

---

# Restitution 3D de monuments historiques à partir de plans anciens

**Christophe Riedinger, Hedi Tabia, Michel Jordan**

*ETIS, UMR8051*

*ENSEA – Université Cergy-Pontoise – CNRS, France*

*{christophe.riedinger,hedi.tabia}@ensea.fr,michel.jordan@u-cergy.fr*

---

*RÉSUMÉ. Dans cet article, nous présentons un ensemble d'algorithmes permettant l'analyse automatique de plans d'architecte anciens, afin d'élaborer une restitution 3D des bâtiments correspondants. Divers algorithmes de traitement des images permettent d'extraire un ensemble d'informations pertinentes des plans au sol (par exemple, murs principaux, cloisons, emplacement des ouvertures). Le modèle 3D correspondant est construit par extrusion sur la base du plan au sol, et affiné par l'adjonction de textures issues d'images d'élévation ou de coupes présentes dans les mêmes collections de plans anciens. Ces outils ont été appliqués à des plans du XVIII<sup>e</sup> siècle du Château de Versailles, permettant d'obtenir une reconstruction 3D en particulier de deux sites du Château.*

*ABSTRACT. In this paper, we present a complete set of algorithms for analyzing old ground plans of historical monuments, in order to build a 3D restitution of the corresponding monument. First, some image processing algorithms are used to analyze ground plans and extract a lot of informations such as thick and thin walls, openings, etc. The 3D model is then build by extruding the ground plans, and refined by adding textures from cut-offs and elevation images of the same collection of old plans. We applied our algorithms to ground plans of the Château de Versailles (XVIII<sup>th</sup> century), providing us 3D models of two parts of the castle.*

*MOTS-CLÉS : reconstruction 3D, plans, architecture, patrimoine, histoire, morphologie mathématique.*

*KEYWORDS: 3D restitution, plans, architecture, cultural heritage, history, mathematical morphology.*

---

DOI:10.3166/TS.32.87-108 © 2015 Lavoisier

### Extended abstract

This paper addresses the analysis of old graphic documents, more specifically old plans of historic monuments. Our main objective is to compute from these old plans a 3D model of the monument as faithful as possible to the plans. Beside the touristic and game applications of this work, its main interest is the 3D modeling of disappeared, modified or even never built monuments or parts of monuments, and thus to help historians who study the life in these monuments in the past centuries.

We worked on a collection of historical plans (XVII<sup>th</sup> and XVIII<sup>th</sup> centuries) of the *Château de Versailles*, with ground plans, elevation images and cut-off images. The *Archives nationales de France* are currently digitizing this collection of about 6,000 documents. Such old plans present some specific characteristics (either due to the original drawings, to their curation conditions or to the digitization process) which do not allow to apply classical softwares for the analysis of modern architect plans; thus we developed a set of algorithms in order to compute 3D models from such 2D plans and images.

The first part of our work concerns the analysis of the ground plans: after a first preprocessing step which aims to reduce the amount of information to deal with, we developed mathematical morphology tools in order to extract the main structures of the monument (main walls and dividing walls) and to localize openings (doors and windows) and staircases. Beside this, a dedicated filtering algorithm detects and removes writings and hatches in the image. Thus we obtain the footprints of the building, and build a first 3D model by simply extruding the walls to an arbitrary fixed height.

In the second part, we work on the elevation and cut-off images. We use these images in order to give texture informations to the 3D model. This part of our system requires more interactions from the operator, who manually selects each wall of the model and the corresponding elevation image. The interesting region of the elevation image is computed thanks to a flooding algorithm, and this region is then triangulated in order to compute the vertical faces of the 3D model. This step allows us to fix the actual height of each wall of the model. We do not intend to present the final 3D model as a realistic model on the photometric side, but it is a new view upon old graphic documents, and, in some cases, the only way to have a rather intuitive access to modified or destroyed historical monuments.

We then present resulting models computed on the different parts of the *Château de Versailles*: the chapel and the *Appartement du Roy*. We also applied our algorithms to documents representing other monuments, and present such one result in this paper.

### 1. Introduction

L'utilisation de modèles 3D de bâtiments est très répandue, aussi bien en architecture et construction que dans les domaines du tourisme (visite virtuelle) ou des jeux (jeux vidéos). Les modèles 3D permettent aux architectes et aux urbanistes d'avoir une vue réaliste de leur travail, d'étudier l'illumination, les transferts de chaleur, la

propagation des ondes, les flux de transport public, *etc.* La création de modèles 3D à partir de plans a été effectuée de manière semi-automatique depuis les années 2000 (Xuetao *et al.*, 2009 ; Tong *et al.*, 2005 ; Lewis, Séquin, 1998 ; Dosch *et al.*, 2000). Cependant, les outils présentés dans ces recherches nécessitent des plans graphiques précis et de haute résolution.

Par ailleurs, la coopération entre sciences de l'information et sciences humaines s'est beaucoup développée ces dernières années dans le domaine de l'étude et de la conservation du patrimoine. De grands projets impliquant informaticiens d'une part, historiens, archéologues ou conservateurs d'autre part, ont eu pour objet la préservation ou la restitution d'objets du patrimoine, très souvent à partir d'acquisitions 3D (laser ou photogrammétrie) de l'objet complet ou de parties de celui-ci (Cosmas *et al.*, 2001 ; Yastikli *et al.*, 2003 ; Tingdahl *et al.*, 2011 ; Remondino, 2011) (on trouvera également une revue, un peu ancienne, des projets et des technologies développées dans ce domaine en (Van Gool, Sablatnig, 2006)). Dans le domaine de la conservation, la combinaison de modèles 3D acquis par laser et d'algorithmes de réalité augmentée permet de créer des modèles très réalistes tant du point de vue géométrique que photométrique (3DMonuments, s. d.).

Lorsque les monuments étudiés ont partiellement disparu, des modèles 3D peuvent être construits en combinant acquisitions 3D, algorithmes de traitement d'images et logiciels de CAO, le projet emblématique dans ce domaine en France étant le projet *Cluny numérique* (Cluny, s. d. ; Landrieu *et al.*, 2010). Il est à noter que ces réalisations font appel à un grand nombre d'interventions manuelles, non seulement lors de l'acquisition 3D, mais aussi dans les étapes de réalité augmentée.

### **1.1. État de l'art**

Nous présentons dans ce paragraphe quelques-unes des contributions marquantes de l'état de l'art sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour construire notre système.

Lewis et Sequin ont développé un système semi-automatique pour créer des modèles de construction 3D à partir des plans 2D conçus par ordinateur (Lewis, Séquin, 1998). Le système proposé nécessite une assistance relativement minimale de la part de l'utilisateur. Il accepte des plans 2D sous format DXF (format de description géométrique commun, utilisé par AutoCAD). Le système commence par nettoyer les plans 2D, puis corrige les petites incohérences géométriques locales et effectue les ajustements nécessaires afin d'obtenir une mise en page typologiquement cohérente. Les informations sémantiques telles que les numéros de chambres ainsi que la position des portes et des fenêtres sont extraites. Les murs sont extrudés à une hauteur spécifiée par l'utilisateur. Finalement, les portes et les fenêtres sont insérées aux endroits convenables. Ainsi, une représentation en trois dimensions de la construction est générée, ce qui permet d'améliorer la visualisation et l'interactivité. Les modèles générés sont compatibles avec le système de Berkeley WALKTHROUGH et avec le simulateur d'incendie NIST CFAST.

Dosch *et al* proposent un système complet de reconstruction 3D de plans d'architecture numérisés en 2D (Dosch *et al.*, 2000). Le système proposé commence par diviser les plans numérisés en tuiles, traite chaque partie séparément, puis les fusionne après vectorisation. En utilisant une approche basée squelette, les segments sont extraits des plans. Leur système permet de détecter les lignes pointillées, les arcs ainsi que les escaliers. Les auteurs fournissent une interface utilisateur pour laisser l'utilisateur interagir avec le système, ce qui permet la correction des erreurs présentes sur le modèle extrudé. Les auteurs insistent sur la stabilité de leur système de traitement d'image et de détection de symboles. Néanmoins, il apparaît que le système a été faiblement testé et est susceptible d'être amélioré.

Horna *et al.* proposent une méthode de reconstruction basée sur quatre phases principales (Horna *et al.*, 2007) : (i) détection de contours et élimination des incohérences géométriques, (ii) reconstruction topologique avec des informations sémantiques, (iii) extrusion 3D du bâtiment, (iv) superposition des étages. Le modèle traduit la relation entre les éléments du plan 2D en information sémantique associée à tous les volumes tels que les fenêtres, portails, escaliers, *etc.* La génération 3D est effectuée par extrusion en utilisant des règles spécifiques guidées par la sémantique.

Lu *et al* ont proposé de nouvelles méthodes pour analyser des « dessins » architecturaux, qui sont habituellement utilisés pour décrire les intentions des architectes (Lu *et al.*, 2007). Ces dessins architecturaux sont catégorisés selon les auteurs en trois entités : structurelle, fonctionnelle et décorative. Les entités structurelles contiennent les éléments de support tel que l'acier et le béton. Les entités fonctionnelles telles que les portes, les fenêtres et les ascenseurs décrivent les éléments de commodité ou de confort pour les habitants. Des exemples d'entités décoratives sont les cloisons, les suspensions aux plafonds, *etc.* Le traitement de ces dessins architecturaux est effectué en trois étapes principales : la reconnaissance des entités structurelles en utilisant des méthodes basées sur l'analyse et la reconnaissance de formes ; la suppression des primitives graphiques structurelles des objets reconnus ; et enfin la reconnaissance des entités architecturales restantes par des méthodes de reconnaissance de symboles. Les auteurs ont testé leur système sur 257 plans architecturaux / structure dessins, 40 plans synthétiques et 217 plans réels. Ce modèle montre des résultats intéressants avec un taux de détection supérieur à 80 % sur l'ensemble des données synthétiques et réelles.

S.-H. Or *et al.* proposent une approche pour générer des modèles 3D à partir d'un plan 2D (Or *et al.*, 2005). Le système proposé est très automatisé. Le système convertit le plan 2D en un nombre de segments connectés et analyse leur relation interne pour générer le modèle 3D en conséquence. Le plan est premièrement prétraité afin de convertir l'image du plan en une image vectorisée. L'approche utilise un système de reconnaissance de symboles pour l'identification des portes et fenêtres. Le système suppose que les symboles « arc » représentent les portes et que les boîtes de petite taille représentent des fenêtres. Une fois ces symboles identifiés, les modèles 3D sont générés et chargés dans le moteur de jeux 3D « Genesis 3D ».

## 1.2. Architecture générale de notre système

Le projet présenté dans cet article se situe au croisement des deux domaines évoqués en introduction. Il s'agit en effet de proposer une méthode automatique de création de modèles 3D à partir des plans anciens de monuments historiques. Les difficultés auxquelles nous faisons face sont dues aussi bien aux caractéristiques des plans anciens qu'à leur conditions de conservation et à leur numérisation : les lignes droites ne sont pas toujours parfaitement droites, ni d'une épaisseur constante, les caractères écrits ne sont pas « standardisés », pas plus que les symboles utilisés, la numérisation laisse entrevoir par transparence le verso du plan, ou parfois les marques de pliage des documents ou des retombes, *etc.* (cf. figure 1).

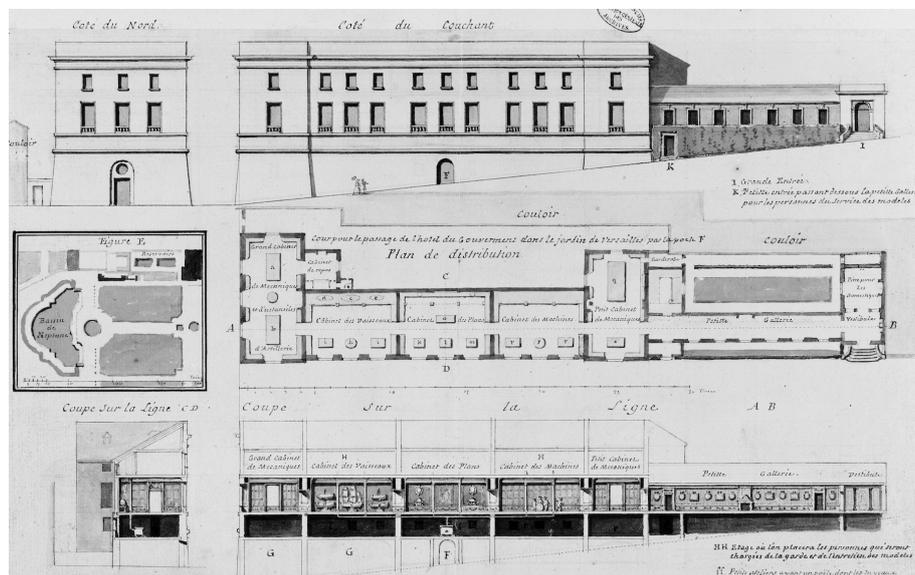


Figure 1. Exemple de plan d'un monument historique (château de Versailles, plan du XVIII<sup>ème</sup> siècle); de haut en bas, élévation, plan de distribution, coupe transversale

La première étape du projet consiste à extraire les informations 2D pertinentes des plans numérisés : nous avons intégré pour cela un ensemble d'outils de traitement d'image permettant de localiser dans les plans leurs éléments principaux (murs extérieurs et intérieurs, ouvertures, escaliers). D'autres éléments des plans, tels que les informations textuelles, ne sont pas intéressants pour notre application, et sont donc filtrés. Nous obtenons ainsi une représentation des plans sous forme de couches sémantiques. Ces algorithmes sont détaillés dans le paragraphe 2.

Le modèle 3D est obtenu par extrusion des informations 2D, et complété par des informations extraites d'autres documents d'époque (élévations et coupes), cette étape est exposée dans le paragraphe 3.



pixels). Deux approches sont possibles dans ce cas pour obtenir des données entrant en mémoire vive, et exigeant moins de temps de calcul :

- la division des images en « tuiles », traitées indépendamment et dont les résultats sont ensuite fusionnés (Dosch *et al.*, 2000) ; dans ce cas, l'algorithme de fusion des résultats sur chaque tuile doit être particulièrement étudié ;
- la dégradation de résolution des images ; les résultats sont obtenus sur les images de résolution dégradée ; cette approche est particulièrement sensible à l'algorithme de dégradation des images.

C'est cette deuxième approche que nous avons choisie pour réduire la dimension des images d'un facteur  $r$ , tel que la plus grande dimension des images à traiter soit d'environ 3 000 pixels). Considérant que les plans sont tracés à l'encre noire ou de couleur foncée sur un fond clair, nous avons donc défini un algorithme *ad hoc*, permettant de préserver l'information utile sur les plans : nous conservons dans l'image réduite le pixel le plus sombre de chaque pavé de dimension  $r \times r$  dans l'image d'origine (*cf.* figure 3b).

### 2.2.2. Binarisation

L'étape de binarisation est précédée d'un débruitage, pour lequel nous utilisons l'algorithme des *Non Local Means* (Van De Ville, Kocher, 2009).

La plupart des pixels de l'image sont blancs ou de couleur claire, correspondant à la couleur du papier, la valeur médiane des niveaux de gris  $med$  est donc proche de la valeur de fond de l'image. Pour chaque pixel  $(u, v)$  de l'image initiale  $I$ , nous calculons, dans son voisinage  $3 \times 3$ , la moyenne des différences absolues des niveaux de gris avec  $med$ , et obtenons l'image  $I_{diff}$ . La valeur médiane  $med_{diff}$  de  $I_{diff}$  est calculée. Chaque pixel de l'image binarisée  $I_b$  est calculé ainsi ( $s$  est un seuil paramétré par l'utilisateur) :

$$\begin{aligned} \text{si } I(u, v) > med & \quad I_b(u, v) = 0 \\ \text{si } I_{diff}(u, v) > s \times med_{diff} & \quad I_b(u, v) = 255 \\ \text{sinon} & \quad I_b(u, v) = 0 \end{aligned}$$

Expérimentalement, nous avons fixé  $s$  et vérifié que ses variations ont peu d'influence sur le résultat final. Nous obtenons ainsi une image dans laquelle les contours des tracés sont plus marqués, et donc seront mieux détectés (*cf.* figure 3c).

### 2.3. Détection et localisation des murs extérieurs et intérieurs

Les murs extérieurs et intérieurs (cloisons) sont détectés sur l'image du plan binarisé ; les murs y apparaissent sur les plans comme des traits sombres de différentes épaisseurs. Nous avons choisi d'utiliser pour cela le formalisme des opérateurs de morphologie mathématique, qui nous permet de détecter les murs épais et les cloisons en utilisant le même algorithme et en faisant simplement varier un paramètre de seuil.

De plus, les droites n'étant pas toujours parfaitement rectilignes sur ces documents anciens, des méthodes à base d'accumulateurs telles que les transformées de Hough donnent des résultats moins pertinents.

### 2.3.1. Détection des murs

L'objectif de cette étape est d'obtenir un algorithme unique permettant de détecter les murs principaux, les murs secondaires, les cloisons, et de n'en sélectionner qu'une « catégorie » au moyen de seuils appropriés. Pour chaque pixel de l'image binaire appartenant à une composante connexe d'intérêt, nous calculons la transformée en distance, en itérant l'opérateur d'érosion de boule unité, et en appliquant la distance de Chebychev (Fabbri *et al.*, 2008 ; Huang, Mitchell, 1994)), dont l'implémentation est rapide et qui donne des résultats satisfaisants pour notre application. Chaque pixel étant étiqueté par sa distance au bord le plus proche de la composante connexe à laquelle il appartient, l'image des distances nous permet de sélectionner les éléments par leur épaisseur ; la figure 3 présente le résultat de la détection des murs principaux (murs extérieurs et murs porteurs, figure 3d) et des murs intérieurs et cloisons (figure 3e). Les seuils de détection des murs et des cloisons sont choisis par l'utilisateur, en fonction des dimensions originales des plans, et du facteur de réduction qui a été utilisé dans l'étape de prétraitement ; ici, les cloisons sont d'épaisseur comprise entre 2 et 5 pixels, et les murs principaux ont une épaisseur supérieure ou égale à 6 pixels.

### 2.3.2. Segmentation des murs détectés

L'étape suivante consiste à segmenter les murs détectés, quelle que soit leur épaisseur, de manière à obtenir leurs contours, qui seront introduits en tant qu'arêtes du modèle 3D final.

Nous partons donc de l'image binaire des murs  $I_m$  calculée à l'étape précédente, sur laquelle nous calculons les gradients locaux, que nous binarisons ensuite, pour obtenir l'image  $I_{grad}$ . Le squelette morphologique de  $I_{grad}$  (calculé par amincissement, en utilisant les huit éléments structurants  $L$ , (Soille, 2003)) nous fournit une image où les contours des murs sont tous marqués d'épaisseur 1. Nous extrayons ensuite de cette image les points de jonction (en rouge sur la figure 4, figure de gauche), points extrémités des segments que nous voulons extraire du plan original.

### 2.3.3. Extraction des segments et fusion

Les points appartenant à des segments de lignes (correspondant aux contours des murs) sont étiquetés en prenant comme points de départ les points de jonction, par dilatation morphologique d'élément structurant la boule unité, itérée le long des squelettes (les points n'appartenant pas au squelette ne sont pas modifiés). Lorsque l'image résultat n'est plus modifiée par une itération, l'ensemble des points du squelette ont reçu une étiquette numérique.

Les segments adjacents sont ensuite fusionnés, en partant du segment le plus long en utilisant le critère suivant :

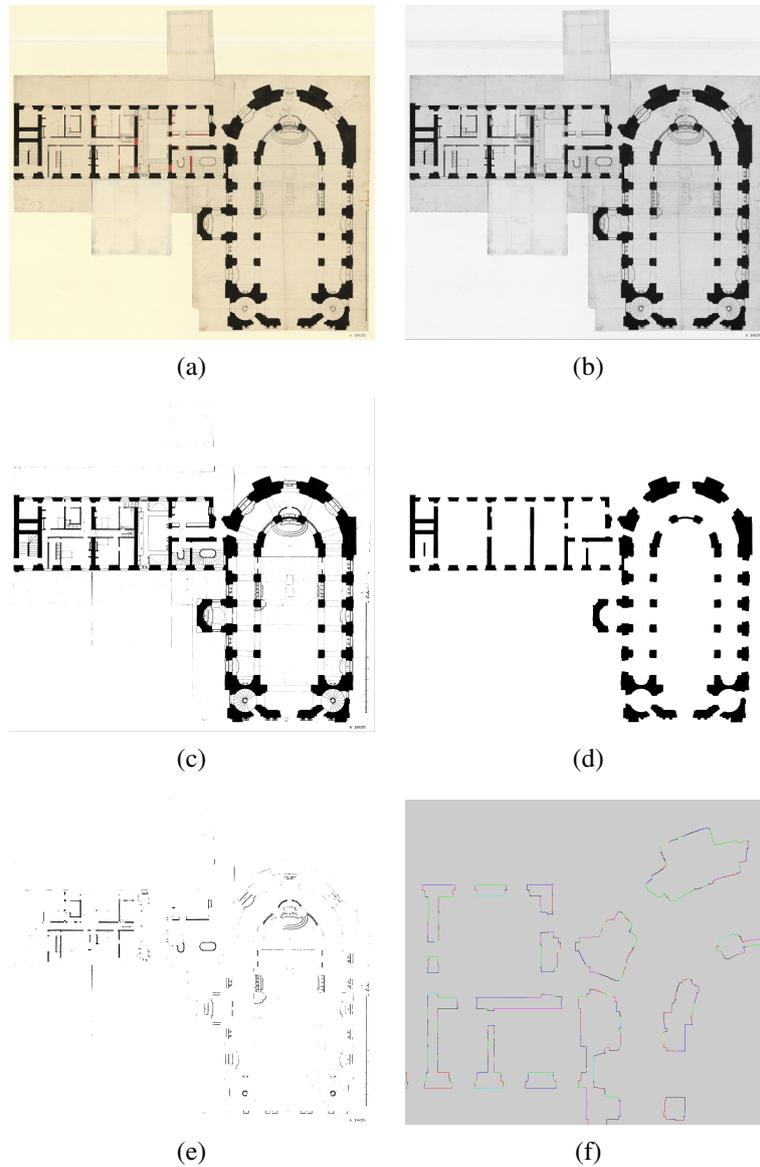


Figure 3. Traitement d'une image de plan au sol (plan de la Chapelle du Château de Versailles) : (a) plan d'origine (dimensions  $9464 \times 8736$ ); (b) plan réduit en niveaux de gris (dimensions  $3185 \times 2913$ ); (c) plan binarisé (dimensions  $3185 \times 2913$ ); (d) murs principaux détectés sur le plan de la (c); (e) cloisons (murs secondaires, ou rambardes) détectés sur le même plan; (f) segments de droite détectés sur la figure (d) (détail sur une partie de la figure)

CRITÈRE — Si  $A$  est un segment et  $B$  le segment à fusionner avec  $A$ , ces segments sont fusionnés si et seulement si la distance entre le barycentre des points de  $B$  et la droite passant par  $A$  est inférieure à un seuil donné.

Ce critère est itéré jusqu'à ce qu'il ne soit plus vérifié par aucune paire de segments. La figure 4 (droite) montre un résultat de fusion de segments sur une partie du plan original. La figure 3f montre les résultats obtenus sur le plan de l'appartement du Roi présenté en figure 3a (les segments ont été calculés sur l'image des murs principaux figure 3d, la figure présente une vue de détail de cette image). Notre objectif n'est pas forcément d'obtenir un segment unique pour chaque pan de mur, mais de réduire fortement le nombre des segments rectilignes avant la création du modèle 3D.

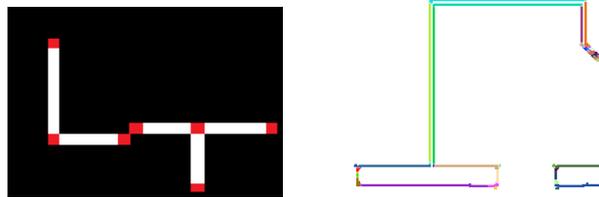


Figure 4. A gauche : segments et points de jonction ; à droite : segments fusionnés (zoom sur une partie du plan)

#### 2.4. Détection des hachures et des zones de texte

Les zones de texte et les hachures peuvent être traitées de manière similaire dans ces plans anciens, et nous les considérons comme des motifs particuliers que nous détectons par une méthode de reconnaissance des formes, utilisant comme caractéristique un histogramme des LBP (*Local Binary Pattern*) (Guo *et al.*, 2010a). Cette méthode est très efficace pour la reconnaissance et la discrimination de textures (Guo *et al.*, 2010b). L'algorithme comprend cinq étapes et nécessite la définition d'images de référence représentant les motifs à détecter :

- calcul des codes LBP sur les images de référence ;
- calcul des codes LBP sur les images d'entrée ;
- calcul de descripteurs des images de référence ;
- calcul de descripteurs des images d'entrée ;
- mesure de distance entre les descripteurs.

##### Calcul des codes LBP

Les codes LBP sont calculés en chaque pixel  $(u, v)$  d'une image  $I$ , sur leur voisinage  $3 \times 3 V$ , de la manière suivante :





Figure 6. Détection de zones de texte et de hachures sur un plan

sur le plan. Ceci afin de placer sur le modèle 3D du monument un escalier en trois dimensions exactement à l'emplacement correspondant à sa position sur le plan. Nous avons choisi de modéliser un certain nombre de types d'escaliers (escalier double, grand escalier), sous forme d'une petite « bibliothèque » et ce sont ces modèles que nous plaçons aux emplacements détectés par le programme.

Nous avons choisi une méthode semi-automatique car les plans dont nous disposons, bien qu'étant numérisés avec une excellente qualité, ne sont pas aussi précis que des plans d'architecte modernes. Par exemple, la partie de l'escalier se trouvant à l'étage du plan est tracée en traits pleins alors que la partie qui se trouve plus proche de l'étage supérieur est tracée, parfois en pointillés, parfois en traits pleins, parfois même n'est pas dessinée (cf. figure 7 pour divers exemples de dessins d'escaliers). Il est alors très difficile d'arriver à une méthode complètement automatique, sans fausses détections.

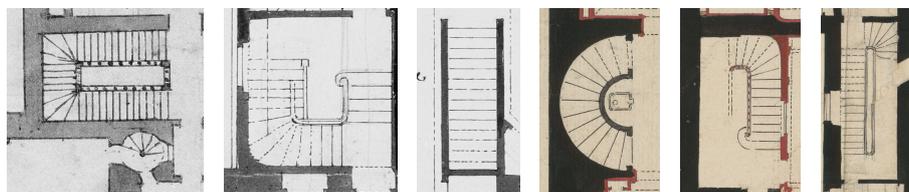


Figure 7. Plusieurs exemples d'escaliers sur des plans du Château de Versailles

Nous avons considéré le fait qu'il est moins fastidieux pour l'utilisateur de tracer un rectangle grossier autour de l'escalier (figure 8), puis de laisser le programme détecter et localiser précisément celui-ci, plutôt que d'effectuer une détection globale

et de devoir ensuite corriger les fausses détections. De plus, l'algorithme n'opérant que sur la partie de l'image contenue dans le rectangle et non sur toute l'image, la détection est plus rapide.

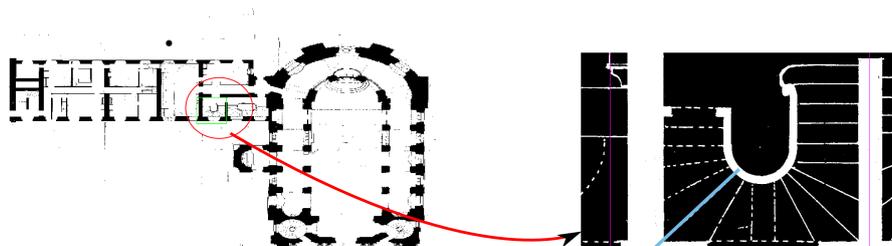


Figure 8. Détection des escaliers : localisation grossière par l'utilisateur

Nous commençons par différencier les différentes composantes connexes de l'ensemble escalier-murs tracés sur le plan. Un pointillé étant par définition une entité isolée sur le plan, il constitue une composante connexe isolée ; une suite de pointillés formant une ligne constituerait alors une composante connexe seconde dans le formalisme de morphologie mathématique. Nous avons cependant renoncé à appliquer complètement ce formalisme dans cette partie de notre travail ; en effet, il y a dans les plans une telle diversité de représentations des escaliers (notamment en taille des traits pointillés et en régularité de leur espacement) que les opérateurs morphologiques permettant de « boucher les trous » entre pointillés n'ont pas donné des résultats satisfaisants sur tous nos exemples. Nous avons donc utilisé un algorithme *ad hoc* d'approximation de la direction de la meilleure droite représentant une composante connexe à l'aide de l'estimateur robuste bien connu de Tukey (Beaton, Tukey, 1974). Puis nous calculons la distance de tous les points de la composante connexe à cette droite. Si toutes ces distances sont inférieures à un seuil, nous considérons que c'est une droite. Notons que les droites correspondant à des murs et tracées en traits pleins sont toujours attachées à d'autres droites représentant les murs perpendiculaires. L'ensemble de ces murs ne constitue pas une droite et n'est donc pas inclus dans l'ensemble des droites détectées. Les droites détectées sont en fait les pointillés délimitant les différentes marches d'un escalier (figure 8, à droite). Chaque pointillé est une composante connexe avec une meilleure droite d'approximation, nous accumulons les angles entre ces droites et l'axe horizontal dans un histogramme.

Il faut alors distinguer deux cas. Les pointillés parallèles à l'axe des abscisses et à l'axe des ordonnées peuvent correspondre à des droites différentes alors que leurs coefficients directeurs sont identiques. Les pointillés en diagonale n'ont le même coefficient directeur qu'à condition qu'ils appartiennent à la même droite. Pour tracer une diagonale, nous considérons alors toutes les composantes connexes qui sont tombées dans le même *bin* de l'histogramme. A partir de celles-ci, nous calculons la meilleure droite approchée  $\Delta$ , en utilisant là encore l'algorithme de Tukey. Toutes les composantes connexes suffisamment proches de la droite selon la direction de  $\Delta$  sont pro-

longées jusqu'à rencontrer un pixel blanc (une droite support de  $\Delta$  est en bleu sur la figure 8, à droite). Les pointillés tracés en diagonale ont ainsi été prolongés.

Pour tracer les droites verticales, on considère toutes les composantes connexes ayant une pente infinie. Nous les prolongeons verticalement vers le haut et vers le bas jusqu'à trouver un pixel blanc. Le cas des horizontales est traité de façon similaire. Nous passons ensuite à la phase de détection des escaliers. Observons que deux marches d'escalier consécutives ont deux points en commun. Il faut considérer le complémentaire des droites tracées sur le plan (voir figure 9a). C'est un ensemble de composantes connexes. Si deux composantes connexe adjacentes ont deux points en commun, on peut considérer avec une grande probabilité que ce sont des marches d'escalier. Nous gardons alors les pixels de ces composantes connexes. Nous ajoutons une contrainte supplémentaire : une composante connexe qui touche le bord de l'image ne peut faire partie de l'escalier. La boîte englobante de l'ensemble des pixels conservés définit la boîte englobante de l'escalier recherché (figure 9b).

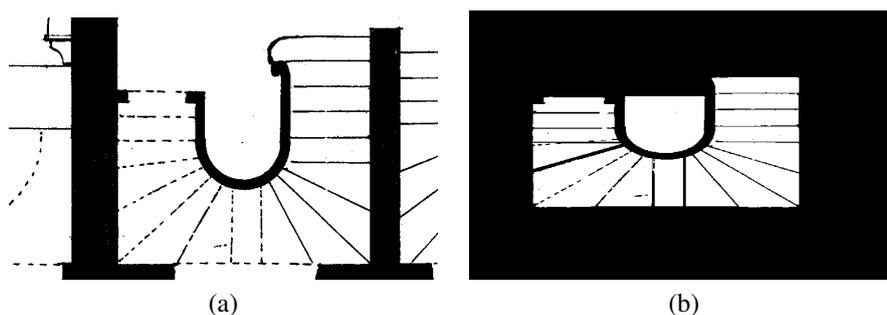


Figure 9. Détection des escaliers : résultats de l'algorithme de localisation

### 3. Restitution 3D

Dans les paragraphes précédents, nous avons effectué l'analyse des plans, nous conduisant à une représentation vectorielle 2D des principales structures du monument étudié. Le but des travaux présentés dans ce paragraphe est d'élaborer une représentation 3D du monument, basée sur les empreintes au sol déduites des plans, et intégrant les informations extraites de vues en élévation ou en coupe du même monument. Ce faisant, notre objectif n'est pas d'obtenir des modèles 3D visuellement réalistes, mais que ces modèles soient suffisamment « agréables » pour que les utilisateurs (principalement historiens) puissent les manipuler et en tirer une meilleure compréhension du bâtiment. Notons par ailleurs que, même dans le cas du Château de Versailles, rares sont les parties du monument pour lesquelles nous avons une description exhaustive comprenant des vues sur toutes les parois d'une pièce, d'une chambre ou d'un appartement.

### 3.1. *Élévation des murs*

Dans un premier temps, nous calculons la géométrie du modèle 3D par une simple extrusion des murs extraits du plan 2D, ce qui donne déjà à l'utilisateur une meilleure compréhension du monument restitué (voir la figure 10 pour le résultat obtenu). La hauteur des murs extrudés est laissée dans un premier temps au choix de l'utilisateur. L'exploitation des images d'élévation nous permettra par la suite de la fixer automatiquement, en respectant les proportions hauteur/largeur de ces images.

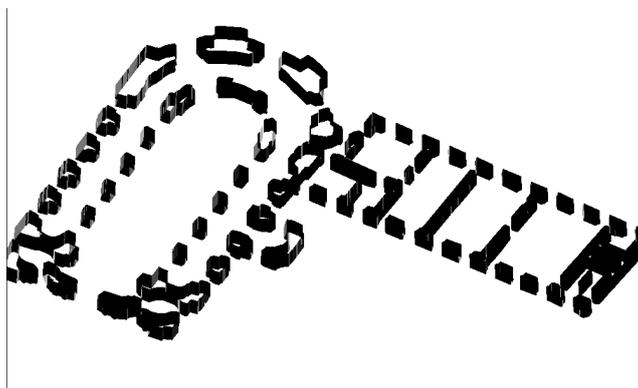


Figure 10. Modèle 3D calculé par extrusion des murs détectés sur le plan original (cf. figure 3d)

### 3.2. *Modèle texturé*

Du fait de la procédure d'extrusion, les faces verticales du modèle 3D sont constitués de deux triangles adjacents formant un rectangle, ce rectangle prend appui sur chaque segment de droite détecté sur le plan au sol. L'objectif de l'étape suivante est d'améliorer la représentation des murs en utilisant les images d'élévation associées aux plans originaux (cf. figure 11).

Cette partie fait appel à l'intervention de l'utilisateur, qui doit sélectionner sur le modèle 3D un mur ou un ensemble de murs, et dessiner sur l'image d'élévation le rectangle englobant approximativement la région correspondante (cf. figure 12). Dans ce rectangle englobant, la région d'intérêt est détectée automatiquement, puis polygonalisée. L'ensemble des sommets de ce polygone est ensuite triangulé pour former un maillage 2D vertical du mur, sur lequel nous appliquons également la texture extraite de l'image d'élévation.

La polygonisation de l'image extrudée s'effectue au moyen d'une triangulation de l'espace 2D de l'image. Pour récupérer le contour de l'objet qui nous intéresse et qui va servir de texture, nous utilisons un processus d'inondation sur l'image binaire de la texture. Nous pouvons raisonnablement supposer que le coin supérieur gauche de l'image n'appartient pas au dessin que l'on veut isoler mais bien au papier laissé vierge

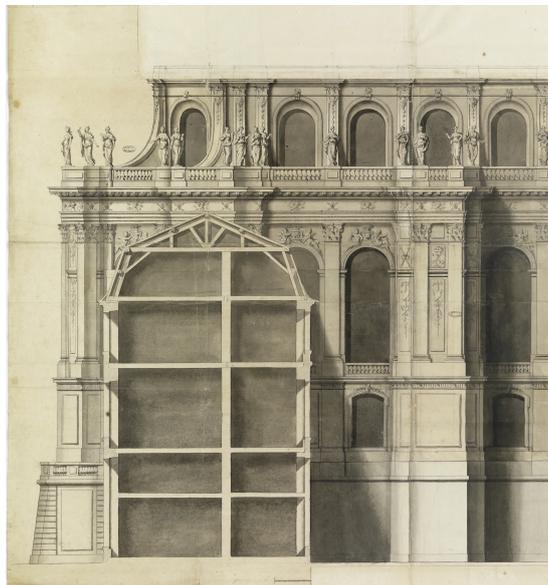


Figure 11. Exemple d'image d'élévation (mur extérieur de la chapelle)

par le dessinateur. Il suffit alors pour l'utilisateur d'indiquer au programme un point à l'intérieur du dessin et d'inonder l'image avec une couleur (par exemple du rouge) en partant du pixel supérieur gauche jusqu'à rencontrer un pixel blanc. La frontière entre les pixels rouges et les pixels blancs constituent la ligne polygonale recherchée (cf. figure 12), au terme d'un processus simple et efficace.

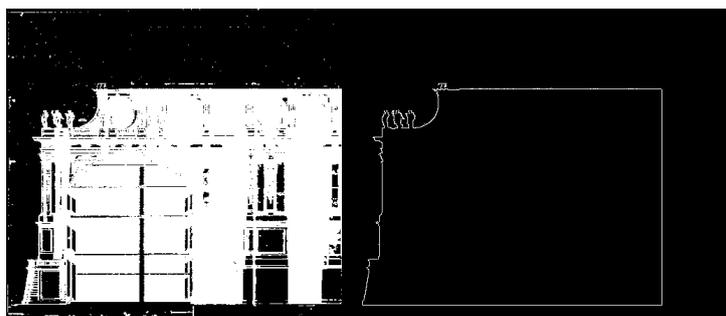


Figure 12. Sélection dans l'image d'élévation de la région d'intérêt correspondant à un mur du modèle 3D

Nous triangulons ensuite ce polygone grâce à des opérations simples de morphologie mathématique. Pour cela, nous divisons l'image binaire de la frontière du polygone en cellules de  $6 \times 6$  pixels. Nous ne conservons qu'un point par cellule. Nous triangulons cet ensemble de points en assignant à chacun de ses points un label et en dilatant les différents labels avec la contrainte supplémentaire que lorsque deux labels se ren-

contrent, l'un ne doit pas recouvrir l'autre. Lorsque l'image n'évolue plus, nous avons obtenu une image de régions labélisées avec certains pixels isolés pour lesquels trois régions distinctes entourent ce pixel. Il suffit de relier les trois origines des régions entourant le label pour obtenir un triangle. En reliant tous les ensembles de trois régions, nous obtenons une série de triangles qui forme une triangulation de l'espace 2D de l'image. Une fois l'image de texture divisée en triangles, nous ne conservons que l'ensemble des triangles qui se trouvent à l'intérieur du polygone. Cette opération est aisée, car, l'utilisateur ayant indiqué l'intérieur du polygone et la frontière de celui-ci ayant été calculée précédemment, nous pouvons produire un masque de tous les points à l'intérieur du polygone. Ensuite pour chaque triangle, nous vérifions si un point intérieur au triangle appartient au masque. Si c'est le cas, le triangle est conservé. Notons que la triangulation étant effectuée par dilatation morphologique, elle ne dépend que marginalement du nombre de points à trianguler.

La figure 13 présente à gauche, un résultat de triangulation obtenu par la méthode exposée dans ce paragraphe, et à droite, une vue du modèle 3D partiellement texturé.

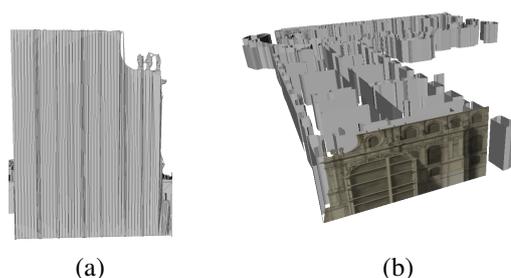


Figure 13. (a) : résultat de la triangulation d'une image d'élévation. (b) : modèle 3D partiellement texturé à l'aide d'images d'élévation

## 4. Résultats

### 4.1. Résultats sur des plans du Château de Versailles

Les algorithmes que nous avons présentés dans cet article sont développés dans le cadre d'un projet de recherche dont l'objet est la numérisation et l'exploitation des archives des plans du Château de Versailles. C'est pourquoi nous présentons d'abord des résultats obtenus sur deux sites du Château : la Chapelle, et l'Appartement du Roy. Les algorithmes ont été implémentés en Java, l'interface utilisateur interactive est développée avec le moteur 3D JMonkey, et les modèles 3D ont été calculés sur un processeur bi-Xeon 2.4 Ghz. Le tableau 1 indique les temps de calcul des différentes étapes de la modélisation pour un site du Château de Versailles (Appartement du Roy, image originale réduite à  $2600 \times 3700$ ).

La figure 14 présente plusieurs vues de l'Appartement du Roy, vues générales et vues de détail sur la Chambre du Roy, dans laquelle ont été intégrées les textures

Tableau 1. Temps de calcul des algorithmes (plan de dimensions 2600 × 3700)

Prétraitements	Segments	Murs	Escaliers	Extrusion	Triangulation
10 s	25 s	61 s	1,5 s	1 s	20 s

disponibles pour deux des murs de la Chambre. Dans la Chambre du Roy, la balustrade qui sépare le lit du reste de la chambre a été détectée sur le plan comme une cloison, nous avons fixé sa hauteur en proportion de la hauteur de la chambre en calculant les hauteurs respectives sur l'image d'élevation qui est utilisée comme texture du mur (figure 14d). Le modèle 3D de la Chapelle est présenté en figure 15.

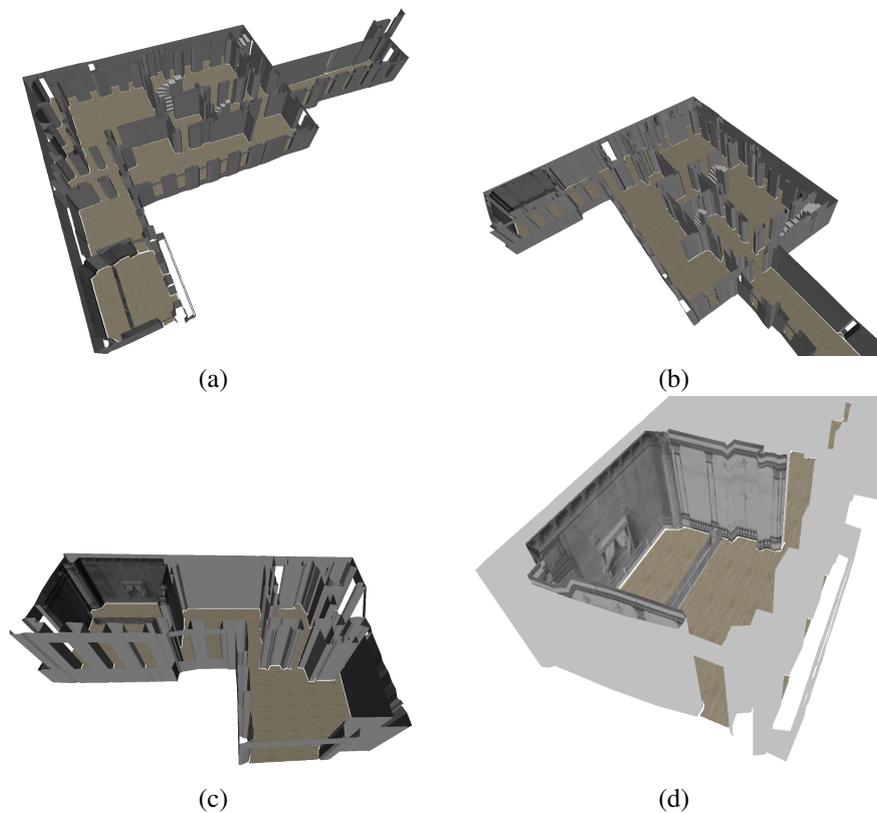


Figure 14. Modèle 3D de l'Appartement du Roy, Château de Versailles : vues générales, et vues de détail sur la Chambre du Roy

#### 4.2. Résultat sur des données d'autres sources

Afin d'en estimer la généralité, nous avons appliqué nos algorithmes à d'autres jeux de données. On trouvera par exemple en figure 16 le résultat obtenu sur le plan

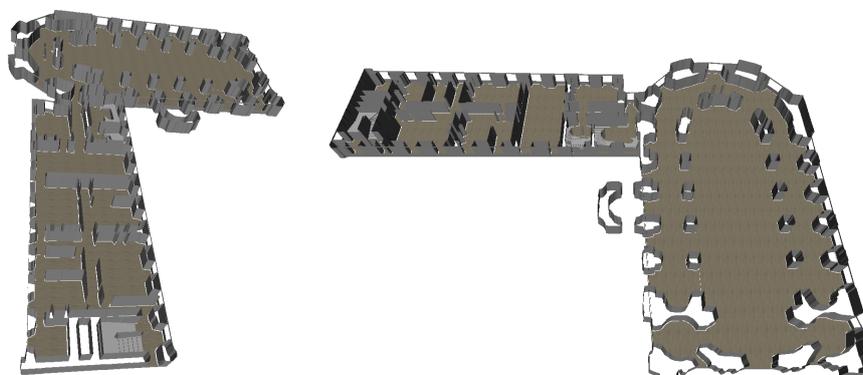


Figure 15. Modèle 3D de la Chapelle du Château de Versailles

d'époque d'un hôtel particulier d'Aix-en-Provence (document de la BNF). Le document numérique initial a une moindre résolution que les documents du Château de Versailles, nous n'avons donc pas effectué sur cette image de prétraitement de réduction des dimensions. Les résultats obtenus montrent une assez bonne robustesse de nos algorithmes, permettant d'envisager leur utilisation sur des jeux de données différents.

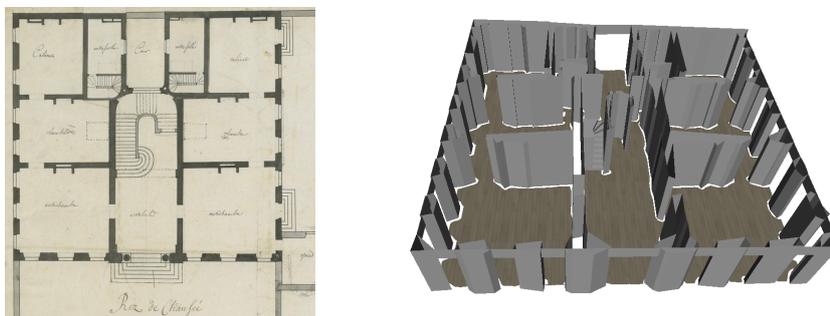


Figure 16. Plan initial et modèle 3D obtenu du premier étage de l'Hôtel de Caumont, Aix-en-Provence

## 5. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans cet article un ensemble d'algorithmes permettant la restitution 3D de monuments historiques à partir de plans anciens numérisés (plans au sol, vues en coupe ou en élévations). Différents outils permettent d'analyser les plans et d'en extraire des « couches d'information » 2D, utiles pour le modèle 3D ou au contraire filtrées car non pertinentes (textes, *etc.*). La géométrie du modèle 3D est construite par extrusion des murs et cloisons détectés sur les plans. Le modèle 3D

est texturé en utilisant des informations extraites de vues en élévation ou en coupe, contemporaines des plans numérisés. L'objectif de notre travail n'est pas d'obtenir des modèles 3D photoréalistes (nous n'avons pas recours à des photographies, ni à des données actuelles, laser ou autres), mais que ces modèles 3D permettent aux historiens (dans un premier temps, puis au grand public par la suite) d'avoir une meilleure compréhension de l'organisation intérieure du monument étudié à l'époque des plans.

Nos algorithmes ont été appliqués à un ensemble de plans anciens du Château de Versailles, en cours de numérisation dans le cadre d'un projet financé par le programme des « Investissements d'avenir ». Dans le cadre de ce projet, qui se terminera à l'automne 2015, la mise à disposition de nouvelles données numérisées nous permettra de compléter la représentation 3D calculée, en particulier pour ce qui concerne les ouvertures (portes, fenêtres), et la détection sur les plans originaux des escaliers et leur modélisation.

L'étape principale suivante sera d'utiliser, lorsqu'elles existent et sont disponibles, les images d'élévation et les coupes pour améliorer le modèle 3D des murs, cloisons et autres parois. Ainsi, la correspondance entre plans au sol, d'où nous extrayons les emplacements des ouvertures (portes et fenêtres), et images d'élévation, permettra d'extraire de celles-ci les textures représentant ces ouvertures, et de calculer une triangulation encore plus représentative des détails des faces verticales du modèle.

Les modèles 3D ainsi reconstitués seront d'une grande aide pour les historiens et les conservateurs, car ils donnent à voir les lieux de vie décrits dans les documents historiques, et rendent possible une meilleure compréhension, en particulier des circulations de personnes à l'intérieur de ces vastes monuments. De plus, une utilisation plus « grand public » est envisageable, par exemple pour montrer l'évolution au fil des années de l'aménagement intérieur du bâtiment.

#### *Remerciements*

*Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet VERSPERA, financé par le LABEX Patrima (Fondation des Sciences du Patrimoine). Nous remercions particulièrement nos collègues du Centre de Recherche du Château de Versailles (Mathieu da Vinha, Isabelle Pluvieux et Benjamin Ringot), des Archives nationales (Pierre Jugie) et de la Bibliothèque nationale de France (Corinne Le Bitouzé), partenaires du projet, qui nous ont fourni les plans numérisés utilisés ici, ainsi que toutes les indications utiles pour leur interprétation. Nous remercions également les relecteurs de cet article, qui nous ont permis de l'améliorer sensiblement.*

#### **Bibliographie**

- Beaton A., Tukey J. (1974). The fitting of power series, meaning polynomials, illustrated on bandspectroscopic data. *Technometrics*, vol. 16, p. 147–185.
- Cluny numérique*. (s. d.). (<http://cluny-numerique.fr/gunzo/restitution-archeologique/cluny-iii>)
- Cosmas J., Itegaki T., Green D., Grabczewski E., Weimer F., Van Gool L. (2001). 3D MURALE: A Multimedia System for Archaeology. In *Proceedings of the 2001 conference on virtual*

- reality, archeology, and cultural heritage*, p. 297–306. Glyfada, Greece, ACM.
- Dosch P., Tombre K., Ah-Soon C., Masini G. (2000). A complete system for the analysis of architectural drawings. *International Journal on Document Analysis and Recognition*, vol. 3, n° 2.
- Fabbi R., Costa L. D. F., Torelli J. C., Bruno O. M. (2008, février). 2d euclidean distance transform algorithms: A comparative survey. *ACM Comput. Surv.*, vol. 40, n° 1, p. 2:1–2:44. Consulté sur <http://doi.acm.org/10.1145/1322432.1322434>
- Guo Z., Zhang L., Zhang D. (2010a, juin). A completed modeling of local binary pattern operator for texture classification. *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 19, n° 6.
- Guo Z., Zhang L., Zhang D. (2010b). Rotation invariant texture classification using LBP variance (LBPV) with global matching. *Pattern Recognition*, vol. 43, n° 3, p. 706–719.
- Horna S., Damiand G., Meneveaux D., Bertrand Y. (2007, mars). Building 3D indoor scenes topology from 2D architectural plans. In *GRAPP*, p. 37–44. Spain. Consulté sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00337793>
- Huang C., Mitchell O. (1994). A euclidean distance transform using grayscale morphology decomposition. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 16, n° 4, p. 443–448.
- Landrieu J., Pèrè C., Rollier-Hanselmann J., Schotte G. (2010). Reconstitution virtuelle de l'église abbatiale Cluny III: des fouilles archéologiques aux algorithmes de l'imagerie. In *Actes du colloque virtual retrospect 2009*, p. 151–159. Pessac, France, Ausonius éd.
- Lewis R., Séquin C. (1998). Generation of 3D building models from 2D architectural plans. *Computer-Aided Design*, vol. 30, n° 10, p. 765–779. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448598000311>
- Lu T., Yang H., Yang R., Cai S. (2007). Automatic analysis and integration of architectural drawings. *International Journal of Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*, vol. 9, n° 1, p. 31–47.
- Or S.-H., Wong K., Yu Y.-k., Chang M. M.-y., Kong H. (2005). Highly Automatic Approach to Architectural Floorplan Image Understanding & Model Generation. In *Proceedings of Vision, Modeling and Visualization, VMV'2005*. Erlangen, Germany.
- Remondino F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, vol. 3, n° 6, p. 1104–1138. Consulté sur <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>
- Ren J., Jiang X., Yuan J. (2013). Noise-Resistant Local Binary Pattern With an Embedded Error-Correction Mechanism. *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 22, n° 10, p. 4049–4060.
- Soille P. (2003). *Morphological image analysis: Principles and applications* (2<sup>e</sup> éd.). Secaucus, NJ, USA, Springer-Verlag New York, Inc.
- Three dimensional monuments, programme national de numérisation du patrimoine*. (s. d.). (<http://www.map.archi.fr/3D-monuments/>)
- Tingdahl D., Vergauwen M., Van Gool L. (2011). Arc3d: A public web service that turns photos into 3d models. *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks*, p. 101.

- Tong L., Chiew-Lan T., Feng S., Shijie C. (2005). A new recognition model for electronic architectural drawings. *Computer-Aided Design*, vol. 37, n° 10, p. 1053 - 1069. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448504002258>
- Van De Ville D., Kocher M. (2009). Sure-based non-local means. *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 16, n° 11, p. 973-976.
- Van Gool L., Sablatnig R. (2006). Special issue on 3d acquisition technology for cultural heritage. *Machine Vision and Applications*, vol. 17, n° 6, p. 347-348. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-006-0042-2>
- Xuetao Y., Wonka P., Razdan A. (2009). Generating 3D Building Models from Architectural Drawings: A Survey. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 29.
- Yastikli N., Emem O., Alki V. (2003). 3D model generation and visualization of cultural heritage. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV-5/C15, p. 1682-1777.

Article soumis le 27/02/2014

Accepté le 10/03/2015