

# La Science et le Patrimoine : les Métiers





**Dès la plus haute préhistoire ...**



## **Des ormeaux support de pigments !**

Utilisation de trois types de roches riches en deux oxydes de fer : **hématite** et **goethite**.

Les artisans de l'époque ont produit une poudre colorante soit en débitant puis en broyant ces roches, soit en les abrasant contre des meules en quartzite.

**Grotte de Blombos - 2009**  
**Afrique du Sud**  
**100 000 ans !**

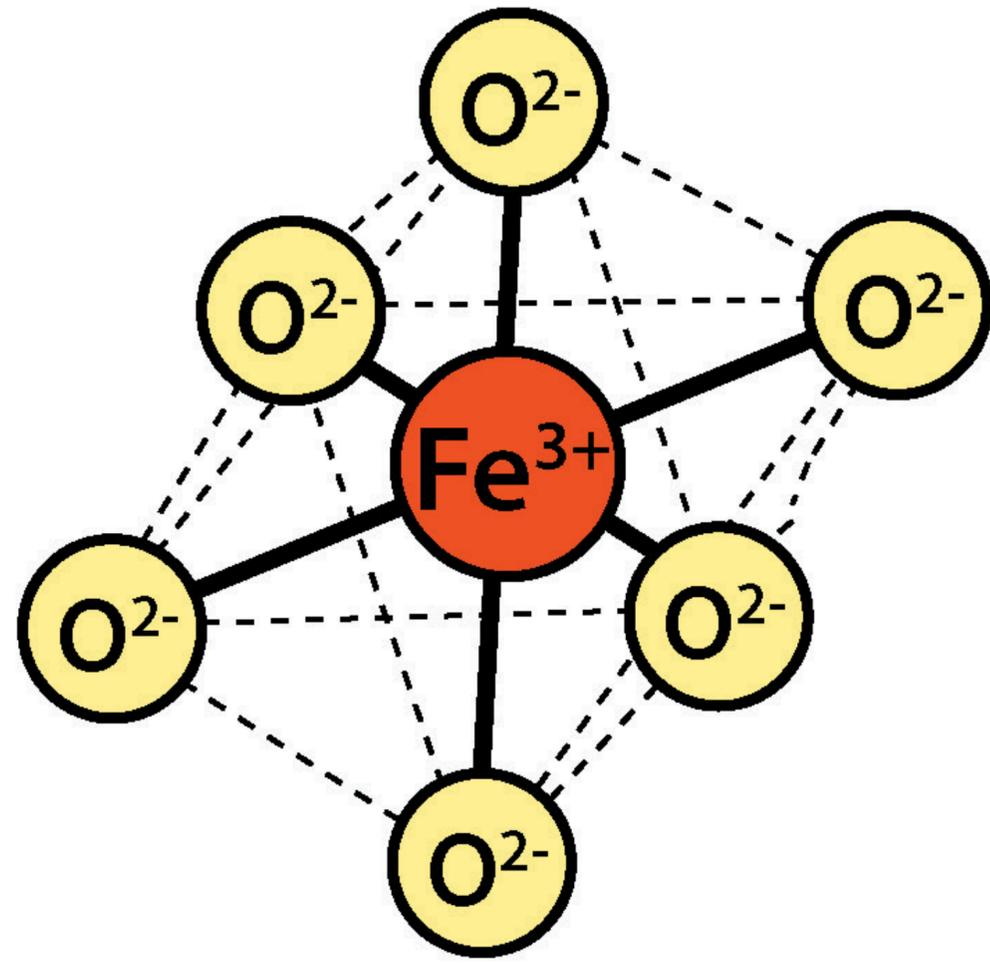
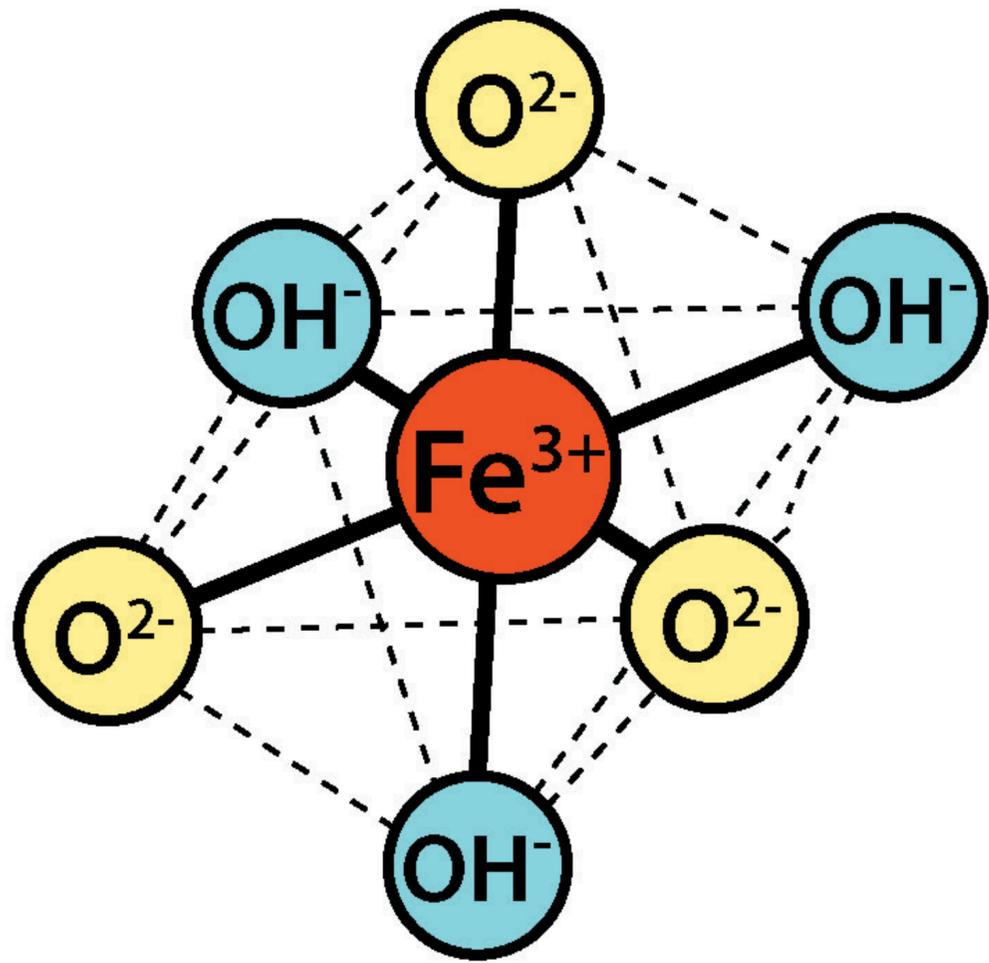
·  
·

**Grotte Chauvet - 1994**  
**36 000 BP**

**Grotte Cosquer - 1985**  
**25 000 BP**

**Grotte de Lascaux - 1940**  
**18 000 BP**

**Grotte d'Altamira - 1876**  
**15 000 BP**



## **1960 - Maladie verte**

CO<sub>2</sub>, Lumière, Température ---> Algues

CO<sub>2</sub> ---> Calcite

André Malraux décide la fermeture de la grotte en 1963

## **2000 - Maladie blanche**

Champignon *Fusarium solani* recouvre les peintures de mycélium avec symbiose avec la bactérie *Pseudomonas fluorescens* qui dégrade le fongicide !

Nécessité d'utilisation d'un antibiotique

**2001 à 2006 -** Epandage de chaux vive sur le sol, traitements par fongicides, antibiotiques et biocides  
Aujourd'hui nettoyage du mycélium tous les quinze jours

## **2007 - Maladie noire**

Tâches noires dues à deux champignons *Ochroconis lascauxensis* et *Ochroconis anomala* qui se nourrissent des composés organiques des traitement précédents !

**2010 -** Yves Coppens est nommé président du comité de surveillance de la grotte

**2011 -** Parution des actes sur les travaux de 74 spécialistes de tous pays sur la conservation en milieu souterrain

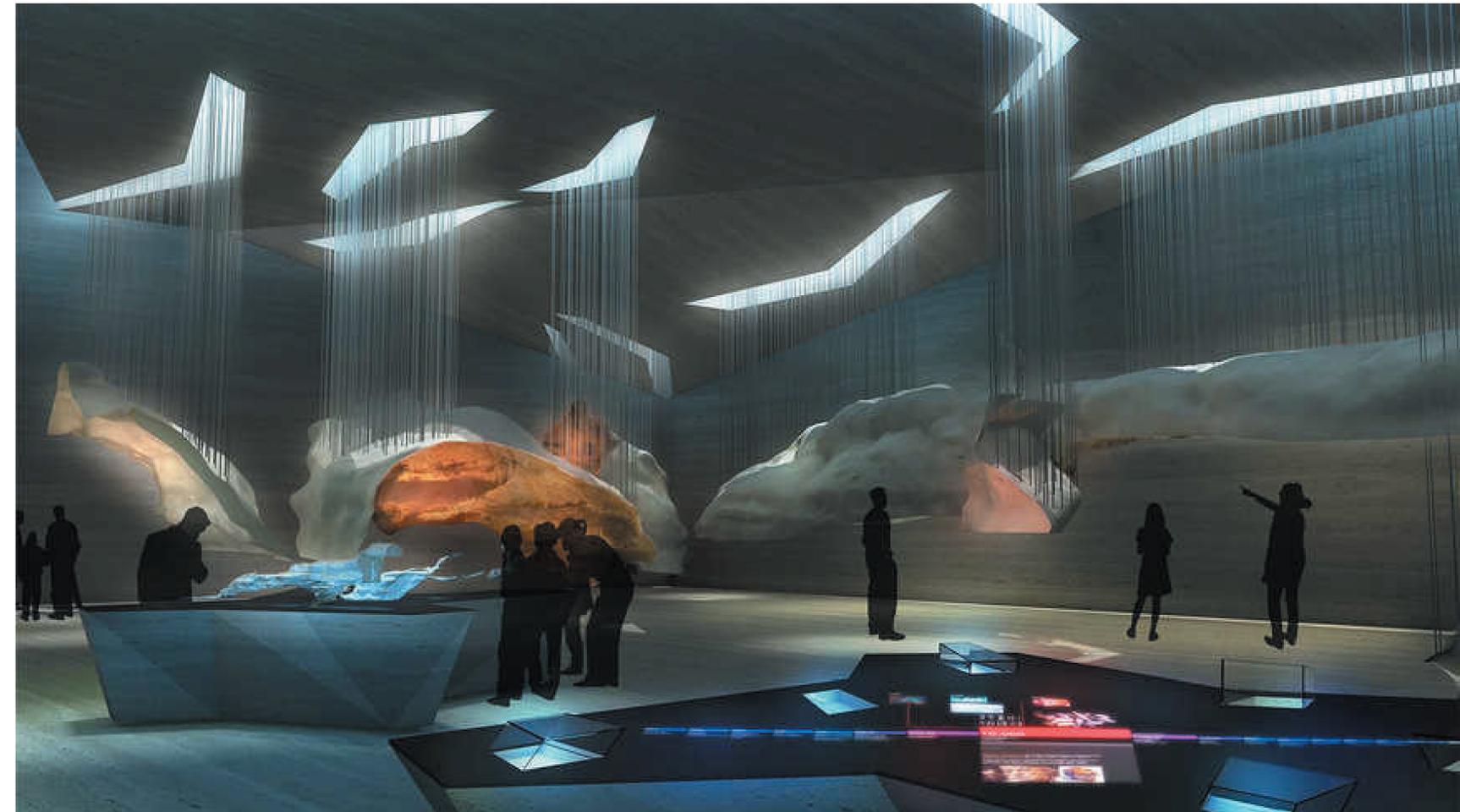


**Lascaux  
malade !**



# Lascaux 4 (Déc 2016)

Le Centre International  
d'Art Pariétal de Montignac



Réalisation de la société norvégienne Snohetta  
(opéra d'Oslo, bibliothèque d'Alexandrie, ...)



**Scanner 3D**

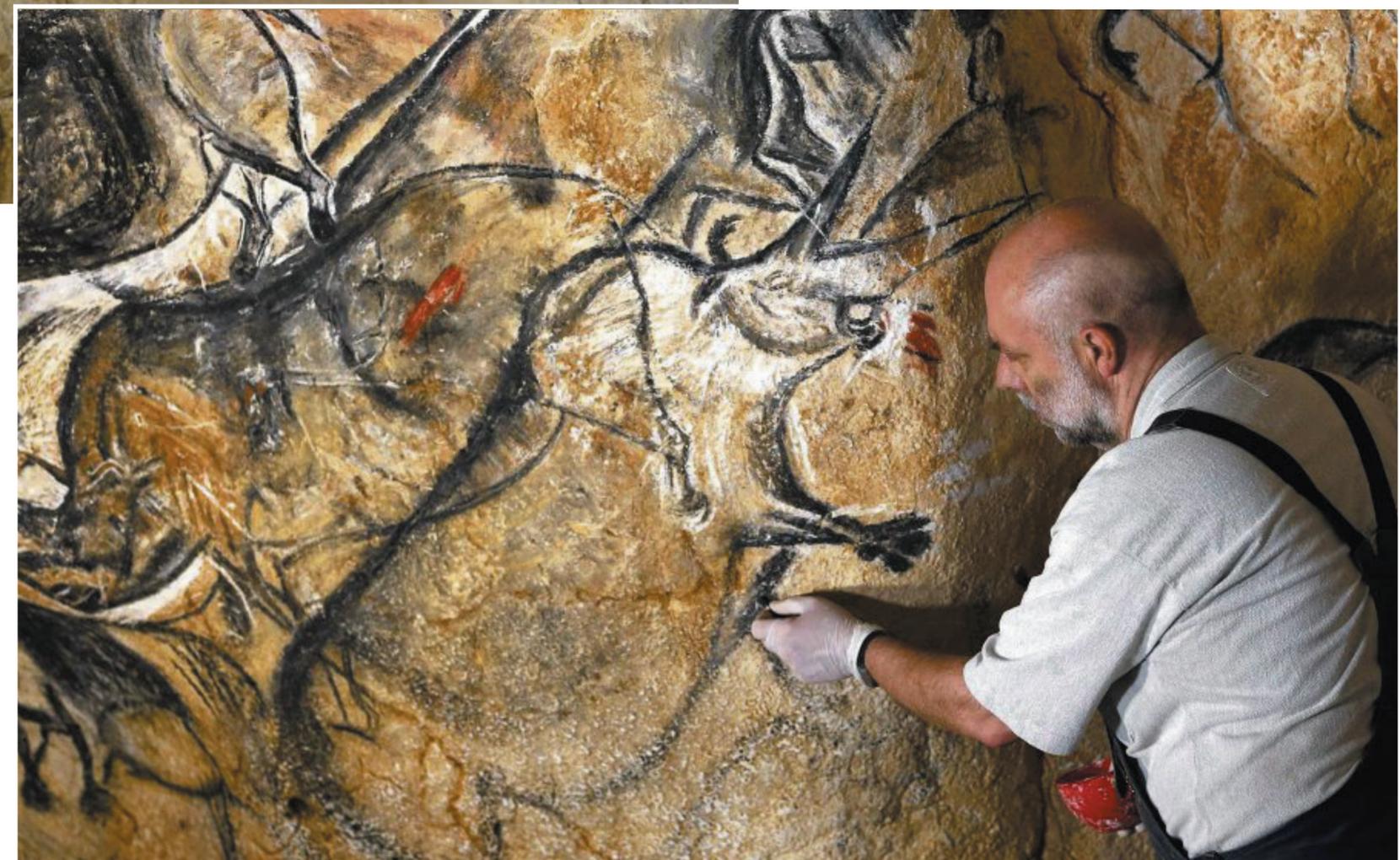


**Réplique Caverne du Pont-d'Arc 2012-2015**





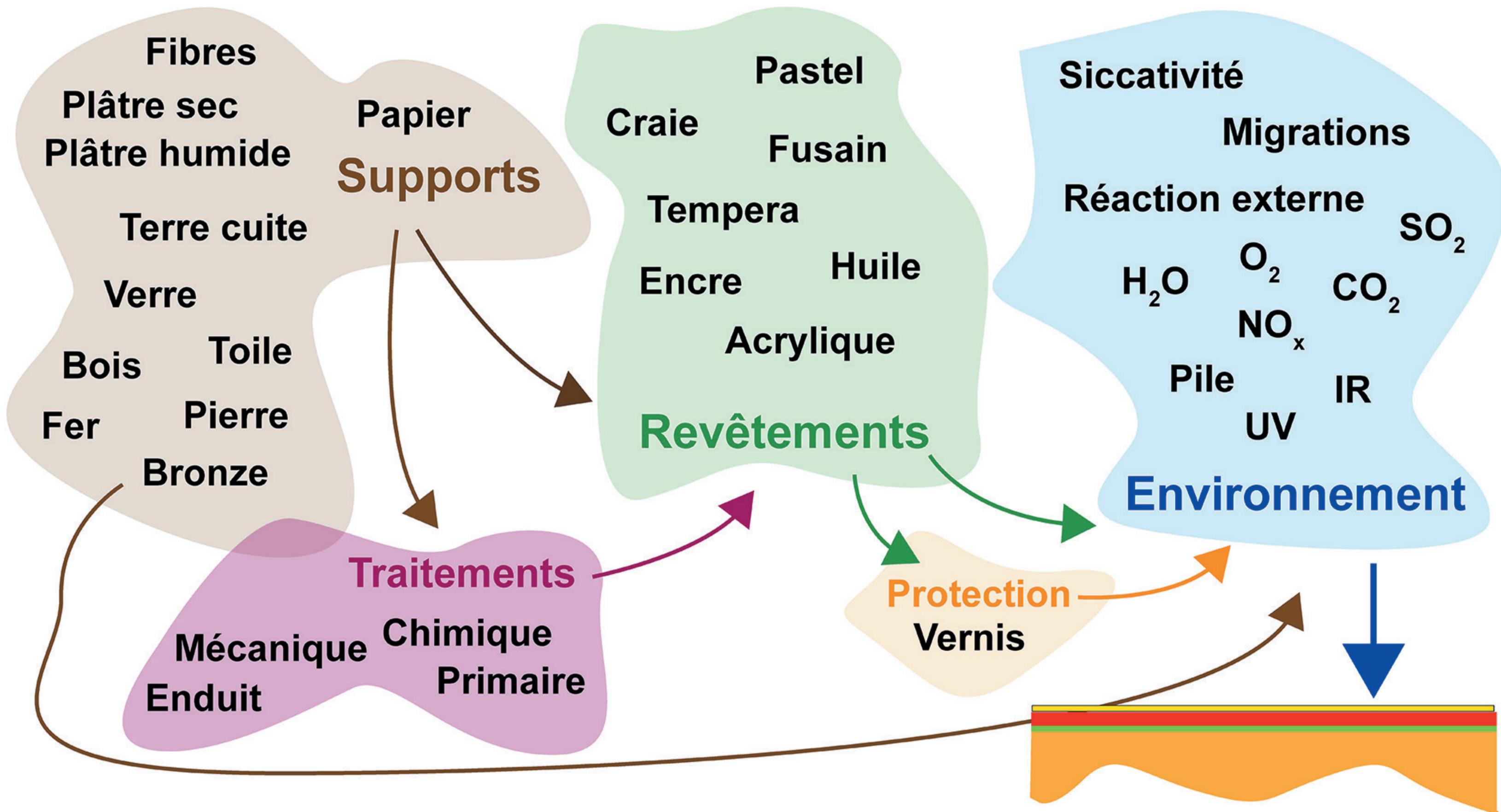
**Gilles Tosello (b.1956)**  
**diplomé en art graphique**  
**docteur en préhistoire**



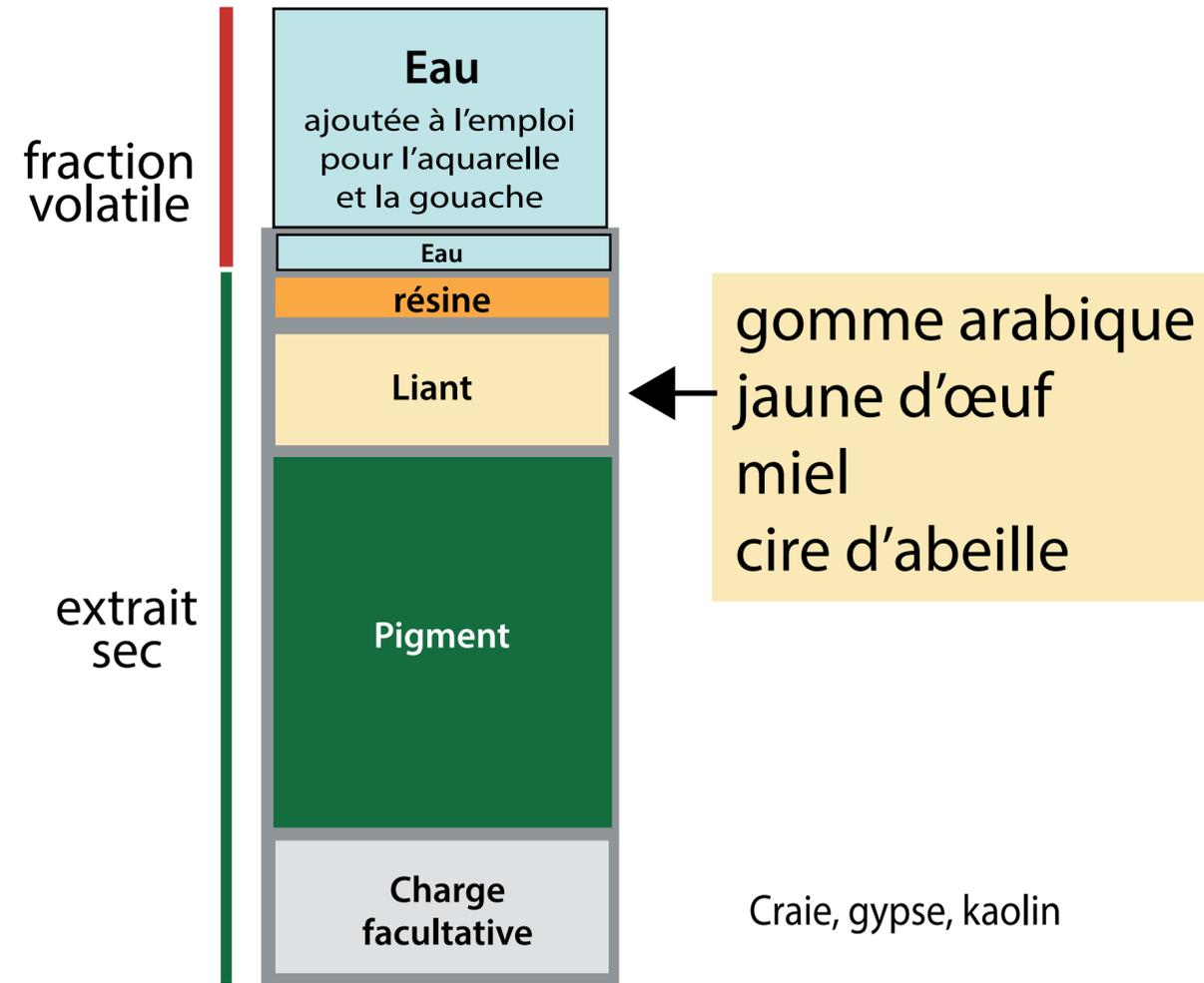


# Les tombes égyptiennes

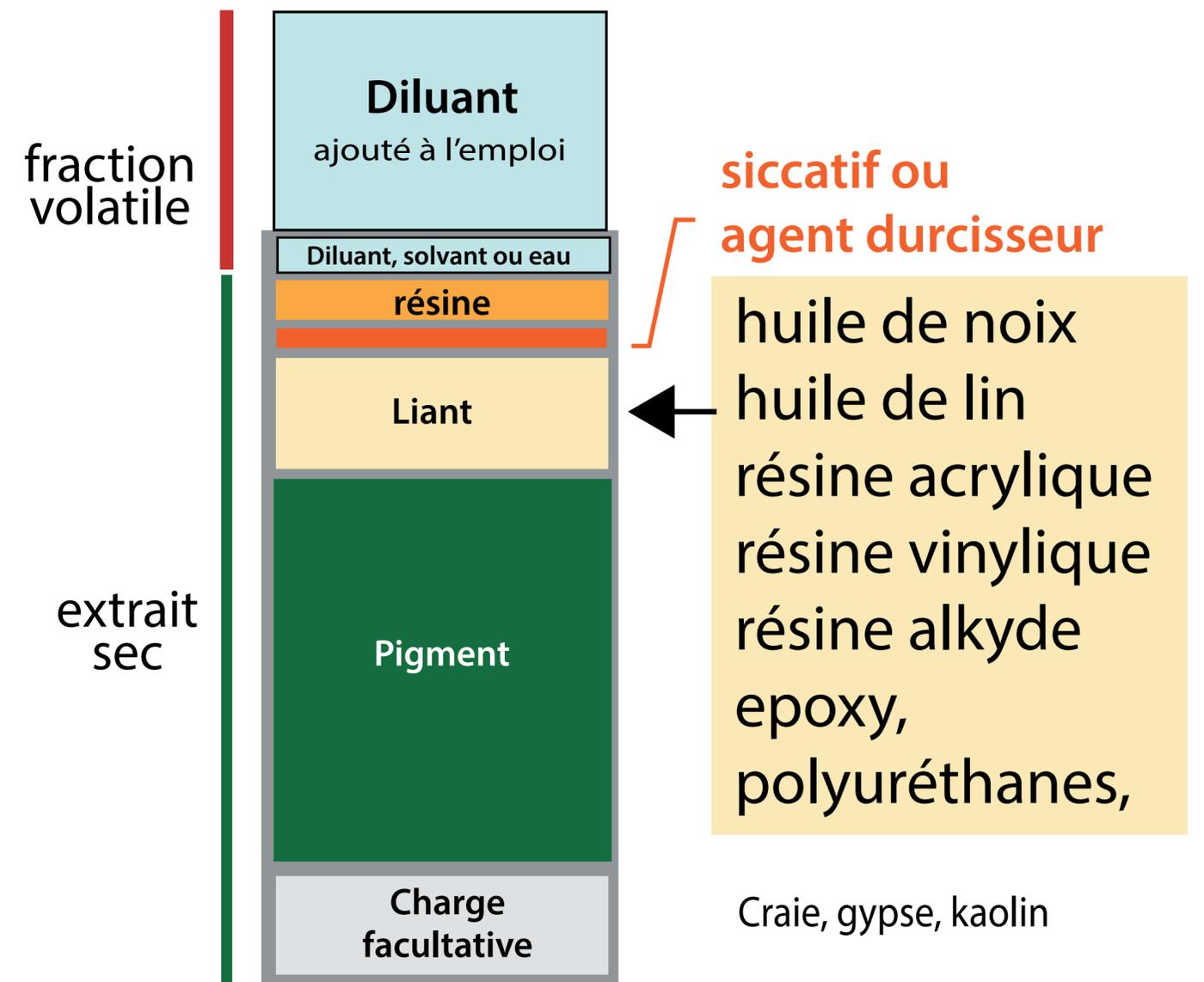




## Tempera - Aquarelle - Gouache - Craie - Pastel



## Peinture huile ou acrylique



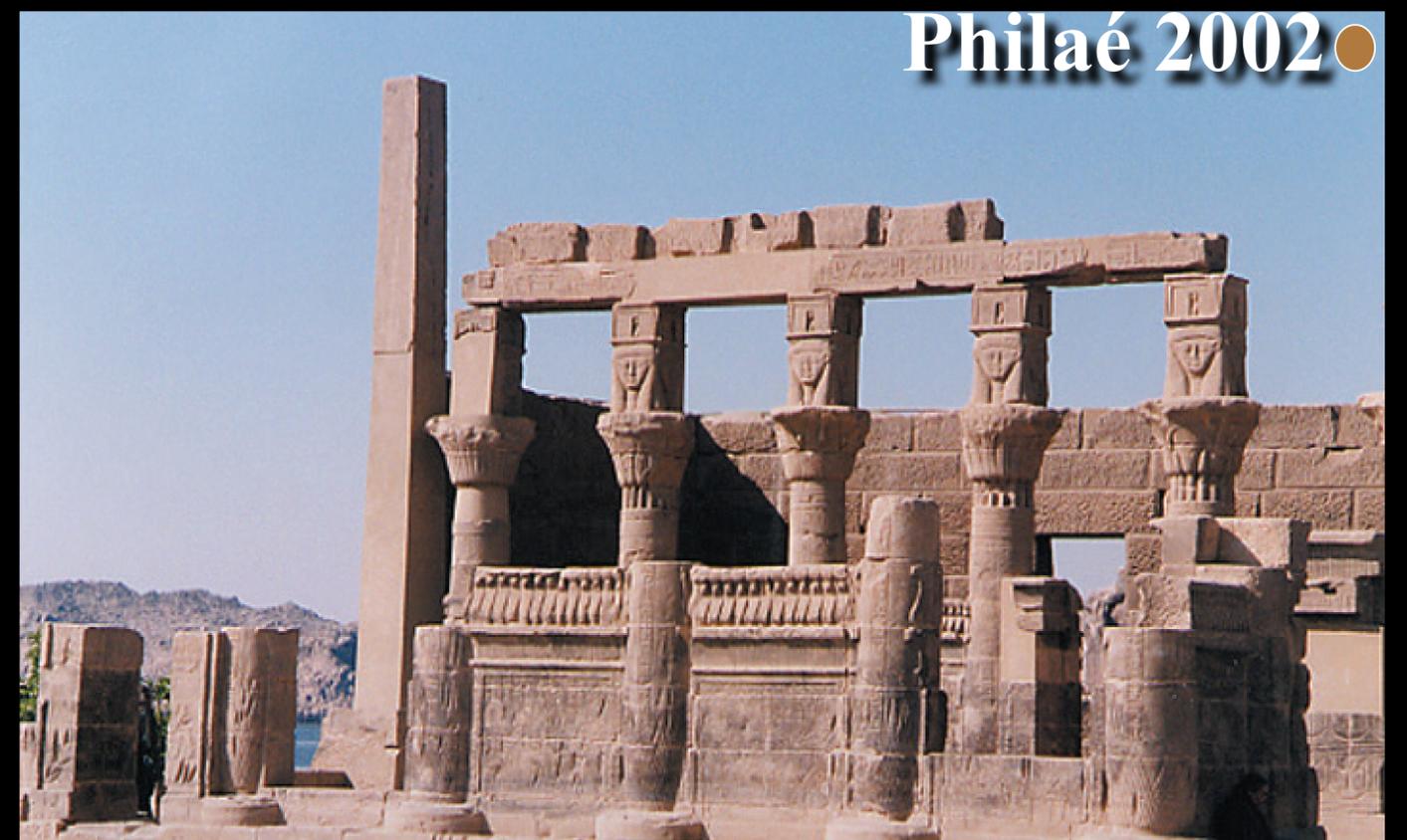
**Conservation par l'absence de lumière, d'humidité,  
d'atmosphère agressive et protection contre l'érosion**



**Vassil Dobrev et la  
tombe de Haou-Neffert**

# LES MONUMENTS







**Temple d'Hera à Agrigente**  
**Sicile, 450BC**

photos 2006





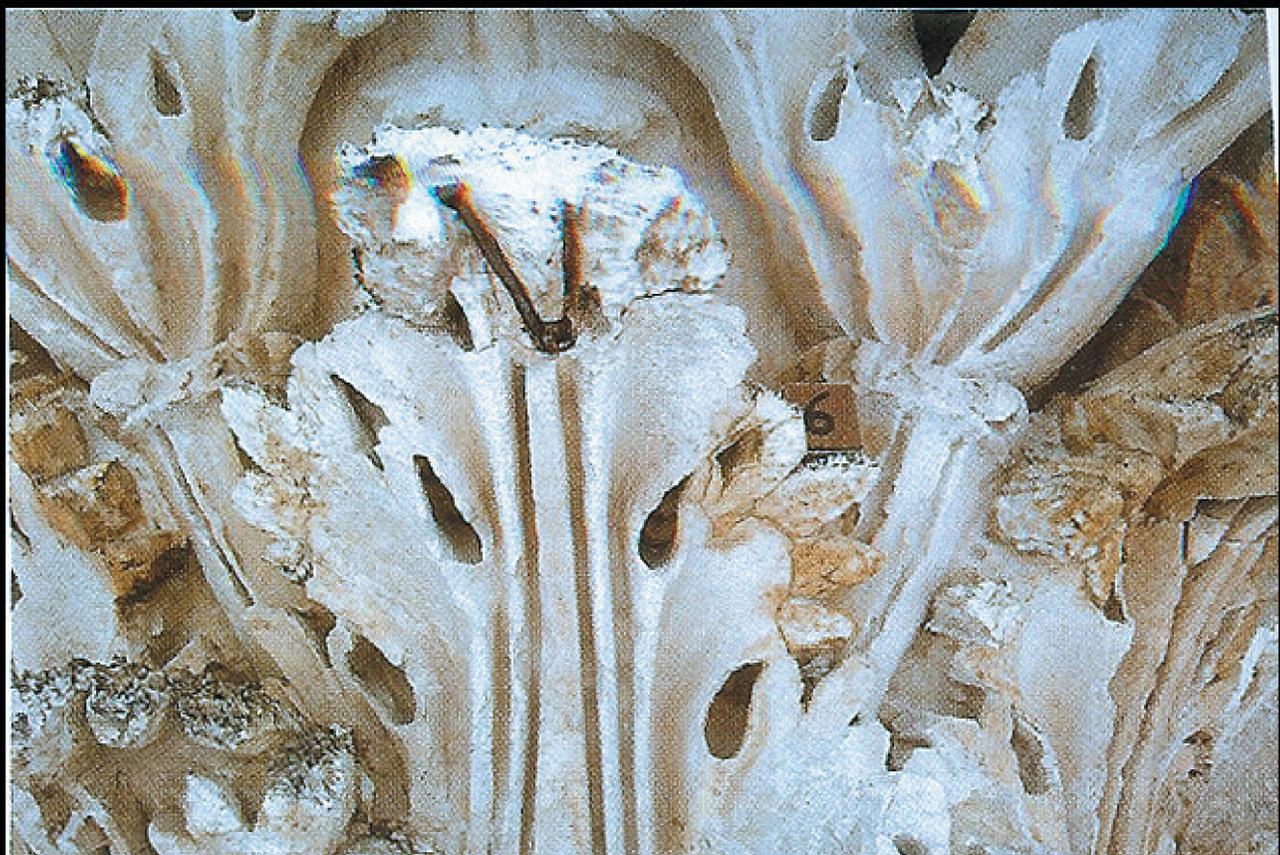
**Temple de la Concorde  
Agrigente, Sicile  
430BC**





Maison Carrée de Nîmes

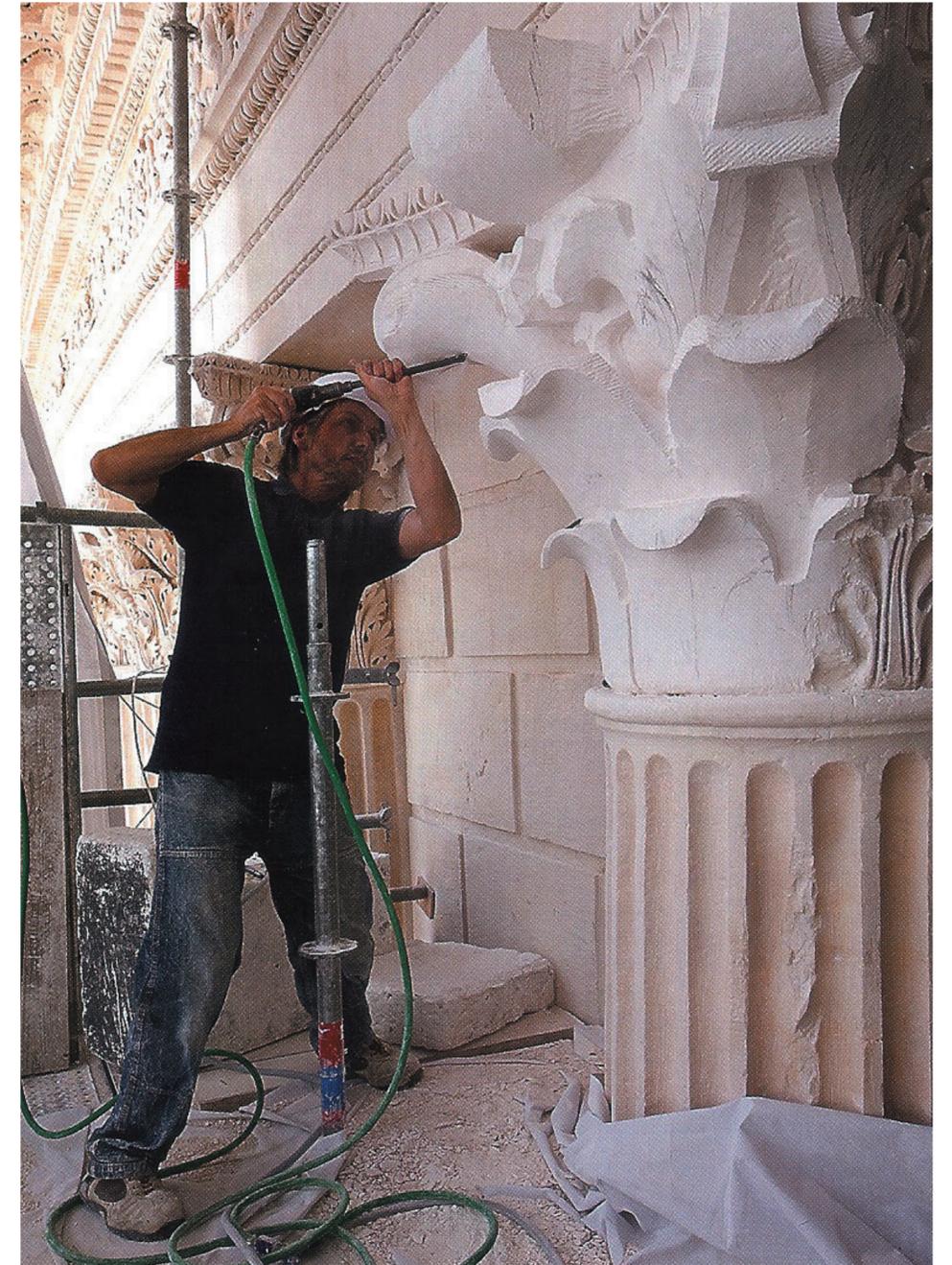
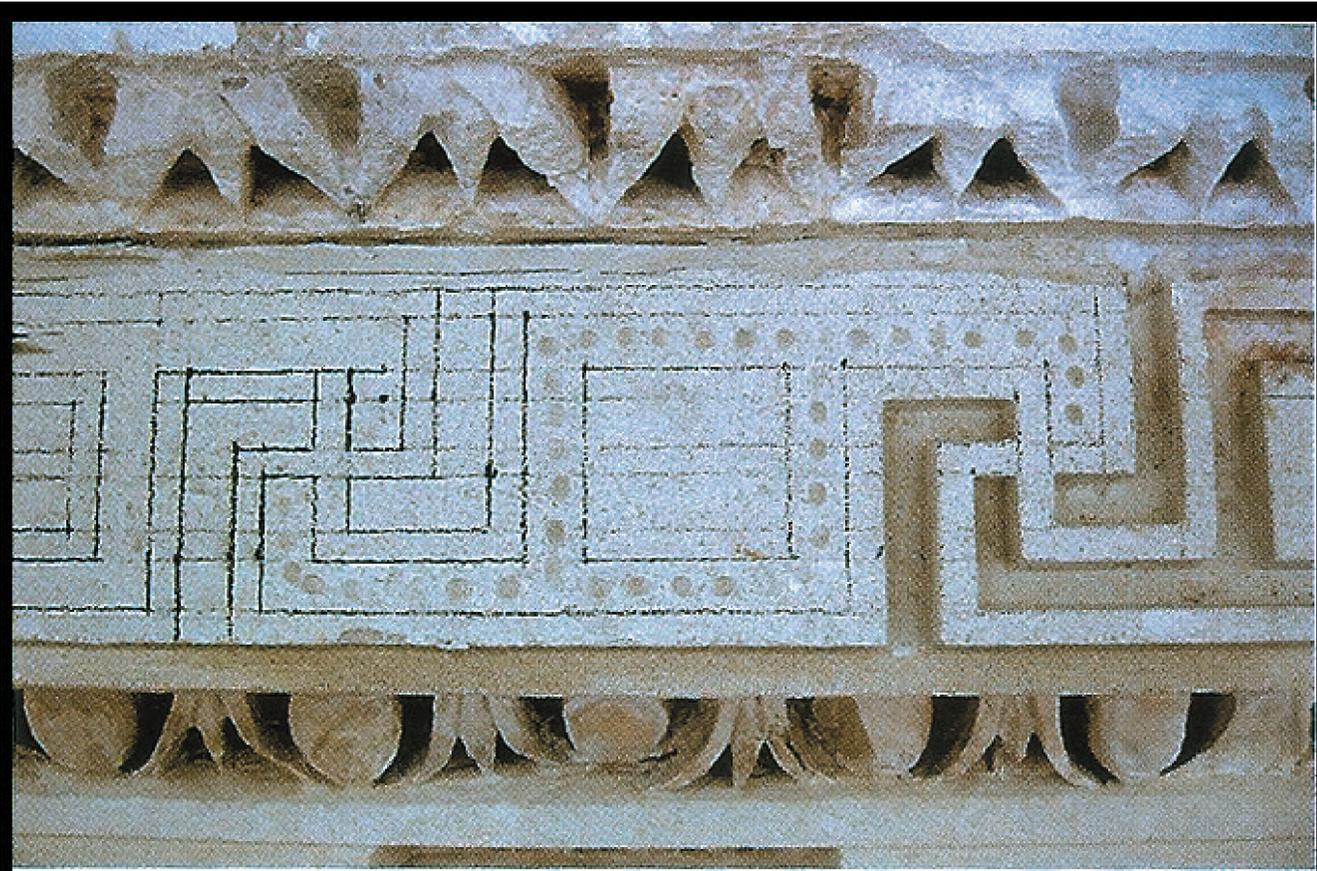
**SURFACES EXTÉRIEURES**  
**Façades, ornements, bas-reliefs, statues**



# Maison carrée de Nîmes

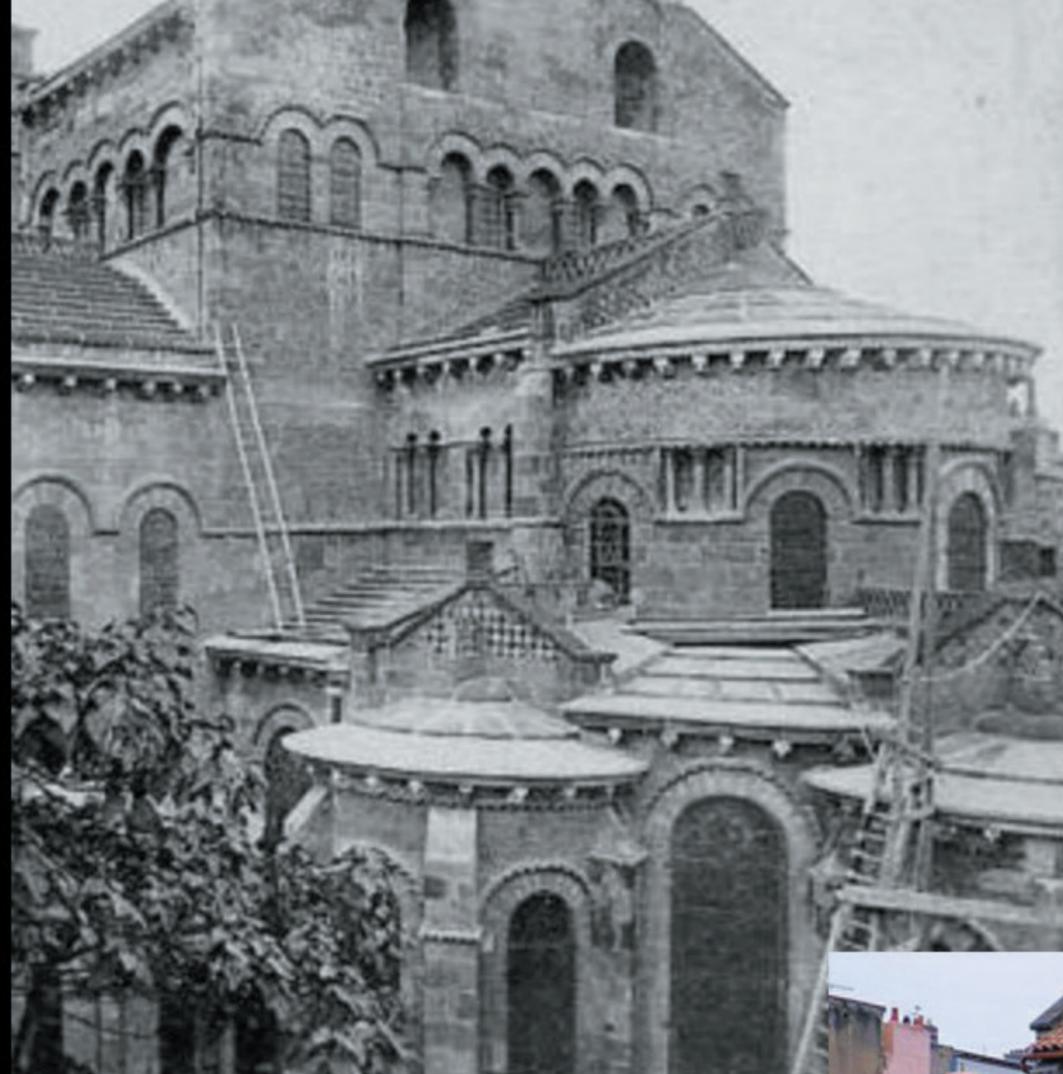
- Passage fraise carbure de tungstène (!)
- Minisablage **billes de verre** 50  $\mu\text{m}$  - 0,8 bar - buse 2 mm
- Minisablage **poudre de corindon** 29  $\mu\text{m}$  - buse 0,8 mm
- Ponctuellement passage au **laser 1064 nm**
- Injection fissures par **mortier hydraulique** sans sel soluble
- Parties désolidarisées collées par **époxy bicomposant**
- Stucage avec mortier de poudre de **Pierre de Lens (Gard)**
- Les éléments de plâtre des restaurations passées sont renforcés par une **résine acrylique**
- Chevilles bois et clous en fer remplacés par **acier inox**
- Ancien badigeon parcellaire conservé sous le **lait de chaux** de l'harmonisation générale (destiné à la formation d'une patine de protection)

# Maison carrée de Nîmes



- Si besoin  
on reconstruit !

Oui, mais ...

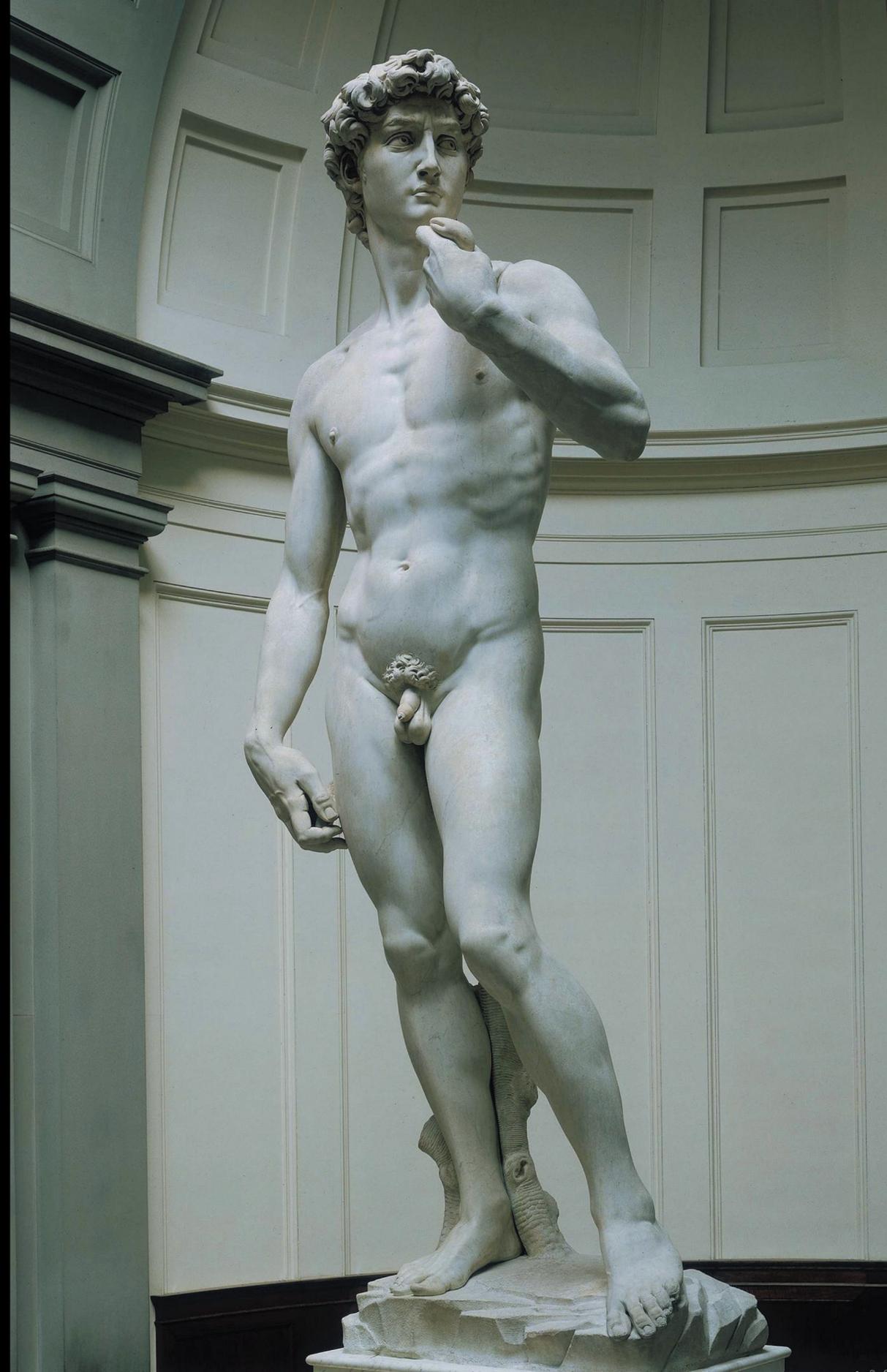


Notre Dame-du-Port

Retour à la tuile canal

Aymon Mallay  
vers 1860  
dalles de lave





**DAVID**

**Michel-Ange**

**1501-1504, 4m34 en marbre blanc  
de Carrare**

**1527, bras gauche brisé en trois**

**1543, restauration du bras**

**1808-1815, passage de cire d'abeille**

**1843, passage à l'HCl 50%**

**avec ... perte de la patine !**

**1873, déplacé de la Piazza della  
Signoria (palazzo Vecchio) à la  
Galleria dell'Accademia, Florence**



# **Chevaux de Marly** par **Guillaume Coustou** en **1745**

**Marbre blanc de Carrare**

**Entrée du parc du Château de Marly**

1794, transférés Place de la Concorde

1840, restauration par Caillouette

1984, empreinte moule (**silicone R-P**,  
alcool polyvinylique) par Michel  
Bourbon et coulage (**poudre de marbre**,  
silice, résines)

1985, originaux cour Marly du Musée  
du Louvre; copies Place de la Concorde  
et parc de Marly

# Utilisation d'un enduit pelable



# Dissolution et Extraction



**Lessivage**

**Electro-lessivage**

**Lavage sous pression**

**Compresses**



## **Abrasion et Ablation**

### **Gommage**

**fragments de rafles de maïs,  
de coquilles de noix  
ou noyaux d'abricots**

### **Microsablage (sec ou hydro)**

**sables divers, corindon, ...**

### **Cryogénisation**

**pellets ou nuggets de CO<sub>2</sub>**

### **Laser**

**longueur d'ondes diverses**

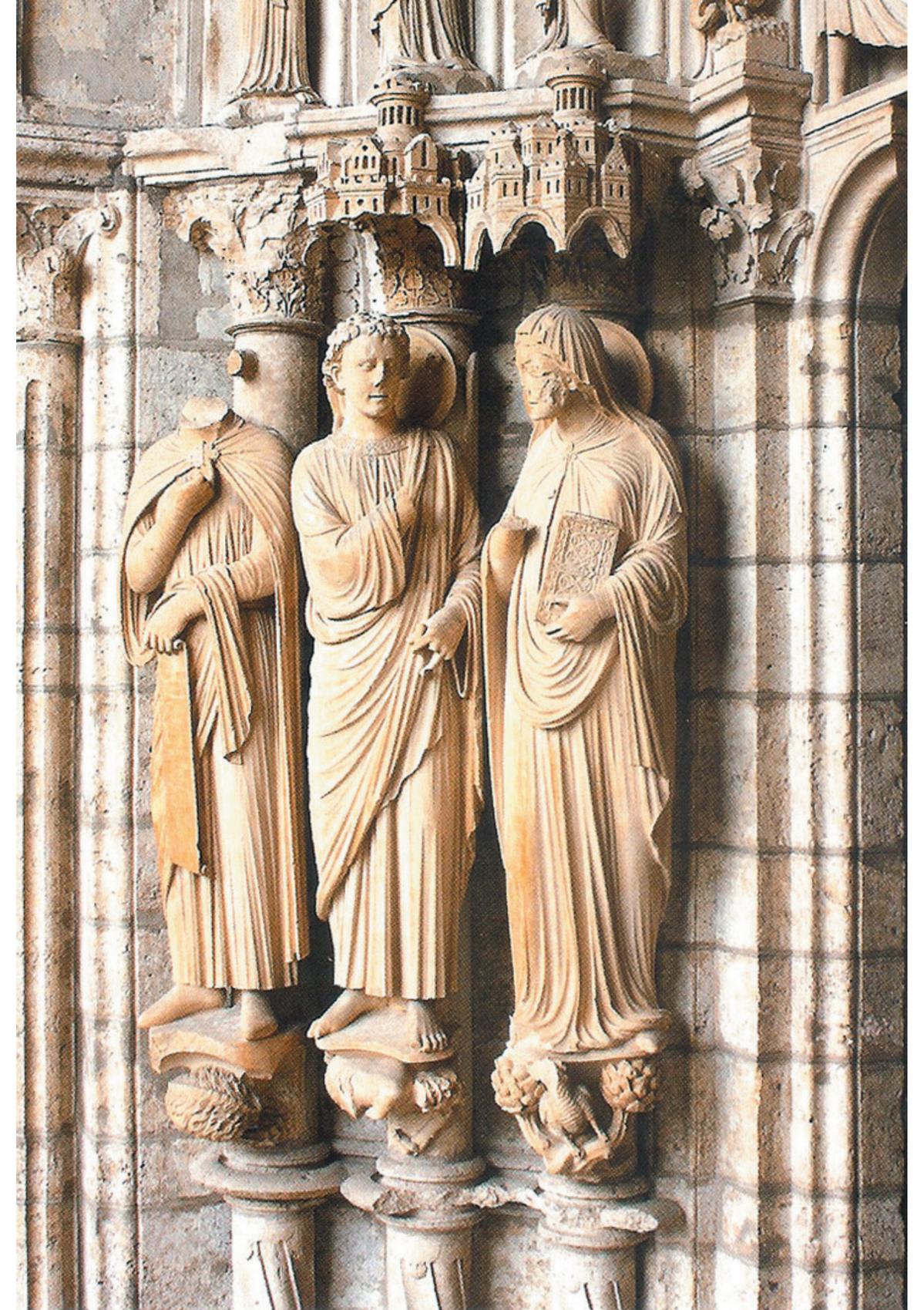
# Utilisation du LASER

**Le laser n'utilise que de l'énergie lumineuse, sans eau (nébulisation, compresses), sans produits chimiques (bases, acides, complexants), sans particules abrasives (micro-abrasion) et sans pression.**

**Il est ainsi possible de nettoyer des croûtes noires indurées sans renforcement préalable sur des surfaces fragiles, écaillées, pulvérulentes, prêtes à tomber.**

**Le laser n'agit pas sur**

- les recouvrements biologiques,**
- les poussières meubles**
- les taches d'imprégnation (encre, graffiti)**



**Jaunissement de la pierre traitée**



**algues, champignons,  
lichens,**



**insectes, moisissures,  
bactéries,**



**Altération des supports colonisés par**

- phénomène de rétention d'eau
- production d'acides organiques
- formation de patines par oxalates
- mécanique d'accrochages sur les supports

## **Traitements et précautions à prendre**

- élimination mécanique des recouvrements
- traitements chimiques de désinfection par un algicide\* (ammonium quaternaire\*\*)

\*jamais d'eau de javel sur un support poreux

\*\* incompatibles avec les produits hydrofuges



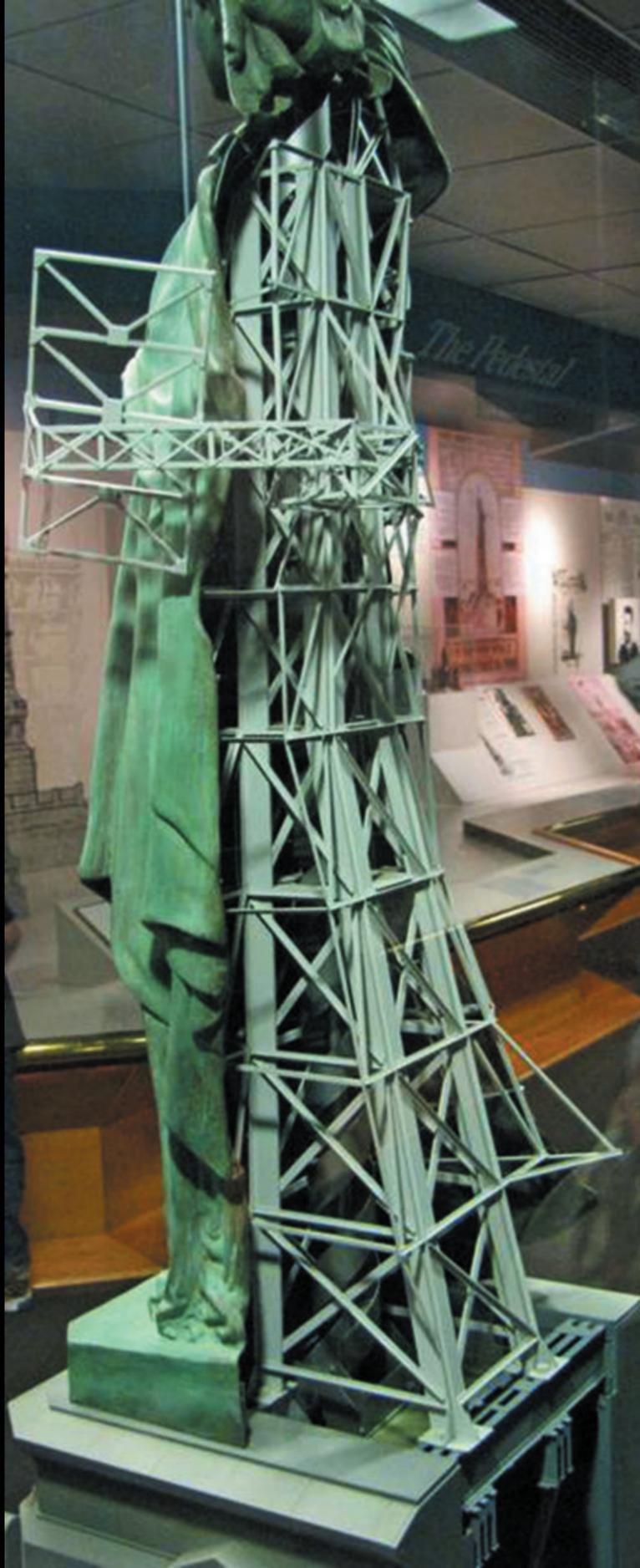
**Bronze avec patine vert-de-gris**  
(carbonate, sulfate, chlorure et acétate de Cu)



**La statue de la Liberté  
a été inaugurée en 1886**

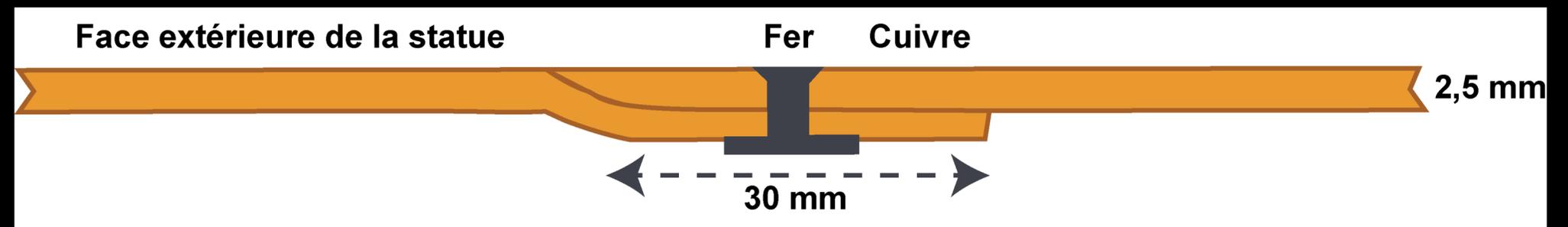
**La torche a été remplacée  
en 1916 puis en 1986**

**La flamme est revêtue de feuilles d'or.**



# La statue de la Liberté

L'armature fer (1350 pièces) détériorée par **corrosion galvanique** (contact avec le cuivre) a été remplacée par de l'acier inox et isolée de la « peau » par du téflon.





# **L'Acier Corten**

**Acier auquel on a  
ajouté un certain  
nombre d'éléments :  
phosphore,  
cuivre,  
chrome,  
nickel,  
molybdène**

**Acier patinable ou auto-patinable. La passivation n'est pas atteinte à la livraison et évolue en fonction du lessivage et de l'exposition à la lumière, ...**



**«MONUMENTVM», inox (1998)  
par Anne et Patrick Poirier  
Centre Luigi Pecci à Prato près de Florence**



**« La colonne brisée »  
Aire des Suchère  
A89, béton armé  
(1984)**







Mésopotamie  
Suse, Babylone, ...  
Briques glaçurées  
6000 BC



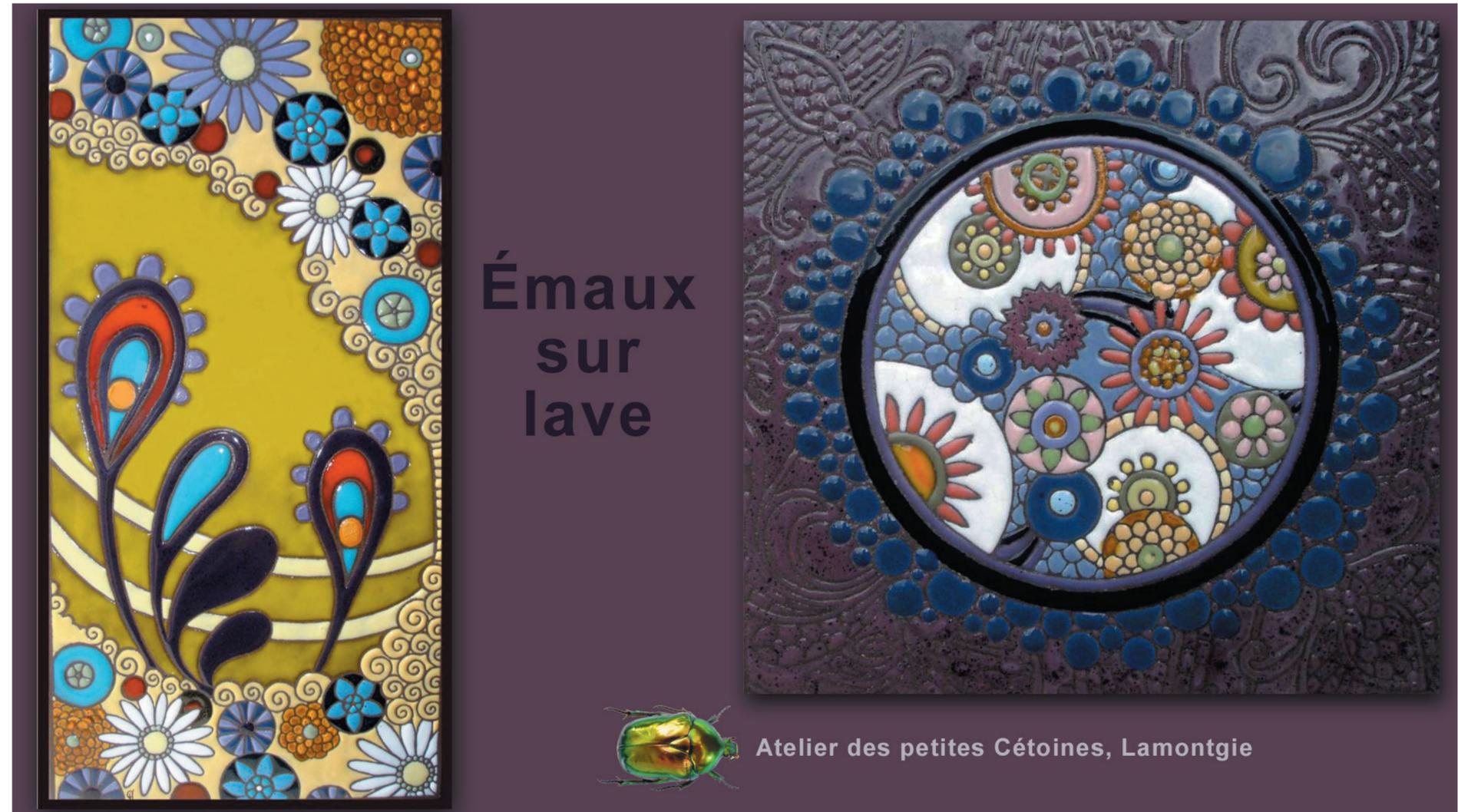
# LAVE ÉMAILLÉE



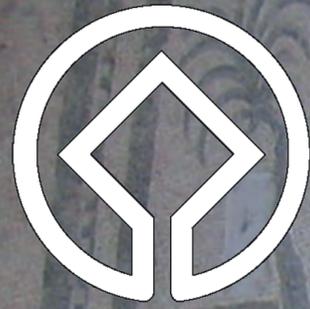
**A Paris, une plaque de la rue Saint-Louis-en-l'île, est en parfait état depuis ... 1828 !**

**Michelin produit des plaques dès 1908 et des bornes de 1928 à 1971.**

**Tables d'orientation, laboratoires, cuisines, ...**



Atelier des petites Cétoines, Lamontgie



# Villa Casale, Sicile, III<sup>e</sup> siècle, 3500 m<sup>2</sup>



# Site de Jerash, Jordanie, IV<sup>e</sup> siècle



# Champlevé mosan, Meuse, XII<sup>e</sup> siècle

Incrustation d'émail dans  
des cavités faites  
sur cuivre, laiton,  
or, vermeil



# PASTEL



- pigments +
- sec (craie, kaolin, gomme)
- gras (huile + cire)

Jean Siméon Chardin (1699-1779)



**Zaria  
Forman**

«Greenland #63»

Pastel tendre  
sur papier  
50''x75''  
2013







## **Autres détrempe**

### **Aquarelle**

**Transparente**

**sur sec ou sur mouillé**

**Aucun droit à l'erreur !**

### **Gouache**

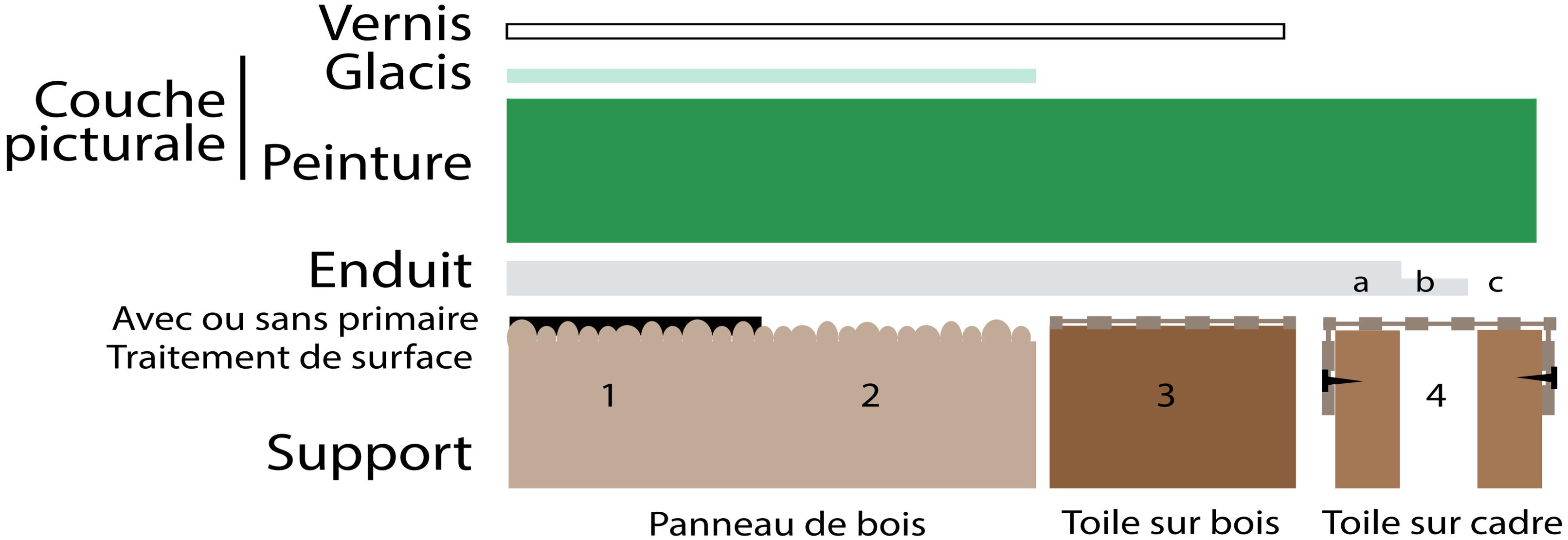
**Opaque**

**car plus chargée**

**Peut se retravailler**

**Fixatif conseillé**

# Stratigraphie d'une peinture de chevalet



Où il est question de vernis



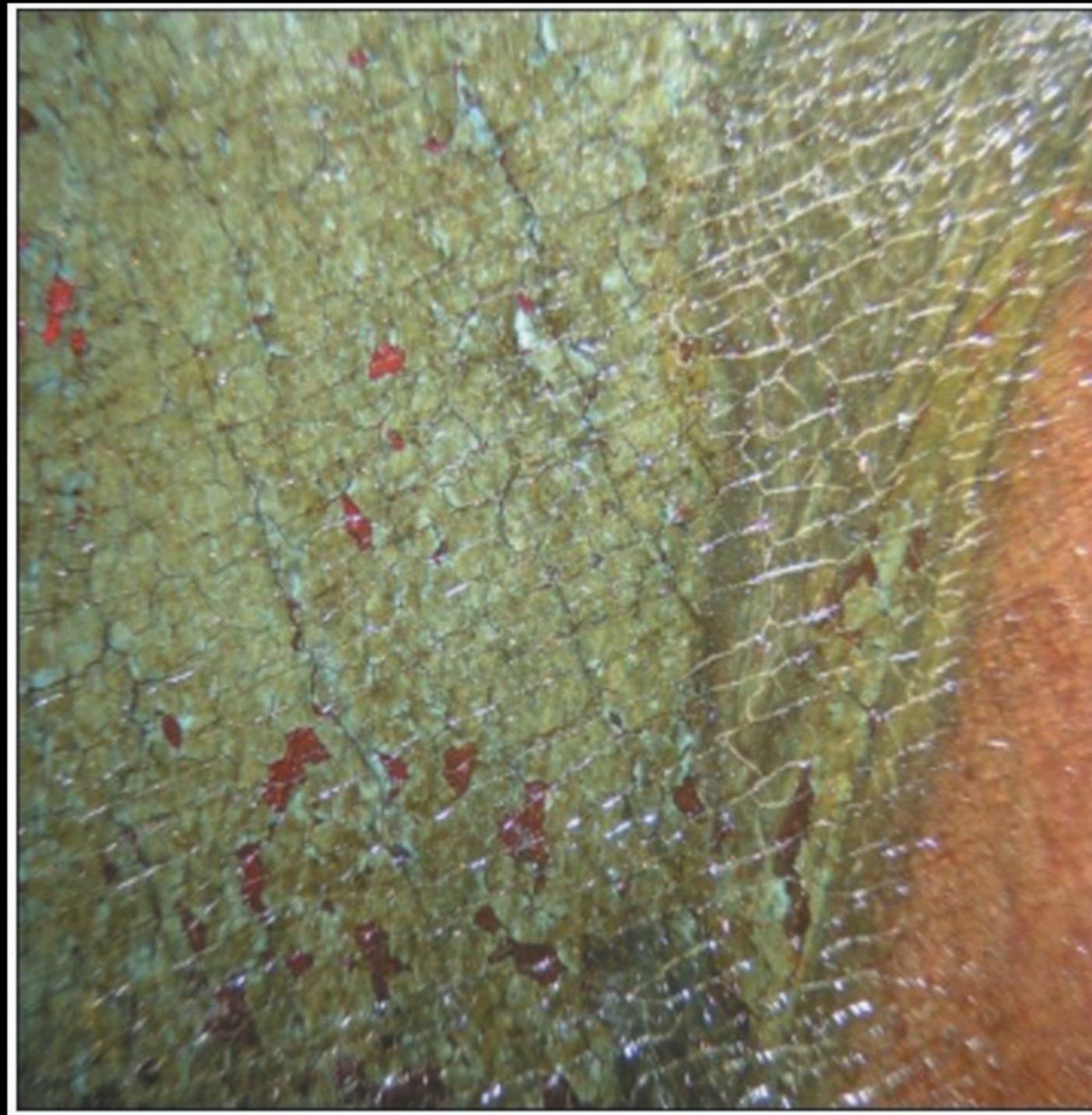
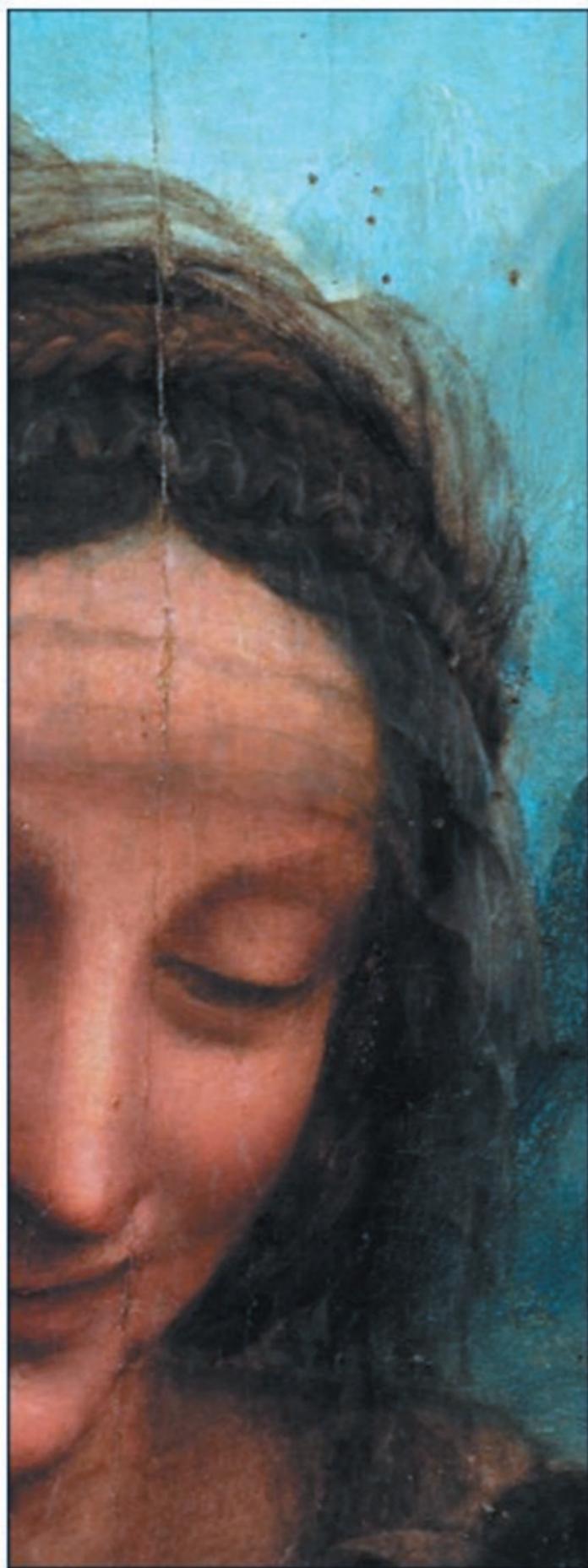
**« Un port en Italie »  
Johannes Lingelbach  
1622-1674**



**Sainte-Anne par Léonard de Vinci  
1501-1519 huile sur bois 168x130 cm  
Rénovation 2010-2012  
dirigée par Cinzia Pasquali  
avec le C2RMF**



**Cartographie des repeints**



**Nettoyage avec un mélange  
éther de pétrole-éthanol**

« Les Noces de Cana » - Véronèse, 1563 - (6,8 x 9,9 m - Louvres)





**Repeint ?**

**Repentir ?**

**Avant-Après  
la Restauration  
de 1992**

**1797 - Découpage en 7 lés de San Gorgio Maggiore**

**1798 - Installation au Louvre**

**1870 - à l'abri à Brest**

**1939 - à l'abri à l'abbaye de Loc-Dieu (Aveyron)**

**1942 - Retour au Louvre**

**1990-92 - Restauration in situ**



**« Les noces de Cana »  
par Véronèse en 1563**



**2007 - Copie numérique par Arte Factum installée  
au réfectoire de San Giorgio Maggiore à Venise**

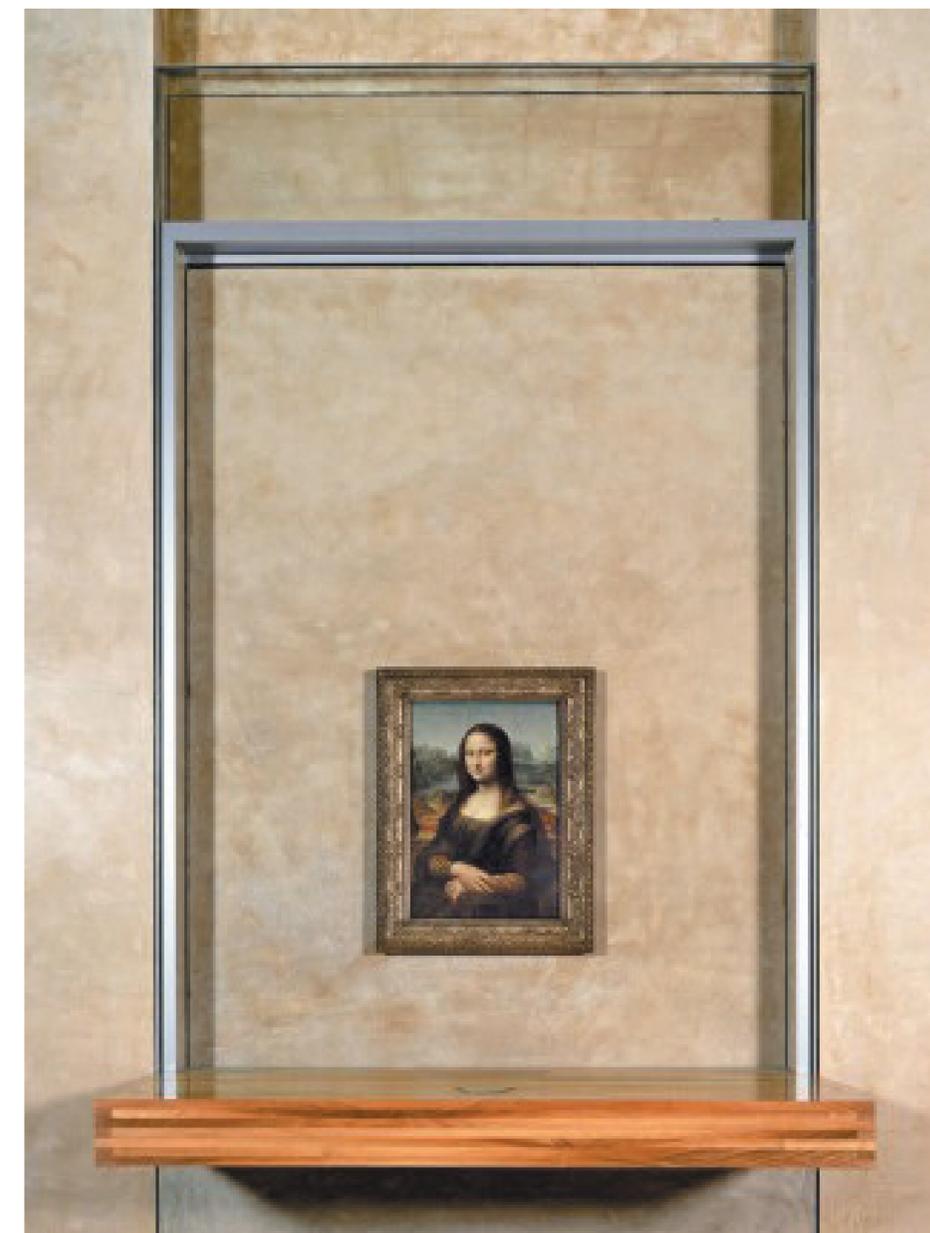
**Pigments déposés par une imprimante 3D  
sur une toile enduite**



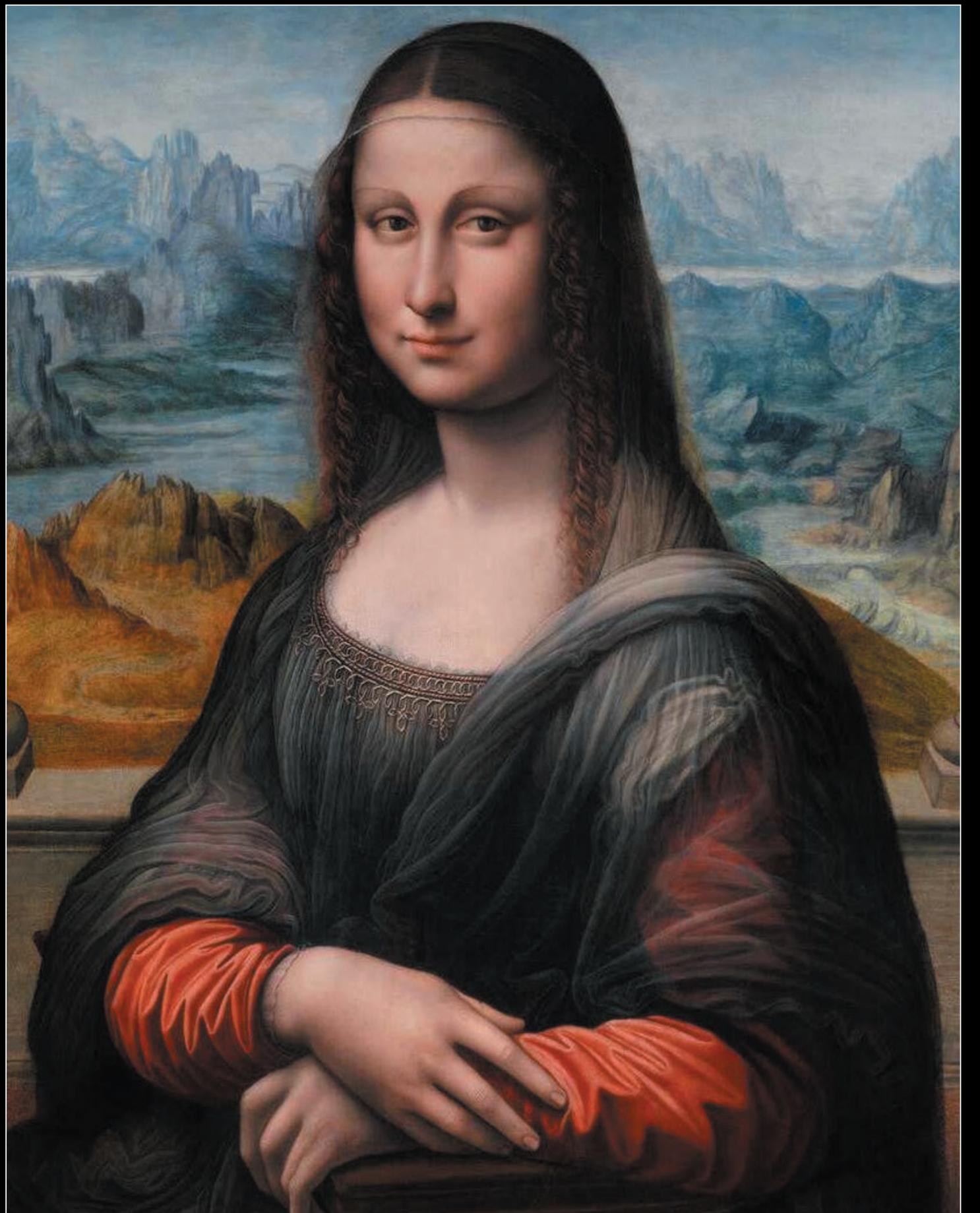
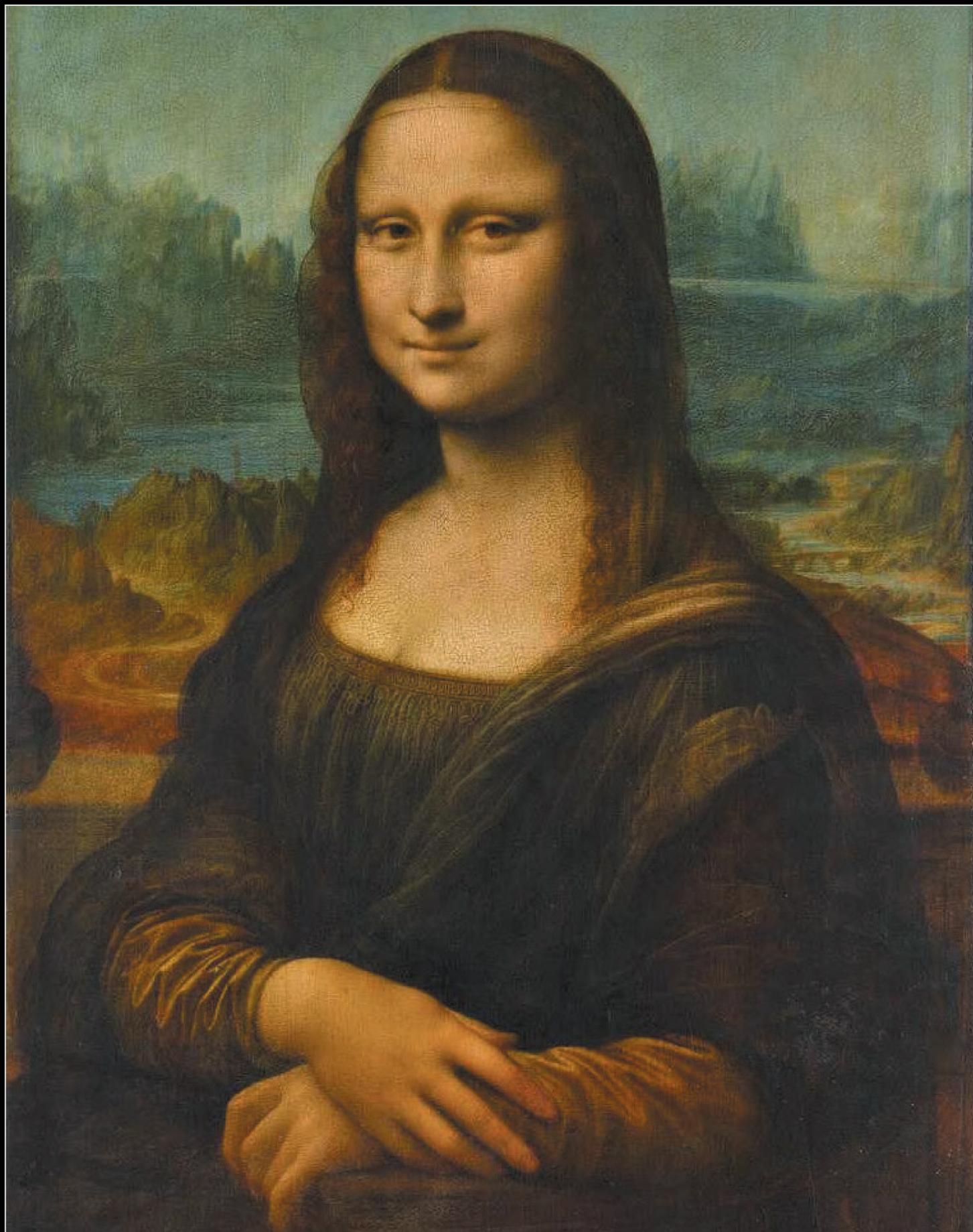
**« La Joconde »**

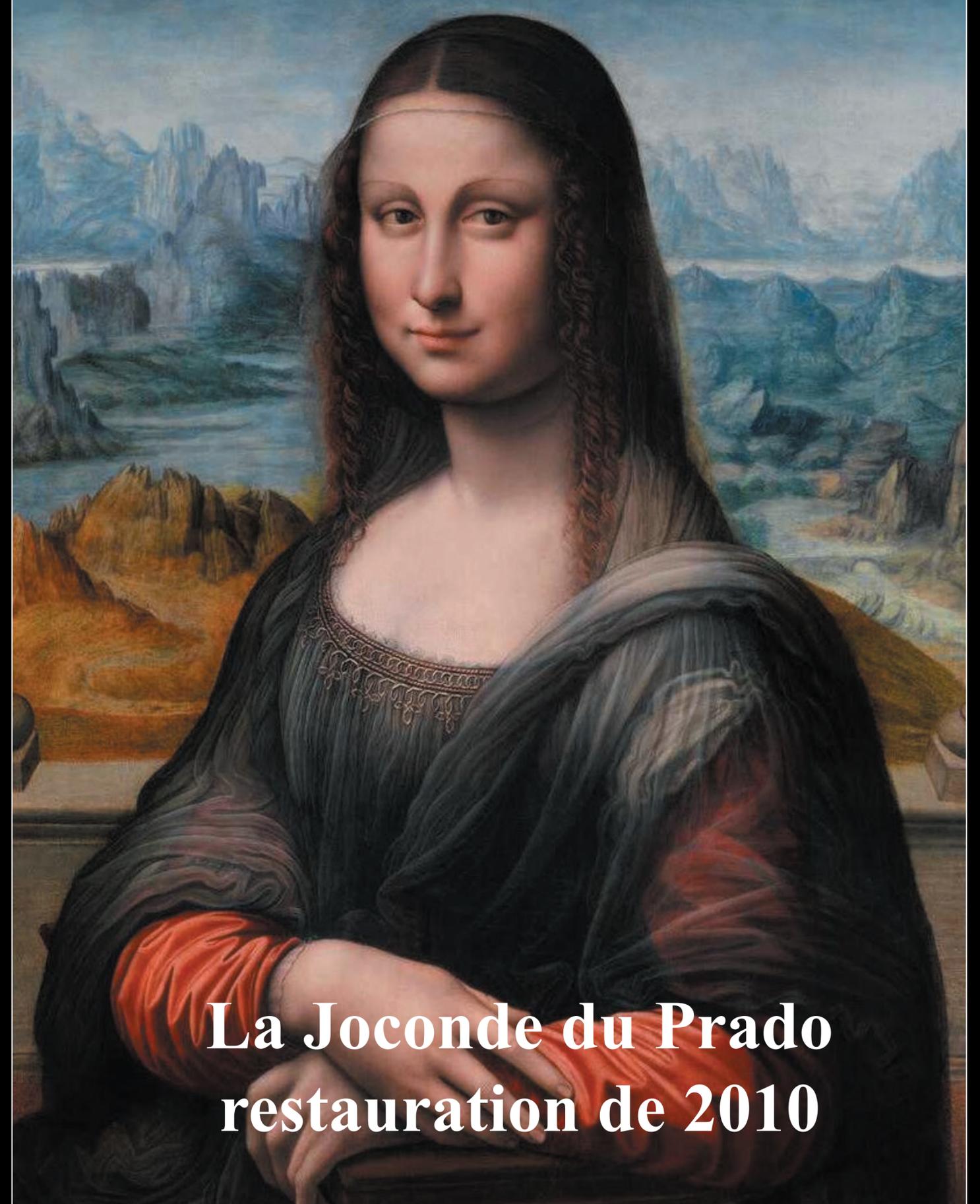
**Salle des États**

**Six millions de  
visiteurs/an**



**Depuis 2005 : Vitrine blindée;  $l = 220$  cm;  $p = 60$  cm;  $h = 460$  cm ;  
Vitrage antireflet feuilleté verre-PolyVinyl Butyral;  
2 systèmes différents de stabilisation de l'humidité.  
installation par le Laboratoire muséotechnique Goppion de Milan**





# Radiographie





**Analyse en  
lumière rasante  
révélant le réseau  
des craquelures**

**Causes multiples**  
- séchage perturbé  
- choix des diluants  
- choix de pigments  
- durcissements et  
rétractations de la  
couche picturale



Fluorescence UV

350-380 nm

Fluorescence sous UV - Photographie dans le visible

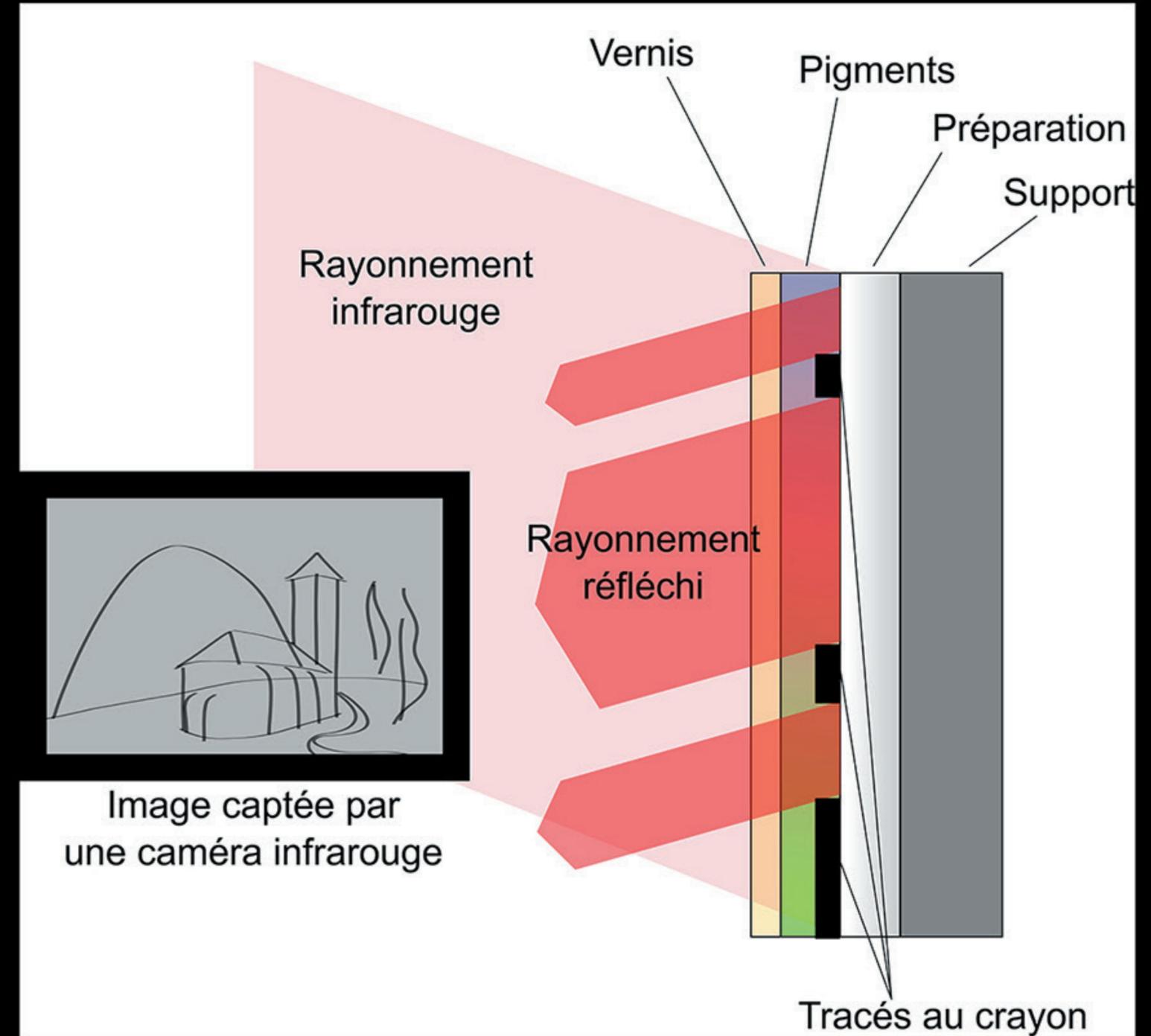
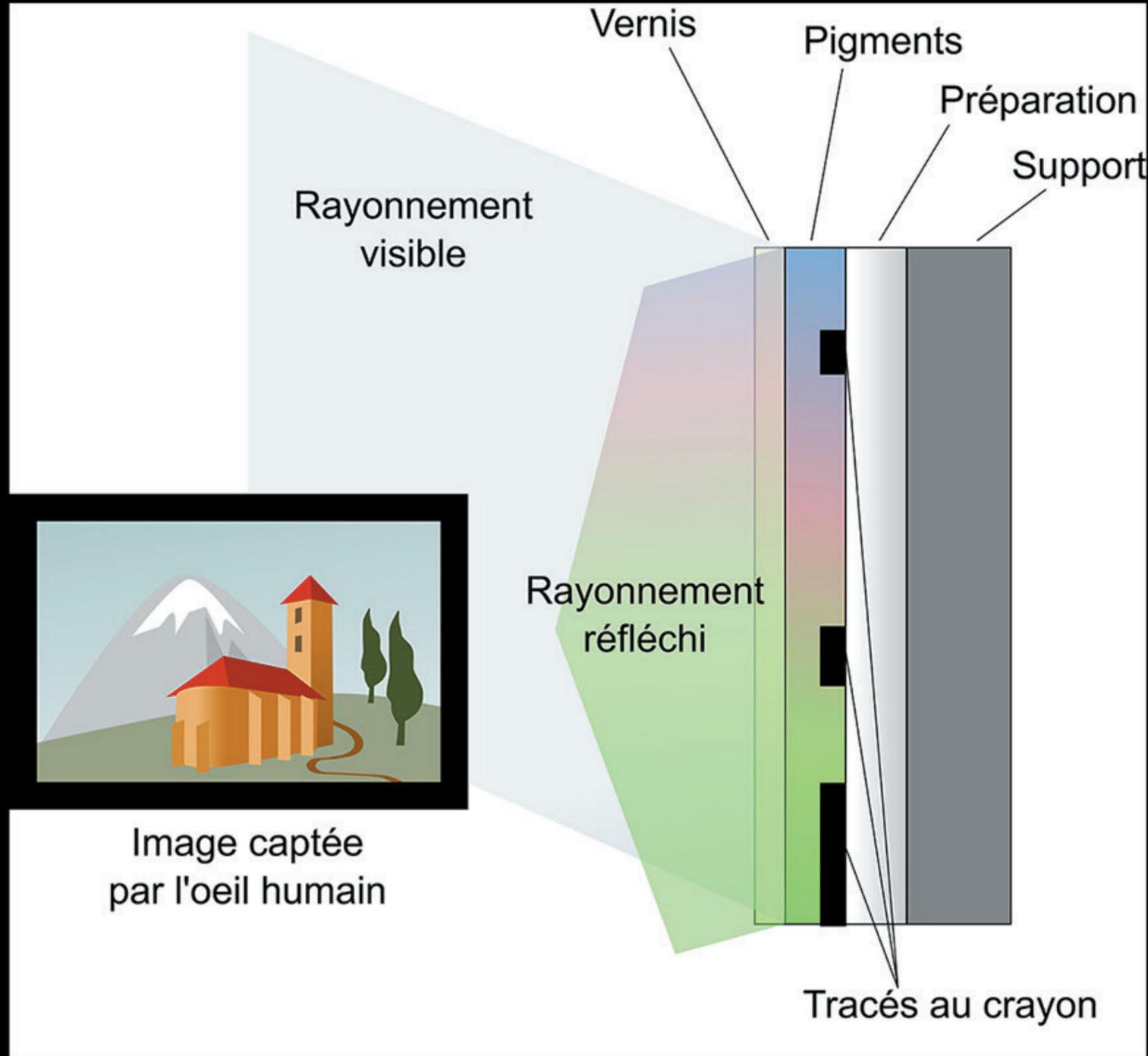


Buste de femme par Bonifacio Bembo



Blanc de zinc

# Photographies visible (380-780 nm) et IR-A (780-1400nm)





# Des avaries irréversibles

**Des parties du tableau de Van Gogh « Fleurs dans un vase bleu » de 1887, ont changé de couleur au cours du temps ...**

- 1- Le jaune cadmium ( $\text{CdS}$ ) utilisé par van Gogh était un pigment nouveau, dont on sait aujourd'hui qu'il s'oxyde avec l'air en sulfate de cadmium ( $\text{CdSO}_4$ ), perdant ainsi couleur et luminosité.**
- 2- Mais le siccatif utilisé dans un vernis, posé après la mort du peintre (!), a aussi réagi avec le sulfate de cadmium pour donner de l'anglésite opaque ( $\text{PbSO}_4$ ).**
- 3- De plus le  $\text{CdSO}_4$  a évolué en Oxalate de Cd qui a ajouté de l'opacité au film.**

**Analyses par X-ray et Infrarouge  
ESRF (Grenoble) et DESY (Hambourg)  
Réf CNRS - Chimie 2.0 (2012)**





# Des avaries irréversibles

Les ciels du peintre Murillo  
ont viré au gris ...

Le pigment bleu « smalt » utilisé est instable.  
Il était préparé avec des oxydes de cobalt mélangé  
à de la silice et de la potasse pour former un  
verre d'un bleu intense qui était ensuite broyé en  
poudre.

La migration des ions potassium hors des grains  
de pigment et le **changement de coordination de  
l'ion cobalt** expliquent la perte de la couleur bleue.

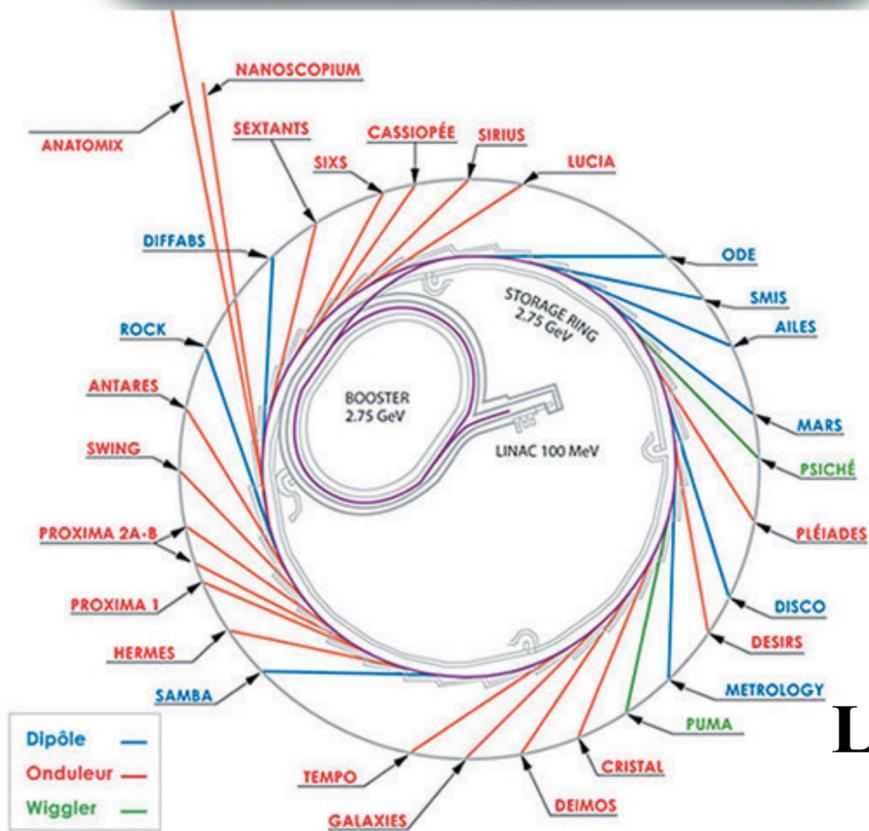
Analyse avec le faisceau X-ray de la ligne LUCIA  
du synchrotron SOLEIL (Saclay).

Réf CNRS - Chimie 2.0



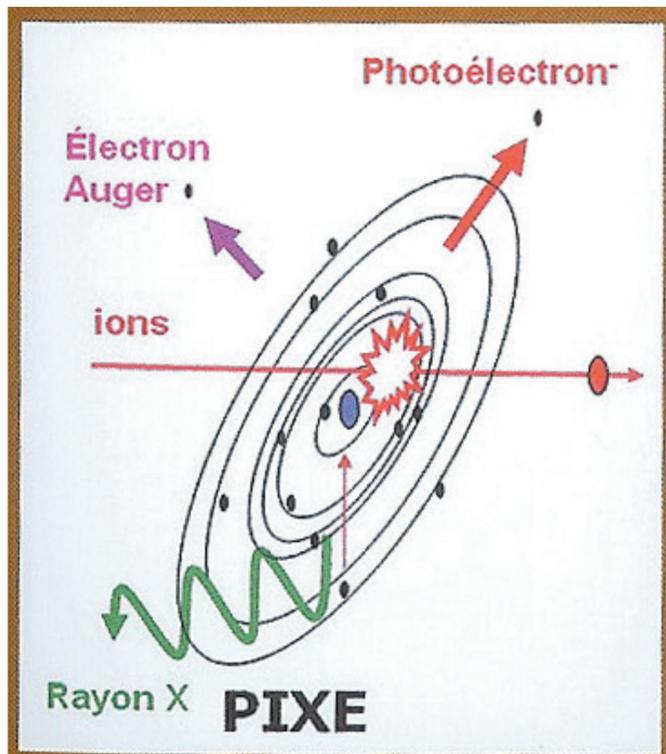
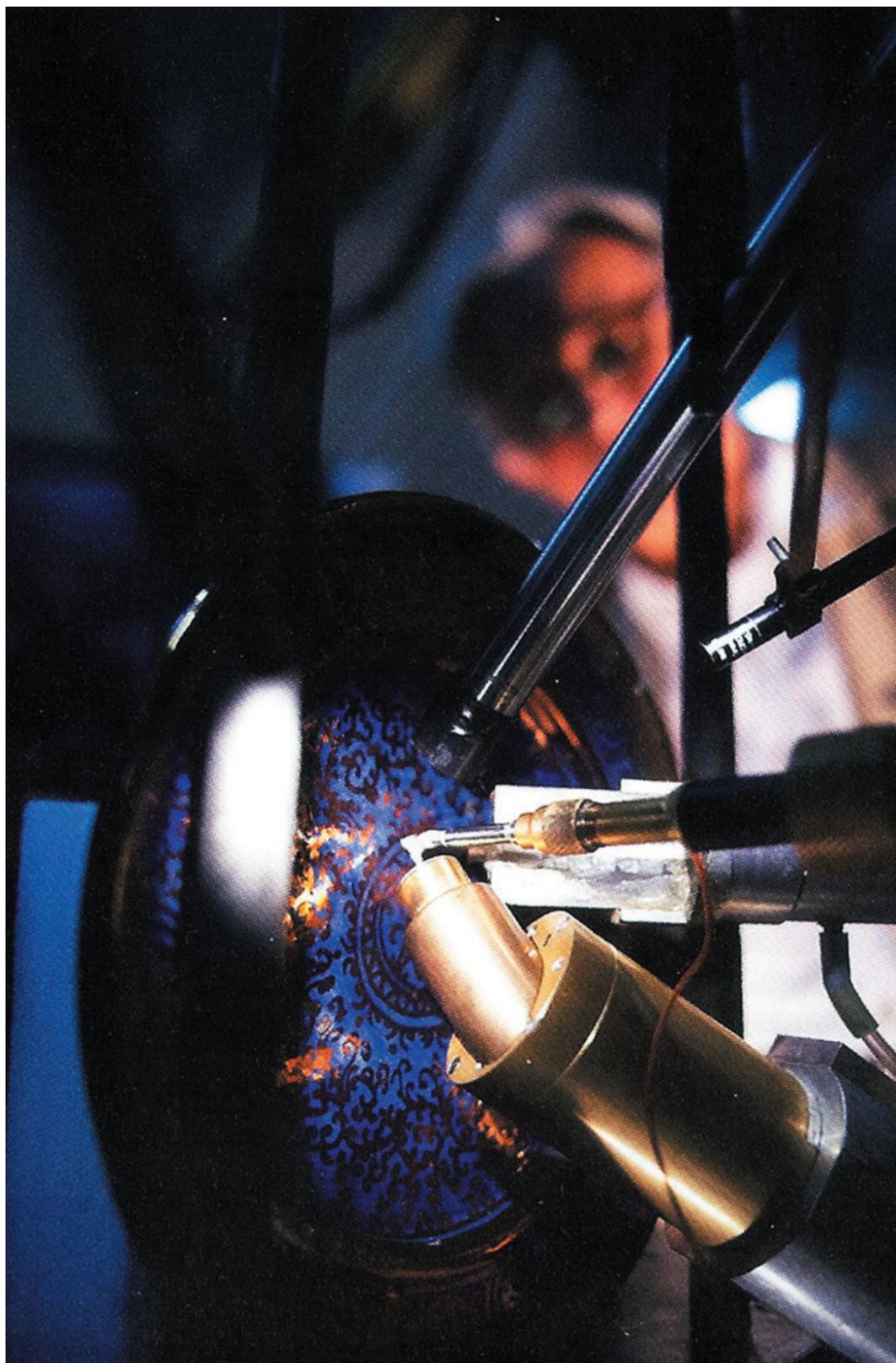
L'Orme des Merisiers  
91190 Saint-Aubin

# Synchrotron SOLEIL de Saclay

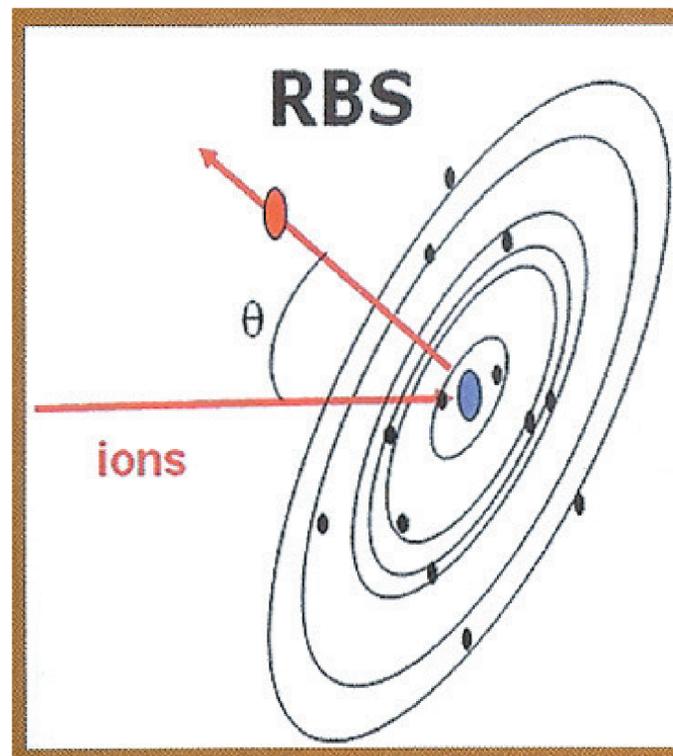


Les lignes de lumière

# Méthodes d'analyse avec AGLAÉ\*



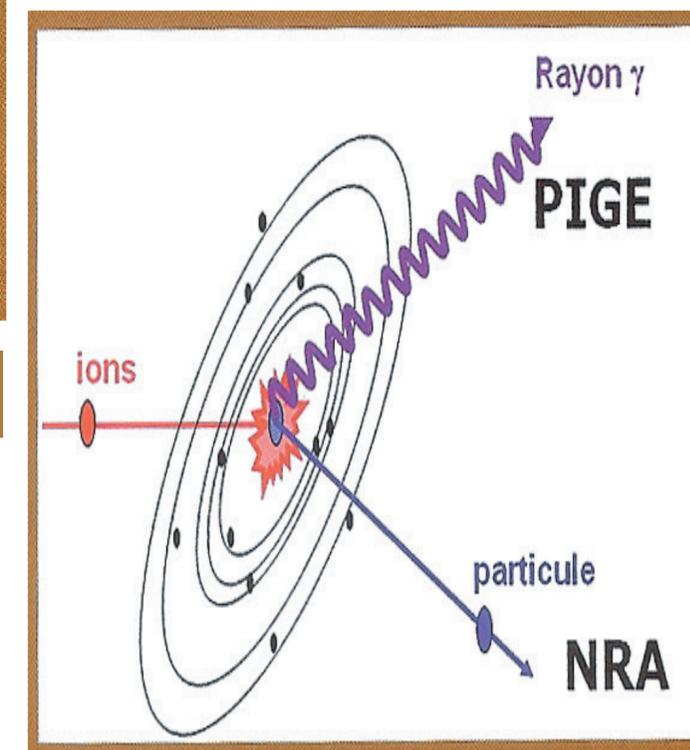
Particle Induced X-ray Emission



Rutherford Backscattering Spectrometry

Particle Induced  $\gamma$ -ray Emission

Nuclear Reaction Analysis



\*Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire



**Domaine de  
l'impossible**

Ecaillage

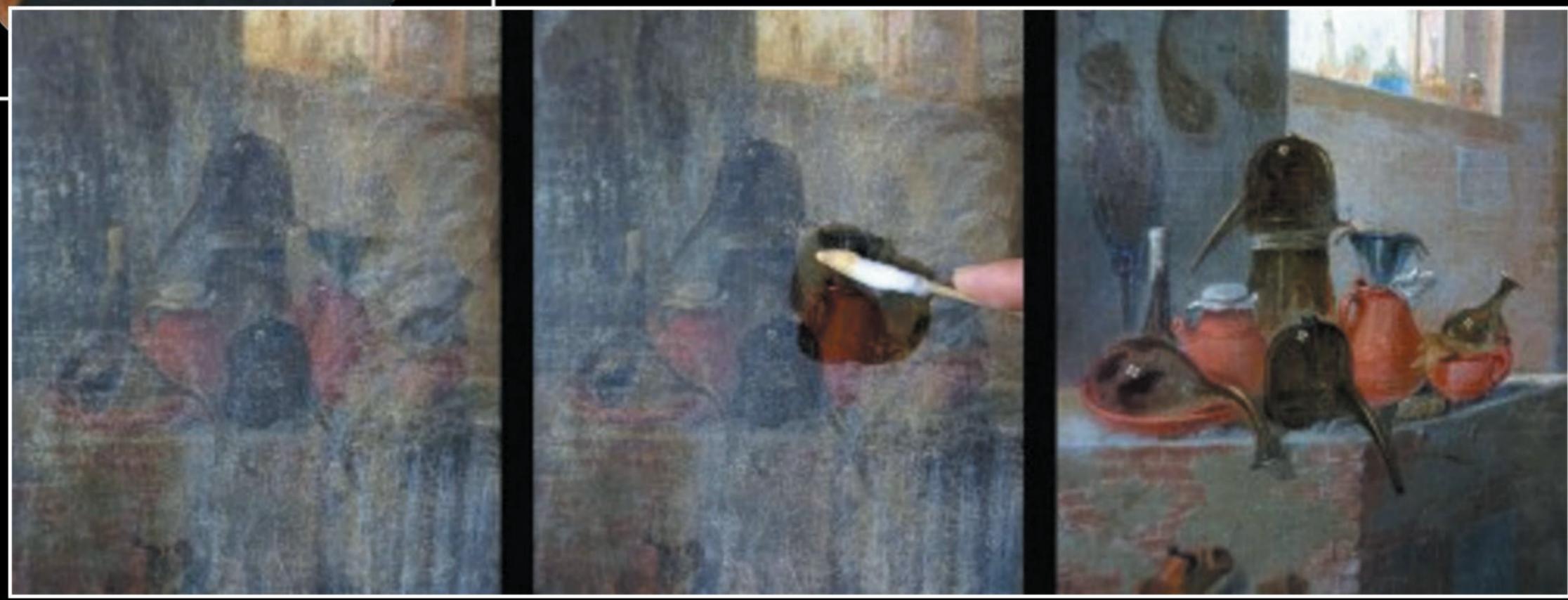


Comblement d'une lacune

- planéité non assurée
- ménisque concave au raccord
- ménisque convexe au raccord

# Chancis de vernis

Opacification du vernis  
suite à humidité





Réentoilage

# Les Fresques



Taurokathapsia, époque Minoenne 1500BC, musée de Thera, Santorin

# Tempera « a fresca »



**calcin**



**Œuvre non protégée**



**Eglise d'Ennezat  
« Les trois vifs et  
les trois morts »  
1420**



# Danse des morts - Chaise-Dieu, 1450-1490

3 Panneaux « a fresco » de « 23 vifs et 23 morts »

4 piliers « a secco » ensemble de 26m



**mine de plomb**  
**ocre rouge**  
**ocre jaune**

*en 1989*  
*dépoussiérage*  
*mousse*  
*algues*

# Cathédrale Sainte Cécile d'Albi

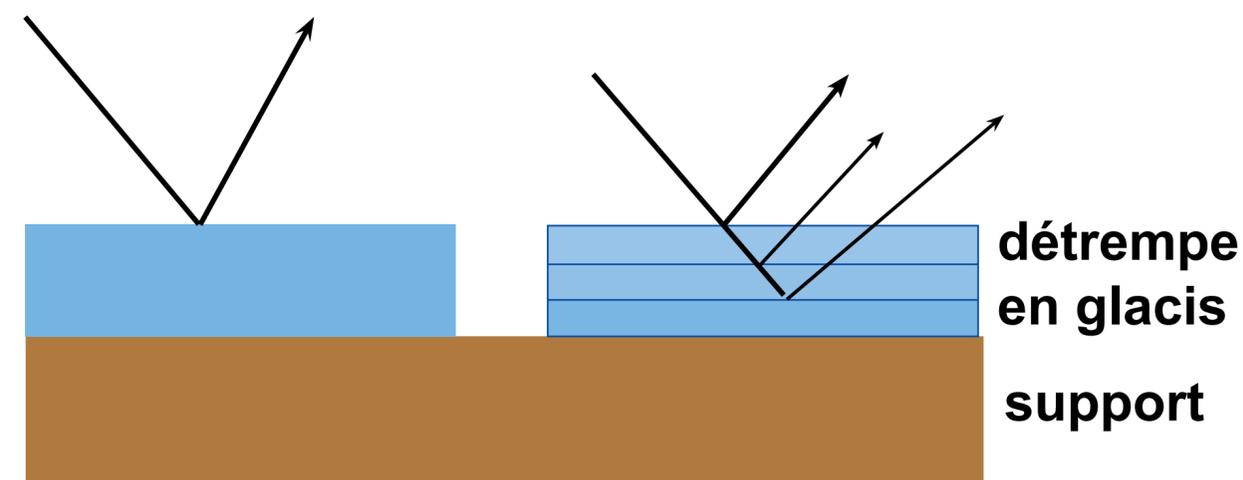
Les fresques de Sainte-Cécile représentent la plus grande surface de fresques de la renaissance en France. Elle est la seule cathédrale d'Europe dont les murs et les voûtes sont demeurés entièrement peints sur une surface d'environ 18 500 m<sup>2</sup>.

Le bleu utilisé est de la lazurite naturelle, carbonate basique de cuivre, pigment qui a été utilisé pour la rénovation, avec un dépôt par glacis (velatura).

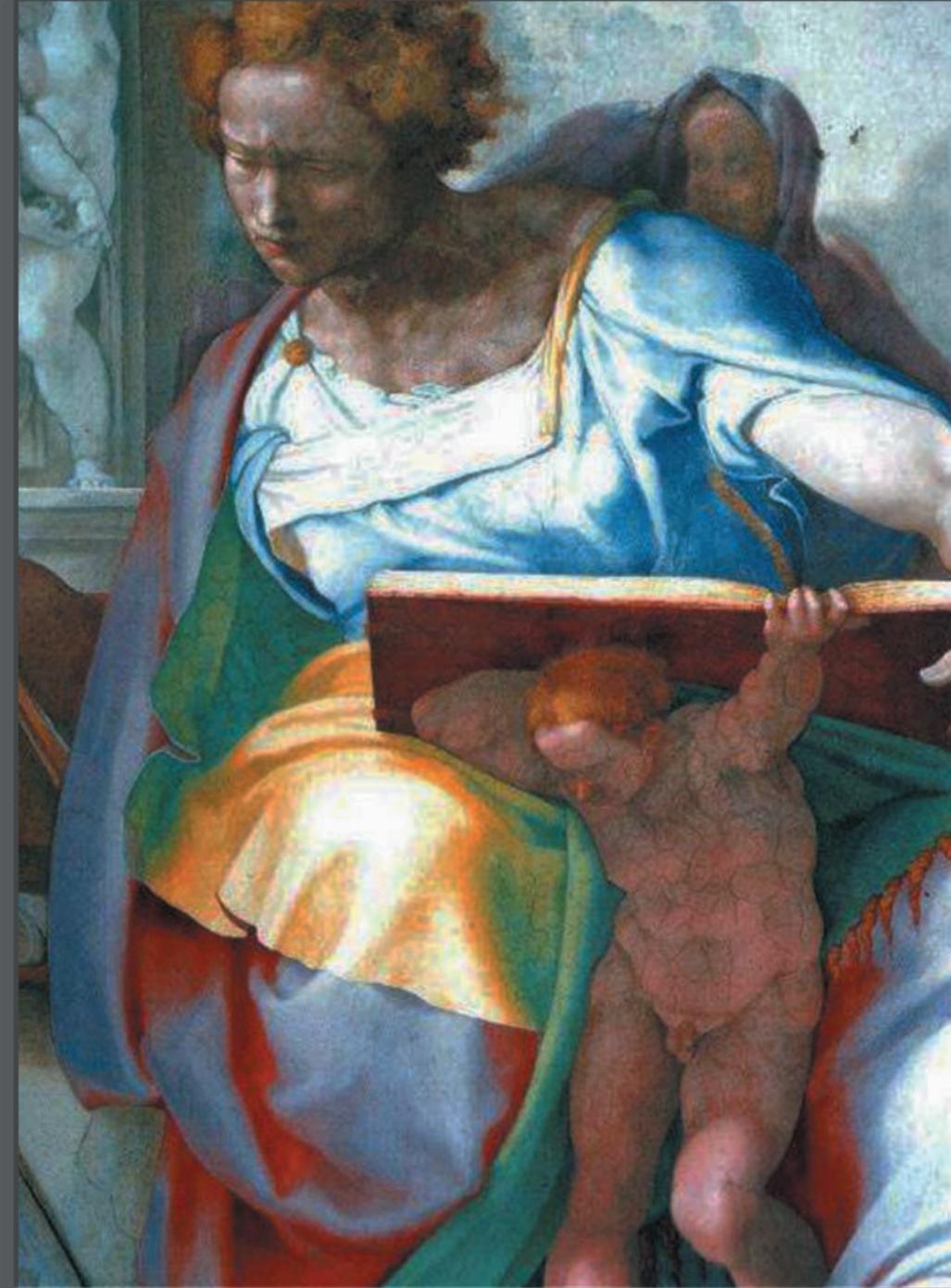
(revue des Editions du Patrimoine «Monumental» 2007-2)



En français, «détrempe» implique un liant aqueux (colle de peau, gomme arabique) et «tempéra» un liant jaune d'œuf.



# Chapelle Sixtine avant et après restauration



financée par « Nippon Television Network Corporation »

## Chapelle sixtine : des prises de libertés inadmissibles



dessin original



avant restauration



après restauration



# Une grisaille, pas toujours grise

Il ne s'agit pas d'un défaut mais de l'ajout d'oxydes métalliques pour imiter la pierre, faire des dégradés ou des ombres. Le mélange oxyde+fondant+eau/vinaigre+gomme est fondu à 600+650°C.

Une méthode utilisée pour la rénovation des vitraux de Strasbourg a consisté à réchauffer un vitrail ancien à 60°C puis à le filmer pendant son refroidissement avec une caméra IR ce qui a permis de révéler le tracé d'origine !

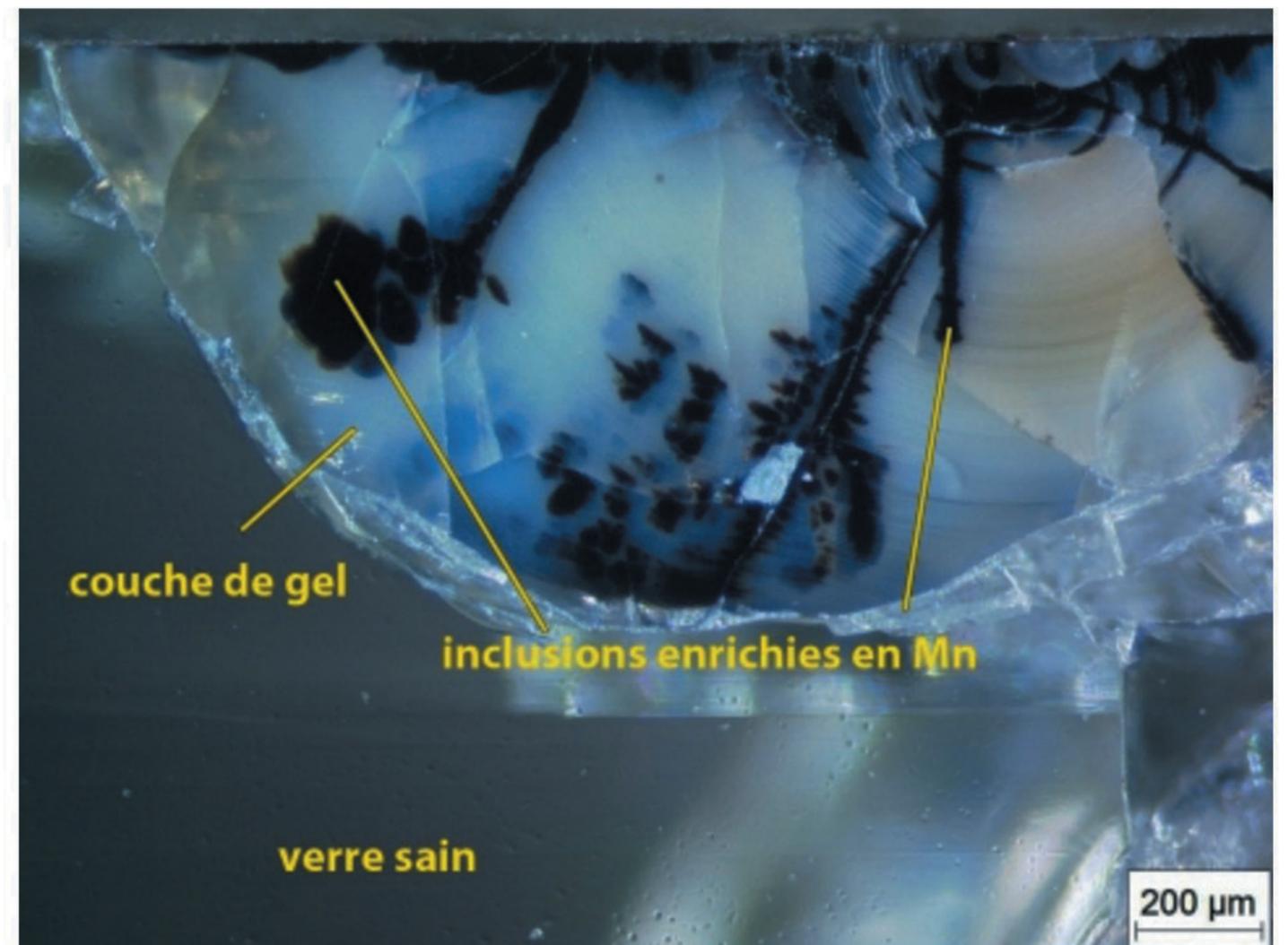


Les verres du Moyen âge sont calco-potassiques :

- Faible taux de silice
- Fondant potassique de cendres de bois ou de fougères

Ils sont sensible à l'eau d'où **la lixiviation** qui provoque une dissolution des ions Potassium ( $K^+$ ), Sodium ( $Na^+$ ) puis Calcium ( $Ca^{2+}$ ) et Manganèse ( $Mg^{2+}$ )

## Brunissement des vitraux



## Traitements possibles

Chlorhydrate d'hydroxylamine  
Hydrogénosulfite de sodium

# Traitement des bois infestés par les xylophages : anoxie, gaz, froid





## **LUTHERIE**

**Stradivarius, 1708**

**« Le Davidoff »**

Premier des cinq  
instruments entrés  
au musée de la  
Phiharmonie de Paris

**Bois : Table en épicéa d'Italie, fond et chevalet en érable d'Europe centrale**

**Vernis : une première couche d'huile lin, la deuxième huile de lin + résine + pigment**

**Pigment : oxyde de fer, vermillon (sulfure de mercure), pigment de cochenille**



# TAPISSERIES

Laine, coton, lin, soie, fils or et argent

The image shows the interior of a church, likely the Chaise-Dieu, featuring a long wall covered in Flemish tapestries. The tapestries are arranged in a series of panels, each depicting a different scene. The wall is made of stone and has a Gothic architectural style. The lighting is warm, highlighting the colors of the tapestries. The text is overlaid on the top part of the image.

# **Tapisseries flamandes de la Chaise-Dieu**

## **65 m en 14 pièces (1518)**

### **Etapes de la restauration (85 000 €)**

**2014 - Phase préparatoire : retrait des galons teintés avant nettoyage, dérestauration, Enlèvement des doublures (teintes origines ?), tests de résistance au nettoyage.**

**2015 - Phase de nettoyage : vaporisation d'eau sur table, ...**

**2015 - Phase de restauration : consolidation des tapisseries par l'apport de tissus de support et l'application de différents points de couture de fils mercerisés.**

**2016 - Phase de doublage des tapisseries, afin qu'elles puissent à nouveau être accrochées.**

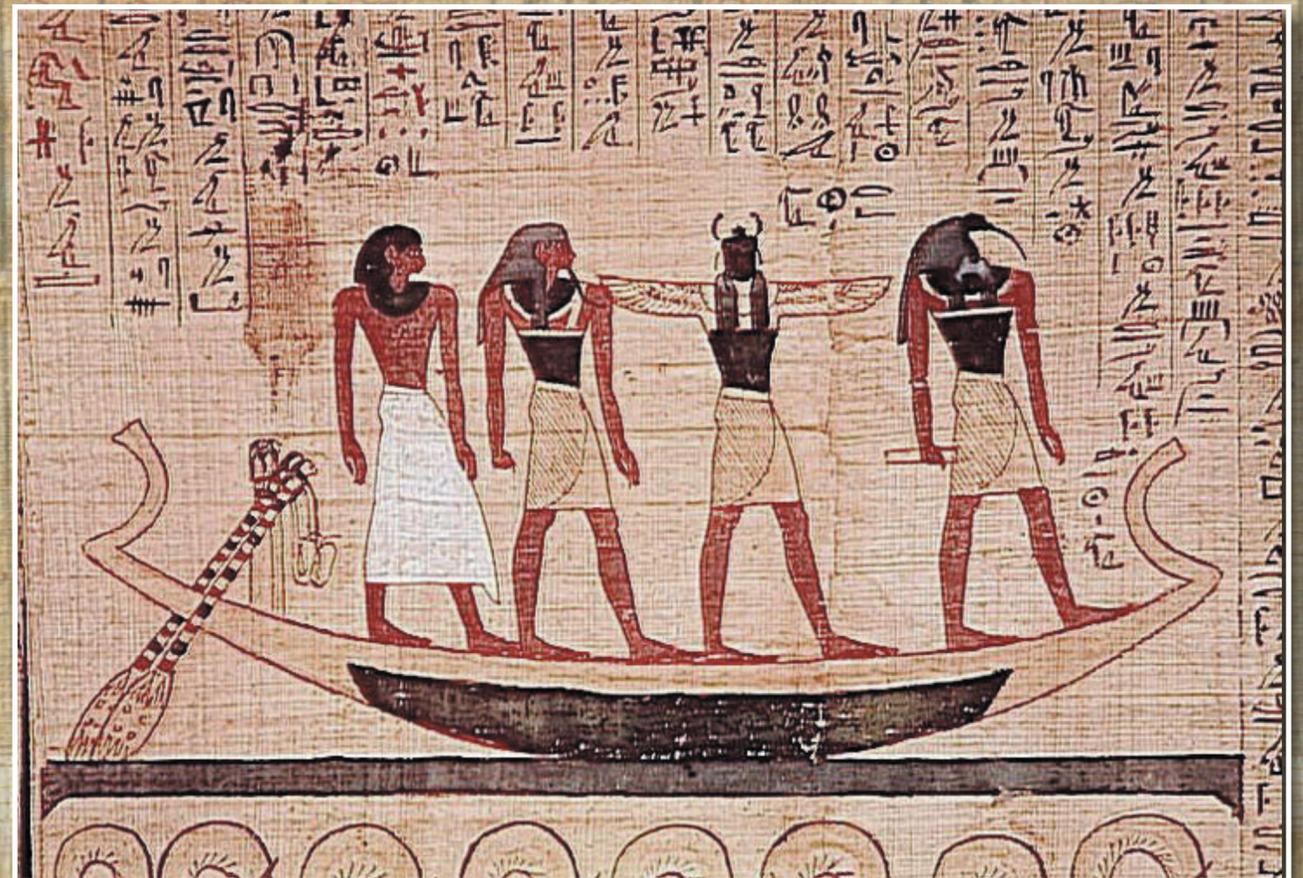
**2017 - Expositions internationales (Chine -USA ?) avant placement dans une salle climatisée de l'abbatiale**

# Papyrus (papyrologie)

Le papyrus est putrescible et se décompose en milieu humide. Les restes de papyrus antiques ont donc été trouvés, en excellent état, dans les régions sèches de l'Égypte et en zone non touchée par la crue du Nil.



Le plus vieux 3100BC, tombe de Hemaka



# **Parchemin, de mouton, de chèvre**

**(de Pargamena, Bergama, Turquie)**

**200BC suite à interdiction d'export des égyptiens !**

## **Volumen**

**Rouleau de feuilles collées  
à déroulement horizontal sur deux axes**

## **Rotulus**

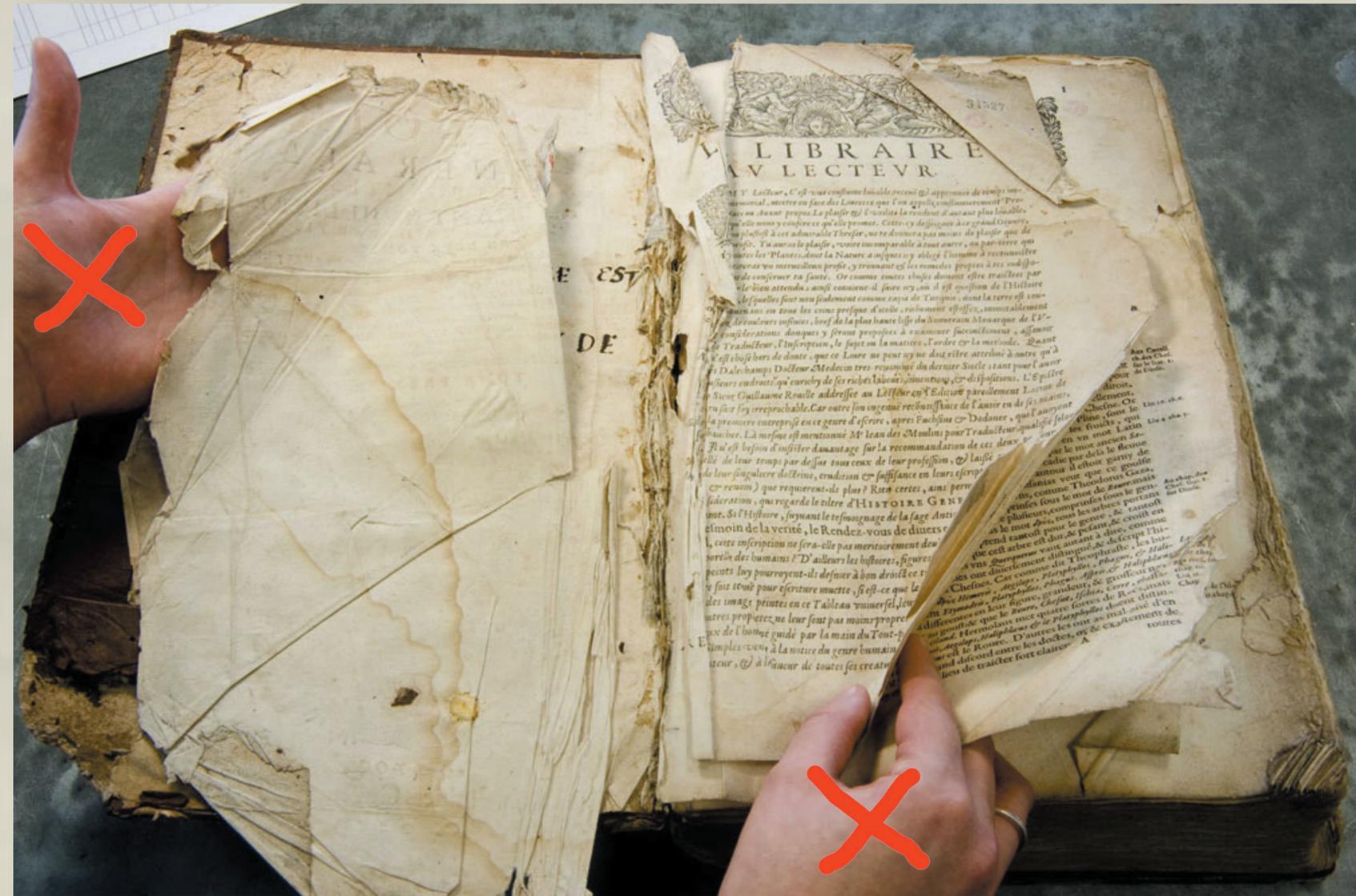
**Rouleau de feuilles collées  
à déroulement vertical sur deux axes**



**Codex livre de feuilles cousues en cahiers 1er-2ème siècle**

**Vélin peaux de jeunes veaux ou de fœtus**

**(Collage par martelage puis avec colle à l'amidon pour les papyrus et colle de peau pour les parchemins)**



## Le domaine des paléographes

Lumière,  
hygrométrie,  
encres, ...



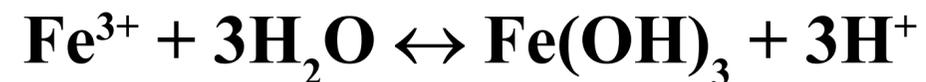
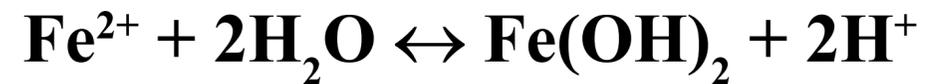


noix de galle ..... 10g  
sulfate de fer ..... 7g  
gomme arabique..... 10g  
eau de pluie ..... 500g

## Destruction du papier (cellulose) par les encres ferro-galliques

**Un ensemble de réactions en cascade :**

**Hydrolyse de la cellulose**



**Oxydation de la cellulose**



**Les radicaux  $\text{RO}^*$ , en milieu acide, oxydent la cellulose qui se dépolymérise.**

**Les agents :  $\text{Fe}^{2+}$  et acide gallique**

**Les conditions : oxygène et humidité**

**Le suivi du rapport  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  est fait à l'aide du synchrotron SOLEIL de Saclay**

# En conclusion

▶ **Intervention minimale**

se limiter à ce qui est nécessaire

▶ **Réversibilité**

possibilité d'éliminer ou modifier une ancienne intervention

▶ **Compatibilité**

les matériaux ne doivent pas réagir entre eux dans le temps

▶ **Lisibilité**

distinguer les parties traitées et originales

▶ **Conservation**

pour une rénovation durable

**Des œuvres temporaires  
qui ne seront jamais au patrimoine  
mondial de l'UNESCO !**



**Le seul moyen de conserver une trace de ces chefs d'œuvres éphémères est la photographie (ou la vidéo) numérique.**

**On tombe alors sur le risques inhérent aux supports numériques qui est la perte de données dans le temps liée:**

**- au support lui-même**

**- à l'environnement**

**- ...**

**CD, DVD, Mémoires diverses sont relativement fragiles  
Des copies des fichiers doivent être effectuées régulièrement**

