

Académie royale
des
Sciences coloniales
—
CLASSE
DES SCIENCES TECHNIQUES
—
Mémoires in-8°. Nouvelle série.
Tome IX, fasc. 3.

Koninklijke Academie
voor
Koloniale Wetenschappen
—
KLASSE
VOOR TECHNISCHE WETENSCHAPPEN
—
Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks.
Boek IX, aflev. 3.

Incidence des déblais rocheux sur l'aménagement hydroélectrique du site d'Inga

PAR

J. LAMOEN

PROFESSEUR AUX UNIVERSITÉS DE BRUXELLES ET DE LIÈGE
ADMINISTRATEUR DE L'INSTITUT NATIONAL
D'ÉTUDES POUR LE DÉVELOPPEMENT DU BAS-CONGO,
MEMBRE DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES COLONIALES



Rue de Livourne, 80A,
BRUXELLES 5

Livornostraat, 80A,
BRUSSEL 5

1959

PRIJS: F 55
PRIX :



**Incidence des déblais rocheux
sur l'aménagement
hydroélectrique du site d'Inga**

PAR

J. LAMOEN

PROFESSEUR AUX UNIVERSITÉS DE BRUXELLES ET DE LIÈGE,
ADMINISTRATEUR DE L'INSTITUT NATIONAL
D'ÉTUDES POUR LE DÉVELOPPEMENT DU BAS-CONGO,
MEMBRE DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES COLONIALES

—————
Mémoire présenté à la séance du 30 janvier 1959.
—————

Académie royale
des
Sciences coloniales
—
CLASSE
DES SCIENCES TECHNIQUES
—
Mémoires in-8°. Nouvelle série.
Tome IX, fasc. 2.

Koninklijke Academie
voor
Koloniale Wetenschappen
—
KLASSE
DER TECHNISCHE WETENSCHAPPEN
—
Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks.
Boek IX, alev. 2.

Les syénites métasomatiques du massif de Kirumba.
Contribution à la lithogénèse des volcans du Kivu
(Congo belge)

PAR

Marcel-E. DENAEYER

ERRATA

	<i>au lieu de</i>	<i>lire</i>
p. 19, 11 ^e ligne du bas	JÉRÉMIE	JÉRÉMINÉ
p. 93, 1 ^{er} schéma du bas de la page	$\Sigma_b > 6.35$ < 18.75	$\Sigma_b > 6.25$ < 18.75
p. 102, 3 ^e et 4 ^e lignes du bas	énergique	énergétique
p. 103, dans l'équation (1)	microline	microcline
p. 137, 17 ^e ligne du haut	(56.863)	(56.263)
p. 156, 12 ^e ligne du haut	absence	l'absence.
pp. 158, 159 et 160	plusieurs noms de minéraux ne sont pas correctement placés au-dessus des formules correspondantes. Le lecteur rétablira aisément la disposition convenable.	
p. 191, 6 ^e ligne du haut	à sodalite	à sodalite bleue
p. 217, 3 ^e ligne du bas	Nicolis	Nicols
p. 221, 4 ^e ligne du haut,	<i>supprimer (A)</i>	
p. 229, 1 ^{re} ligne du bas	Bussashire,	Bushashire
p. 230, 7 ^e ligne du bas	ANALYSE EXTRAITE	ANALYSES EXTRAITES

Académie royale
des
Sciences coloniales
—
CLASSE
DES SCIENCES TECHNIQUES
—

Mémoires in-8°. Nouvelle série.
Tome IX, fasc. 1.

Koninklijke Academie
voor
Koloniale Wetenschappen
—
KLASSE
DER TECHNISCHE WETENSCHAPPEN
—

Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks.
Boek IX, aflev. 1.

Les Mines d'or du 5^e parallèle

PAR

G. SCHAAR

ERRATA

p. 89 Remplacer le tableau 6 par :

	Débit l/sec	Pression kg/cm ²	Puis- sance to- tale en ch théor.	Coût to- tal en 1000 F	Coût par l/sec	Coût par ch théor.
1 ^{er} projet	450	10	600	9000 ⁽¹⁾	20.000 ⁽¹⁾	15.000 ⁽¹⁾
2 ^e projet	700	4,5	420	22000	31.500	40.000
Variante du 2 ^e projet ⁽²⁾	6	6	560	18500	26.500	33.000
3 ^e projet	1620 ⁽³⁾	6	1300	7500	4.600	5.800

⁽¹⁾ Il s'agit de francs de 1939.

⁽²⁾ Une partie des tuyaux remplacés par des tronçons de *race*.

⁽³⁾ Le débit utile de 1620 l/sec résulte du débit de 1800 l/sec, diminué de 10% pour tenir compte des pertes en *race*.

in fine

Légende de la fig. 1, 9^e ligne :
remplacer H'₁, H'₂, H'₃ par H₁, H₂, H₃.

Légende de la fig. 3, 7^e ligne :
remplacer MANNIGS par MANNING.

Incidence des déblais rocheux sur l'aménagement hydroélectrique du site d'Inga

I. INTRODUCTION *

Dans le cadre des études relatives à l'aménagement hydroélectrique du site d'Inga, un arrêté royal, daté du 4 décembre 1957, a créé l'Institut national d'Études pour le Développement du Bas-Congo.

Le premier objet de cet organisme est d'étudier — en faisant éventuellement appel à des institutions publiques ou privées spécialisées — l'ensemble de l'équipement hydroélectrique des rapides du fleuve Congo à l'endroit précité.

Sa création a été la conséquence logique des travaux du Comité d'Experts, institué en avril 1957 par M. le ministre des Colonies A. BUISSET, pour émettre un avis sur les quatre avant-projets d'équipement déposés au début de ce mois par les bureaux d'études CADIC, COMINIÈRE-HARZA, SYDELINGA et VATTENBYGGNADSBYRÅN. Ce Comité, présidé par M. le professeur F. CAMPUS — actuellement président de l'Institut national d'Études pour le Développement du Bas-Congo — et composé pour moitié de personnalités belges, d'une part, et, d'autre part, étrangères appartenant à des pays aussi différents que le Canada, les États-Unis d'Amérique, l'Italie, la Norvège et la Suisse, eut à remplir une mission lourde et délicate en un temps limité à six mois. Dans ces conditions, il fallait s'attendre à ce que d'éventuelles diver-

* Pour plus de détail, voir 4, p. 45.

gences de vues ne fussent que difficilement aplanies au moment du dépôt du rapport final.

Des opinions inconciliables furent effectivement exprimées sur un point entrant directement dans la mission des experts. Cette dernière consistait entre autres à rendre homogènes les prix unitaires préconisés par les quatre bureaux d'études précités pour chaque type de travail, de manière à faire apparaître l'avant-projet fournissant le kWh le moins cher pour une puissance installée qui ne soit pas trop élevée.

Les prix proposés par l'un des experts pour les excavations en terrain rocheux et qui furent utilisés pour ladite homogénéisation étaient les suivants :

Fouilles de terrassement en rocher à ciel ouvert :	111 FB /m ³ ,
Excavation en rocher en galerie (sans étayage) :	480 FB /m ³ ,
» » » » puits :	770 FB /m ³ ,
» » » pour usines et salles de transformation souterraines :	530 FB /m ³ ,

ce qui donnait pour les deux premiers de ces prix un rapport $R = \frac{480}{111} = 4,3$. Cette valeur fut jugée excessive

par un autre expert. Celui-ci signalait que son expérience personnelle des aménagements en Norvège, comprenant de grandes tranchées à ciel ouvert, ainsi que des tunnels et cavernes de grandes sections (65 à 75 m²) ne confirmait pas la valeur de ce rapport. Celui-ci y était compris entre 2 et 2,6. De plus, le prix du m³ d'excavation en tunnel y dépendait beaucoup de la section transversale de l'ouvrage. Pour les tunnels envisagés à Inga, dont les sections sont beaucoup plus importantes que celles des tunnels norvégiens auxquels cet expert se référerait, des prix encore plus bas pourraient être atteints.

Son opinion était d'ailleurs étayée par des données venant de Suède. On peut s'en convaincre en consultant les prix remis par le bureau d'études VATTENBYGGNAD-SBYRÅN de Stockholm :

— Excavation de roche dans de grandes sections, en plein air, y compris une longueur de transport de 1,5 km en moyenne : 160 FB/m³.

— Excavation de roche en galerie souterraine :

Section 54 m² : 470 FB/m³,

» 100 m² : 435 FB/m³,

» 250 m² : 340 FB/m³.

Le Comité d'Experts ayant finalement préconisé l'utilisation de la vallée Van Deuren en première phase de l'aménagement du site, la valeur du rapport R serait déterminante dans le choix du projet d'exécution proprement dit. Des tunnels de grande section peuvent en effet être creusés à un bas prix de revient dans la zone des rhyolites au sud-ouest de la vallée, ce qui favorise les solutions restituant les eaux turbinées au fleuve par galeries souterraines plutôt que par canal à ciel ouvert.

Comme la quote-part des travaux de déblais rocheux dans le coût direct de l'équipement de la vallée Van Deuren (environ 800.000 kW garantis au départ de la centrale) dépasse 20 % et que les immobilisations correspondantes s'élèvent à près de 1.400 millions de francs belges, l'Institut national d'Études pour le Développement du Bas-Congo a estimé que la controverse portant sur leur coût devait être éclaircie.

Dans ce but, il a constitué en mai 1958 un Comité dit des « déblais rocheux » que l'auteur a eu l'honneur de présider, et comprenant :

— M. P. DEMART, professeur à l'Université libre de Bruxelles ;

— M. L. BRISON, professeur à la Faculté polytechnique du Hainaut à Mons ;

— M. A. DOYEN, ingénieur en chef-directeur des Ponts et Chaussées au Ministère des Travaux Publics et de la Reconstruction.

Après avoir étudié les documents leur remis par l'Institut, notamment le Rapport des Experts et les résultats des recherches déjà effectuées sur place, le Comité des Déblais rocheux a préconisé des travaux complémentaires sur le terrain et notamment l'exécution de forages supplémentaires ainsi que l'ouverture d'une carrière expérimentale et de galeries et de chambres souterraines. Ces travaux avaient entre autres pour but :

- a) De se rendre compte de l'aptitude de la roche à la foration et aux tirs de mines ;
- b) D'étudier la tenue de la roche ;
- c) De recueillir le maximum de renseignements sur la fragmentation, les consommations diverses (explosifs, fleurets), etc.

Le Comité a établi, à la demande de l'Institut, les prescriptions techniques nécessaires pour lancer les appels d'offres.

En vue d'éclaircir la controverse sur le coût des excavations rocheuses et notamment le rapport entre les coûts à ciel ouvert et en souterrain, il y avait lieu de tenir compte de l'évolution très rapide qui s'est produite ces dernières années dans la technique d'exécution des galeries, surtout dans les moyennes et grandes sections, dont la réalisation n'a d'ailleurs pu être envisagée qu'en vertu de ces nouvelles techniques.

Il s'indique également de signaler que le procédé du boulonnage des roches remplaçant, dans la plupart des cas, le soutènement traditionnel par boisage et cintres, permet des économies très sensibles et des avancements accrus.

Afin de questionner des spécialistes en travaux importants et récents d'excavation et d'obtenir ainsi le maximum de renseignements utiles, il fut décidé que plusieurs aménagements hydroélectriques en cours d'exécution ou, à défaut, nouvellement mis en service seraient visités.

Le chapitre suivant est relatif aux voyages d'études entrepris à l'initiative soit de l'Institut, soit des membres du Comité.

II. VOYAGES D'ÉTUDES.

Les voyages d'études du Comité des Déblais rocheux ont pu se faire en un temps très court et avec le maximum d'efficacité grâce aux bons offices d'organismes et de firmes étrangères qui les ont toujours organisés de façon parfaite, à savoir :

Pour la Suisse : la S. A. Electrowatt, à Zürich ;

Pour la Suède : le Vattenbyggnadsbyrå (V.B.B.), de Stockholm ;

Pour l'Espagne : la firme Widmark et Platzer de Stockholm, et la S. A. espagnole Iberduero ;

Pour la France : l'Ambassade de France à Bruxelles avec la collaboration du Centre National du Commerce extérieur à Paris, de l'Électricité de France et de la Compagnie Nationale du Rhône.

Le Comité s'est borné à visiter uniquement des chantiers comportant d'importants déblais rocheux à ciel ouvert, et des excavations souterraines de sections fort différentes mais toujours de volumes élevés, à savoir :

1. En Suisse : Le barrage de Mauvoisin.
La centrale souterraine de Fionnay.
La centrale de Nendaz, de la Grande Dixence.
Le bassin de la Lizerne.
Les galeries de Fionnay-Rhône, de la Grande Dixence.

La centrale en caverne de Göschenen, dans l'Uri.

2. En Suède : Les aménagements hydroélectriques de Ramsele, de Korssselbränna, de Bjurfors-Nedre, de Harrsele et de Stofnörrens.

Les trois dernières installations se rapportent à la mise en valeur de la rivière Ume qui se jette dans le golfe de Botnie à Umea.

3. En Espagne : L'aménagement de la chute d'Aldeavila sur le Douro international.
4. En France : Les travaux sur la Durance au barrage de Serre-Ponçon et pour l'aménagement de la chute de Jouques.
L'aménagement des chutes de Montelimar et de Loriol sur le Rhône en amont de Donzère-Mondragon.

A l'occasion d'un voyage en Afrique, un des membres du Comité s'est rendu au site d'Inga pour procéder sur le terrain à d'utiles observations, notamment à la petite galerie creusée antérieurement dans la vallée Van Deuren et sur les essais d'injection de ciment en cours à cette époque. L'examen a également porté sur le choix de l'emplacement de la carrière expérimentale et sur la surface du terrain du fond de la vallée Van Deuren.

* * *

Il n'entre pas dans le cadre du présent mémoire de décrire les installations visitées, ni de donner le détail des renseignements recueillis, dont certains d'ailleurs n'ont été communiqués qu'à titre confidentiel.

Les publications citées *in fine* en bibliographie permet-

tent de se rendre compte, dans la plupart des cas, de la nature et de l'importance des travaux.

Ceux-ci comportent en ordre principal :

1. Pour les déblais à ciel ouvert :

a) Le creusement de canaux de fuite et de chenaux de dérivation.

b) Des abattages en masse pour la réalisation des ancrages de rives des ouvrages de retenue et des têtes de prise d'eau des installations.

2. Pour les déblais en souterrain :

a) Des tunnels sensiblement horizontaux, dont la section à roche nue varie de 10 à 400 m², pour galeries d'amenée, galeries de fuite, accès, etc. ;

b) Des puits verticaux ou inclinés pour la réalisation de conduites forcées ;

c) Des cavernes pour salles de machines, salles de transformation, chambres d'équilibre et chambres de vannes.

Sur chaque chantier et pour chaque type d'excavation, le Comité a rassemblé le maximum de renseignements sur l'organisation, les phases d'exécution, le matériel utilisé, le travail en lui-même ; les diverses consommations, le transport, les avancements, prix, etc...

Il s'est également efforcé de recueillir tous les éléments permettant d'apprécier les prix en tenant compte des facteurs locaux.

Les conclusions du Comité sont résumées dans le chapitre III.

III. CONCLUSIONS DU COMITÉ

A. Alignement des prix de revient d'excavations souterraines.

1. TUNNELS.

Le Comité s'est limité à une tentative d'alignement des prix suisses sur les prix suédois, car les chantiers visités dans ces deux pays sont directement comparables comme matériel, organisation, etc... Les chantiers espagnols, au contraire, se trouvent dans des conditions très particulières par suite des restrictions apportées au choix du matériel et de la tendance qui s'y manifeste de recourir plus largement à une main-d'œuvre à très bas salaires. Il n'a pas, d'autre part, été tenu compte des prix français par suite des nombreuses modifications du cours du franc français.

En Suisse, le salaire horaire est moitié moindre qu'en Suède, mais l'économie de personnel n'y est pas toujours aussi poussée. Par contre, l'explosif coûte de 30 à 50% en plus, et il est manifeste qu'on y recourt plus parcimonieusement dans certains grands travaux.

Ces deux différences — d'ailleurs légères — tendent à se compenser, et l'erreur n'est pas grande de considérer, pour tenter un alignement des prix, que la consommation d'explosifs et l'intervention de la main-d'œuvre sont les mêmes en Suisse et en Suède, pour une section de galerie donnée.

Il est utile de souligner au préalable que les prix unitaires relativement bas actuellement atteints résultent d'une part du perfectionnement des techniques et d'autre

Tableau I. — Prix de revient en Suède,
y compris 20% de frais généraux de chantier.

Endroits	Section m ²	Prix FB	Explo- sifs kg/m ³	M.O. h/m ³	Observations
<i>A. Tunnels (sans soutènements ni ancrages)</i>					
Korsselbränna (galerie d'accès)	35	440	1,16	1,3	Grauwackes mé- tamorphisées et schistes alunifè- res
<i>Id.</i> (tunnel de jonction)	54	360	1,29	1,05	<i>idem.</i> , mais pas- ses de forage plus grandes
Stornörrfors (fenêtres)	54	447,5	—	—	granit
Bjürfors Nedre (calotte)	75	380	1,40	—	granit fracturé
Harrsele (1 ^{re} tranche)	130	—	0,84	0,80	granit et gneiss
Stornörrfors (tranche supé- rieure de la grande galerie)	170	300	0,80	0,72	granit
Bjürfors Nedre (section totale)	260	252	0,80	—	granit fracturé et altéré
Harrsele (section totale)	260	210 et 286	0,72	—	granit et gneiss (une longueur de 400 m a dû être bétonnée)
Stornörrfors (tranches I et II grande galerie)	295	255	0,71	0,55	granit
Stornörrfors (section totale)	400	233	0,65	0,49	granit
<i>B. Puits verticaux</i>					
Stornörrfors (en montant, préparations)	4 à 5	1.960	3,0	—	granit
<i>Id.</i> (section finale)	64	690	1,2	—	granit

Tableau I — Prix de revient en Suède,
y compris 20% de frais généraux de chantier (*suite*).

Endroits	Section m ²	Prix FB (1)	Explo- sifs kg/m ³	M.O. h/m ³	Observations
<i>C. Cavernes pour centrales, etc...</i>					
Stornörrfors (tranche supérieure)	150	555	0,80	—	granit
<i>Id.</i> (section totale)	500	410	0,65	—	
<i>Id.</i> (tranche inférieure)	350	350	0,58	—	
<i>D. A ciel ouvert</i>					
Canal de fuite Stornörrfors roche	410	163,5	0,55	—	sur 580.000 m ³
<i>Id.</i> (terre meuble)	1350	33,6	—	—	sur 1.300.700 m ³

part — et d'une façon prépondérante — des progrès de l'organisation du travail.

Grâce à ces derniers, dans les vingt dernières années, le prix par m³ excavé a seulement doublé, tandis que les salaires ont sensiblement quadruplé.

L'intervention du travail humain par m³ excavé (y compris les travaux accessoires) dans des chantiers souterrains bien organisés peut être caractérisée, d'après les observations relevées en Suède, par le *tableau I*, qui donne également les consommations d'explosifs par m³, ainsi que les prix de revient y compris 20% pour frais généraux de chantier.

Ce tableau est résumé, en ce qui concerne l'indice de main-d'œuvre et la consommation d'explosifs, par les deux graphiques des *figures 1* et *2*.

Sur le graphique à double échelle logarithmique de la *figure 2*, on remarquera que les indices de main-d'œuvre et de consommation d'explosifs en fonction de la section des tunnels sont représentés par des droites, avec une

(1) Basé sur le change : 1 couronne suédoise = 10 FB.

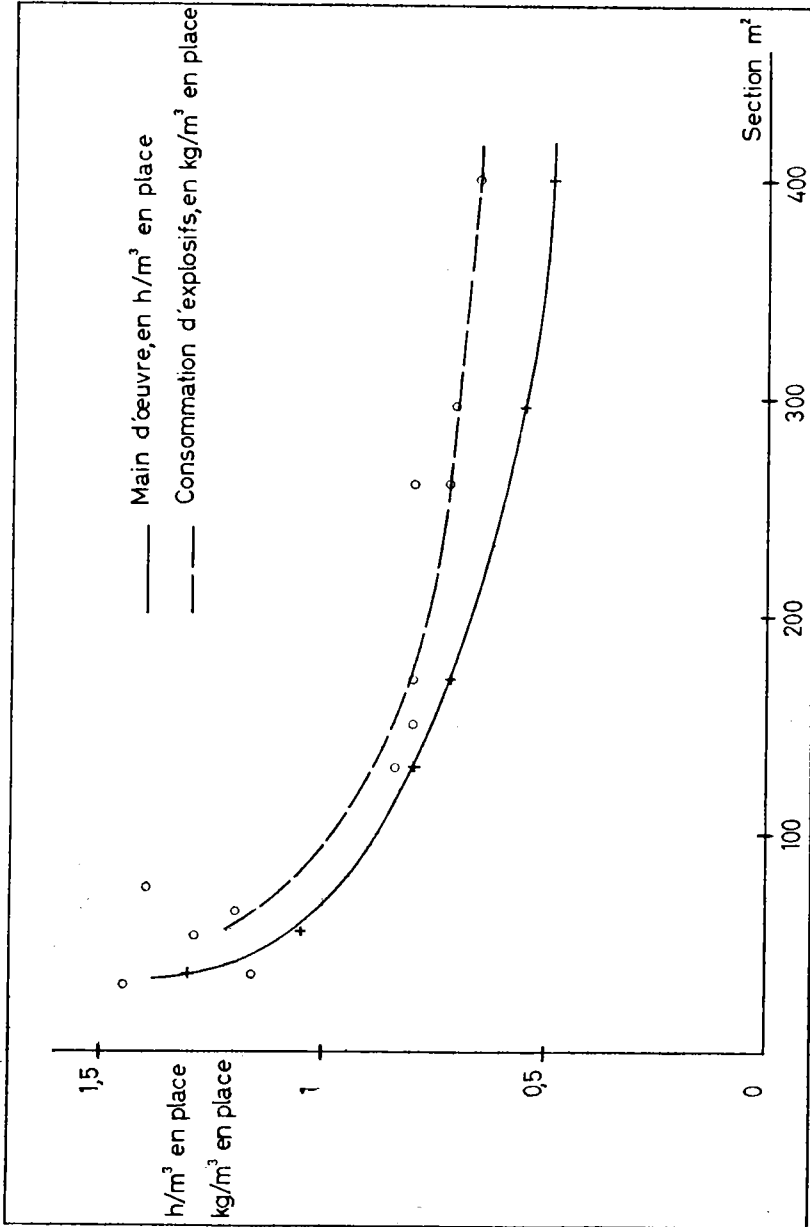


Fig. 1. — Tunnels suédois. Coefficient main-d'œuvre et consommation d'explosifs.

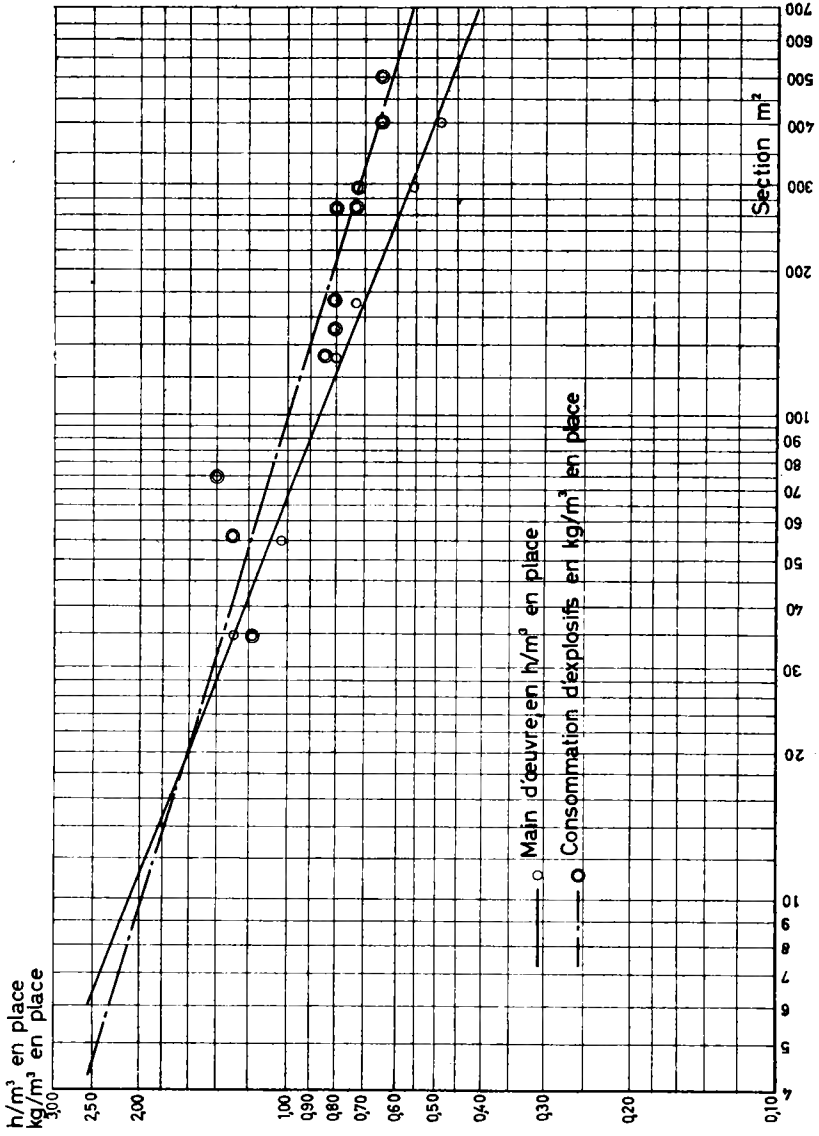


Fig. 2. — Tunnels suédois. Coefficient main-d'œuvre et consommation d'explosifs (échelles logarithmiques).

dispersion pratiquement nulle en ce qui concerne la main-d'œuvre, mais avec des écarts qui, sans être exagérés, sont plus élevés en ce qui concerne les explosifs (surtout dans les faibles sections).

Ceci tendrait à démontrer que, pour des chantiers bien organisés, comme c'est le cas en Suède, le coût de la main-d'œuvre ne dépend pratiquement que de la section excavée, tandis que la consommation d'explosifs est influencée non seulement par la section mais également par la nature du terrain. Cette nature du terrain aurait d'autant plus d'influence que la section serait plus faible.

Détermination des fonctions.

Main-d'œuvre.

$$\text{Log } M = \text{log } M_o - k_m \log \left(\frac{S}{S_o} \right) \quad (1)$$

M = indice de main-d'œuvre en h/m^3 pour une section S en m^2 .

M_o = indice de main-d'œuvre pour une section S_o de référence (par exemple, 10 m^2).

k_m = coefficient dépendant de l'organisation (tangente de l'angle d'inclinaison de la droite).

L'équation (1) peut se mettre sous la forme

$$M = M_o \times \left(\frac{S_o}{S} \right)^{k_m}$$

$$M = 2,1 \times \left(\frac{10}{S} \right)^{0,386}$$

Explosifs.

$$E = E_o \times \left(\frac{S_o}{S} \right)^{k_e}$$

$$E = 1,9 \times \left(\frac{10}{S} \right)^{0,299}$$

avec

E = consommation d'explosifs en kg/m^3 ;

S = section du tunnel en m^2 ;

S_0 = section de référence (par exemple, 10 m^2) ;

k_e = coefficient dépendant de l'organisation du travail et de la nature de la roche.

Partant des graphiques ainsi établis, il est facile de procéder à l'alignement des prix. A titre d'exemple, le calcul pour la section de 125 m^2 est donné ci-après :

Explosifs : $0,9 \text{ kg}/\text{m}^3$	Travail humain : $0,8 \text{ h}/\text{m}^3$
Coût explosifs : Suisse $0,9 \times 45 = 40,50 \text{ FB}$ - Suède $0,9 \times 30 = 27 \text{ FB}$	
Main-d'œuvre : Suisse $0,8 \times 40 = 32,00 \text{ FB}$ - Suède $0,8 \times 80 = 64 \text{ FB}$	
<u>72,50 FB</u>	<u>91 FB</u>

soit une différence en plus de $18,50 \text{ FB}/\text{m}^3$ pour la Suède.

Compte tenu de 20 % de frais généraux, il faudra multiplier le prix suisse de $1,2 \times 18,50 = 22,20 \text{ FB}$ pour l'aligner sur les prix suédois.

En procédant de même pour d'autres sections, on obtient le *tableau II*.

Tableau II

Sections m^2	Explosifs kg/m^3	Main-d'œuvre h/m^3	Coûts		Différence \times 1,2 FB.
			Suisse	Suède	
10	11,90	2,1	169,5	225,0	67
30	1,40	1,5	123,0	162,0	47
35	1,25	1,3	108,5	141,7	40
64	1,15	1,0	91,6	114,5	32
125	0,90	0,8	72,5	91,0	22
200	0,80	0,7	64,0	80,0	19

Ces ajustements permettent de réduire fortement la dispersion des prix relevés, et de tracer les graphiques *fig. 3* et *4* donnant la variation du prix d'excavation

par m³ en fonction de la section excavée. On observe que, sur le graphique logarithmique de la fig. 4, la fonction est représentée par une droite d'équation

$$P = P_0 \left(\frac{10}{S}\right)^{0,290}$$

avec P₀ (coût du tunnel de 10 m³) variant de 510 à 800 FB/m³, suivant la nature de la roche, le taux des salaires et le degré d'organisation.

Pour les excavations étudiées en Suède, on a :

$$P = 695 \left(\frac{10}{S}\right)^{0,290}$$

* * *

Une comparaison *approximative* des prix ainsi alignés et des prix probables au Congo a été tentée.

Au Congo, dans un chantier bien organisé, il faudra au plus un Européen pour dix indigènes. Le salaire moyen horaire par homme des équipes ainsi composées sera :

$$\frac{2.000 + (10 \times 100)}{11 \times 8} = 34,10 \text{ FB/h}$$

D'autre part, l'explosif coûte, au Congo, au maximum 2,2 fois plus cher qu'en Suède. Dès lors :

1) *Si l'organisation et le rendement de la main-d'œuvre étaient aussi bons au Congo qu'en Suède ou en Suisse, les coûts du matériel et des consommations étant peu différents, on aurait, par exemple, en section de 35 m² :*

Explosifs	Congo 1,25 × 66 = 82,50 FB	
		Suède 1,25 × 30 = 37,50 FB
Main-d'œuvre :	Congo 1,3 × 34,10 = 44,30 FB	
		Suède 1,3 × 80 = 104,00 FB
	126,80 FB	141,50 FB

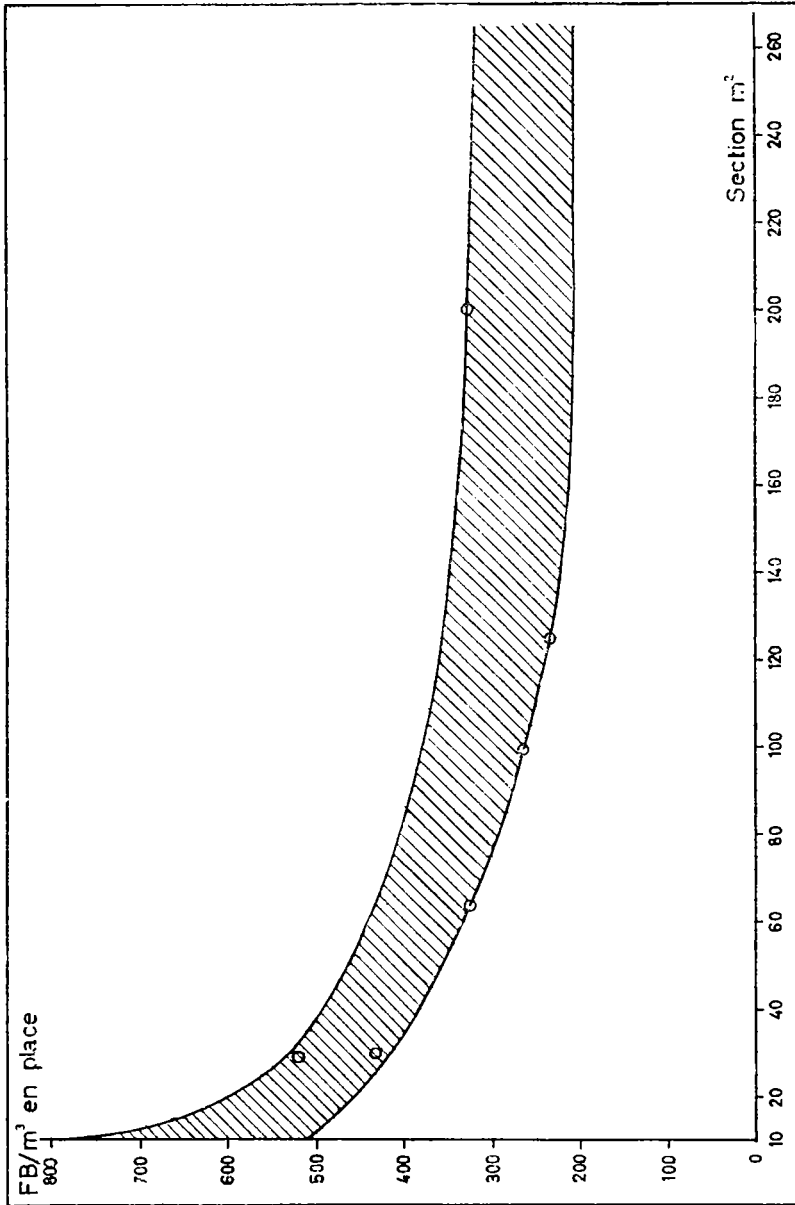


Fig. 3. — Tunnels. Coût des excavations souterraines en Suisse aligné sur prix suédois.

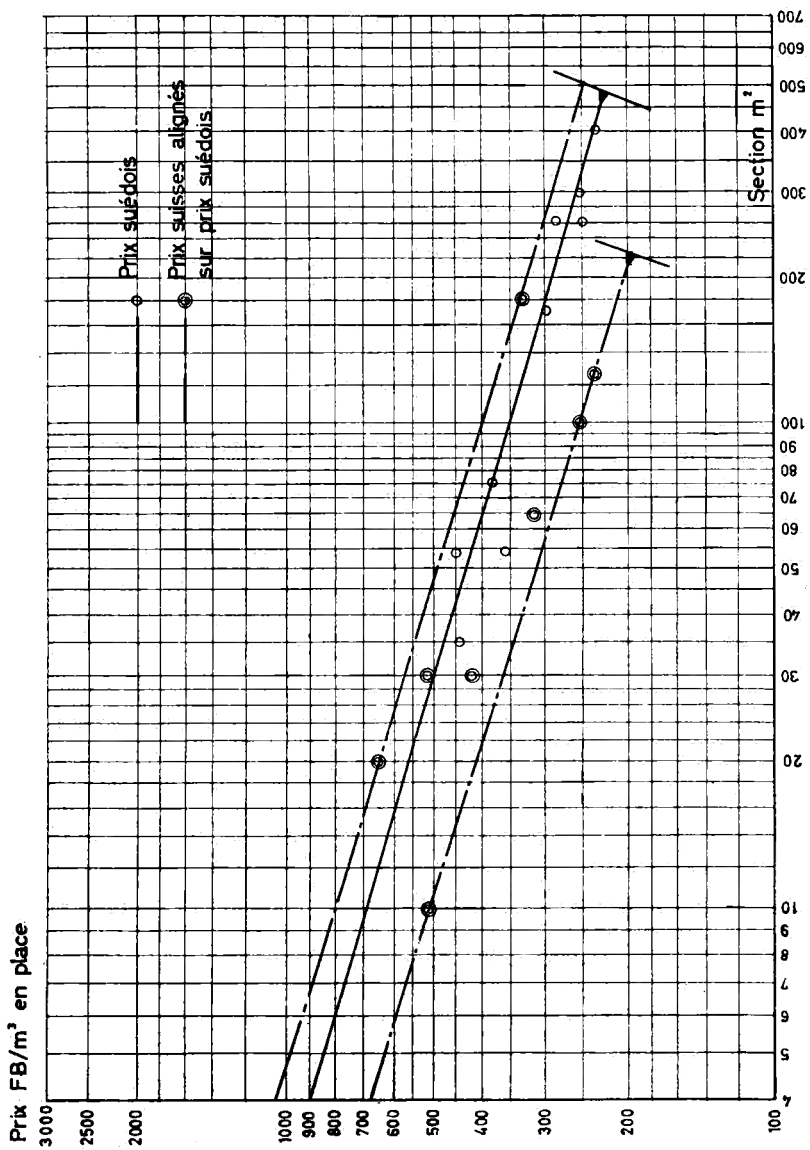


Fig. 4. — Tunnels. Coût des excavations souterraines en Suisse aligné sur prix suédois (échelles logarithmiques).

Compte tenu de 20% pour frais généraux, le prix du m³ au Congo serait inférieur de 1,2 (141,50 — 126,80) = 17,60 FB/m³ au prix suédois.

En répétant le calcul pour diverses sections de tunnels, on obtient le *tableau III*.

Tableau III.

Sec- tions m ²	Prix suédois moyens (<i>fig. 4</i>) FB/m ³	Prix Congo (avec 20 % F. G. mais sans bénéfice) FB/m ³
10	700	664
35	480	462
64	400	394
125	330	325
200	290	286

2) *En faisant l'hypothèse plus pessimiste que le rendement des équipes sera moitié moindre au Congo qu'en Suède, on atteindrait des prix par m³ plus élevés au Congo qu'en Suède.*

Il suffit de corriger les chiffres précédents sur la main-d'œuvre seule. Par exemple, en section de 125 m² :

En Suède : Explosifs + main d'œuvre = 91 FB/m³.

Au Congo : $(0,9 \times 66) + (2 \times 0,8 \times 34,10) =$
 $59,50 + 54,50 = 114 \text{ FB/m}^3$

Différence en plus pour le Congo : $114 - 91 = 23 \text{ FB/m}^3$

Compte tenu de 20% pour frais généraux, 27,60 FB/m³

En répétant le calcul pour différentes sections, on obtient le *tableau IV*.

Tableau IV.

Sec- tion m ²	Prix suédois moyens (<i>fig. 4</i>) FB/m ³	Prix Congo (avec 20 % F. G. mais sans bénéfice) FB/m ³ .
10	700	754
35	480	516
64	400	435
125	330	358
200	290	314

3) La réalité sera vraisemblablement intermédiaire entre les deux hypothèses considérées, mais toutefois plus proche de la seconde que de la première. Il semble bien que les prix par mètre cube à prévoir au Congo ne seront que très légèrement supérieurs aux prix alignés sur les conditions suédoises.

4) Les données recueillies en Espagne ont été utilisées pour en déduire des prix probables au Congo, en supposant que l'on y transpose exactement les méthodes de travail, le matériel et les rendements observés à Aldeavila.

L'adaptation des prix doit ici tenir compte :

- a) De la différence de coût des explosifs ;
- b) De la différence des salaires horaires ;
- c) De la différence d'estimation des frais généraux qui sont portés pour 8 % en Espagne et que nous avons évalués à 20 % de façon uniforme.

On arrive ainsi au *tableau V*.

Tableau V.

Section m ²	Prix Espagne FB/m ³	Majoration pour Congo FB/m ³	Prix Congo (avec 20 % F. G. mais sans bénéfice) FB/m ³
28	318	210	566
60	218	138	383

5) Les résultats de ces divers essais de transposition aux conditions congolaises sont rassemblés en *figure 5*.

La loi trouvée est de la forme $P = P_0 \times \left(\frac{10}{S}\right)^{0,290}$
avec P_0 variant de 664 à 754 FB/m³.

Il est bien entendu que cette loi n'est valable que jusqu'à la limite des sections exécutées en Suède, c'est-à-dire jusqu'à 400 m². De légères extrapolations semblent cependant possibles.

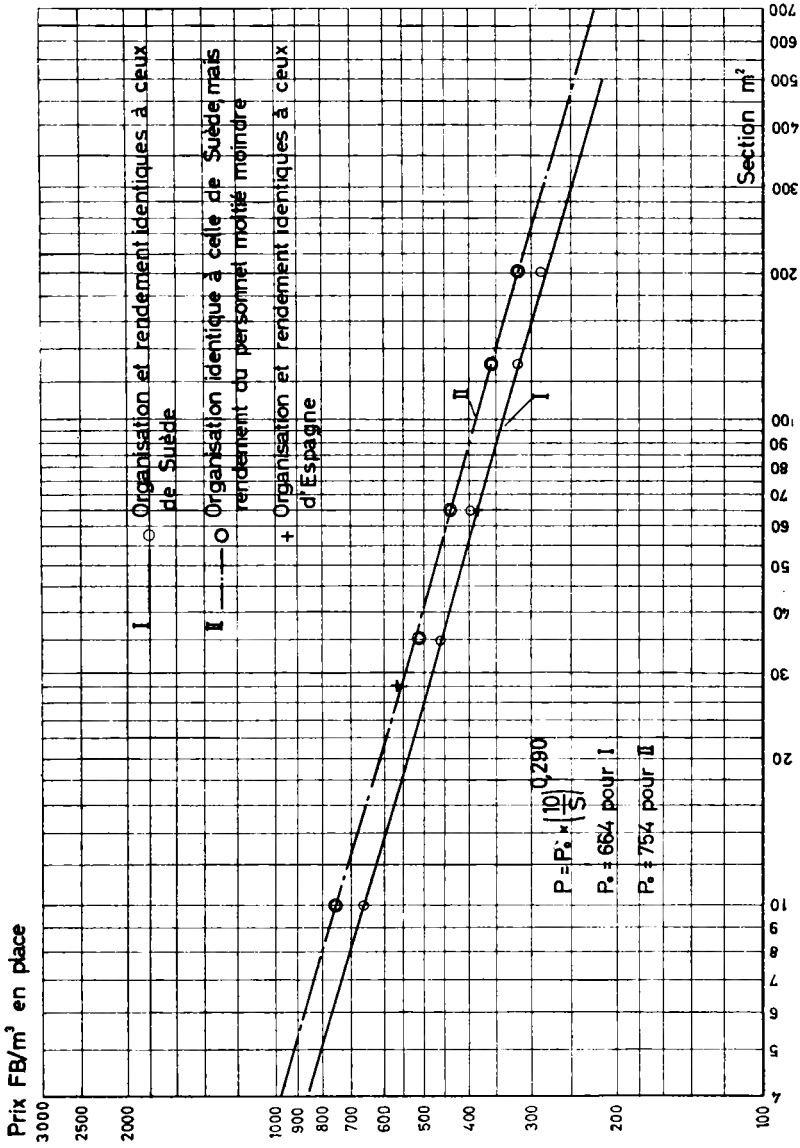


Fig. 5. — Tunnels. Estimation du coût probable d'excavation au Congo en tablant sur 20 % pour frais généraux (sans bénéfice) dans 3 hypothèses différentes.

Il s'agit d'autre part de conditions moyennes de creusement. La dispersion est la même que celle observée en Belgique.

Les frais généraux de chantier ont été supposés être de 20 %, chiffre assez normal en Europe.

En se basant sur cette loi et sur un supplément de 15 % pour tenir compte du bénéfice et des frais généraux de siège de l'entreprise, on obtiendrait les prix mentionnés au *tableau VI*.

Tableau VI.

Section en m ²	Prix moyen en FB/m ³
100	415
177	355
250	315
400	290
560	265

Il y a lieu de remarquer à nouveau qu'il s'agit là de prix moyens et qu'une dispersion normale est à prévoir.

2. CONDUITES D'AMENÉE.

En Suisse, en Espagne et en France, les conduites d'amenée sont inclinées.

Les Suisses estiment que l'inclinaison optimum est de 80 %, soit environ 40°. Les conduites d'amenée d'Aldeavila en Espagne sont inclinées à 47°, tandis qu'en France, la cheminée avait une pente de 69 %. En Suède, les ouvrages visités ne comportaient que des puits verticaux.

Cette différence de doctrine provient de variations dans la conception de l'exécution.

Dans les deux premiers pays cités, on creuse d'abord en montant, depuis le niveau de la centrale, une galerie pilote de 4 à 5 m². Cette galerie est alors agrandie à la

section finale en descendant. En France, le puits a été creusé en montant à pleine section.

Les Suédois utilisent une méthode originale de creusement des puits verticaux. La première phase consiste à forer depuis la surface jusqu'au niveau de la centrale un trou de 15 cm de diamètre. Un treuil est installé à la surface, le câble passant dans ce trou. La seconde phase consiste à creuser un puits pilote d'environ 4m² en montant à partir d'une cage suspendue au treuil de surface. Cette cage est équipée de stabilisateurs pneumatiques, d'une conduite d'alimentation d'air comprimé, d'un téléphone et d'une réserve d'air de sécurité.

La troisième phase consiste à élargir la section au diamètre définitif depuis le haut.

Ce mode d'exécution emprunté aux Suédois a également été utilisé récemment à St Fillans en Écosse du Nord pour l'équipement hydroélectrique de Breadalbene (*The Engineer*, juillet 1958).

Le tableau ci-après reprend quelques prix de puits comparés à ceux des galeries horizontales de sections équivalentes et situés dans les mêmes terrains, de manière à établir les rapports les plus exacts possibles. Il n'existait pas toujours des sections de tunnel exactement équivalentes dans le même terrain, mais elles ont été déterminées en considérant, par exemple, le puits incliné de 10 m² et le tunnel de 20 m² à Fionnay-Rhône (Suisse).

En appliquant au puits la formule

$$P = P_o \times \left(\frac{S_o}{S}\right)^{0,290}$$

établie précédemment pour les tunnels, on a,

$$\text{Pour une section } S_1 : P_1 = P_o \left(\frac{S_o}{S_1}\right)^{0,290}$$

et,

$$\text{Pour une section } S_2 : P_2 = P_o \left(\frac{S_o}{S_2}\right)^{0,290}$$

$$\text{d'où } \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{0,290}$$

$$\begin{aligned} \text{Si } S_1 &= 10 \text{ m}^2 \\ S_2 &= 20 \text{ m}^2 \\ P_2 &= 607 \text{ FB/m}^3 \end{aligned}$$

on obtient :

$$P_1 = 607 \times \left(\frac{20}{10}\right)^{0,290} = 740 \text{ FB/m}^3$$

Tableau VII.

Sec- tion	Pays	Prix FB/m ³ puits	Prix FB/m ³ tunnels	Rapport prix puits tunnels.	
4	Suède	1960	1180	1,65	} Moy. } à bon rendement partie sup. du puits à mauvais rendement
5	Espagne	590	525	1,12	
5	Espagne	1160	525	2,21	
16	France	1085	650	1,67	
28	Espagne	500	318	1,58	
64	Suède	690	400	1,73	

De la dernière colonne de ce tableau, il ressort que le rapport entre les prix en puits et en tunnels est pratiquement constant pour des sections identiques quelles qu'elles soient, pour autant bien entendu que le terrain soit de même nature. La valeur moyenne de ce rapport semble se situer aux environs de 1,6.

3. CAVERNES.

Le prix par m³ est fortement influencé, toutes conditions égales quant à la nature de la roche et à la section, par les proportions des cavernes (rapport longueur/section) et les possibilités de coordination des diverses phases d'exécution.

Le coût de la ou des galeries pilotes peut peser assez lourdement sur le prix moyen, ainsi que l'interférence des travaux de creusement et des travaux éventuels de bétonnage.

Le rapport du Comité mentionne des prix relevés dans ces conditions particulières, en Suisse et en Suède.

L'alignement de ces prix sur les conditions du Congo est possible suivant la méthode utilisée pour les tunnels.

Il est nécessaire de souligner que le prix du m³ excavé en caverne est généralement supérieur au prix du m³ excavé en grand tunnel. Toutefois, dans un aménagement hydroélectrique, l'importance relative du volume excavé en caverne est généralement faible par rapport au volume total des excavations souterraines. Pour des cavernes de grande longueur, dans un terrain de bonne tenue, sans galerie pilote, le prix de revient est sensiblement le même que celui d'un grand tunnel de même section.

B. Considérations relatives au coût des excavations à ciel ouvert.

Parmi les nombreux aménagements hydroélectriques visités, cinq comportaient des excavations à ciel ouvert de grande importance : il s'agit des travaux de Mauvoisin en Suisse, de Stornörrfors en Suède, d'Aldeadávila en Espagne, de Serre-Ponçon et de Jouques sur la Durance.

A Mauvoisin, Aldeadávila et Serre-Ponçon, il s'agissait d'abattages en grande masse sur les flancs des vallées ; à Stornörrfors et à Jouques, du creusement d'un canal de grande longueur et de grande section.

Le Comité des Déblais rocheux n'a donc pas disposé ici, comme pour les travaux souterrains, d'observations aussi nombreuses permettant d'évaluer de façon relativement précise le coût du mètre cube de roche excavé à ciel ouvert dans différentes conditions de section et de terrain.

Des renseignements obtenus sur d'autres chantiers que ceux visités ont également été retenus.

Il a paru préférable, par suite du petit nombre de références, de déterminer dans chaque cas pour le même terrain le rapport R du coût du m³ excavé en souterrain pour une section déterminée au coût du m³ excavé à ciel ouvert en grande section, plutôt que la valeur absolue du prix unitaire d'excavation à ciel ouvert. Cette façon de faire dispense de corrections sur les coûts des explosifs et de la main-d'œuvre, variables d'un pays à l'autre, ainsi que sur le pourcentage de frais généraux, et permet de ne pas tenir compte des variations du change.

Le *tableau VIII* donne les résultats obtenus.

Tableau VIII.

Pays	Section en tunnel m ²	R =
		$\frac{\text{Prix en tunnel de section donnée}}{\text{Prix à ciel ouvert en grande section pour le même terrain}}$
France	23	8,6
Espagne	28	3,18
Rhodésie	Probablement petite section	3,34
Suisse	30	3,43
Suède	54	2,72
Espagne	60	2,18
Philippines	65	3,5
Rhodésie	Grande section inconnue inférieure à 100 m ²	2,5
Suisse	100	2,21
France	100	1,92 à 2,33
France	100	2,08
Suède	400	1,43

L'examen de l'étude du coût par m³ des excavations souterraines en fonction de leur section (prix alignés sur prix suédois) donne un point de comparaison supplémentaire. En effet, si la section d'un tunnel augmente indéfiniment, le coût en question tend vers le coût de l'excavation à ciel ouvert dans la même roche, augmenté des frais de ventilation et d'éclairage, qui sont minimes (de 2 à 6

FB/m³). En d'autres termes, le coût par m³ d'excavation des tranches inférieures en très grandes sections, après creusement de la tranche de couronne, doit, si on le diminue des frais de ventilation et d'éclairage, être de peu supérieur au coût par m³ de l'excavation à ciel ouvert dans la même roche.

Or, à Stornörrfors, à Bjürfors-Nedre et à Göschenen, on a noté des coûts de 180 FB/m³ en granit pour la tranche inférieure des très grandes sections. Corrigé comme il vient d'être dit, ce niveau de prix est voisin de 163,50 FB/m³ obtenu à Stornörrfors pour le creusement du canal à ciel ouvert en granit.

Les éléments recueillis ont été condensés en un graphique (*fig. 6*) qui fait apparaître les différentes valeurs du rapport R par comparaison au coût du m³ excavé en souterrain en diverses sections avec le coût du m³ excavé à ciel ouvert en grande section dans la même roche.

Il est peut-être discutable de reporter sur le même graphique des points relatifs à des abattages en masse à flanc de vallée et des points relatifs à des creusements de canaux de grande section. On peut cependant le faire en première approximation, car si l'abattage en grande masse consomme moins d'explosifs, il entraîne souvent des frais de forage et de chargement plus élevés que l'abattage en tranchée. En outre, souvent gêné par diverses servitudes et soumis à d'anormales sujétions, il est grevé par elles de frais que n'a pas à supporter le creusement des canaux.

En conclusion, on peut dire :

a) Que le coût du m³ d'excavation à ciel ouvert, avec minage et transport à 1 km environ, sera d'environ 3,5 à 2,2 fois moins élevé que celui de l'excavation en galerie souterraine si la section de celle-ci est comprise entre 30 et 100 m² ;

b) Que le coût du m³ d'excavation à ciel ouvert sera d'environ 2,2 à 1,4 fois moins élevé que celui de l'excavation souterraine, si la section de la galerie creusée passe de 100 à plus de 400 m² ;

c) Que ces résultats ne sont pas en accord avec les prix « homogénéisés » retenus pour les estimations (sans distinction de section). En effet, le rapport $R = 4,3$ indiqué dans l'introduction au présent mémoire est nettement supérieur à tout ce qui a été relevé ou estimé pour les sections de tunnel nécessaires à Inga.

Enfin, il résulte des observations faites par un des membres du Comité dans la vallée Van Deuren, que le coût des excavations à ciel ouvert à prévoir en cet endroit devra être majoré pour tenir compte des frais de déboisement et d'aménagement préalables en surface d'un terrain très accidenté.

C. Organisation générale des opérations de chantier.

L'organisation des différentes opérations (forage et chargement des mines, abattage, chargement et évacuation des déblais, etc.) doit assurer une coordination aussi parfaite que possible des diverses phases du travail d'excavation, dont les unes — telles la mise en place des explosifs et les tirs — sont essentiellement discontinues, tandis que d'autres — telles le forage, le pelletage et le transport — doivent pour bien faire être quasi continues.

L'incidence d'une telle coordination sur les rendements des hommes et du matériel, sur l'économie des consommations de toutes espèces et sur la sécurité est telle qu'elle justifie que l'on impose à l'entrepreneur le recours à un conseiller d'organisation spécialisé en grands travaux de génie civil, conseiller qui doit être doté de larges pouvoirs

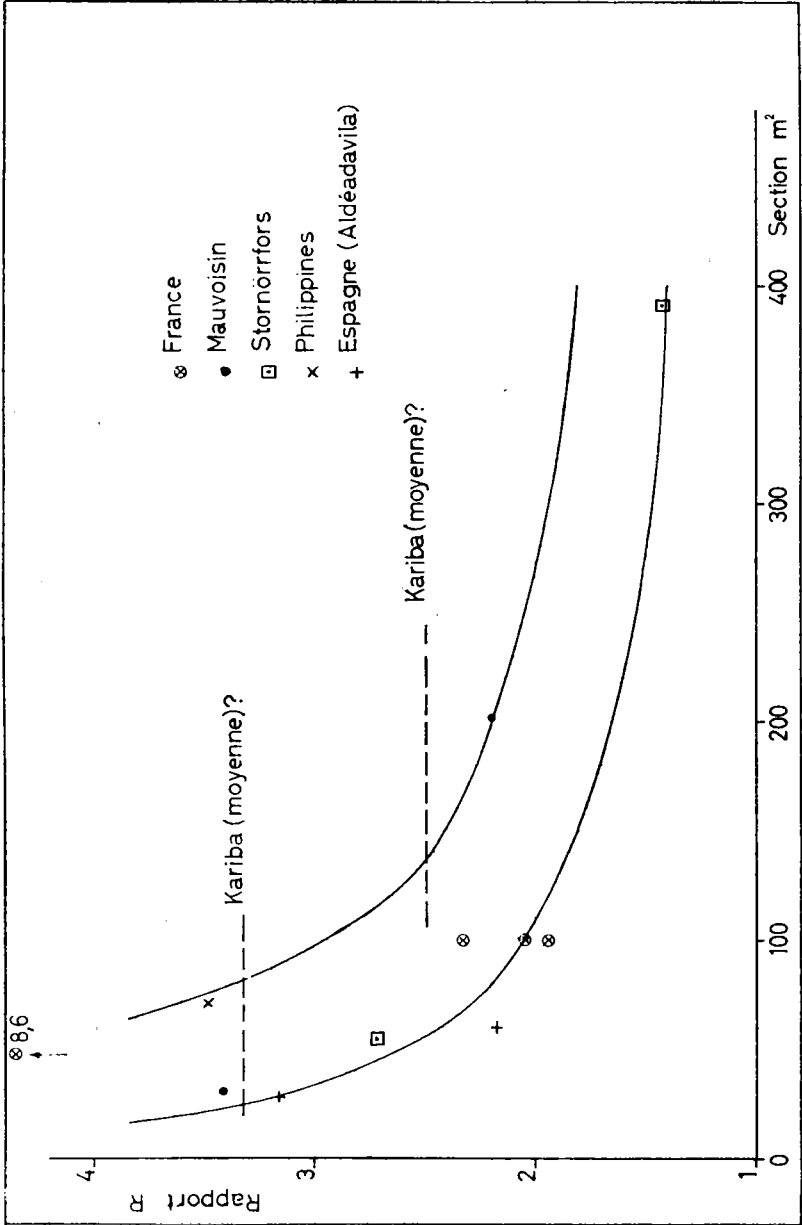


FIG. 6. — Excavations à ciel ouvert.

tout en étant dégagé des questions routinières (voir exemple des chantiers suédois, d'Aldeadávila, etc.).

La disposition, le nombre et la charge des mines sont étudiés de manière que :

1) Le volume des déblais abattus par un tir soit suffisant pour permettre l'utilisation à plein rendement, jusqu'au tir suivant, du matériel de chargement et de transport ;

2) L'intervalle entre deux tirs corresponde au temps nécessaire pour effectuer le forage dans de bonnes conditions ;

3) Les déblais soient assez fragmentés pour permettre le chargement mécanique sans recourir à des minages secondaires, mais non inutilement broyés ni projetés à distance.

A partir de ces principes de base, l'expérience a conduit à une certaine standardisation des méthodes et du matériel, dont quelques traits saillants sont soulignés ci-après :

1) Pour les attaques en pleine section en chantiers souterrains, emploi de marteaux-perforateurs moyens, sur béquilles, à l'exclusion de *jumbos* (1). Les foreurs munis de leurs béquilles, prennent place sur des tours de forage à 2 ou 3 étages, portées par camions automobiles, aisément et rapidement déplaçables.

Cette façon de faire augmente peut-être un peu la main-d'œuvre de forage, mais supprime celle qu'exigeraient la mise en place, le retrait et l'entretien d'un *jumbo*. Elle est également plus souple.

2) Pour les forages à ciel ouvert dans les attaques en tranchée, ainsi que pour les enlèvements de tranches successives dans les grandes excavations souterraines (après abattage de la calotte), l'utilisation de marteaux-

(1) Jumbo = Marteau(x) sur chariot.

perforateurs lourds, sur *wagon-drill*, est absolument générale.

Les *wagon-drill* permettent de limiter le personnel de forage à l'unité par 4 marteaux et plus, tout en assurant un alignement et une orientation des fourneaux. Dans les travaux à ciel ouvert, surtout si la surface du terrain est irrégulière, il est très utile de monter les *wagon-drill* sur chassis automoteurs tous-terrains (cas de Stornörrfors).

3) Les fleurets monoblocs, avec taillants en carbure de tungstène rapportés directement sur l'outil, ont supplanté partout les fleurets à taillants amovibles (ou *jackbits*).

4) Pour les attaques souterraines en pleine section, la préférence va au schéma de minage à bouchon conique ou pyramidal, plus rarement en éventail, plutôt qu'au bouchon canadien, dès que le personnel est bien formé.

Il est d'intérêt capital d'utiliser des détonateurs électriques de fabrication comportant assez d'étages de retards pour pouvoir abattre en un seul tir tout le front de grandes sections. La combinaison des retards ordinaires et des micro-retards peut être nécessaire pour attaquer des sections de 100 m² et davantage. Le Comité a eu l'occasion de se rendre compte des conséquences désastreuses de restrictions dans le nombre d'étages de retards disponibles.

5) Dans les attaques par tranches successives ou dans les tranchées à ciel ouvert, le tir se fait par files de mines parallèles sautant successivement. La hauteur de front la plus favorable, pour la coordination des diverses opérations se situe aux environs de 5 à 6 m en souterrain et de 10 à 11 m à ciel ouvert. Il est souhaitable que le forage précède le front d'une cinquantaine de mètres, de façon à être indépendant de l'abattage.

6) Les explosifs sont choisis de façon à fragmenter convenablement les déblais, sans broyage excessif. Même

en roche très dure, nous n'avons vu que rarement dépasser des teneurs en nitroglycérine de 50 %.

Le tassement pneumatique des charges, en augmentant la densité de chargement aux endroits voulus, a un effet meilleur que la généralisation d'emploi d'un explosif à très grande brisance.

En travaux souterrains, l'emploi simultané de deux types d'explosifs est très répandu : explosif plus puissant pour toute la partie centrale de la section, explosif plus lent pour les mines de pourtour, afin de prévenir la fissuration de la roche en place. Le recours à des charges héli-cylindriques, à section directionnelle, dans les trous de pourtour, donne des résultats remarquables pour le dressage des parois comme c'est le cas en Suède.

La suppression du bourrage des mines, générale en Suède, permet une grande économie de temps. Elle ne paraît pas influencer notablement la consommation d'explosifs, moyennant un choix judicieux de ceux-ci.

7) Le chargement et le transport des déblais sont entièrement mécanisés. On utilise en souterrain, comme en surface, des pelles mécaniques puissantes — si possible électriques, sinon Diesel — et des bennes automobiles Diesel de grande capacité. Pour le travail par tranches en souterrain ou en tranchée à ciel ouvert, l'attaque par front de 16 m de largeur au moins (si elle est possible) offre le grand avantage de permettre les manœuvres rapides de gros engins à haut rendement.

Moyennant un service d'entretien bien outillé et bien organisé, une réserve de 30 à 35 % suffit pour les camions-bennes utilisés (pistes entretenues et rampes locales ne dépassant pas 1/7 au maximum).

Le transport souterrain sur rails ne conserve d'intérêt que pour les galeries de petite section et de grande longueur.

8) Lorsque la consolidation du ciel ou des parois des

excavations souterraines est nécessaire, on recourt au boulonnage de façon systématique, sauf dans les rares cas où ce procédé est exclu (terrain déliteux ou failleux, ou stratifications entrecroisées). Le soutènement métallique provisoire est très rarement utilisé.

Le boulonnage est considéré comme une consolidation et un soutènement définitif pour des galeries non bétonnées ni blindées, dans un très grand nombre de cas. En combinaison avec le gunitage, il permet des solutions élégantes, peu coûteuses et rapides. Le revêtement de la voûte de la centrale d'Aldeadávila en est la meilleure illustration.

D. Remarques au sujet de la section des galeries et cavernes.

La nature du rocher conditionne les sections des chambres et galeries en ce sens qu'elle détermine le maximum de largeur possible pour ne pas créer dans le terrain des contraintes inutiles.

D'autre part, la largeur possible impose des limites d'encombrement aux engins mécaniques.

Le tracé de la voûte doit, de l'avis du Comité, être un compromis entre la forme ogivale qui correspond à l'équilibre théorique naturel des roches dans leur stabilisation définitive et toute autre forme plus simple au point de vue de l'exécution.

La plupart des centrales souterraines visitées ont des sections de roche nue comprises entre 400 et 600 m² avec des portées de 18 à 22 m et des hauteurs de 25 à 30 m. De telles sections nécessitent un bon terrain. Une des installations visitées en Suisse a cependant été réalisée dans le schiste carbonifère, mais la caverne était pourvue d'un revêtement en béton avec piliers de soutènement ancrés par des tirants précontraints.

La plus grande section de tunnel (400 m²) rencontrée par les membres du Comité est réalisée dans la galerie de fuite de Stornörrfors, dans un rocher d'excellente qualité.

Cette section, qui avait été prévue initialement à 250 m², a été obtenue par augmentation de la hauteur de l'excavation tout en limitant la largeur, maximum au sommet, à 16 m. La *figure 7* donne les dimensions de ce tunnel ainsi que les phases d'exécution.

Toute augmentation de section des tunnels semble ne pouvoir se concevoir que par un accroissement de la hauteur, ce qui risque toutefois d'introduire une instabilité des parois latérales.

Pour combattre cette instabilité, dans les grandes sections, même en roche d'excellente qualité, il est donné un fruit de 1/20 aux parois latérales. Pour la facilité, ce fruit est réalisé en gradins, par réduction de largeur des tranches prises successivement en descendant (*fig. 7*).

E. Sécurité et hygiène.

Bien que les procédés d'excavation soient aujourd'hui étudiés dans le constant souci d'assurer aux travailleurs le maximum de sécurité, les travaux d'excavation tant en surface qu'en souterrain peuvent donner lieu à des accidents fortuits, imprévisibles ou dus à des prises de risques et à des défaillances humaines. Ces accidents peuvent encore provoquer des victimes.

Pour réduire autant que possible l'importance des uns et le nombre des autres, le Comité des Déblais rocheux préconise entre autres les mesures ci-après :

1. Ne confier les travaux qu'à des entreprises possédant des cadres expérimentés et une main-d'œuvre spécialisée, au moins au niveau des moniteurs.
2. Exiger de l'entrepreneur qu'il fournisse ses plans d'exécution, plannings et programmes de travail avec

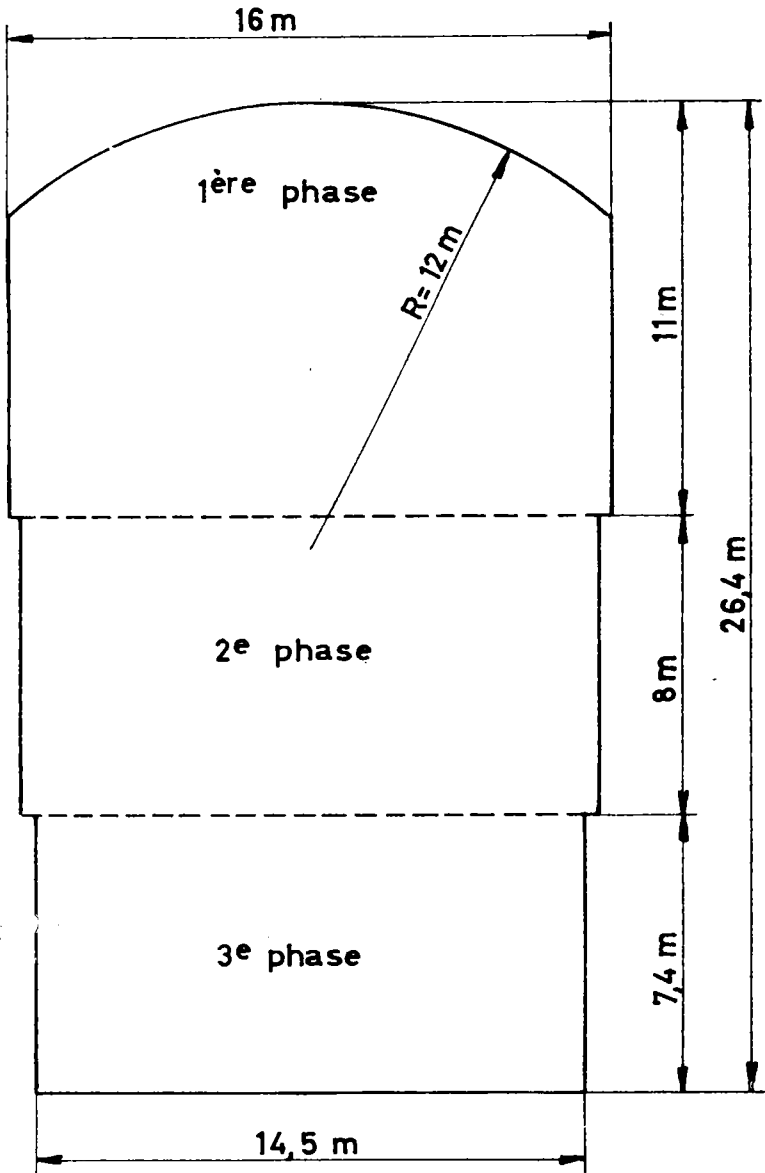


FIG. 7. — Coupe transversale du tunnel de Stornörrfors.

toutes les conditions de sécurité correspondantes, établis par des bureaux d'études spécialisés, signés par eux et contresignés par lui.

3. Prévoir une ventilation surabondante et un éclairage intensif ; en contrôler l'existence permanente.

4. N'autoriser que la foration humide et exiger l'aspersion des déblais pendant le marinage ⁽¹⁾.

5. Ne permettre l'approche des fronts de travail qu'après peignage systématique des roches, consolidation par boulonnage lorsqu'il y a lieu et soutènement par tout autre moyen approprié si le boulonnage est insuffisant.

6. Imposer pour le tir des mines les précautions prévues par les livrets spéciaux que devront posséder et respecter les boutefeux responsables.

7. Suspendre la mise en œuvre des détonateurs électriques et faire évacuer les endroits où les mines sont déjà amorcées, en cas de menace d'orage. Créer un service de détection des orages et en imposer l'intervention.

8. Imposer des règles très strictes pour assurer la sécurité des transports et du personnel.

Prévention des accidents.

Il n'est peut-être pas superflu de rappeler que, dans l'ordre, les installations de traction et la circulation du personnel dans les galeries, précèdent l'emploi des explosifs et les chutes de pierres en tête des statistiques d'accidents survenus dans les travaux souterrains.

Aussi est-il de toute première importance que les transports soient soumis à une sévère réglementation et que les

(1) Marinage = Chargement des déblais.

moyens de déplacement qu'il sied de mettre à la disposition du personnel offrent toute sécurité.

En outre, l'éclairage sera convenable en tous lieux.

On organisera une minutieuse étude du problème particulièrement délicat de la sécurité d'emploi des explosifs.

Stockage, préparation, transport et chargement seront codifiés jusqu'aux détails. On interdira notamment de commencer le chargement sur un front aussi longtemps que la perforation n'est pas complètement terminée et le personnel éloigné.

Le contrôle des mines par ohmmètre (vérifié avant chaque usage) sera fait en l'absence de tout personnel à front par le seul chef responsable du tir.

La ventilation sera prévue et organisée de manière à assurer le plus rapidement et aussi complètement que possible après chaque volée, l'évacuation des gaz toxiques. Elle devra maintenir en permanence la salubrité de l'atmosphère. Un renversement de l'aéragé immédiatement après le tir y contribuera, les fumées et poussières étant de la sorte véhiculées dans les guidons d'aéragé jusqu'à l'extérieur.

L'accès au chantier sera interdit à quiconque n'est pas protégé par un casque du type imposé, n'est pas chaussé de souliers à bouts armés, n'est pas suffisamment muni de vêtements.

Pour ce qui est des chutes de pierres, il est difficile de fixer des règles de prévention précises. L'expérience du chef, que rien ne remplace, est un élément capital de protection. Nous signalons ici que le boulonnage des roches se montre partout efficace.

La technique d'emploi des boulons n'exige pas une grande spécialisation, mais il importe néanmoins que les ingénieurs soignent l'instruction des contremaîtres, à qui incombera la tâche de déceler, par simple inspection de la roche, les parties suspectes ou exposées à se déloger.

Il y a lieu d'insister sur l'importance de la prévention

des accidents qui, en dehors de son caractère humanitaire, constitue un facteur primordial de rendement de la main-d'œuvre, spécialement dans les régions où celle-ci n'est pas familiarisée avec l'industrie moderne, ni avec les grands chantiers de génie civil. Le moindre accident de personne désorganise le travail et peut exercer un effet psychologique désastreux. La visite de certains chantiers par les membres du Comité a permis à ce sujet des conversations édifiantes avec les responsables du recrutement et de la formation de la main-d'œuvre.

La projection périodique de films bien choisis paraît être un excellent moyen de propagande de la sécurité. De tels films peuvent être empruntés en Suède, en France et sans doute en Suisse.

F. Eléments d'orientation dans le choix d'une solution.

1. A l'heure où se pose pour certains projets d'aménagements hydroélectriques la question du *choix entre installations souterraines ou à ciel ouvert*, le Comité signale que ses contacts avec les bureaux d'études de pays étrangers lui ont révélé l'existence d'une considération nouvelle, à leurs yeux très importante.

Il s'agit du souci d'abriter toutes les parties vulnérables en temps de guerre en les installant profondément en sous-sol.

Il importe dès le départ des études, d'examiner si l'on souscrit à cette servitude. L'argument qui, autrefois, eût refoulé un tel impératif, à savoir le coût plus élevé des excavations souterraines, semble s'amenuiser au fil des années. On peut voir, dès à présent, de grandes excavations souterraines exécutées à meilleur prix par *mètre cube utile* qu'en surface, surtout lorsque ces dernières doivent être exécutées en terrain difficile ou sous un climat rigoureux.

2. Une autre tendance se rapporte aux *moyens de transport*. Dès le début des travaux, l'objectif majeur sera d'atteindre au plus tôt l'heure de la mise en marche de la centrale et du rendement des capitaux investis. Ce souci restera constant jusqu'à la fin des travaux de génie civil.

Aussi, bien des économies de détail, qui pourraient être de règle autre part, passeront au second plan, tout devant être sacrifié à l'économie générale du projet, par la réalisation des meilleurs avancements (conséquence des délais imposés d'ailleurs par le maître de l'œuvre).

A cette fin, on se souviendra d'un vieux principe de l'art des mines : « Une exploitation minière est surtout une entreprise de transport » ou, exprimé autrement : « Une bonne exploitation postule un transport surpuissant ».

Intensifier les moyens d'évacuation des déblais, c'est solliciter d'une manière plus pressante les appareils de chargement, c'est forcer au rendement des équipes d'abattage. En créant promptement le vide derrière les foreurs, on accélère inéluctablement le rythme de toutes les opérations, ce qui en général en abaisse le coût, en diminuant l'incidence de toutes les dépenses proportionnelles au temps.

Aussi sera-ce vers un matériel de chargement et de transport rapide, robuste, de forte capacité, de dimensions bien étudiées en vue de réduire son encombrement, que devra se porter le choix. Il y a souvent interdépendance entre le choix du matériel et celui des sections d'attaque : c'est un élément dont il faut tenir compte au départ de tout projet.

Ces considérations ont une telle importance que l'on ne recourt aux galeries-pilote que dans des cas de plus en plus rares, car leur creusement peut peser lourdement sur le coût moyen du m³ excavé. D'où les prix unitaires plus élevés du creusement en cavernes, par rapport à ceux des excavations en tunnels de section équivalente.

Si une galerie-pilote paraît indispensable, il y a lieu

de lui donner une section assez grande pour en réduire le prix par m³ excavé à une valeur assez basse, et pour qu'elle puisse constituer une phase utile d'exécution de l'ouvrage final.

Les résultats du creusement à Inga de la galerie, des chambres d'essai, ainsi que de la carrière expérimentale demandées par le Comité des Déblais rocheux, peuvent fournir des éléments d'appréciation qui, joints aux résultats des sondages, pourraient rendre inutiles des galeries-pilote.

3. Les tendances actuelles du *choix des unités de production* des centrales hydroélectriques installées ou mises récemment à l'étude montrent une orientation vers un minimum d'unités pour la production de la puissance prévue.

On invoque les avantages ci-après :

- a) Diminution du volume d'excavation ;
- b) Meilleur choix possible des emplacements ;
- c) Charges d'amortissement moindres ;
- d) Économie de marche, les grosses unités fonctionnant même à charge partielle (mais dans une région encore favorable de la courbe de rendement, très plate), étant finalement plus économiques en exploitation qu'un plus grand nombre de petites unités fonctionnant à pleine charge.

Nous avons constaté que pour une puissance installée identique, l'espace nécessaire pour loger une série de groupes de 75.000 kW est bien plus grand que celui qu'occuperaient des unités de 150.000 kW.

Pratiquement, à partir d'une certaine puissance, c'est le nombre d'unités qui conditionne les dimensions de la centrale.

Sans envisager nécessairement des puissances unitaires

de 260 à 320.000 kW comme en U.R.S.S., on se dirige déjà maintenant vers les 200.000 kW et plus (en Suède, à Stornörfors : 150.000 kW pour 76 m de chute ; en Espagne à Aldeadávila : 127.000 kW pour 139 m de chute), l'expérience acquise autorisant de telles perspectives.

G. Remarques finales.

Pour gagner du temps, le rapport du Comité a été clôturé provisoirement avant que les résultats des travaux de reconnaissance supplémentaire sur le terrain ne soient connus. Ceci ne peut guère modifier les conclusions actuelles ; tout au plus pourrait-il en résulter quelques ajustements de détail.

Les conclusions du Comité postulent une *tenue minimum de la roche*, que d'ailleurs les indications des géologues et l'inspection du terrain permettent d'escompter, tout au moins si les excavations se situent dans la rhyolithe.

Tous les prix utilisés dans les essais d'alignement à des conditions types sont basés sur l'*expérience des cinq dernières années*. Cette précision est d'importance en raison de l'évolution très rapide de la conception des moyens d'exécution, évolution génératrice d'une sensible économie.

Il convient, si l'on veut réduire le plus possible l'écart entre le prix d'exécution et les estimations, de faire largement appel à la concurrence des firmes spécialisées, auxquelles ne seront proposés que des projets parfaitement au point, de façon à ne pas entraîner de modifications en cours d'exécution. De telles modifications sont toujours très coûteuses et réduisent à néant tous les efforts de prévision et les effets de la concurrence.

IV. INCIDENCE DES COÛTS D'EXCAVATION EN ROCHE SUR L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE D'INGA

Ainsi que le faisait judicieusement remarquer dans son rapport personnel un des membres du Comité d'Experts institué en 1957 par M. le ministre A. BUISSERET [4, intr. et p. 42] :

» Le rapport du coût des travaux de déblais rocheux en tranchée à ciel ouvert et en tunnel aura une influence prépondérante dans le choix du schéma d'aménagement de la vallée Van Deuren. De grands tunnels peuvent être creusés à un bas prix de revient, particulièrement dans l'excellente rhyolithe, ce qui tend à favoriser les projets restituant de cette manière au fleuve les eaux turbinées dans la centrale, tandis que les prix unitaires utilisés pour l'homogénéisation pourraient conduire à d'autres conclusions. C'est la raison pour laquelle la question est à la fois importante et urgente ».

Dans un récent mémoire, M. le professeur F. CAMPUS, président de l'Institut national d'Études pour le Développement du Bas-Congo, attirait également l'attention des spécialistes sur les volumes considérables d'excavations en rocher (près de 11 millions de m³) prévus dans l'aménagement de première phase à Inga. Il mettait l'accent sur la nécessité d'étudier l'installation

» ... au moins partielle, d'usines souterraines avec galeries de fuite débouchant en aval de Shongo » [4, p. 23].

Les conclusions du Comité des Déblais rocheux lèvent donc une incertitude qui pesait lourdement sur le choix des solutions susceptibles d'être retenues.

Pour juger de l'influence des prix sur les estimations, quelques exemples ont été repris ci-après :

1) Projet SYDELINGA VIIbis, comportant en 2^e étape 3 galeries de fuite de 177 m² chacune.

La réduction du prix unitaire par rapport aux premières prévisions est de 145 FB/m³.

Sur un volume total de 904.000 m³, excavé en souterrain, on réalise une diminution de coût de l'ordre de 131.000.000 FB.

2) Projet SYDELINGA VIII : comprenant en première étape 3 galeries de fuite de 177 m² pour un volume total de 980.000 m³, permet un gain de 142.000.000 FB.

3) L'exemple le plus significatif se rapporte à l'avant-projet V. B. B. avec galeries de fuite de 250 m² de section.

En première étape et en adoptant le prix unitaire de 315 FB/m³ déterminé précédemment avec 20 % de frais généraux de chantier et 15 % pour bénéfice et frais généraux de siège, l'estimation doit être diminuée de 450.000.000 FB sur un montant total de 6.400.000.000 FB, soit un bénéfice d'environ 7 %.

* * *

Les réductions ainsi obtenues sur les estimations se passent de tout commentaire.

Étant donné l'importance des déblais rocheux dans l'aménagement du site d'Inga, on peut dès à présent être certain qu'il sera possible d'établir, avec une approximation suffisante, le coût des travaux à entreprendre et de choisir en connaissance de cause la solution la plus avantageuse.

BIBLIOGRAPHIE

1. A.B.J.O. Öberg & Sons, Boktryckeri Eskilstuna 1957 : En fyrklöver privata kraftverk i Ulmeälven.
2. BOWMAN, WALDO, G. : Swedes make rock tunnel history (*Engineering News-Record*, 18 août 1955).
3. CABAINUS, J. et MAIGRE, R. : Aménagement de la Durance. Le barrage de Serre-Ponçon (*Travaux*, Paris, août 1958).
4. CAMPUS, F. : L'aménagement hydroélectrique du fleuve Congo à Inga (Mém. A.R.S.C., Bruxelles, 1958).
5. Compagnie nationale du Rhône : L'Aménagement de la chute dite de Montélimar.
6. Électricité de France : Barrage de Serre-Ponçon. Aménagement de la Basse-Durance. Chute de Jouques.
7. GORANSSON, T. : Stornörrfors : Milestone in rock excavation history (*Engineering News-Record*, 30 janvier 1958).
8. RAMBERT, O., et GOVARD, M. : L'aménagement de la chute de Mauvoisin. (*Le Génie Civil*, 1.5.1958).
9. S. A. Electro-Watt à Zurich : La chute de Göschenen.
10. S. A. Iberduero (Espagne) : Sistema hidroelectrico del Duero.
11. Société anonyme de la Grande Dixence : Petit Guide de la Grande Dixence.
12. Swedish State Power Board : Stornörrfors — Technical data (Stockholm).

TABLE DES FIGURES

1. Tunnels suédois. Coefficient main-d'œuvre et consommation d'explosifs	13
2. Tunnels suédois. Coefficient main-d'œuvre et consommation d'explosifs (échelles logarithmiques)	14
3. Tunnels. Coût des excavations souterraines en Suisse aligné sur prix suédois	18
4. Tunnels. Coût des excavations souterraines en Suisse aligné sur prix suédois (échelles logarithmiques)	19
5. Tunnels. Estimation du coût probable d'excavation au Congo en tablant sur 20% pour frais généraux (sans bénéfice) dans 3 hypothèses différentes	22
6. Excavation à ciel ouvert	30
7. Coupe transversale du tunnel de Stornörrfors	36

TABLE DES MATIÈRES

I. Introduction	3
II. Voyages d'Études	7
III. Conclusions du comité	10
A. Alignement des prix de revient d'excavations souterraines	10
B. Considérations relatives au coût des excavations à ciel ouvert	26
C. Organisation générale des opérations de chantier	29
D. Remarques au sujet de la section des galeries et des cavernes	34
E. Sécurité et hygiène	35
F. Éléments d'orientation dans le choix d'une solution	39
G. Remarques finales	42
IV. Incidence des coûts d'excavation en roche sur l'aménagement hydroélectrique d'Inga	43
Bibliographie	45
Table des figures	46
Table des matières	47

