

## La photogrammétrie au service de la justice : mesures géométriques du cratère de l'explosion AZF

■ Michel KASSER - Jean-Baptiste MONNERIE - Laurent DELGADO - Daniel ROBERT

*Une série de travaux photogrammétriques très performants a été effectuée sur le cratère qui s'est formé lors de l'explosion de l'usine AZF le 21 septembre 2001, à Toulouse.*

*Ces travaux montrent comment il est possible de tirer parti d'images d'origines extrêmement hétérogènes, tant en matière d'échelle que de qualité métrique et de dates d'acquisition. Ceci a permis de constituer un lever très détaillé du cratère correspondant aux premières heures après l'explosion, avant que sa géométrie ne soit complètement bouleversée par les phénomènes naturels et les nombreux travaux entrepris le jour même.*

### MOTS-CLÉS

Photogrammétrie, vidéogrammétrie, cratère d'explosion.

photographiques et vidéo, et il était impératif d'utiliser des clichés pris juste après l'explosion.

Dans ces conditions, les traitements photogrammétriques les plus innovants ont été appliqués à l'ensemble de trois jeux de documents sélectionnés (un seul étant destiné à cet usage), afin de reconstituer la géométrie du cratère immédiatement après sa formation. Les résultats d'une précision remarquable ont permis d'établir une cartographie fine et une description du cratère, qui est ainsi devenue une des pièces principales du dossier.

### Choix des images

Dès le 22 septembre 2001, le lendemain de la catastrophe, les eaux des nappes phréatiques ont déjà inondé le fond du cratère. Ainsi, lorsque le géomètre-expert requis pour les besoins de l'enquête judiciaire intervient pour réaliser sa campagne de relevés (le 22 au soir), il est déjà trop tard pour observer le cratère dans son état initial. Toutefois, l'instruction judiciaire avait à disposition un reportage photographique et un film datant du jour de l'explosion. L'ensemble de ces données a fait l'objet d'une analyse poussée afin de réaliser un traitement photogrammétrique.

Les toutes premières images disponibles sont issues du film réalisé par la gendarmerie depuis un hélicoptère environ 45 minutes après l'explosion. Peu après, un reportage photographique a été réalisé, avec une série de clichés pris depuis le versant nord du cratère. Il est clair qu'aucune disposition particulière n'a été prise au moment de

### Introduction

Le 21 septembre 2001, un dépôt d'environ 350 tonnes de nitrates, situé dans le bâtiment 221 de l'usine AZF à Toulouse, détonait en formant un cratère de 75 mètres de long, 57 mètres de large et 7 mètres de profondeur, avec un nombre de victimes et des dégâts considérables.

Dans le cadre de l'enquête judiciaire, les services d'un géomètre-expert ont été très rapidement requis pour établir le relevé du cratère. Le 22 septembre au soir, les premières mesures ont été réalisées. Des travaux complémentaires ont été menés deux jours plus tard et les résultats finaux remis à la police judiciaire le 26 septembre 2001. Malgré la célérité avec laquelle furent menés ces travaux, aucun dossier technique, aucun rapport, aucune donnée numérique ne furent versés au dossier pénal avant la fin de l'instruction judiciaire. Initialement, seul un schéma des relevés avait été mis à la disposition de la justice. Après de nombreuses demandes de la part de la défense, une partie des données numériques fut enfin accessible plus de cinq ans après les événements.

Ces données numériques firent alors l'objet d'une analyse détaillée. Les

relevés furent superposés aux photographies aériennes géoréférencées prises six jours après l'explosion par la société Aeroscan pour le compte de la Mairie de Toulouse. Cette analyse montrait que les relevés présentaient des écarts de calage planimétrique et altimétrique de l'ordre de 2 à 3 mètres. Par ailleurs, certaines zones du cratère, notamment ses flancs, avaient été insuffisamment couvertes par les relevés topographiques. Enfin, certaines questions restaient sans réponse, à savoir quand et comment le fond du cratère avait été cartographié alors qu'il avait été submergé par le retour des eaux de la nappe phréatique dès le soir même de l'explosion : les méthodes employées par le géomètre-expert pour cartographier ce fond avaient-elle permis d'atteindre un résultat adéquat ?

Le cratère d'origine ayant été complètement remanié par les phénomènes naturels (tassements, pluies, nappe phréatique) et par les travaux liés à l'enquête, il était devenu sans objet de réaliser de nouvelles mesures sur le terrain. Devant ce constat, une nouvelle voie s'est imposée pour essayer de reconstituer la morphologie du cratère original : la photogrammétrie numérique qui viendrait s'appuyer sur un certain nombre de documents



l'acquisition de ces données pour permettre une exploitation métrologique future. A ce moment, s'exprimait seulement la volonté de témoigner à travers la réalité des images.

En complément de ces images prises le jour même de l'explosion, une troisième source de données a été exploitée. Il s'agit d'un reportage photographique réalisé par les experts judiciaires avec un appareil 6 x 6 Rollei-Métric depuis un hélicoptère le 8 octobre 2001. Bien que très postérieur à la date de l'explosion, ce reportage est précieux compte tenu de la robustesse des données issues du traitement de ce projet. En effet, contrairement aux deux sources précédemment citées, les images Rollei-Metric (photos argentiques) ont été réalisées à des fins éventuelles d'exploitation photogramétrique. Elles nous ont servi de référence dans le cadre de cette étude.

Par ailleurs, la prise de vue aérienne Aeroscan du 27 septembre effectuée par la ville de Toulouse et mentionnée précédemment a servi de base pour la mise en référence générale.

## Stratégie de traitement

Afin d'estimer au mieux les précisions intrinsèques aux différents jeux de données, les sources ont été exploitées de façon indépendante par la société ESIC avec le logiciel de photogrammétrie industriel MeeX (DCNS-ESIC SN) :

- 1- Film de la gendarmerie depuis hélicoptère
- 2- Reportage photo du sol depuis le versant nord du cratère
- 3- Reportage photo Rollei-Métric depuis hélicoptère.

Compte tenu de la qualité des photos, les données Rollei-Métric ont été considérées comme référence d'un point de vue métrologique pour toutes les analyses comparatives. La dernière phase de traitement, réalisée par l'IGN, a consisté à basculer l'ensemble de nos projets dans le référentiel Lambert en exploitant les données issues d'un traitement photogramétrique extrêmement soigné de la

prise de vue aérienne Aeroscan. On arrive ainsi par propagation d'erreur à quantifier les précisions finales de positionnement de restitution dans l'environnement global du site.

## Principes généraux du traitement

MeeX est un logiciel de photogrammétrie à vues convergentes, dont les applications premières sont industrielles : métrologie, modélisation "tel que construit"... Il permet d'utiliser différents types de capteurs, de pouvoir intégrer différentes sources images (analogiques, numériques) et de travailler avec des primitives géométriques autres que le point (ligne, cylindre, cercle...). lui permettant ainsi de s'adapter à tous types de milieu et en particulier aux milieux que l'on qualifie d'"hostile". Le cœur du code de calcul est basé sur le concept de l'ajustement de faisceaux, qui détermine simultanément :

- le sous-vecteur des primitives objets (point, ligne, cylindre...),
- le sous-vecteur des stations (les 6 degrés de liberté des capteurs au moment des prises de vue) ;
- le sous-vecteur des paramètres internes des capteurs (distance principale, excentrement du point principal, distorsions optiques...).

Une des particularités importantes de MeeX est d'être capable de se satisfaire en entrée des images seules, sans autre donnée additionnelle lui permettant d'initier les traitements. Cette particularité implique par contre que les traitements initiaux soient robustes et que l'auto-calibrage des capteurs soit une règle, avec la possibilité d'utiliser des modèles géométriques du plus simple (sténopé) au plus complet (utilisé pour la photogrammétrie industrielle à vocation métrologique).

## Analyse géométrique des données sources

### ■ Vidéo de la gendarmerie

Le film vidéo a été réalisé depuis un hélicoptère à une distance de l'ordre de 400 m du cratère. L'opérateur a

donc utilisé le zoom de sa caméra afin de mieux voir le cratère.

La démarche a ici été complexe : l'extraction d'images numériques à partir du film vidéo a été effectuée, après une photo-interprétation du film, permettant d'identifier les images à zoom (distance principale) maximum. En effet, toute détermination classique photogramétrique s'appuie sur la conservation des paramètres internes des capteurs utilisés.

### ■ Reportage photographique du sol

Les informations EXIF (métadonnées associées à chaque image numérique) contenues dans les images originales, nous ont permis de connaître la focale de l'appareil photographique numérique utilisé.

### ■ Reportage Rollei-Metric

Les images issues des clichés argentiques scannés au format 6x6 n'étaient associées à aucune donnée géométrique ; cela est sans conséquences, compte tenu d'une longue expérience passée dans l'utilisation de ces caméras semi-métriques. L'exploitation bidimensionnelle de ces images scannées diffère des images numériques, provenant directement du capteur (CCD ou CMOS). Par exemple, les coordonnées des points mesurés dans l'image sont exprimées dans un référentiel image très différent : unité pixel, origine dans le coin en haut à gauche.

A contrario, les coordonnées images des points mesurés dans l'image argentique sont exprimées dans un référentiel associé à des croix de réseau, obtenues grâce à une plaque réseau calibrée située en fond de chambre de l'appareil (contre le film) dans la caméra. Tout traitement photogramétrique argentique débute donc par la phase classique d'orientation interne, qui permet de passer des coordonnées pixels aux coordonnées métriques associées au référentiel des croix de réseau. Cette transformation (similitude, affine ou homographie, en fonction des déformations du film et du procédé de scannage) est calculée après la digitalisation automatique de tout ou partie des 121 (11x11) croix de réseau réparties sur le cliché (voir figure 1).





**Figure 1.** Une des images Rollei-Metric, disposant d'un auto-étalonnage très précis. Deux des croisillons sont entourés en rouge.

## Les différentes phases de traitement

L'ajustement de faisceaux requiert des valeurs initiales des différents paramètres (distorsion, focale, paramètres d'orientation). Pour les paramètres internes des capteurs, une valeur approchée de la distance principale est nécessaire ; a contrario, on peut parfaitement se contenter de valeurs nulles concernant les paramètres de distorsion.

La toute première étape consiste donc à déterminer l'orientation relative de deux images choisies préalablement compte tenu de leur intérêt (positions relatives, champs couverts, recouvrement). A ce stade du calcul, cette orientation relative (5 degrés de liberté) est déterminée, à un facteur d'échelle près. Un premier nuage de points est donc triangulé en associant le référentiel objet à l'une des deux images ou directement

aux points triangulés. La suite consiste à étendre le processus sur toute l'emprise géométrique de la scène à traiter, grâce à des relèvements de nouvelles images ou des triangulations de nouvelles primitives géométriques. Ces traitements élémentaires (relèvement, triangulation) doivent être robustes et donc capables d'identifier sans ambiguïté toutes fautes d'identification de points, qui peuvent être nécessairement nombreuses dans ce type de chantier où aucun balisage n'a été fait. Il convient d'ailleurs de noter que dans MeeX, l'opérateur est assisté lors des phases de digitalisation sur les images par un calcul de prédiction (positionnement automatique du curseur souris). Outre le gain de temps obtenu grâce à ce procédé, cela permet de minimiser grandement le nombre de fautes d'identification.

Les images issues du film vidéo ont fait l'objet d'un traitement particulier,

appelé "relèvement auto-calibrant", ayant pour objectif de déterminer la distance principale en même temps que la position et l'orientation de la caméra (donc un total de 7 inconnues). L'objectif était en effet de s'assurer de la qualité de la photo-interprétation des images à zoom maximum. Les points triangulés issus du projet utilisant le reportage Rollei-Métric ont été utilisés, afin d'obtenir la précision maximale.

L'ajustement de faisceaux a été exécuté très en amont (avec quelques images), il permet de déterminer en bloc les 3 sous-vecteurs de paramètres et d'estimer leurs précisions et indicateurs de fiabilité. Quant à la mise à l'échelle finale du modèle, elle a été réalisée en intégrant des points de calage ou des distances connues.

## Présentation des différentes données

### ■ Reportage photographique du sol

Dix-sept images du reportage photo ont été exploitées (14 photos prises le 21/09 et 3 prises le 22/09). Ce reportage a offert l'intérêt d'une double proximité :

- proximité temporelle : photos prises le jour ou le lendemain de l'explosion,
- proximité spatiale : photos prises au bord du cratère.

Pourtant l'exploitation photogrammétrique de ce reportage n'était pas garantie. En effet, il présentait deux difficultés. Premièrement l'appareil photo utilisé n'est évidemment pas dédié aux applications métrologiques. Deuxièmement les prises de vues ont été faites du même côté du cratère (versant nord) : ce n'est pas un contexte favorable en photogrammétrie terrestre où il est préférable d'avoir à disposition des images de la scène prises sur 360 degrés. De plus, compte tenu de cette configuration de prises de vues, la couverture photo du cratère n'est pas exhaustive (zones non couvertes sur le flanc nord). L'illustration ci-après montre où le photographe s'est positionné (cf. figure 2).

Le traitement photogrammétrique s'est néanmoins révélé possible avec l'obtention de bons résultats. Les incertitudes calculées à 3 sigma (probabilité à 99%)





**Figure 2.** Schéma présentant les positions successives de la caméra lors des reportages photographiques exploités, les 21 et 22 septembre.

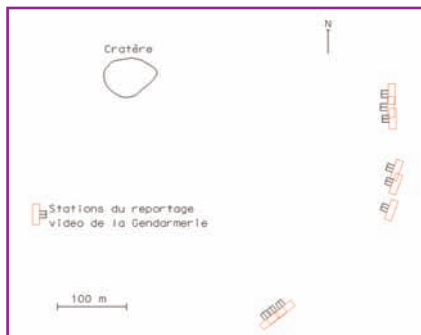
sur les 442 points mesurés sont en moyenne de  $\pm 50$  mm, ce qui est très satisfaisant. Les photos suivantes issues du reportage illustrent la densité de points mesurés à la surface du cratère, ainsi que leur nature (cf. figure 3).

## ■ Film de la gendarmerie

La méthode d'exploitation des données vidéo ne diffère pas de celle appliquée aux reportages photos. Seule une phase préalable de sélection et d'extraction d'images issues du film est nécessaire. Les images sont extraites suivant les trois critères suivants :

- Netteté et qualité de l'image.
- Position de l'hélicoptère au moment de la prise de vue.
- Prises de vues à focale maximum (zoom maxi).

L'illustration suivante montre la localisation de l'hélicoptère par rapport au cratère pour les images exploitées (cf. figure 4).



**Figure 4.** Schéma présentant les positions successives de la caméra pour les images exploitées ici, issues de la vidéo de la gendarmerie prise en hélicoptère.

Dix images satisfaisant ces critères ont été extraites de la bande vidéo. Les incertitudes déterminées à 3 sigma sur les 36 points déterminés à l'issue du calcul d'ajustement de faisceaux final sont de l'ordre de  $\pm 500$  mm, ce qui représente un excellent résultat.

## ■ Photos Rollei-Metric

Contrairement aux deux sources précédentes, la vocation première des photos Rollei Métric du 8 octobre 2001, était d'ordre métrologique. La configuration de prises de vues est ici idéale et la couverture photo du cratère est complète. Les photographies sont en outre de bonne qualité.

L'intérêt de ces images ne se situe pas ici au niveau de leur capacité de restitution de données, car les images datant du 8 octobre 2001, et sont donc très largement postérieures à l'explosion. La physionomie de la scène n'est plus celle d'origine, et le fond du



**Figure 5.** Schéma présentant les positions successives de la caméra lors du lever Rollei-Metric.

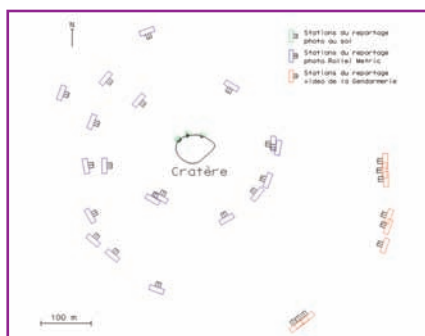
cratère est inondé. L'intérêt de ce jeu de données se situe au niveau de sa robustesse métrologique, et a très logiquement servi de référence pour qualifier et estimer la précision de restitution des autres données intégrées dans cette excellente ossature géométrique. Le seul problème restant à traiter a été alors de correctement identifier des points naturels permettant l'intégration des différentes données de façon fiable. L'illustration suivante montre la localisation de l'appareil photo par rapport au cratère pour les images exploitées (cf. figure 5).

Dix-neuf images issues du reportage ont été exploitées. A l'issue du calcul final, les incertitudes déterminées à 3 sigma sur les 107 points mesurés sont de l'ordre de  $\pm 100$  mm, ce qui n'est que deux fois supérieur à celles du reportage photographique depuis le sol, alors que le rapport d'échelle entre les deux projets est environ de 10 (altitude de l'hélicoptère 120 m par rapport



**Figure 3.** Exemple de points naturels identifiés et levés sur deux des images exploitées.





**Figure 6.** Schéma présentant les positions successives de caméras lors des trois prises de vues utilisées.

au sol). Les localisations des trois prises de vues du projet donnent le résultat graphique suivant (cf. figure 6).

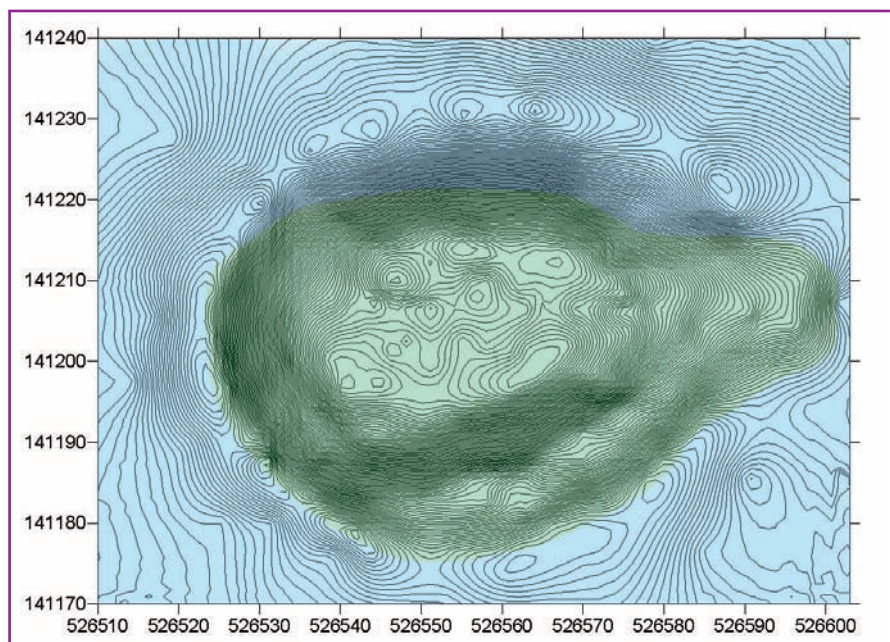
### ■ Ajustement sur les données Rollei-Metric

Les ajustements entre les données du reportage photo du sol et du film de la gendarmerie sur les données Rollei-Metric sont très intéressants car ils servent à quantifier et à valider la qualité et la cohérence des modèles par rapport à la référence choisie (projet Rollei-Metric). Ils permettent également d'apprécier la précision absolue du traitement photogrammétrique.

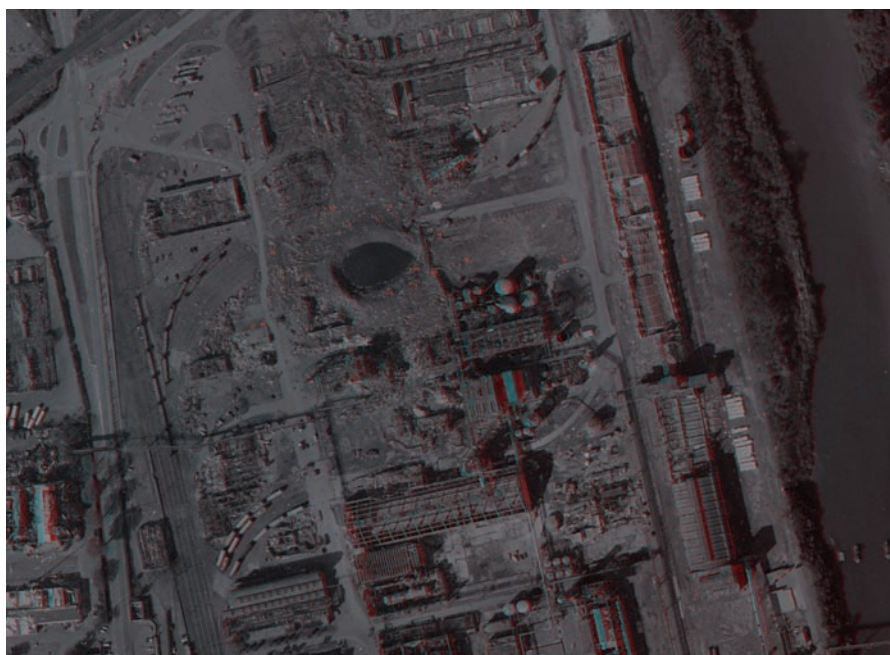
L'ajustement de l'ensemble des paramètres permettant de passer d'un système de coordonnées à un autre (similitude spatiale) est effectué. Celui-ci n'est évidemment réalisable qu'en exploitant les points communs aux trois projets. Les écarts de distance entre points identiques déterminés après calculs des similitudes peuvent être estimés comme étant représentatifs de la qualité et de la précision de restitution.

### ■ Ajustement du reportage photographique au sol sur le reportage Rollei-Metric

Le calcul de la transformation permettant l'ajustement des points 3D issus du traitement du projet photographique sur le projet Rollei-Metric donne une erreur moyenne quadratique (emq) de l'ordre de 140 mm. Sur ce constat, il a été décidé de fusionner ces deux jeux de données complémentaires, l'un donnant le fond du cratère et l'autre, ses alentours (cf. figure 7), afin de



**Figure 7.** Fusion des deux jeux de données : la zone en vert relève du traitement de reportage photo au sol, la zone en bleu relève du traitement Rollei-Metric.



**Figure 8.** Localisation des points d'appui utilisés pour la mise en référence.

disposer d'un modèle numérique de l'ensemble du cratère (les zones relevant des 2 projets restant cependant clairement identifiables).

### Ajustement des données du film de la gendarmerie sur la mission Rollei-Metric

Le calcul de la transformation permettant l'ajustement des points issus du traitement du film de la gendarmerie sur le projet Rollei-Metric donne des

emq qui sont de l'ordre de 500 mm (pour une dizaine de points).

### ■ Traitement des données Aeroscan par l'IGN

Afin de basculer l'ensemble de ces données dans le référentiel Lambert, l'IGN a extrait, à partir du couple stéréoscopique aérien réalisé pour le compte de la mairie de Toulouse en 2001, les coordonnées tridimensionnelles de détails de la scène préalablement



identifiés. Cette identification est représentée sur l'image suivante (cf. figure 8 en anaglyphe).

Les données disponibles étaient les suivantes :

- La prise de vue argentique réalisée à la demande de la ville de Toulouse, peu de temps après l'explosion.
- Le fichier de calibration de la caméra ayant servi à la prise de vue argentique.
- Une orthophotographie de la zone datée du 16/09/01.

- Un ensemble de coordonnées de points terrain.

Le déroulement de l'opération a été le suivant : les clichés argentiques de la ville de Toulouse ont été scannés, une équipe a été chargée de calculer les grilles de localisation nécessaires à la restitution avec le logiciel GeoView. Pour obtenir ces grilles, l'équipe de l'IGN a calculé l'aérotriangulation associée aux clichés, selon les étapes classiques d'orientation interne de la caméra, de mise en place du couple

d'images à l'aide de mesures de points d'appui réalisées en stéréo, et de calcul de l'aérotriangulation grâce aux coordonnées des points terrains fournis.

L'identification de ces points terrain a été possible en utilisant l'orthophotographie de la zone. Ce calcul a permis de positionner les images dans le système géodésique ancien NTF - Lambert 3. Ce positionnement absolu, dépendant essentiellement de la précision des points d'appui, assez difficile à qualifier, est estimé dans l'intervalle 50 cm - 1 mètre.

Ces grilles de localisation ont ensuite été utilisées avec le logiciel GeoView pour la restitution de la zone du cratère (cf. figure 9). Pour répondre à la demande, un levé des formes caractéristiques de la zone a été effectué, avec des courbes de niveaux pour la morphologie du cratère et d'un ensemble de points cotés. Pour fournir une référence géométrique aux travaux 3D réalisés par la société ESIC, ce levé a été complété par une saisie d'éléments caractéristiques de la zone. La précision estimée de ces levés est de l'ordre de 30 cm, le produit final de cette opération est un ensemble de fichiers 3D (figure 9).

Le produit final de cette opération est un ensemble de fichiers 3D décrivant à l'aide de lignes caractéristiques et de points cotés, la forme de la zone du cratère.

## ■ Ajustement des données issues du reportage photographique du sol et du reportage Rollei-Metric sur les données IGN

Compte tenu de leur complémentarité (et donc de leur segmentation possible), les données du reportage photo du sol et celles du reportage Rollei-Metric avaient donc été fusionnées par la société ESIC. Leur ajustement sur les résultats IGN a fait l'objet d'un seul calcul. Il est à préciser qu'avec l'inondation du cratère et de la grande différence d'échelle entre les photos du sol et le couple stéréo aérien, il aurait été vraiment délicat d'identifier davantage de détails communs entre ces deux projets.

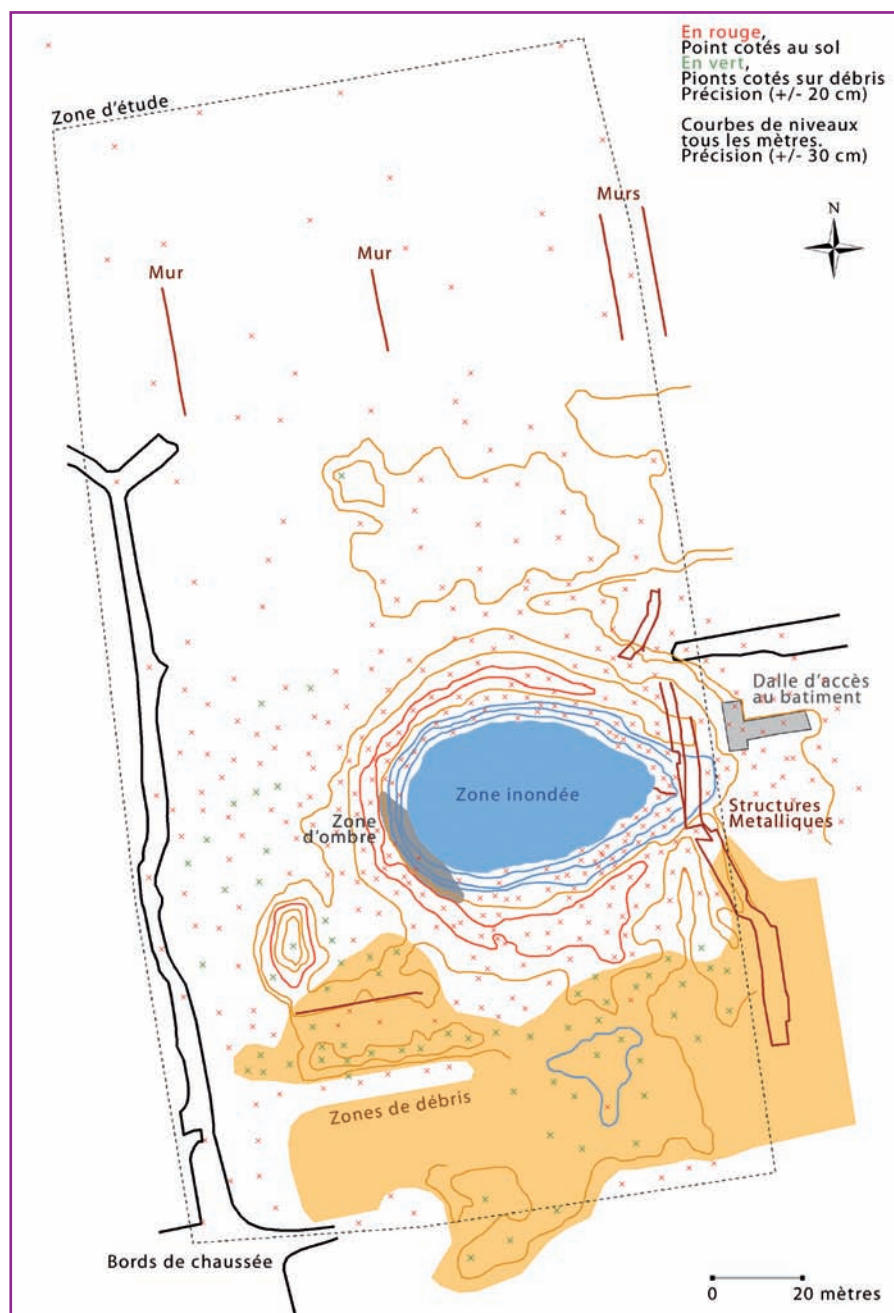


Figure 9. Ensemble de fichiers 3D décrivant à l'aide de lignes caractéristiques et de points identifiables cotés, la forme de la zone levée pour les mesures du cratère.



Le calcul de la transformation permettant l'ajustement des points issus des deux projets photographiques sur les données IGN donnent des emq de l'ordre de 250 mm (200 mm en planimétrie et 300 mm en altimétrie).

### ■ Ajustement des données du film de la gendarmerie sur les données IGN

Les points communs issus des traitements du film de la gendarmerie et du projet IGN sont au nombre de 4. Ce chiffre est trop faible pour permettre un calcul de transformation solide (faible redondance). Il a donc été décidé de partir du modèle issu du traitement des deux reportages photos (photos du sol + Rollei-Metric) exprimé dans le référentiel site pour le basculement des données film. En combinant les deux transformations successivement (les deux reportages photos sur les données IGN, puis le film gendarmerie sur les deux reportages), les erreurs à 3 sigma sont de l'ordre de 800 mm.

## Présentation des résultats cartographiques et morphologiques - Conclusions

A partir des résultats obtenus, un MNT a été créé. Le modèle 3D obtenu a permis de cartographier de manière détaillée le cratère AZF juste après l'explosion et de mettre en évidence certains traits morpho-structuraux essentiels, révélateurs du mécanisme de l'explosion. Un bon nombre d'éléments objectifs importants ont ainsi pu être mis en évidence (cf. figure 11).

Le fond du cratère qui est l'empreinte directe de l'explosion, est caractérisé par une ride de 14 mètres de long, 7 mètres de large et environ 0,5 à 1 mètre de haut par rapport au milieu environnant. L'analyse de cette structure montre qu'elle est constituée en réalité de deux pics ("central peak" ou "rebound peak"), sub-circulaires, d'environ 7 mètres de diamètre et étroitement imbriqués l'un l'autre. Ces pics représentent les zones de détonation maximale probablement situées au niveau de deux tas de

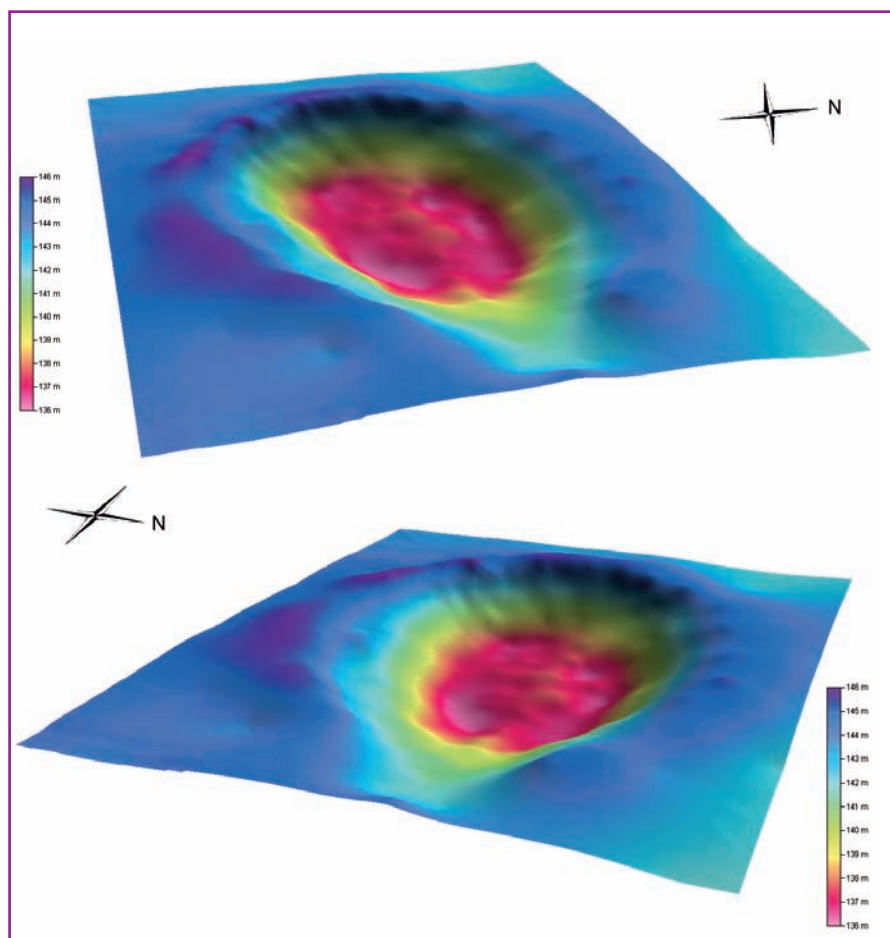


Figure 10. Représentation en perspective basée sur les levés obtenus, selon deux points de vue différents.

nitrate qui ont détoné dans le hangar principal.

Ce double pic central est entouré par un sillon de 4 à 6 mètres de large et d'environ 0,5 à 1 mètre de profondeur. Cette dépression circulaire, au-delà du fait qu'elle est topographiquement moins élevée que les pics centraux, est interprétée comme la zone où l'angle de cisaillement entre l'onde de pression de la détonation et le toit du substratum rocheux est atteint (environ 30°) ce qui a facilité un affouillement des couches géologiques indurées sous-jacentes (phase de cratérisation ou d'excavation).

Les flancs internes nord et ouest du cratère sont relativement réguliers avec des pendages de l'ordre de 35 à 40°. Le flanc sud présente un pendage du même ordre mais est interrompu dans sa partie médiane par un méplat qui plonge doucement vers l'Est du cratère. Ce méplat est la trace de failles concentriques qui se sont créées lors

de l'explosion et le long desquelles ont été observées les arrivées d'eau.

Quant au flanc Est, il présente des pentes bien plus douces, de l'ordre de 10 à 15°. La dissymétrie observée entre les flancs internes Est et Ouest du cratère est liée en grande partie aux conditions géotechniques différentes du sous-sol avec notamment des sables graveleux et argileux à l'Est (cohésion de l'ordre de 20 KPa) et des argiles très raides (de l'ordre de 200 KPa) dans la partie occidentale. Il est important également de noter que dans cette zone, des glissements de terrain post-explosion (très certainement liés à des phénomènes de liquéfaction) sont observés et viennent adoucir la morphologie de la pente de ce flanc.

Dans le secteur oriental, la crête qui couronne le cratère est largement éventrée et déformée par des phénomènes tardifs qui donnent au cratère l'aspect si caractéristique de





cratère égueulé. Ces phénomènes tardifs ont contribué à modeler et à adoucir la morphologie de ce flanc oriental.

Des phénomènes tardifs équivalents ont été observés sur le flanc externe occidental du cratère avec notamment un large sillon de 29 m de long, 3 mètres de large et environ 0,5 à 1 mètre de profondeur qui a été creusé dans les éjectas de l'explosion. Cette trace a été longuement interprétée dans la presse comme "la trace noire" liée à des phénomènes divers (électromagnétiques, électriques, etc). Par ailleurs, la cartographie précise du cratère a permis de calculer avec une meilleure précision le volume du cratère. D'après les calculs présentés ici, ce volume serait de 7365 m<sup>3</sup> au lieu de 8770 m<sup>3</sup> comme cela avait été estimé initialement.

Finalement, il est évident que la connaissance géométrique précise du

cratère était indispensable pour la bonne compréhension des mécanismes de cette explosion

Et c'est grâce aux ressources impressionnantes apportées par la photogrammétrie poussée dans ses performances ultimes que les caractéristiques géométriques de ce cratère, siège de l'énigme, ont pu être définies de façon rigoureuse, apportant ainsi une contribution irremplaçable à la justice. ●

## Contacts

### Michel KASSER

Professeur des Universités,  
Directeur de l'École Nationale des Sciences  
Géographiques (ENSG) à l'IGN  
michel.kasser@ensg.eu

### Jean-Baptiste MONNERIE

Ingénieur ESGT, Chargé d'Affaires ESIG-SN  
jean-baptiste.monnerie@esic-sn.fr

### Laurent DELGADO

Ingénieur à l'Institut Géographique  
National (IGN) - laurent.delgado@ign.fr

### Daniel ROBERT

Ingénieur géologue-géophysicien à Total  
daniel.robert@total.com

## ABSTRACT

*A set of very effective photogrammetric operations has been done on the crater formed during the disaster bound to the AZF explosion on September 21, 2001, in Toulouse. These works show how it is possible to take benefit from images of extremely heterogeneous origins, in terms of scale, of metric quality and of acquisition dates. It has allowed constituting a very detailed survey corresponding to the very first hours after the explosion, before the geometry of crater has been completely upset by the numerous works.*

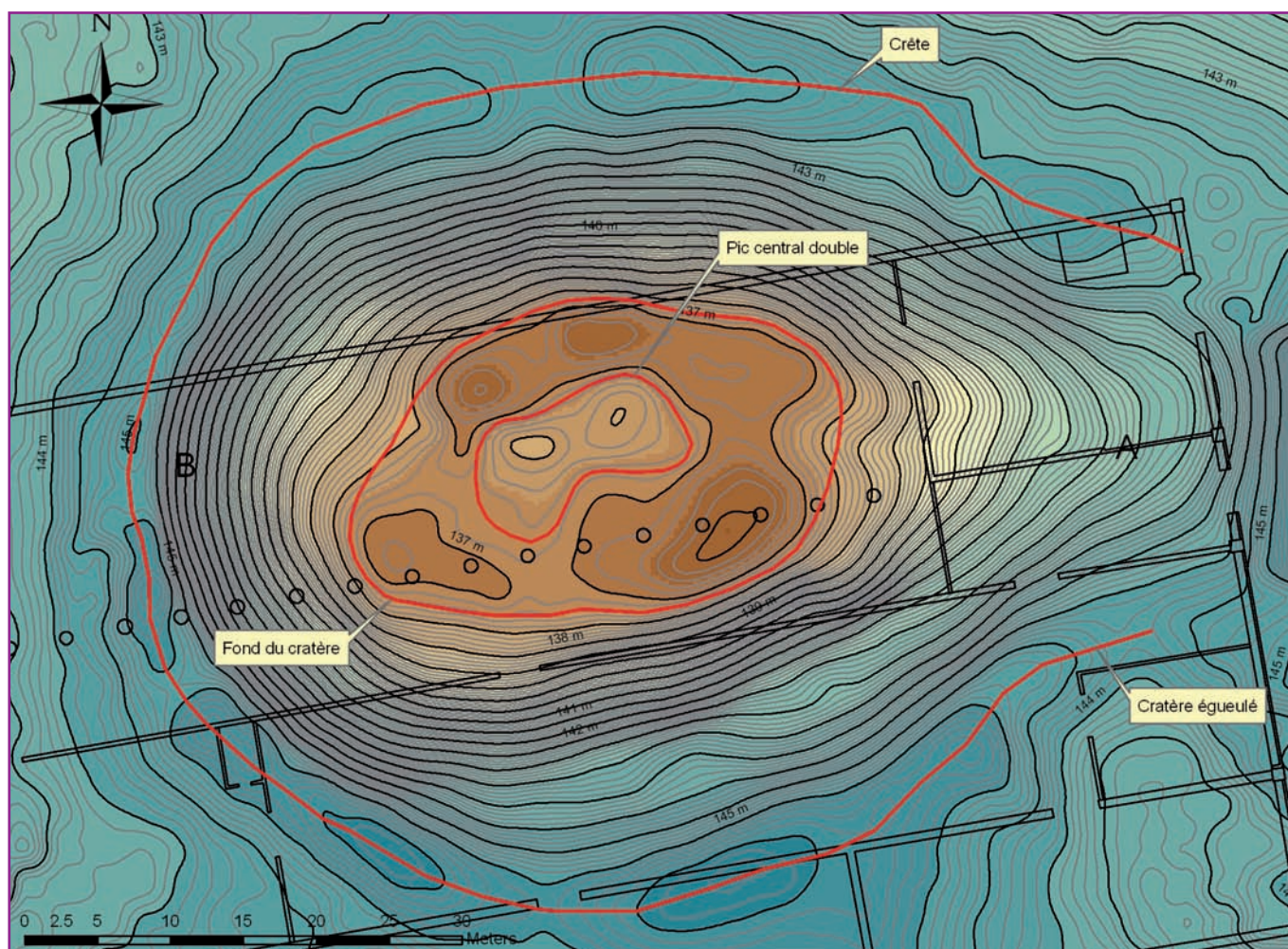


Figure 11. Représentation en courbes de niveau, avec les traits morphologiques principaux.