



**HAL**  
open science

## De Saint-Denis à Royaumont -Du pigment au pixel

Patrick Callet

► **To cite this version:**

Patrick Callet. De Saint-Denis à Royaumont -Du pigment au pixel. Virtual Retrospect 2017, Maud Mulliez; Caroline Delevoie, Nov 2017, Pessac, France. pp.135-143. hal-03151469

**HAL Id: hal-03151469**

**<https://hal.science/hal-03151469>**

Submitted on 24 Feb 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Tiré-à-part des Actes du colloque

### Virtual Retrospect 2017

M.Mulliez, éd. (2019), Restituer les couleurs // Reconstruction of Polychromy, Actes du Colloque *Virtual Retrospect 2017*, Archeovision 8, Éditions Ausonius, Bordeaux



P. Callet

*De Saint-Denis à Royaumont – Du pigment au pixel*

pp.135-143

# De Saint-Denis à Royaumont – Du pigment au pixel

Patrick Callet, Chercheur associé au CAOR Mines-Paristech, PSL university  
Président du Centre Français de la Couleur  
[president@centrefrancaisdela couleur.fr](mailto:president@centrefrancaisdela couleur.fr)

**Résumé :** L'étude du gisant polychrome de Philippe-Dagobert, aujourd'hui installé dans la nécropole royale de Saint-Denis a fait l'objet d'une série d'études scientifiques entreprises en 2004-2005 à l'École Centrale Paris. Outre les mesures et simulations spectrales effectuées pour retrouver "une couleur plausible" de l'état d'origine de la sculpture, deux films vidéo ont été produits. Un film grand public, en français et en espagnol, ainsi qu'un film portant sur les prélèvements et les analyses réalisées par le LRMH.

La structure multicouche des traces de peintures restantes ne permettait pas de retrouver complètement les couches picturales les plus profondes pouvant attester de la "couleur-matière" de la sculpture. Ayant identifié les parties peintes dans l'état d'origine supposé, nous avons numérisé, la totalité du gisant et son soubassement. Une réplique 3D en résine stéréophotolithographique a été fabriquée en 2005 avec essais de peintures réelles. Les couches picturales apparentes nous ont notablement renseignés, mais il manquait toujours une information capitale lorsque l'on parle de couleur... la lumière. Dans quel environnement lumineux, naturel ou non, cette sculpture baignait-elle ? Originale de l'église abbatiale de Royaumont, nécropole des enfants royaux, où Philippe-Dagobert fut le premier défunt résident. Où donc se plaçait ce gisant, dans l'église abbatiale ? L'éclairage naturel provenait-il d'un vitrail polychrome ou en grisaille ? Quel système de lampes ou autre dispositif était utilisé pour mettre en valeur peintures et dorures dans un édifice "chromatiquement paradoxal" puisqu'à la fois royal et cistercien ? Avec la Fondation Royaumont, nous avons pu étudier le lieu et son histoire, dans le but de retrouver la forme et les attributs lumineux et acoustiques de l'église abbatiale détruite après la Révolution de 1789. Bien des éléments donnaient des indications sur la façon dont la lumière pouvait être présente dans l'édifice disparu. Nous avons décidé de reconstruire numériquement l'église abbatiale en 3D pour tenter de retrouver la lumière disparue, objet d'un autre film vidéo qui fut présenté lors de l'exposition Saint Louis, à la Conciergerie de Paris. L'article expose la démarche et les questionnements sur la validité des hypothèses de reconstruction des lumières et matières médiévales au regard de ce que ces usages symboliques pouvaient bien signifier au XIII<sup>e</sup> siècle.

**Mots-clés :** peinture, lumière, vitrail, simulation, numérisation, prototypage rapide, polychromie, gisant, vidéo

**Abstract:** The scientific study of the polychrome recumbent of Philippe-Dagobert, now in the royal necropolis of Saint-Denis was developed during the period 2004-2005 with students, scientists, engineers and the movie maker team at Ecole Centrale Paris. Spectral measurements and simulations were produced for attempting to retrieve a set of plausible colours corresponding to the initial polychrome programme dedicated to medieval sculpture. Two video movies were made on this topic. A mainstream movie, in French and Spanish, and also a more specialised one only in French showing the detailed analyses and methods employed to characterise the deepest layers of paint observed on the visible remains of today. Some takings were allowed and made by the Laboratoire de Recherche des Musées de France because the non-invasive method of characterisation by spectrophotometry were not efficient in that case. Once characterised the painted parts and their initial coloured materials, we 3D digitised the whole statue, the recumbent itself and its base. A 3D replica by stereophotolithography was then produced in 2005 on which tests of colouring were executed with medieval paints and pigments techniques. The apparent layers of the remaining paints were very useful to retrieve the "material colour" but something very essential was always missing...: light. In which lighting, either natural or artificial, the sculpture was installed inside the Royaumont abbey church ? The Philippe Dagobert's recumbent was the first funeral monument built in the church, designed as a royal children's necropolis. In what part of the church the statue could have been exhibited? What kind of stained-glass window? Polychrome or grisaille? What kind of artificial lighting could have been chosen in those times ? The Cistercian monks were confronted to the royal will of polychromy and gilts simultaneously present in a very ascetic ambience. Thanks to the Royaumont Foundation we could study the place and access a lot of documents for our quest of retrieving the church shape and its initial lighting and acoustic properties. The church was destroyed during the French Revolution and only drawings and engravings were available. Combined with the ground remains, a 3D model could emerged.

Many elements gave us indications on the way the natural light could enter the church. The 3D reconstruction was then

pertinent for studying the lighting properties of the building. This was the occasion to produce another movie displayed in Paris for the King Saint Louis exhibition at the Conciergerie during the years 2014-2015. The text hereafter focuses on the scientific methodology, the several questionings and hypotheses made for displaying a 3D polychrome model of the abbey church including natural lighting and material properties of the built environment accounting for the symbolic uses in the XIII<sup>th</sup> century.

**Keywords:** paint, lighting, stained-glass window, simulation, 3D digitisation, rapid prototyping, polychromy, recumbent, video



Fig. 1. Le gisant de Philippe Dagobert, actuellement à la basilique de Saint-Denis (P. Callet)

## INTRODUCTION

Dans un cadre didactique impliquant des élèves ingénieurs centraliens de plusieurs promotions successives, se sont déroulés des projets scientifiques concernant la couleur et l'archéologie, pendant plus de quinze années. Mettre la science et la technologie au service de l'art, demeurer à l'écoute d'autres spécialistes, historiens, conservateurs de musée, historiens de l'art, archéologues, archivistes, médiateurs du patrimoine, etc. place les élèves dans des situations qu'ils rencontreront dans l'entreprise, aussi bien dans le fonctionnement interne que dans les relations avec les clients. Les responsables de ces projets ont aussi, au fil des sujets soumis aux élèves, placé la "Communication" très en amont de chaque action traitée. Les élèves ont ainsi appris alors à s'observer en train de faire, à se soucier de la trace laissée de leur activité, à la transmettre à d'autres, à travailler en équipe, à maîtriser des vocabulaires très variés,

à traduire dans plusieurs langues le film vidéo produit sur le projet en cours, à rédiger des articles scientifiques pour des conférences ou des revues. Le résultat résidait autant dans la démarche que dans le résultat exposé du problème abordé.

Il s'est agi ici de l'enchaînement de deux projets se faisant suite sur une dizaine d'années ! Le premier projet consistait à répondre à la question : Peut-on retrouver les couleurs disparues<sup>1</sup> ? Application à une sculpture polychrome de la basilique de Saint-Denis, le gisant de Philippe Dagobert, jeune frère (1222-1235) du futur Saint Louis (fig. 1). Le second, qui devint une suite logique du premier sans que nous en eussions eu conscience au tout début, a été plus particulièrement dédié à la lumière naturelle dans la grande église abbatiale de Royaumont et à sa reconstruction en 3D dont il fut rapidement question. Ainsi, des premiers pigments prélevés sur une sculpture polychrome naquirent les pixels, ces petits grains d'image, qui montrent, expliquent, analysent et synthétisent, remontent enfin le temps jusqu'au XIII<sup>e</sup> siècle.

## LA FORME : NUMÉRISATION 3D

À l'aide d'un système de numérisation 3D par lumière structurée de la société Breuckmann nous avons acquis 267 nuages de points d'environ 1,5 millions de points chacun (fig. 2). Ces séances de numérisation en équipe d'élèves ingénieurs se sont déroulées de nuit au cœur de l'hiver dans la basilique (plutôt fraîche !) de Saint-Denis ; il n'était pas question d'utiliser d'autres systèmes de capture 3D qui auraient pu avoir un contact avec la sculpture. Grâce à son état général assez satisfaisant, la sculpture put être numérisée dans sa totalité malgré les difficultés d'accès de l'instrument compte tenu du peu d'espace disponible entre les tombeaux dans la basilique. Les équipes se relayaient entre la fermeture de la basilique au public et jusqu'à 2h du matin environ. Le plus long de tous les travaux a consisté en la reconstruction 3D, l'assemblage des 267 nuages de points en un seul tout cohérent et représentait alors environ 500 h de travail pour deux ingénieurs spécialisés. S'ajoutait à cela une semaine de calculs ininterrompus pour le logiciel d'assemblage des 267 vues réalignées entre elles, nettoyées des points en double, etc. Vint ensuite un découpage morphologique en zones pertinentes ayant le même attribut, cheveux, visage, mains, manches du vêtement, petit lion au pied du gisant, et tous les ornements du soubassement du XIX<sup>e</sup> siècle, etc. Ce grand niveau de détails permettait par la suite d'envisager plusieurs hypothèses de mise en couleur et dorure.

1. Callet 2008.

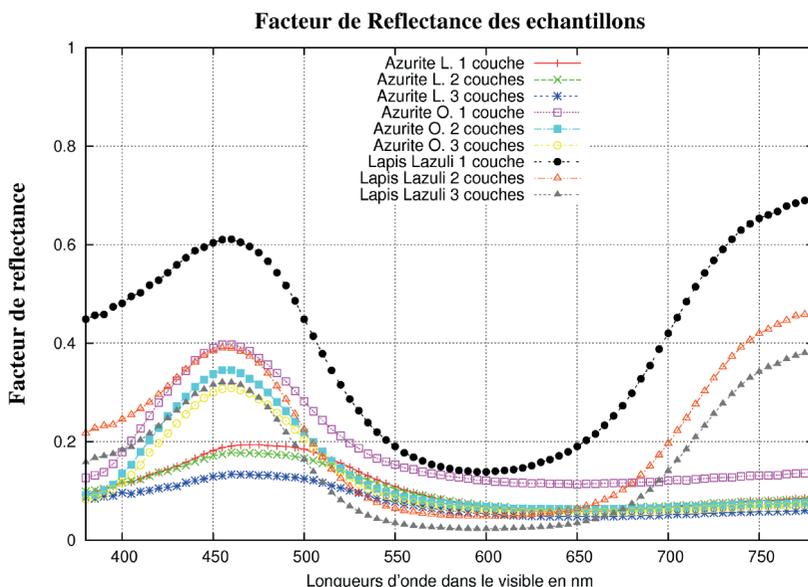


Fig. 2. Numérisation 3D du gisant de Philippe-Dagobert, par lumière structurée ( P. Callet).

## LA COULEUR ET SES MATIÈRES

Les prélèvements autorisés et effectués par le LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques) ont permis de définir l'ordre des couches picturales et ainsi de remonter aux couches picturales primitives. Des microstratigraphies réalisées sur ces prélèvements renseignent, grâce à la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage, sur les répartitions des couches de peinture, leur distribution granulométrique (broyage manuel des pigments, bien entendu, au XIII<sup>e</sup> siècle). Ces renseignements sont importants car identifier la nature d'un matériau utilisé pour la mise en couleur d'une sculpture ne suffit pas à caractériser complètement l'apparence visuelle qui en résulte. En effet, la clarté, un des trois attributs de la couleur avec la tonalité et la saturation, dépend fortement de la taille des grains. Plus les pigments sont petits et plus la couleur apparaît pâle. Cela reste vrai tant que la conductivité – l'absorption – du matériau réduit en poudre n'est pas trop élevée ; mais nous ne nous trouvons pas ici dans un cas extrême où cette loi serait transgressée... donc plus c'est fin et plus c'est pâle ! Néanmoins, ajuster la clarté d'une peinture sur la base d'observations faites au hasard sur des écailles de peintures si petites reste de l'ordre de l'hypothèse. Même si le sondage fait pour le prélèvement est admis comme caractéristique de ce qui se faisait sur le tout ou sur la partie colorée avec la même peinture. Les couches picturales identifiées ont ainsi fait apparaître la céruse (carbonate de plomb), le vermillon (sulfure de mercure), l'outremer naturel ou lazurite (aluminosilicate de sodium et calcium, issu du lapis-lazuli), la malachite (carbonate de cuivre), l'azurite (carbonate de cuivre), l'ocre jaune ou goethite (hydroxyde de fer), la feuille d'or, le noir de carbone. Il n'a pas été possible d'identifier d'éventuelles traces de vernis (gomme laque par exemple) et la question du brillant de la peinture est resté en suspens. C'est un sujet généralement évité qui, de plus, heurte rapidement

Fig. 3. Spectres de réflexion diffuse comparés de l'azurite et de la lazurite, sur fond blanc de céruse (P. Callet).



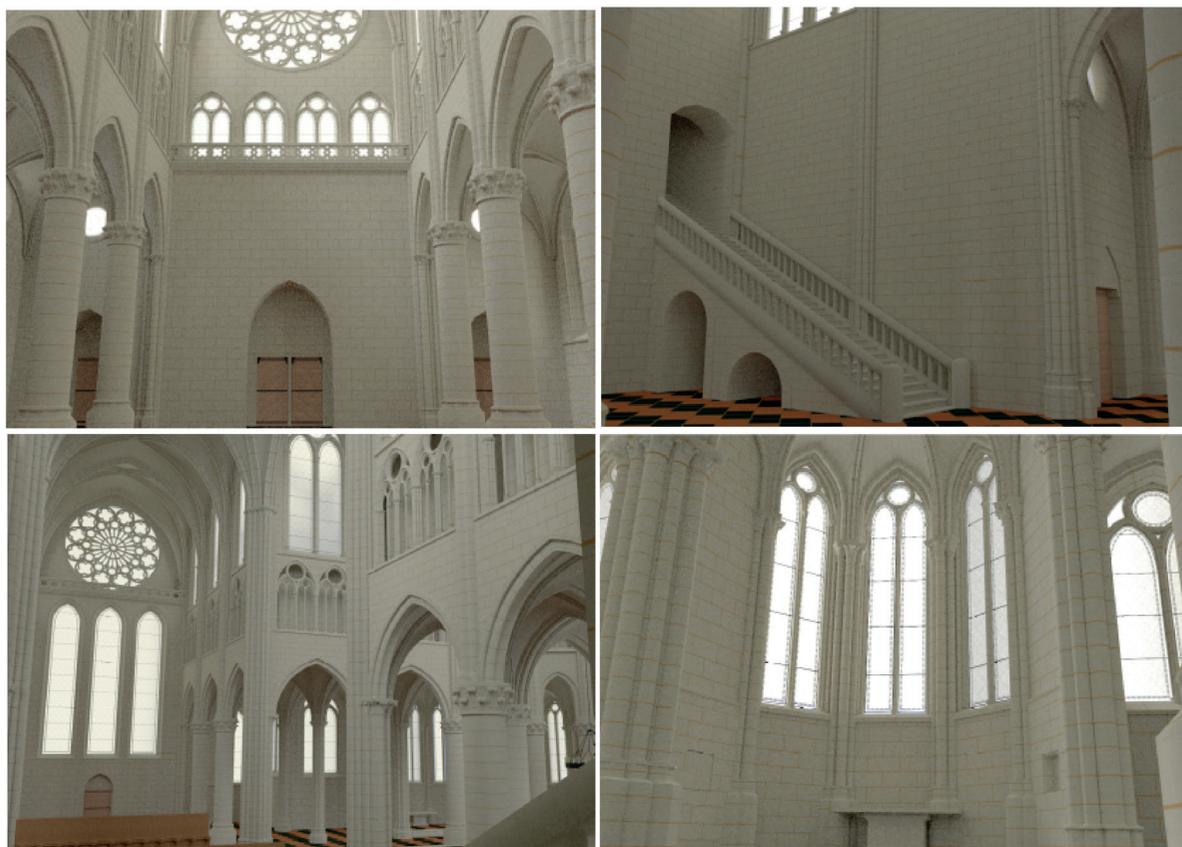
les goûts actuels fondés sur l'idée qu'on se fait le plus souvent des couleurs des objets et œuvres du passé... mates. Nous avons cependant étudié l'influence de l'épaisseur des couches picturales sur l'appât de céruse en comparant les pigments d'azurite et de lazurite (outremer naturel) (fig. 3). On y remarque les pics de réflexion de la lumière du côté du bleu (à gauche) très similaires, alors que la lazurite réfléchit très fortement dans le rouge lointain, d'où la possibilité de bien discerner ces deux bleus par la lumière d'une flamme.

D'autres matières ont été identifiées sur le bord de la dalle, de petits disques de pâte de verre très colorés, rouges. Aucun prélèvement n'a cependant été effectué sur ces ornements.



Fig. 4. Le gisant de Philippe-Dagobert sous son demi-baldaquin éclairé par une lumière de chandelle de cire d'abeille et un éclairage ambiant lumière du jour (P. Callet).

Fig. 5. Plusieurs vues de l'intérieur de l'Église reconstruite à l'aide de Blender (P. Callet).



Le sol était revêtu de carreaux dont certains furent découverts glaçurés de vert et de jaune, avec fleur de lys. La plupart des motifs sont géométriques, simples et nous ne savons rien quant à la disposition de carreaux de sol mats ou brillants. La représentation que nous avons donnée en images de synthèse s'est inspirée de sols réels connus d'édifices cisterciens de même époque.

#### SUR LES TRACES DES LUMIÈRES MÉDIÉVALES

La couleur-matière est certes nécessaire pour reconstruire une apparence visuelle plausible de ce que put offrir au regard médiéval semblable sculpture si richement décorée. Qu'en était-il donc de la lumière ? On sait que dans l'éthique cistercienne, le brillant et la polychromie étaient proscrits. Bernard de Clairvaux s'est montré fort virulent vis à vis des clunisiens sur ce point de la décoration de l'église, de l'usage des ornements et de la lumière même. Idéalement un seul cierge dans l'église cistercienne. La lumière s'identifiant à Dieu lui-même, en tant que sa première création, ne peut être dupliquée. Pas de "débauche" de lumière, de cierges et de lampes dans la maison de Dieu. Pour des raisons similaires le décor mural est absent, seuls figurent sur l'enduit à la chaux des murs, assurant une grande clarté à l'édifice, les joints réguliers tracés à l'ocre jaune ou rouge. Ces joints représentent "un faux-appareil" comme il est souvent dit en architecture. Nous préférons désigner cet effet de pureté graphique, ce dessin de l'église régulière et idéale dans l'édifice de pierre, sous l'expression "appareil figuré". Il apparaît que le tombeau de Philippe Dagobert fut sculpté aux environs de 1256. À l'occasion du décès en 1260 de Louis de France, fils de Saint Louis, les deux tombeaux semblent avoir fait "baldaquin commun", comme on peut le supposer d'après les dessins des gisants de la collection Gaignières<sup>2</sup>. Après 1260, soit environ un siècle après le décès de Bernard de Clairvaux (Saint Bernard), on peut supposer que l'ordre cistercien a quelque peu pris des distances avec la règle de Saint Benoît. Cela expliquerait alors la situation a priori paradoxale dans laquelle se trouvait l'abbaye de Royaumont. En effet, le roi Saint Louis offrait cette abbaye à l'ordre cistercien mais à la condition d'en faire la nécropole de la famille royale puisque seuls les rois de France étaient enterrés à Saint-Denis. Accepter des sculptures polychromes et dorées, sans doute pourvues de lampes à huile suspendues, dut faire l'objet de "négociations" délicates. Ainsi s'est donc posée la question de la clarté de l'édifice et de ses modes lumineux. Le vitrage général de l'église fut aussi débattu par le comité scientifique du projet et nous avons retenu principalement l'hypothèse d'un vitrage très clair avec un listel discret rappelant la dimension royale de l'édifice. Un verre bleu et quelques fleurs de lys en alternance dans une baie vitrée principalement en grisaille.

#### SIMULATION SPECTRALE

La reconstruction 3D, suivant les plans établis par l'architecte Vernier au XIX<sup>e</sup> siècle, couplée aux mesures effectuées dans les ruines de l'abbaye a permis de fournir une maquette 3D réalisée avec le logiciel libre de synthèse d'image "Blender" (fig. 5). Les élèves ingénieurs centraliens avaient pour tâche de se transmettre de groupe en groupe et d'année en année, la maquette réalisée par le groupe précédent. Tâche d'autant plus ardue au fil des ans que les différents groupes d'élèves devaient apprendre également l'utilisation du logiciel. En réalisant la maquette 3D de l'édifice, il est apparu un certain nombre d'erreurs indétectables sur les plans pourtant détaillés de Vernier (erreurs de mesures dimensionnelles principalement). Le comité scientifique du projet avait pour tâche régulière de suivre l'avancée de la modélisation et d'en corriger les propositions. Cela a permis d'aboutir à la version présentée dans le diaporama-film produit pour l'exposition en 2014, à la Conciergerie, à Paris et intitulé "Reconstruction 3D de l'église abbatiale de Royaumont".

Plusieurs modèles de vitraux ont été proposés et tous se sont fondés sur une étude des verres médiévaux<sup>3</sup>, grâce notamment aux nombreux fragments conservés à l'abbaye de Maubuisson, une autre abbaye cistercienne proche de Royaumont. Une petite pièce de verre de 3 mm d'épaisseur (fig. 6) a attiré notre attention par la présence d'une fine couche de bulles dans le verre sur un millimètre d'épaisseur et uniformément réparties sur la face externe du vitrail. La face interne comportait un motif en grisaille dit en "cage à mouches". Il semble bien que ce type de fabrication de verre avec bulles intentionnelles ait pu être une innovation en son temps. L'artifice aurait alors servi à blanchir la lumière par diffusion d'icelle en surface du verre, étant entendu que la lumière entrait par l'extérieur. Le verre lui-même contenant encore à l'état de traces de l'oxyde de fer lui donnant une coloration uniformément verdâtre quoiqu'assez pâle.

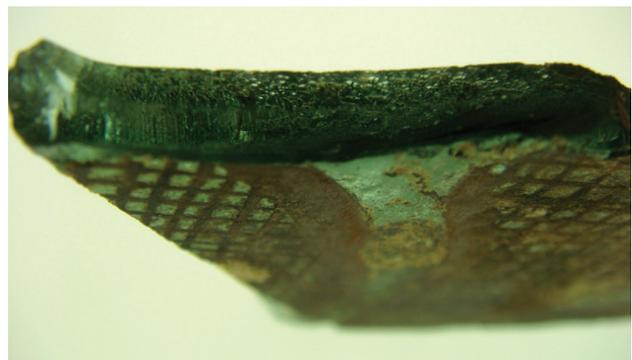


Fig. 6. Pièce de verre trouvée dans les ruines de l'abbaye de Maubuisson, près de Royaumont. Artifice ou accident ? La fine couche de bulles sur la face externe semble bien volontaire (P. Callet).

2. Ritz-Guilbert 2016, 318-336.

3. Callet 2016, 9-13.

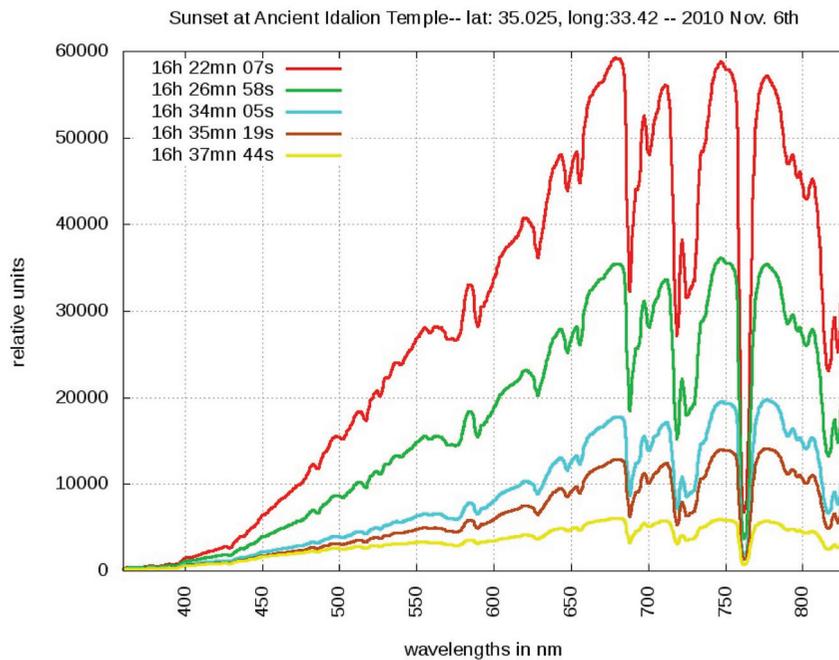


Fig. 7. Le spectre de la lumière solaire reçue au sol dans la dernière heure du couchant (P. Callet).

Afin de caractériser les verres médiévaux et de s'approcher au mieux de leurs propriétés optiques nous avons décidé d'entreprendre une étude générale des verres. À l'aide de productions récentes de la verrerie Saint Just un ensemble de 180 échantillons de verres colorés a fait l'objet de mesures par ellipsométrie spectroscopique. Le but étant de trouver l'indice de réfraction complexe des verres. En effet, cette notion est la seule pertinente pour donner des simulations précises dans une démarche "physiquement réaliste". La caractérisation des verres à l'aide des deux fonctions spectrales qui forment l'indice de réfraction complexe permet de faire varier la clarté du verre en ne jouant que sur l'épaisseur du verre à composition constante. Les maîtres verriers découpaient les feuilles de verre de façon à pouvoir y choisir la clarté (plus fin est le verre et plus clair il est) comme paramètre. Cette étude pourtant fort intéressante n'a cependant pas été appliquée à Royaumont dès lors que nous admettions que le vitrage était constitué de verre en grisaille.

Concernant la lumière naturelle, solaire et directe, nous avons étudié parallèlement ce qu'il se passait au solstice d'été sur la façade de la cathédrale Notre-Dame de Paris au XIII<sup>e</sup> siècle<sup>4</sup>, dans le cadre du jubilé (les 850 ans de la vieille Dame) en 2013. Nous avons alors appliqué les mêmes principes de correction de la position du soleil (lever et coucher à une date précise), à savoir une précession des équinoxes d'un angle de

50" par an. Négligeable sur la durée de vie humaine... mais plus du tout pour 850 ans. La correction de positionnement angulaire du soleil est alors d'environ 12°. Cela a pour effet de rendre plus frontale la lumière du couchant pour le solstice d'été, le jour le plus long de l'année, la fête de la lumière avant tout... *ad majorem Dei gloriam*, en quelque sorte.

Ainsi, nous avons caractérisé autant que possible les couleurs matières de la sculpture polychrome, les couleurs lumières issues du vitrail, et replacé le soleil dans le ciel : il restait alors à calculer les images.

Le spectre solaire qui se déforme au cours d'une même journée par la variation de la longueur parcourue par la lumière dans l'atmosphère est décrit ici dans la dernière heure du couchant (fig. 7). Il est utilisé dans les simulations.

#### Principe du calcul spectral des images

S'il est nécessaire de caractériser les matériaux et les sources de lumière en présence, il est tout aussi important de définir l'observateur. Pour les commodités et les facilités d'échange, de comparaison de résultats de modèles, il est pertinent de définir des observateurs colorimétriques de référence. Ils sont caractéristiques de la vision humaine moyenne et dépendent du niveau d'éclairement dans lequel baigne la scène représentée. Nous utilisons ici l'observateur colorimétrique de référence CIE 164 (10°).

La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a défini plusieurs observateurs colorimétriques de référence. Le champ visuel d'ouverture angulaire de 10° mentionné est adapté à la vision de jour, donc à des couleurs et pour un niveau

4. Callet 2010, 20-30.

## Le tristimulus

L'espace colorimétrique virtuel CIE XYZ permet le calcul de toutes les grandeurs photométriques ; il est le pivot de toutes les transformations d'espaces colorimétriques. Les nombres ci-après définissent les trois composantes du tristimulus.

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda, \theta_S, \phi_S) R(\lambda, \theta_i, \theta_r) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda, \theta_S, \phi_S) R(\lambda, \theta_i, \theta_r) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda, \theta_S, \phi_S) R(\lambda, \theta_i, \theta_r) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

où la constante

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda, \theta_S, \phi_S) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

est obtenue par normalisation de la composante Y de manière à ce qu'à la longueur d'onde de 560 nm on ait  $Y = 100$ . Le facteur de réflectance  $R(\lambda, \theta_i, \theta_r)$  est ici écrit avec les variables angulaires pour inclure la description de la BRDF (bi-directional reflectance distribution function) en tant que facteur de réflectance pour tout angle d'observation ou d'éclairage. Les fonctions  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  et  $\bar{z}(\lambda)$  sont les fonctions colorimétriques caractérisant la sensibilité spectrale de l'observateur colorimétrique de référence utilisé dans la simulation (ici CIE 1964 avec 10° d'ouverture du champ visuel).  $S(\lambda, \theta_S, \phi_S)$  désigne le solide photométrique caractérisant la source de lumière (composition spectrale et répartition spatiale de l'émission).

Fig. 8. Le principe de calcul du tristimulus (X,Y,Z) (P. Callet).

d'éclairage important. L'observateur ainsi caractérisé est appelé "photopique" alors que pour la vision crépusculaire il est nommé "mésopique" et "scotopique" pour la vision nocturne, celle-là même où la notion de couleur a disparu.

La simulation spectrale consiste à calculer ce qu'un œil humain moyen et normalement sain verrait s'il était plongé dans les mêmes conditions d'environnement que dans la scène imaginée à l'aide d'un modèleur 3D. Tous les matériaux et sources de lumière doivent être spectralement définis, caractérisés et avec une résolution en longueur d'onde suffisante. Ici, nos simulations sont obtenues pour 81 bandes spectrales de largeur 5 nm uniformément réparties dans l'intervalle visible de 380 à 780 nm de longueurs d'onde. Ce qui est vu par un œil virtuel est ainsi appelé "tristimulus" et noté (X,Y,Z). Une fois ce tristimulus calculé, en fait les trois intégrales du produit de la réflectance du matériau observé, du spectre d'émission de la source utilisée et des sensibilités spectrales des trois familles de photorécepteurs de l'œil, nous pouvons convertir ces trois nombres dans l'espace colorimétrique de notre choix.

Pour l'affichage sur écran, la plupart du temps, cette transformation est appelée "tone mapping" en anglais. Elle consiste à adapter au support de visualisation le tristimulus calculé (X,Y,Z) en un triplet (R,V,B) par exemple. Sur ce principe de calcul, il est tout à fait envisageable de remplacer l'œil humain par une caméra ou un appareil photo connus de

manière à produire des images caractéristiques qui seraient produites par ces instruments.

Pour comprendre la nécessité du calcul de simulation spectrale lorsqu'on cherche une restitution physiquement réaliste, on peut considérer l'exemple suivant. La pyrite, sulfure de fer, appelé "l'or des fous" a un éclat métallique et légèrement doré en lumière naturelle. Si l'on décrit ses propriétés de réflexion de la lumière en mode trichromatique (R,V,B) seulement, lorsque qu'elle sera vue sur écran elle apparaîtra grise. Cela est parfaitement cohérent et fournit une apparence totalement éloignée de ce que l'on voit avec nos yeux. Pourquoi est-ce donc si différent en trichromatique et en spectral ? Parce que les longueurs d'onde associées au triplet chromatique (R,V,B) sont respectivement 700 nm, 535 nm et 438 nm et le jaune est précisément situé entre la valeur pour le rouge et celle pour le vert, il ne peut être restitué puisqu'il ne possède aucune composante ni en rouge ni en vert.

### Le logiciel de simulation

La simulation spectrale s'appuie sur un logiciel libre et "open source" développé à l'École Centrale Paris, dans les années 2000. Ce logiciel de simulation spectrale, Virtuelium, peut manipuler des longueurs d'onde, soient fixées d'avance avec un pas d'échantillonnage déterminé soient énumérées dans un fichier scène au format "xml". Il est donc possible d'avoir une précision de calcul colorimétrique très élevée

en échantillonnant une zone particulière des spectres qui seront manipulés. Autre caractéristique du logiciel, il s'appuie principalement sur la manipulation de données les plus fondamentales possibles telles que les indices de réfraction complexes des matériaux et milieux de propagation de la lumière. Les matériaux y sont décrits par ces indices ou par des spectres de réflexion diffuse ou encore par des constantes de diffusion et d'absorption (cas des poudres pigmentaires) comme les grandeurs K et S de la théorie de Kubelka et Munk<sup>5</sup> ou le modèle de diffusion macroscopique de Melamed (corrigé). Pour ce qui est de la lumière, plusieurs illuminants normalisés par la CIE sont enregistrés (A, C, D65, D55, F1 à F12) et il est bien entendu possible, c'est ce qui est fait pour la lumière solaire, d'utiliser directement le spectre solaire mesuré au sol à différentes dates et heures pour un lieu donné. Pour le projet ici décrit, nous avons aussi effectué des mesures de spectres d'émission de lampe à huile, de chandelles de cire d'abeille et également, pour comparaison, de bougies modernes de stéarine. La lumière médiévale de la chandelle de cire est sensiblement plus rougeâtre que celle des cierges ou bougies d'aujourd'hui. Toutes ces mesures sont directement accessibles au logiciel *Virtuelium*. Quant à l'observateur colorimétrique de référence utilisé, il peut être choisi parmi toutes les descriptions recommandées par la CIE. Deux algorithmes de calcul d'image sont présents : le tracé spectral de rayons et le photon-mapping.

#### Le film vidéo

Le film vidéo<sup>6</sup> produit dans le cadre de l'année Saint Louis fut réalisé avec le logiciel libre déjà mentionné, Blender. Les simulations spectrales étant beaucoup plus longues que les calculs trichromatiques, elles ont servi à définir les meilleurs paramètres pour Blender. Ce film-diaporama a été présenté en boucle à la Conciergerie pendant l'exposition qui s'est achevé fin janvier 2015.

#### CONCLUSION

Nous avons décrit le processus d'interaction de la lumière avec les matériaux de la période médiévale occidentale du monde chrétien ; nous avons aussi montré comment nous pouvions nous donner à voir ce qui devait s'offrir au regard de nos prédécesseurs du XIII<sup>e</sup> siècle. Il est important de faire observer que l'œil de l'homme d'aujourd'hui est tout aussi performant que celui de l'homme médiéval, l'évolution se faisant sur des dizaines de milliers d'années au moins. Cependant, la vision des couleurs des objets du passé, si elle est restituée au mieux, dans la limite des possibilités des théories physiques d'aujourd'hui, ne peut correspondre à ce que percevait (et non seulement "recevait") l'homme médiéval. L'interprétation des couleurs, le filtre culturel que cela représente, même s'il

est globalement connu, ne peut (et ne pourra sans doute jamais) restituer la charge émotionnelle véhiculée par la vision et interprétée par le cerveau.

Ce qu'il resterait à faire ?

Replacer un ou plusieurs gisants (les tombeaux ou plutôt les cénotaphes complets) dans la maquette 3D de l'église abbatiale de Royaumont. Retrouver les emplacements et les orientations desdits gisants, achever les ornements dorés des vêtements en étudiant plus précisément les motifs, ajouter des lampes suspendues si l'hypothèse de leur présence est suffisamment fiable, s'assurer de la pertinence des carreaux de sol choisis ; malgré la vraisemblance de nos choix, la question du brillant des carreaux reste posée. Idem, pour les tuiles glaçurées qui pouvaient, et selon quels motifs, recouvrir la toiture, etc. Mais le plus extraordinaire pour cet édifice et la simulation qui pourrait être réalisée serait de faire "sonner" l'édifice correctement<sup>7</sup>. Nous savons que l'abbaye pouvait accueillir jusqu'à 120 moines. Imaginons-les descendre l'escalier du dortoir, un à un, dans un ordre préétabli en psalmodiant pour rejoindre leur place dans les stalles. L'acoustique du lieu se prêtait particulièrement aux louanges envahissant progressivement tout l'espace. En terme de simulation, il serait intéressant de pouvoir restituer – en temps réel – au sein de l'architecture l'arrivée des moines et ouïr leur chant, en "ajoutant" ces sources sonores itinérantes progressives. Il semblerait aussi intéressant, du point de vue de la simulation acoustique de considérer l'hypothèse, vérifiée en quelques autres édifices, de pots acoustiques (céramiques creuses encastrées dans les murs en quelques endroits judicieusement choisis pour éviter les échos et/ou magnifier certains sons). Les propriétés acoustiques de ces constructions peuvent être étudiées scientifiquement, les matériaux, pour la plupart, étant parfaitement connus. Du pigment au pixel, un voyage dans le temps qui, en fait n'en est toujours qu'à son commencement. Voir le passé, imaginer l'avenir... c'est bien ce que nous apprend ce genre d'aventure au carrefour des arts, des sciences et des technologies.

5. Callet 2017, 21-25.

6. Denizet 2006.

7. Gbikpi-Benissan 2016.

## Bibliographie

- Callet, P. (2008) : "Sur les traces des couleurs perdues", *Pour La Science*, 366, Paris, 82-88.
- (2016) : *Simulation spectrale pour le patrimoine culturel*, édition du Centre Français de la Couleur, Paris.
- (2017) : *Couleur et apparence visuelle-Transparent, translucide, opaque*, collection Sciences fondamentales | Physique Chimie, éditions Les Techniques de l'Ingénieur, [En ligne] AF3252 V2 mis en ligne le 10 janvier 2017, consulté le 15 septembre 2018. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/optique-physique-42528210/couleur-et-apparence-visuelle-af3252/>
- Callet, P., Dumazet, S., Leclercq, C. et Politi, C. éd. (2010) : *Natural Lighting, Gilt and Polychromy of Notre-Dame de Paris Cathedral*, 11<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST, Paris, 63-70.
- Ritz-Guilbert, A. (2016) : *La collection Gaignières, Un inventaire du royaume au XVI<sup>e</sup> siècle*, Paris.
- Gbikpi-Benissan, G., Callet, P. et Magoulès, F. (2016) : "Spectral Domain Decomposition Method for Physically-Based Rendering of Royaumont Abbey", in : *2016 IEEE Intl Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE Intl Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC) and 15th Intl Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering (DCABES), Aug 2016*, Paris, 379-385.
- Denizet, P. (2006) : *Sur les traces des couleurs perdues*, Film vidéo (29 mn), URL: <https://www.dailymotion.com/video/xr911j>

