

Coûts constatés sur les tunnels routiers récemment construits en France

Utilisation dans les projets futurs

2674

B. CONSTANTIN
Ingénieur au Centre d'Études des Tunnels

Présentation

par
Jean PÉRA
Directeur du Centre d'Études des Tunnels

Les progrès survenus dans la période récente dans le domaine des ouvrages d'art routiers provoquent des variations relatives du coût de certains types par rapport à d'autres. Mais ces progrès n'ont d'effet que pendant une durée limitée, puis d'autres apparaissent. Aussi est-il nécessaire de refaire périodiquement une appréciation des coûts.

Estimer le coût du génie civil d'un tunnel routier est plus difficile qu'estimer le coût de ses équipements : signalisation, éclairage, ventilation, etc. D'autre part, tant l'appréciation des rôles du terrain autour de l'excavation et du soutènement que l'emploi de nouvelles machines ont modifié l'exécution des tunnels.

C'est l'estimation du génie civil qui est ici développée. Les différentes méthodes utilisables sont présentées et illustrées par des exemples récents. Leur application présuppose le recueil et le traitement de nombreuses informations provenant d'ouvrages en cours de réalisation. Ces informations se périment d'ailleurs avec le temps.

L'article montre aussi, alors que des progrès paraissent encore possibles, que les tunnels peuvent dans certains cas être compétitifs par rapport à d'autres ouvrages d'art. L'attention des maîtres d'ouvrage doit être attirée sur le soin à apporter à une bonne implantation et sur la nécessité d'études spécifiques suffisantes pour parvenir à une estimation correcte.

Sommaire

1. Introduction
2. Décomposition du coût de la construction des tunnels routiers
3. Les estimations du génie civil des tunnels
 - 3.1. Généralités
 - 3.2. Méthode d'estimation
4. Conclusion

1. Introduction

Un produit industriel est vendu à un prix qui résulte de la connaissance du prix de revient, un chantier à un prix qui résulte de supputations à propos du prix de revient plausible. La réalité n'est pas aussi simple, bien sûr, et même pour un produit industriel, la connaissance du prix de revient suppose d'abord qu'il soit parfaitement défini, que soit défini le modèle de répartition des divers frais. Pour l'industriel, les coûts directs de fabrication sont parfaitement connus, nous verrons qu'il n'en est pas de même pour les travaux souterrains pour un grand nombre de raisons. Nous aurons l'occasion de souligner que le même intitulé de prix unitaire ne recouvre pas toujours les mêmes prestations. Pour pallier ce défaut, il est à noter que la future circulaire d'application du fascicule 69 Travaux en souterrain du CCTG comporte en annexe un bordereau de prix type dont elle recommande l'application sans modification des libellés. Outre cette raison purement technique, qui interdit de comparer sans précaution des prix apparemment identiques portant sur plusieurs chantiers différents, bien d'autres raisons font que pour une prestation donnée d'une même affaire et pour une même prestation sur différentes affaires, il est difficile de calculer un prix de façon rigoureusement identique et de définir le « juste prix ».

La question du coût des ouvrages souterrains se pose d'une manière complètement différente que pour celui d'autres constructions en raison :

- du rôle prédominant des facteurs liés à la nature du sol ; en effet, c'est cette nature qui impose de choisir entre un nombre limité de procédés d'exécution,

- du pourcentage élevé d'incertitudes qui peut en résulter pour les estimations,

- d'un préjugé défavorable des ingénieurs et des maîtres d'ouvrage sur le niveau du coût d'un tunnel que l'on considère parfois à tort comme beaucoup plus élevé que celui d'autres ouvrages (fig. 1).

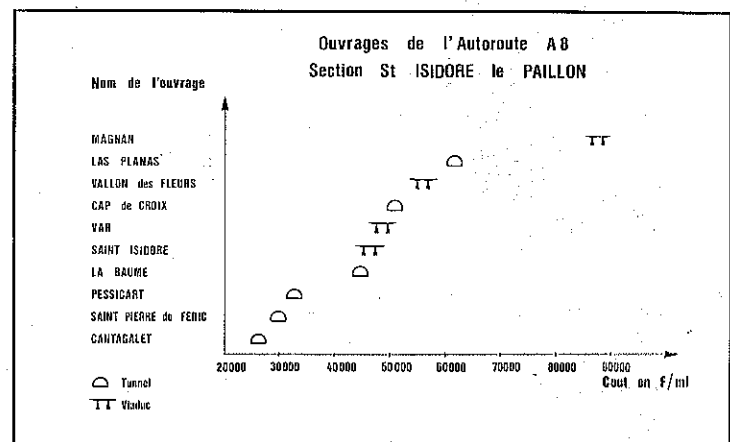


Figure 1

Une des missions du Centre d'études des tunnels du ministère des Transports, en tant que service spécialisé, est d'aider les maîtres d'œuvre dans l'établissement de leurs projets et donc de fournir à ceux-ci à tous les niveaux du projet les estimations correspondantes. Ce travail, comme nous le verrons, nécessite une collecte importante de données tant au point de vue prix que configurations de terrain, méthodes d'excavation employées, matériel, etc.

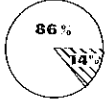
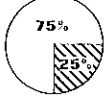
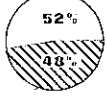
Avant de traiter plus à fond le problème des estimations de travaux souterrains, nous nous pencherons sur les principaux facteurs à prendre en compte.

2. Décomposition du coût de construction des tunnels routiers

Il est possible de distinguer dans les ouvrages souterrains routiers deux grandes familles de coûts :

- les coûts liés à la réalisation du souterrain (excavation, soutènement, revêtement...) qui sont les coûts de génie civil proprement dit,
- les coûts liés à l'utilisation de l'ouvrage qui comprennent le génie civil du second œuvre (plafonds de ventilation, usines souterraines...) et les équipements (éclairage, ventilation, télétransmission...).

Les trois exemples de tunnels routiers étudiés figure 2 présentent trois cas très différents, tant par le type de trafic que par les conditions géologiques et la longueur.

Coût Total	Observations
	Tunnel à double sens de rase campagne ou de montagne Longueur 500 m environ Ventilation naturelle
	Tunnel à sens unique sur autoroute de rase campagne ou route nationale catégorie exceptionnelle Longueur 3 km environ Ventilation transversale partielle 3 usines
	Tunnel à double sens sur voie urbaine Longueur 1,5 km environ Ventilation transversale pure 3 usines

 Génie civil lié au tunnel.

 EQUIPEMENTS : Eclairage ; Ventilation (y compris son Génie Civil)

Figure 2

Ces diagrammes montrent bien que les dépenses de génie civil sont en général prépondérantes, bien que dans certains cas de tunnels longs qui doivent comporter des usines de ventilation voire des puits de ventilation et dans le cas de tunnels urbains à trafic intense et congestionné le coût de la ventilation, des équipements et du génie civil qui leur est lié soit très important. On ne parlera pas ici des estimations de ces équipements qui sont traités en général par des marchés séparés, mais qui font l'objet au CETU d'études similaires.

Les travaux d'exécution des têtes des ouvrages ne seront cités que pour mémoire, leur coût pouvant varier de quelques pour cent à 30 % environ du total en fonction de la longueur du tunnel et de la manière d'entrer dans le sous-sol (orientation de l'axe du tunnel, pente du terrain naturel, difficultés de stabiliser les talus...).

Ces travaux de génie civil comprennent, outre le génie civil lui-même, les reconnaissances préliminaires tels sondages, galeries de reconnaissance, essais de laboratoire, etc.).

Tous les travaux de reconnaissance en vue d'un projet ont un coût qui peut représenter environ 10 % du coût total de génie civil et notamment en site urbain où les risques doivent être limités ; en montagne, ils ne représentent que 0,5 à 1 % quand il n'est pas prévu de galerie de reconnaissance.

Ces pourcentages peuvent paraître élevés mais ils sont liés étroitement aux dépassements constatés lors des travaux comme le montre la figure 3 établie par le LCPC. Cette courbe, qui est très parlante, doit toutefois être interprétée avec des réserves, car si un faible pourcentage du coût consacré aux études élève les risques en cours de travaux, il ne suffit pas de dépenser 10 % en études pour s'affranchir des aléas.

Le génie civil proprement dit du tunnel comprend le creusement (abatage + marinage), le soutènement et le revêtement. Il est intéressant (fig. 4) de comparer la part relative des trois postes cités ci-dessus dans différentes sections de soutènement pour un tunnel type autoroutier.

Compte tenu des niveaux de prix, on constate que les postes de creusement et revêtement sont d'un montant comparable en valeur absolue, par contre le coût du soutènement, lui, peut varier de 1 à 20 du profil dit léger au profil lourd.

Pour certains cas très particuliers, les travaux préparatoires à l'avancement (traitement de terrain par injection, congélation...) peuvent même représenter jusqu'à 50 % du coût du génie civil dans des situations très défavorables (très mauvais terrains avec charge d'eau importante, déplacement de réseaux ou prévention contre les tassements en site urbain, traversées d'accidents géologiques).

3. Les estimations du génie civil des tunnels

3.1. Généralités

Outre l'intérêt de connaître des coûts globaux de tunnels construits selon des méthodes et dans des horizons de terrain différents, l'utilité principale des méthodes proposées ici est de permettre au projeteur de disposer de bases solides pour évaluer ses projets et donc :

- d'implanter l'ouvrage dans les meilleures conditions économiques possibles,
- d'estimer le montant final des travaux ainsi que le degré d'incertitude.

On peut schématiser les études d'un projet de tunnel routier en trois étapes principales : les préétudes, les études d'avant-projet et la consultation des entreprises. A chacune de ces étapes correspond un niveau différent d'étude de prix par la précision du résultat demandé. Au niveau des préétudes, quand le choix est à faire entre plusieurs solutions de tracé avec ou sans tunnel, on pourra se contenter de coûts kilométriques d'ouvrages analogues dans des conditions similaires. En prenant pour référence le coût moyen d'un kilomètre courant de tunnel creusé en bon rocher, on remarque que le coût du génie civil en site terrestre rocheux peut varier dans une fourchette de 1 à 7, comme le montre la figure 5 représentative du coût de génie civil d'un échantillon de tunnels récemment construits en France. Les études devenant plus précises, l'estimation sera conduite à partir de prix d'ordre, lesquels s'appliquent aux natures principales de travaux (par exemple prix du mètre cube de béton de revêtement incluant toutes les prestations connexes telles remplissage des hors profils, injection de remplissage...). Pour la consultation des entreprises, l'estimation aux prix unitaires devra s'efforcer de chiffrer le contrat avec précision.

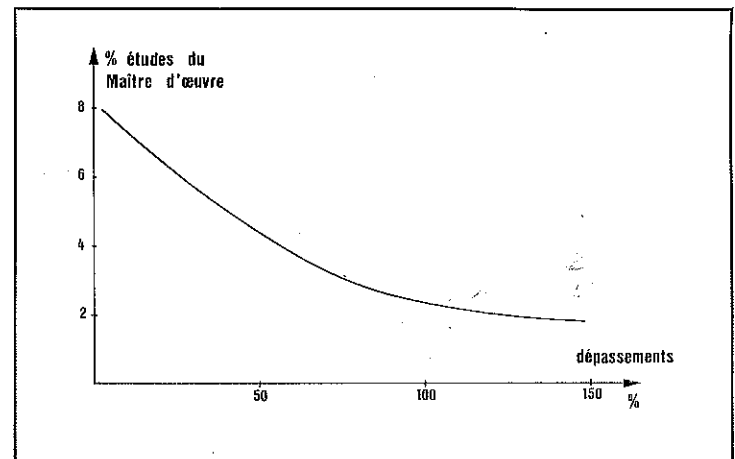

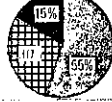

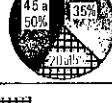


Figure 3

Figure 4

Caractéristiques des section	Répartition des coûts	Rapport du Prix
Terrain : Rocher peu fracturé Soutènement : quelques ancrages, grillage de protection Revêtement : 30cm		1
Terrain : Fracturé de bonne tenue Soutènement : boulons scellés, béton projeté, treillis soudé Revêtement : 30cm		1,15
Terrain : Fracturé de tenue médiocre Soutènement : boulons scellés, cintres type TH, béton projeté, treillis soudé Revêtement : 40cm		1,55
Terrain : Mauvaise tenue Soutènement : cintres lourds à oreilles, plaques de blindage, béton de blocage Revêtement : 40cm		2 à 2,5

 Creusement

 Soutènement

 Revêtement

NOM	Nbre Tubes / Nbre Voies	Longueur Km	Date de Construction	Coût de Génie Civil M.F.	Coût au Km M.F.	Coût au m ³ de Volume Intrados
FOURVIÈRE	2 / 4	1,7	1967 - 1973	356	105	1212 F
L'ANGESSE A ₈	2 / 4	0,08	1971 - 1973	16	100	952 F
SAINT - CLOUD (Ouv. Quatre tunnel Voies)	1 / 3	0,35	1973 - 1976	54,5	156	1837 F
DULLIN A ₄₊₃	2 / 4	1,6	1972 - 1975	144,60	45,20	531 F
L'ÉPINE A ₄₊₃	1 / 2	3,20	1972 - 1975	195,20	61	642 F
CANTAGALET A ₈	1 / 3	0,50	1972 - 1977	13,20	26,40	280 F
SAINT-PIERRE DE-FÉRIC A ₈	1 / 3	0,22	1972 - 1977	6,60	30	319 F
PESSICART A ₈	1 / 3	0,57	1972 - 1977	19	33,30	354 F
LAS PLANAS A ₈	1 / 3	1,13	1972 - 1977	70	61,90	658 F
CAP de CROIX A ₈	1 / 3	0,39	1972 - 1977	20	51,30	546 F
LA BAUME A ₈	1 / 3	0,35	1972 - 1977	1570	44,90	478 F
LES MONTS	2 / 6	0,87	1975 - 1979	72,20	41,90	517 F
DASTIA	1 / 2	0,23	1977 - 1980	17	73,90	1070 F
VUACHE A ₄₊₂	2 / 4	1,39	1979 - 1981	86,50	31,10	518 F

Figure 5

$$x \cdot 1,40 = P \times 89$$

3.2. Méthode d'estimation

3.2.1. Prix d'ordre

Les coûts kilométriques des tunnels utilisés au tout début des projets sont affectés d'imprécisions qui expriment :

- les incertitudes liées à la géologie et au comportement réel des terrains,
- les variations liées à la conjoncture sur le marché des travaux publics.

Comme il est dit plus haut, de bonnes études géologiques et géotechniques permettent de limiter ou du moins d'encadrer dans la plupart des cas la première cause de dispersion. Le deuxième facteur d'imprécision est atténué par l'analyse complète des prix d'ordre obtenus sur tous les tunnels construits en France. Il reste encore notable pour certains procédés nouveaux ou peu répandus.

La méthode employée consiste à établir, sur la base du coût réellement atteint par les ouvrages après achèvement (décompte général et définitif) et règlement des réclamations éventuelles, une répartition des dépenses en fonction des quantités de quelques grands postes caractéristiques de l'ouvrage dans les différents profils rencontrés.

Au Centre d'études des tunnels, nous avons choisi de cerner le coût global du génie civil d'un tunnel par cinq prix principaux qui représentent :

- le creusement (abatage, marinage, soutènement),
- le revêtement définitif en béton coffré,
- les coffrages (pour mise en œuvre du revêtement),
- l'étanchéité,
- la plate-forme (chaussée, trottoirs, drainage).

Le coût du mètre linéaire de tunnel sera alors obtenu en multipliant ces cinq prix par les quantités géométriques nécessaires.

A titre d'exemple, le prix d'ordre de creusement sera synthétisé en regroupant toutes les dépenses effectuées lors des travaux relatives aux :

- terrassement en souterrain,
- marinage et transport des déblais sur un kilomètre,
- la fourniture et la pose du soutènement y compris sujétions y afférentes,
- les hors profils du terrassement,
- une partie des frais d'installation et de repliement du chantier.

Toutes ces dépenses sont ensuite rapportées au mètre cube de section théorique d'abatage.

Ce prix, par contre, ne comprend pas les diverses plus-values :

- pour rampe,
- pour longueur différente de 1 km,
- pour venues d'eau,
- pour travail en site urbain,

qui sont pris en compte séparément.

Cette analyse est applicable par catégorie de terrain définie en fonction de sa tenue et donc du soutènement et du revêtement nécessaire.

L'attribution d'une catégorie est évidente pour une analyse après travaux, elle est plus délicate pour l'estimation d'un projet. A cette fin nous avons été amenés à considérer sept classes de terrain en soutènement traditionnel (fig. 6) et quatre classes en nouvelle méthode autrichienne (fig. 7).

A partir de cette classification, nous établissons des courbes de coût en fonction de la section à excaver comme on peut le voir sur la figure 8 :

- la courbe 1 correspond au terrain ordinaire ne nécessitant aucun soutènement autre qu'un grillage de sécurité (classe 1),

SOUTÈNEMENT TRADITIONNEL				
Classe	Phases d'exécution	Soutènement	Épaisseur de béton en clé	
1	Pleine section	Aucun soutènement	0 ou 30cm	
2	Pleine	Boulonnage et plaques de blindage éventuelles	Boulonnage léger en voûte (1 boulon pour 2m ² environ)	30 à 40cm
3	Demi-section	Béton projeté	Boulonnage dense en voûte (1 boulon par m ²)	40 cm
4	Demi-section	Cintres type HEB	Espacement entre cintres 1,50m	60cm
5	Section divisée	Blindage partiel	Espacement entre cintres 1,00m	60 cm
6			Espacement entre cintres 0,75m	60 cm
7	Section divisée	- Enfilage à l'avancement - Blindage du front si nécessaire		80cm

Figure 6

NOUVELLE MÉTHODE AUTRICHIENNE				
Classe	Phases d'exécution	Soutènement	Épaisseur de béton en clé	
A	Pleine ou	Boulonnage en voûte Béton projeté en voûte	<div><div>- 1 boulon pour 7m² environ</div><div>- 5cm de béton projeté</div></div> <div><div>- 1 boulon pour 4,5m² environ</div><div>- 10cm de béton projeté</div></div>	30 cm 30 cm
C	Demi-section	Boulonnage intense Béton projeté sur toute la section	<div><div>- 1 boulon pour 3,5m² environ</div><div>- 10cm de béton projeté</div></div> <div><div>- 1 boulon pour 2m² environ</div><div>- 10 cm de béton projeté</div></div>	30 cm
D		Cintres type TH en D	<div><div>- 1 cintre par ml</div></div>	30 cm

Figure 7

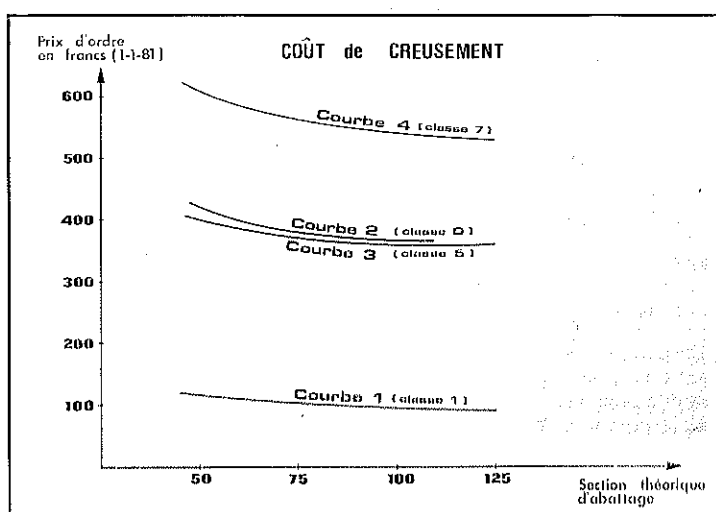


Figure 8

- la courbe 2 correspond à un terrain difficile avec pose immédiate à l'avancement du soutènement (boulonnage intense, cintre TH et béton projeté) (classe D),
- la courbe 3 correspond à un terrain difficile avec soutènement traditionnel (cintre lourd type HEB) (classe 5),
- la courbe 4 correspond à un mauvais terrain nécessitant l'enfilage à l'avancement (classe 7).

Au sujet de ces courbes qui ont été choisies parmi les plus représentatives, on peut formuler les remarques suivantes :

- le prix au mètre cube excavé est fortement influencé par la section du tunnel pour les petites sections. Cette différence provient des difficultés de travail dans un espace exigu,

- l'écart entre les courbes extrêmes est de 1 à 5. La différence réelle entre les coûts peut être bien supérieure parce que les courbes sont des moyennes et qu'elles excluent les procédés spéciaux (traitement de terrain, bouclier, etc.),

- la courbe C est une moyenne qui correspond à un espacement moyen entre les cintres (1 m). Ce coût peut varier dans de fortes proportions suivant la qualité du terrain.

L'utilisation d'une telle méthode à partir de courbes préétablies, telles que celles de l'exemple précédent, présente l'avantage d'être simple et rapide encore que cette simplicité ne soit qu'apparente. En effet, l'utilisateur de ces prix doit être capable d'apprécier correctement les classes de terrain à appliquer, les géologues et géotechniciens devront donc être étroitement associés aux estimations car eux seuls peuvent apprécier les incertitudes encore existantes et donc aider à fixer éventuellement des sommes à valoir dans des zones mal reconnues ou si un doute subsiste sur la qualité du terrain.

3.2.2. Prix unitaires

Au niveau des études finales et du lancement de la consultation, les quantités sont correctement définies et un bordereau de prix unitaires rédigé.

Il faut alors mettre un chiffre en face de chaque prix, c'est alors qu'apparaît tout l'intérêt d'une standardisation des définitions de prix de manière à pouvoir comparer ceux-ci d'un marché à un autre. Pour l'entrepreneur, cette standardisation aussi est pleine d'intérêt, il ne faut pas oublier que statistiquement une entreprise étudie de douze à quinze affaires pour en obtenir une.

Cette condition d'identité doit être satisfaite en priorité pour les prix dits significatifs ou principaux qui ont la particularité d'être répétitifs et qui présentent donc le plus grand intérêt pour les maîtres d'œuvre.

Par prix significatifs ou principaux, on entend les prix unitaires qui, associés aux quantités auxquelles ils s'appliquent, représentent un montant des dépenses au moins égal à 75 % du montant total des travaux. Dans un marché courant, une dizaine de prix suffisent, comme le montre la figure 9 représentative du marché du tunnel creusé sous la Citadelle à Bastia.

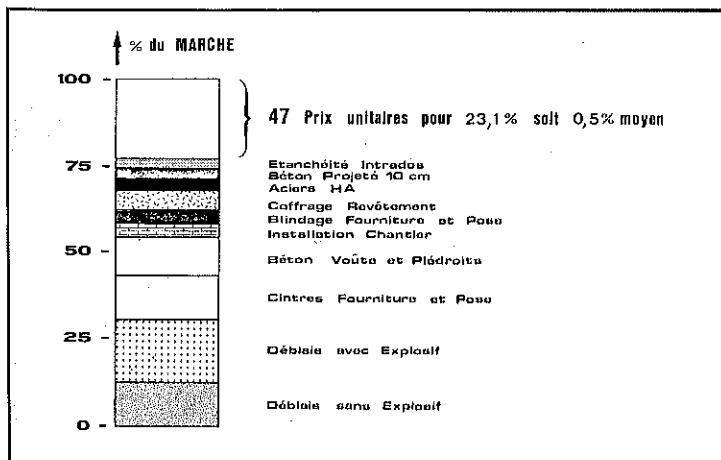


Figure 9

En général, on considérera que les prix cessent d'être significatifs en deçà d'un poids de 3 % dans un marché à la condition expresse que la quantité prise en compte ne puisse être sujette à de fortes variations à la hausse en cours de travaux.

$$\sum_{i=1}^n P_i \times Q_i = 75 \% \times M_t$$

avec
 $P_i \times Q_i \geq 3 \% M_t$
 Q_i faibles variations

Pour tous les prix non significatifs, le maître d'œuvre pourra se contenter des données brutes qu'il possède dans ses diverses séries de prix ; pour les prix principaux, il est difficile pour lui de connaître et d'étudier tous les facteurs intervenant tels que :

- importance du marché,
- taille de l'entreprise,
- quantité prise en compte,
- poids du prix dans le marché,
- situation de l'entreprise et de son carnet de commandes,
- implantation géographique de l'entreprise,
- taux d'amortissement pris en compte et rendement estimé du matériel,

- interprétations différentes du texte contractuel (en particulier dossier géotechnique et géologique),
- main-d'œuvre, etc.

De ceci résulte une grande dispersion des prix unitaires lors de la consultation. Par exemple, la figure 10 montre la dispersion importante constatée sur les prix de déblais et de revêtement d'un récent marché de tunnel. Ces prix appliqués à leurs quantités respectives représentent pourtant 51 % du montant du marché.

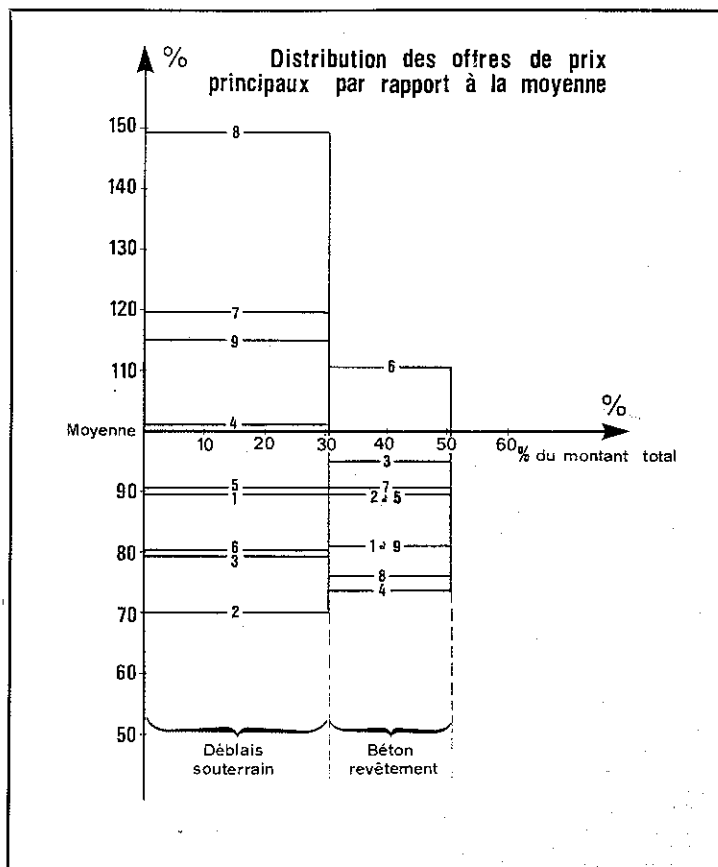


Figure 10

Ne pouvant maîtriser tous ces facteurs et leurs interactions et du fait du petit nombre de marchés relatifs aux tunnels, nous avons été conduits à utiliser des méthodes d'approche des prix différentes.

Nous citerons les plus employées :

- la méthode des prix types,
- la méthode des sous-détails.

3.2.2.1. Méthode des prix types. Cette méthode dont les fondements ont été posés il y a une dizaine d'années par le Service d'études des routes et autoroutes a été utilisée à son origine aux fins de jugement des résultats d'appels d'offres car elle permet en outre de disposer d'un moyen de mesure de la concurrence. On s'est vite aperçu que la puissance statistique de cette méthode permettait son utilisation aux fins d'estimation des prix unitaires avec une bonne précision.

Pour chiffrer un bordereau de prix, il faut en effet posséder un nombre important de données relatives aux prix, or il faut bien le dire les marchés de tunnels sont en petit nombre par rapport aux autres travaux ; la méthode des prix type s'affranchit de cet obstacle en utilisant toutes les offres des entreprises pour un marché donné plutôt que d'utiliser seulement les prix unitaires du contractant.

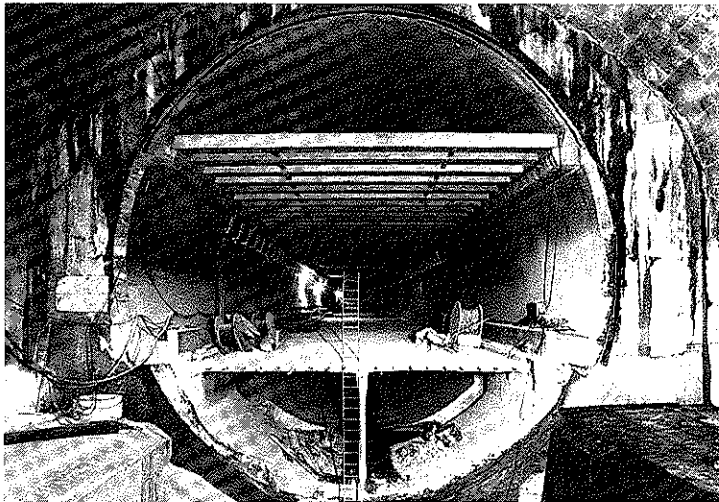
Etant donné les dispersions constatées pour un prix unitaire donné dans la série des offres, il a paru utile de rechercher un moyen **rapide et efficace** de sélection d'un prix unitaire dans la série. Ce prix appelé prix type est celui obtenu à un rang déterminé dans la série rangée dans un ordre croissant des valeurs.

La recherche des prix types devra permettre :

- de déterminer des prix qui soient l'expression de la concurrence,
- de calculer le prix limite d'un marché significatif de l'état de l'offre et de la demande,
- de disposer d'éléments comparatifs afin d'apprécier les variations de ces prix dans le temps.

Le choix d'un prix type effectué en fonction du nombre de concurrents a été conditionné par les observations suivantes effectuées par un grand nombre de consultations :

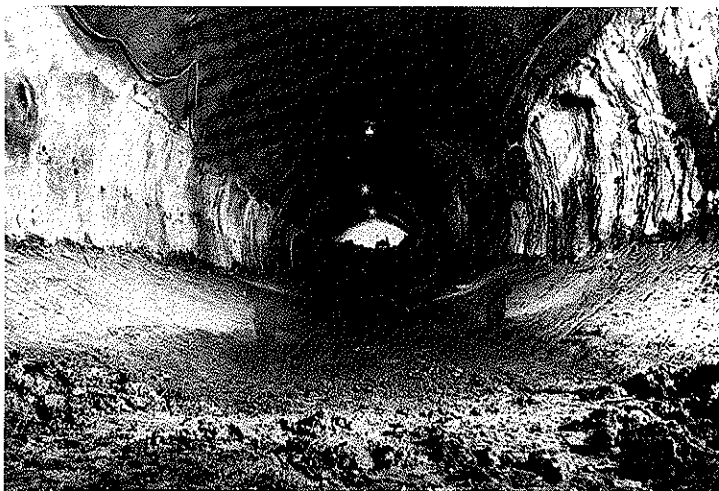
- les offres de prix n'obéissent pas à la loi de Laplace-Gauss, leur distribution en effet présente constamment une dissymétrie par rapport à



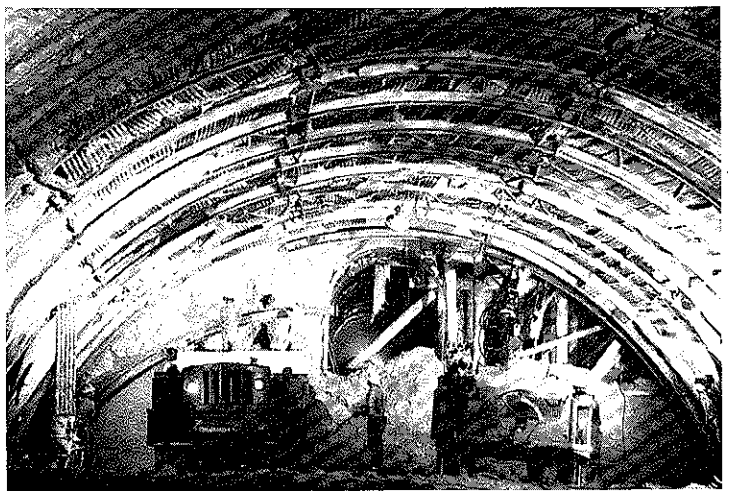
Tunnel de Fourvière (Photo Studio Villeubannais)



Tunnel sous la citadelle à Bastia



Tunnel de Las Planas, A 8 (Photo Y. Collet)



Tunnel de Cap de Croix, A 8. Pose de cintre (Photo Y. Collet)

une distribution normale et ceci pour tous les appels d'offres dépouillés à ce jour, une répartition plus gaussienne ne peut que traduire un manque de concurrence ;

- ce fait est mis en évidence par une représentation graphique des prix en fonction de leur écart type (fig. 11 et 12). Les « n » offres de chaque prix unitaire sont distribuées de part et d'autre de leur moyenne sur une échelle dont l'unité de mesure représente un écart type de la série des « n » offres, toutes les séries sont distribuées suivant une même échelle

Figure 11

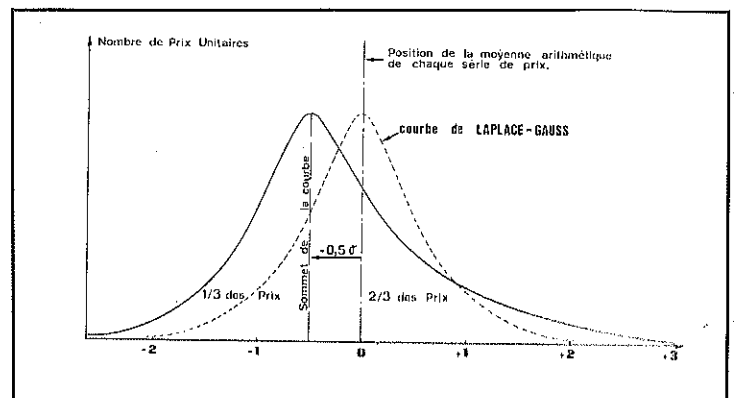
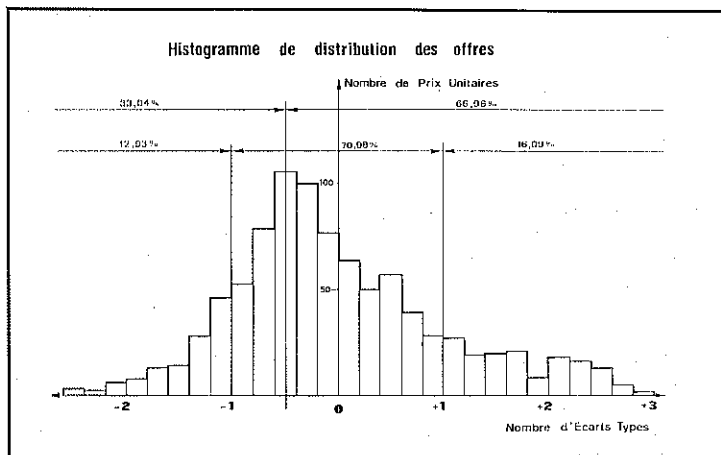


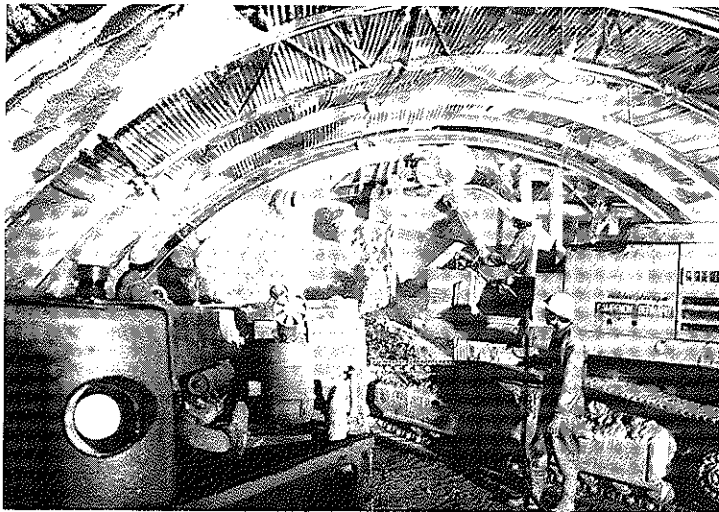
Figure 12

puis juxtaposées et totalisées. Le mode partage la distribution à raison de un tiers du côté des plus bas prix, deux tiers de l'autre (dans le cas de la loi normale, le mode est confondu avec la moyenne).

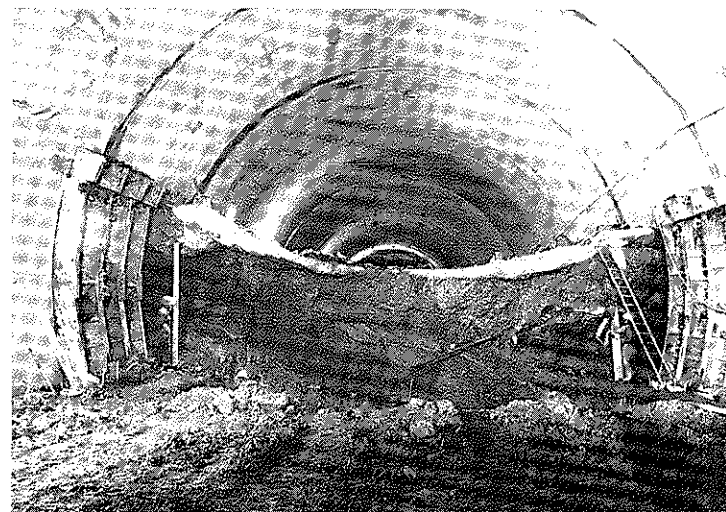
Les observations précédentes se traduisent par la formule donnant le rang du prix type dans une série classée par ordre croissant et qui est :

$$\frac{N-1}{3} + 1$$

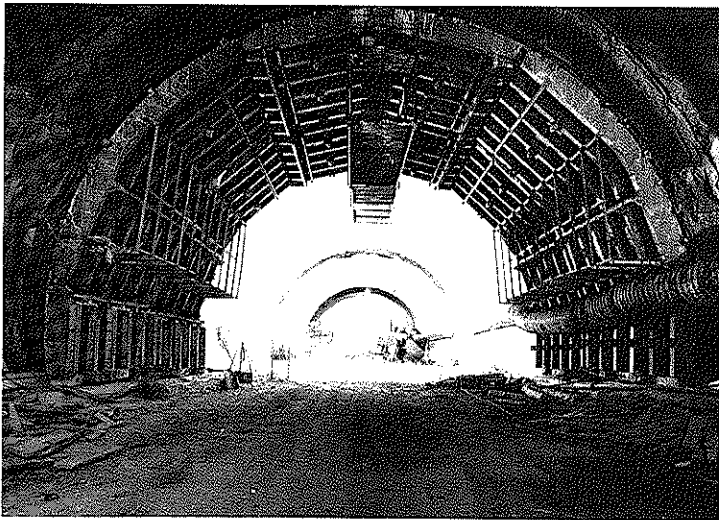
(N étant le nombre de soumissionnaires d'où un nombre d'intervalles de rang = N - 1, et la position du prix type au rang qui suit immédiatement le premier tiers de l'étendue de la série, figure 13).



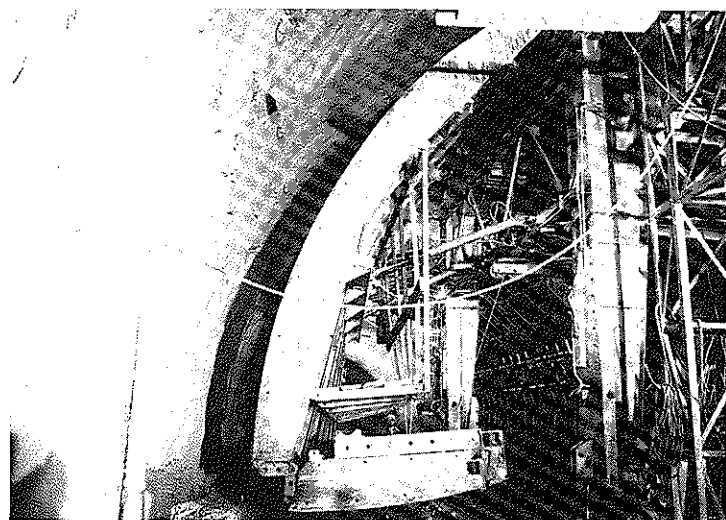
Machine à attaque ponctuelle. Tunnel de Cap de Croix, A 8 (Photo Y. Collet)



Coffrage des piédroits par plots. Vue du radier provisoire. Tunnel de Las Planas, A 8 (Photo Y. Collet)



Coffrage sans son portique. Tunnel de Las Planas, A 8 (Photo Y. Collet)



Détail d'un coffrage, A 8 (Photo Y. Collet).

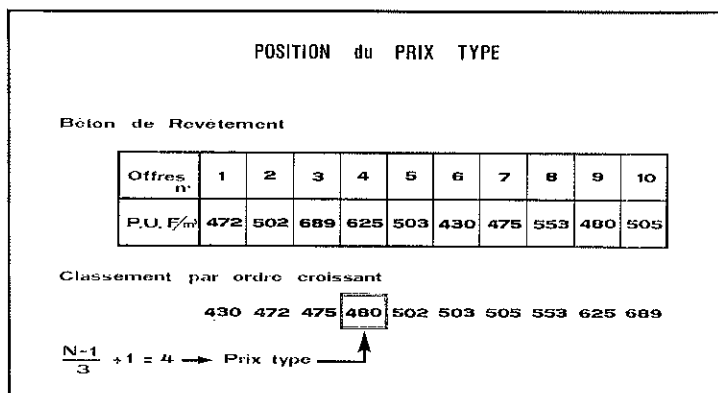


Figure 13

En définitive, le prix type résulte d'un mode de sélection empirique. C'est dans une série d'offres d'un prix unitaire le prix le plus probable puisque situé dans la zone de plus forte densité de la distribution. Il est censé tenir compte des conditions techniques, économiques, géographiques, de concurrence relative au marché étudié puisque calculé à partir de l'ensemble des offres faites.

Ainsi qu'indiqué précédemment, la position du prix type choisie permet de calculer un montant d'offre fictif ; l'évaluation obtenue donne un résultat qui est en général un peu supérieur à l'offre la moins disante. L'étude statistique des écarts moyens entre l'offre type et le moins disant sur de nombreux appels d'offres a permis de montrer que ces écarts variaient en fonction du nombre de soumissionnaires. Les prix types ajus-

tés à l'aide de ces écarts sont donc comparables entre eux puisque rendus indépendants du nombre de soumissionnaires.

Le suivi de ces prix types ajustés (appelés prix standard) permet d'évaluer dans le temps et dans l'espace leur variation.

Par ailleurs, le fait que les écarts entre montant total aux prix types et montant au moins disant suivent en fonction du nombre de soumissionnaires une loi de répartition dissymétrique analogue à celle présentée ci-dessus permet, au moment d'une estimation, si le nombre de soumissionnaires est connu, de tester le résultat final puisqu'une probabilité s'attache à chaque écart.

Cette méthode, qui n'est bien entendu pas spécifique aux marchés de tunnels, a l'avantage, à précision égale, de nécessiter un nombre plus faible d'informations qu'une méthode basée uniquement sur les prix de marchés.

3.2.2.2. Méthode des sous-détails. Cette méthode trouve dans les tunnels des conditions particulièrement favorables d'application en raison du caractère cyclique et répétitif des opérations liées à la progression des chantiers dans ces ouvrages linéaires.

Le but des études poursuivies est de fournir au maître d'œuvre des éléments d'information leur permettant d'évaluer, d'apprécier et de discuter certains postes élémentaires de dépenses constitutifs des prix principaux cités précédemment.

Les données à introduire dans le calcul sont :

- la longueur du tronçon où s'applique la méthode estimée,
- la définition géométrique qualitative des éléments constitutifs de la section,
- le comportement du terrain (temps de stabilité, type et quantité de soutènement),
- estimation des fournitures nécessaires,
- liste des matériels nécessaires,
- liste des personnels nécessaires.

Sous-détail

Désignation des prix : Q.3
Quantité prévue : 31 800 m³

Rendement estimé : 18 m³/heure

Composant du prix (matériel, main-d'œuvre et fournitures) (travaux sous-traités)		U	Quantité ou durée d'utilisation	Matériel				P.U. Main-d'œuvre **	P.U. Fournitures et prestations	Total	Sous-traitant	
Nbre	Désignation			Amortissement 1	Gros entretien 2	Consommables * 3	P.U. 1+2+3				P.U.	Total
Main-d'œuvre												
1	CE	9										
1	conducteur centrale	9										
4	chauffeurs	36										
10	maçons	90										
4	aides	36										
	Pour 144m³	180 h	h	1,25				50,50		63,10		
Matériel												
	centrale	h	0,06	50,81	17,82	42,37	111			6,16		
	camion malaxeur	h	0,20	31,97	7,88	47,15	87			17,40		
	pompe	h	0,12	22,00	3,10	35,50	60,60			7,27		
Fournitures												
	ciment	t	0,325						225	73,13		
	agrégats	t	2,00						41	82		
	divers									36,14		

* Le poste consommables comprend : les carburants, pneumatiques, lubrifiants
** Prix pondéré moyen de l'équipe

	Total (1)	287,70	Total (2)	
Frais généraux				
% du total (1)		88,56		
% du total (2)				
	Total (3)	374,26	Total (4)	
Aléas et bénéfice				
% du total (3)	Total (3)	11,24	Total (4)	
% du total (4)				
TOTAL		385,50		

Prix de vente total hors taxes : 385,50 F/m³

Figure 14

Une estimation de l'avancement réalisable et des temps d'arrêt permet d'établir avec les éléments précédents le coût direct des diverses tâches faisant l'objet de prix unitaires.

Cette méthode a l'avantage de pouvoir s'appliquer à des procédés nouveaux et elle permet de préparer le suivi ultérieur des travaux.

Elle nécessite de celui qui l'applique :

- une bonne connaissance pratique des chantiers,
- une connaissance suffisante du matériel spécifique aux travaux souterrains, des taux de pannes et des durées d'amortissement généralement pratiquées par les entreprises,
- la connaissance des charges d'emploi de la main-d'œuvre (primes spécifiques),
- des archives basées sur des mesures de temps élémentaires de cycle et de composition d'équipes recueillies sur des chantiers analogues.

A titre d'exemple, on donne les valeurs moyennes du cycle type sur la partie française du tunnel routier du Fréjus d'une section excavée en une seule phase de 90 m² pour une zone ayant une vingtaine de boulons à ancrage ponctuel au mètre (dont une quinzaine ont 4,65 m de long) pour des volées de 4,2 m de longueur :

- tir et ventilation : 0,5 h
- marinage et purge : 3,5 h
- boulonnage : 2,0 h
- pose de grillage de protection : 1,0 h
- forage de la volée : 2,5 h
- chargement de la volée : 1,5 h

Temps moyen : 11,0 h

Cet exemple est celui d'un chantier où le matériel pour la perforation a des performances élevées.

Dans le cas de l'exécution de la demi-section supérieure d'un tunnel autoroutier d'une surface de 50 m² (la section totale ayant plus de 100 m²) dans des calcaires broyés nécessitant la pose de cintres lourds HEB 180, un blindage métallique avec bourrage par béton des hors profils derrière les blindages, le cycle s'analyse ainsi, la section centrale ayant un pas de 1,5 m d'avance sur les deux sections latérales :

- tir et ventilation : 0,5 h
- marinage et purge : 1,5 h
- mise en place HEB 180 : 2,0 h
- mise en place simultanée du blindage et du béton de bourrage : 6,5 h
- forage de la volée : 2,0 h
- chargement de la volée : 1,0 h

Temps moyen : 13,5 h

L'avancement moyen est de 2,65 m/jour.

Il est à noter que le temps passé à la pose des cintres n'est pas proportionnel à leur poids et doit s'analyser dans chaque cas en fonction du mode de mise en place, des calages et des entretoisements. Il comporte une forte proportion de manipulations indépendantes du poids du cintre pour une dimension donnée.

Pour la même demi-section mais dans un calcaire ne nécessitant que trois boulons de 3 m au mètre linéaire, le cycle se décompose ainsi :

- tir et ventilation : 0,5 h
- marinage et purge : 2,5 h
- pose des boulons : 2,0 h
- forage de la volée : 2,0 h
- chargement de la volée : 1,0 h

Temps moyen : 8,0 h

Pour des volées de 3,3 m de longueur, on réalise un avancement de 10 m/jour, ce qui constitue presque le maximum possible avec cette technique.

Ces exemples montrent bien une des difficultés de l'estimation à partir d'une synthèse des prix qui est d'estimer l'incidence sur les rendements (ou les cadences d'avancement) des modifications des conditions géotechniques qui ne sont pas toujours connues. Ces incertitudes ont d'ailleurs fait l'objet d'une étude (MM. Margason et Pocok, 1970) qui vise à quantifier et à étudier les conséquences de ces variables sur la marche du chantier.

Une fois les cadences retenues, l'estimateur peut calculer le prix de revient sec. Ce qui, résultant de l'étude, ne contient aucune majoration pour l'ensemble des frais généraux, taxes, assurances et bénéfices.

L'estimateur doit donc connaître, en plus, les entreprises qui sont susceptibles de soumissionner en fonction de la taille du marché. En effet, pour ces frais, de multiples combinaisons sont possibles selon l'importance de l'entreprise, son organisation, son fonctionnement et la nature de la tâche évaluée (s'il s'agit de fourniture ou de sous-traitance, les frais généraux correspondants sont nettement inférieurs à ceux appliqués à des travaux correspondant à une valeur ajoutée par l'entreprise). Enfin, le coefficient à appliquer aux prix sec dépend naturellement de la répartition ou non du personnel d'encadrement, du matériel « indivis » (matériel que l'on peut répartir sur les prix unitaires).

Pour faciliter ce travail et afin d'apprécier entre elles différentes offres, un cadre type de sous-détail de prix a été établi, il est imposé aux soumissionnaires, ce qui permet de collecter un nombre important de renseignements comparables (fig. 14).

4. Conclusion

Nous ne voudrions pas conclure sans parler d'un phénomène qui vient compliquer le travail de l'estimateur, l'évolution des coûts dans le temps.

On peut noter plusieurs facteurs venant tempérer l'évolution inflationniste actuelle :

- matériaux et procédés nouveaux,
- meilleure connaissance des propriétés des terrains,
- expérience des ingénieurs,
- développement du nombre des ouvrages souterrains.

La mécanisation des chantiers a eu un effet bénéfique sur les coûts de creusement et de boulonnage dans les terrains homogènes et résistants (exemple figure 15, progrès dans la foration) ; par contre, dans les mauvais terrains, l'emploi relativement important de main-d'œuvre nécessaire fait que les coûts tendraient à l'augmentation (cas des tunnels urbains).

Les tendances dans l'évolution des prix s'ajoutent en surimpression aux éléments évolutifs traditionnels.

D'une manière générale, on constate que :

- le coût de creusement en terrain autostable croît moins vite que les indices,
- le coût du génie civil des tunnels rapporté au mètre cube (cf. figure 5) évolue presque comme les indices tout en restant inférieur.

C'est pourquoi, l'analyse des variations des prix demande beaucoup de circonspection.

L'analyse des prix est donc une fonction permanente du maître d'œuvre et chaque affaire doit être étudiée très en détail au moins pour les prix principaux (cf. § 3.2.2.) avant d'établir une estimation définitive.

Bibliographie

- Détermination du degré de précision d'une estimation. M. TROUDE, *Annales ITBTP*, octobre 1979.
- Délais et coûts d'exécution des tunnels. Dr Max HERZOG, *Strasse und Verkehr*, janvier 1980.
- AIPCR. Compte rendu de la séance réservée au comité technique des tunnels routiers. *RGRA*, juin 1980.
- Définition et structure des prix. MM. BERTIN, GIRARDOT, STEPHAN. Formation permanente, fascicules 5 et 6 groupées, *RGRA*, 1976.
- Modèle de calcul des coûts d'un tunnel. H. EINSTEIN, F. MOAVENZADEH, *Schweizerische Bauzeitung*, octobre 1977.
- Coût des tunnels et les apports de la mécanique des roches. L. ROCHET, *Bulletin de liaison des laboratoires des P. et C.*, janvier-février 1971.
- Calcul et contrôle des prix dans les entreprises de bâtiment et de travaux publics. R. TOFANI. Editions du Moniteur.
- Dossier pilote des tunnels. Centre d'études des tunnels, ministère des Transports, édition 1976.
- L'analyse statistique des offres dans les marchés avec les collectivités publiques. Y. HEDUY, *Revue française de recherche*, op n° 37, 1965.
- Dossier de formation des prix, SETRA, 1978.
- Exploitation des prix unitaires. A. DUPONT, rapport de fin d'étude INSA, 1974.
- Etude préliminaire du coût de construction de tunnel. MM. MARGASON, POCK, TRRL, Crowthorne, Berkshire (G.B.), 1970.

m/h dans du granite Suédois

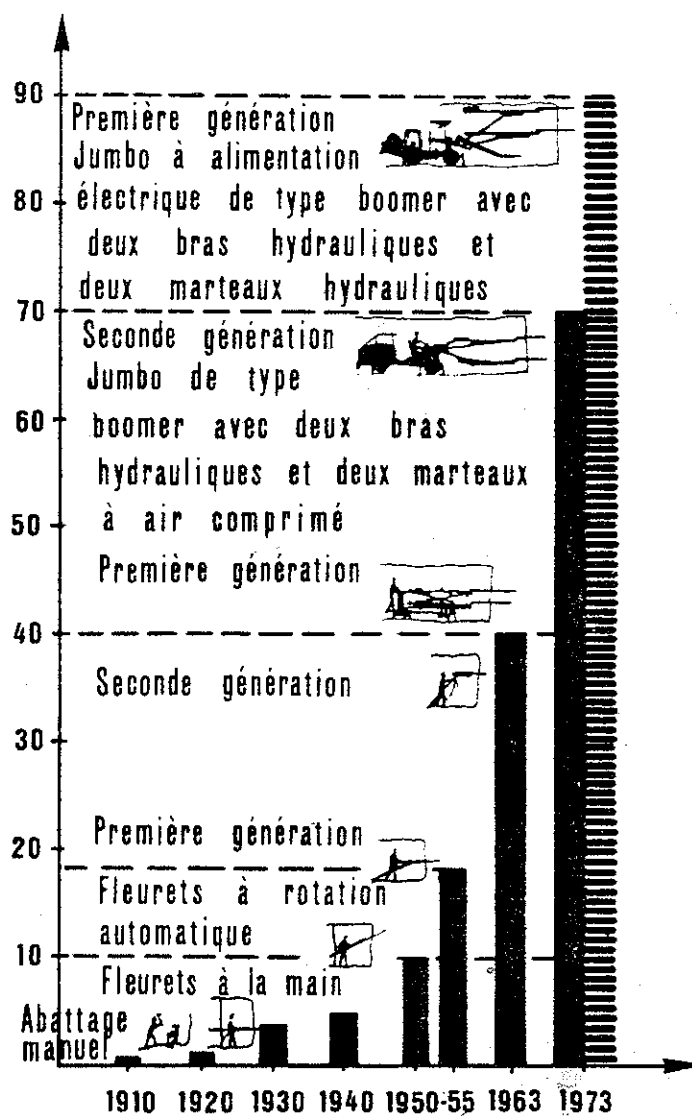


Figure 15

Construction et exploitation en terrains difficiles et dans des espaces restreints : l'exemple du contournement autoroutier de Nice. H. MAILLANT, 43^e Congrès annuel de l'IBTTA.

Les estimations prévisionnelles aux différents niveaux des études, B. CONSTANTIN, Journées d'études AFTES, Nice 1981.