

La reconstruction du panorama de la « Tapisserie de Bayeux » comme fond de référence d'un système d'information documentaire spatialisée

Algorithmes de traitement d'images dédiés à la construction d'un panorama et au recalage d'images sur le panorama

The reconstruction of the Bayeux tapestry panorama as a reference tool for a spatialised system of documentary information. Image-processing algorithms devoted to panorama construction and plotting of images on this panorama

Clémentine Berthelot, Katia Zidane, Abderrahim El Moataz, Régis Clouard, Arnaud Daret, Antoine Verney et Cécile Binet



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/insitu/21817>
DOI : 10.4000/insitu.21817
ISSN : 1630-7305

Éditeur

Ministère de la Culture

Référence électronique

Clémentine Berthelot, Katia Zidane, Abderrahim El Moataz, Régis Clouard, Arnaud Daret, Antoine Verney et Cécile Binet, « La reconstruction du panorama de la « Tapisserie de Bayeux » comme fond de référence d'un système d'information documentaire spatialisée », *In Situ* [En ligne], 39 | 2019, mis en ligne le 31 mai 2019, consulté le 11 juillet 2019. URL : <http://journals.openedition.org/insitu/21817> ; DOI : 10.4000/insitu.21817

Ce document a été généré automatiquement le 11 juillet 2019.



In Situ Revues des patrimoines est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

La reconstruction du panorama de la « Tapisserie de Bayeux » comme fond de référence d'un système d'information documentaire spatialisée

Algorithmes de traitement d'images dédiés à la construction d'un panorama et au recalage d'images sur le panorama

The reconstruction of the Bayeux tapestry panorama as a reference tool for a spatialised system of documentary information. Image-processing algorithms devoted to panorama construction and plotting of images on this panorama

Clémentine Berthelot, Katia Zidane, Abderrahim El Moataz, Régis Clouard, Arnaud Daret, Antoine Verney et Cécile Binet

Introduction

La « Tapisserie de Bayeux »

- 1 La « Tapisserie de Bayeux » est une création presque millénaire, datant de la fin du XI^e siècle, qui relate l'accession au trône d'Angleterre du duc de Normandie Guillaume le Conquérant en 1066. Elle est reconnue par la communauté scientifique et le grand public, à l'échelle internationale, comme une œuvre d'art d'exception qui témoigne d'un événement majeur de l'histoire de l'Europe médiévale et constitue par ailleurs une source documentaire de premier plan sur la société du XI^e siècle¹.
- 2 Premier objet mobilier classé au titre des monuments historiques (liste de 1840), inscrite en 2007 au registre « Mémoire du monde » de l'Unesco², l'œuvre, propriété de l'État, est

déposée dans la collection « musée de France » de la Ville de Bayeux³ et exposée au Centre Guillaume le Conquérant (musée de la Tapisserie de Bayeux) depuis 1983.

- 3 Improprement appelée « tapisserie », cette longue tenture narrative continue de près de 70 m de long sur 50 cm de haut est une broderie de laine sur toile de lin.

Richesse de l'iconographie et référencements

- 4 L'une des caractéristiques majeures de cette œuvre est sa grande richesse iconographique qui se déploie sur une frise historiée principale encadrée de deux bordures. Pour le grand public, la narration se compose de 58 scènes, dont les repères numérotés sont inscrits sur une bande de toile ancienne de 20 cm de haut placée au-dessus de la toile brodée mais largement postérieure à celle-ci.
- 5 À ces dimensions exceptionnelles s'associe un très grand nombre de figures qui constituent autant de thèmes d'étude, isolément ou dans leurs relations entre elles. Simone Bertrand, conservatrice de la Tapisserie de 1948 à 1978, qui a tenté de les dénombrer individuellement, a recensé 1 515 items : 626 personnages, 505 animaux différents, 202 chevaux et mulets, 55 chiens, 49 arbres, 41 vaisseaux et barques, 37 bâtiments et édifices variés⁴. Mais, comme elle le souligne, malgré plusieurs tentatives, ce résultat reste approximatif tant les éléments sont diversifiés et parfois difficilement identifiables. Ainsi, l'indexation thématique de l'ensemble des figures iconographiques proposée par Michael Lewis en 2005 dénombre 627 personnages, 33 bâtiments, 37 navires, 737 animaux, 23 arbres et 416 autres éléments végétaux⁵.
- 6 On le voit, cette œuvre est une source d'une richesse incomparable pour qui – chercheurs comme grand public – s'intéresse à la représentation de la société du XI^e siècle. Elle a ainsi fait l'objet d'un très grand nombre d'ouvrages qui sont autant de regards sur cette iconographie. L'analyse de la bibliographie par Shirley-Ann Brown en montre le poids et la diversité depuis la « redécouverte » de l'œuvre par le monde scientifique au début du XVIII^e siècle⁶. Ces auteurs, en particulier ceux qui se trouvent de part et d'autre de la Manche, contribuent à enrichir la connaissance de la Tapisserie en se focalisant, plus ou moins précisément, sur les éléments iconographiques. Cependant, la longueur de l'œuvre est souvent une limite à la description et à l'argumentation. Certains auteurs choisissent ainsi de proposer des reproductions de la Tapisserie dans leurs ouvrages et de s'y référer par planches illustrées. D'autres tentent de s'appuyer sur des systèmes de « géolocalisation » plus ou moins bien connus des lecteurs afin de les aiguiller, à défaut de reproduction. Parmi ceux-ci, le plus connu en France est probablement celui qui se réfère à la numérotation proposée sur la bande de toile dite « bande numérotée », visible et faisant partie intégrante de l'œuvre mais imprécise dans sa délimitation, si bien que les variations sont nombreuses selon les auteurs. D'autres proposent de se repérer à partir des inscriptions latines séparant les scènes, mais là encore, cela manque parfois de précision. Côté britannique, deux volumes, qui ont connu une assez large diffusion et proposent chacun une reproduction de la Tapisserie, servent parfois de référence aux auteurs⁷.
- 7 Ainsi, si l'étude de l'iconographie impose de se référer constamment à un système de repérage afin de garantir la lisibilité de l'argumentaire, la longueur de la Tapisserie (près de 70 m) et le grand nombre de ses figures font de la localisation des motifs dans l'œuvre tout entière un sujet particulièrement important. Les méthodes pour s'y référer demeurent malgré tout multiples et aucun consensus, aucune méthodologie précise,

accessible et universelle de « géoréférencement » sur la Tapisserie n'existe à ce jour. L'enjeu de la reproduction de l'œuvre est lui-même limité par l'édition papier, l'impression imposant des contraintes matérielles comme le découpage systématique en autant de planches que nécessaire, au détriment d'une bonne vision d'ensemble de la frise brodée⁸.

- 8 Si rien ne peut remplacer la confrontation directe avec la monumentalité de l'œuvre originale *in situ*, le numérique offre aujourd'hui de nouveaux outils susceptibles de proposer à la communauté scientifique et au grand public un accès documentaire renouvelé. Cette volonté de faciliter l'accès à sa connaissance est l'un des principes qui ont fondé le projet de restructuration du musée de la Tapisserie de Bayeux à l'horizon 2024.

Le projet de restructuration du musée de la Tapisserie de Bayeux et le « système d'information documentaire spatialisée » (SIDS)

- 9 Ce projet, né en 2013 autour du concept de « Centre de compréhension de l'Europe du Moyen Âge », a été lancé par l'État (DRAC Normandie), le conseil départemental du Calvados et la Ville de Bayeux afin d'améliorer les conditions de conservation, de présentation et d'accès à l'œuvre. Activement appuyé par le conseil régional de Normandie, il s'est développé en une phase d'étude (faisabilité, 2013-2017), puis de programmation (2017-2020), devant aboutir à une phase de réalisation à l'horizon 2024. Dans ce cadre, le volet numérique est particulièrement ambitieux puisqu'il s'est concrétisé par la conception et le développement d'un outil innovant, un « système d'information documentaire spatialisée » (qu'on appellera ici « SIDS »), visant à offrir un accès numérique à l'œuvre et à proposer une méthodologie de « géoréférence » universelle à destination de la communauté scientifique dans un premier temps (conservateurs, restaurateurs, historiens, historiens de l'art, archéologues...) et du grand public dans un second temps. En effet, dès le début du projet, le groupe des experts constitué autour de la DRAC et de la Ville de Bayeux pour élaborer le programme d'étude préalable aux actions de conservation-restauration a préconisé le rassemblement de l'ensemble de la documentation dispersée entre Paris, Charenton-le-Pont⁹, Caen et Bayeux afin de comprendre l'histoire matérielle de l'œuvre¹⁰. La création d'un système dont les principes s'approchent d'un « SIG » propre est très vite apparue comme indispensable, support de l'interprétation des spécialistes appelés à élaborer un nouveau constat d'état et futur support de la découverte de la matérialité et de l'iconographie par le grand public¹¹.
- 10 Le projet de SIDS a été lancé en 2016, dans le cadre d'un partenariat conventionné entre les porteurs du projet, l'État et la Ville de Bayeux, et les maîtres d'œuvre, à savoir l'Université de Caen-Normandie et le CNRS, à travers différents laboratoires coordonnés autour de la direction de la Maison de la recherche en sciences humaines (MRSH). Ces laboratoires, rassemblant des domaines de compétence variés, sont le CERTIC (Centre de ressources technologiques pour les TIC/DSI¹²), le PDN (Pôle Document numérique/MRSH) et le GREYC (Groupe de recherche en informatique, image, automatique et instrumentation de Caen/Unicaen-Ensicaen). Le SIDS est un outil d'indexation de l'ensemble de la documentation relative à la Tapisserie de Bayeux, « géoréférencée » sur une reproduction numérique haute définition de l'œuvre. L'interface propose un fond de référence, réalisé grâce à une captation sous différents éclairages, menée en janvier 2017

sous la maîtrise d'ouvrage de l'État par le pôle Conservation-restauration numérique de la Fabrique de patrimoines en Normandie. L'utilisateur peut naviguer dans ce fond de référence grâce à différents systèmes de localisation (numéros de scènes, inscriptions en latin, mais aussi des systèmes de localisation propres à certains experts, et d'autres qui viendront enrichir cette liste), y indexer de l'information sur des « zones d'intérêt » géolocalisées, en extraire les objets issus de la base de données documentaire dédiée au projet, et y plaquer différentes couches d'images, anciennes ou récentes¹³. Ainsi, au-delà de constituer le fond de référence du système d'information documentaire spatialisée, cette captation permet à l'utilisateur de naviguer librement dans l'œuvre, avec la possibilité de zoomer et, après traitement de la couverture photographique du revers réalisée en 1982 par le service de l'Inventaire général de Basse-Normandie (Pascal Corbierre) et le service des Archives photographiques de l'État (Jean Gourbeix), de confronter les deux panoramas pour que l'utilisateur puisse les comparer¹⁴.

- 11 Ce dispositif étant en premier lieu un outil de visualisation de la Tapisserie, la question du traitement des images a été l'une des premières problématiques envisagées lors de sa conception. En effet, la création du fond de référence a posé différents problèmes, inhérents à la nature même de cette œuvre textile dont la structure est mouvante. Le GREYC, en lien avec l'ensemble des équipes en charge du projet, a donc proposé des solutions logicielles basées sur des algorithmes de traitement et d'analyse d'images permettant de réaliser un panorama de l'œuvre, de résoudre les problèmes de recalage d'images particulières sur ce panorama (calques utilisés lors de la campagne d'étude de 1982-1983) et de recalibrer des images historiques issues de campagnes antérieures.
- 12 Les solutions proposées étant basées essentiellement sur le recalage d'images, après une présentation du contexte et des objectifs des travaux, nous en présenterons le principe et sa formulation générale. Nous détaillerons ensuite l'état d'avancement des travaux concernant la construction du fond de référence par assemblage automatique d'images numériques de la Tapisserie (« *stitching* ») et la création d'un panorama, ainsi que le recalage semi-automatique d'images de calques sur ce fond de référence.

Création d'un panorama de la Tapisserie de Bayeux

Contexte et objectifs

- 13 Dans le cadre du volet « Études » du projet de restructuration du musée de la Tapisserie, une couverture complète de la face en prises de vues multi-spectrales a été effectuée en janvier 2017 par les équipes de la Fabrique de patrimoines en Normandie¹⁵, après des tests préalables réalisés en 2016 par le Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) pour en définir la faisabilité et la pertinence. Comme cela a été mentionné plus haut, elle avait notamment pour objectif de documenter l'état actuel de la Tapisserie et de servir de support à différents programmes de recherche comme le SIDS, référence alimentant la base de données géoréférencées comme « support cartographique ».
- 14 Cette numérisation a permis d'obtenir une couverture complète de la Tapisserie sous la forme d'une série de 86 images, de 8 000 x 6 000 pixels environ chacune, sous différentes modalités : lumière directe, réflexion infrarouge et fluorescence ultraviolet. Chaque série d'images consécutives possède une zone de recouvrement qui facilite l'assemblage en

continuité. Dans la figure 1, on observe cette zone de chevauchement sur les deux premiers clichés de la couverture photographique en lumière directe (**fig. 1**).

Figure 1



Deux premiers clichés de la couverture photographique en lumière directe. Détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle.

Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa), janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

- 15 Il faut noter que si les images en lumière directe permettent de réaliser une première couverture numérique de la Tapisserie en haute définition en ouvrant la voie à la constitution d'un fond de référence pour le SIDS, d'autres images obtenues avec différentes modalités apportent des informations complémentaires pouvant accompagner les études de constat d'état de l'œuvre, étape préalable indispensable à toute programmation d'intervention en matière de conservation préventive ou de restauration. Ainsi, les images en fluorescence ultraviolet mettent-elles en évidence certains matériaux de restauration (**fig. 2**). D'autres images, comme celles obtenues par réflexion ultraviolet et converties en fausses couleurs, révèlent quant à elles des altérations du support de la Tapisserie comme les taches¹⁶.

Figure 2



Deux premiers clichés de la couverture photographique en fluorescence ultraviolet. Détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle.

Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa), janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

- 16 Dans le cadre du projet de SIDS, cette campagne d'imagerie a permis de générer un ensemble de couvertures photographiques ayant vocation à servir de référence pour l'interface de la base de données géoréférencées. Ainsi, la couverture en lumière directe, une fois recalée, offre le panorama servant de fond sur lequel la documentation sera géoréférencée. Cette série de clichés fait donc l'objet d'un traitement particulier, et tient

lieu de support à la création d'un algorithme de traitement automatique d'images destiné à recréer le panorama complet de l'œuvre à partir de l'ensemble des clichés.

- 17 Pour réaliser cette seule couverture photographique, un traitement manuel, bien que très long et fastidieux, aurait été possible mais l'intérêt majeur de ce dispositif est de permettre la répétition de ces opérations sur d'autres couvertures photographiques. Par conséquent, cet algorithme devra accompagner le travail de reconstitution de multiples panoramas, dont le nombre, qui ira croissant avec les futures opérations d'imagerie sur l'œuvre, rend impossible le recours à des opérations manuelles. De plus, les multiples interventions nécessaires sur les images sources, toujours en cours, en raison des contraintes de captation (intervalle de temps pour la captation, déplacement de la broderie, local d'exposition, matériel de captation), imposent de re-générer fréquemment le panorama pour valider les traitements intermédiaires.

Définitions et formulation générale

- 18 Le recalage d'images est un terme très générique qui indique une mise en correspondance spatiale d'images ou de points de contrôle extraits des images pour comparer ou combiner leurs informations respectives. Cette mise en correspondance se fait par la recherche d'une transformation géométrique permettant de passer d'une image à une autre. Sous cette définition apparemment simple, beaucoup de méthodes et d'approches pour le recalage ont été proposées dans la littérature¹⁷. Ces méthodes peuvent correspondre à différents types de recalage selon que les images proviennent d'une même source ou de plusieurs : recalage mono-modal, recalage multimodal, recalage modalité/modèle recalage temporel, etc.
- 19 Le problème du recalage d'images peut être formulé d'une manière générale sous la forme de minimisation d'une fonctionnelle de la forme :

$$\min_{t \in T} J(f, t(g))$$

- 20 où f, g sont les deux images à recaler, t une transformation géométrique, T un ensemble de transformations géométriques admissibles et J un critère de similarité à minimiser.
- 21 Les composantes d'un système de recalage dépendent alors de la nature de la transformation t et de son domaine de définition T , des primitives utilisées (sur quoi portent J et t), du critère de similarité et de la méthode d'optimisation considérée.

Élaboration d'un algorithme de construction du fond de référence

- 22 Point de départ du travail pour ce vaste projet, pierre angulaire du système de référencement et support essentiel de la re-documentarisation de la Tapisserie de Bayeux, la construction du fond de référence constitue une problématique fondamentale et complexe : nombreuses images sources nécessaires, caractéristiques hors normes du fichier généré, contraintes techniques et matérielles, contraintes d'utilisation finale. L'enjeu de cette reconstruction est à la hauteur de l'importance de l'œuvre.
- 23 Il existe sur le marché des logiciels permettant de réaliser manuellement des opérations d'assemblage de photos (*Photoshop*, *Gimp*...). Une étude de faisabilité a été réalisée au début de notre réflexion afin de déterminer dans quelle mesure il serait possible de les

utiliser pour assembler les images constituant le panorama de référence. Sans surprise, cette étude a démontré que l'opération s'avérerait longue et coûteuse, puisqu'il a fallu plusieurs jours à un opérateur pour reconstituer manuellement les trois premiers mètres de la Tapisserie. De plus, un photomontage panoramique « classique » risquait de faire perdre un certain nombre d'informations aux frontières des images, ce qui n'est pas acceptable pour le projet qui nous occupe. Ce procédé n'était donc pas envisageable, d'autant que l'opération devait être répétée pour les expérimentations et la mise en production finale.

- 24 Nous avons également testé différents logiciels utilisant des algorithmes de recalage automatique mais leur capacité de reconstruction reste limitée à quelques images puisqu'ils nécessitent de charger en mémoire toutes les images en même temps. Le non-contrôle des paramètres induit des transformations géométriques et colorimétriques qui modifient complètement l'image et entraînent une perte de qualité.
- 25 L'algorithme que nous avons développé a vocation à pallier ces problèmes de logiciels basés sur le recalage semi-automatique ou automatique.
- 26 Notre solution logicielle repose sur les six étapes correspondant aux composantes d'un système de recalage :
- 27 1 - Détection de points de contrôle dans les parties de recouvrement des deux images à assembler.
- 28 2 - Mise en correspondance de ces points de contrôle.
- 29 3 - Estimation des paramètres de transformation ; des méthodes de minimisation ont été utilisées.
- 30 4 - Élimination des points aberrants pour optimiser l'estimation de la transformation.
- 31 5 - Application de la transformation, qui est réalisée par interpolation bilinéaire.
- 32 6 - Affinement des résultats par fusionnement (« *Blending* »).

Détection des points de contrôle

- 33 Notre objectif est de trouver des points de contrôle stables, invariants aux changements d'illumination, d'échelle, de rotation, et aux modifications mineures d'échelle dues à des déformations de la Tapisserie. Nous avons choisi d'implémenter l'opérateur SIFT¹⁸, (*Scale Invariant Feature Transform*) développé, largement analysé et utilisé en recalage d'images¹⁹. L'opérateur SIFT est divisé en 4 étapes que l'on peut résumer ainsi :
- 34 - Détection des *extrema* dans l'espace des échelles : elle est implémentée en utilisant la différence de 2 gaussiennes avec différentes échelles et en traversant l'espace échelle.
- 35 - Localisation des points de contrôle.
- 36 - Distribution des orientations en utilisant un gradient local.
- 37 - Attribution d'une signature à chaque point de contrôle.

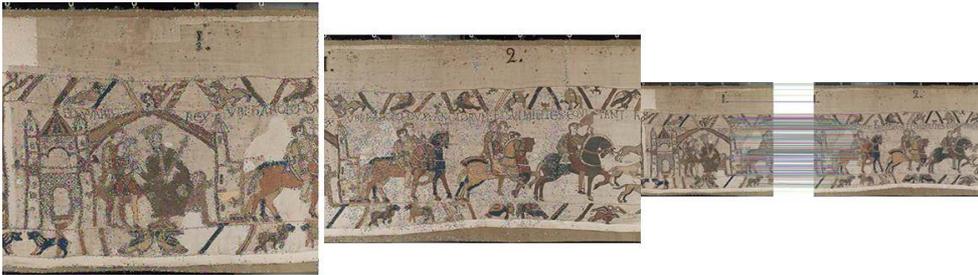
Correspondance des points de contrôle

- 38 Après avoir détecté les points de contrôle dans les deux images à assembler, associés par leurs descripteurs, il s'agit de trouver une correspondance entre ces deux points. Cette dernière a été établie par la méthode de ratio faible en utilisant la somme carrée des écarts comme mesure de similarité entre les descripteurs.

Estimation de la transformation

- 39 Au vu des différentes déformations qui peuvent exister entre les images à assembler, plusieurs types de transformations peuvent être utilisés, en exploitant la correspondance établie entre les points de contrôle. Dans notre cas, nous avons utilisé une transformation globale rigide (translation et rotation) suivie d'une transformation locale élastique. La figure 3 illustre la détection des points de contrôle par la méthode SIFT et leurs correspondances (**fig. 3**).

Figure 3



Détection et correspondance des points de contrôle. Université de Caen Normandie, CNRS / GREYC - ENSICAEN, K. Zidane, A. Elmoataz, R. Clouard, octobre 2017. Réalisés à partir des détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle.

Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa, janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

Application de la fonction de transformation

- 40 Après l'estimation des paramètres de la fonction de transformation, nous procédons à l'alignement des deux images. L'application directe de la fonction de transformation peut créer des trous ou des sauts. Nous procédons alors à un calcul de l'inverse de la matrice des paramètres puis nous transformons le système de coordonnées de la première image (référence) vers celui de la seconde image. Cela donne des coordonnées réelles qu'il faut interpoler. Pour cela, nous utilisons l'interpolation bilinéaire. La figure 4 illustre un exemple de construction d'une suite de quatre images prises selon deux modalités différentes (lumière directe et fluorescence ultraviolet) (**fig. 4**).

Figure 4



Construction d'images mosaïques à partir des quatre premiers clichés des deux couvertures photographiques en lumière directe et fluorescence ultraviolet. Université de Caen Normandie, CNRS / GREYC - ENSICAEN, K. Zidane, A. Elmoataz, R. Clouard, octobre 2017. Réalisés à partir des détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle.

Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa, janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

- 41 Le fond de référence construit est un fichier au format TIFF⁶⁴²⁰, tuilé pyramidal²¹. Son poids est d'environ 14 Go. Pour le recalage, il est possible d'utiliser la version en pleine résolution avant tuilage pyramidal qui permet de réduire le poids du fichier support de travail à 10 Go.

- 42 Le démonstrateur qui résulte de ces différents travaux se présente comme un système avec plusieurs fonctionnalités : visualisation, zoom d'une image, assemblage d'images. La figure 5 est une capture d'écran de quelques scènes du panorama de la Tapisserie construit automatiquement (fig. 5).

Figure 5



Capture d'écran du logiciel. Aperçu des détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle. Université de Caen Normandie, CNRS / GREYC - ENSICAEN, K. Zidane, A. Elmoataz, R. Clouard, octobre 2017. Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa), janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

Recalage semi-automatique d'images de calques sur le panorama de la Tapisserie de Bayeux

Contexte et objectifs

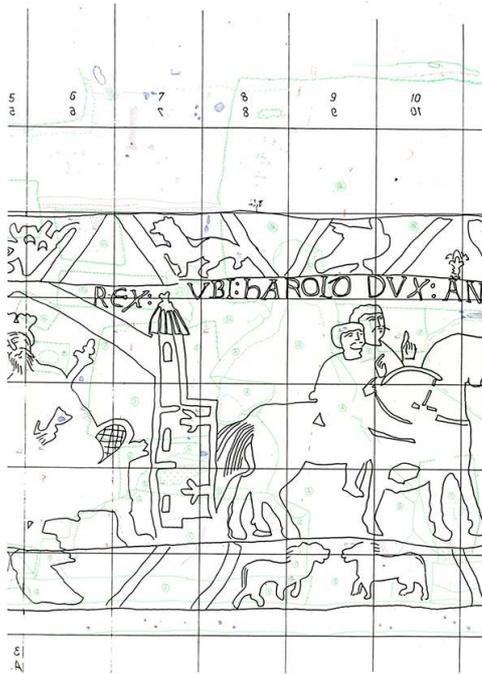
Le recalage de couches de données sur le fond de référence

- 43 Parallèlement à la création du panorama, un autre type de « recalage » présente un intérêt majeur pour l'enrichissement du SIDS qui a pour vocation de devenir la référence faisant autorité pour l'étude de la Tapisserie.
- 44 Étant donné le nombre important de campagnes photographiques existantes, utiles aussi bien pour l'étude de l'état matériel de l'œuvre que pour celle de son iconographie, le regroupement et l'affichage par couche conviennent particulièrement à un système de type SIG. L'idée est de créer une couche de données par collection comme on crée habituellement une couche thématique sur un SIG (couche des chemins de fer, couche des cours d'eau, etc.). La caractéristique mouvante de l'œuvre, ainsi que les conditions hétérogènes des prises de vue, font qu'il est impossible de poser une photo issue d'une campagne directement sur le fond de référence de la Tapisserie. Un recalage entre l'image et le fond est nécessaire. Ce recalage doit donc pouvoir être réalisé sur des images numériques provenant de différentes sources, produites par différents capteurs et à différentes époques. Elles représentent le même objet déformable à des instants ou selon des modes de prise différents.

Un lot particulier : les calques de la campagne d'étude de 1982-1983

- 45 La projection des calques ayant servi d'outil d'annotation lors de la dernière opération de constat d'état de la Tapisserie, dans l'hiver 1982-1983, a constitué le premier travail de recalage d'images sur le fond de référence généré.
- 46 Lors du transfert du musée de la Tapisserie de ses anciens locaux (hôtel du Doyen) à son nouvel – et actuel – emplacement (Centre Guillaume le Conquérant), durant l'hiver 1982-1983, la Tapisserie de Bayeux fut déménagée et on profita de ce mouvement pour réaliser une opération de constat d'état de l'œuvre, sur une durée de trois mois (novembre 1982 - janvier 1983). Cette étude, sous la maîtrise d'ouvrage de l'État (conservation régionale des Monuments historiques – sous la responsabilité de François Macé de Lépinay, inspecteur des monuments historiques), fut la première à s'intéresser spécifiquement au revers de l'œuvre, qui fut dédoublée pour l'occasion. De cette campagne, qui vit la participation de plusieurs laboratoires, a résulté un certain nombre de rapports, dont notamment celui de l'équipe de restauratrices en charge de l'étude du revers²². L'ensemble des ressources documentaires issues de cette campagne (photographies, rapports, notes de travail...) a vocation à enrichir en priorité la base de données documentaire liée au SIDS, en tant que source d'information majeure à destination des conservateurs et des restaurateurs s'intéressant à l'état matériel de l'œuvre.
- 47 Lors de cette étude, les restauratrices ont réalisé deux séries de calques afin de recueillir leurs annotations sur le revers de l'œuvre (**fig. 6**). Elles ont ainsi dessiné, en amont de la campagne, sur des feuilles calques, l'ensemble de la frise de la Tapisserie, en prenant pour repère les formes iconographiques. Sur ces calques, au nombre de 144, elles ont dessiné un quadrillage afin de bénéficier d'un système de repérage le plus précis possible (références en abscisse : 1 à 653 ; références en ordonnée : A à F). Une fois finalisés, ces calques ont été agrandis à l'échelle réelle de la Tapisserie, constituant des carrés de 10 cm² environ. Grâce à ces calques, qui ont été dupliqués en deux séries – l'une consacrée aux annotations concernant la toile, l'autre aux broderies – les restauratrices ont pu dessiner et annoter un grand nombre d'éléments sur le revers : pièces de restauration, trous, déchirures, reprises, coutures, prélèvements, taches, etc.

Figure 6



Calque n° 3 de la série « Toile ».

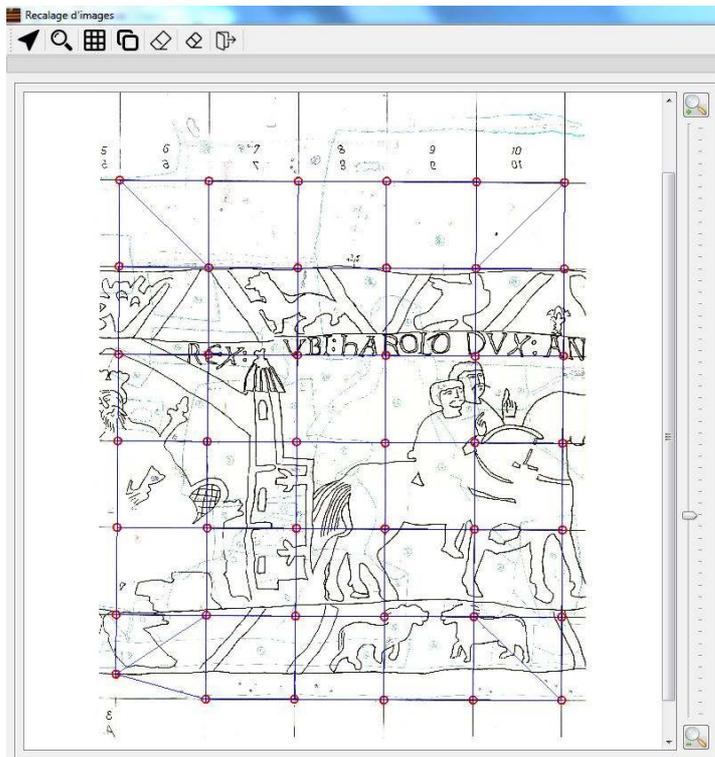
© Ministère de la Culture (France) - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (Charenton-le-Pont), 0080/168, I. Bédât, B. Girault, V. Monier.

- 48 Ces informations, couplées aux notes prises durant la campagne, sont indispensables aux futures études sur l'état matériel de l'œuvre. C'est pourquoi il s'est avéré nécessaire de recalcr les images numérisées de ces calques sur le fond de référence.
- 49 Ces calques ayant servi de support pour localiser l'ensemble des annotations de la campagne 1982-1983, leur recalage sur le fond de référence permettra d'analyser plus facilement ces notes dans l'environnement créé.
- 50 Par conséquent, parmi l'ensemble de la documentation qui pourrait être traitée pour être recalée sur le fond de référence, ce lot revêt une importance particulière, et a donc été traité en priorité. Un outil spécifique a été mis au point afin de procéder à son recalage sur le fond de référence.

Opération de traitement des images des calques

- 51 L'objectif est de positionner et recalcr ces 144 calques sur le fond de référence, tout en conservant le système de numérotation (grilles).
- 52 Pour chaque image de calques correspondant à une partie de la Tapisserie :
- 53 - Nous détectons automatiquement la grille en utilisant une binarisation de l'image suivie de détection de droites par transformée de Hough (fig. 7).

Figure 7

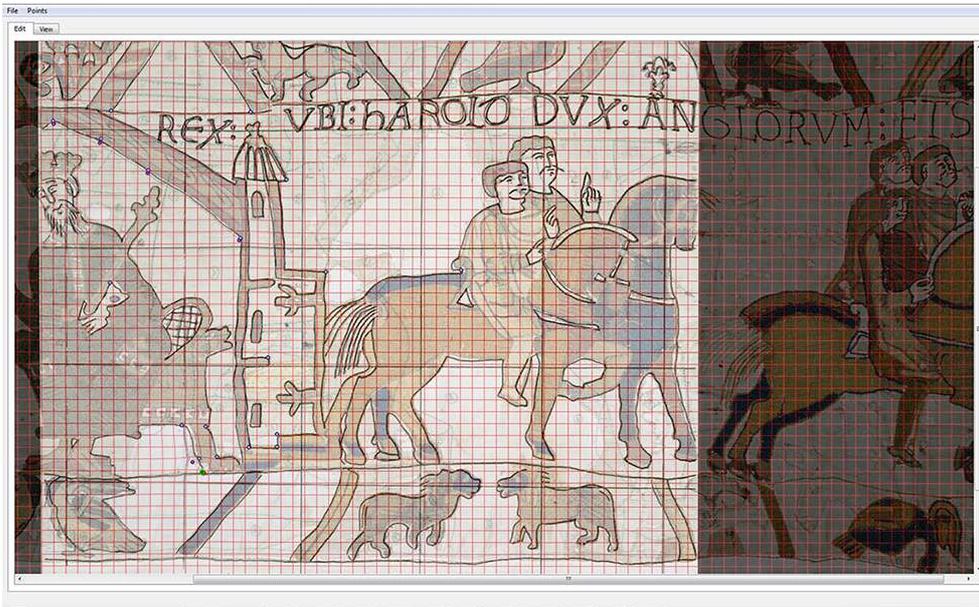


Détection automatique de la grille. Capture d'écran du logiciel. Université de Caen Normandie, CNRS / GREYC - ENSICAEN, K. Zidane, A. Elmoataz, R. Clouard, octobre 2017. Réalisé à partir du Calque n° 3 de la série « Toile ».

© Ministère de la Culture (France) - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (Charenton-le-Pont), 0080/168, I. Bédard, B. Girault, V. Monier.

- 54 - Nous projetons l'image du calque sur la scène correspondante dans le fond de référence. Cette opération est effectuée de manière semi-automatique, l'utilisateur choisit quatre points non colinéaires sur l'image du calque et leurs homologues sur l'image du fond.
- 55 - Nous calculons la transformation non rigide entre les images et alignons les deux images.
- 56 - Nous appliquons la même transformation à la grille qui a été détectée.
- 57 - Dans certains cas, la transformation globale rigide n'est pas suffisante pour obtenir un alignement parfait. Le logiciel propose alors un algorithme de recalage élastique permettant de pallier ce problème (**fig. 8**).

Figure 8

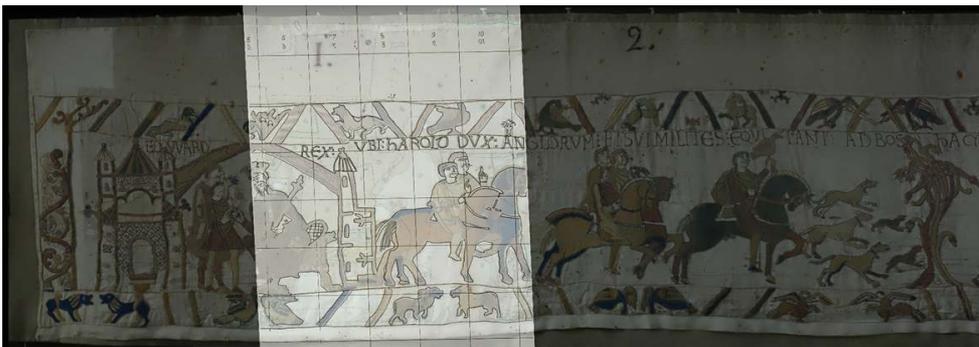


Affinement par recalage local élastique. Capture d'écran du logiciel. Université de Caen Normandie, CNRS / GREYC - ENSICAEN, K. Zidane, A. Elmoataz, R. Clouard, octobre 2017. Réalisé à partir du Calque n° 3 de la série « Toile ».

© Ministère de la Culture (France) - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (Charenton-le-Pont), 0080/168, I. Bédard, B. Girault, V. Monier. Et à partir des détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle. Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa, janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

- 58 En itérant ce procédé, il est possible de construire une couche des calques et des grilles pour toute la Tapisserie (fig. 9).

Figure 9



Résultat du recalage. Capture d'écran du logiciel. Université de Caen Normandie, CNRS / GREYC - ENSICAEN, K. Zidane, A. Elmoataz, R. Clouard, octobre 2017. Réalisé à partir du Calque n° 3 de la série « Toile ».

© Ministère de la Culture (France) - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (Charenton-le-Pont), 0080/168, I. Bédard, B. Girault, V. Monier. Et à partir des détails de la Tapisserie de Bayeux – XI^e siècle. Phot. A. Cazin & G. Debout / CC by-nc-sa, janvier 2017. © La Fabrique de patrimoines en Normandie.

- 59 Le format de sortie choisi (SVG) permet d'utiliser ce résultat comme une couche de données très légère pouvant embarquer des métadonnées, par exemple les coordonnées des calques, ce qui la rend interopérable avec le système documentaire du projet.

Conclusion

- 60 On s'aperçoit avec ce dernier exemple que, logiquement, les grilles après recalage ne sont plus parfaitement rectilignes : c'est une illustration de toute la difficulté de ces différents travaux de traitement des images, du fait de la nature même de l'œuvre, mouvante, dont il n'existe pas d'illustrations parfaites et fixes. Toutes les opérations d'imagerie sur la Tapisserie sont soumises à une variable intrinsèque à l'œuvre (tensions dues à la broderie et à son mode de présentation (suspension verticale, posée sur un support horizontal...), ainsi qu'à sa longueur importante, qui suppose toujours de la déplacer pour couvrir toute son étendue recto-verso. En effet, jamais à ce jour une campagne d'imagerie de la Tapisserie de Bayeux n'a pu déroger à cette règle ; s'en dispenser nécessiterait que l'œuvre soit « stabilisée » dans une pièce d'au moins 70 m de long, avec les conditions de sécurité qui s'imposent pour la préservation de cette œuvre majeure.
- 61 On le voit, le traitement de la documentation relative à la Tapisserie de Bayeux réalisé dans le cadre de ce projet de système d'information documentaire spatialisée, et notamment des illustrations (clichés photographiques sous différents spectres de lumière mais aussi dessins, relevés, schémas, etc.) est soumis à des contraintes très particulières. Ces deux volets qui ont occupé les premières phases, parallèlement à la conception du système dans son ensemble par toutes les équipes engagées dans le projet (base de données documentaire, mise en place de la méthodologie de travail, création de l'interface...), illustrent l'ambitieux travail de traitement des images qui accompagne celui du traitement des ressources documentaires (récolement, sélection, indexation...). D'autres travaux sur les images sont à l'étude, comme le recalage des images « historiques » de la Tapisserie (depuis les premiers relevés manuscrits du début du XVIII^e siècle jusqu'aux fonds documentaires constitués durant les études menées pendant la Seconde Guerre mondiale²³) sur le fond de référence, mais aussi divers projets d'analyse automatique des images qui permettraient aux utilisateurs d'extraire des informations telles que l'analyse des couleurs ou des textures de la broderie. Ces traitements visent, dans le cadre global du projet SIDS, à accompagner les experts dans leurs études et à leur permettre d'exploiter la documentation sous un angle nouveau. Cette phase sera ensuite suivie d'une réflexion sur la restitution de tout l'acquis technique et scientifique au profit du grand public qui sera invité « à entrer en profondeur » dans la Tapisserie de Bayeux.

NOTES

1. - Voir dans la base Palissy : notice PM14000079.
2. - Voir le site : <http://www.unesco.org/new/fr/communication-and-information/memory-of-the-world/register/full-list-of-registered-heritage/registered-heritage-page-1/bayeux-tapestry/> [consulté le 21/05/2019].
3. - « Tapisserie de Bayeux-MAHB Musée d'Art et d'Histoire Baron Gérard » (JO du 29/07/2017).

4. - BERTRAND, Simone. *La Tapisserie de Bayeux et la manière de vivre au onzième siècle*. La Pierre-qui-Vire, Saint-Léger-Vauban : Zodiaque, 1966, p. 32.
5. - LEWIS, Michael. *The Archaeological Authority of the Bayeux Tapestry*. Oxford : John and Erica Hedges, coll. « BAR British Series, 404 », 2005.
6. - BROWN, Shirley Ann. *The Bayeux Tapestry: Bayeux, Médiathèque municipale, Ms. 1: A Sourcebook*. Turnhout : Brepols, 2013.
7. - STENTON, Frank. *The Bayeux Tapestry; A comprehensive survey* [1957]. Londres : Phaidon, 1965 et WILSON, David M. *The Bayeux Tapestry; The complete Tapestry in colour*. Londres : Thames & Hudson, 1985.
8. - Martin Foys, auteur d'une reproduction digitale de la Tapisserie, a également soulevé ces contraintes en ces termes : « *The dilemma of studying the Tapestry is twofold. In traditional editions of the textile, the discursive limits of the printed page require either a sacrifice of narrative fluidity for detailed resolution, or the converse. Put another way, in a printed edition, "readers" of the Tapestry either are given the document in gloriously detailed, high-resolution plates that fragment the textile's continuity, or are faced with small-scale reproductions that capture large narrative blocks but lack any comprehensive magnified detail. [...] In traditional reproductions, the Tapestry, itself a collocation of word and image, must be necessity be spatially divorced from any texts of substantial commentary, for, like the Tapestry, one may pack only so much logos and imagos into a finite material space.* » (Voir FOYS, Martin Kennedy. « Hypertextile Scholarship: Digitally Editing the Bayeux Tapestry ». *Documentary Editing: Journal of the Association for Documentary Editing* (1979-2011), 437, 6-2001, p. 34).
9. - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine.
10. - Lieux de conservation des collections documentaires parmi lesquels la Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (Charenton-le-Pont), le Laboratoire de recherche des monuments historiques (Champs-sur-Marne), le service de l'Inventaire général du patrimoine culturel de Normandie (Caen) ou encore le musée de la Tapisserie de Bayeux.
11. - Ces premières réflexions autour du projet ont alors été impulsées par le comité technique (« groupe des experts ») en charge du suivi des études sur l'œuvre, constitué notamment de membres de la DRAC Normandie (CRMH/conseillère Musée), du C2RMF, du LRMH ou de la direction générale des Patrimoines (SDMHEP/IDP).
12. - Technologies de l'information et de la communication/direction des systèmes d'information.
13. - Voir VERNEY, Antoine, BERTHELOT, Clémentine, DARET, Arnaud, CHAUVEAU, Jérôme, BUARD, Pierre-Yves, ROGER, Julia et BINET, Cécile. « Redocumentariser la Tapisserie de Bayeux : base de données documentaire et système d'informations spatialisées ». *Tabularia* [En ligne], Les sources des mondes normands à l'heure du numérique, mis en ligne le 19 décembre 2018, consulté le 25 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/tabularia/3278> ; DOI : 10.4000/tabularia.3278.
14. - Couverture photographique du revers conservée à la Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, cotes 82PC085 à 82PC173.
15. - Établissement public de coopération culturelle (EPCC) créé en 2015. Voir le site : <http://www.lafabriquedepatrimoines.fr/> [consulté le 22/05/2019].
16. - Rapport de la campagne d'imagerie scientifique de la Tapisserie de Bayeux, mars 2017, par Antoine CAZIN et Guillaume DEBOUT, La Fabrique de patrimoines en Normandie.
17. - ZITOVA, Barbara, FLUSSER, Jan. « Image registration: A Survey and Recent Advances ». *Proceedings of International Conference on Image Processing*, 2005.
18. - LOWE, David. « Distinctive image feature from scale-invariant keypoint ». *International journal of Computer Vision*, 2004.
19. - MOREL, Jean-Michel, YU, Guoshen. « ASIFT. A new Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison ». *SIAM Journal On Imaging Sciences*, vol. 2, issue 2, 2009.

20. - Encore appelé BIGTIFF, voir le site : <http://www.simplesystems.org/libtiff/> [consulté le 22/05/2019].

21. - Le tuilage facilite l'affichage d'images volumineuses, l'aspect pyramidal concerne le stockage de la même image à différentes résolutions pour permettre le zoom sur l'image sans perte de qualité.

22. - BÉDAT, Isabelle, GIRAULT, Béatrice, MONIER, Véronique. *Étude technique de la broderie de Bayeux. Rapport d'études menées du 2 novembre 1982 au 31 janvier 1983*. Rapport conservé à la Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, cote 2009/013/074. Voir : http://www.culture.gouv.fr/public/mistral/mdp-etudes_fr?ACTION=CHERCHER&FIELD_1=REF&VALUE_1=MDP92016082.

23. - LEMAGNEN, Sylvette. « L'histoire de la Tapisserie de Bayeux à l'heure allemande. Un nouvel éclairage sur la mission dirigée par Herbert Jankuhn pendant la Seconde Guerre mondiale ». Dans BOUET, Pierre, NEVEUX, François, LEVY, Brian Joseph (dir.). *La Tapisserie de Bayeux : l'art de broder l'Histoire*. Actes du colloque de Cerisy-la-Salle, 1999. Caen : Presses universitaires de Caen, 2004, p. 49-64.

RÉSUMÉS

L'État et la Ville de Bayeux s'associent à l'Université de Caen-Normandie et au CNRS pour la conception et le développement d'un outil numérique d'étude et de valorisation de la Tapisserie de Bayeux, broderie médiévale du XI^e siècle, classée au titre des monuments historiques. Il consiste en un « système d'information documentaire spatialisée » (SIDS), s'inspirant d'un SIG (système d'information géographique) classique, créé à l'échelle de l'œuvre. Cet outil permettra l'exploitation des données documentaires et scientifiques sur l'œuvre, géoréférencées sur une représentation haute définition de la Tapisserie. Sa réalisation répond à différentes problématiques comme le traitement des images pour la création de ce fond de référence, obtenu à partir d'une suite de clichés numériques. Construire ainsi un panorama est une problématique connue dans le domaine de l'analyse et le traitement de l'image. Cependant, cette broderie présente certaines contraintes, comme son support non rigide et sa taille exceptionnelle, de près de 70 m, soit une image totale de 480 000 x 6 000 pixels qui rend ces algorithmes existants obsolètes. En contact direct avec les équipes de l'Université de Caen impliquées, le GREYC a développé une approche basée sur le matching des points d'intérêts SIFT et un algorithme de fusion basé sur un modèle de déformation géométrique élastique afin de conserver la structure de l'œuvre. Cette approche conserve la qualité des images, sans limite de nombre ou de types, et permet aujourd'hui un accès facilité à cette œuvre majeure.

The services of the State and of the City of Bayeux have joined forces with the University of Caen-Normandy and with the CNRS in order to design and develop a digital tool for the study and interpretation of the so-called Bayeux Tapestry, an eleventh-century medieval embroidery which is listed in France as a historic monument. This project involves a spatialised documentary information system inspired by a classic geographical information system but adapted to the scale of the embroidery. This tool will allow for the management of documentary and scientific information about the work, geo-referenced to a high definition representation of the tapestry. The realisation of the project involves finding answers to a number of questions such as the production of images for the tool, obtained from a series of digital photographs. Building up a

panorama in this way is not an innovation in the field of image treatment and analysis. But the Bayeux tapestry presents certain specific constraints, such as its non-rigid backing and the mere size of the piece, 70 metres long. This means a total image of 480,000 x 6,000 pixels, making existing algorithms obsolete. In direct contact with the University teams involved, the GREYC has developed an approach based on matching up the SIFT interest points and a fusion algorithm based on a model of elastic geometrical deformation, in order to respect the structure of the tapestry. This approach allows for the high quality of the images to be preserved, without any limit to their number or type, and today facilitates access to this major work.

INDEX

Mots-clés : tapisserie de Bayeux, algorithme de traitement d'image, information spatialisée, stitching, recalages d'images, panorama, opérateur SIFT

Keywords : Bayeux tapestry, image treatment algorithm, spatialised information, stitching, image calibration, panorama, SIFT operator

AUTEURS

CLÉMENTINE BERTHELOT

Chargée de mission - Ville de Bayeux/DRAC Normandie cberthelot@mairie-bayeux.fr

KATIA ZIDANE

kathia.zidane@ensicaen.fr

ABDERRAHIM EL MOATAZ

abderrahim.elmoataz-billah@unicaen.fr

RÉGIS CLOUARD

regis.clouard@ensicaen.fr

membres de l'équipe Image du laboratoire GREYC (Groupe de recherche en Informatique, Image, Automatique et Instrumentation de Caen, Normandie Univ, UNICAEN, ENSICAEN, CNRS, GREYC, 14000 Caen, France)

ARNAUD DARET

CERTIC/DSI - Université de Caen-Normandie arnaud.daret@unicaen.fr

ANTOINE VERNEY

Conservateur en chef des musées de Bayeux - Ville de Bayeux averney@mairie-bayeux.fr

CÉCILE BINET

Conseillère Musée - DRAC Normandie cecile-m.binet@culture.gouv.fr