APPLICATIONS DE TECHNOLOGIES DE MODELISATION GEOLOGIQUE TRIDIMENSIONNELLE AUX PROJETS DE TUNNELS

B. GAUDIN - (SCETAUROUTE). - **J.L. PEREZ** - (LRPC de Nice).
P. PORTOLANO - (EOSYS). - **J. DARCY** - CETu

ABSTRACT : 3D geological modelling tools have been developed for the mining and oil and gas industries that can be beneficially used for a variety of tunneling projects. These tools turn out to be especially useful when the geology is complex or poorly understood. 3D models can be sequentially updated and validated during the project, with data acquired at succesive survey stages. These updated models improve the quality of interpretation as well as allowing the visualization of the geology in many ways, thus facilitating the necessary communication between geologists, design engineers and construction engineers. Several examples of the application of a software modelling tool for both design and construction phases of tunneling projects are presented.

RESUME : Des outils informatiques de modélisation géologique tridimensionnelle, qui ont été développés pour des applications minières ou pétrolières, peuvent être utilisés avec profit pour les projets de tunnels. Ces outils s'avèrent particulièrement utiles dans les cas où la géologie est complexe et incertaine. Les modèles peuvent être enrichis et validés progressivement dans le temps au cours de l'évolution d'un projet, par l'apport des données des phases successives des reconnaissances. Ils permettent de nombreux modes de visualisation facilitant l'indispensable dialogue entre les géologues et les ingénieurs lors de la conception de projets de tunnels ou lors de travaux. Plusieurs exemples de l'application d'un logiciel de modélisation géologique à des projets et travaux sont présentés.

1 - INTRODUCTION

Des évolutions importantes dans le domaine des travaux souterrains sont observées depuis une quinzaine d'années: contractualisation des études géologiques et géotechniques, mécanisation et automatisation de plus en plus poussées des procédés d'excavation, développement de nouvelles méthodes de pré-soutènement, etc...
Ces évolutions conduisent à exiger des reconnaissances de plus en plus précises et complètes, indispensables pour que Maîtres d'Oeuvre et Entrepreneurs, chacun dans leurs domaines, puissent arrêter leurs choix en ayant une connaissance aussi exacte que possible des conditions géologiques.

On constate également une évolution dans la nature des tunnels: les impératifs de tracés qui s'imposent aux grands ouvrages modernes (routes et voies ferrées) conduisent à des tunnels plus en plus longs, contraints de traverser des structures géologiques complexes avec des terrains dont le franchissement peut s'avérer difficile.

Il faut donc, de plus en plus fréquemment, relever le défi multiple de la définition spatiale des structures, des faciès de roches impliquées, de la typologie des accidents tectoniques et des relations structure-hydrogéologie.

A l'occasion de plusieurs études récentes de tunnels, des modélisations géologiques tridimensionnelles ont été mises en oeuvre, avec le souci permanent de les enrichir continuellement par les apports de données en provenance des diverses techniques de reconnaissance:
géologie de surface, photogéologie, thermographie, modèles numériques de terrain (MNT), images prises de satellites, sondages, géophysique...

On construit ainsi un ou plusieurs modèles qui alimentent la réflexion et orientent les études et reconnaissances ultérieures, dans une démarche itérative permanente qui peut être poursuivie jusqu'à la réalisation des travaux.

La modélisation géologique a pris son essor dans les années 80 lorsqu'on a pu disposer d'outils d'interpolation performants en 2 et 3 dimensions ainsi que de stations de travail volumiques interactives, indispensables pour réaliser les stations d'interprétation géologique. Les principales demandes de ces technologies ont été longtemps cantonnées au domaine pétrolier d'une part, avec une conception plutôt orientée vers l'utilisation des données géophysiques, et au domaine minier d'autre part, en privilégiant l'aspect géostatistique pour la détermination des teneurs en minerais.

L'application de la modélisation géologique tridimensionnelle à l'étude des projets de génie civil prend son essor actuellement et démontre tout son intérêt dans ce domaine. Par ses capacités d'intégrer dans le modèle des données très variées issues des différentes techniques de la télédétection, de la géophysique, de la géologie et des sondages, elle s'avère constituer un outil précieux, voire irremplaçable, pour le travail d'analyse et de synthèse que le géologue est obligé de conduire à toutes les phases du projet, depuis les premières études préliminaires jusqu'au pilotage du chantier.

2 - LES CONDITIONS D'UNE BONNE MODELISATION GEOLOGIQUE

Tout d'abord, il est indispensable qu'une collaboration étroite s'établisse entre le géologue (au sens large: géologue, géotechnicien, hydrogéologue) et le modélisateur. Commencée dès la collecte des données, cette collaboration est nécessaire pour adapter ces données, sans les altérer, en vue de leur introduction dans le modèle, pour définir l'extension de ce dernier, pour présenter les résultats et les intégrer dans la chaîne informatisée du projet. A l'évidence, le modélisateur doit non seulement maîtriser l'informatique géologique, mais être également géologue.

L'élaboration d'un modèle dès les premiers stades d'étude, s'inscrit dans une logique de progressivité indispensable pour mieux cerner les incertitudes et orienter les reconnaissances: la formalisation des incertitudes sur le modèle aide à définir des techniques d'investigation les mieux adaptées, depuis les images satellites jusqu'aux sondages. En général, on aura intérêt à ébaucher le modèle dès le début de l'étude avec le **modèle numérique de terrain** (MNT), les données géologiques connues et les clichés satellites et aériens existants. Ensuite, le dialogue avec les ingénieurs d'infrastructures pourra commencer, maquettes 2D ou 3D à l'appui.

3 - LA MODELISATION GEOLOGIQUE: LES ETAPES D'ELABORATION - L'UTILISATION

Le stockage des données de toutes natures, cartographiques, photographiques, levers géologiques, géophysiques, sondages, quels qu'en soient le format et l'origine, doit s'effectuer dans une base de données commune.

L'interprétation des données peut commencer dès les premières opérations de stockage réalisées, puis se poursuivre au fur et à mesure de l'enrichissement de la base de données. Par visualisation et analyse interactive 2D et 3D, on validera ces données et leur cohérence géo,métrique de manière à éliminer les erreurs de différentes natures (données de fichiers ou interprétations erronées).

Les objets géologiques sont regroupés et interprétés en fonction d'hypothèses structurales et stratigraphiques explicitées. L'apport du géologue est indispensable pour la formulation d'hypothèses géologiques cohérentes et la définition du processus d'intégration de données de provenances différentes (par exemple: failles repérées par géophysique, sondages, levés structuraux...).

A l'issue de cette étape, des hypothèses géologiques dont le degré de cohérence est insuffisant sont rejetées ou des demandes d'investigations complémentaires sont formulées. **Cette démarche est fondamentale pour la réussite de la modélisation**.

La modélisation proprement dite requiert des outils informatiques performants rapides et de grande capacité, comportant des algorithmes d'interpolation permettant le calcul de tous types de surfaces (strates, failles, plis, filons...) en accord avec les données géologiques régionales (épaisseur des strates, style tectonique, régime des contraintes...), de manière à pouvoir, à partir de ce modèle, établir toutes coupes prévisionnelles (profils géologiques, coupes de sondages) et cartes isobathes avec calculs de longueurs, surfaces ou volumes, ou générer des entités «tectono-sédimentaires» à partir d'un modèle prédéfini.

La collaboration géologue - modélisateur est évidemment essentielle dans cette phase de modélisation, que ce soit pour le choix et le paramétrage des algorithmes utilisés, pour la critique des résultats et les tests éventuels de paramètres différents ou enfin pour l'élimination de scénarios conduisant à des impossibilités géométriques. L'efficacité de la démarche est aussi directement liée à la puissance des outils de calculs et aux performances des outils graphiques.

L'actualisation du modèle s'opère au fur et à mesure de l'apport des données nouvelles (résultats d'un nouveau sondage, étude détaillée du site d'une tête de tunnel...). On est ainsi conduit à la critique des scénarios de la phase précédente et à l'élimination ou l'adaptation de certains d'entre eux. **Ce caractère évolutif doit se perpétuer jusqu'à la fin des travaux et il est fondamental que l'outil de modélisation mis en oeuvre permette cette actualisation de façon automatique et rapide**.

A toutes les phases de la modélisation, **divers documents peuvent être tirés du modèle**. Il peut s'agir de fichiers destinés à permettre les calculs nécessaires au projeteur (surfaces, cubatures dans chaque unité géologique par exemple...). Il peut s'agir aussi de vues 3D, sous forme de blocs diagrammes avec choix de perspectives, types d'éclairement, distorsions d'échelles, et extraction à la demande de coupes 1D ou 2D, voire d'animations. **Il s'agit alors d'un véritable outil de communication consultable en temps réel**, facilitant l'assimilation du contexte géologique et de ses implications sur le projet par les différents intervenants non géologues.

L'échange avec d'autres systèmes doit être prévu. Il faut pouvoir transférer tout ou une partie du modèle vers des logiciels de simulation numérique géotechnique, hydrogéologique, d'interprétation géophysique, de SIG ou de DAO. Diverses options de définition et transferts de maillages doivent être disponibles (maillages pour calculs aux éléments finis, par exemple).

Les différentes tâches et leur enchaînement pour l'élaboration d'un modèle géologique 3D sont résumés par l'organigramme présenté à la figure 1.

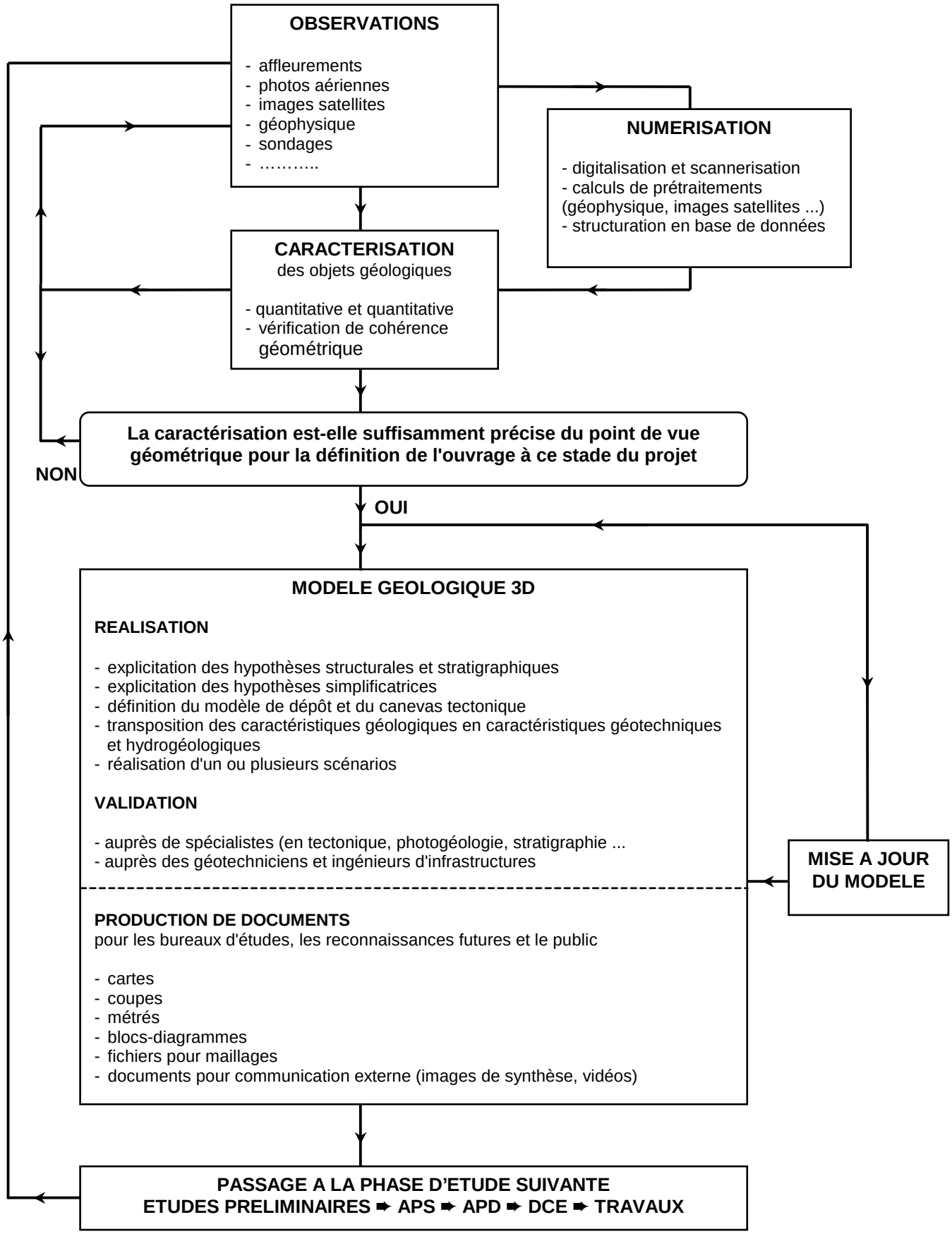


Figure 1 - Organigramme pour l'élaboration d'une modélisation géologique 3D

4- EXEMPLES D'APPLICATIONS DE MODELISATIONS A DES PROJETS RECENTS DE TUNNELS

Les exemples présentés ci-après sont tirés d'applications faites avec la Société EOSYS qui utilise le logiciel de modélisation géologique «EarthVision» développé par la Société DYNAMIC GRAPHICS, et qui a complété indépendamment les fonctionnalités de cet outil par des développements spécifiques aux méthodes utilisées en FRANCE pour la caractérisation de la géologie des tunnels. Ces logiciels qui requièrent des moyens informatiques puissants, fonctionnent sur les stations interactives UNIX-3D les plus récentes.

4.1- **Le tunnel du MERCANTOUR**, application en phase «Etudes Préliminaires».

Le tunnel du Mercantour, d'une longueur de 17,5 km, entre Isola et Vinadio s'inscrit dans le cadre d'une nouvelle liaison transfrontalière à l'étude, entre la France et l'Italie.
Le tunnel traversera le massif cristallin de l'Argentera à une altitude comprise entre 800 m et 900 m sous un recouvrement maximal de 1800 m environ.

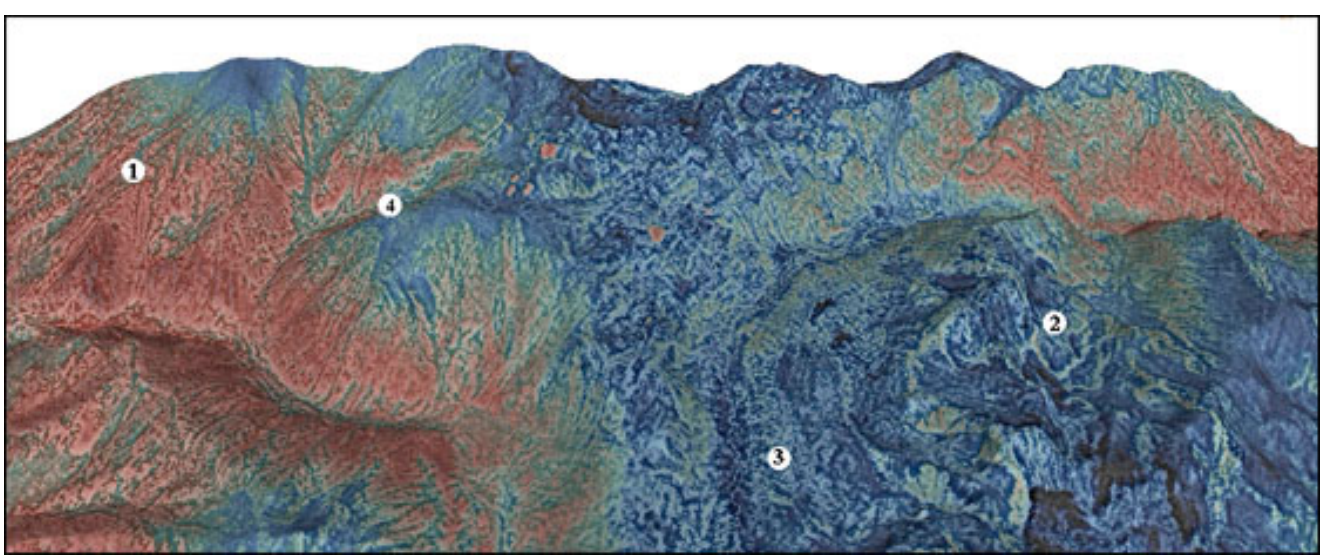
Du Sud-Ouest au Nord-Est, le tunnel doit intersecter deux ensembles de roches métamorphiques orientées selon la direction prédominante N 140°:

- le complexe de la Tinée entre Isola et la frontière, avec un cortège de plusieurs ensembles de roches gneissiques (Anelle, Iglières, Rabuons), comportant un coeur synclinal triasique de cargneules, gypses, pélites et quartzites.
- le complexe de Chastillon - Valmasque, entre la cime Maladeccia et Vinadio, constitué de roches métamorphiques plus anatectiques et plus homogènes, recouvrant partiellement le batholite de granite de l'Argentera.
- entre ces deux ensembles, une dépression morphologique avec concentration de mylonites et cataclasites.

Les principales inconnues géologiques concernent:
- la position et l'importance des bandes de cataclasites au niveau du projet, qui constituent des zones de faiblesses mécaniques et à fort potentiel aquifère,
- la présence éventuelle du Trias à la cote du tunnel,
- la présence et la localisation du batholite de granite,
- l'existence de structures et/ou fracturations autres que la principale N 140° et ses conjuguées.

L'analyse de ces problèmes a été conduite par une équipe pluridisciplinaire associant géologues français et italiens appartenant au CETE Méditerranée, au CETU, à l'Université de Nice, à la Société EOSYS et au Politecnico de Turin.

La reconnaissance des cataclasites dans la zone centrale a été opérée par un sondage profond de 1155 m incliné de 25° sur la verticale vers le Nord-Est, accompagné de divers essais in situ.



Légende: 1- Complexe de la Tinée
2 - Complexe de Chastillon-Valmasque
3 - Zone de mylonites et de cataclasites
4 - Accidents limitant le Trias de la Tête de Sespoul

Figure 2 – Massif du Mercantour : la superposition d'une thermographie aérienne redressée et du MNT permet de mettre en évidence des accidents et des faciès métamorphiques non repérables dans le domaine visible.
(CETE Méditerranée, CETU, EOSYS).

Le travail d'analyse à partir de levés de terrain s'est rapidement heurté aux difficultés soulevées par l'étendue de la zone concernée, des conditions d'accès difficiles voire impossibles et les problèmes d'interprétation des photos aériennes liés aux distorsions et déformations des prises de vues en raison du relief très accentué.
Pour conduire cette étude, l'utilisation des outils de la modélisation géologique tridimensionnelle est alors rapidement apparue essentielle. Celle-ci s'est faite en trois étapes:

i) Utilisation des outils pour guider l'étude sur le terrain moyennant:

- l'analyse morphologique du MNT qui a permis de mieux localiser les bandes de cataclasites,
- la superposition en machine du MNT, de la carte géologique et des photos aériennes redressées, qui a permis de faire une synthèse plus exacte dans les zones à fort relief,
- le redressement et l'intégration des données issues des clichés infrarouges numérisés, dont les traitements ont permis de localiser des accidents non visibles avec les autres techniques d'investigation (accidents limitant le Trias, ainsi que la Maladeccia au Nord) et d'accentuer la différenciation entre les faciès anatectiques, migmatitiques et gneissiques (*figure 2*).

ii) Vérifications sur le terrain par les divers intervenants avec retour en fin de journées sur la station de travail pour valider les observations de terrain, les sites inaccessibles ayant été observés d'hélicoptère.

iii) Intégration de l'ensemble des données validées dans le modèle géologique 3D: données de surface, coupes des sondages, hypothèses structurales, etc... Le modèle 3D élaboré (*figure 3*) est appelé à évoluer et s'affiner dans la suite des études. En son état actuel il constitue la donnée de base utilisée pour optimiser le calage du tracé.

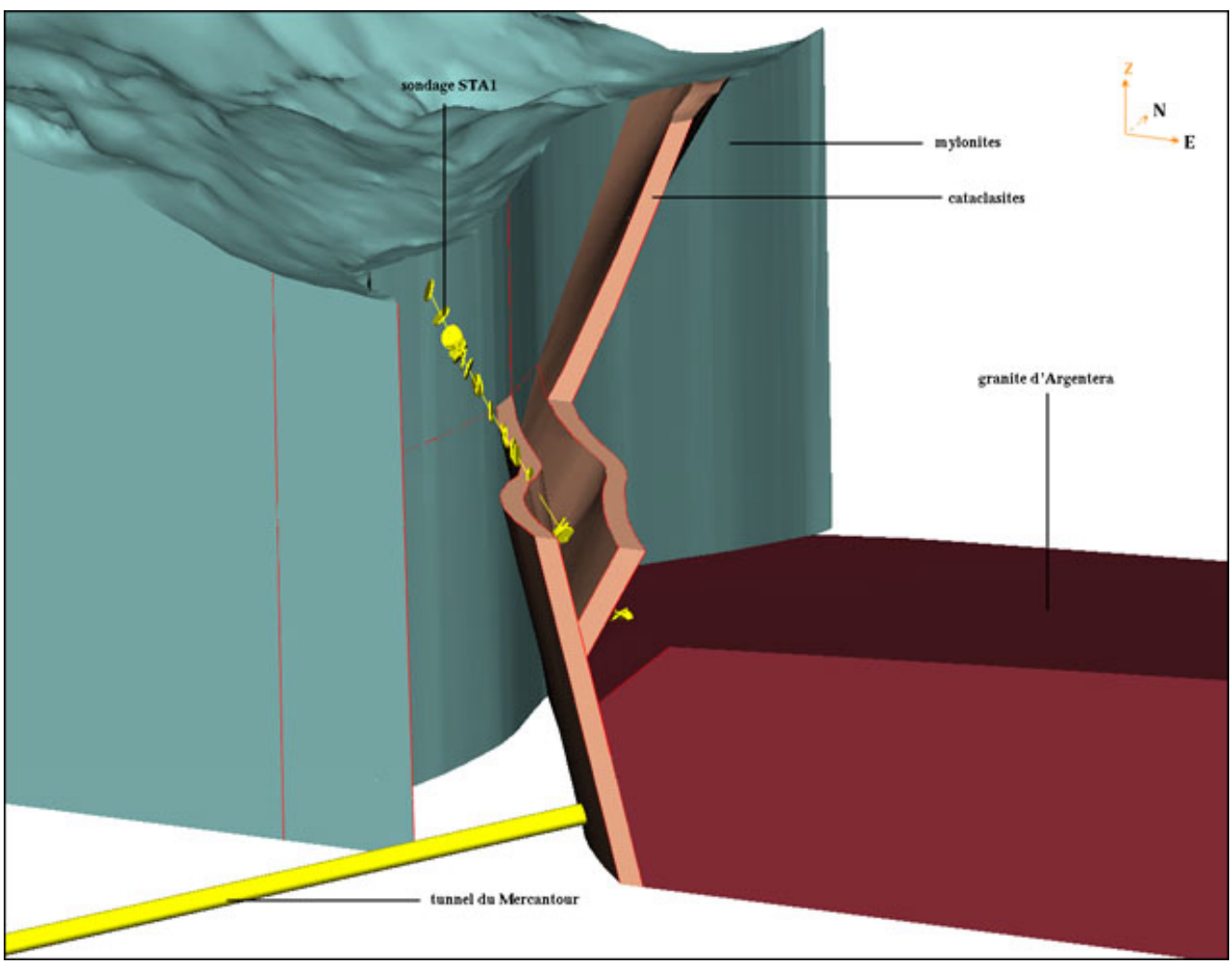


Figure 3 - Modèle géologique écorché du massif du Mercantour montrant la disposition des bandes de cataclasites, obtenue à partir des données du sondage et des anomalies morphologiques observées sur le MNT.
(CETE Méditerranée, CETU, EOSYS).

L'exemple du tunnel du Mercantour a confirmé toute l'importance des outils de modélisation géologique pour aider au bon déroulement de la phase de caractérisation d'une étude complexe. L'un des aspects de cette étude qui n'est pas le moins intéressant, est que l'utilisation même des outils a contribué à fédérer une équipe en imposant aux géologues d'effectuer une synthèse plus rigoureuse de leurs observations et de leurs hypothèses et aux modélisateurs de venir confronter sur le terrain les résultats découlant de leurs modélisations.

4.2 - Le tunnel du FAROT, application en phase «Avant-Projet Sommaire».

Dans le cadre de l'étude d'APS de l'autoroute A51 passant par Gap, le franchissement de la zone de Beaufin, près de la retenue du Sautet sur le Drac, nécessitera le creusement d'un tunnel de 3,8 Km de long environ, le tunnel du Farot.

Les terrains rencontrés comportent un socle de micaschistes avec son tégument de terrains primaires et triasiques incluant des coulées de spilites, chevauchés par des marnes et calcaires secondaires et tertiaires.

La modélisation géologique de ce projet a été opérée pour le compte du CETE Méditerranée et du CETU dans un but méthodologique, après que l'essentiel des travaux de reconnaissances de l'APS ait été réalisé.

Un premier modèle basé uniquement sur des données d'affleurements, de sondages et de sismique réfraction a immédiatement mis en évidence le déficit critique de connaissance géologique pour la partie centrale du projet sous le massif de la Tête de la Sambut *(figure 4)* d'accès difficile; de plus ce premier modèle réalisé reflétait mal, d'un point de vue qualitatif, la perception de la géologie acquise par les géologues ayant travaillé sur cette zone.

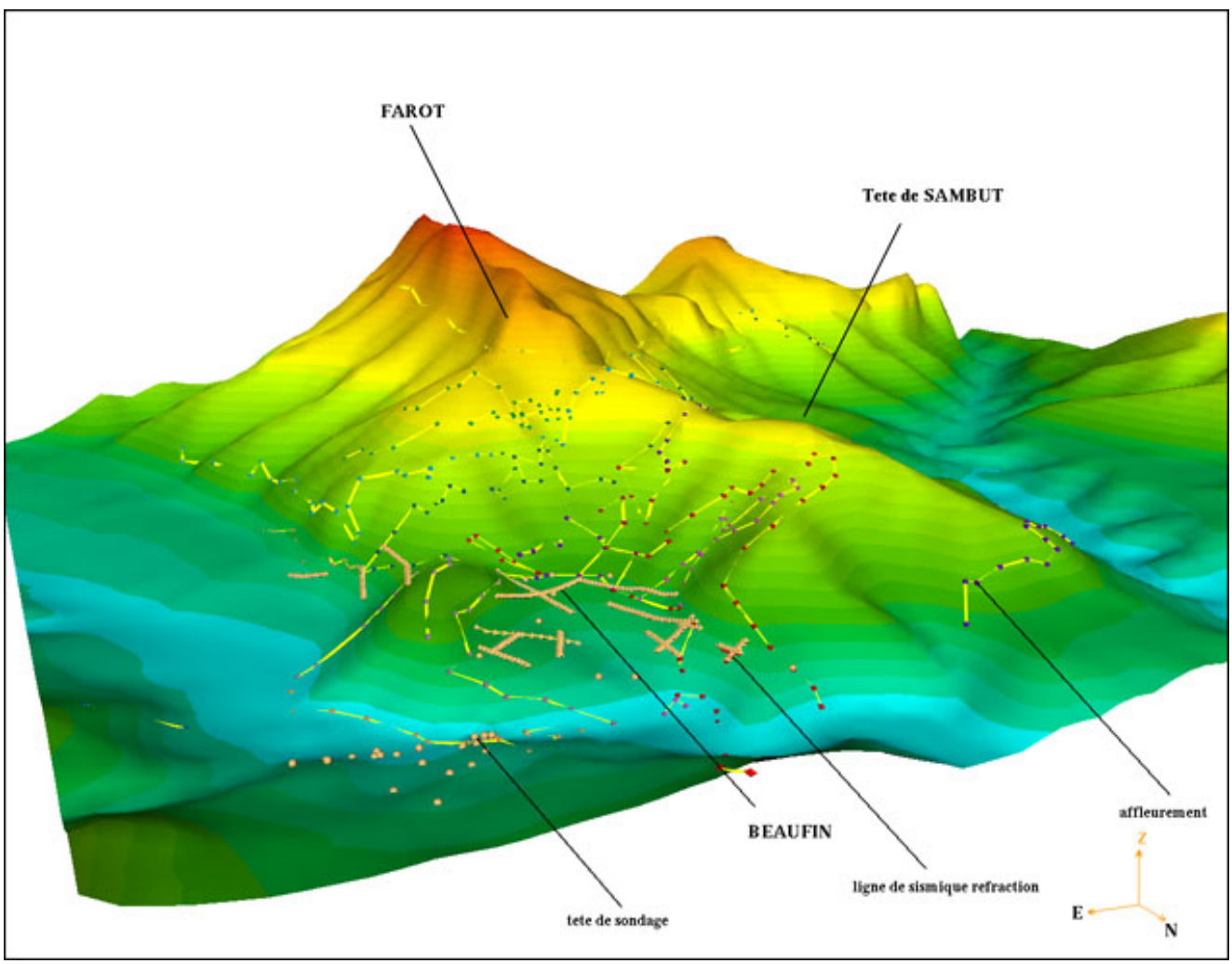


Figure 4 - Modèle numérique de terrain du massif du Farot avec localisation des reconnaissances.
(CETE Méditerranée, CETU, EOSYS)

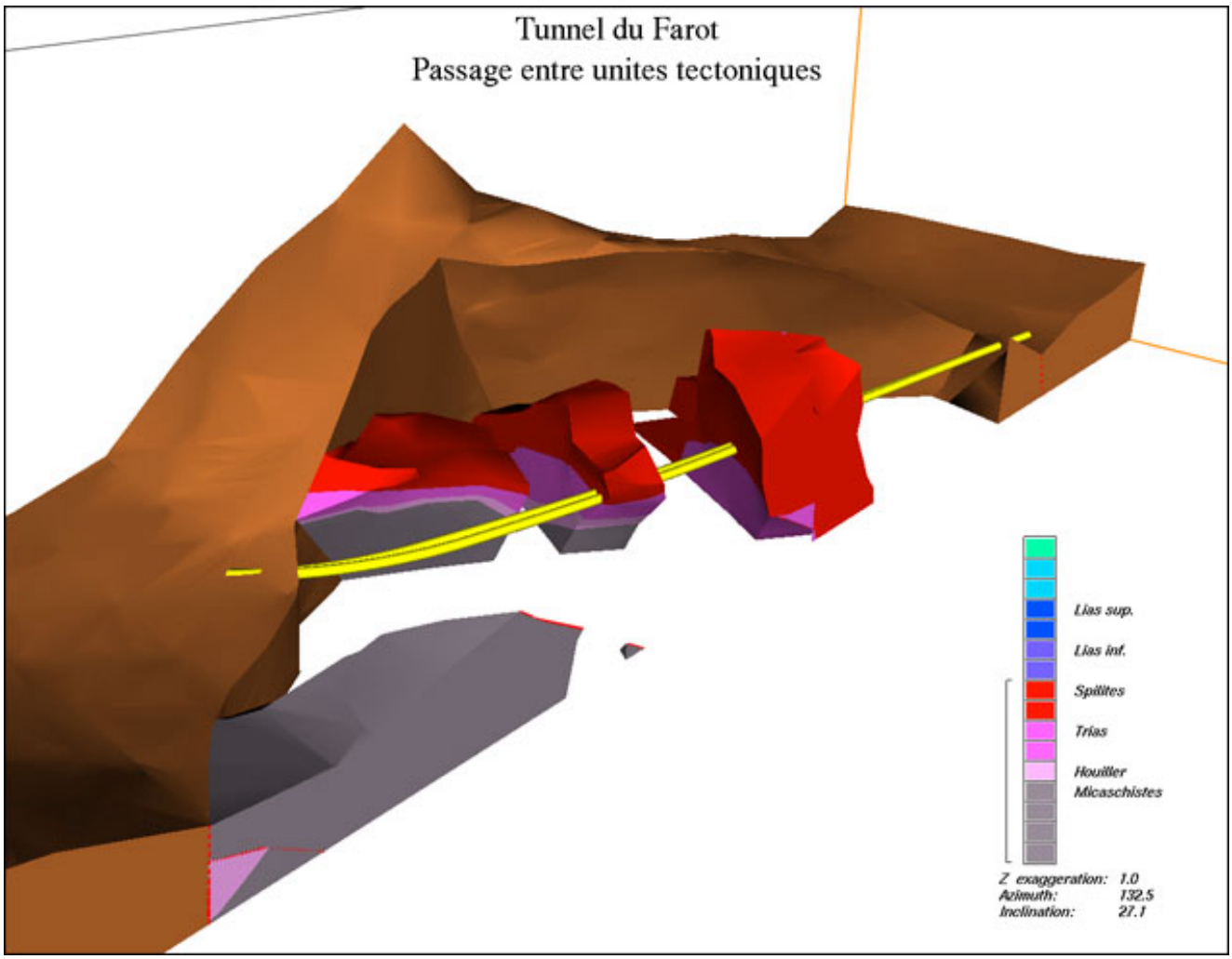


Figure 5 - Modèle géologique écorché du massif du Farot - Des compartiments délimités par des jeux de failles ont été enlevés pour faciliter la perception de l'incidence de la géologie sur le projet.
(CETE Méditerranée, CETU, EOSYS)

La phase suivante a consisté en la mise au point de méthodologies de caractérisation numérique pour localiser avec plus de précision sur le MNT les résultats des observations photogéologiques et les hiérarchiser. Une méthodologie spécifique a également été mise au point pour le calcul du modèle géologique, à partir des données de surface et de la synthèse structurale qualitative réalisée à partir de la photogéologie.

Un deuxième modèle *(figure 5)* a alors été calculé à partir de ces nouvelles données. Le modèle ainsi obtenu s'est trouvé beaucoup plus en accord avec la sensibilité des géologues les plus réticents vis à vis du premier modèle. Malgré tout, il eut aussi ses opposants qui restaient plutôt en faveur du premier modèle.

Pour lever une des principales indéterminations du projet, un sondage profond sous la Tête de la Sambut a été réalisé à l'automne 1995 dans le cadre d'études complémentaires de l'APS. Ce sondage a trouvé, en bon accord avec le second modèle, une importante épaisseur de spilites au détriment des faciès sédimentaires du Trias, absents à cet endroit.

L'étude du Farot a montré que la modélisation géologique tridimensionnelle sur station de travail n'est pas seulement un outil de visualisation: elle permet aussi de mettre plus facilement en évidence des incohérences géométriques qui subsistent dans les reports et les interprétations faits avec les moyens traditionnels, elle permet de cibler les emplacements les plus pertinents pour la recherche de données complémentaires et enfin elle permet de rendre plus accessibles aux ingénieurs d'infrastructures des enjeux de débats de spécialistes des sciences de la terre et les conséquences qui en découlent pour le projet.

4.3 - Le sillon glaciaire du tunnel des HURTIERES, application en phase «Travaux» (cf. communication BIENFAIT et Al., Thème C).

Lors du creusement du tunnel des Hurtières traversant un massif de schistes sur l'autoroute A43 dans la vallée de la Maurienne, un débourrage brutal de matériaux alluvionnaires sablo-graveleux a interrompu l'avancement le 26 octobre 1994. Cet accident est survenu à la suite de la rencontre d'un sillon glaciaire entaillant profondément le massif de schistes depuis le terrain naturel en surface vers la cote 413 jusqu'au niveau des tubes entre les cotes 337 à 344 environ.
Un fontis s'est formé au sein des matériaux de remplissage du sillon, remontant jusqu'au terrain naturel où est apparu un puits d'effondrement d'une dizaine de mètres de diamètre et d'une profondeur du même ordre.

A la suite de cet accident, une campagne de sondages de reconnaissance a été entreprise dès le début du mois de novembre, comportant de nombreux sondages carottés et destructifs forés à partir des tubes Ouest et Est, et à partir de la surface, les objectifs assignés aux reconnaissances étant d'acquérir des informations sur la topographie du sillon, la nature des matériaux de remplissage et l'hydrogéologie, informations indispensables pour pouvoir définir les méthodes à mettre en oeuvre pour le franchissement de l'accident.

La campagne de reconnaissance s'est poursuivie jusqu'à la fin de l'année 1994, suivie à partir du début de l'année 1995 par des travaux d'injections réalisés depuis le tube Est vers le tube Ouest.

Au cours de l'avancement de ces reconnaissances, la géométrie du sillon glaciaire s'est rapidement révélée d'une complexité plus grande que celle imaginée dans un premier temps.

Compte tenu du nombre croissant de sondages effectués, avec des orientations très variables, il est apparu utile de faire appel à l'outil informatique pour aider à la compréhension de la géométrie du sillon et à sa représentation, moyennant le modelage de surfaces courbes passant par les limites sillon-massif identifiées ponctuellement au niveau des sondages ou du terrain naturel.

Dans un premier temps, un bloc de base, représentant l'ensemble du massif des Hurtières, a été constitué à partir du MNT fourni par le fichier MACAO.

Dans un deuxième temps, les données des sondages et les limites reconnues en surface entre le massif de schiste et le remplissage alluvionnaire du sillon ont été introduites pour élaborer le modèle 3D du sillon, en considérant que l'on n'avait que deux couches géologiques distinctes: les schistes et le remplissage du sillon .

Les deux tubes du tunnel, introduits par ailleurs dans le modèle, permettent d'obtenir les intersections avec le sillon.

Le premier algorithme de génération de surface, mis en œuvre pour modéliser le sillon, ne permettait pas de faire apparaître de surface en surplomb.

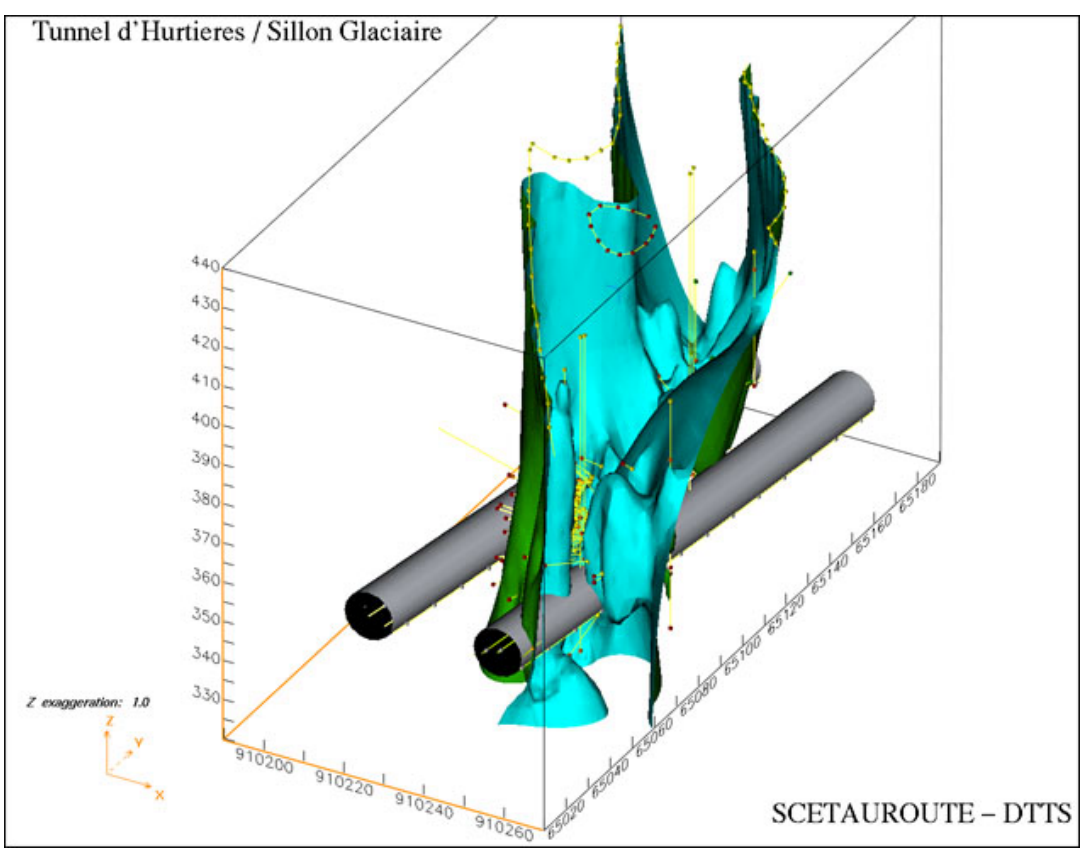


Figure 6 – Vue perspective du sillon glaciaire obtenu à partir du modèle. (SCETAUROUTE, EOSYS)

La progression des reconnaissances par sondages carottés ou destructifs, ainsi que les nombreux forages d'injection effectués à partir du tube Est au début de l'année 1995, ayant confirmé la complexité de la géométrie du sillon, avec localement la présence de parois en surplomb, il a été nécessaire de recourir à un algorithme de modelage de surface permettant la prise en compte de surplombs pour obtenir une image plus ajustée de la réalité *(figure 6)*.

Les surfaces obtenues par le calcul ne peuvent évidemment pas passer rigoureusement par tous les points introduits en données: l'imprécision dépend du pas de discrétisation plus ou moins grand qui est choisi en compatibilité avec la précision recherchée et de la «rugosité» réelle de la surface que l'on cherche à modéliser.
Au total, ce sont les données de 63 sondages et 104 forages d'injection qui ont été utilisés pour la modélisation géométrique du sillon.

5 - CONCLUSIONS

Les possibilités actuelles offertes par les moyens de modélisation géologique tridimensionnelle et les quelques applications fructueuses qui ont pu être faites dans le courant des dernières années sur des projets ou chantiers de tunnels montrent clairement que l'utilisation de ces outils devrait se généraliser dans les études à venir.

Comme pour de nombreux autres domaines de l'informatique, les coûts d'utilisation demeurent marginaux vis à vis des travaux de reconnaissance sur le terrain et sans aucune mesure avec les coûts de construction des ouvrages souterrains pourtant très fortement dépendants de la géologie.

Les auteurs sont néanmoins très conscients que ces outils, aussi perfectionnés soient-ils, ne sont là que pour aider le géologue et l'ingénieur d'infrastructure. Ils ne sauraient en aucun cas les affranchir du travail de terrain et de recueil de données, souvent ingrat et fastidieux, mais sans lequel aucun modèle géologique fiable ne peut être bâti.