

La maîtrise des risques : une approche indispensable dans le développement des études de tunnels en terrains difficiles⁽¹⁾

P. GRASSO
E. CHIRIOTTI
S. XU

Geodata Spa Corso Duca
degh Abruzzi, 48/E 10129
Turin, Italie

Résumé

L'étude et la construction de tunnels longs et profonds et de tunnels en milieu urbain sont souvent associées au risque dérivant de la non conformité des informations géotechniques, d'un choix non adéquat de la méthodologie de construction et des incidents potentiels pendant la construction. La gestion de la plupart des risques peut avoir lieu à travers l'utilisation d'un Plan de gestion du risque (*Risk Management Plan*, RMP). Le RMP identifie et quantifie les risques et les problèmes, en sélectionnant et mettant en action les mesures pour mitiger et contrôler les risques et indique s'il existe un risque résiduel qui devra être partagé entre les sujets impliqués dans le projet. Le système d'aide à la décision pour les tunnels DAT (*Decision Aids for Tunnelling*), logiciel de support au processus de décision dans l'étude des tunnels et partie intégrante de l'analyse des risques, est utilisé pour simuler, de façon probabiliste, le processus de la construction en souterrain. Les résultats du DAT illustrent les effets des incertitudes liées à la géologie, à la méthode de construction, etc., en termes de temps et coûts pour les différentes solutions alternatives. La discussion du processus de développement d'un RMP est suivie par l'application des concepts de RMP à deux projets pris comme exemple : 1) le tunnel de base Maurienne-Ambin faisant partie de la liaison ferroviaire Lyon-Turin et 2) les tunnels des lignes C et S du métro de Porto au Portugal. Les résultats démontrent que le processus de gestion du risque est un instrument d'ingénierie pratique qui peut être appliqué aux études de tunnels garantissant des résultats satisfaisants et des bénéfices en ce qui concerne temps, coûts et sécurité.

Risk management plan : a must-adopt approach for tunnelling in difficult ground conditions

Abstract

The design and construction of both long and deep tunnels and urban tunnels are frequently associated with many risks due to poor geological information, inappropriate selection of the construction methods and potential accidents during construction. The implementation of a Risk Management Plan, RMP, can be very effective to manage such risks. The aim of a RMP is to identify the potential hazards, quantify the relative risks, and implement systematically adequate preventive measures to mitigate and/or control the identified risks, indicating if any residual risk could be shared among the stakeholders of the Project. The DAT (*Decision Aids in Tunnelling*) system is a computer-simulation program developed to support the decision-making process for tunnelling projects and can be used as part of the risk analysis process. DAT simulates, in a probabilistic way, the process of underground constructions. The results of DAT simulations can show the effects of uncertainties due to geology, construction method, etc., in terms of the overall construction time and costs for different design-and-construction options considered for a given project. Following a general discussion on the process of developing a RMP, two case-histories are presented to illustrate the application of the concepts of the RMP: 1) the base tunnel Maurienne-Ambin that is part of the new railway Lyon-Turin link and 2) the tunnels of the Lines C and S of the Porto Light Metro in Portugal. The results have shown that the process of risk management is an effective engineering tool that can be applied for developing large underground infrastructure projects, increasing greatly the possibility of achieving the project goals especially with regards to time, costs and safety.

⁽¹⁾ Conférence invitée, prononcée lors de la séance spéciale du Comité français de mécanique des sols du 18 juin 2003.

Introduction

Les études des ouvrages en souterrain ont suivi, traditionnellement, une approche déterministe, basée sur la gestion indirecte des risques potentiels à travers une série de décisions prédéterminées lors de l'étude. En fait, la phase d'étude ainsi que la phase de construction sont toujours caractérisées par un certain niveau d'incertitude, lié spécialement aux caractéristiques, à la variabilité dans l'espace, au comportement du massif rocheux et au degré de connaissance de tels facteurs.

Malgré l'expérience, une certaine marge d'incertitude, et par conséquent le niveau de risque qui en dérive, ne pourra jamais être complètement évitée. De plus, les conditions de connaissance de la partie géologique, source principale de risque du projet, ne sont pas souvent les meilleures et la caractérisation du sol est insuffisante pour de nombreux facteurs : difficulté et complexité géologique, profondeur du tunnel, limitations imposées aux fonds destinés aux auscultations, plan d'auscultation défini *a priori* par rapport à la méthode d'excavation, auscultations réalisées en une seule phase plutôt qu'en tranches de façon à concentrer les auscultations dans les zones critiques, auscultations très limitées lors de la construction spécialement quand elles impliquent une interruption de l'avancement, sous-estimation des risques à la faveur d'une production élevée (Pelizza et Grasso, 1998). Pour toutes ces raisons, la réalisation d'un projet ne pourra jamais être considérée comme un événement prédéterminé.

En considération de ces préambules, la direction à suivre est l'activation d'une gestion efficace du risque, accompagnée par une approche flexible dans les phases d'étude et de construction. Cette direction s'est dessinée progressivement au cours des dernières décennies :

- les années quatre-vingt sont encore caractérisées par l'absence d'une approche attachée à la reconnaissance et à la gestion du risque, surtout dans la phase de préconstruction. La gestion de l'incertitude, surtout celle de nature géologique, est réalisée à travers l'utilisation déterministe des classifications et les profils géologiques sont mis à jour, lors de la construction. Souvent les différences entre les conditions prévues et celles rencontrées ne sont pas suffisamment gérées et les différences sont exacerbées par l'insuffisance du confinement ou des techniques de construction. Cet ensemble de circonstances crée un milieu idéal pour l'amplification de réclamations ;
- dans les années quatre-vingt-dix, les concepts d'incertitude, de probabilité et d'évaluation du risque furent introduits. La méthode observationnelle, proposée par Peck dès 1960, devient un procédé alternatif d'étude, basé sur le pilotage de la construction à travers une auscultation attentive de paramètres clés, améliorée par l'activation de contre-mesures prédéfinies et l'éventuelle révision de l'étude ;
- dans le nouveau millénaire, le projet flexible et la maîtrise des risques sont deux aspects qui s'intègrent dans le processus de développement du projet. La tolérance du risque du maître d'ouvrage est définie ; la vulnérabilité du projet est évaluée en relation avec les risques rencontrés et un schéma de gestion du risque est développé parallèlement aux responsabilités pour la gestion et la réduction des risques résiduels. Non seulement maître d'ouvrage et constructeur, mais également bureau

d'études et maître d'œuvre participent aux risques, surtout en ce qui concerne les contrats « clef en main ».

L'évolution décrite ci-dessus montre la prise de conscience croissante qu'un projet en souterrain ne peut être réalisé sans risques : les risques peuvent être gérés, minimisés, partagés, transférés ou simplement acceptés mais ils ne peuvent être ignorés.

Approches pour la gestion du risque

Définition

Il existe des événements qui peuvent être l'origine des éléments d'incertitude d'un projet. Ils sont associés à une probabilité (P) de se vérifier et à un impact (I), en termes de sécurité, temps et coûts. Le risque associé est généralement défini en littérature comme le produit entre la probabilité et l'impact : $R = P \times I$.

Il faut déterminer, pour chaque risque, le niveau d'acceptation qui permet de définir si le risque peut être assumé ou doit être diminué, à travers l'utilisation de mesures aptes à réduire la probabilité, l'impact ou les deux facteurs négatifs en même temps.

Le risque résiduel est défini comme le risque qui reste après la mise en œuvre des actions de réduction. Ce risque doit être lui aussi évalué pour son acceptabilité et contrôlé au moyen de contre mesures définies à l'avance.

Les origines du risque

Les risques principaux qui peuvent être rencontrés dans les ouvrages souterrains sont les suivants :

- risque géologique, lié à l'insuffisance des informations obtenues à travers la campagne de reconnaissances, à la capacité de reconnaître le comportement du sol et d'en prévoir ses singularités (les tunnels longs et profonds et les barrages sont particulièrement vulnérables) ;
- risque d'étude, lié surtout à la difficulté du projet à s'adapter aux conditions géomécaniques rencontrées réellement, aux défauts de construction, à l'expérience du bureau d'études ainsi qu'aux contraintes contractuelles ;
- risque de construction, lié au choix de techniques de construction non appropriées ou mal maîtrisées, aux phénomènes d'instabilité, à l'expérience du constructeur et aux contraintes contractuelles ;
- risques opérationnels liés aux défauts de fonctionnement et aux accidents ;
- risque financier, lié aux contraintes sociales et politiques, à la non-acceptation des responsabilités, aux contentieux, à la sécurité.

Le plan de gestion du risque (Risk Management Plan-RMP)

De nombreux et récents cas dans le monde ont démontré que la gestion du risque peut être améliorée

énormément par l'utilisation systématique et préalable des techniques de *risk management* pendant l'étude ; plus son utilisation est mise en œuvre rapidement dès le début de l'étude, plus les résultats sont appréciables. L'activation du système de gestion du risque assure une identification rapide des problèmes potentiels, la mise en œuvre de mesures appropriées de réduction du risque et le contrôle et la répartition des risques résiduels entre les différentes parties qui prennent part au projet.

L'objectif est donc de minimiser le plus possible tous les risques identifiés à chaque phase de l'étude et de la construction, selon les informations disponibles et les décisions qui doivent être prises et de mettre en œuvre, pendant la réalisation, les mesures de réduction du risque déterminées préventivement.

Le RMP doit être intégré dans chaque phase du projet (étude, appel d'offres, contrat, construction, exploitation) et doit impliquer dans le processus toutes les parties appelées en cause, pour éviter ou réduire les risques et répartir les responsabilités. Dans ce sens, l'approche d'un groupe qui incorpore différentes disciplines et prospectives est fondamentale. De plus, il est essentiel que tous les « acteurs » soient représentés : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, bureau d'études, entreprise de construction.

Le processus consiste en les phases suivantes (Chirotti, Grasso, 2002) :

- identification du risque, c'est-à-dire rédaction d'une liste la plus exhaustive possible des risques potentiels ;
- quantification du risque, à travers l'évaluation de la possibilité qu'il se manifeste et l'impact sur le projet ;

- assignation d'un ordre de priorité aux risques identifiés et sélection des risques qui devront être repris en considération ultérieurement parce qu'inacceptables ;
- réduction du risque, si on ne peut l'éviter, en modifiant l'approche et la méthode de construction ;
- réévaluation du risque selon la mise en œuvre des mesures de réduction ;
- identification du risque résiduel en tenant compte du fait que, suite à l'introduction des mesures de réduction, la responsabilité de la gestion du risque résiduel peut être attribuée à d'autres ;
- définition des actions successives (contre mesures) nécessaires pour réduire ultérieurement le risque résiduel si non acceptable ou pour en effectuer la gestion et le contrôle. Les risques qui ne pourront être atténués devront être également acceptés et gérés.

Le tableau I présente les composants d'un RMP à partir des différents points de vue des participants. Le reste de l'article prend surtout en considération la perspective du bureau d'études.

2.4

L'identification du risque

Dans la réalisation de grands ouvrages en souterrain, la continuelle variabilité spatiale en termes de structures, de caractéristiques et de comportement géotechnique et le niveau limité et ponctuel de connaissances déterminent le niveau d'incertitudes le plus élevé qui caractérise le projet.

TABLEAU I Schéma des points importants de la gestion du risque, en fonction des différents points de vue (modifié par Clayton, 2001).
Scheme of the relevant aspects for the risk management process, according to the different points of view (modified by Clayton, 2001).

Maître d'ouvrage	Bureau d'études	Entreprise de construction
Définir les objectifs du projet et les exigences.	Identifier les exigences de base du maître d'ouvrage et la tolérance aux risques.	Activer les procédures de gestion du risque le plus tôt possible, déjà au stade de l'appel d'offres et de la négociation du contrat.
Établir la tolérance du maître d'ouvrage au risque, aussi bien pour le degré d'incertitude que pour le niveau de risque à prendre.	Identifier les risques au stade des études préalables (établir une liste). Utiliser les techniques d'analyse des risques pour identifier, quantifier les risques et les placer en ordre de priorité.	Créer une liste des risques non encore identifiés/indiqués par le maître d'ouvrage ou le bureau d'études.
Activer la procédure de gestion du risque en phase d'étude.	Définir une campagne d'auscultations adéquate au niveau des risques géotechniques du projet.	Si le contrat est du type <i>étude et construction</i> , revoir les risques géologiques et soigner la récolte de données in situ.
Estimer la vulnérabilité du projet au risque : géotechnique, financier, de l'environnement, de la santé, et de la sécurité (recours à des experts).	Adopter une stratégie pour l'étude et une méthodologie de construction aptes à gérer les incertitudes en atténuant les risques non acceptables, selon les critères de : réduction de l'incertitude, simplicité et fiabilité de la solution de construction, et conformité à l'état de l'art.	Observer, contrôler, enregistrer le comportement de la structure lors de la construction.
Identifier comment, quand, et par qui les risques seront gérés.	Reconnaître que l'approche déterministe peut être souvent peu précise.	Fournir les données au bureau d'études et interagir pour identifier les points critiques et, si nécessaire, modifier les méthodologies de construction et l'étude elle-même.
Définir les contrats en fonction de la distribution des risques acceptables et de façon à garantir le meilleur résultat économique.	Préférer une analyse de sensibilité et une analyse probabiliste. Pour chaque mécanisme critique clef, définir plus d'une stratégie de défense (contre mesures).	
Assurer, avant le début des travaux, la mise en place de procédures efficaces de solution de contentieux.	Anticiper les contrôles et les auscultations lors de la construction. Quand c'est possible, avoir recours à l'étude flexible, transformer les auscultations des paramètres et les événements clés en pivot de la méthode observationnelle.	
S'assurer qu'un RMP est adopté par le bureau d'études et l'entreprise.	Compléter la liste des risques (y compris les risques résiduels) et communiquer cette liste au maître d'ouvrage et à l'entreprise.	

Le processus d'identification du risque, surtout géologique-géotechnique, doit passer à travers un parcours structuré et systématique (Chiriotti, Grasso, 2002) composé de :

- la création d'un groupe de spécialistes proportionné aux dimensions et à la complexité du projet ;
- la récolte de données publiées ou non sur les conditions géologiques régionales et locales, y compris photos de satellite et photos aériennes. Ces données fournissent des informations importantes sur les structures et les contacts principaux qui devront, même en phase initiale, être localement vérifiés et détaillés à travers le travail sur place et successivement supportés par une campagne de reconnaissance adéquate ;
- la production d'un modèle géologique et estimation des conditions de terrain les plus probables et de leur variabilité relative ;
- l'identification des techniques possibles de construction ;
- l'utilisation du travail de groupe entre experts et mise en valeur d'expériences précédentes pour l'identification des risques, au moyen de listes de contrôle, heuristique, software de risques, *rock engineering system* de Hudson, etc. ;
- la préparation d'un registre formel des risques qui doit être utilisé comme base de données pour la définition de la solution alternative optimale.

2.5

Quantification du risque

Quantifier un risque signifie en évaluer les composants, c'est-à-dire la probabilité et l'impact en termes de sécurité, temps et coûts. Dans le domaine des ouvrages en souterrain, la quantification du risque se base sur un ensemble d'approches analytiques (statistique) et d'opinions d'experts.

2.5.1

Exemples de quantification du risque selon les opinions d'experts

La quantification à travers les opinions d'experts devient nécessaire quand la nature et le nombre de données ne sont pas propices à des élaborations statistiques ou quand l'analyse statistique des données ne peut identifier des problèmes spécifiques (ex. localisation de failles ou d'incidents géologiques). Dans ce cas, l'expérience permet de quantifier, même de façon simplifiée, les composants de probabilité (P) et d'impact (I) selon une échelle de valeur comme celle reportée dans le tableau II.

TABLEAU II Exemple de valeur de la probabilité d'un événement (a) et de l'impact d'un événement (b).
Example of probability (a) and impact (b) ratings of hazards.

(a)		(b)	
Échelle de valeur	Probabilité	Échelle de valeur	Impact
5	Très probable	5	Très élevé
4	Probable	4	Élevé
3	Peu probable	3	Moyen
2	Improbable	2	Bas
1	Négligeable	1	Très bas

Il est évident que les échelles de valeur sont typiques du projet, car elles en respectent les obligations et les limites.

Le risque R est défini comme le produit de P et I et les résultats sont présentés dans la colonne 1 du tableau III. Pour définir le degré de valeur de ce même tableau, il est important d'y intéresser aussi le maître d'ouvrage (ou l'entreprise/opérateur, en cas de contrat clef en main) afin de refléter directement la tolérance du risque.

Associer un niveau de risque à chacun des risques identifiés permet d'obtenir une classification et de discerner les risques qui doivent être minimisés des risques qui doivent être acceptés.

TABLEAU III Exemple d'échelle de valeur du risque associé à un événement.
Example of risk rating associated to hazards.

Échelle	Niveau de risque	Actions requises
17-25	Intolérable	Les travaux ne peuvent commencer avant que le risque n'ait été réduit. Si le risque ne peut être réduit, on pourrait devoir arrêter le projet.
13-16	Substantiel	La construction ne peut commencer avant que le risque ne soit réduit. Les solutions pour les risques existent mais nécessitent d'autres ressources.
9-12	Significatif	Les travaux peuvent commencer et progresser jusqu'au moment où les contre mesures devront être prises.
5-8	Mineur	Les travaux ne subissent pas de retard appréciable. Considérer des solutions avec coûts optimisés.
1-4	Insignifiant	Aucune

2.5.2

Exemples de quantification probabiliste du risque

La quantification à travers des approches analytiques, comme l'approche statistique, permet une évaluation moins qualitative aussi bien de la probabilité que de l'impact.

Les lois statistiques permettent d'associer à différents éléments, discrets et continus, une distribution probabiliste. On peut prendre l'exemple des paramètres de classification et de géomécanique des massifs rocheux (Kalamaras, 1996) définis à travers une distribution gaussienne pour la résistance à la compression mono-axiale, GSI, les modules de déformation, et une distribution exponentielle négative pour l'espacement des discontinuités, etc. En outre, la distribution de Poisson peut être utilisée pour définir la distribution statistique d'événements discrets tels que : rencontrer une faille non prévue le long du tracé, un karst, un éboulement en surface ou l'instabilité du front. L'exemple reporté dans la figure 1 montre le cas d'un tunnel alpin de 20 km et l'étude de probabilité de rencontrer des nappes qui amènent de l'eau dans le tunnel.

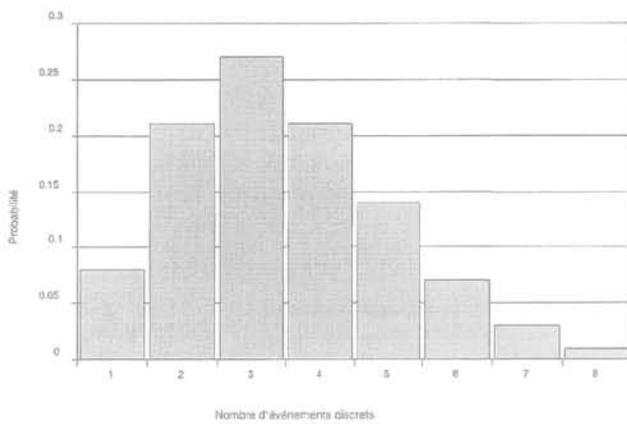


FIG. 1 Représentation statistique de la probabilité que se produise un événement : distribution du nombre d'accidents géologiques d'un segment en tunnel de 20 km de long définie selon le modèle de Poisson (Grasso *et al.*, 2001).

Statistical representation of the probability of an event: Poisson distribution of the number of geological accidents along a 20 km-long tunnel.

Les incertitudes géologiques qui caractérisent un projet, mais également la vitesse d'avancement variable en fonction des différents facteurs humains et logistiques qui influencent typiquement le processus de construction, rendent impossible une prévision précise des temps et des coûts. Ceux-ci varient toujours dans un certain intervalle. Par conséquent, l'impact d'un risque en terme de durée et de coût est représentable par une loi statistique (Figs. 2A et 2B). De plus, puisque chaque coût total est associé à une durée, on peut représenter les informations contenues dans les figures 2A et 2b sous la forme d'un nuage de points (Fig. 2C).

Pour évaluer les conséquences économiques (impact) d'un événement discret périodique, on peut utiliser une fonction exponentielle, au lieu d'une fonction linéaire, pour exprimer les influences liées aux problèmes logistiques, au potentiel élevé de contentieux, à l'augmentation de l'impact politique et social en relation avec la répétition de l'événement négatif dans le domaine du projet.

L'utilisation de l'approche probabiliste en phase d'étude permet, par exemple, d'évaluer si le système de confinement choisi est fiable ou, mieux encore, de quantifier la probabilité d'instabilité et de vérifier si telle probabilité est acceptable. L'évaluation du support se base sur une évaluation de la distribution statistique de la marge de sécurité (S), définie comme la différence entre la capacité (C) de confinement et la demande (D) et utilise, par exemple, la méthode bien connue de convergence-confinement. Elle se déroule de cette façon :

- définition du genre de données variables, aussi bien déterministes que probabilistes ;
- évaluation de la variabilité des paramètres géomécaniques (par exemple : résistance de la roche intacte GSI) et de construction (exemple : épaisseur du béton fibré projeté, espace entre les boulons) et définition de leur loi de distribution la plus appropriée ;
- détermination de la matrice de corrélation entre les paramètres, en utilisant les corrélations connues entre les paramètres géomécaniques et en définissant les

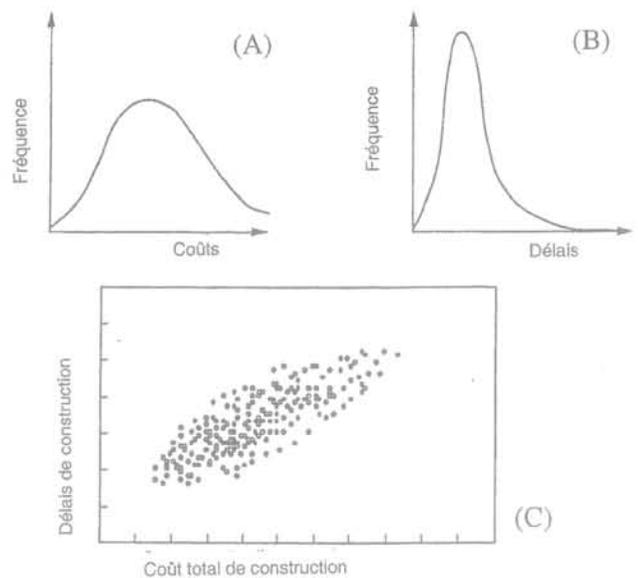


FIG. 2 Représentation statistique d'impact en termes de temps et coûts (Einstein *et al.*, 1992).

Statistical representation of the impact in terms of time and costs (Eistein *et al.*, 1992).

corrélations appropriées entre paramètres géomécaniques et paramètres de construction, par exemple, pour prendre en considération que la densité du support est gouvernée par les conditions du massif rocheux au front ;

- incorporation des différentes sources d'incertitude dans la méthode d'analyse (dans ce cas, la méthode convergence/confinement) à travers la simulation Monte-Carlo ;

- chaque ensemble de valeurs déterminé de cette façon est introduit dans les fonctions pour déterminer la capacité de soutènement et la courbe de réaction du terrain et est évalué au point d'intersection entre les deux fonctions ; ce point représente la condition d'équilibre, c'est-à-dire la demande D du système en termes de pression interne ;

- la marge de sécurité (S) est évaluée comme la différence entre les capacités (C) du support (calculée avec les équations proposées par Hoek (1980) en considérant le poids gravitationnel de la zone plastique) et la demande D déterminée auparavant ;

- la simulation est répétée un nombre significatif de fois de façon à obtenir une distribution de la fonction (S) avec une précision acceptable ;

Hypothèses :

- probabilité d'occurrence d'un événement particulier = 0,1 % (défini dans la phase d'identification du risque) ;
- segment en tunnel de 20 km de long ;
- extension de l'événement : 10 m.

Une telle méthode a été appliquée, entre autres, au cas d'un tunnel ferroviaire en Amérique du Sud, ayant une section de 100 m², une longueur de 7 km, une couverture entre 150 et 200 m (classes III-IV de RMR très variables). Le but était d'optimiser le système de soutènement, construit à l'origine avec béton fibré projeté et boulons et d'augmenter sa fiabilité en termes de sécurité, de contrôle du temps et des coûts (Russo *et al.*, 1999).

Le schéma des analyses réalisées est reporté en figure 3a. La solution proposée comme alternative consiste en cintres d'acier et béton fibré projeté. La figure 3b montre les résultats en termes de distribution cumulative de la marge de sécurité pour les deux solutions de soutènement (originale et alternative). Il est à noter que le facteur de sécurité (CFS) pour la solution originale est 1,2 comparé à 1,6 pour la solution alternative, mais la probabilité d'instabilité se réduit de 20 %.

Un autre exemple simple pour l'application de l'approche probabiliste est illustré en figure 4. L'analyse d'interaction convergence-confinement, combinée avec une simulation Monte-Carlo, est utilisée pour analyser et comparer différents scénarios de crise : instabilité totale avec le support de boulons (alternative A),

fissures dans le soutènement de cintres et de béton projeté (alternative B) pour définir les mesures d'étude opportunes, en tant que variation de la capacité de soutien, pour faire face aux petites variations géologiques (Grasso *et al.*, 2001).

La variabilité des conditions géologiques est représentée par la relation entre la résistance du massif rocheux et la contrainte initiale. Pour chaque couple résistance-contrainte, l'analyse fournit la valeur de la pression nécessaire pour l'équilibre et le nuage de points de la figure 4 (a) en représente la distribution. A l'intérieur du champ d'application de chaque section type, la simulation permet de discriminer des petites variations relatives aux conditions géologiques qui demandent une adaptation relative de la section type

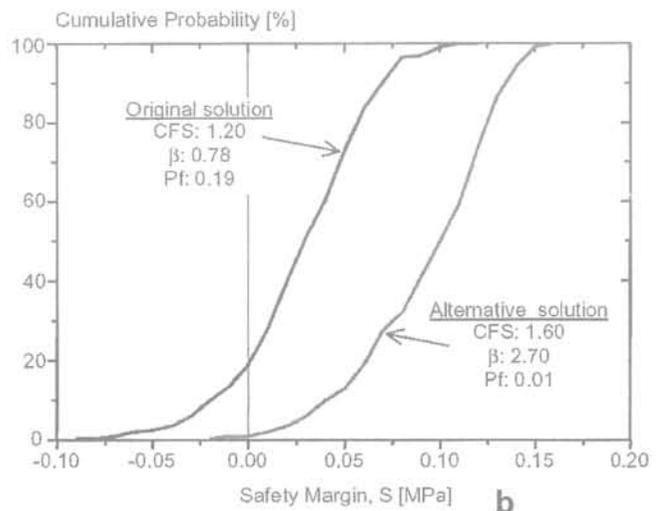
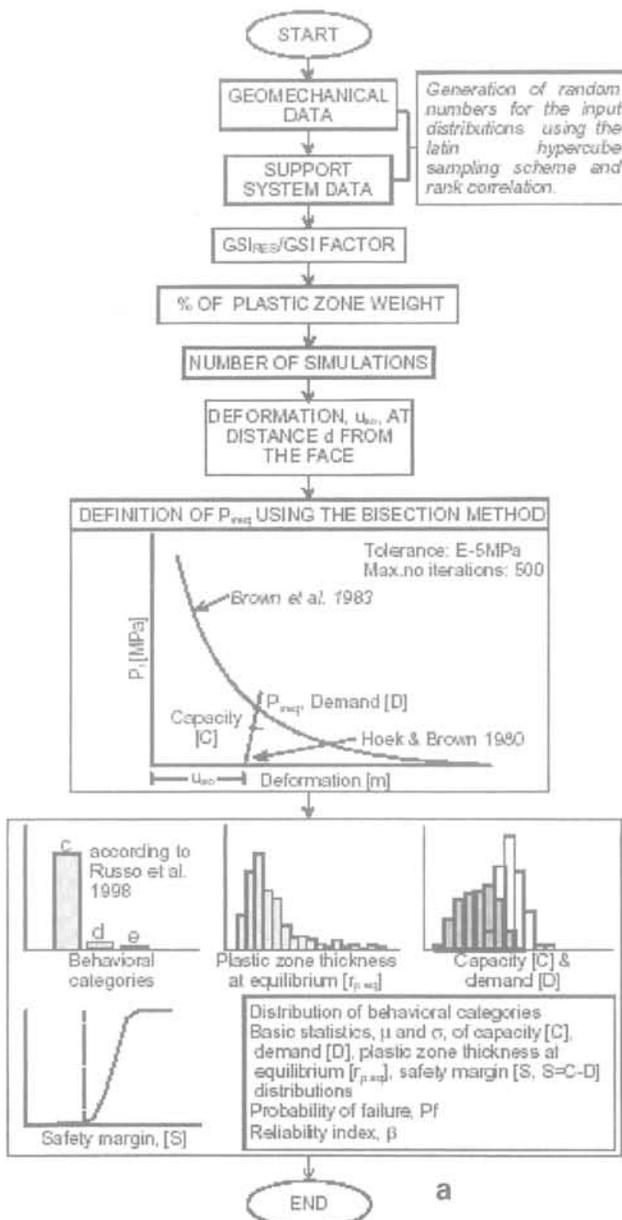


FIG. 3 Schéma des analyses (a) et distribution cumulative de la marge de sécurité (b) pour les solutions de soutènement de première phase originale (béton projeté et boulons) et alternative (béton projeté et cintres) pour un tunnel ferroviaire (Russo *et al.*, 1999).

Steps of the analysis (a) and cumulative distribution of the safety margin (b) related to the evaluation of potential failure of a railway tunnel considering both the original support system (bolts and shotcrete) and the alternative solution (ribs and shotcrete) (Russo *et al.*, 1999).

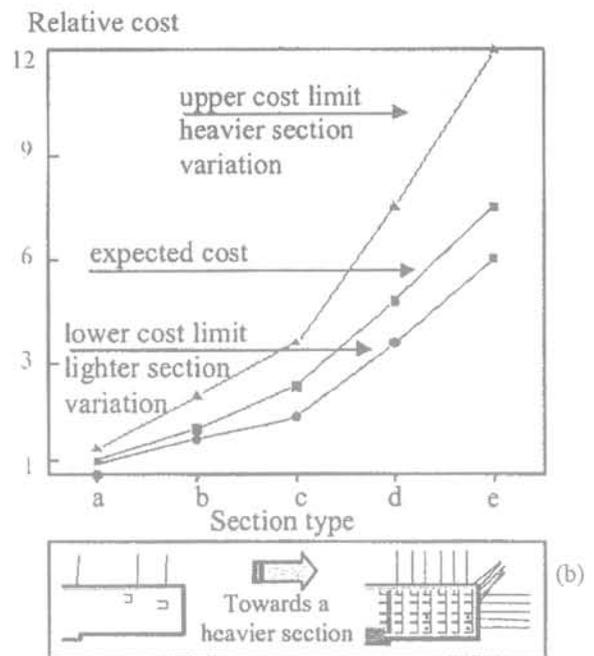
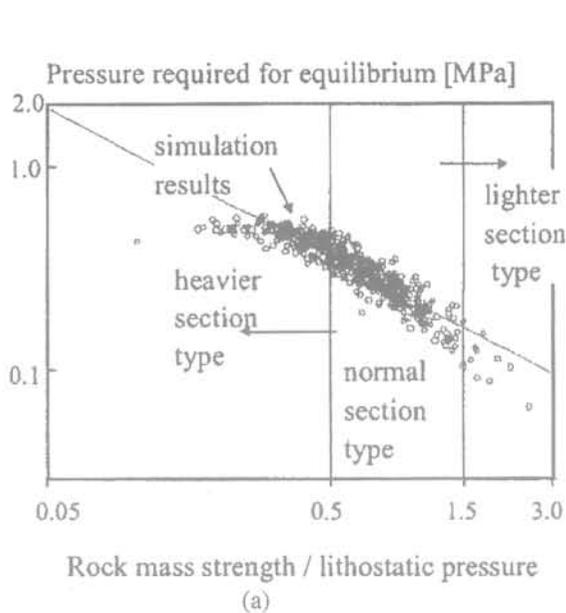


FIG. 4 Définition de la variation de la section type par rapport à une analyse probabiliste de l'interaction terrain-soutènement (a) et exemple de variation du coût pour différentes solutions (b) (Grasso *et al.*, 2001).
Variation of the section type as a function of the probabilistic analysis of the soil-support interaction (a) and cost variation for different alternatives (b) (Grasso *et al.*, 2001).

en terme d'allègement c'est-à-dire de renforcement relatif. Les résultats des analyses sont montrés dans la figure 4 (b) qui illustre la correspondance entre le type de la section du soutien (lourde, normale, légère) et son coût relatif.

3

Utilisation de systèmes intégratifs pour l'analyse du risque : le DAT

En 2001, le Département de génie civil et de l'environnement de l'université de Southampton, sponsorisée par l'*Institution of Civil Engineers in London*, a mené une enquête sur les techniques de gestion du risque dans la pratique (Clayton, 2001). Des questionnaires furent distribués à plus de 250 sociétés (bureaux d'études pour l'environnement et la géotechnique, entreprises générales, géotechniques et spécialisées en auscultations) ; seulement 28 % d'entre elles répondirent au questionnaire.

De l'analyse des questionnaires rendus, l'on observa que 90 % des sociétés pensent que les procédures de gestion du risque devraient faire partie du projet dès la phase préliminaire ; seulement 70 % suivent une procédure de gestion du risque, tandis que 30 % utilisent, dans ce but, un logiciel. Il apparaît de plus que, parmi les sociétés consultées, les bureaux d'études géotechniques sont ceux qui utilisent le moins les techniques d'analyse et de gestion du risque, tandis que les plus grands utilisateurs sont les grandes entreprises de construction.

Par conséquent, puisqu'il existe sur le marché un intérêt toujours plus marqué pour faire de l'analyse du

risque un composant habituel des différentes phases de projet, il est essentiel de promouvoir cette approche et de trouver les instruments capables de la supporter, surtout quand il s'agit de grands projets.

A notre avis, le logiciel le plus efficace pour l'analyse du risque est le système appelé *Decision Aids for Tunnelling (DAT)*, développé par le *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* et l'*École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)*. Le DAT a été utilisé par *Geo-data* dans de nombreux projets, ce qui a conduit à des développements ultérieurs du logiciel.

Le DAT permet de simuler le processus de construction en souterrain, de façon probabiliste. Les données d'entrée sont représentées par les conditions géologiques et les paramètres de construction le long du tracé, leur degré de variabilité et donc d'incertitude, y compris l'évaluation des incertitudes dans le processus décisionnel. Les résultats du DAT illustrent les effets de la géologie, de la construction, en fournissant une distribution des temps et des coûts lors de la phase de construction.

Le système DAT permet de gérer et d'analyser les différentes séquences de l'excavation, comme dans le cas de fronts multiples excavés en parallèle ou en séquence ; il permet de simuler la construction simultanée de plusieurs tunnels dans un même projet. Les éventuels retards et interruptions de travail peuvent être également représentés (Grasso *et al.*, 2002).

3.1

Principes de base du DAT

Le DAT est constitué par deux modules principaux : le module géologique et le module de construction (Einstein *et al.*, 1992 ; Grasso *et al.*, 2002c).

Le module de description de la géologie permet la production, de façon probabiliste, de profils géologiques et géotechniques sous la forme de classes géomécaniques le long du tracé de l'ouvrage. Le processus consiste en :

1) subdivision du tunnel en segments ou zones homogènes selon les conditions géologiques ou géomécaniques. Les différentes longueurs de ces segments peuvent être définies au moyen d'une distribution triangulaire ;

2) définition des paramètres géologiques et géotechniques qui contrôlent la méthode d'excavation et déterminent le système de support, pour chaque zone homogène, selon les différents paramètres possibles de variabilité et d'incertitude ;

3) fourniture d'une extension et d'une matrice de transition pour chaque paramètre ; de telles informations sont utilisées pour simuler un profil possible pour chacun d'eux (par exemple, le paramètre « granite » plutôt que « schiste ») en termes de probabilité en fonction de la distance ;

4) détermination, par la combinaison des différents états des paramètres, des profils des classes géomécaniques qui sont, à leur tour, utilisés dans la simulation de la construction.

Le module simulation dans la construction met en relation les simulations des profils de classes géomécaniques et les catégories de comportement de l'excavation avec les classes techniques directement associées aux différentes solutions de projet (section type, revêtement de première phase et définitifs, méthode d'excavation). Les paramètres relatifs à la construction peuvent être définis de manière probabiliste ou déterministe. Le niveau de détails des données en entrée et, par conséquent, la précision de la simulation dépendent des phases de développement du projet.

La simulation des opérations de réalisation se base sur la méthode Monte-Carlo et suit, pas à pas, le profil de classes géomécaniques déjà défini.

La procédure se répète pour chaque zone du profil ; on arrive ainsi à une évaluation finale des coûts et délais correspondant à ce profil. Le total des coûts et des temps pour chaque simulation constitue un point dans le diagramme « nuage » de la figure 2. La simulation est répétée pour chaque profil généré par le module géologique. Pour obtenir un résultat statistique satisfaisant, il faut généralement réaliser plus de 300 simulations.

Le schéma général du système DAT est reporté dans la figure 5.

3.2

Domaines d'application

Le DAT peut être appliqué à toutes les phases du projet, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à l'étude de définition particulière. C'est un instrument utile pour toutes les parties (Maître d'ouvrage, bureau d'études, entreprises).

Les domaines d'application du DAT embrassent l'analyse du risque géologique, de projet, de construction, avec d'importantes applications en ce qui concerne les décisions financières et de développement des contrats. Les principaux domaines sont donc :

1) la définition du degré de précision des campagnes d'auscultation requises pour respecter un certain niveau de tolérance (Fig. 6a) ;

2) le choix des alternatives de projet (Fig. 6b) ;

3) le choix des méthodes de construction plus appropriées pour réduire le risque et pour évaluer l'efficacité des contre-mesures différentes pour la gestion des risques résiduels ;

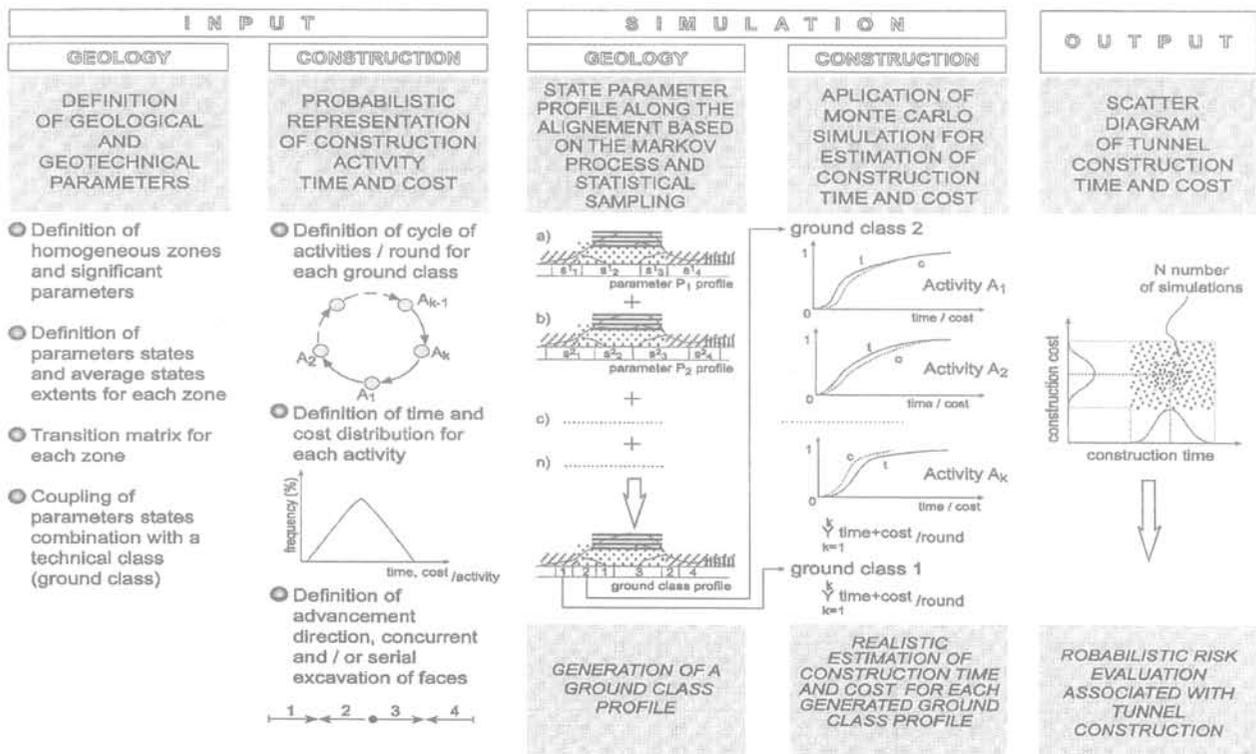


FIG. 5 Schéma général du système DAT (Russo et al., 1997).
General scheme of the DAT system (Russo et al., 1997).

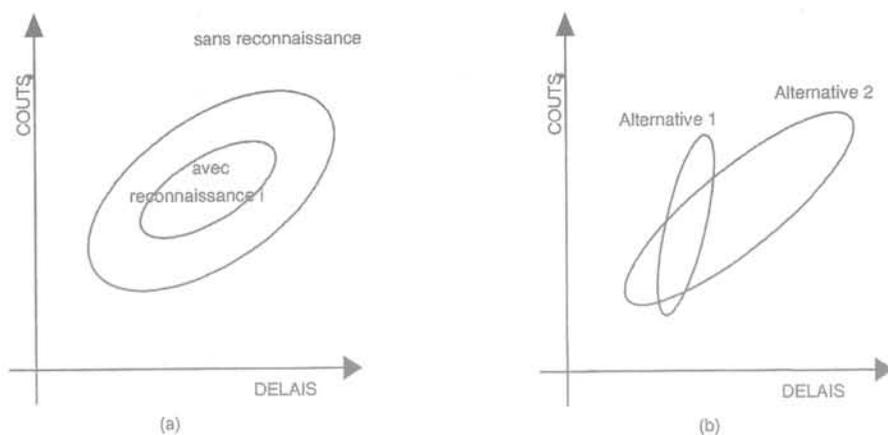


FIG. 6 Exemple de réduction de l'incertitude due à la phase des auscultations (a) et de comparaison entre solutions alternatives par rapport à la distribution (b) (Einstein *et al.*, 1992).
Qualitative example of reducing the effects of the geological uncertainties on time and cost with adequate investigations (a) and comparison between alternative solutions (b) (Einstein *et al.*, 1992).

4) l'évaluation de la durée totale d'un projet et des coûts relatifs ;

5) la simulation des scénarios de crise et d'impact sur temps et coûts ;

6) l'organisation financière d'un projet (division du projet en lots, choix du contrat approprié à chaque lot ; simulation du cash-flow lors de la réalisation) ;

7) l'organisation des travaux et la distribution des ressources.

En ce qui concerne le point 6, l'introduction des graphiques probabilistes distance-délais permet des considérations intéressantes (Grasso *et al.*, 2001). La figure 7 permet d'identifier les zones caractérisées par le degré d'incertitudes le plus élevé, pour lesquelles il faut prévoir une intégration d'auscultations et/ou le recours à des techniques d'excavation différentes afin de réduire le risque. Le même graphique, en termes financiers, fournit une base réaliste pour diviser l'œuvre en lots, chacun desquels étant confié à une entreprise avec contrat séparé qui tiendra compte du niveau des risques que chacun comporte.

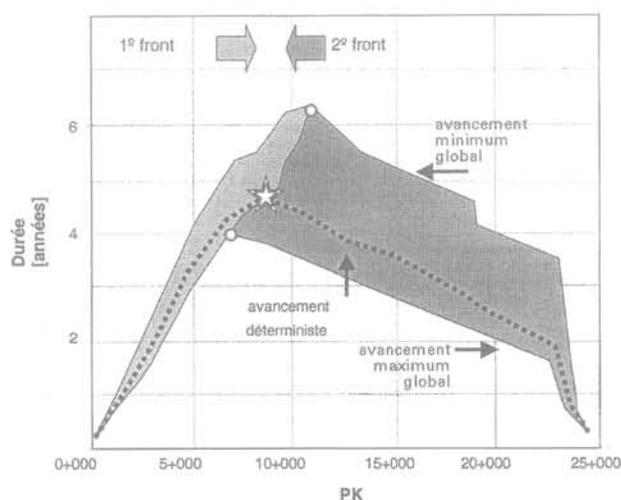


FIG. 7 Représentation sur le plan distance-temps de planning excavation et soutènement déterministes et probabilistes.
Probabilistic planning of excavation and support vs deterministic planning.

4

Exemple 1 : Tunnel de base Maurienne-Ambin

4.1

Caractéristiques générales du projet

Le tunnel de base Maurienne-Ambin, de 52,6 km de long et 2 500 m de couverture maximale, représente, au point de vue de la durée de la construction et des investissements, l'œuvre principale de la liaison ferroviaire à grande vitesse Lyon-Turin. Le tunnel traverse plusieurs formations rocheuses de sédimentaires (calcaires, arénaires) à métamorphiques (gneiss, schistes, quartzites). La campagne de reconnaissance du site réalisée en 1990 indiquait que le projet était réalisable. Cependant, les nombreuses lacunes en ce qui concerne les parties géomécanique et hydrogéologique représentaient une grande source d'incertitudes et de risques.

4.2

La nécessité de l'analyse du risque

L'étude, la construction et la mise en exercice d'un tunnel long et profond comme celui de Maurienne-Ambin peuvent être associées à des risques considérables dus au manque d'informations géotechniques, au choix erroné de techniques de construction et aux incidents potentiels lors de la construction du tunnel.

Ces risques ont été quantifiés, grâce au DAT, de la façon suivante :

- quantification de l'impact dû à l'effet combiné entre le risque géologique, géomécanique et hydrogéologique sur la durée et sur les coûts du projet ;

- identification le long du parcours des zones où les estimations construction-planning peuvent être dépassées de façon significative à cause de l'effet combiné des risques géologiques ;

- identification de la configuration du projet et des alternatives d'organisation associées au risque minimal ;

– définition des zones qui demandent de nouvelles reconnaissances pour réduire le risque de façon acceptable.

4.3

Caractéristiques de l'analyse du risque avec utilisation du DAT

Au moment de la réalisation de l'étude, le maître d'ouvrage avait identifié plusieurs scénarios de construction, caractérisés par les divers emplacements des galeries de service, les séquences de construction, la division du lot et les techniques d'excavation.

Le DAT a permis de mener une étude comparative probabiliste des alternatives disponibles, en simulant la variabilité et l'incertitude du modèle de référence. Principalement, l'analyse a permis :

- d'évaluer l'effet d'une galerie de service et de reconnaissance parallèle à l'axe du futur tunnel sur les coûts et la durée du projet ;
- d'évaluer l'effet des venues d'eau dans le tunnel et le coût relatif des pompages sur les coûts totaux et la durée du projet ;
- de considérer la fiabilité des prévisions géologiques et géomécaniques ;
- de développer le graphique probabiliste de dépenses lors de la réalisation des travaux de génie civil.

4.4

Données

Le niveau de détails des données a engendré une énorme quantité de données, la plus grande que le DAT avait gérée jusque-là (Bonnard et Gardel, Geodata, 2000). Par contre, la simulation s'est avérée très réaliste (Grasso *et al.*, 2002).

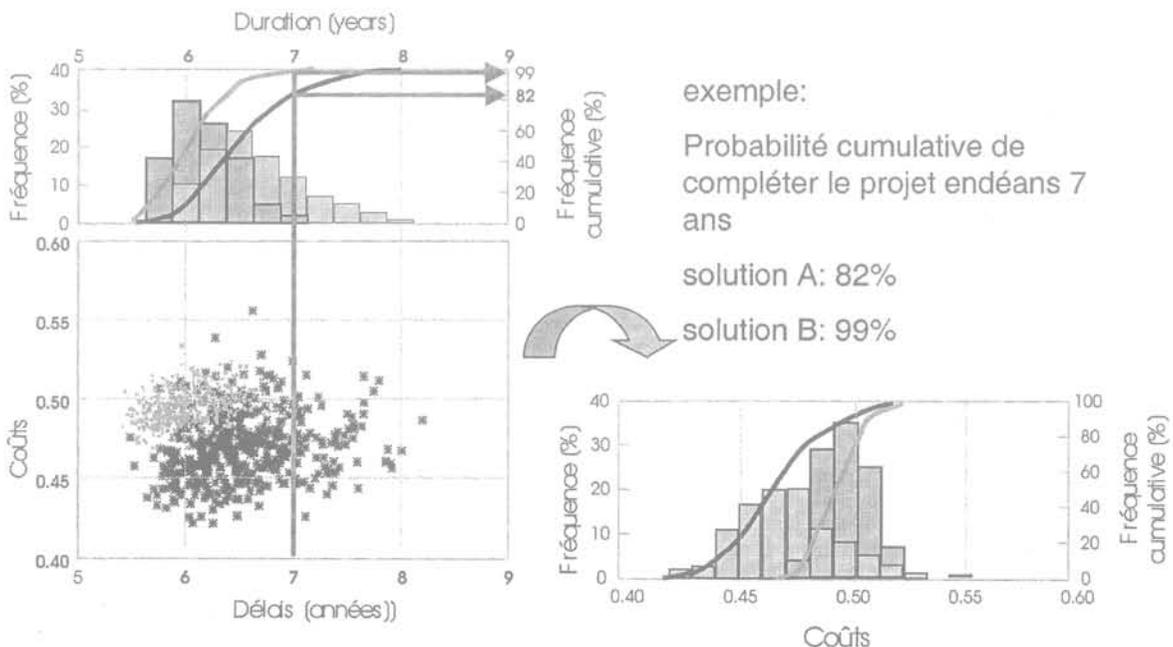


FIG. 8 Exemple de résultat fourni par le DAT : comparaison entre des alternatives caractérisées par différents niveaux d'auscultations in situ (complet, cas A, et partiel, cas B).
Example of DAT results: comparison between alternatives characterized by different numbers of site investigations (complete investigation, Case A, and partial investigation, Case B).

Le profil longitudinal a été divisé en 44 zones homogènes et l'on a introduit 17 zones connues *a priori* comme problématiques au point de vue des caractéristiques géomécaniques, géologiques, hydrogéologiques (comportement du sol, instabilité locale dérivant des charges anisotropes, zones de nappe avec possibilité de très grande perméabilité, venues d'eau...).

Les paramètres de construction comprennent : les vitesses d'avancement et les coûts unitaires associés à la méthode de construction et à la section type de la zone du tunnel ; l'organisation générale des travaux y compris les retards accumulés entre les différentes phases ; les coûts fixes associés aux méthodes de construction ; le nombre de jours de travail par semaine ; l'influence pénalisante sur les temps et les coûts des conditions imprévues dans les zones problématiques.

Des séries répétées d'accidents géologiques à impact minime ont été prises en considération, puisque, sur la base de l'expérience, ces accidents semblent être assez fréquents dans les tunnels longs et profonds. Leur impact se réduit considérablement en cas de réalisation d'une galerie de reconnaissance parallèle, grâce au drainage préventif que celle-ci exerce, à l'acquisition anticipée de données sur les conditions géologiques que le tunnel rencontrera et à la possibilité de réaliser des traitements locaux du massif rocheux avant l'excavation.

4.5

Principaux résultats obtenus

Au total, 11 projets alternatifs ont été sélectionnés sur la base du schéma d'étude, de la séquence et de la méthode de construction, de l'approfondissement des auscultations de base. Pour chaque alternative considérée, 500 simulations ont été réalisées.

Les analyses du risque, réalisées avec le DAT, montrent que les différentes alternatives sont influencées

exemple:

Probabilité cumulative de compléter le projet endéans 7 ans

solution A: 82%

solution B: 99%

de façons très différentes par les conditions géologiques, géomécaniques, hydrogéologiques, en ce qui concerne les temps et le coût global du projet. L'extension de la campagne de reconnaissance et le niveau des informations récoltées, agissant sur le degré d'incertitude qui caractérise le problème, influencent la garantie de pouvoir déterminer raisonnablement la date de fin des travaux (Fig. 8).

Après évaluation du risque restant, les résultats obtenus avec ce genre de simulation déterminent de combien les auscultations doivent être augmentées pour rendre le risque acceptable. Les analyses conduites ont mis en évidence trois zones critiques, deux sur le versant français et une sur le versant italien, qui requièrent la réalisation du même nombre de galeries de reconnaissance.

La figure 9 montre l'impact relatif d'un accident imprévu en terme de temps et de coûts additionnels, de venues anormales et non contrôlées d'eau dans l'excavation (I : pas de galerie de reconnaissance ; II : galerie de reconnaissance et tunnel ferroviaire construits en même temps ; III : galerie de reconnaissance construite avant le tunnel ferroviaire). Ce graphique est également très important pour sélectionner les alternatives et quantifier le risque résiduel associé.

La figure 10 illustre, pour un des lots, l'analyse comparative de deux solutions sur le programme d'excavation et la mise en œuvre des soutènements de première phase. La première utilise complètement un tunnelier, la seconde la méthode traditionnelle. Ce type d'analyse a permis de mettre en évidence la localisation des zones critiques à l'intérieur d'un même lot (proportionnelles à la largeur de la bande de prévision) et de confronter le niveau de criticité des différents lots.

L'analyse du risque conduite pour le tunnel de base Lyon-Turin constitue dans son genre un cas unique en terme de détails des données des analyses et de l'approche utilisée pour la modélisation. Ces deux aspects ont permis la simulation réaliste du processus de construction, ainsi que la possibilité d'évaluer l'impact d'aspects tels que les venues d'eau et les imprévus géologiques. De plus, les résultats ont permis de définir la division optimum des lots à construire et des zones requérant des auscultations supplémentaires.

5

Exemple 2 : le métro de Porto

5.1

Caractéristiques générales du projet

Le métro de Porto (Portugal) est un système de métro léger qui se développe sur une longueur de 70 km, à travers 7 municipalités. De ces 70 km, 20 sont en construction. La partie en souterrain est située dans la ville de Porto. Les tunnels pris en considération sont le tunnel d'environ 8 m de diamètre interne des lignes C et S, pour une longueur totale de 7 km, réalisés avec deux tunneliers EPB-TBM Herrenknecht. Sur le tracé se trouvent 10 stations souterraines. Pour les travaux de génie civil, le projet a été confié, par contrat *Design Build Operate Transfer*, au consortium d'entreprises internationales Normetro, formé des sociétés Soares da Costa, Somague et Impregilo. La construction commencée en 1998 devrait se terminer en 2004.

Un système de soutènement unique a été utilisé sur une longueur de 1 400 m ; il a une épaisseur de 300 mm

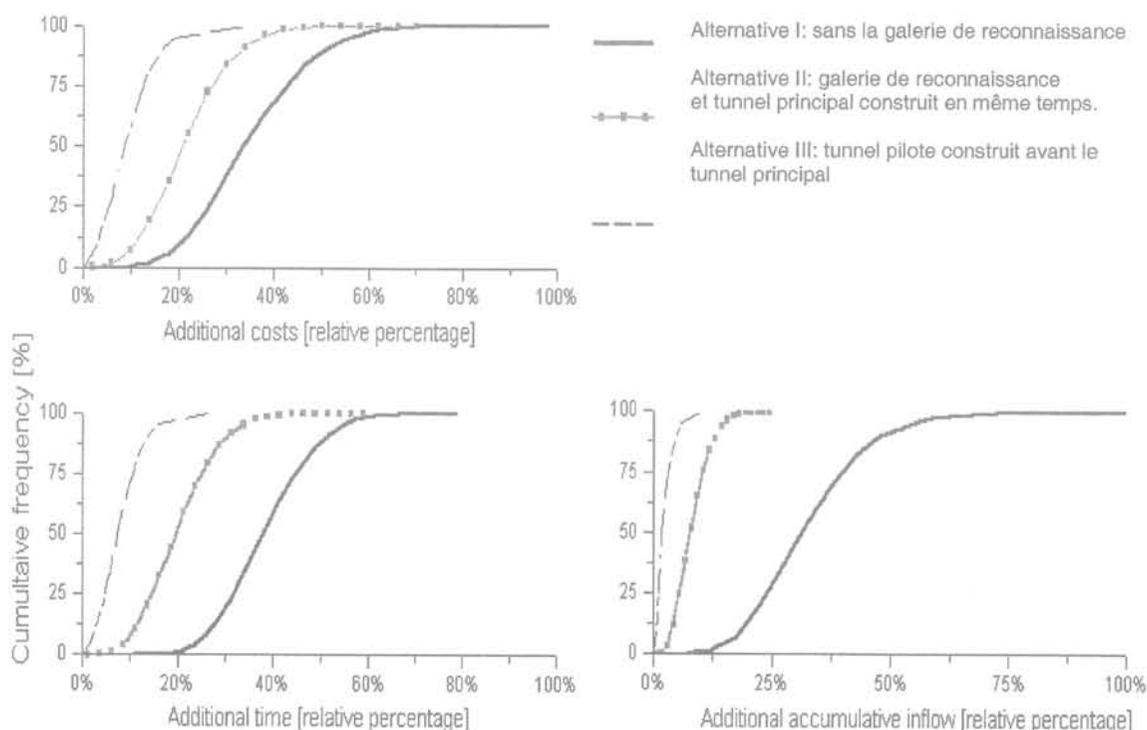


FIG. 9 Évaluation probabiliste, à travers la distribution de coûts additionnels, retards et venues d'eau dans l'excavation, de l'impact d'incidents géologiques pour trois différentes alternatives prises en considération. Probabilistic evaluation of geological accidents on additional costs, additional time and additional cumulative water inflow for three considered alternative solutions.

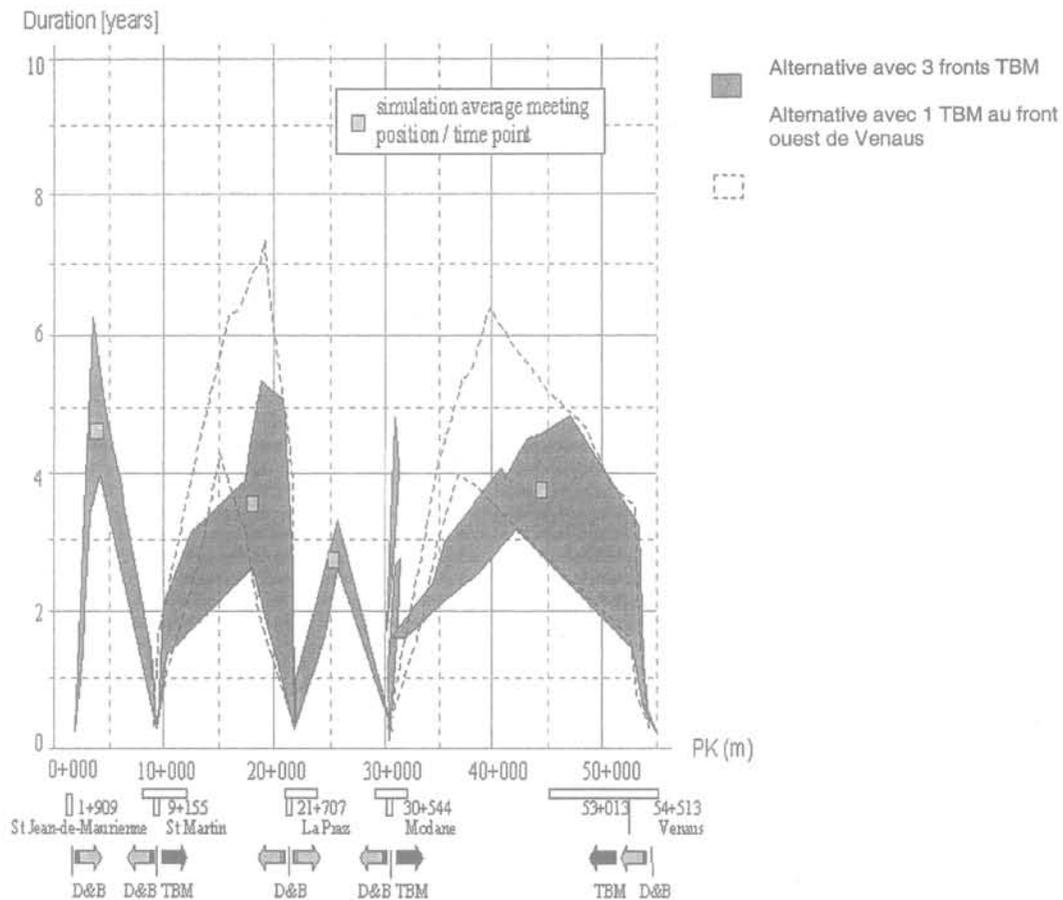


FIG. 10 Programmes de travail (excavation et soutènement de première phase) relatifs à deux alternatives comparées entre elles de façon probabiliste. Planning (excavation and support) of two alternatives compared in a probabilistic way.

et est constitué de 6 voussoirs préfabriqués en béton armé plus la clef, ce qui permet d'excaver avec un rayon minimum de courbure de 200 m.

La couverture moyenne varie entre 15 et 30 m, avec un minimum de 3 à 4 m dans le segment final du tunnel C, réalisé sous des bâtiments de valeur dans le centre de la ville. La nappe est localisée entre 10 et 25 m au-dessus du tunnel.

5.2

Caractéristiques particulières du milieu urbain

Les caractéristiques du contexte dans lequel se trouve l'ouvrage et qui requièrent une attention particulière pour identifier et contrôler les paramètres clés sont les suivantes :

- construction du métro dans un contexte urbain très habité, avec plus de 1 700 bâtiments à l'intérieur de la zone influencée par les excavations ;
- risque géologique à la charge du consortium d'entreprises. Le contexte géologique est complexe et composé de matériaux hétérogènes dans la formation du « granite de Porto » caractérisés par une variabilité rapide et imprévisible dans l'espace. Le profil d'altération du granite varie de sain à complètement altéré et est caractérisé par la présence de blocs préservés aux-

quels s'ajoutent des structures fragiles (failles), des intrusions pegmatitiques, des niveaux granulaires non cohérents. Ces derniers manifestent une structure thixotropique métastable à potentiel élevé d'effondrement due à la grande porosité et à la faible cohésion des sols résiduels ;

- développement du projet en terme de paramètres moyens insuffisants. Forte probabilité de changement due à la variabilité des conditions au front de taille, avec difficulté de contrôle et adaptation immédiate de la pression de stabilisation du front ;
- les terrains suivent un comportement élastoplastique fragile, conduisant à des effondrements brusques et imprévisibles en surface, si le front de taille n'est pas suffisamment supporté ou si une « sur-extraction » est permise ;
- le contexte hydrogéologique complexe est caractérisé par la présence de parcours préférentiels de communication (naturels et artificiels) qui garantissent une recharge rapide de l'aquifère. Un réseau de galeries hydrauliques préexistantes et une grande densité de puits le long du tracé influencent le flux souterrain (aussi bien en drainage qu'en recharge) et constituent une interférence avec l'excavation ;
- les fluctuations de la nappe (souvent rapides et localisées, dépendantes du taux de pluviosité de la région et du régime des canaux préférentiels) influencent la stabilité du front de taille. Ce dernier influence lui-même la nappe, provoquant une variation locale des gradients hydrau-

liques qui, si élevés, peuvent conduire à un phénomène d'érosion interne dans les matériaux plus altérés.

5.3

Le RMP adopté pour l'analyse et la réduction du risque

Le rôle de Geodata dans le projet était le suivant :

- développement de l'étude de construction des tunnels ;
- évaluation de l'impact sur la surface ;
- gestion des auscultations et mise à jour du projet en conséquence ;
- réduction du risque.

Les analyses réalisées pour répondre aux demandes du maître d'ouvrage et de l'entreprise illustrent la nécessité de respecter les temps de consigne de l'ouvrage et de réduire le risque dérivant de l'incertitude géologique et hydrogéologique, spécialement en ce qui concerne l'impact sur le bâti et sur l'opinion publique. Par conséquent, le RMP a été articulé à deux niveaux lors de l'étude d'exécution.

1. Niveau de sélection des alternatives :

- caractérisation géomécanique basée sur les analyses statistiques des données (Russo *et al.*, 2001) ;
- choix de la méthode d'excavation et planning des constructions, selon les termes de référence du travail et de la sécurité, au moyen du système DAT.

2. Niveau d'étude des solutions d'ingénierie :

- adoption d'un processus de réduction du risque dans chaque phase de l'étude, en identifiant le niveau du risque, à travers le degré d'incertitude et de variabilité associé aux paramètres clés, en reportant les risques jusqu'aux standards du projet et en communiquant les risques résiduels (Fig. 11a) ;
- définition d'une stratégie flexible (Fig. 11b) pour traiter les inconnues et les incertitudes résiduelles qui consistent principalement en :

- prévision ponctuelle des valeurs des paramètres clés ;
- simulation des scénarios possibles de crise et de prévision des contre mesures applicables et prédéfinies au sein de l'étude elle-même ;
- définition des procédures pour activer les contre mesures à travers une campagne d'auscultations ;
- définition des données du projet (charge sur le revêtement) à travers l'utilisation de méthodes empiriques et probabilistes pour vérifier les résultats des analyses numériques (Russo *et al.*, 2001).

Une mise à jour de l'analyse complète du risque a été réalisée après le début de l'excavation, après avoir complété le segment initial du tunnel C et après que s'est manifestée une criticité sérieuse dans le processus de construction. Pour en garantir l'efficacité, l'analyse du risque a été réalisée en utilisant une « équipe de travail » regroupant prospectives et disciplines de chaque acteur.

L'application d'une telle procédure a porté à l'intégration du RMP à travers les éléments suivants :

- 1) réduction des risques potentiels dans la phase d'étude ;
- 2) adaptation de la façon d'opérer de l'EBP-TBM ;
- 3) ajustement des contre-mesures des risques potentiels et résiduels lors de la construction ;
- 4) activation d'un protocole spécial pour l'avancement du tunnel (PAT), lien dynamique entre projet et construction et outil dans le processus de décision et réalisation.

5.4

Le RMP dans la phase d'étude avant la construction

L'objectif est de récupérer 8 mois de retard accumulés sur un total prévu de 33 mois et de trouver une solution d'accélération au moyen du DAT.

Le tracé des tunnels des lignes C et S a été divisé en segments homogènes au point de vue des modalités

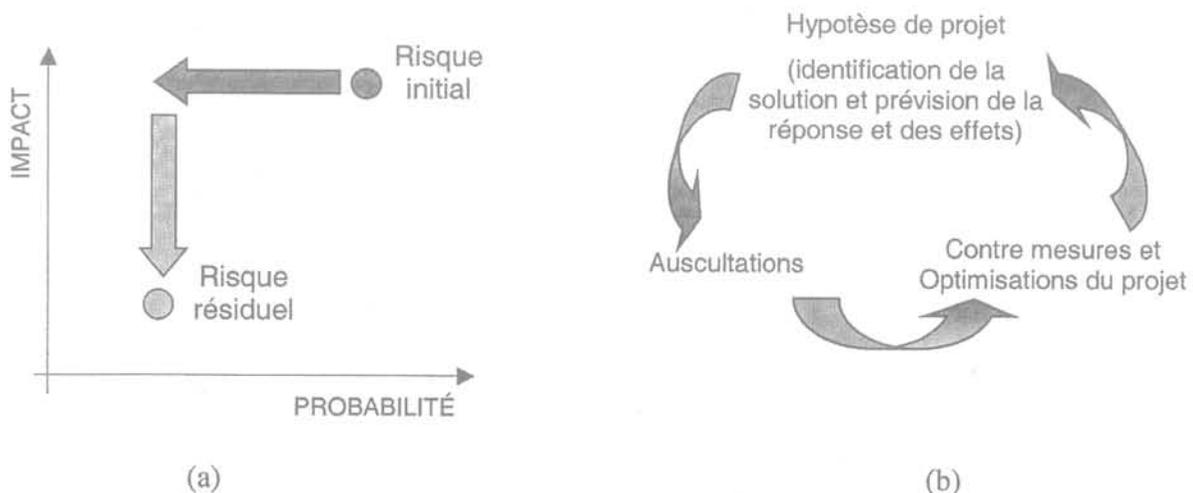


FIG. 11 Schéma de la politique de réduction du risque au stade de la conception (a) et de la stratégie de gestion du risque résiduel en cours d'œuvre (b).
Scheme of the approach for reducing the risk at the design stage (a) and strategy for managing the residual risk during construction (b).

d'avancement. Pour représenter de façon réaliste le processus d'excavation, la simulation DAT a inclus également des modalités d'avancement avec confinement partiel en chambre d'excavation, introduisant de cette façon un certain pourcentage de risque d'instabilité de durée variable par rapport à une possibilité d'amélioration de la vitesse d'avancement.

En plus de la solution de base (0), des alternatives (1-2-3) ont été considérées. Elles sont ainsi caractérisées (Fig. 12) :

– alternative 0 : construction des deux tunnels au moyen d'un seul tunnelier qui creuse tout d'abord le tunnel C et, ensuite, le tunnel S. L'amélioration et/ou le renforcement préalable du sol ou des bâtiments n'est

pas considéré. La simulation considère la possibilité que, parfois et pour de brefs moments, la modalité d'excavation ne soit pas adéquate (par ex. : vitesse de réaction du responsable de la construction insuffisante, manque de contrôles à l'avancement...);

– alternative 1 : La consolidation du sol est prise en compte pour permettre une progression rapide. Le renforcement statique des bâtiments associé au présoutènement du sol permet d'augmenter la longueur des segments où le tunnelier pourra opérer de façon ouverte. Hypothétiquement, le présoutènement pourrait se révéler efficace dans 80 % des cas (absence d'accidents ; vice-versa dans les 20 % restants, les accidents sont toujours possibles) ;

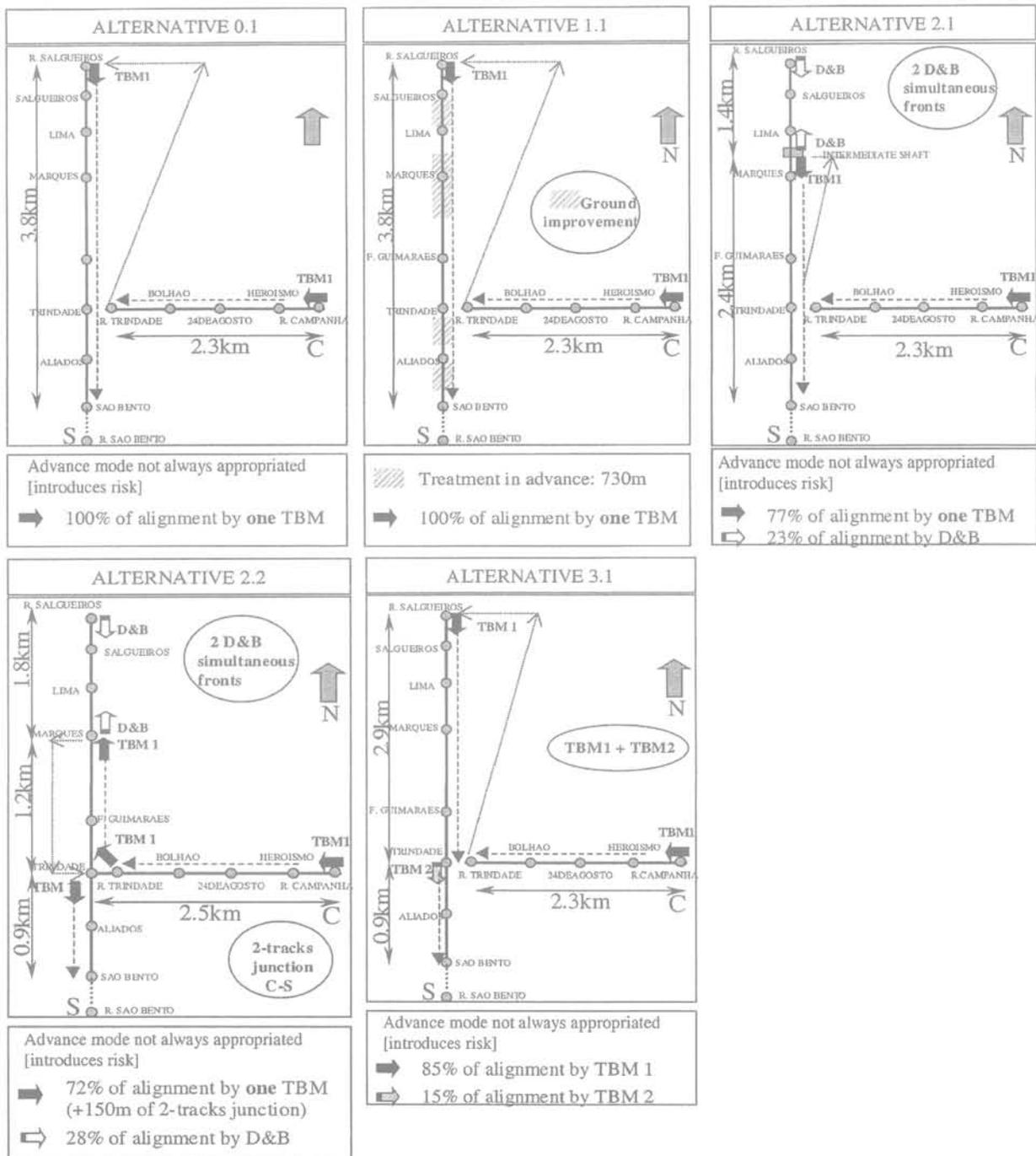


FIG. 12 Schéma des alternatives comparées entre elles au moyen du DAT. Layout of the various alternatives compared using DAT.

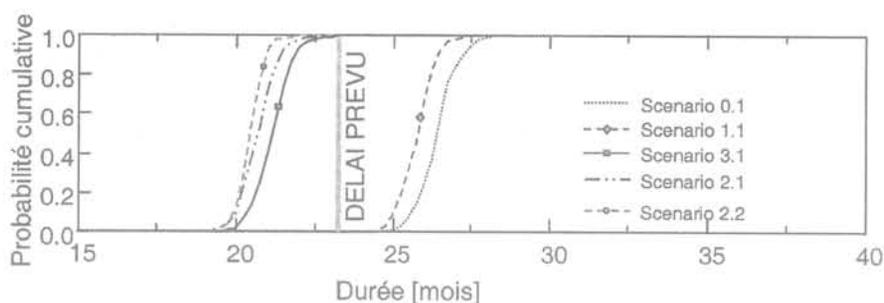


FIG. 13 Schéma des alternatives comparées entre elles au moyen du DAT.
Layout of the various alternatives compared using DAT.

- alternative 2 : en plus de l'excavation réalisée avec le tunnelier, deux fronts sont excavés en traditionnel (à l'explosif). Cette alternative présente deux options par rapport à l'excavation avec tunnelier (Fig. 12) ;
- alternative 3 : deux tunneliers sont utilisés pour creuser les deux tunnels.

Les résultats de l'analyse DAT sont montrés dans la figure 13 dans laquelle sont indiquées les probabilités cumulées de la durée de la construction pour chacune des quatre alternatives. Il est évident que l'alternative 0 est la plus lente et est suivie de près par l'alternative 1. Les alternatives 2 et 3 sont presque équivalentes en terme d'accélération de la construction et permettent de respecter les limites de temps mais comportent des risques très différents.

Chaque solution permet de prévoir les travaux et les opérations à réaliser avant le passage du tunnelier. La solution offerte par l'alternative 3 (utilisation de 2 tunneliers) non seulement minimise la préparation des travaux (par exemple : solution indépendante de la progression des stations) mais est également plus fiable en ce qui concerne la stabilité du milieu hétérogène. Dans ce sens, le choix de la méthode d'excavation adéquate est la première réponse au risque.

5.5

Intégration du RMP dans la phase de construction

Après l'excavation de la première partie du tunnel C, une analyse complète du risque a été menée en tenant compte des aspects de l'étude et de la construc-

tion, pour laquelle aucune analyse n'avait été réalisée précédemment. L'approche « groupe de travail » a été décidée pour l'analyse du risque de façon à ce que soient représentées toutes les opinions : entreprise, bureaux d'études, experts dans le domaine de la géotechnique, des auscultations, et des tunneliers.

La procédure de gestion du risque a été développée au cours de rencontres de travail focalisées sur les points suivants :

- identification des événements critiques dans les différentes phases du projet (auscultations, étude, construction et opération), de leurs causes et de l'entité de référence ;
- évaluation des probabilités que l'événement se produise, évaluation de son impact sur la sécurité lors de la construction (pour les opérateurs et pour le public), des coûts et de la durée ;
- évaluation des risques associés à l'événement comme combinaison de probabilité et impact ;

TABLEAU IV (a) Échelle quantitative de la probabilité (P) que se produise un événement.
Quantitative scale of the probability (P) – Porto Metro.

Échelle P	Description de la probabilité	Impact
5	Fréquente	Événement presque certain
4	Probable	Événement attendu
3	Occasionnelle	1 dans 10
2	Peu probable	1 dans 100
1	Improbable	1 dans 1 000

TABLEAU IV (b) Échelle quantitative de l'impact (I) d'un événement dans le métro de Porto.
Quantitative scale of the impact (I) – Porto Metro.

Échelle I	Description de l'impact	Impact sur la santé et la sécurité (lors de la construction et de l'exploitation)	Impact économique (coût pour la mise en œuvre de mesures de sécurité)
5	Très haut	Un ou plus incidents mortels	Fin potentielle du projet
4	Haut	Lésions graves ou longue maladie	Délais de plusieurs mois. Coûts additionnels jusqu'à 10 000 000 €
3	Moyen	Lésions guérissables ou maladie	Délais de plusieurs semaines. Coûts additionnels jusqu'à 1 000 000 €
2	Bas	Lésions légères/inconforts. L'accidenté nécessite un traitement immédiat et un congé de maladie	Coûts extra de 100 000 €
1	Très bas	Lésions légères/inconforts Le blessé peut continuer à travailler	Coûts extra de 10 000 €

TABLEAU V

Échelle quantitative du risque (P x I) associé à un événement, utilisée pour le métro de Porto.
Quantitative scale of the risk (P x I) associated to hazards, used for the Project of Porto Metro.

Échelle P x I	Niveau de risque	Actions pour maîtriser le risque compromettant santé et sécurité	Actions pour maîtriser le risque économique
1-4	Bas	Vérifier si le changement de conception peut réduire les risques futurs. Procéder avec la conception	Communiquer les résultats de l'analyse de risque à la Direction, aux intervenants, et éventuellement à tierces personnes.
5-9	Moyen	Prendre en considération une étude ou une méthode de construction alternative. Si ce n'est pas possible, spécifier les précautions à prendre. Identifier le risque résiduel.	Communiquer les résultats de l'analyse de risque à la Direction, aux intervenants, et éventuellement à tierces personnes.
10-25	Haut	Rechercher des solutions alternatives. Si ce n'est pas possible, spécifier les précautions à prendre et en informer la Direction. Enregistrer le risque résiduel.	Prendre en considération les alternatives et évaluer la proportion coût bénéfice des mesures de réduction en relation avec la gravité du risque (impact).

– priorité des risques en terme de réduction et acceptabilité ;

– définition de mesures appropriées de contrôle du risque (RCM) pour réduire ce dernier ;

– nouvelle définition du risque, après l'application du RCM, donc identification du risque résiduel ;

– définition d'actions ultérieures (contre mesures) nécessaires à la gestion et au contrôle du risque résiduel.

Les échelles qualitatives de probabilité (P), impact (I), risque (R) d'un événement sont indiquées respectivement dans les tableaux IV (a), 4 (b), et V.

L'application des procédures décrites a mis en évidence les points critiques du projet et a permis l'intégration du RMP en ce qui concerne les méthodologies d'étude, le choix des procédures d'opération du tunnelier, et la communication entre les équipes d'étude et de construction.

De plus, pour garantir l'efficacité du RMP, différents aspects organisationnels ont été revus et/ou introduits :

1) rôles, responsabilité et flux des informations au sein du groupe ;

2) introduction du rôle et de l'équipe de l'Ingénieur résident (IR) pour la supervision de la construction directement par le bureau d'étude ;

3) activation de la réunion journalière (RRG) du tunnel y compris la maîtrise d'œuvre, l'équipe de construction et l'équipe de l'IR ;

4) activation d'un groupe d'experts internationaux pour les audits périodiques.

5.5.1

Réduction du risque dans la phase d'étude

Les points suivants furent considérés dans le développement du RMP pour le projet (Grasso *et al.*, 2002a) :

– mise à jour du modèle géologique, géotechnique et hydrogéologique pour chaque segment encore à excaver, à travers un ensemble d'auscultations spécifiques par phases, pour des sections de 200 à 400 m, de façon à utiliser le niveau de connaissance acquis pour le détail de la phase successive ;

– définition des critères spécifiques pour gérer les risques relatifs aux immeubles en surface et aux sous-services, en adaptant la prévision des tassements au milieu hétérogène au moyen d'une méthode semi-empirique ;

– adaptation du système d'auscultation, en prévoyant un contrôle pour chaque immeuble dans la zone d'influence du tunnel ; pour réduire l'impact économique, aussi bien des instruments actifs (lus systématiquement) que des instruments de contrôle additionnel (pour lesquels les lectures systématiques sont réalisées seulement dans le cas où la limite d'attention a été touchée dans les instruments actifs contigus) ont été placés et distribués selon le niveau de risque des immeubles ;

– adoption d'une procédure spécifique pour calculer la pression de stabilisation du front, en l'adaptant aux conditions de chaque zone ;

– sélection et contrôle d'un groupe additionnel de paramètres clés, y compris les paramètres représentatifs du tunnelier lui-même de façon à pouvoir adapter l'étude aux conditions rencontrées et donc de mitiger n'importe quel risque résiduel ;

– établissement des valeurs pour chaque paramètre clé qui serviront de seuils d'attention et d'alarme pour la mise en action des contre mesures prévues.

5.5.2

Ajustement des modalités d'opération de l'EPB-TBM

Les tunneliers employés peuvent opérer en mode fermé (chambres d'excavations pleines de matériaux d'excavation conditionnés et pressurisés) ou en mode ouvert (chambres d'excavation partiellement pleines de matériaux d'excavation conditionnés mais non pressurisés). Ces deux modalités sont appliquées en fonction des conditions géomécaniques rencontrées au front de taille.

Dans le cas spécifique, si le mode ouvert est utilisé dans une situation où est normalement requise l'utilisation du mode fermé (par exemple : lorsque l'entreprise décide de changer le mode prévu par le bureau d'études pour augmenter la production, ou bien lorsqu'un brusque changement de la géologie n'est pas suivi par une réponse immédiate de l'opérateur), il existe un risque de sur-excavation ayant comme conséquences des tassements excessifs et des éboulements, qui se traduisent au minimum par une augmentation des délais de construction. Les risques d'une inadéquate opération de la TBM et leurs impacts sont simulés par le DAT qui introduit le délai exponentiel du cumul des retards dus à la succession des accidents.

La figure 14 montre les résultats de l'analyse. Le résultat obtenu dénote que :

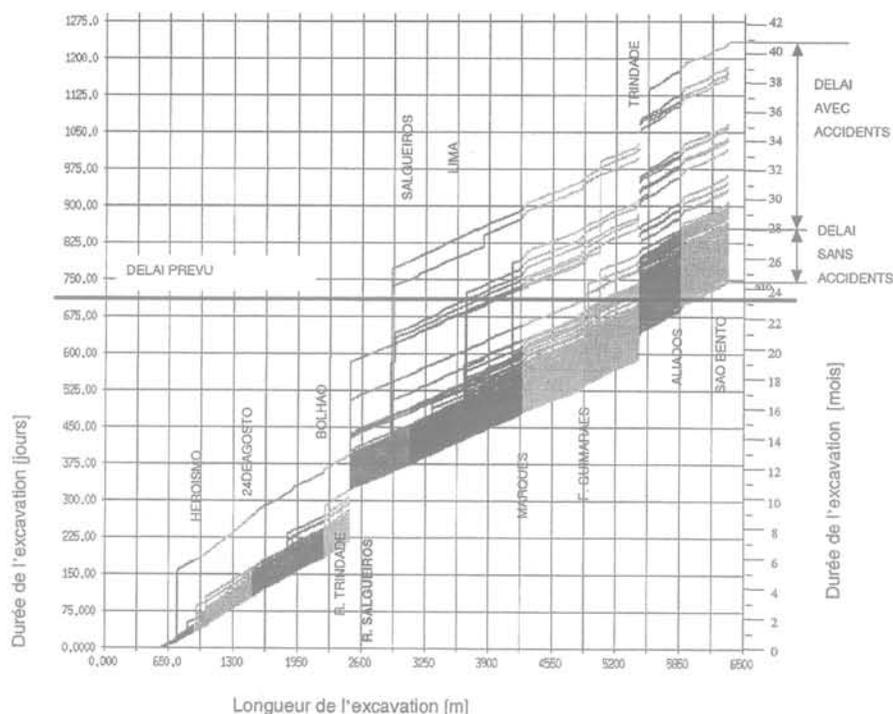


FIG. 14 Résultats des analyses de simulation de la probabilité de durée des travaux avec ou sans accidents dus à l'utilisation non appropriée du tunnelier (la position des stations et des rampes est indiquée, R).
Results of the probabilistic simulation of the construction time with or without accidents due to the improper use of the TBM (the position of both stations and ramps is indicated).

– le choix d’opérer en mode ouvert quand le mode fermé serait requis ne conduit pas à de réels bénéfices en terme de production ;

– dans un contexte géologique extrêmement hétérogène, le risque d’accidents dus à l’erreur humaine face à un changement de conditions au front existe toujours et peut avoir des conséquences désastreuses pour la sécurité du public.

Par conséquent, vu les délais réduits pour la réalisation et l’environnement fortement habité, ce dernier risque n’a pas été considéré comme acceptable dans ce projet. De ce fait découle la nécessité que l’excavation soit toujours réalisée en mode fermé.

L’impact de la réduction partielle de la vitesse d’avancement sur les temps de consigne de l’ouvrage, dérivant de l’utilisation exclusive de la façon fermée, a été corrigé à travers une redistribution des distances à parcourir par les deux TBM par rapport à ce qui est reporté dans la figure 12.

5.5.3

Réduction des risques dans la phase de construction

La révision de l’analyse du risque a mis en évidence deux paramètres clés :

– l’adoption de la méthode correcte d’excavation qui sert comme première contre-mesure pour limiter le risque d’instabilité et d’effondrement ;

– son contrôle sévère, comme deuxième contre-mesure, pour limiter l’impact de l’éventuelle instabilité. Par conséquent, différentes actions ont été nécessaires pour appliquer le RMP à la phase de construction (Guglielmetti *et al.*, 2002) :

- contrôle rigoureux des paramètres clés du tunnelier pour opérer dans les intervalles opérationnels prévus (Fig. 15) ;

- mise au point d’un système secondaire de support actif du front de taille. Un système automatique injecte de la bentonite dans la chambre d’excavation si la pression au front diminue sous les limites préétablies ;

- installation d’alarmes automatiques dans la cabine de pilotage qui s’activent lorsque les valeurs de seuil (de volume extrait, pression au front...) sont dépassées ou non respectées, rédaction des procédures opérationnelles du tunnelier pour assurer son utilisation correcte et l’adoption de techniques d’excavation appropriées. Les procédures contiennent également les actions et les flux d’information en cas d’anomalies ;

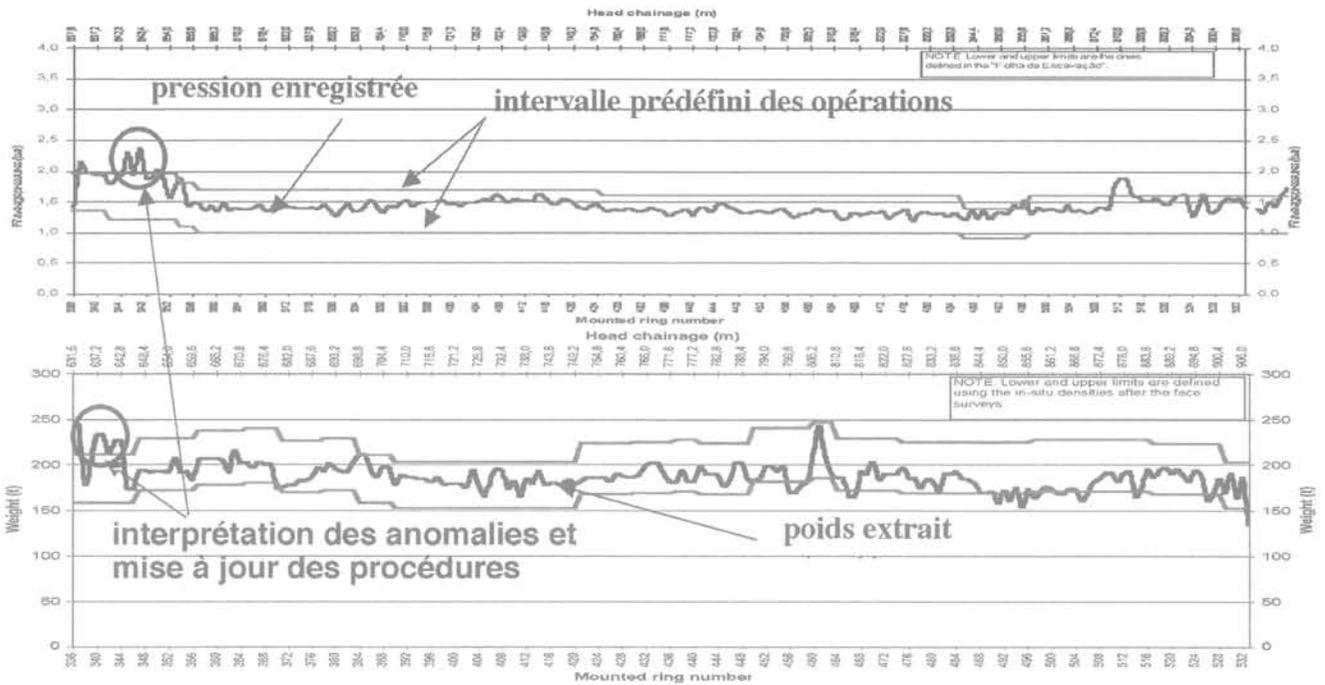
- création d’une équipe de suivi du système, composée de personnel de l’entreprise et du bureau d’études pour une interface systématique des paramètres clés avec les processus d’étude, de construction, d’auscultations et les éventuelles modifications ;

– réalisation d’un système d’information géographique (SIG) intégré pour la gestion des interférences du projet au niveau de l’étude, du monitoring et des analyses. L’accès aux données est garanti en temps réel à tous les acteurs engagés dans la réalisation du projet.

5.5.4

Protocole pour l’avancement du tunnel

Pour garantir le respect des principes théoriques adoptés dès le début et résumés dans la figure. 8, le protocole pour l’avancement du tunnel (PAT) a été inséré dans le RMP. Le PAT est un document « vivant » qui agit à l’intérieur du RMP comme lien entre l’étude et la construction (Grasso *et al.* 2002). Le PAT est un document d’étude détaillé, produit et mis à jour tous les 200-400 m avec un minimum d’anticipation sur l’excavation, qui résume les nécessités de l’étude et de la construction. Une approche multidisciplinaire est utilisée pour identi-



■ GEODATA

FIG. 15 Exemple de contrôle des paramètres clés à travers des intervalles opérationnels prédéfinis qui mettent en évidence les anomalies et obligent à les interpréter, à mener des actions correctives et à mettre à jour de façon dynamique les procédures.

Example of control of the TBM's key-parameters through predefined operational ranges that emphasize anomalies, obliging to interpret them, implementing corrective measures and updating dynamically the procedures.

fier les risques résiduels à travers la récolte de données, l'analyse et l'interprétation de toutes les données supplémentaires relatives à la section précédemment excavée, aux conditions géologiques et hydrogéologiques locales, aux informations sur les interférences avec structure en souterrain ou en surface, au relevé actualisé de l'état des immeubles. Ces informations sont donc utilisées pour obtenir un très bon modèle de prévision.

Le contenu du PAT est donc discuté avec le maître d'ouvrage et, après son approbation, est donné en dotation à l'équipe de construction. A ce point, le PAT devient une directive dynamique pour les opérations d'excavation, utilisée :

- 1) pour mettre à jour ultérieurement, par rapport à l'étude d'exécution, les paramètres clés sur une base quotidienne en fonction des auscultations en temps réel ;
- 2) comme support dans le processus décisionnel.

La directive assure donc à toutes les parties en cause que la construction est réalisée de façon complètement contrôlée.

5.5.5

Résultats de l'application du RMP au métro de Porto

Grâce aux procédures décrites, à partir de septembre 2001, la totalité de la ligne C (2 300 m) et environ 1 700 m de la ligne S ont été complètement excavés, avec de bons résultats, sans incidents, et avec des tassements superficiels très limités, même en présence de faible couverture (3 à 4 m). La vitesse d'avancement de 40 à 50 m par semaine est satisfaisante, surtout si l'on

considère la nécessité d'entrer continuellement en conditions hyperbariques dans la chambre d'excavation pour la maintenance de la tête à cause de la forte capacité d'abrasion du granit.

Aucune situation d'alarme n'a plus été enregistrée après l'application du RMP. De plus, l'augmentation du niveau de connaissance du sol, de sa réponse à l'excavation, et du contrôle du tunnelier a augmenté le degré de confiance dans la technique d'excavation permettant d'optimiser les études (par ex. : limitation des soutènements du sol avant le passage du tunnelier ; optimisation du système d'auscultations et du régime de lectures ; réduction des ouvrages de protection préalables...) là où le degré d'incertitude qui caractérisait le projet avait obligé à prévoir des solutions beaucoup plus conservatrices.

6

Conclusion

Le risque géotechnique, sous forme de conditions géologiques non prévues ou imprévisibles, est un facteur décisif pour le contrôle des temps, des coûts et de la sécurité de tous les plus importants projets d'ingénierie de génie civil. Le projet doit être géré dans toutes ses phases, en prêtant grande attention aux sources des risques, à leur identification, leur quantification et leur minimisation, après avoir défini la tolérance spécifique du projet aux risques. Un tel processus requiert l'attention du maître d'ouvrage, du bureau d'études et de l'entreprise dans

toutes les phases du projet, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à l'entrée en exercice de l'œuvre terminée ; il requiert également le développement d'un RMP – stratégie de gestion et répartition du risque.

Le RMP utilisera des instruments d'analyse du risque, de nature semi-empirique à probabiliste, qui permettront d'approcher, de manière flexible, l'étude

et la construction, en évitant ainsi l'imprécision et la rigidité inhérentes à l'approche déterministe.

Les exemples d'application de l'analyse du risque reportés dans cet article ont démontré qu'une politique de gestion du risque n'est pas une fantaisie, mais un outil pratique pour l'ingénierie qui peut amener de nombreux avantages.

Bibliographie

- Chiriotti E., Grasso P. – Il controllo dei rischi nello scavo meccanizzato di gallerie in area urbana. *Convegno Nazionale di Geotecnica*, L'Aquila, 2002.
- Clayton C.R.I. – Managing Geotechnical Risk. Improving Productivity in UK Building and Construction. *Institution of Civil Engineers, London. Thomas Telford Publishing*, London, 2001.
- Einstein H.H., J.-P. Dudt, V.B. Halabe, F. Desceudres – *Decision Aids in Tunneling. Principle and Practical Application*. Monographie, Swill Federal Office of Transportation, Project Alp Transit, 1992.
- Grasso P., Chiriotti E., Xu S. – Riduzione e condivisione dei rischi residui associati allo scavo di un tunnel meccanizzato in ambito urbano attraverso l'uso di un protocollo di avanzamento. *Convegno Nazionale di Geotecnica*, L'Aquila, 2002a.
- Grasso P., Collomb D., Vignat P., Bochon A. – Base Tunnel Maurienne-Ambin : Probabilistic Estimation of Construction Time and Cost for Various Project Planning and Configuration Alternatives Considerino Geologic and Geomechanical Uncertainties. Actes du congrès *Le indagini Geologiche e Geotecniche Propedeutiche alla Costruzione delle Opere Sotterranee sia Civili che Minerarie*, Modena, 2002c.
- Grasso P., Kalamaras G.S., Mahtab M.A. – Project Financing for Long and Deep Tunnels : An Approach Based on Risk Analysis. Actes *AITES-ITA World Tunnel Congress*, Milano, 2001.
- Guglielmetti V., Grasso P., Gaj F., Chiriotti E. – Il controllo dello scavo e della stabilità del fronte in uno scavo meccanizzato in ambiente urbano con il metodo a pressione di terra bilanciata. *EPB Shield. Gallerie e Grandi Opere in Sotterraneo*, 2002.
- Kalamaras G.S. – A Probabilistic Approach to Rock Engineering Design : Application to Tunnelling. *Milestones in Rock Engineering*, The Bieniawski Jubilee Collection, A.A. Balkema, Rotterdam, 1996, p. 113-135.
- Pelizza S., Grasso P. – Tunnel Collapses : Are They Unavoidable? *World Tunneling*, 1998, p. 71-75.
- Russo G., Kalamaras G.S., Origlia L., Grasso P. – A Probabilistic Approach for Characterizing the Complex Geologic Environment for Design of the New Metro of Porto. Actes *AITES-ITA World Tunnel Congress*, Milano, 2001.
- Russo G., Kalamaras G.S., Grasso P. – Reliability Analysis of Tunnel-Support Systems. Actes *9th ISRM Congress*, Parigi, 1999.
- Russo G., Xu S., Valdemarin F., Grasso P. – A Tunnel Construction Time and Cost Probabilistic Evaluation with the System DAT (Decision Aids for Tunneling). *Strategic Project-Tunnel Coordinator S. Polizza*, Final Report, 1997, p. 124-138.
- A consulter également :
- Balan A., Trannoy P., Guttières L. – Application du MERP aux travaux souterrains et son intégration aux marchés publics. *AFTES, Journées d'études internationales de Toulouse*, 2002.
- Chiriotti E., Grasso P., Xu S. – Analysis of Tunnelling Risks : State-of-the art and Examples. *MIR 2002* et prochaine publication dans *Gallerie*, 2002-2003.
- Grasso P., Mahtab M.A., Kalamaras G.S., Einstein H.H. – On the Development of a Risk Management Plan for Tunnelling. *28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress*, Sydney, 2002b.
- Hoek E. – Geotechnical Risks on Large Civil Engineering Projects. *Inter. Association of Engineering Geologists Congress*, Vancouver, 1998.
- ITA Working Group n.12. *Guidelines for Tunnelling Risk Assessment*. Draft of the WG Report Prepared for WG 12 Meeting in Sydney, February, 2002.
- ITA Working Group n.17. *Long Traffic Tunnels at Great Depth*. First Draft of the WG Report Prepared for WG 17 Meeting in Amsterdam, April 2003.
- Kovari K. – La sicurezza del sistema nel campo della costruzione di gallerie in aree urbane : l'esempio della galleria Zimmerberg. *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee* n° 36, dicembre 2002.
- Maidl B. – TBM procurement using risk analysis. *Tunnel & Tunnelling International*, April 2003.
- Piraud J. – Sur la désaffection des français pour les travaux souterrains : causes et remèdes possibles. *AFTES, Journées d'études internationales de Toulouse*, 2002.
- Robert J. – L'analyse des risques pour la maîtrise des incertitudes lors de la construction d'un tunnel. *AFTES, Journées d'études internationales de Toulouse*, 2002.