

# Développement et exploitation d'un produit de type "image solide".

## Application à l'analyse géostructurale des ouvrages rocheux de la SNCF

■ **Antoine GOZÉ**

*Depuis 2011, la SNCF a engagé un programme de recherche portant sur la modélisation géostructurale 3D des parois rocheuses en milieu ferroviaire. Les travaux menés en amont ont montré que des données 3D de qualité pouvaient être obtenues sur l'ensemble d'une paroi rocheuse par mesures lasergrammétriques et photogrammétriques. Dans ce projet, nous nous sommes concentrés sur le développement d'outils adaptés aux géologues pour l'exploitation de modèles 3D. Pour ce faire, un support de travail permettant à des utilisateurs non spécialistes de manipuler de la donnée 3D a été investigué : l'image solide. Les images solides correspondent à des clichés 2D enrichis d'une information tridimensionnelle disponible instantanément. Des outils de mesure et de recherche sont implémentés et servent à établir une analyse géostructurale complète d'une paroi depuis un poste informatique en exploitant le potentiel de ces images. De plus, ce support permet d'offrir des solutions de visualisation des résultats conviviales et d'extraire des informations quantitatives et fiables de toutes les parties d'un massif rocheux (zones dangereuses, inaccessibles, en hauteur, etc.).*

### ■ MOTS-CLÉS

image solide, photogrammétrie, scanner-laser terrestre, analyse géostructurale, paroi rocheuse, développement logiciel, GAIA-GeoRoc

### Contexte du projet

Le Réseau ferré national est composé de 31 000 km de lignes exploitées par la SNCF. Sur ce vaste ensemble, on retrouve des tranchées rocheuses principalement situées en zones montagneuses et dans les territoires présentant des escarpements rocheux. 4 000 de ces ouvrages sont classés comme sensibles, c'est-à-dire qu'ils présentent un risque pour l'exploitation ferroviaire (régularité du trafic, stabilité des ouvrages) et la sécurité des voyageurs et nécessitent une surveillance accrue. Ce contrôle est effectué par des géologues à travers des analyses géostructurales. Ces études ont pour objectifs de définir le niveau de dangerosité de l'ouvrage et de déterminer

la solution de confortement la mieux adaptée. La finalité visée est la limitation du risque d'éboulement dans l'emprise ferroviaire.

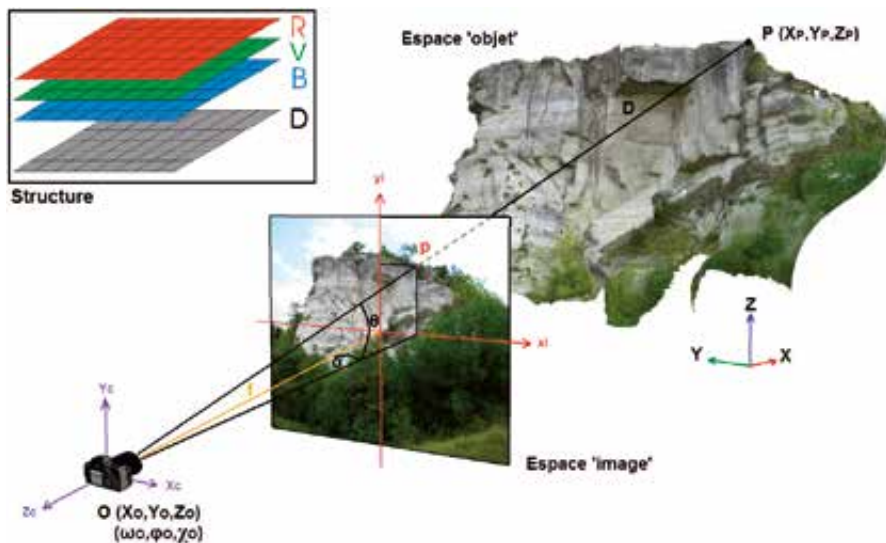
Aujourd'hui les analyses géostructurales sont principalement basées sur des inspections visuelles (sur place et à l'aide de photographies) et des levés manuels effectués directement au contact de la paroi. De plus, les analyses sont réalisées sur des parties jugées caractéristiques de la paroi et non sur l'ensemble de l'affleurement. Les données exploitées ne reflètent donc pas toute la complexité du massif. Par conséquent, les solutions de confortement définies peuvent être surdimensionnées et entraîner des surcoûts.

Depuis 2011, la division Assistance Travaux et Topographie de la SNCF, en collaboration avec la division Ouvrage en Terre et Hydraulique, a engagé une démarche visant à améliorer la modélisation et l'analyse géostructurale 3D des parois rocheuses. Cette démarche vise une meilleure connaissance du patrimoine rocheux du réseau ferré national ainsi que la maîtrise d'une technique limitant les temps d'intervention sur les voies. À ce titre, ces deux dernières années, l'étude des techniques de lasergrammétrie et de photogrammétrie terrestre a montré des résultats satisfaisants pour l'acquisition de données 3D denses de l'ensemble des massifs rocheux tout en conservant la précision attendue par les géologues (5 cm). L'exploitation de ces données par des experts géologues pour établir des études géostructurales nécessite le développement d'outils et de traitements spécifiques, permettant notamment la manipulation des données 3D par un public non spécialiste. L'image solide se présente comme un outil cohérent à l'interface entre l'image 2D et l'information 3D. Les développements ont été réalisés en langage C++ avec la bibliothèque graphique Qt et l'environnement mathématique R. Le tout est réuni au sein d'un logiciel intitulé Gaia-GeoRoc.

### L'image solide

#### ■ Principe et structure

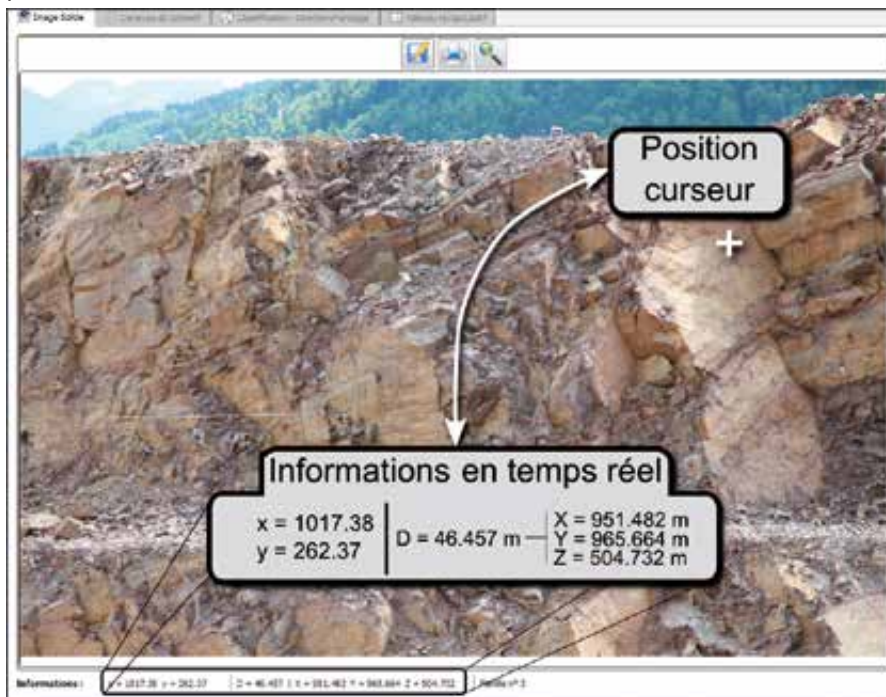
Le principe de l'image solide, introduit par [Bornaz et Dequal, 2003], est venu rendre les données tridimensionnelles facilement manipulables et exploitables par un public non spécialiste.



**Figure 1.** Création de l'image solide, relations entre l'espace "objet" et l'espace "image", [Assali, 2012]

Le concept se base sur l'utilisation conjointe de nuages de points 3D et de photographies orientées. Dans cette approche, les points 3D du nuage de points sont directement projetés sur une image 2D orientée grâce aux équations de colinéarité. De ce fait, aux trois informations radiométriques (rouge, vert, bleu) qui composent traditionnellement l'image, se rajoute une quatrième couche qui contient l'information géométrique. Cette information, appelée carte des profondeurs, contient les distances

spatiales D entre le centre de prise de vue du cliché et les points terrains (voir la figure 1). Ces distances sont, ensuite, utilisées pour calculer dynamiquement les coordonnées 3D de chaque pixel. Cette détermination passe par le calcul des angles  $\alpha$  et  $\theta$  obtenus à l'aide de simples relations trigonométriques. Ces deux angles permettent de définir une demi-droite dans l'espace avec comme origine la position de la caméra. Le point 3D que l'on cherche à calculer se situera quelque part sur cette droite. En utilisant la distance D, on est alors



**Figure 2.** Exemple d'image solide au sein de GAIA-GeoRoc. x,y coordonnées image, D distance spatiale et X,Y,Z coordonnées 3D

capable d'exprimer les coordonnées du pixel en coordonnées 3D dans l'espace image. La dernière étape consiste à réaliser une transformation à 6 paramètres (3 translations :  $T_{X_0}$   $T_{Y_0}$   $T_{Z_0}$  et 3 rotations :  $\omega_0$   $\phi_0$   $\chi_0$ ) pour convertir ces coordonnées vers l'espace objet.

Pour l'utilisateur, le support visuel reste celui qu'il connaît, c'est-à-dire la photographie 2D, mais il a, en complément, accès à une information tridimensionnelle (voir la figure 2). Il est à noter que nous aurions pu choisir de stocker directement les coordonnées X, Y, Z de chaque pixel mais afin de limiter les ressources mémoires nécessaires (3 couches supplémentaires requises) nous avons privilégié le calcul dynamique des coordonnées.

Cette approche permet au géologue d'effectuer un travail quantitatif simplifié sur l'image. Ce travail se réalise à l'aide d'outils qui exploitent la donnée 3D disponible dans les images solides. Ce support permet d'offrir des solutions de visualisation des résultats conviviales et d'extraire des informations quantitatives et fiables indispensables à la réalisation d'études géostructurales.

### ■ Faiblesses

La création d'une image solide rencontre deux principales faiblesses :

- La superposition de plans.
- La différence de densité de données entre le nuage de points 3D et les photographies.

#### La superposition de plans

La première faiblesse intervient lorsque plusieurs plans se superposent dans le nuage 3D, c'est-à-dire que des points supposés être masqués par une surface en avant-plan se retrouvent projetés sur la carte des profondeurs. Ce phénomène introduit des artéfacts faussant la géométrie réellement visible depuis le point de prise de vue. La figure 3(a) illustre cet artéfact.

Dans l'exemple présenté en figure 3(a), les points rouges situés dans le cadran jaune ne devraient pas apparaître car ils correspondent à un plan du mur non visible depuis la prise de vue du cliché. Dans notre projet, afin de remédier à ce problème, nous avons créé un filtre



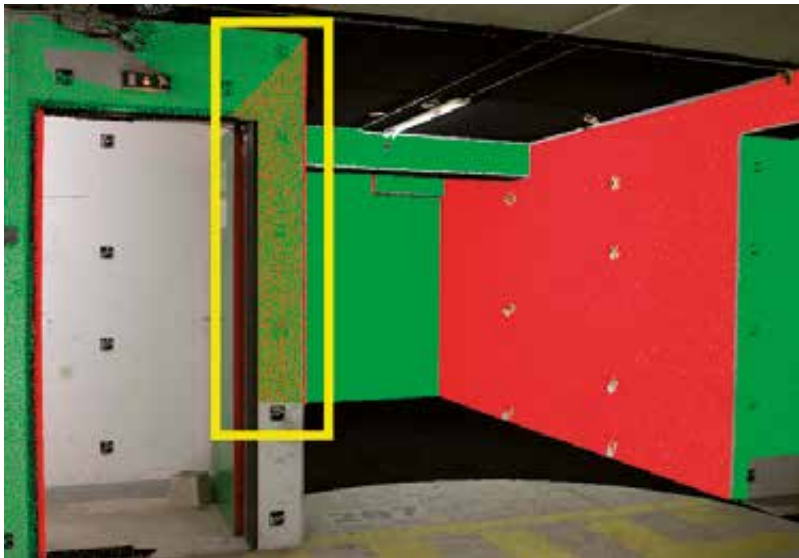


Figure 3 (a). Superposition de plans



(b). Résultat du filtrage des plans de la figure 3(a)



sur la carte des profondeurs. Ce filtre permet de détecter les changements brutaux de distances spatiales et d'ainsi supprimer cet artéfact.

#### *Solution : Le filtrage des plans*

L'objectif de ce filtre est d'effacer de la carte des profondeurs l'information des pixels sur lesquels un plan situé en arrière a été projeté (voir l'encadré jaune de la figure 3). Pour ce faire, on déplace une matrice de convolution (3x3, 5x5 ou 9x9) sur chaque pixel de l'image qui contient de l'information afin de définir un voisinage. Dans ce voisinage, on identifie la distance spatiale minimum que l'on compare à la distance spatiale du pixel traité. Si l'écart est supérieur au seuil défini par l'utilisateur, l'information du pixel est supprimée.

Un filtrage sur les données présentées en figure 3(a) permet d'obtenir les résultats fournis dans la figure 3(b). Les points rouges ont été supprimés de l'encadré jaune. Les résultats obtenus montrent bien la cohérence de la méthode appliquée. Avec un

seuil correctement défini, les pixels contenant de l'information fautive ont été nettoyés.

Pour résoudre cette faiblesse, nous aurions également pu introduire une étape de maillage du nuage de points. Ainsi les points masqués par une surface intermédiaire solide auraient été clairement identifiables et automatiquement exclus de la projection. Nous n'avons néanmoins pas développé cette approche car elle nécessite de plus nombreuses ressources de calcul.

#### **La concaténation de données d'origines différentes**

La deuxième faiblesse de l'image solide est due à une différence de densité des données entre le nuage 3D et l'image 2D. Deux situations coexistent. La première non gênante pour l'utilisateur est observée lorsque le nuage de points est sur-échantillonné par rapport à l'image 2D, certains points du nuage correspondent alors à un même pixel. Nous conservons ici le point 3D possédant la distance spatiale la plus courte

car nous estimons qu'il est situé en avant-plan.

La deuxième situation, plus gênante pour l'utilisateur, est constatée quand le nuage de points est sous-échantillonné par rapport à l'image 2D. Certains pixels ne correspondent alors à aucun point 3D et des trous apparaissent dans la carte des profondeurs (voir la figure 4a).

Bien que cette lacune n'introduise pas d'erreur, elle témoigne néanmoins d'un manque de données que nous nous proposons de combler. Les techniques d'interpolations spatiales se présentent alors comme une réponse à cette faiblesse rencontrée lors de la concaténation de données d'origines différentes. Toutefois ces interpolateurs doivent être manipulés avec précaution car certains biais peuvent être insérés.

#### *Solution : L'interpolation*

Le manque d'information dans l'image est vite apparu comme une gêne pour l'utilisateur. La densification des données est obtenue en utilisant des techniques d'interpolation spatiale. L'interpolation spatiale sert à déter-

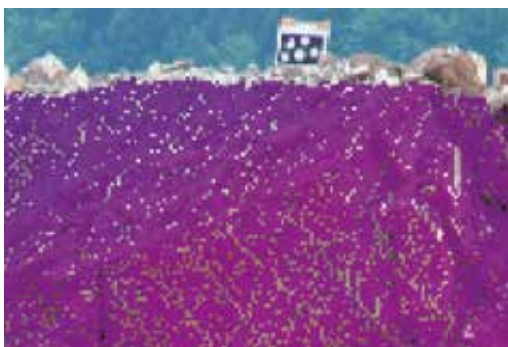


Figure 4a. Carte des profondeurs brutes (Visualisation avec un dégradé du violet pour les distances spatiales plus petites vers le bleu pour les distances spatiales plus grandes)

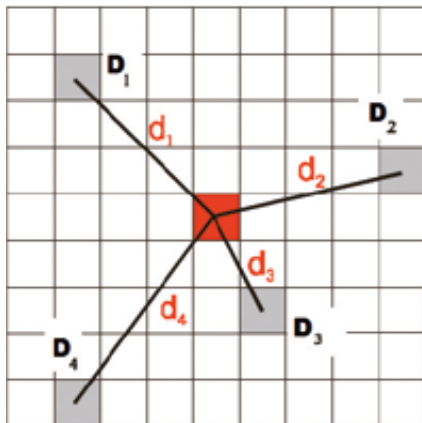


Figure 4b. Carte des profondeurs après une interpolation

miner, à partir de valeurs connues, la valeur d'une donnée située à l'intérieur du cadre des valeurs connues. Il est à noter qu'une bonne interpolation doit permettre d'accroître la quantité d'information de manière satisfaisante dans l'image sans dégrader la précision.

**La méthode de pondération par distance inverse**

La méthode de pondération par distance inverse permet d'estimer la distance spatiale d'un pixel inconnu en attribuant une plus grande importance aux informations des points les plus rapprochés. Cette opération est réalisée à l'aide de l'équation 1 (voir la figure 5). La pondération utilisée est inversement proportionnelle à la distance image séparant le pixel inconnu et le pixel voisin connu. Par conséquent, le poids des points voisins diminue lorsque la distance augmente.



**Figure 5.** Schéma de principe de l'interpolation par distance inverse [Bornaz et Dequal, 2003]

D'après cette méthode, pour un pixel de coordonnées (x, y), l'information D interpolée est égale à :

$$D(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{D_i}{d_i^p} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{d_i^p} \right]} \text{ Équation 1}$$

Où :

- n est le nombre de points considérés dans le voisinage.
- p est la puissance d'interpolation.
- d est la distance image séparant le pixel inconnu et le pixel i considéré (en mètres).
- D est la distance spatiale connue du pixel i.

Le paramètre de puissance permet de donner une influence encore plus grande aux valeurs plus proches du pixel interpolé. À mesure que p augmente, le poids attribué aux pixels distants diminue rapidement.

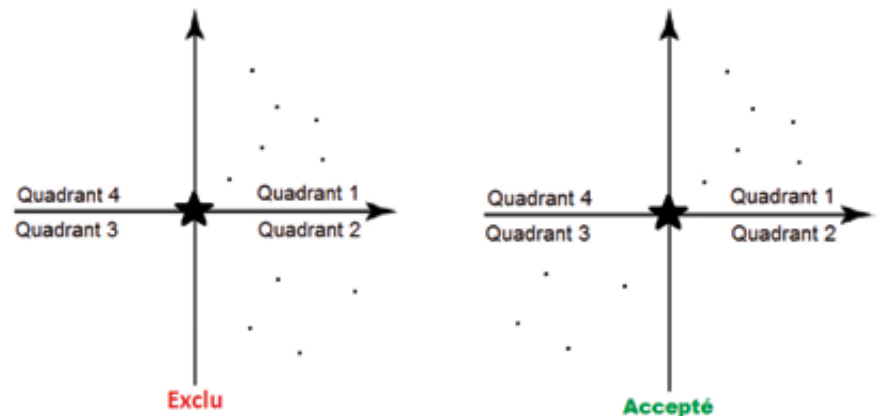
Dans cette interpolation, plusieurs variables de l'équation 1 sont paramétrables selon la volonté de l'utilisateur : le nombre de points n à considérer dans le voisinage et la puissance p. Ces paramètres pouvant influencer le résultat, l'usager se doit d'effectuer plusieurs tests et adapter le calcul aux caractéristiques de la paroi afin d'obtenir le résultat le plus pertinent.

Cependant lors de la mise en place de cet interpolateur, un problème dû à une extrapolation en bordure d'image est apparu. L'encadré jaune sur la figure 6 montre que l'extrapolation peut fournir des résultats absurdes.



**Figure 6.** Problème d'extrapolation évité grâce à l'analyse directionnelle

La croix rouge devrait avoir une distance 3D supérieure à 100 mètres mais le manque d'information dans cette zone produit un résultat erroné. Une extrapolation est effectuée à partir des points de la paroi et donne, à la croix rouge, une distance 3D



**Figure 7 (a)** Pixel exclu par l'analyse directionnelle ; **(b)** Pixel accepté par l'analyse directionnelle

fausse. Afin d'éviter cette lacune et pour fournir des résultats fiables, une analyse directionnelle par quadrant est effectuée lors des interpolations.

**L'analyse directionnelle**

L'interpolation ne prenant pas en compte la répartition des pixels voisins autour du pixel à interpoler, la seule manière d'éviter l'extrapolation est d'exclure les pixels recevant des informations de manière localisée : c'est le rôle de l'analyse directionnelle.

Dans notre étude, une analyse par quadrant a été développée (jugée suffisante) mais une analyse par octant pourrait également être effectuée dans l'idée d'être plus restrictif dans la sélection des pixels.

L'objectif de cette analyse par quadrant est de traiter uniquement les pixels recevant de l'information de plusieurs directions. Pour ce faire, il suffit d'identifier si les pixels voisins autour du pixel à interpoler sont répartis au moins dans deux quadrants non consécutifs. Si ce n'est pas le cas, on exclut le pixel et celui-ci ne sera donc pas interpolé. La figure 7(a) illustre le cas d'un pixel exclu et la figure 7(b) un pixel accepté.

Avec cette analyse, seul "l'intérieur" de l'image solide est densifié, aucune extrapolation n'est effectuée. La figure 4(b) illustre la carte des profondeurs de la figure 4(a) après une interpolation. On constate une cohérence des données et un résultat fiable ou aucun biais n'a été inséré.

Les faiblesses que nous venons d'évoquer sont d'autant plus présentes que les prises de vue du nuage de points et





**Figure 8.** Rotule panoramique couplée à un appareil photo numérique [Leica Geosystems]



des clichés sont différentes. En effet, un écart entre l'image du nuage et l'image photo induit nécessairement des zones lacunaires dans l'image solide. Afin de faire coïncider de manière précise les deux positions, il est possible d'utiliser une rotule panoramique adaptée à la hauteur du scanner pour réaliser les prises de vues (voir la figure 5).

Le manque d'informations, l'extrapolation et le lissage des données sont les principales limites que l'on rencontre. Les développements proposés prennent en compte les limites et donnent à l'utilisateur les moyens d'effectuer la meilleure interpolation en fonction de la paroi étudiée et des données mesurées. L'utilisateur étant maintenant en mesure de construire des images solides fiables, nous pouvons nous intéresser à l'exploitation de ces images à travers des outils d'inspection 3D.

## L'exploitation du potentiel de l'image solide : les outils d'inspection 3D

Les images solides permettent au géologue de se localiser simplement et rapidement sur la paroi en simulant une visite sur le terrain. Les outils d'inspection 3D viennent l'assister dans l'établissement de son expertise de la paroi rocheuse. Ils lui permettent d'extraire des informations et d'effectuer des recherches tant sur l'ensemble de l'affleurement rocheux que sur des zones plus locales. Ces outils peuvent même venir remplacer d'éventuelles

mesures que le géologue aurait dû effectuer manuellement (à la boussole ou au ruban) sur le terrain. De plus, ils offrent la possibilité de faire des mesures dans les zones dangereuses ou inaccessibles. Le géologue peut ainsi inspecter précisément l'intégralité d'une paroi depuis son poste informatique et ce en toute sécurité.

Traditionnellement, la détermination de la structure d'un massif rocheux nécessite la mesure de distances et d'orientations des discontinuités apparentes relevées en surface de l'affleurement. L'étude de l'agencement de ces discontinuités permet ensuite de caractériser les blocs individualisés et potentiellement instables et donc de prévoir et dimensionner les confortements nécessaires. Pour une paroi rocheuse complète, l'ensemble de ces opérations peut prendre une à plusieurs journées. Ici l'approche proposée permet d'effectuer l'étude à travers un logiciel en quelques heures seulement et avec des résultats plus complets. Des outils de mesure permettent d'extraire les propriétés géométriques et géologiques de la paroi comme si le géologue réalisait directement les mesures sur l'affleurement rocheux. En complément, des outils de recherche

permettent de mettre en évidence certaines caractéristiques géométriques de la structure (plan, symétrie, etc.).

### ■ Visualisation selon l'orientation

Cet outil d'analyse offre une visualisation de l'image solide en fonction de l'orientation des pixels. Pour chaque pixel contenant de l'information 3D et à partir du voisinage défini par l'utilisateur, on calcule le plan moyen et son orientation (méthode détaillée dans la partie 3.3.). En fonction du report de l'orientation dans une palette de couleur définie, le pixel prend la couleur correspondante (voir la figure 9).

Ce premier outil permet de donner une idée globale de l'orientation du massif et ensuite d'étudier plus en détails certaines spécificités présentées dans les outils suivants.

### ■ La mesure de distances 3D

La disponibilité instantanée des coordonnées tridimensionnelles des pixels de l'image solide permet de proposer un outil servant à mesurer des distances 3D dans l'image. L'utilisateur définit la distance qu'il souhaite mesurer à partir de deux points sur l'image (voir la figure 10). Le résultat obtenu



**Figure 9.** Visualisation en fonction de l'orientation



**Figure 10.** Mesure de distances 3D au sein de GAIA-GeoRoc

est similaire à celui qu'obtiendrait le géologue en mesurant directement au ruban sur le terrain.

Cet outil permet de quantifier certains éléments de la structure et de donner un ordre de grandeur des éléments de la paroi rocheuse, première étape indispensable à la réalisation d'une étude géostructurale.

### ■ Le relevé des discontinuités et l'extraction de leurs propriétés

Cet outil permet à l'utilisateur d'extraire les propriétés géométriques et géologiques des discontinuités d'un massif rocheux (une discontinuité est un plan qui interrompt physiquement la continuité de la paroi). Un plan de discontinuité peut être directement visible en surface de la paroi ou bien, selon son orientation, intersecter celle-ci

sous forme d'une simple ligne appelée trace. Deux types de saisies sont donc proposées : par zones de mesure (polygone) ou par trace (polyligne). La figure 11 illustre ces deux méthodes ainsi que leurs propriétés associées.

Une fois la discontinuité saisie sur l'image, le géologue dispose d'un ensemble d'informations calculé selon la méthode suivante :

- Détermination du nombre de pixels, de points 3D, du barycentre, de l'équation du plan moyen (à travers une analyse en composantes principales sur les points 3D) et de son écart-type.
- Pour les traces : calcul de la longueur de la trace.
- Pour les zones : projection des points 3D dans le plan moyen et calcul de la surface du polygone projeté. La détermination du plan moyen de la discontinuité est faite à l'aide d'une

analyse en composantes principales (ACP). Il s'agit d'une méthode statistique permettant d'extraire, d'un jeu de données, les 3 axes moyens représentatifs de la répartition spatiale de cet échantillon (voir la figure 12). Pour ce faire, on utilise la variance des données pour décrire et résumer l'information en 3 vecteurs propres. Dans notre cas, seul le troisième vecteur nous intéresse car il décrit la normale au plan moyen. Les coefficients a, b et c de l'équation du plan sont donc connus et connaissant le barycentre de la zone, on détermine facilement le dernier paramètre d du plan moyen (voir l'équation 2 ci-dessous).

$$ax + by + cZ + d = 0$$

Figure 12. Analyse en Composantes Principales : Vecteurs propres [Assali, 2012] ; Le meilleur plan correspond au plan principal (V1, V2), dont V3 est la normale ;

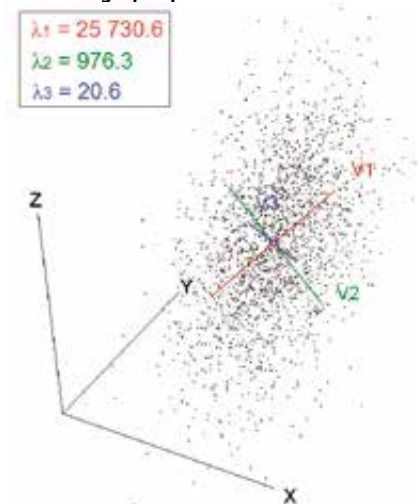


Propriétés	
Propriété	Valeur
Pixels :	816
Points 3D :	751
Surface :	0.339 m <sup>2</sup>
Dir. Hz. :	N 239.9°
Pendage :	60.2°
Centre [m] :	X = 951.868 Y = 965.167 Z = 506.653
σp :	0.005 m
Indices de rugo...	
▲P1	
JRC :	9.7
i :	12.5°
Profil [*.jpg]	<input type="button" value="Voir"/>
▲P2	
JRC :	2.0
i :	5.7°
Profil [*.jpg]	<input type="button" value="Voir"/>



Propriétés	
Propriété	Valeur
Points 3D :	18
Longueur :	1.868 m
Dir. Hz. :	N 111.5°
Pendage :	86.5°
Centre [m] :	X = 950.750 Y = 965.870 Z = 505.218
σp :	0.016 m

Vue perspective du nuage de points et des axes principaux ;  
Vue orthographique de côté



- Pour les zones : Estimation de la rugosité à l'aide de deux profils en travers

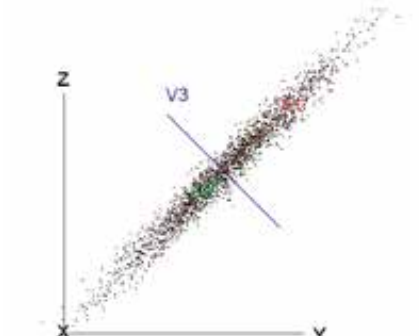


Figure 11. Les deux types de sélection de discontinuités (par zone de mesure et par trace)



de la zone (l'un selon la ligne de plus grande pente et l'autre selon l'horizontale) ainsi que quatre indices : deux par profil (le JRC (sans unité) : Joint Roughness Coefficient et  $i$  ( $^{\circ}$ ) : l'angle d'aspérité). Le calcul est effectué à partir de la méthode de [Maertz et Al., 1990] sur deux profils afin d'obtenir un meilleur estimatif. La rugosité peut permettre au géologue d'évaluer l'adhérence, le glissement, le roulement ou encore la sensibilité à l'usure ou à la corrosion d'une paroi.

- Report des orientations sur un diagramme de Schmidt. Il s'agit d'un mode de représentation des données propre au géologue (mode de représentation le plus répandu à ce jour). Il permet de mettre en évidence les orientations majoritaires et d'effectuer l'analyse technique (classification en familles directionnelles, étude de stabilité de blocs, etc.).
- Visualisation en 3D des points de la zone ou de la trace.
- Export des directions et pendages vers d'autres logiciels de géologie



**Figure 13.** Recherche de l'orientation N 228°/82°, écart 14° (Direction de l'horizontale/Pendage)

(Stereonet, OpenStereo, etc.).  
Ce troisième outil de mesure permet d'analyser plus précisément le massif et d'en apprendre davantage sur sa géométrie.

## ■ Recherche d'une orientation donnée

Les géologues peuvent avoir besoin de localiser certaines orientations spécifiques dans la structure de la paroi au cours de leurs études. Grâce à l'image solide, il est possible de mettre en évidence des pixels, c'est-à-dire des zones de la paroi ayant une orientation commune donnée. L'outil calcule l'orientation des pixels avec la même méthode que précédemment et colore le pixel qui respecte les conditions posées par l'utilisateur : l'orientation qu'il recherche et la tolérance. *La figure 13* illustre un exemple de recherche d'orientation dans l'image.

Avec cet outil, le géologue en apprend plus sur la formation de la roche et peut aussi connaître facilement les parties de la roche qui présentent un risque pour les installations ferroviaires.

## ■ Intersection/Extension de plans

L'intersection et l'extension d'un plan 3D dans l'image solide est un outil inté-



**Figure 14.** Intersection/extension d'un plan dans l'image solide



ressant permettant d'appréhender les interactions spatiales entre les discontinuités aboutissant éventuellement à l'individualisation de blocs rocheux. Il offre donc la possibilité de matérialiser la trace d'un plan donné sur l'image. D'un point de vue géologique, cet outil permet de visualiser l'extension des discontinuités dans la paroi. À partir d'une discontinuité saisie dans l'image ou d'une orientation et d'un point connu, on calcule l'équation du plan correspondant. On détermine alors la distance orthogonale de chaque pixel à ce plan, puis, si la distance est inférieure à la tolérance posée par l'utilisateur, le pixel est coloré. La *figure 14* présente un exemple à partir d'une zone de mesure.

Grâce à cet outil, on visualise rapidement la propagation des discontinuités dans le massif. Ainsi, on identifie plus facilement les blocs rocheux vraisemblablement instables. De plus, on met en évidence des zones jusque-là non considérées qui en réalité peuvent interagir avec des discontinuités plus lointaines.

### ■ Identification de blocs

L'identification de blocs est le dernier outil proposé pour mener une étude géostructurale. Il offre la possibilité de venir identifier sur l'image solide un bloc rocheux et de déterminer son

volume. L'individualisation est ici réalisée par sélection des sommets et des faces qui composent le bloc. D'un point de vue mathématique, un bloc rocheux est assimilé à un polyèdre (concave ou convexe) dont la formule du volume (en mètres cubes) est la suivante :

$$\text{Volume} = \left(\frac{1}{3}\right) \times \sum_{i=1}^n ((\Omega_i \times \bar{V}_i) \times A_i)$$

Où :

n est le nombre de faces du polyèdre.

$\Omega_i$  représente les coordonnées 3D du barycentre de la face i (en mètres).

$\bar{V}_i$  représente le vecteur normal de la face i (en mètres). La normale doit être dirigée vers l'intérieur du polyèdre.

$A_i$  représente l'aire de la face i (en mètres carrés).

Afin d'aider les géologues dans leur démarche d'identification, un assistant avec des voyants de couleurs (rouge/vert) a été développé. Les voyants sont attachés aux sommets et aux faces et permettent d'indiquer si les conditions mathématiques définissant un polyèdre sont respectées. Une fois l'identification terminée, l'utilisateur obtient le volume du bloc et pour chaque face, l'aire et l'écart-type au plan moyen (*voir la figure 15*). L'écart-type fourni permet d'apprécier la planéité des faces définies et d'ainsi valider la position des sommets.

### ■ Validation des outils

L'ensemble des résultats a été validé par comparaison des données traitées avec des points connus issus de levés tachéométriques. De plus afin de valider cette nouvelle approche, une étude avec les deux méthodes (classique et nouvelle) a été réalisée sur une paroi. L'évolution apportée présente plusieurs intérêts comparativement aux études classiques (*voir la figure 16*).

Tout d'abord cette méthode présente un intérêt technique pour la qualité des rendus car des analyses plus poussées sont réalisées sur l'intégralité des massifs, mais également plus localement sur de petites zones. Le second intérêt de cette méthode est sécuritaire car aucun accès en zones dangereuses n'est nécessaire (évite les risques de chutes de blocs et les risques liés aux circulations ferroviaires) et l'auscultation en zone inaccessible devient également possible. Le dernier intérêt est économique car les mesures sont réalisées rapidement et les traitements s'effectuent depuis un poste informatique à travers un logiciel, ce qui réduit considérablement les coûts d'acquisition et d'analyse.

Les études sont menées pas à pas avec une progression critique du géologue. Le logiciel permet donc d'aider les géologues dans leur analyse mais l'expertise reste manuelle afin d'affiner le

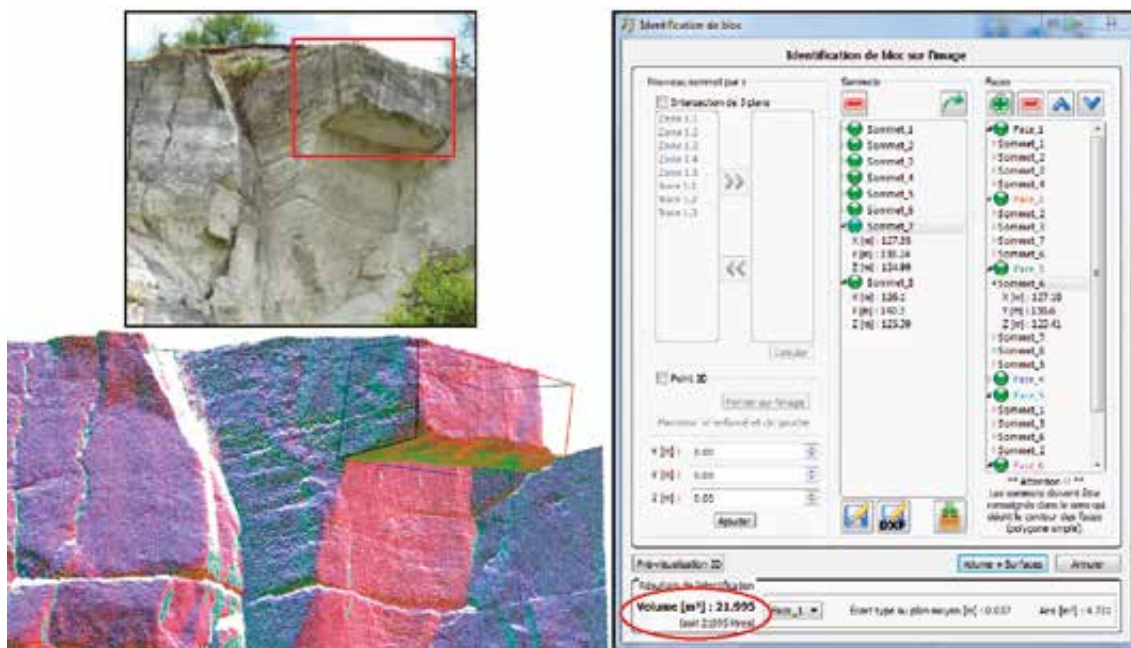


Figure 15. Identification d'un bloc rocheux sur une image solide avec prévisualisation 3D et assistant.



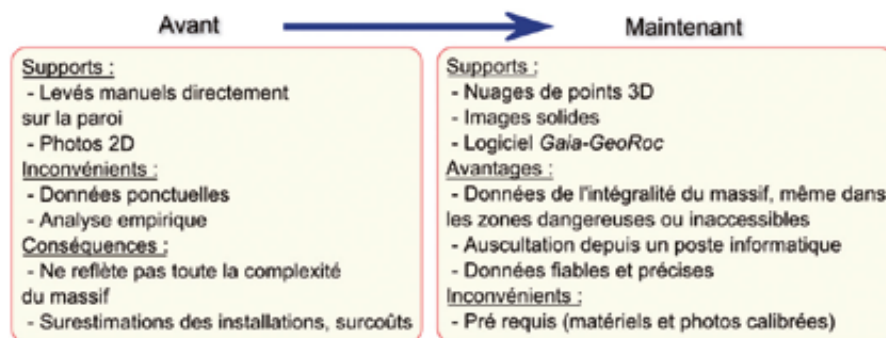


Figure 16. Comparaison entre l'étude classique et la nouvelle approche.

diagnostic. Des démonstrations et une première diffusion du logiciel auprès de géologues ont permis de recueillir des avis positifs. Les participants ont été surpris et satisfaits des résultats (convivialité, précision et qualité des présentations proposées). La prise en main du logiciel s'est effectuée rapidement, ce qui valide les efforts de vulgarisation menés. Le caractère exhaustif du logiciel a également été souligné. Tous ces éléments confirment que les développements ont été réalisés dans le sens des attentes des futurs utilisateurs.

## Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de concevoir un nouvel outil intégré au logiciel GAIA-GeoRoc, permettant d'assister les géologues dans leurs futures analyses géostructurales. L'acquisition de données par lasergrammétrie et/ou photogrammétrie permet de disposer d'une grande quantité de données qui sont représentatives de l'ensemble de l'affleurement rocheux. L'étude à travers GAIA-GeoRoc permet d'effectuer des analyses tant d'un point de vue général que local de la paroi rocheuse, ce qui permet d'affiner l'analyse géologique et ouvre des perspectives d'études jusqu'ici très coûteuses. Le fort intérêt des géologues pour ce logiciel a incité la SNCF à le référencer auprès de l'Agence pour la Protection des Programmes (APP). Son déploiement auprès de l'ensemble des spécialistes de la SNCF est prévu pour 2014 et la politique de diffusion auprès de la communauté scientifique est en cours d'étude. Ce logiciel propose d'ores et déjà des outils avancés mais les possibilités offertes par les images solides ne sont pas intégralement exploitées.

Des outils simulant et quantifiant l'installation de solutions de confortement pourraient par exemple être implémentés. Enfin, dans l'idée de pouvoir étudier la stabilité des blocs rocheux, des outils d'analyse cinématique pourraient également être développés. ●

## Remerciements

Je remercie vivement Monsieur Pierre Assali, doctorant, SNCF, Université de Strasbourg, Université de Savoie, Monsieur Flavien Viguier, Ingénieur Géomètre Topographe SNCF et Monsieur Nicolas Pollet, docteur en géologie SNCF pour leur contribution de qualité indispensable à la réalisation de ce projet.

## Contact

Antoine GOZÉ  
antoinegoze@gmail.com

## Bibliographie

### Ouvrages et thèses

- Assali, P. [2012], *Modélisation géostructurale 3D de parois rocheuses en milieu ferroviaire. Application aux Ouvrages en Terre*. Rapport de mi-thèse, Université de Strasbourg, Université de Savoie, SNCF.
- Slob, S. [2010], *Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser-scanning*. Thèse de doctorat, Delft University of Technology - Civil Engineering and Geosciences.
- Villemin, T. [2010], *Géomécanique des instabilités rocheuses du déclenchement à l'ouvrage*. Chapitre Fracturation et fragmentation des massifs rocheux, p.29-60, Hermes Sciences - Lavoisier
- Wyllie, D.C. et Mah, C.W. [2004], *Rock Slope engineering, Civil and Mining*, Taylor & Francis, 4th edition, ISBN 978-0-415-28001-3.

### Articles et revues

- Bornaz, L. et Dequal, S. [2003], *A new concept : the solid image*. In XIXth CIPA Symposium - 30 September-4 October - Antalya, Turkey.
- Haddad, N. [2007], *Towards Creating a Dialogue between the Specialized Technician and non Technician Users of the 3D Laser Scanner*. In the XXth International CIPA Symposium, 01-06 October, Athens, Greece.
- Maerz, N., Franklin, J. et Bennett, C.P. [1990], *Joint Roughness Measurement using shadow profilometry*. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 25, N°5, p.329-343.
- Munaretto, D. et Roggero, M. [2013], *Solid image extraction from lidar point clouds*. In the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL, Part5/W1, p.189-195.
- Pierrot Deseilligny, M. et Clery, I. [2011], *Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels*, Collection EDYTEM, 12, p.51-66.

## ABSTRACT

*This study is part of a research project focusing on rock faces 3D modeling in railway environment. SNCF (the French National Railway Company) is therefore developing a new approach for sampling and modeling rock discontinuities using both terrestrial laser-scanning (TLS) and optical imaging, for improving safety and regularity of train traffic regarding to rock falls risks. This project focused on the development of tools (gathered into the GAIA-GeoRoc software) allowing geologists to perform a geostructural statement from the captured 3D models. The «solid image» principle was investigated in order to make the 3D data accessible for non technician users. The notion of solid image is introduced as the enrichment of a classical 2D digital image with the corresponding 3D geometrical information. Functionalities for extracting reliable geometrical information directly from a monoscopic image were developed and used for setting up geostructural analysis and statement of the studied outcrops. Moreover, this support offers user-friendly visualization solutions.*