

## Création de photomodèles adaptés à l'étude des fronts rocheux

■ Pauline LUCAS

*Les géologues travaillant au sein du bureau d'étude en risques naturels GIPEA (Géomatique Ingénierie Prévention Environnement Aménagement) ont besoin d'un outil leur permettant de visualiser à la fois la géométrie et la nature des fronts rocheux. Ils ont besoin de ces informations pour réaliser leurs études de stabilité et proposer des aménagements.*

*Il a donc été décidé de réaliser un outil informatique permettant la création d'un photomodèle des parois à étudier. Pour réaliser un photomodèle nous avons besoin de photographies du front et d'un semis de points 3D représentant la géométrie de la paroi. Pour être exploitables les photographies devront être orientées. Pour cela il faut également mesurer des points de calage. Une méthodologie décrivant les étapes d'acquisition de ces données, photographies et points de calage, a été mise au point.*

*L'outil informatique créé permet tout d'abord, d'orienter les photographies grâce aux points de calage à partir d'un calcul de compensation basé sur les principes de la DLT (Direct Linear Transformation). Puis une autre application traite la triangulation du semis de points 3D par la méthode de Delaunay appliquée aux coordonnées sphériques des points. Le maillage ainsi obtenu est ensuite texturé pour obtenir un photomodèle réaliste du front rocheux. Un module de restitution 3D a également été créé en attendant que les outils prévus pour faciliter l'interprétation géologique et la représentation des aménagements à apporter soient programmés.*

**L**e projet de fin d'études présenté a été réalisé au sein de l'entreprise GIPEA (Géomatique Ingénierie Prévention Environnement Aménagement).

Depuis sa création, GIPEA s'emploie à développer des programmes informatiques pour faciliter l'appréhension et le traitement des données relatives aux risques naturels majeurs et aider à la décision en matière d'aménagement. Son activité est très diversifiée : élaboration de Plan de Prévention des Risques, étude de stabilité de versants, réhabilitation de carrières, études d'impacts, photogrammétrie, etc...

Pour développer ces activités, GIPEA dispose d'employés possédant diverses compétences (informatique, géotechnique, mécanique des roches, topographie, hydraulique).

C'est dans ce cadre de développement des outils de travail que mon projet s'est déroulé. Il avait pour but la

conception d'un outil informatique permettant la réalisation de photomodèles utilisables pour des études géologiques de fronts rocheux naturels (tels que des falaises) ou exploités (tels que des carrières).

L'instrument mis en place doit aider le géologue à étudier la géométrie de la paroi ainsi que la nature et les caractéristiques de la roche.

Le projet avait également pour but la conception d'outils facilitant l'extraction des informations utiles à l'analyse des risques que présente la paroi (mesure de distances, mesure de volumes, extraction de profils, visualisation de plans...).

Pour aboutir au résultat attendu, le projet a été divisé en quatre grandes phases.

Tout d'abord, nous nous sommes intéressés aux données nécessaires à la réalisation d'un photomodèle (photographies, points de calage, modèle 3D)

et aux différentes méthodes pour les acquérir. Cette première étape a permis de créer une méthodologie d'acquisition des données.

Nous avons ensuite étudié les possibilités de transformation du semis de points 3D en un modèle maillé.

Puis, nous nous sommes penchés sur l'utilisation de textures afin d'obtenir un photomodèle réaliste. Cette étape comprend aussi bien l'orientation des photographies utilisées comme texture que le placage de ces textures sur le modèle 3D. Enfin, nous avons recherché les outils qui peuvent être utiles à l'interprétation du photomodèle et étudié les possibilités d'intégration de ces outils dans une application.

Les éléments constituant le logiciel final ont été programmés en C++ sous un environnement Visual C++. Ce choix a été réalisé par l'informaticien de GIPEA pour répondre aux exigences des calculs et pour permettre une adéquation

■ ■ ■

- entre le logiciel créé et les logiciels existants.

## Levé : établissement d'une méthodologie

La méthode utilisée pour la représentation de fronts rocheux par un photomodèle doit s'adapter au mieux aux compétences des personnes susceptibles de l'appliquer et aux moyens matériels dont dispose GIPEA.

Nous avons donc choisi des méthodes de prise de vues et de mesure des points de calage répondant à ces critères.

### ■ Contexte de création de l'outil

Seul le topographe de l'équipe était familiarisé avec les principes de la photogrammétrie. Il a donc fallu mettre en place une méthode d'acquisition des photographies et des points de calage pour permettre aux autres membres de l'équipe de réaliser des photomodèles sans l'aide du topographe.

GIPEA dispose d'un appareil photo numérique, le Nikon D70. Cet appareil a été acheté avant mon arrivée dans l'entreprise, nous avons donc dû nous adapter à ses caractéristiques. (Voir figure 1)

Il est également important de souligner que GIPEA ne possède pas d'appareil de topographie type tachéomètre. Elle doit donc sous-traiter les travaux de lever des points de calage. Cependant, le

choix de la disposition et du nombre de points de calage s'effectuera par un employé de GIPEA qui devra également transmettre au topographe chargé des travaux, ses exigences de levé (méthode choisie, précision attendue...).

### ■ Prises de vue

Les photographies des fronts rocheux devront, à la fois permettre le placage de texture sur le photomodèle et une éventuelle stéréorestitution.

Pour plus de facilité, une plus grande couverture de la paroi, et en fonction du matériel dont dispose GIPEA, il a été décidé que les photographies seront terrestres et non pas aériennes. De plus, pour pouvoir être utilisées pour les applications définies ci-dessus, elles devront répondre aux critères suivants :

- Chaque zone à étudier par stéréorestitution doit se trouver sur deux clichés constituant un couple
- Le recouvrement entre deux clichés doit être supérieur ou égal à 60%
- Les axes de prises de vues doivent être parallèles ou très peu convergents (entre deux clichés d'un même couple)
- La base de prise de vue doit être la plus possible parallèle à la surface à étudier
- Tous les éléments devant apparaître sur le photomodèle doivent être photographiés (nécessité de compléter le levé prévu pour la restitution afin de couvrir les parties cachées)

Afin d'aider le personnel de GIPEA non familiarisé avec la photogrammétrie, des tableaux récapitulant les conditions de prises de vues à respecter pour répondre aux critères énoncés ont été mis en place. Ils reprennent les paramètres essentiels, c'est-à-dire la distance à respecter entre deux photographies pour obtenir un couple stéréoscopique, la taille de la zone couverte par une photographie, et la taille du terrain représenté par un pixel. Ces tableaux ont été élaborés en fonction de l'éloignement "objet-appareil" et des caractéristiques de l'appareil photo numérique utilisé par GIPEA.

### ■ Points de calage

Des points de calage seront nécessaires pour orienter les photographies, ils devront être au minimum 6 et ne pas se situer dans un même plan (Conditions d'utilisation de la "Direct Linear Transformation"). Cependant, les fronts n'offrent souvent pas d'éléments caractéristiques facilement identifiables pouvant être utilisés comme points de calage. De plus, les fronts rocheux ne sont pas toujours accessibles, il est donc parfois difficile de matérialiser ces points. Il faut donc adapter les méthodes de levé classiques à ces conditions particulières. Ainsi deux méthodes ont été mises en place :

- Les points sont matérialisés par une trace de peinture avant d'être levés par tachéométrie. Un croquis de repérage est ensuite réalisé et les photographies ne sont prises qu'après matérialisation des points (qui sont ainsi facilement identifiables).
- Les photographies ont été prises et les points de calage doivent être mesurés. Les points nécessaires ont été repérés sur la photographie et le porte prisme est guidé par l'opérateur vers ces points. Les points sont relevés par tachéométrie et l'emplacement du prisme, à chaque mesure, est repéré par une photographie.

Nous avons vu que nous devons disposer de six points de calage minimum par photographie à orienter mais nous en mesurerons toujours plus pour parer à une éventuelle erreur.

Caractéristiques	Valeurs
Nombre de pixels	6.1 megapixels
Résolution max.	3008 x 2000
Sensibilité	ISO 800, 400, 200, 1 320, 600, 1600
Taille du capteur	15.6 x 23.7 mm
Type de capteur	CCD
Objectifs disponibles	35-52 mm
Formats d'enregistrement	JPEG, RAW, RAW + JPEG
Interface	USB
Dimensions	14 x 16.8 x 11.1 cm
Poids	595 g

Figure 1 : Principales caractéristiques de l'appareil photo numérique (Nikon D70)

## Triangulation

Les semis de points représentant la paroi à matérialiser dont dispose GIPEA pour réaliser le maillage 3D, sont de deux types : des semis de points irréguliers et des levés par profils. Deux méthodes de triangulation correspondant à ces deux types de données ont donc été mises en place et programmées.

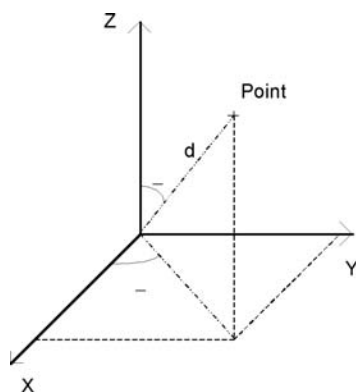
### ■ Semis de points irréguliers

Nous avons tout d'abord étudié les logiciels existants permettant de trianguler des semis de points irréguliers. Ces logiciels se sont révélés très performants mais trop coûteux pour une entreprise telle que GIPEA ; nous avons donc choisi de créer notre propre application de triangulation.

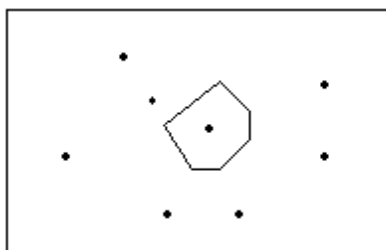
Nous ne pouvions trianguler directement les semis de points en 3 dimensions, il nous fallait passer à un système de coordonnées en deux dimensions pour pouvoir appliquer la triangulation de Delaunay.

Nous avons tout d'abord tenté de projeter les points sur un plan horizontal. Cette méthode a posé des problèmes dans le cas d'étude de surplombs. En effet, dans ce cas, deux points ayant des coordonnées planes identiques peuvent être associées à des altitudes différentes. Ces points seront situés sur un même triangle alors qu'ils sont en réalité éloignés.

Nous avons ensuite utilisé les coordonnées sphériques des points. En choisissant pour origine du système de coordonnées

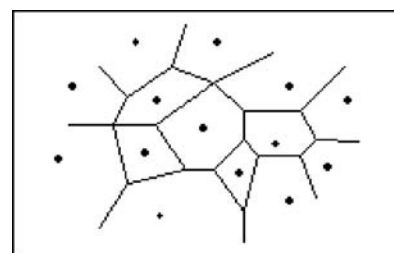


**Figure 2 : Utilisation des coordonnées sphériques des points**



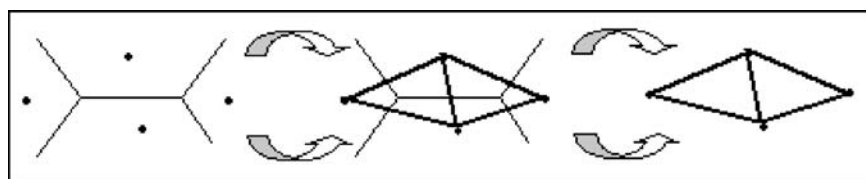
**Figure 3 : Polygone de Voronoi d'un point**

Source : [www.kaddour.com/chap4/chap4.htm](http://www.kaddour.com/chap4/chap4.htm).



**Figure 4 : Diagramme de Voronoi**

Source : [www.kaddour.com/chap4/chap4.htm](http://www.kaddour.com/chap4/chap4.htm).



**Figure 5 : Construction de la triangulation de Delaunay**

Source : [www.kaddour.com/chap4/chap4.htm](http://www.kaddour.com/chap4/chap4.htm).

données sphériques un point depuis lequel tous les points du semi sont visibles, nous ne pouvons associer à un couple de coordonnées  $(\theta, \varphi)$  (voir figure 2) qu'un seul point. Le choix du point d'origine est aisé lorsque le semi étudié a été obtenu par tachéométrie depuis une seule station, puisqu'il peut être cette station.

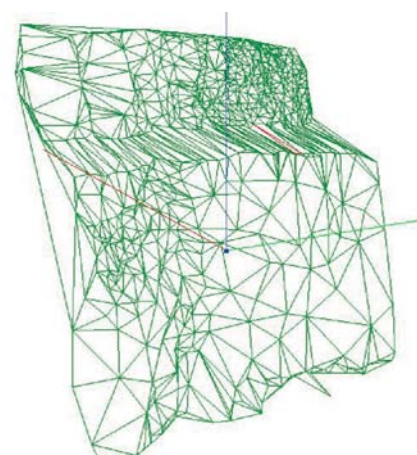
Nous appliquons ensuite la triangulation de Delaunay aux points caractérisés par leurs coordonnées sphériques. Pour obtenir une triangulation de Delaunay, nous utilisons la notion de diagramme de Voronoi qui est l'ensemble des polygones de Voronoi de chaque point.

Le polygone de Voronoi d'un point est l'ensemble des points  $(x,y)$  plus proches de ce point que d'un autre point (voir figure 3).

Le diagramme de Voronoi est l'union des polygones de Voronoi de tous les points (voir figure 4).

A partir du diagramme de Voronoi, la triangulation de Delaunay est construite. Pour cela, toutes les paires de points dont les polygones de Voronoi sont adjacents sont reliées par un segment (voir figure 5).

Cette méthode est adaptée à l'étude des fronts rocheux puisqu'elle permet de représenter des surplombs cependant

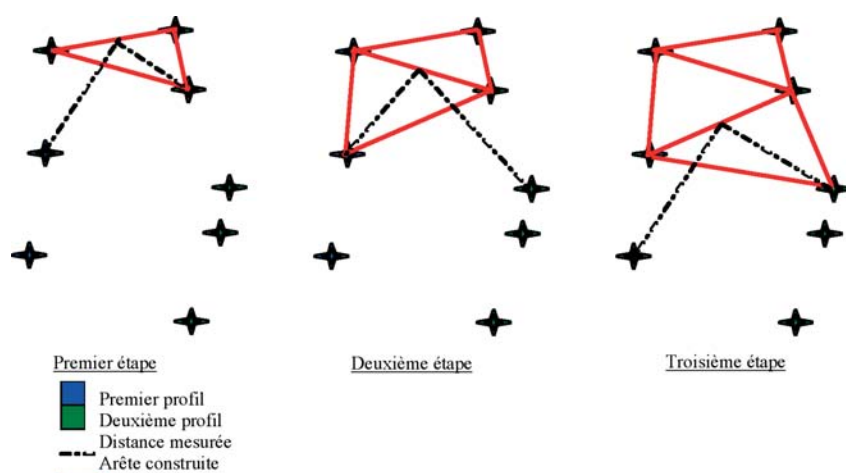


**Figure 6 : Exemple de triangulation obtenue avec notre méthode**

elle doit être appliquée avec soin car la qualité du résultat obtenu (correspondance avec la géométrie réelle de la paroi) dépend du repère de coordonnées sphériques utilisé

### ■ Profils

La méthode décrite ci-dessus a été appliquée aux profils dont dispose GIPEA. Nous avons toutefois observé une perte d'informations contenues dans ces profils. Ainsi, une méthode de triangulation spécifique aux profils a été mise en place. Cette méthode consiste à parcourir la liste des profils par paires en les reliant deux à deux, exploitant ainsi la disposition des points en profils successifs.



**Figure 7 : Méthode de triangulation des profils**

Les triangles reliant deux profils sont construits en parcourant des paires de points (un point de chaque profil). En partant des deux premiers points de chaque profil, la première arête du premier triangle est construite, puis les distances du milieu de cette arête avec le point suivant de chaque profil sont comparées. Le point le plus proche est alors retenu pour constituer le troisième point du triangle.

L'arête qui relie ce point au point du triangle appartenant à l'autre profil, sera la première arête du deuxième triangle.

Cette méthode permet de trianguler rapidement des profils sans perdre d'information.

## Placage de texture

### ■ Orientation des clichés

Une seconde application, nommée Orientation/Calibration a été créée et programmée pour calibrer notre caméra et effectuer les orientations interne et externe des photographies de la paroi. Les valeurs des 11 coefficients de la Direct Linear Transformation (DLT) sont déterminées ainsi que les valeurs des paramètres de distorsion (distorsion radiale, distorsion tangentielle et défaut d'orthogonalité et d'échelle). Ces étapes sont réalisées par une méthode de compensation par les moindres carrés basée sur les principes de la "Direct Linear Transformation" (DLT). Pour cela, nous avons besoin des clichés, des

données des points de calage mesurés et des valeurs observées de la focale de l'appareil photo et des coordonnées du point principal. Nous pouvons ensuite calculer les paramètres d'orientation interne (coordonnées du point principal et distance principale) et externe (coordonnées du centre de projection et angles de rotation).

### ■ Réalisation du photomodèle

Le photomodèle de la paroi peut ensuite être réalisé à partir du modèle 3D de la paroi issu de la triangulation et des photographies orientées. L'étape du placage de texture consiste à chercher une correspondance entre les mailles (triangles) du modèle 3D et une partie de photographie. Pour réaliser cette étape, nous utilisons les résultats de l'orientation des clichés. Nous cherchons pour chaque sommet du maillage (X,Y,Z) le pixel correspondant sur le cliché (xc, yc) en appliquant les formules suivantes :

$$x_c = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} - \Delta x$$

$$y_c = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} - \Delta y$$

Avec :

$$\Delta x = x' (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1 (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y'$$

$$\Delta y = y' (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + 2P_1 x' y' + P_2 (r^2 + 2y'^2) + A_1 x' + A_2 y'$$

$$x' = x - x_0$$

$$y' = y - y_0$$

$$x_0 = \frac{L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$

$$y_0 = \frac{L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$

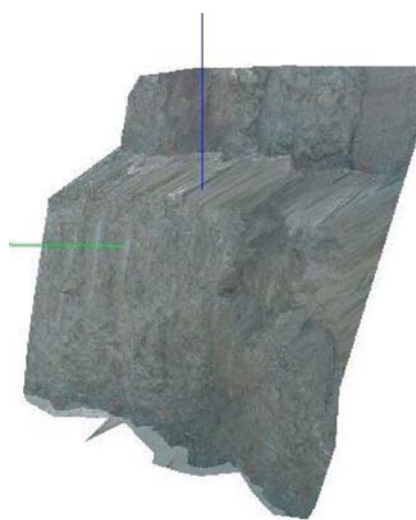
$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

Où :

L1, ..., L11 sont les coefficients de la DLT  
K1, K2, K3 sont les paramètres de distorsion radiale

P1, P2 sont les paramètres de distorsion tangentielle

A1, A2 sont les paramètres de correction du défaut d'orthogonalité et d'échelle



**Figure 8 : Photomodèle d'un front rocheux**

Notre application permet le placage d'une ou plusieurs texture(s) sur un même modèle 3D. Le choix de la photographie s'effectue en fonction de l'angle de prise de vue. Une photographie prise de face sera privilégiée à une photographie prise en biais.

Le résultat obtenu pourra être visualisé en VRML, pour permettre un déplacement facile, illimité et par toutes les per-



sonnes disposant d'une interface de visualisation adaptée ou sous une application de visualisation réalisée par GIPEA en OpenGL. Cette deuxième option de visualisation a permis d'intégrer au photomodèle des outils présents dans d'autres applications réalisées par GIPEA.

## Interprétation du photomodèle

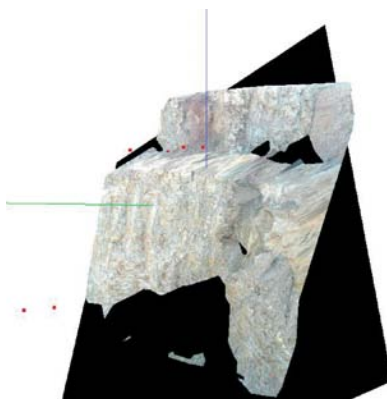
Les géologues souhaitent pouvoir réaliser leurs interprétations directement sur le photomodèle. Les outils d'aide à l'interprétation dont ils avaient besoin ont donc été répertoriés et décrits. Certains de ces outils ont pu être créés et intégrés dans le logiciel de création du photomodèle tandis que d'autres seront programmés prochainement à partir des descriptions que j'ai effectuées.

### ■ Visualisation des ouvrages de confortement

Les géologues souhaitent pouvoir visualiser les ouvrages de confortement (murs, merlons, filets, clous, ...) qu'ils envisagent de mettre en place pour sécuriser la zone étudiée. La possibilité de visualiser les ouvrages en 3D sur le photomodèle les aidera à dimensionner avec précision les ouvrages et ainsi ils pourront réaliser des estimations de prix également plus précises. De plus, cela leur permettra également de proposer au client les différentes options réalisables et d'évaluer l'impact de chaque ouvrage sur l'environnement visuel.

### ■ Visualisation des plans

Une application permettant de visualiser des plans a été mise en place. À partir d'une sélection de points (3 minimum) le plan moyen est calculé. Il est tel que la somme des distances des points au plan soit la plus petite possible. Ce calcul est effectué par une compensation par les moindres carrés. Cet outil facilite le travail des géologues puisqu'ils peuvent ainsi situer les couches les unes par rapport aux autres en les représentant chacune par un plan moyen ou encore étudier l'évolution des failles.



**Figure 9 : Exemple de visualisation d'un plan moyen**

Le calcul du plan moyen a également été utilisé pour vérifier que les points de calage utilisés lors de l'orientation des clichés ne se trouvent pas dans un même plan.

### ■ Extraction de profils

Les géologues souhaitent également pouvoir extraire des profils horizontaux et verticaux du photomodèle pour étudier par exemple les trajectoires de chute de blocs. Une première application permettant l'extraction de profils perpendiculaires aux axes du système de coordonnées a été réalisée, elle devra être améliorée pour proposer également l'extraction de profils obliques.

### ■ Détermination de coordonnées

Pour déterminer les coordonnées 3D des points du photomodèle une application de stéréorestitution a été mise en place. Elle utilise les couples de photographies obtenus grâce à la méthodologie et leur orientation obtenues lors de la création du photomodèle. Cela facilite, par exemple, la détermination de distances.

## Conclusion

L'utilisation d'un photomodèle pour les études de stabilité est une grande avancée pour GIPEA qui ne disposait jusqu'à présent d'aucun outil de visualisation 3D des fronts rocheux. Cet outil complètera les méthodes déjà utilisées par les géologues et facilitera leur travail d'interprétation. Il rend également plus aisées les démonstrations et les justifications auprès des clients puisqu'ils peuvent visionner et se déplacer sur les fronts sans être sur le terrain. ●

## Contact

**Pauline LUCAS**  
lucas.pauline@gmail.com

## ABSTRACT

*The geologists working within the engineering and design department in natural risks GIPEA (Géomatique Ingénierie Prévention Environnement Aménagement) need a tool allowing them to visualize at the same time the geometry and the nature of the rock faces. They need this information to make their studies of stability and to propose installations.*

*It was thus decided to produce a data-processing tool allowing the creation of a photomodel walls to be studied. To carry out a photomodel, we need photographs of the face and 3D points representing the geometry of the rock face.*

*To be exploitable the photographs will have to be oriented. For that it is also necessary to measure control points. A methodology describing the stages of acquisition of these data, photographs and control points, have been developed. The data-processing tool created allows first of all, to orient the photographs thanks to the control points starting from a calculation of least square adjustment based on the principles of the DLT (Direct Linear Transformation). Then another application treats the triangulation of the 3D points by the method of Delaunay applied to the spherical co-ordinates of the points. The grid thus obtained is then textured to obtain a realistic photomodel rock face. A module of 3D restitution was also created while waiting for that the tools designed to facilitate geological interpretation and representation of installations to be brought are programmed.*