

# DÉVELOPPEMENT PHOTOGRAMMÉTRIQUE ISOMÉTRIQUE DE PLANS ANCIENS

Alexane Nghien<sup>1</sup>, Marc Pierrot-Deseilligny<sup>1</sup>

1: Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, LASTIG, F-94160 Saint-Mandé, France

## Résumé

Une méthode de mise à plat numérique de plans baguettes (plans papiers de l'Ancien Régime soutenus entre deux baguettes en bois) a été proposée pour aider les Archives Nationales dans leur conservation de patrimoine sous forme numérique. Cette méthode de mise à plat utilise le logiciel de photogrammétrie MicMac (Rupnik et al., 2017). On y réalise ainsi une chaîne de traitements photogrammétrique afin de générer à partir de photographies d'un plan, son maillage triangulé. Un stage de fin d'étude a été réalisé pour adapter cette méthode existante, l'évaluer et la transmettre de façon optimale aux Archives Nationales. Désormais les Archives Nationales utilise cette application particulière de MicMac, ainsi qu'un protocole de photogrammétrie leur permettant de développer des plans anciens.

**Mots clés :** Photogrammétrie, Développement isométrique de surface, MicMac

## Abstract

*A digital isometric flattening method for baguette plans (paper plans from the French Ancien Régime supported between two wooden sticks) has been designed to help the French National Archives in their digital heritage conservation. This flattening method uses the MicMac photogrammetry software (Rupnik et al., 2017). An end-of-study internship was carried out to adapt this existing method, evaluate it and transmit it optimally to the National Archives. The National Archives now use this particular application of MicMac, as well as a photogrammetry protocol allowing them to develop old plans.*

**Keywords :** Photogrammetry, Isometric surface development, MicMac

## 1. Introduction

### 1.1. Exposé du contexte, cahier des charges

La conservation du patrimoine est un enjeu crucial qui passe notamment par la numérisation de documents historiques la plus fidèle à la réalité possible. Pour les Archives Nationales, la numérisation de plans se faisait par la production d'orthophotographies. Cependant certains plans trop déformés physiquement par le temps, l'humidité ou les variations de température ne peuvent être acquis de telle sorte car l'information sur les parties courbées serait perdue sur une orthophotographie. Par la fragilité des plans, les restaurateurs des Archives Nationales ne sont pas en mesure d'aplanir ces plans physiquement. Ainsi, une mise à plat virtuelle numérique a été proposée pour pallier ce problème. La mise à plat virtuelle pour les Archives doit respecter plusieurs conditions : être géométriquement correcte, ne pas présenter de discontinuités radiométriques. D'un point de vue pratique, les traitements, présents sous MicMac, doivent être facilement exploitables et réalisables de façon automatique. Une intégration dans le logiciel MeshRoom a été proposée définissant sous la forme d'une chaîne de traitement pré-paramétrée, accessible et optimale pour ce besoin en particulier [AliceVision (2024)].

La mise en plat en patrimoine peut s'apparenter à un problème de développement de sphère ou d'ellipsoïde en cartographie.

## 2. Etat de l'art

### 2.1. Méthodes de développement

L'objectif premier de ce traitement est de déterminer une surface plane possédant la même topologie que le maillage 3D dans un cas idéal. Le problème revient donc à trouver une bijection entre ces deux surfaces paramétrées. De nombreuses applications existent pour ce problème de paramétrisation planaire (Laurent Saboret et Jain (2006)) (application de texture, atlas, développement de maillage, remaillage...).

Dans le cas continu, on effectue une caractérisation locale du plan, c'est-à-dire que l'on considère la différentielle comme une application du plan tangent vers le plan de développement. Dans le cas d'une surface développable, l'application doit être isométrique. En pratique, les surfaces sont presque développables. Plusieurs critères (conformité, équivalence) peuvent aussi être choisis comme contraintes à minimiser pour caractériser le développement. De nombreuses méthodes dans le cas discret, visent à minimiser un critère d'isométrie. Nous aborderons uniquement les méthodes permettant de passer des points 3D du maillage à des coordonnées 2D  $(u,v)$  avec des bords contraints ou non contraints (Tutte, 1963). Ces méthodes permettent de passer du maillage à des surfaces homéomorphiques à des disques ou des sphères. Toutes ces méthodes ont pour objectifs de minimiser les distorsions à savoir conserver une cohérence de propriétés géométriques, éviter les

singularités, d'être conformes et isométriques (dans un cas idéal).

Parmi les méthodes qui possèdent une contrainte de bord, c'est-à-dire que le développement doit être dans un espace dont les bords sont définis et fixés (pour la plupart des cas un disque). On peut citer le Discrete Conformal Map (Eck et al., 1995) qui permet de minimiser la déformation angulaire et préserve la topologie, la paramétrisation aouthalique discrète (Desbrun et al., 2002) qui permet de préserver les aires qui minimise localement la distorsion en aire.

Notre cas correspond à un développement de surface sans contraintes de bords. D'autres méthodes existent, conformes et isométriques voire aouthaliques. On peut citer : A Local/Global Approach to Mesh Parameterization (Liu et al., 2008) réalisée par Liu et al. basée sur une minimisation d'énergie itérativement locale, déterminant une paramétrisation idéale pour chaque triangle puis globale, s'assurant de la cohérence du maillage triangulé. Cette méthode détermine itérativement localement une paramétrisation idéale pour chaque triangle dans un plan, en utilisant par défaut des translations, uniquement des similarités pour une paramétrisation conforme (as-similar-as-possible), des rotations pour une paramétrisation isométrique (as-rigid-as-possible) ou encore des transformations de déterminant égal à 1 pour conserver les aires. A chaque itération la méthode détermine pour chaque triangle  $t$  une transformation optimale  $L_t$  (rotation ou similarité) basée sur une minimisation d'énergie entre les coordonnées 2D des triangles et une transformation linéaire, puis ces applications sont fixées et on recalcule les coordonnées 2D des triangles par un système linéaire épars.

La méthode Least Squares Conformal Maps (Lévy et al., 2002) permet de déterminer une paramétrisation d'un maillage 3D non isométrique à un disque. Elle minimise par moindres carrés les variations de la conformité du maillage paramétré.

### 3. Méthodologie

La mise à plat d'une surface texturée est d'abord un problème géométrique (développement d'une surface), puis un problème radiométrique (définition d'un modèle, récupération de la couleur) et enfin de texture (esthétique satisfaisante).

Le développement de la surface s'effectue par de nombreuses opérations sous MicMac. On utilise pour cela des acquisitions photographiques d'une surface déformée que l'on souhaite développer. On suppose que les photographies en entrée possèdent un recouvrement suffisant pour réaliser une détection de points homologues radiométriques selon l'algorithme SIFT Lowe (2004). Dans le cas du protocole développé pour le stage, nous avons imposé un recouvrement de 80% en intrabande, et 55% en interbande (figure 2).

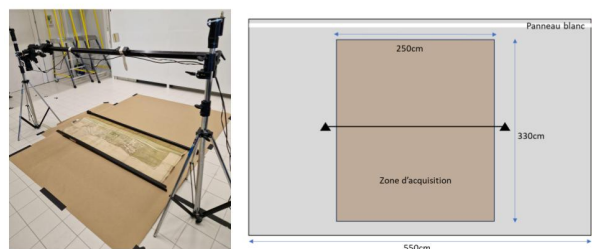


FIGURE 1: Studio photographie des Archives Nationales

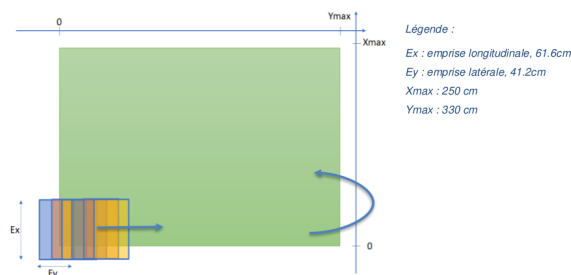


FIGURE 2: Schéma d'une vue nadir du parcours de l'acquisition. En vert la carte à acquérir est représentée, et en couleur les clichés successifs

#### 3.1. Acquisitions

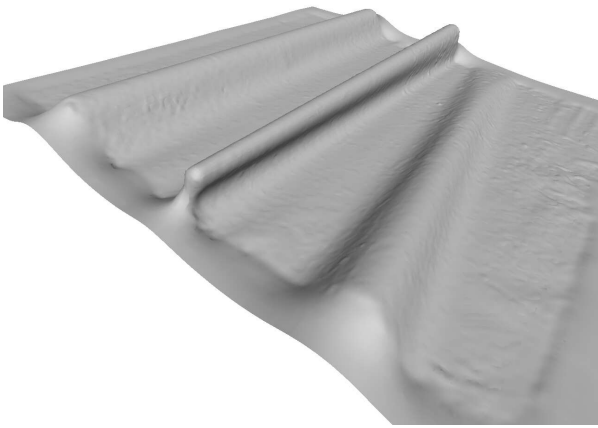
Les clichés ont été acquis dans un environnement contrôlé au possible, au studio photographie des Archives Nationales. Des flash éclairent le plafond blanc pour avoir un éclairage indirect, le plus homogène et isotrope possible afin de limiter la présence d'ombre. Dans ce protocole d'acquisition, nous avons réalisé les clichés avec un Nikon D810, capteur plein format (35.9mm x 24mm). L'appareil est fixé sur une rampe dans un plan parallèle à celui du sol (figure 1). Les spécifications techniques sont détaillées en figure 3. Le montage permet d'acquérir des plans de façon optimale selon les moyens disponibles (figure 2).

#### 3.2. Calcul de modèle 3D

Une chaîne de production classique en photogrammétrie est utilisée pour générer le modèle 3D du plan

Focal	60mm
Résolution	300 dpi
Hauteur caméra	103cm
Emprise	<b>61,6 cm x 41.2 cm</b>
<b>Recouvrement intrabande</b>	<b>80%</b>
<b>Recouvrement interbande</b>	<b>55%</b>
Base	8.24cm
Ecart interbande	27.7cm

FIGURE 3: Tableau des caractéristiques de l'acquisition



**FIGURE 4:** Maillage avec des extensions indésirables

baguette, déjà présente et implémentée sous MicMac (Rupnik et al. (2017)). On successivement les étapes suivantes :

1. Détection des points homologues avec l'algorithme SIFT (Lowe (2004)) entre les différents clichés
2. Calcul de l'orientation relative entre les caméras
3. Saisie d'une échelle et d'un plan
4. Basculement du bloc à cette échelle
5. Calcul du nuage de points dense
6. Saisie de la zone à développer
7. Calcul du maillage triangulé en utilisant l'algorithme de reconstruction de surface de Poisson (Kazhdan et al. (2006))

### 3.3. Développement de surface

Une fois le maillage généré par des traitements classiques de photogrammétrie, présentons la méthode de mise à plat numérique.

#### 3.3.1. Découpage du maillage

Après avoir saisi le masque du maillage à la main, l'algorithme supprime tous les points extérieurs au masque. On peut choisir le seuil de découpe d'un triangle. Par défaut, si un seul point d'un triangle est hors du masque, tout le triangle est supprimé. Si on a avant découpage le maillage de la figure 4, on obtient le maillage de la figure 5

#### 3.3.2. Développement géométrique du maillage sans texture

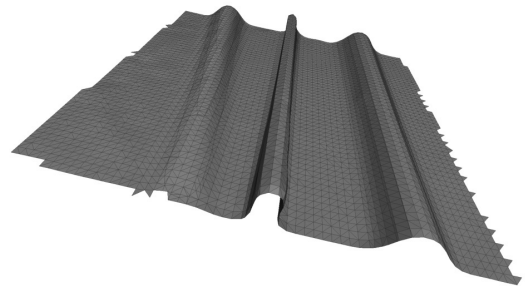
Une fois le maillage découpé et corrigé (figure 6), il peut être développé.

L'isométrie du développement peut être formalisée de nombreuses façons. Une première méthode intuitive serait de minimiser l'écart entre les distances sur le plan développée et les orthodromies sur le maillage 3D. On pose :

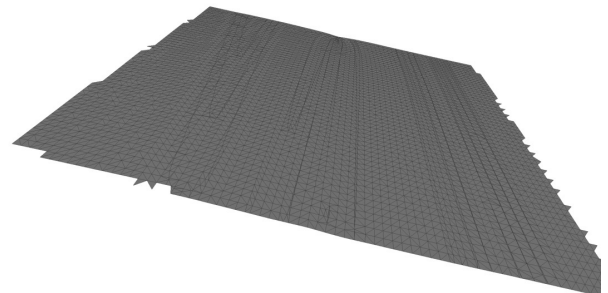
- $P_i$  les  $i$  points 3d du maillage triangulé,  $P_i \in R^3$



**FIGURE 5:** Maillage après le clipping (découpage)



**FIGURE 6:** Maillage 3d non développé



**FIGURE 7:** Maillage après développement)

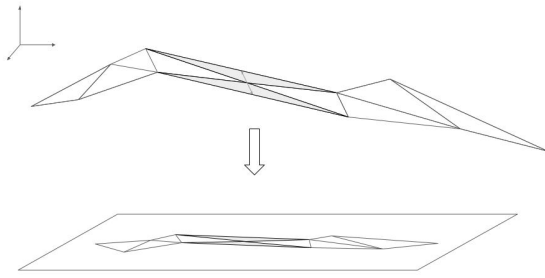


FIGURE 8: Développement du maillage 3d vers un plan

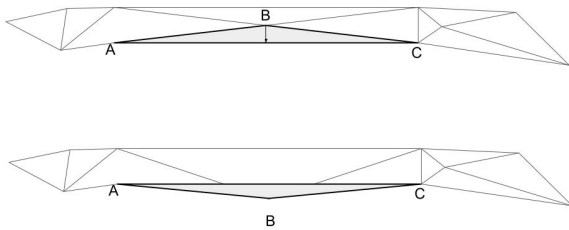


FIGURE 9: Impact d'une variation de distance non bloquée par le critère sur un petit triangle qui peut résulter en une inversion du triangle

- $\phi(P_i)$  les positions 2d inconnues du développement,  $\phi(P_i) \in R^2$
- $\tau_t = P_{t_1}, P_{t_2}, P_{t_3}, t \in [1, T]$  les  $T$  triangles du maillage (2d ou 3d)

Nous avons pour contrainte d'avoir un développement dans la mesure du possible isométrique. C'est-à-dire que sa distance sur le plan doit être la même que l'orthodromie sur le maillage non développé (géodésique). On écrit ce critère d'isométrie sous la forme :

$$E_{dist}(\phi) = \sum_{t=1}^T \sum_{m,n=1}^3 [d(P_{t_m}, P_{t_n}) - d(\phi(P_{t_m}), \phi(P_{t_n}))]^2 \quad (1)$$

où  $d$  définit une distance entre 2 points.

Cette équation présente une non stabilité notamment à cause de triangles plats. Cette non stabilité est illustré sur la figure 9 dans le cas des triangles très plats. Si l'on bouge orthogonalement le point  $B$  par rapport à l'axe  $(AC)$ , les distances ne varieront que très peu : le point n'est pas bien tenu. Ainsi, optimiser ce critère est instable dans ce cas particulier, que l'on retrouve à de nombreuses reprises (figure 9). Le point  $B$  n'est pas fixe, on pourrait dans le cas limite obtenir une inversion de triangle (le point  $B$  passe de l'autre côté de l'axe  $(AC)$ ).

Afin de réaliser un développement stable, on choisira plutôt une approche locale. En effet, il existe pour chaque triangle  $\tau_i$ , indépendamment des autres, un développement exact dans un triangle du plan. Notons  $\tau_t^2 = (q_{t_1}, q_{t_2}, q_{t_3})$  les coordonnées d'un développement

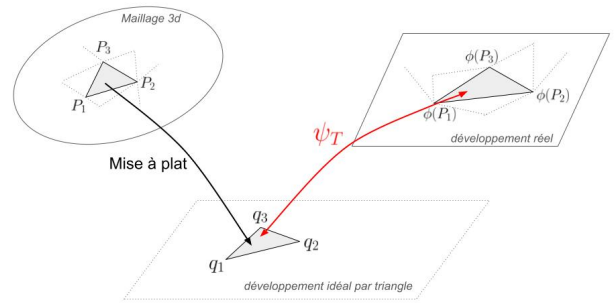


FIGURE 10: Définition du critère global d'isométrie

idéal des triangles. On a donc le critère :

$$d(q_{t_m}, q_{t_n}) = d(P_{t_m}, P_{t_n}) \quad (2)$$

avec  $m, n \in (1, 2, 3), t \in [1, T]$  où  $T$  est le nombre de triangles du maillage.

Dans ce cas de développement parfait, il existe ainsi pour chaque triangle une rotation plane  $R_t$  telle que :

$$\phi(P_{t_m}) = R_t q_{t_m} \quad (3)$$

Notons  $\psi$  l'application qui associe à chaque triangle une rotation plane :

$$\psi(\tau_t) = R_t \quad (4)$$

Ainsi dans le cas idéal, c'est-à-dire pour chaque triangle indépendamment, pour  $m \in (1, 2, 3), t \in [1, T]$  avec  $T$  le nombre de triangles on peut écrire :

$$\psi(q_{t_m}) = \phi(P_{t_m}) \quad (5)$$

On cherchera à minimiser l'énergie de déformation globale en calculant simultanément  $\phi$  et  $\psi$  selon l'équation 5 :

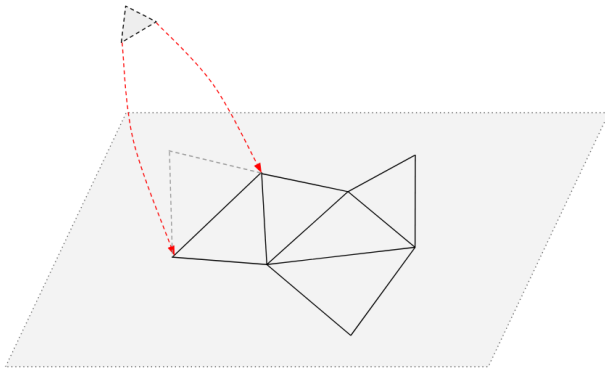
$$E_R(\phi, \psi) = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^3 d(\phi(P_{t_m}) - \psi(\tau_t)(q_{t_m}))^2 \quad (6)$$

On minimise cette énergie par moindres carrés non linéaires itérés.

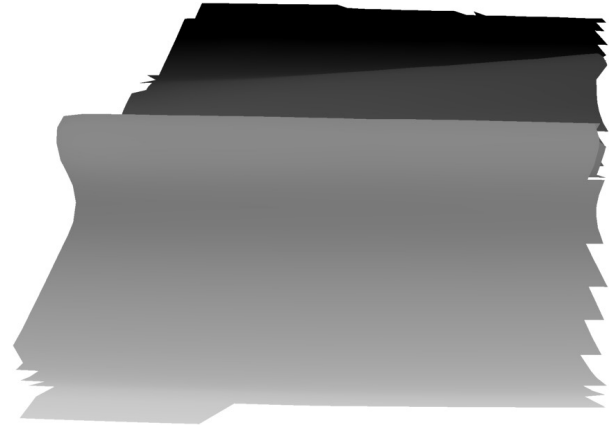
Pour commencer, on initialise en choisissant un triangle arbitrairement au milieu du maillage par exemple et on calcule son développement exact. Ensuite, de façon itérative :

1. Sélection les triangles connexes à ceux déjà développés
2. Projection (développement) par similitude (pour conserver les angles) de ces triangles pour trouver la position du 3ème point (figure 11).
3. Minimisation selon le critère énergétique

Cette étape renvoie en sortie le maillage développé (figure 7), et un extrait du maillage initial 3D correspondant aux points de celui développé, qui peut être exactement égal au maillage en entrée d'étape s'il n'y a pas de problème de connectivité.



**FIGURE 11:** Projection par similitude des 2 points adjacents au maillage développé dans le plan pour retrouver le 3ème point par conservation des angles



**FIGURE 13:** ZBuffer depuis la photographie de 12

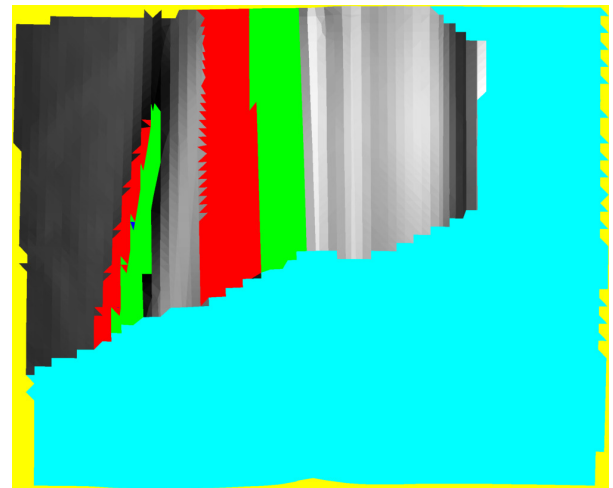


**FIGURE 12:** Photographie du plan à développer

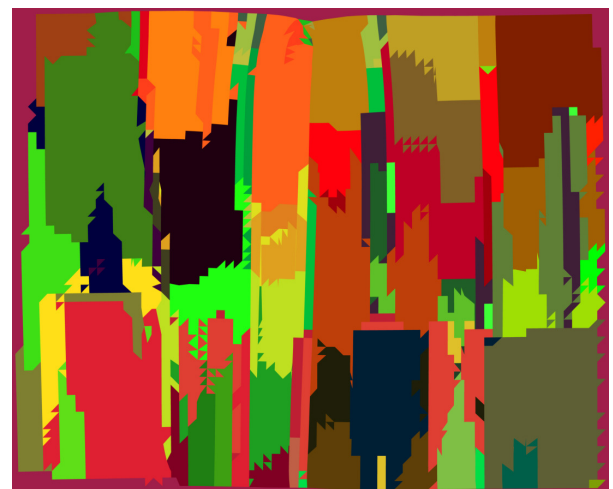
### 3.3.3. Calcul de la visibilité, qualité et radiométrique de chaque triangle du maillage

Cette étape prépare l'égalisation radiométrique puis la coloration des pixels de l'image développée. Pour chaque image on calcule un Z-Buffer (pour déterminer la visibilité de chaque triangle depuis le centre de perspective de la photographie). Puis pour chaque triangle visible on calcule sa résolution dans l'image. On obtient ainsi une carte des résolutions pour chaque image, dans laquelle on a des triangles correctement orientés mais occultés par d'autres, des triangles non visibles car mal orientés (vus de façon plats depuis l'image) et des triangles visibles possédant différentes résolutions. On choisit ensuite pour chaque triangle l'image dans laquelle il possède la résolution la plus élevée pour extraire l'information radiométrique (la texture). La figure 15 présente pour chaque triangle la meilleure image dans laquelle il possède la meilleure résolution. Pour déterminer cette image, on utilise des ellipsoïdes de résolution dans lesquels on mesure pour toutes les images dans lesquelles chaque triangle apparaît sa meilleure résolution dans le pire des cas pour sa reprojection (figure 16).

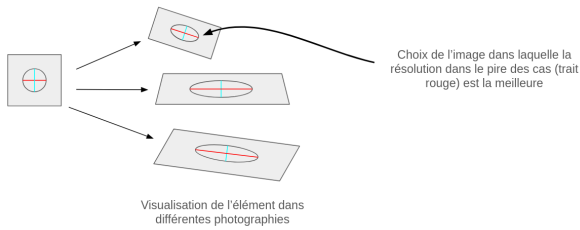
Les figures 14 et 15 présentent les résultats de cette



**FIGURE 14:** Carte de visibilité des triangles depuis la prise de vue de 12



**FIGURE 15:** Visualisation des images sélectionnées pour donner la couleur aux triangles



**FIGURE 16:** Schéma du choix de l'image pour laquelle un triangle possède la meilleure résolution spatiale

étape dans la géométrie 2d du plan développé.

Sur la figure 14 on observe la visibilité et résolutions des triangles du maillage développé depuis le point de vue d'une seule image.

La figure 14 présente comme code couleur :

- Gris : triangles visibles. La valeur de gris (noir → blanc) est proportionnelle à la résolution calculée
- Cyan : triangles qui ne se projettent pas dans l'image ou une absence de triangle
- Rouge : triangles orientés correctement mais occultés par d'autres
- Vert : triangle non visible à cause de leur orientation

On utilise une palette de couleur aléatoire pour représenter la couleur des images. Une même couleur montre les triangles de la même image.

### 3.4. Égalisation radiométrique

On pourrait simplement pour chaque triangle du maillage développé appliquer la couleur du pixel de l'image dans laquelle il possède la meilleure résolution, mais il y aurait des artéfacts : en effet les conditions d'éclairage ne sont pas parfaitement identiques entre les images, la surface n'est pas lambertienne : ainsi la couleur d'un même pixel vu entre deux images ne sera pas identique entre ces deux images. Avant cela, nous calculons un modèle radiométrique afin d'égaliser les images et ensuite de colorer pixel à pixel le maillage. Ici nous sommes dans un cas où l'on possède de nombreuses images se recouvrant sur une même zone. Nous allons ainsi procéder :

- Détermination des points homologues radiométriques
- Calcul d'un modèle radiométrique entre les différentes images
- Application du modèle pixel par pixel sur les différentes images

#### 3.4.1. Détermination d'un modèle radiométrique

La détermination du modèle radiométrique global se fait en plusieurs étapes. On calcule tout d'abord un premier modèle radiométrique affine entre toutes les images (permet de gérer les cas de grandes dynamiques entre images).

Par image on effectue ensuite une correction pour enlever l'effet de vignettage. Cette correction est définie par un modèle radiométrique s'exprimant sous la forme



**FIGURE 17:** Plan développé présentant des ombres

d'une fonction radiale paire, avec  $i, j \in [1, n], [1, p]$  la position du pixel où  $(n, p)$  est la dimension de l'image  $r$  la distance entre chaque pixel et le centre de l'image,  $(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \dots)$  sont les coefficients du modèle,  $k \in [1, N]$  où  $N$  est le nombre d'images utilisée pour le développement :

$$\phi(i, j) = \gamma_k \cdot [1 + \alpha_k \cdot r^2 + \beta_k \cdot r^4] \quad (7)$$

#### 3.4.2. Développement 2D et application de la texture sur l'image finale

Le modèle radiométrique calculé par image, on peut désormais attribuer une couleur à chaque pixel de l'image développée en appliquant le modèle radiométrique. Ainsi, on égalise tout d'abord chacune des images dont au moins un triangle récupère la couleur. Ensuite, on génère une orthoimage de dimension égale à la boîte englobante de la triangulation 2d, en ajoutant des marges. On parcourt ensuite chaque pixel de l'orthoimage, on récupère l'identifiant du triangle dans lequel il se trouve, l'image associée égalisée et on associe ainsi la couleur en récupérant l'information.

## 4. Évaluation

L'évaluation du résultat peut se faire selon différents aspects, radiométriques et géométriques.

### 4.1. Radiométrique : Artéfacts radiométriques

Les sources des artéfacts radiométriques sont nombreuses. Nous avons réalisé quelques tests pour identifier les possibles sources d'erreurs extérieurs : vérifier les conditions d'éclairage, détection d'un systématiques dans la caméra, détecter une éventuelle présence d'ombre du trépied du montage (figure 1).

On peut observer certains défauts présents sur les images 17.

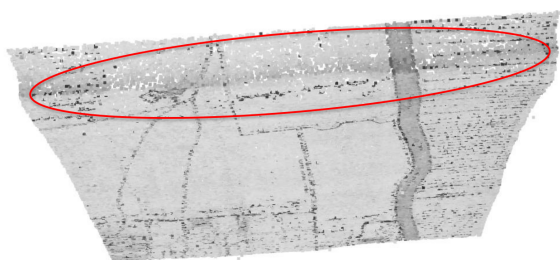
Un éclairage zénithal non homogène sur une surface anisotrope cause des ombres au niveau des pentes sur les parties courbées du plan. Nous avons proposé une méthodologie de correction des ombres selon une approche empirique.

#### 4.1.1. Modélisation des ombres

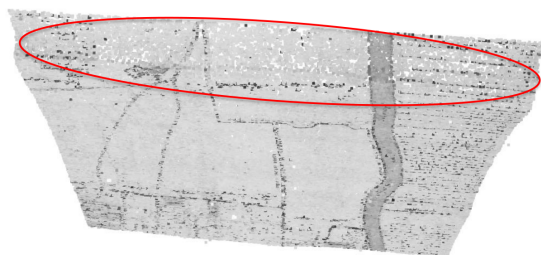
Tout d'abord, on peut effectuer un lien empirique entre pente et ombre : plus la pente est forte, plus l'ombre sera prééminente, pour un éclairage zénithal non homogène sur une surface anisotrope. Ainsi, nous proposons un modèle polynôme de degré 2 pour corriger les ombres au niveau des pentes :

$$L = Ap^2 + Bp + C \quad (8)$$

avec  $L$  grandeur assimilée à la luminance du pixel,  $A, B, C$  inconnues, et comme abscisse la pente (c'est-à-dire ici la normale à la pente), et comme ordonnée la luminance de chaque point. Nous travaillons ici sur un nuage de points en 4 dimensions ( $X, Y, Z$  et luminance). Nous avons appliqué un seuillage sur la pente pour sélectionner les points de références pour le calcul des paramètres du modèle. Pour corriger le nuage et réhausser la luminance des pixels, nous calculons une luminance moyenne sur la totalité de la carte, correspondant à la valeur moyenne de luminance pour une pente nulle. Puis, chaque élément est réhaussé de la différence entre la valeur du modèle pour sa pente et la valeur moyenne de luminance. Les figures 18 et 19 présentent le nuage de points avant et après correction des ombres.



**FIGURE 18:** Nuage de points sans correction des ombres au niveau des pentes

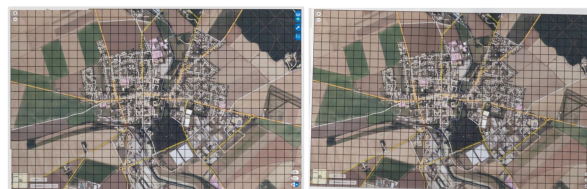


**FIGURE 19:** Nuage de points avec correction des ombres au niveau des pentes

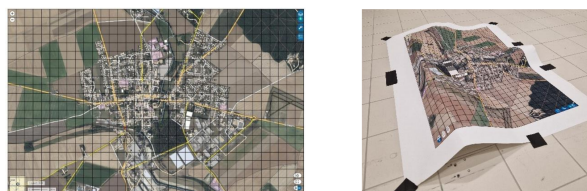
## 4.2. Géométrie

### 4.2.1. Qualification de l'isométrie

Le développement est supposé isométrique. Afin de tester cette condition, nous mesurons les déformations liées au développement d'une image plate par rapport au développement de cette même image déformée. Nous avons imprimé une carte au format A2 puis réalisé une acquisition selon un protocole de photogrammétrie



**FIGURE 20:** A gauche : image développée du plan sans déformation initiale, à droite : image développée de la carte pliée

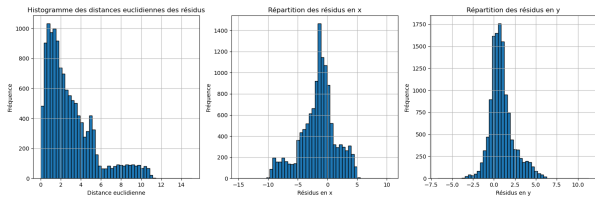


**FIGURE 21:** A gauche : plan qui a servi aux tests, à droite : photographie du plan déformé

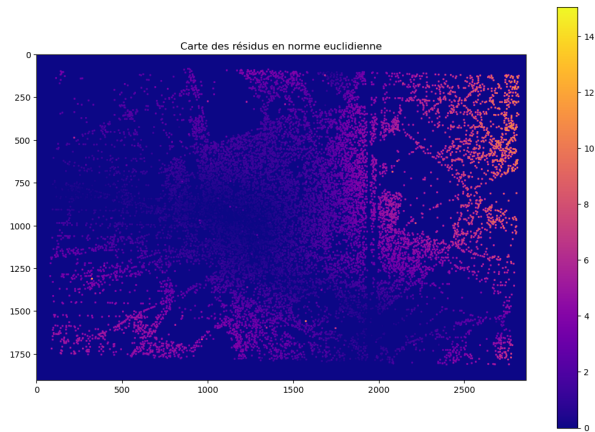
de cette carte, en prises de vue orthogonales selon les spécifications techniques décrites plus haut (figure 3), réalisé toute la chaîne de développement de surface. Il s'agit de l'image témoin. Ensuite nous avons déformé, plié cette carte, puis effectué exactement le même protocole d'acquisition : c'est notre image sujet. Les acquisitions photographiques ont été effectuées dans un environnement contrôlé, afin de s'assurer que les conditions d'acquisition soient le plus possible identiques entre les deux chantiers. Les positions des caméras sont identiques, même conditions d'éclairage, même temps de pose et même nombre de photographies pour la construction du modèle. Le résultat doit normalement être identique à une orthophotographie de la zone. Nous avons repris cette même carte, pliée et déformée, réalisé des acquisitions aux mêmes endroits selon le même protocole et appliqué la chaîne de développement. Une fois que nous possédons deux images développées : une sujet, l'autre témoin, nous mesurons les résidus du recalage entre la carte plate physiquement et la même carte déformée puis aplatie numériquement. Puisque les développements ont lieu dans des espaces d'arrivée de même dimension, il existe une bijection qui permet de passer de l'une à l'autre. Dans notre cas en 2 dimensions il s'agit d'une transformation affine 2d (similitude).

Cependant le développement est presque isométrique : il n'existe pas une similitude idéale. Ainsi, nous allons devoir calculer les paramètres de l'affinité plane qui minimisent les résidus du recalage l'image de référence et l'image développée. Entre les deux images développées, on a déterminé des points homologues par SIFT Lowe (2004) et itérativement par Random Sample Consensus (RANSAC) calculé ces paramètres. La figure 23 montre les résidus du recalage.

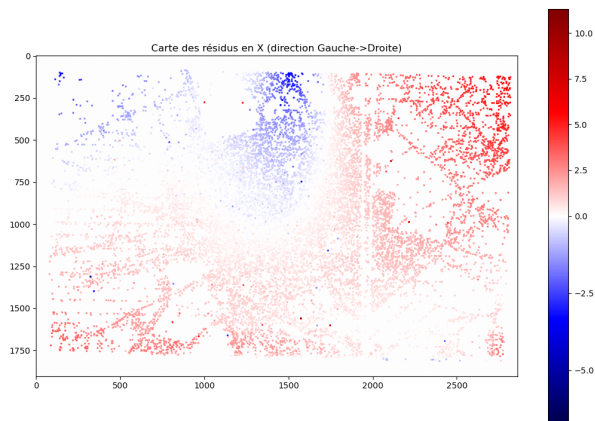
La figure 23 présente la répartition spatiale des résidus en valeur absolue (norme euclidienne en pixels) et les figures 24 et 25 la variation spatiale des résidus selon l'axe des abscisses (figure 24) et des ordonnées



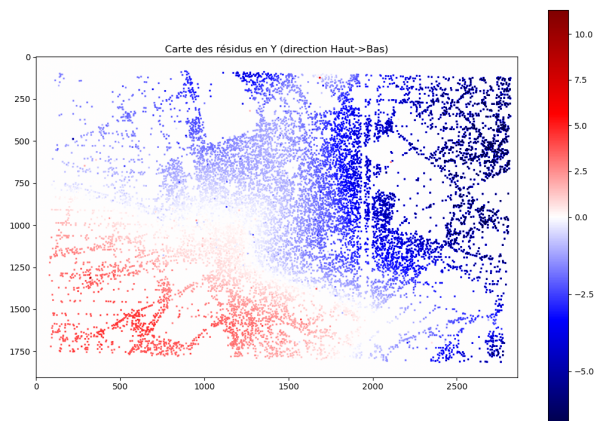
**FIGURE 22:** Histogrammes des résidus du recalage entre l'image de référence plate, et l'image de référence mise à plat numériquement



**FIGURE 23:** Répartition spatiale des résidus en norme euclidienne (en pixels)



**FIGURE 24:** Répartition spatiale des résidus en Y (en pixels)



**FIGURE 25:** Répartition spatiale des résidus en X (en pixels)

(figure 25). On remarque que les résidus sont proches de 0 là où se trouvent les plis de la carte froissée. Puisque les résidus augmentent de façon orthogonale aux plis (direction plis->bordures images), le recalage s'effectue au niveau du plis minimisant ainsi les résidus moyens.

Si les résidus étaient parfaitement nuls, on qualifierait le développement d'isométrique. La moyenne des résidus en distance euclidienne (en pixel) sur les 12605 points homologues est de 2.93 pixels. La différence moyenne du recalage en Y (axe des abscisses direction nord->sud) est de -1.57 pixels et en X (axe ouest->est) est de 0.9 pixel. La figure 22 présente les histogrammes de ces répartitions de résidus. Proportionnellement, sur l'image de 1904x2863 pixels, cela revient à une erreur moyenne de 0.03% en Y et de 0.08%

Cette différence provient principalement de deux effets : les contraintes de pliage (principal pli là où les résidus sont nuls ou proche de 0) ont déformés le papier qui n'est désormais plus parfaitement développable.

## 5. Conclusion et perspectives

Une nouvelle méthode de développement photogrammétrique de surface développable (dans le cas discret) a été proposée par le biais de MicMacV2, et mise en application dans le cadre d'un stage de fin d'études. Cette méthode permet de réaliser un développement isométrique de surface développable.

Au préalable, il convient de disposer d'un maillage triangulé tridimensionnel. Cette méthode est intégrée dans une chaîne de traitement photogrammétrique. La qualité de l'isométrie du développement dépendra nécessairement du caractère développable du maillage à développer. Dans le cas des plans baguettes, en plus de ne pas être plats, ils ont subis des déformations avec le temps. L'algorithme permet de minimiser l'impact de ces déformations dans le développement. La plupart des artefacts ont été corrigés grâce au modèle d'égalisation radiométrique, à quelques exceptions résiduelles près.

Un protocole d'acquisition pour cette application spécifique des plans baguettes a été proposée au laboratoire de photographie des Archives Nationales.

## Références

- AliceVision, 2024. *alicevision/MeshroomMicMac*. Original-date : 2023-07-17T08 :54 :50Z.  
URL <https://github.com/alicevision/MeshroomMicMac>
- Desbrun, M., Meyer, M., Alliez, P., 2002. Intrinsic parameterizations of surface meshes. *Computer Graphics Forum* 21 (3), 209–218.  
URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8659.00580>
- Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery, M., Stuetzle, W., 1995. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. Dans : *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '95*. ACM Press, pp. 173–182.  
URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=218380.218440>



- Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H., 2006. Poisson surface reconstruction. Symposium on Geometry Processing.
- Laurent Saboret, Pierre Alliez, B. L. M. R.-L. A. F., Jain, H., 2006. Cgal doc planar parameterization of triangulated surfaces meshes. [https://doc.cgal.org/latest/Surface\\_mesh\\_parameterization/index.html](https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_parameterization/index.html), accessed : 2024/02/13.
- Liu, L., Zhang, L., Xu, Y., Gotsman, C., Gortler, S. J., 2008. A local/global approach to mesh parameterization. Computer Graphics Forum 27 (5), 1495–1504.  
URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-8659.2008.01290.x>
- Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision 60 (2), 91–110.  
URL <http://link.springer.com/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Lévy, B., Petitjean, S., Ray, N., Maillot, J., 2002. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. ACM Transactions on Graphics 21 (5), 362–371.
- Rupnik, E., Daakir, M., Pierrot Deseilligny, M., 2017. MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry 2 (1), 14.  
URL <http://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-017-0027-2>
- Tutte, W. T., 1963. How to draw a graph s3-13 (1), 743–767.  
URL <http://doi.wiley.com/10.1112/plms/s3-13.1.743>