

# **ÉTUDE COMPARATIVE DES COÛTS DE GENIE CIVIL SELON LES SYSTEMES DE TRANSPORT GUIDÉS ADOPTÉS**

F. KUHN      INRETS  
M. P. MARX   SEMALY

-----

Mme C. MARTINET   SEMALY  
M.B. CONSTANTIN   CETU

## **RÉSUMÉ**

Après une description géométrique et technique de 20 systèmes de transport urbain guidé exploités ou à l'étude en France, le présent rapport procède à une analyse comparative des coûts de construction en souterrain et en viaduc en fonction de différents paramètres de sols, de géométrie et de capacité.

Cette comparaison est effectuée pour des interstations de 800 m et de 400 m c'est à dire d'un ouvrage en ligne et d'une station adaptés à chacun des 20 systèmes pour des capacités équivalentes de transport.

Les coûts sont obtenus à partir de 2 logiciels de dimensionnement, les modèles METROV et ESTIM dont les notices sont jointes en annexe avec le bordereau des prix val. Jan. 92.

Les méthodes de construction analysées sont la tranchée couverte superficielle, la tranchée couverte profonde, le tunnel réalisé au tunnelier et selon la méthode traditionnelle et le viaduc.

L'intérêt de la construction d'un monotube ou d'un bitube pour réaliser un tunnel à 2 voies est examiné pour les principaux systèmes de transport.

Une analyse des coûts de génie civil à la place offerte pour chacun des 20 systèmes complète la comparaison.

Pour chacune des méthodes constructives la progression du coût de génie civil est examinée en fonction de l'augmentation de la section, des dimensions des ouvrages, c'est à dire de la largeur et de la hauteur des véhicules, le gabarit des véhicules retenus dans cette étude varie entre 1,60 m et 2,90 m, la longueur entre 3,12 m et 312 m: l'étude montre le gain de coût possible si on optimise l'implantation des équipements fixes et on réduit les dimensions intérieures des ouvrages.

En conclusion, cette étude nous montre qu'il y a de nombreux paramètres qui influent sur le coût de construction d'un souterrain, que la solution aérienne est la moins chère et que parmi les méthodes de construction de souterrain, la méthode au tunnelier peut s'avérer la moins chère au delà d'un certain linéaire d'ouvrage à réaliser: la solution bitube par rapport à une solution monotube selon les cas peut s'avérer la moins chère des deux types de construction.

Cette étude nous rappelle enfin qu'il est important de bien dimensionner les ouvrages en fonction du trafic attendu à court terme et à long terme et de choisir un système de transport suffisamment souple permettant d'absorber, si possible sans modification future du génie civil, toute demande de trafic supplémentaire.

**Mots clés:** Génie civil: tranchée couverte - tunnel - ouvrages d'art - calcul de coût de construction - systèmes de transport urbain guidés - métro léger - métro - métro lourd (RER).

**Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité**  
2 Avenue du Général Malleret Joinville 94114 ARCUEIL CEDEX

**Centre de Recherche et d'Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés**  
20 Rue Elisée Reclus 59650 VILLENEUVE D'ASCQ

**METRAM**  
25 Cours Emile ZOLA 69625 VILLEURBANNE

**Centre d'Etude des Tunnels**  
109 Avenue Salvador ALLENDE case n°1 69674 BRON CEDEX

## **ETUDE COMPARATIVE DES COUTS DE GENIE CIVIL SELON LES SYSTEMES DE TRANSPORT ADOPTES**

---

## **COMPARATIVE STUDY OF CIVIL ENGINEERING COSTS ACCORDING TO THE MASS TRANSIT SYSTEMS**

M. KUHN Francis  
Mme. MARTINET Christine  
M. MARX Pierre  
M. CONSTANTIN Bernard

INRETS  
METRAM  
CETU

**RAPPORT FINAL**

**N° de contrat AFME : 0030005 du 30 Mai 1990**

Février 1992



**Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité**

**Centre de Recherche et d'Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés**  
20 Rue Elisée Reclus 59650 VILLENEUVE D'ASCQ

**Région NORD - PAS de CALAIS**

**Responsable : M. Y. DAVID**

**Tél : 20.43.83.43**

**Nombre de personnes ayant participés aux travaux : 4 Ingénieurs dont  
1 ingénieur CRESTA ( 6 mois)**

**N° de contrat AFME : 0030005 du 30 Mai 1990**

**Objet de la décision: Etude comparative des coûts de génie civil**

**Date de notification du contrat : 30 Mai 1990**

**Nom du responsable AFME : M. MORCHEOINE Alain**

**Service AFME : Service TRANSPORTS (M. CHAUMAIN Gérard)**



## RESUME

Après une description géométrique et technique de 20 systèmes de transport urbain guidé exploités ou à l'étude en France, le présent rapport procède à une analyse comparative des coûts de construction en souterrain et en viaduc en fonction de différents paramètres de sols, de géométrie et de capacité.

Cette comparaison est effectuée pour des interstations de 800 m et de 400 m c'est à dire d'un ouvrage en ligne et d'une station adaptés à chacun des 20 systèmes pour des capacités équivalentes de transport.

Les coûts sont obtenus à partir de 2 logiciels de dimensionnement, les modèles METROV et ESTIM dont les notices sont jointes en annexe avec le bordereau des prix val. Jan. 92.

Les méthodes de construction analysées sont la tranchée couverte superficielle, la tranchée couverte profonde, le tunnel réalisé au tunnelier et selon la méthode traditionnelle et le viaduc.

L'intérêt de la construction d'un monotube ou d'un bitube pour réaliser un tunnel à 2 voies est examiné pour les principaux systèmes de transport.

Une analyse des coûts de génie civil à la place offerte pour chacun des 20 systèmes complète la comparaison.

Pour chacune des méthodes constructives la progression du coût de génie civil est examinée en fonction de l'augmentation de la section, des dimensions des ouvrages, c'est à dire de la largeur et de la hauteur des véhicules, le gabarit des véhicules retenus dans cette étude varie entre 1,60 m et 2,90 m, la longueur entre 3,12 m et 312 m: l'étude montre le gain de coût possible si on optimise l'implantation des équipements fixes et on réduit les dimensions intérieures des ouvrages.

En conclusion, cette étude nous montre qu'il y a de nombreux paramètres qui influent sur le coût de construction d'un souterrain, que la solution aérienne est la moins chère et que parmi les méthodes de construction de souterrain, la méthode au tunnelier peut s'avérer la moins chère au delà d'un certain linéaire d'ouvrage à réaliser: la solution bitube par rapport à une solution monotube selon les cas peut s'avérer la moins chère des deux types de construction.

Cette étude nous rappelle enfin qu'il est important de bien dimensionner les ouvrages en fonction du trafic attendu à court terme et à long terme et de choisir un système de transport suffisamment souple permettant d'absorber, si possible sans modification future du génie civil, toute demande de trafic supplémentaire.

**Mots clés:** Génie civil: tranchée couverte - tunnel - ouvrages d'art - calcul de coût de construction - systèmes de transport urbain guidés - métro léger - métro - métro lourd (RER).





## SUMMARY

After a geometrical and technical description of the 20 urban guided mass transit systems in operation or on study in France, this report makes a comparative analysis of tunnel and viaduct construction costs depending on the ground geology, the vehicles geometry and capacity .

This analysis is done for a 400 and an 800 meters segment ( tunnel or viaduct ) including one station adapted to each system: the comparison is achieved for an equal capacity of transport.

The costs are computed by 2 models called METROV and ESTIM whose descriptions are included in appendix with the unit price list, established on Jan. 1992.

The construction methods considered in this study are :

- a cut and cover method or superficial covered trench,
- a cut and covered method or deep covered trench,
- a shield method or tunneling with a tunnel boring machine,
- a conventional mining excavation method
- a viaduct.

The interest to bore one or twin tubes to realize a double track tunnel is also examined for the main mass transit systems.

The comparison is ended by an analysis of civil engineering costs per seat as a function of the number of transported passengers per hour for each considered system .

Finally, for each construction method the increase of civil engineering cost is examined as a function of the dimensional parameters such as diameter, width and height of constructions. In this report the gauge of the described vehicles is studied between 1.60 and 2.90 meters and their length between 3.12 and 312 meters.

The report shows the possible benefit when reducing the width and the height of a cut and cover construction or the diameter in the case of a tube.

In conclusion, this study brings to the fore the civil engineering costs depending on many variables. The viaduct is the least expensive construction and among the underground construction methods, the tunnelling boring machine method can be the least expensive beyond a minimum segment of tunnelling construction: in some cases a twin tubes construction works can be less expensive than for a one tube construction.

It is important to improve the design of a subway construction in relation with the frequentation expected in a short and a long term and to choose a mass transit system flexible enough to absorb the increasing demand of transport and if possible without supplementary construction works in transportation capacity improvements.



# ETUDE COMPARATIVE DES COUTS DE GENIE CIVIL SELON LES SYSTEMES DE TRANSPORT ADOPTES.

## ----- SOMMAIRE -----

	pages
<b>1 - Introduction</b>	<b>4</b>
1.1 Préambule	4
1.2 Présentation de l'étude	4
1.3 Les systèmes en présence	5
<b>2 - Le classement des systèmes de transport</b>	<b>20</b>
2.1 L'offre de capacité maximum des systèmes	20
2.2 Classement des systèmes selon les plages de débit habituelle	21
<b>3 - Le génie civil</b>	<b>23</b>
3.1 La tranchée couverte	23
3.2 Le tunnel profond	30
3.3 Le viaduc	33
3.4 Les stations souterraines et aériennes	34
<b>4 - L'étude économique</b>	<b>36</b>
4.1 Rappel des caractéristiques des matériels roulants	36
4.2 Coûts unitaires des infrastructures souterraines	39
4.2.1 Tranchée couverte - niveau superficiel	40
a/ coût pour un linéaire (1station + 1interstation) de 800 mètres	41
b/ coûts pour un linéaire (1station + 1interstation) de 400 mètres.	42
4.2.2 Tranchée couverte - niveau profond	43
a/ coût pour un linéaire (1station + 1interstation) de 800 mètres	44
b/ coûts pour un linéaire (1station + 1interstation) de 400 mètres.	45
4.2.3 Tunnelier	46
a/ coût pour un linéaire (1station + 1interstation) de 800 mètres	47
b/ coûts pour un linéaire (1station + 1interstation) de 400 mètres.	48

4.3	Coûts unitaires des infrastructures aériennes	49
	a/ coût pour un linéaire (1 station + 1 interstation) de 800 mètres	52
	b/ coûts pour un linéaire (1 station + 1 interstation) de 400 mètres.	53
4.4	Comparaison des coûts de génie civil des systèmes de chacun des 4 groupes	54
4.4.1	Tranchée couverte - niveau superficiel	54
4.4.2	Tranchée couverte - niveau profond	61
4.4.3	Tunnelier	65
4.4.4	Comparaison monotube bi-tube	73
4.4.5	Tunnel traditionnel	79
4.4.6	Viaduc	85
4.5	Comparaison des coûts de génie civil à la place offerte par chacun des systèmes.	89
4.5.1	Tranchée couverte - niveau superficiel	89
4.5.2	Tranchée couverte - niveau profond	95
4.5.3	Tunnelier	100
4.5.4	Viaduc	106
<b>5</b>	<b>- Conclusions</b>	<b>112</b>
5.1	Les limites de la comparaison	112
5.2	Les résultats de la comparaison	115
5.3	Conclusion générale	129
<b>6</b>	<b>- Bibliographie générale</b>	<b>133</b>
<b>7</b>	<b>- Annexes</b>	<b>135</b>

<b>Annexe au chapitre 3: Le génie civil</b>	<b>136</b>
3.1.4. Géotechnique	136
<b>Annexe au chapitre 4: L'étude économique</b>	<b>138</b>
4.1 Rappel des caractéristiques des matériels roulants	138
4.4 Comparaison des coûts de génie civil des systèmes des 4 groupes	148
4.4.1. Tranchée couverte - niveau superficiel	148
4.4.2. " " " profond	158
4.4.3 Travaux au tunnelier	167
4.4.5 Tunnel traditionnel	170
4.4.6. Viaduc	179
4.5 Comparaison des coûts de génie civil à la place offerte pour chaque système	182
4.5.1 Tranchée couverte superficielle	182
4.5.3 Tunnel au tunnelier	184
4.5.4 Viaduc	186
<b>Annexe au chapitre 5 Conclusions</b>	
5.2.2 Incidence de la variation du gabarit d'un système sur le coût de G.C.	188
5.2.2.a Tranchée couverte superficielle	189
5.2.2.b " " profonde	194
5.2.2.c Tunnelier	197
5.2.2.d Tunnel traditionnel	200
5.2.2.e Viaduc	204
5.2.2.f Construction de stations	207
<b>6 Présentation des logiciels utilisés</b>	<b>215</b>
6.1 Présentation du logiciel METROS	215
6.1.1 Manuel de l'utilisateur	226
6.2 Présentation du logiciel ESTIM	249
6.3 Bordereau des prix utilisés	255



## **1 - Introduction**

### **1.1 Préambule**

Le développement important de la circulation automobile et les inconvénients qui en découlent amènent à poser la question de l'implantation de transports collectifs qui soient à la fois performants et relativement attractifs.

Les systèmes automatiques guidés répondent à cet objectif et leur bon impact énergétique n'est plus à démontrer.

Le VAL, par exemple, a fait la preuve de sa bonne adaptabilité à certains types d'agglomérations, pour une certaine gamme de débits.

Il serait toutefois intéressant d'étendre ce genre de solution à des agglomérations de taille moins importante, à des débits plus modestes.

Parmi d'autres avantages l'intérêt énergétique est évident: assurer un nombre non négligeable de déplacements avec une bonne efficacité énergétique d'une part, en ne consommant que de l'électricité d'autre part.

Le premier paramètre pouvant intervenir sur les possibilités de diffusion de telles solutions est bien sûr le coût, lui même lié au type d'insertion envisageable, même si la décision nécessairement d'ordre politique s'appuie aussi sur d'autres critères.

On assiste ainsi actuellement dans le monde à des tentatives de développement de systèmes automatiques " intermédiaires ".

En France même, on peut penser au perfectionnement du SK, au projet Transville etc.. sans oublier les possibilités d'adaptation du VAL à des débits plus faibles. Pour tous ces systèmes, quand on raisonne sur des cas concrets, le coût des infrastructures a généralement une importance prédominante par rapport au coût des véhicules et des divers équipements, et plus particulièrement dans les nombreux cas de figure où le passage au souterrain ne peut pas être évité ( il faut en effet un contexte favorable pour passer en aérien ou au niveau du sol ).

C'est donc d'abord sur le cas du souterrain qu'une étude de la sensibilité du coût aux divers paramètres apparaît nécessaire. Il importe de savoir dans quelle mesure le gabarit largeur, le gabarit hauteur, la longueur d'interstation, la longueur de quai etc.. ont un impact sur le coût des tunnels.

### **1.2 Présentation de l'étude**

Après une description des systèmes retenus dans cette étude qui vont du système SK au système de métro de banlieue du Réseau Express Régional, nous classons ces systèmes en fonction des capacités offertes en passagers par heure et par sens dans 4 groupes définis par les plages de débit habituelles de ces systèmes et comparons les coûts d'infrastructures des différents systèmes permettant de transporter des débits de passagers équivalents.

En effet les caractéristiques géométriques des matériels roulants utilisés sont variées et ces différences entraînent des disparités dans les coûts de construction des ouvrages qu'ils soient aériens ou souterrains que nous essayons de mettre en évidence.

Pour chaque système nous définissons la géométrie des ouvrages en souterrain ou en viaduc à partir des ouvrages existants sur les réseaux de Paris, Lyon, Lille, Grenoble ou à partir des données des constructeurs pour des systèmes comme le SK 4000, SK 6000 et le Transville.

Après une description des méthodes constructives utilisées pour la réalisation de tunnel avec station souterraine et de viaduc avec station aérienne, l'étude économique est établie pour des caractéristiques géotechniques différentes dans des terrains granulaire ou cohérent, dans la nappe phréatique ou hors de la nappe phréatique.

### 1.3 Les systèmes en présence

#### 1.3.1 Le système SK

Le système SK est composé de petites cabines de 10 à 20 places, tractées par un câble, roulant sur des rails et se succédant à moins de 20 secondes d'intervalle. Entre les stations, les cabines sont entraînées à 20 km / h et en station elles sont décélérées à 1 km / h. Le débit varie selon la grandeur des cabines et l'intervalle retenu et peut atteindre 6000 personnes par heure et par sens.

Les capacités offertes

Nous retenons pour cette étude comparative 2 types de système SK:

- SK1 qui offre une capacité de transport de 4000 personnes par heure et par sens.
- SK2 qui offre une capacité de transport de 6000 personnes par heure et par sens.

Les capacités unitaires du matériel roulant correspondant aux systèmes SK1 et SK2 sont données dans le tableau suivant:

Système	Capacité Unitaire			Intervalle minimum en secs	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>		
SK1 4000					
Places assises	6	6			
Places debout	10	15	32	15	3840
Total	16	21	32		
SK2 6000					
Places debout	25	37	50	15	6000

Les principales caractéristiques géométriques et les poids des cabines des systèmes SK1 et SK2 sont données dans le tableau suivant, la hauteur est donnée au dessus du plan de roulement:

Longueur	Cabine SK1 4000		Longueur	Cabine SK2 6000		Hauteur
	Largeur	Hauteur		Largeur	Hauteur	
		en mètres				
3, 12	1, 60	2,785	4, 00	1, 85	2,785	



	Poids des cabines à vide et en charge en tonnes			nbre de roues
	Poids à vide	en CN*	en CE	
SK1	1,6	2,72	4,00	4
SK2	2,4	4,15	6,00	4

\* Nous prenons en compte un poids de 70 kg par passagers.

A partir des dimensions des cabines et de l'épaisseur de la voie, en implantant un cheminement central de 70 cm de large et une lame d'air de 30 cm le long des parois du tunnel, le tableau suivant donne les dimensions des ouvrages souterrains et aériens:

	en tranchée couverte		en tunnel profond		en viaduc	
	largeur du cadre en m	hauteur en m	monotube en m	bitube en m	voie unique en m	double en m
SK1	4, 50	3, 40	5, 10	3, 90	2, 60	4, 50
SK2	5, 00	3, 60	5, 65	4, 25	2, 85	5, 00

## BIBLIOGRAPHIE

- Le " SK ", produit ou concept ? par G. Thomas Dir. dept. "Systèmes de transport ", SOULE et Yann de Kermadec, Ingénieur - conseil dans Transports urbains N° 66 jan - mars 1989 page 17 à 23.

- SK automated continuous transportation System: the specifics, par Soulé Corp.

### 1.3.2 Le Système TRANSVILLE

Le Transville est un système de transport en commun, automatique urbain, en site propre de type "Transport automatique léger", dont les véhicules sont construits en matériaux composites, sustentés par des aéro-sustentateurs basse pression, motorisés par des moteurs électriques linéaires, à inducteurs fixes constituant une voie active.

Les cabines de ce système sont propulsées jusqu'à 72 km/h par une succession de "moteurs linéaires axiaux" implantés sur la voie.

Les capacités offertes

A partir de l'assemblage des éléments d'un module de base les véhicules peuvent être:

- une cabine simple de 6,6 m de long de 44 places à raison de 4 p/m<sup>2</sup>.
- une cabine double de 10,9 m de long de 81 places à raison de 4p/m<sup>2</sup>.
- une cabine triple de 15,20 m de long de 118 places à raison de 4p/m<sup>2</sup>.

L'intervalle de temps entre les passages de deux cabines est de 100 secondes: cet intervalle est obtenu avec un automatisme simplifié, il peut être réduit à des valeurs inférieures à 100 secondes pour des interstations inférieures à 800 mètres. Pour notre étude nous retenons l'intervalle donné par le constructeur de 100 secondes.

Les débits horaires, exprimés en "passagers par heure et par sens" avec une charge nominale de 4 p./h/sens sont:

- pour une cabine simple:	1584 pas./h/sens.
- pour une cabine double:	2916 " "
- pour une cabine triple:	4248 " "
- pour une rame de deux cabines double:	5832 " "
- pour une rame de deux cabines triples:	8496 " "
- pour une rame de trois cabines triples:	12744 " "

Nous retenons pour cette étude comparative 2 types de systèmes Transville, le système Transville 1 capable de transporter en charge normale 5800 p./h/sens et le système Transville 2 capable de transporter en charge normale 12700 p./h/sens.

Les capacités unitaires du matériel roulant correspondant aux systèmes Trans1 et Trans 2 sont données dans le tableau suivant:

Système Transville 1	Capacité Unitaire			Intervalle minimum en secondes	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>		
Places assises	40	40	40	100	5832
Places debout	122	182	244		
Total	162	222	284		
Transville 2					
Places assises	84	84	84	100	12744
Places debout	270	405	540		
Total	354	489	624		

Les principales caractéristiques géométriques et les poids des cabines des systèmes Transville 1 et Transville 2 sont données dans le tableau suivant:

	Système TRANSVILLE		Hauteur en m*
	Longueur en m	Largeur en m	
1 cabine	6, 60	2, 30	2,70/3,60
2 cabines	10, 90	2, 30	2,70/3,60
3 cabines	15, 20	2, 30	2,70/3,60
2 éléments de 2 cabines Transville 1	21, 80	2, 30	2,70/3,60
3 éléments de 3 cabines Transville 2	45, 60	2, 30	2,70/3,60

\* Nota: la 1ère hauteur est la distance entre le toit de la cabine et le plan de glissement des coussins d'air, la 2ème hauteur est la distance entre le toit de la cabine et le plan de roulement du chariot qui porte l'induit du moteur linéaire.

	Poids à vide	Poids des cabines à vide et en charge en tonnes		
		en CN	en CE	Nbre de roues
Transville 1	15,2	27,52	36,48	coussins d'air et patins
Transville 2	22,8	41,28	54,72	coussins d'air et patins

Le constructeur indique que l'évacuation exceptionnelle en ligne des passagers se fait par le bout avant du véhicule sur la voie sous réserve de l'acceptation par la Commission de Sécurité: en effet cette voie en béton sans obstacle se compose de 2 bandes de 0,80 m de large supportant les coussins d'air du véhicule de part et d'autre d'une ouverture de 0,55 m et de 0,90 m de profond prévue pour le passage de la structure support du chariot sur lequel est fixé le moteur linéaire.

Ainsi dans le cas du système Transville nous retenons une lame d'air de 30 cm le long des parois du tunnel et de 50 cm entre 2 véhicules qui se croisent soit 110 cm à ajouter à la largeur de 2 véhicules pour dimensionner l'ouvrage souterrain.

Si cette dimension de 110 cm pouvait être adoptée pour chaque système étudié ici, nous aurions un gain en largeur pour chaque ouvrage en voie double de:

- dans le cas du métro de Lyon un gain de 70 cm, la dimension à ajouter au gabarit statique de 2 véhicules qui se croisent étant de 180 cm,
- dans le cas du métro de Lille un gain de 80 cm, la dimension à ajouter au gabarit statique de 2 véhicules qui se croisent étant de 190 cm,
- dans le cas du tramway un gain de 80 cm, la dimension à ajouter au gabarit statique de 2 véhicules qui se croisent étant de 190 cm,
- dans le cas du métro de Paris un gain de 110 cm, la dimension à ajouter au gabarit statique de 2 véhicules qui se croisent étant de 220 cm,
- dans le cas du RER un gain de 200 cm, la dimension à ajouter au gabarit statique de 2 véhicules qui se croisent étant de 310 cm: les dimensions indiquées ci-dessus ne tiennent compte que du gabarit statique des véhicules en alignement droit, si nous retenons le gabarit dynamique et le profil de la voie dans le cas du RER le gain serait moins important.

Pour cette étude nous ne retenons que les dimensions d'ouvrage en alignement droit, dimensions d'ouvrages existants sauf pour les systèmes de transport à l'étude.

Pour dimensionner les ouvrages adaptés aux différents systèmes de transport on doit tenir compte du gabarit statique et dynamique des véhicules, de l'état de la voie, des profils en long et en travers de la voie en alignement droit et en courbe, néanmoins les dimensions données ci-dessus donnent une bonne approximation des écarts que l'on peut obtenir en supprimant ou modifiant tel ou tel type d'évacuation en ligne des passagers, en effet la plupart des dimensions ci-dessus proviennent d'ouvrages existants.

Les surdimensionnements entraînent des surcoûts de génie civil non négligeables notamment avec la méthode de construction au tunnelier et en viaduc.

En tenant compte d'une lame d'air de 30 cm le long des parois du tunnel et de 50 cm entre 2 véhicules qui se croisent, le tableau suivant donne les dimensions en alignement droit des ouvrages souterrains et aériens qui sont identiques pour les 2 systèmes, seule la longueur des quais varie, cette longueur est de 22 m pour Transville 1 et 46 m pour Transville 2.

TR1&2	Tranchée couverte		hauteur	Tunnel profond		Viaduc	
	larg. en m du cadre voie unique	voie double		Diamètre intérieur monotube	bitube	larg. en m du tablier voie unique	voie double
	3, 00	5, 80	4, 40	6, 30	4, 30	2, 60	5, 40

## BIBLIOGRAPHIE

- Transville, "hi-tech" et écologique: un nouveau concept de transport urbain, par PFT  
Procédés France Transport.

- Transville Gabarits de circulation, par PFT.

### 1.3.3 Le système VAL

Le système VAL (Véhicule Automatique Léger) est un système de transport guidé exploité avec des véhicules électriques qui roulent en utilisant des essieux simples et des roues équipées de pneus et circulent en site propre intégral, ce système est caractérisé par:

- l'automatisme intégral qui permet une exploitation avec des intervalles très courts jusqu'à 1 minute entre rames;
- le gabarit compact (2,06 m de large dans sa version de base) et la légèreté de l'équipement de roulement (véhicules sur essieux à roulement pneu);
- la présence de portes palières le long des quais des stations dont l'ouverture/fermeture est synchronisée automatiquement avec l'ouverture/fermeture des portes des véhicules.

Les capacités offertes

Nous retenons pour cette étude les véhicules VAL 206 et VAL 256 et les systèmes exploités avec 1 ou 2 véhicules VAL 206 et avec 1, 2, 3 ou 4 véhicules VAL 256 soit 6 cas.

Les capacités unitaires de ces 2 véhicules et des différents systèmes sont données dans le tableau ci après:

Système VAL 206-1	Capacité Unitaire			Intervalle minimum en secondes	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>		
Places assises	44	44	44		
Places debout	116	174	232	60	9600
Total	160	218	276		
VAL 206-2	320	436	552	60	19200
VAL 256-1					
Places assises	12	12	12		
Places debout	80	120	160	60	5520
Total	92	132	172		
VAL 256-2	184	264	344	60	11040
VAL 256-3	276	396	516	60	16560
VAL 256-4	368	528	688	60	22080

Les principales caractéristiques géométriques et poids des véhicules des systèmes VAL 206-1, 206-2, 256-1, 256-2, 256-3, 256-4 sont données ci-après:

	Longueur	Système VAL		Longueur des quais en m
		Largeur	Hauteur	
VAL 206-1	26	2, 06	3,25	26
VAL 206-2	52	2, 06	3,25	26
VAL 256-1	14	2, 56	3,53	14
VAL 256-2	28	2, 56	3,53	28
VAL 256-3	42	2,56	3,53	42
VAL 256-4	56	2,56	3,53	56

Poids des véhicules à vide et en charge en tonnes

	Poids à vide	en CN*	en CE	nbre d'essieux
VAL 206-1	27,8	39	47,12	4
VAL 206-2	55,6	78	94,24	8
VAL 256-1	18,6	25,4	30,64	2
VAL 256-2	37,2	50,08	61,28	4
VAL 256-3	55,8	75,12	91,92	6
VAL 256-4	74,4	100,16	122,56	8

A partir des dimensions des véhicules et de l'épaisseur de la voie, en tenant compte d'une passerelle d'évacuation le long de chaque voie de 70 cm et d'une lame d'air de 50 cm entre 2 véhicules qui se croisent, le tableau suivant donne les dimensions des ouvrages souterrains et aériens en alignement droit:

Tranchée couverte			Tunnel foré				Viaduc	
larg.& haut. du cadre en m			Foré	Traditionnel		larg. en m du tablier		
voie unique	ht	voie double	Diam. int. mono	bitube	ouverture mono	bitube	voie uni.	voie double
VAL 206								
3,10	3,90	6,10	6,80	4,65	6,40	4,10	3,70	6,50
VAL 256								
3, 60	4,20	7,10	7, 80	5,15	7,40	4,60	4,20	7,50

## BIBLIOGRAPHIE

- Catalogue des matériels Français de Transports collectifs urbains de Mai 1988 édité par le CETUR et la DTT.

- Le Métro de Lille par B. Guillemot, CUDL et Y. David, CRESTA dans les Annales des Ponts et Chaussées 4e trim. 1985.

- Les évolutions du VAL par D. Ferbeck, Matra Transport et B. Royaux, Gec-Alsthom dans Colloque AFCET 1989.

### 1.3.4 Le système MAGGALY

Le système MAGGALY (Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise) est un système de transport guidé exploité avec des véhicules électriques sur bogie comportant 4 roues porteuses sur pneus accolées à 4 roues fer de sécurité et circulant en site propre intégral, ce système se caractérise par:

- le pilotage automatique fondé sur le principe du canton mobile déformable (CMD), met en service des microprocesseurs de sécurité.

- la protection des voyageurs en station et lors des manoeuvres d'embarquement - débarquement sans recourir aux portes palières de quai au moyen d'un système de détection par nappe infrarouge de pénétration de l'espace des voies en station et avec des portes de véhicules équipées de bords sensibles.

Les capacités offertes

Les véhicules de ce type de Métro sont à grand gabarit soit 2, 90 mètres de large, ce système est exploité avec des rames de 2 ou 4 véhicules.

Les capacités unitaires du matériel roulant et les capacités maximum offertes par les systèmes exploités avec des rames de 2 véhicules soit MAGGALY 1 ou avec des rames de 4 véhicules soit MAGGALY 2 sont données dans les tableaux suivants:

Système MAGGALY	C N 4p/m <sup>2</sup>	Capacité Unitaire CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>
1 voiture			
Places assises	56	56	56
Places debout	76	114	152
Total	132	170	208

Système MAGGALY	C N 4p/m <sup>2</sup>	Capacité Unitaire CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>	Intervalle minimum en secondes	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
MAGGALY 1					
2 voitures	264	340	416	90	10560
MAGGALY 2					
4 voitures	528	680	832	90	21120

Les principales caractéristiques géométriques et poids des véhicules exploités dans les systèmes MAGGALY 2 sont données dans le tableau suivant:

Système MAGGALY				
	Longueur en m	Largeur	Hauteur	Longueur des quais
1 véhicule	18	2, 89	3,45	
MAGGALY 1	36	2, 89	3,45	36
MAGGALY 2	72	2, 89	3,45	72

Poids des véhicules à vide et en charge en tonnes				
	Poids à vide	en CN*	en CE	nbre d'essieux
MAGGALY 1	50,6	69,08	79,72	8
MAGGALY 2	101,2	138,16	159,44	16

A partir des dimensions des véhicules et de l'épaisseur de la voie, en tenant compte d'une passerelle d'évacuation le long de chaque voie de 70 cm et d'une lame d'air de 40 cm entre 2 véhicules qui se croisent, le tableau suivant donne les dimensions des ouvrages souterrains et aériens en alignement droit qui sont identiques pour les 2 systèmes, seule la longueur des quais varie selon le tableau ci dessus:

Tranchée couverte			Tunnel foré				Viaduc	
larg.& haut. du cadre			Foré	Traditionnel		larg. en m du tablier		
voie unique	ht	voie double	Diam. int.	ouverture	mono	bitube	voie uni.	voie double
en m	en m	en m	mono	bitube	mono	bitube	en m	en m
en m	en m	en m	en m	en m	en m	en m	en m	en m
3,90	4,05	7,60	8,35	5,30	8, 80		4,05	7,60

## BIBLIOGRAPHIE

- Le métro de Lyon par M.R. Waldmann, Dir. de la SEMALY, dans Revue Technica de Mai-Juin 1975.

- Métro de Lyon: résultats du concours ligne D. Les boucliers à pression de boue, par J. Ferrand Dir. adj. de la SEMALY et J. Pera Dir. du CETU, dans les Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.



### 1.3.5 Le Tramway Français ou Métro léger

Le tramway moderne dérive de la technique des anciens tramways, c'est un système avec conducteur, les systèmes précédents étant exploités sans conducteurs, circulant en général en site propre mais pouvant aussi circuler en site banal ou protégé c'est à dire en surface ce qui est favorable aux coûts d'investissement.

Le tramway Français ( exploité à Nantes ou Grenoble) est un véhicule de 2 ou 3 caisses articulées montées sur 3 ou 4 bogies, contenant 172 ou 239 passagers en charge normale, piloté à vue, pouvant plus ou moins être automatisé afin d'augmenter la sécurité et accroître la fréquence des rames, en fonction du linéaire de mise en site propre de la voie.

#### Les capacités offertes

Nous retenons pour cette étude comparative 3 types de système de Métro léger: les capacités unitaires du matériel roulant correspondant aux systèmes Tram 1, Tram 2 et Tram 3 sont données dans le tableau suivant:

Système Métro Léger	Capacité Unitaire		
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>
1 véhicule			
Places assises	54	54	54
Places debout	120	180	240
Total	174	234	294

Système Métro Léger		Capacité Unitaire			Intervalle minimum en secondes	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
		C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>		
Tram 1	1 veh.	174	234	294	90*	6 960
Tram 2	2 veh.	348	468	588	90*	13 920
Tram 3	3 veh.	522	702	882	90*	20 880

\* Nota: Nous considérons qu'en site propre intégral le tramway peut être exploité avec un intervalle minimum de 90 secondes, une telle fréquence nécessite l'adoption d'une signalisation de sécurité et d'une signalisation par cantonnement ce qui augmente le coût du système.

Les principales caractéristiques géométriques et les poids des véhicules de Métro léger Tram 1, Tram 2 et Tram 3 sont données ci-après:

	Longueur en m.	Système Métro Léger Largeur	Hauteur*	Longueur des quais
1 véhicule	29, 40	2, 30	3,6	30
Tram 1	29,40	2, 30	3,6	30
Tram 2	58,80	2, 30	3,6	60
Tram 3	88, 20	2, 30	3,6	90

\* Nota: Nous prenons la hauteur de captation minimale, la hauteur du véhicule par rapport au plan de roulement étant de 3,365 m.

Poids des véhicules à vide et en charge en tonnes				
	Poids à vide	en CN*	en CE	nbre d'essieux
Tram 1	44,6	56,78	65,18	6
Tram 2	89,2	113,56	130,16	12
Tram 3	133,8	170,34	195,40	18

A partir des dimensions des véhicules et de l'épaisseur de la voie, en implantant des cheminements latéraux de 75 cm de large et une lame d'air de 40 cm entre 2 véhicules qui se croisent, le tableau suivant donne les dimensions des ouvrages souterrains et aériens en alignement droit:

Tranchée couverte			Tunnel foré				Viaduc	
larg. & haut. du cadre en m			Foré		Traditionnel		larg. en m du tablier	
voie unique	ht	voie double	Diam. int. mono	bitube	ouverture mono	bitube	voie uni.	voie double
3,35	4,50	6,50	7,40	5,40			3,35	6,50

### Bibliographie

- Les transports urbains guidés de surface, situation actuelle et perspectives, par F. Kuhn dans Synthèse INRETS N°4, Mars 1987.

### 1.3.6 Le Métro sur Pneus

Le Métropolitain est un système de transport guidé urbain classique avec conducteur, utilisant des véhicules sur bogies avec roulement sur roues fer ou sur pneus, circulant uniquement en site propre intégral; ce système est destiné à équiper les grands axes des agglomérations millionnaires.

Dans cette étude comparative nous prenons le cas du Métro sur pneus Parisien à partir duquel de nombreux métros ont été réalisés en France et à l'étranger.

#### Les capacités offertes

Les capacités unitaires du matériel roulant MP 73 sont données dans le tableau suivant:

Les capacités maximum offertes par le système exploité avec des rames de 5 véhicules soit MP 73-1 ou avec 6 véhicules soit MP 73-2 sont données dans les tableaux suivants:

Système MP 73	Capacité Unitaire		
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>
-----			
Motrice avec cabine			
Places assises	24	24	24
Places debout	90	135	180
Total pour M	114	159	204
-----			
Motrice sans cabine			
Places assises	24	24	24
Places debout	95	142	190
Total pour N	119	166	214
-----			
Remorque			
Places assises	24	24	24
Places debout	95	142	190
Total pour R	119	166	214
-----			

Système MP 73	Capacité Unitaire			Intervalle minimum en secondes	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
	C N	CE	Surcharge		
	4p/m <sup>2</sup>	6p/m <sup>2</sup>	8p/m <sup>2</sup>		
<hr/>					
Capacité d'1 rame MRRNM soit 5 voitures					
	585	816	1050	90	23 400
<hr/>					
Capacité d'1 rame MNRRNM soit 6 voitures					
	704	982	1264	90	28 160
<hr/>					

Les principales caractéristiques géométriques et les poids des véhicules exploités dans les systèmes MP 73-1 et MP 73-2 sont données dans le tableau suivant:

Système Métro sur Pneus				
	Longueur en m	Largeur	Hauteur	Longueur des quais
1 motrice M	15,51	2,40	3,488	
1 remorque R	14,79	2,40	3,488	
1 motrice N	14,79	2,40	3,488	
MP 73-1 5voit.	75,40			76
MP 73-2 6voit.	90,19			90

Poids des véhicules à vide et en charge en tonnes				
	Poids à vide	en CN*	en CE	nbre d'essieux
1 motrice M	23,6	31,58	37,88	4
1 remorque R	16,4	24,73	31,38	4
1 motrice N	22,8	31,13	37,78	4
MP 73-1 5 voit. MRRNM	102,8	143,75	176,30	20
MP 73-2 6 voit. MNRNM	125,6	178,40	214,08	24

\* Le poids d'un passager est de 70 kg.

A partir des dimensions des véhicules et de l'épaisseur de la voie, en tenant compte d'un cheminement de 70 cm le long de chaque voie dans un espace de 85 cm le long des parois latérales et d'une lame d'air de 50 cm entre 2 rames qui se croisent, le tableau suivant donne les dimensions des ouvrages souterrains et aériens en alignement droit qui sont identiques pour les 2 systèmes, seule la longueur des quais varie selon le tableau des dimensions du système ci dessus:

Tranchée couverte			Tunnel foré				Viaduc	
larg. & haut. du cadre en m			Foré		Traditionnel		larg. en m du tablier	
voie unique	ht	voie double	Diam. int. mono	bitube	ouverture mono	bitube	voie uni.	voie double
3,55	4,25	7,00	8,60	5,60	7,10	4,20	7,00	3,55

## BIBLIOGRAPHIE

- Construction des Métros, par M. Bigey, F. Guittonneau, M. Vanel, J. Veinberg, Ed. RATP 1973.

- Memoria Metro Ciudad de Mexico: nota sobre el Metro de Paris page 183 à 188 par Arq. Angel Borja Navarrete ISTME 1977.

### 1.3.7 Le Métro Régional

Le Métro Régional est un système de transport guidé qui se situe à mi distance entre le chemin de fer suburbain et le métro urbain: ce système est utilisé sur le Réseau Express Régional de la Région Parisienne.

Ce système se caractérise par:

- le grand gabarit qui autorise des débits très importants souvent supérieurs à 50 000 pas/h/sens.
- l'utilisation maximum des infrastructures ferrées existantes et des interstations longues qui permettent une vitesse commerciale de l'ordre de 50 km/h pour desservir les banlieues éloignées.

Le Métro Régional est conçu pour être compatible avec les infrastructures de la SNCF ou de la RATP, il est alimenté en énergie électrique par caténaire, en 1,5 kV (RATP) ou 25 kV alternatif (SNCF): il utilise des véhicules sur bogies roues fer à l'écartement normal (1435mm).

Les capacités offertes

Les capacités unitaires du matériel roulant et les capacités maxima offertes par le système exploité avec des rames de 4, 8 ou 12 véhicules soit respectivement RER 1, RER 2 ou RER 3 sont données dans le tableau suivant:

Système RER MI 84	Capacité Unitaire		
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>
1 Remorque R			
Places assises	84	84	84
Places debout	135	202	270
Total pour R	219	286	354
1 Motrice M	211	276	342

Les rames MI 84-1 avec 4 voitures, MI 84-2 avec 8 voitures et MI 84-3 avec 12 voitures ont les capacités unitaires suivantes:

Système RER MI 84	Capacité Unitaire			Intervalle minimum en secondes	Capacité Maxi du Système en C N en pas / h / sens
	C N 4p/m <sup>2</sup>	CE 6p/m <sup>2</sup>	Surcharge 8p/m <sup>2</sup>		
MI 84-1 MRRM soit 4 voitures					
Capacité Tot:	860	1124	1392	120	25800
MI 84-2 MRRM-MRRM					
Capacité tot:	1720	2248	2784	120	51600
MI 84-3 MRRM-MRRM-MRRM					
Capacité tot:	2580	3372	4176	120	77400

Les principales caractéristiques géométriques et les poids des véhicules exploités dans les systèmes MI 84-1, MI 84-2, MI 84-3 sont données dans le tableau suivant:

Système Métro Régional				
	Longueur en m.	Largeur	Hauteur	Longueur des quais
1 voiture	26	2,80	4,18	
MI 84-1 4 voit.	104	2,80	4,18	104
MI 84-2 8 voit.	208	2,80	4,18	208
MI 84-3 12 voit.	312	2,80	4,18	312

Poids des véhicules à vide et en charge en tonnes				
	Poids à vide	en CN*	en CE	nbre d'essieux
1 motrice M	56	70,77	79,94	4
1 remorque R	48	63,33	72,78	4
MI 84-1 MRRM	208	268,20	305,44	16
MI 84-2	416	536,40	610,88	32
MI 84-3	624	804,60	916,32	48

\* Le poids d'un passager est de 70 kg.

A partir des dimensions des véhicules et de l'épaisseur de la voie, en tenant compte d'un cheminement d'évacuation le long de chaque voie de 70 cm dans un espace de 110 cm le long des parois des ouvrages, d'un espace de 90 cm entre 2 rames qui se croisent, le tableau suivant donne les dimensions des ouvrages souterrains et aériens en alignement droit qui sont identiques pour les 3 systèmes, seule la longueur des quais varie selon le tableau des dimensions du système ci dessus:

Tranchée couverte			Tunnel foré				Viaduc	
larg. & haut. du cadre en m			Foré		Traditionnel		larg. en m du tablier	
voie unique	ht	voie double	Diam. int. mono	bitube	ouverture mono	bitube	voie uni.	voie double
5,00	6,30	8,70	8,70	6,30	8,70	5,70	5,00	8,70

## BIBLIOGRAPHIE

- Catalogue des Matériels Français de Transports collectifs urbains par la DTT et le CETUR Mai 1988

- Recueil UITP des Transports Publics tome 1 par Lee H. Rogers et l'UITP 1985.

## 2 - Le classement des systèmes de transport

A partir des descriptions précédentes nous pouvons classer les différents systèmes de transport selon leur possibilité de débit à l'heure de pointe: la limite haute est donnée avec l'intervalle minimum de passage des rames, la limite basse est établie à partir d'un intervalle habituel retenu en heures creuses.

### 2.1 L'offre de capacité maximum des systèmes

Le tableau ci-après récapitule les différents systèmes avec leur offre de capacité:

Système	Intervalle en heures creuses en secs.	Capacité Mini du Système en CN 4 pas./m <sup>2</sup>	Intervalle Mini en secs.	Capacité Maxi du Système en C N 4 pas./m <sup>2</sup>
SK1 4000	30	1920	15	3840
SK2 6000	30	3000	15	6000
Transville 1	240	2430	100	5832
Transville 2	240	5310	100	12744
VAL 206-1	240	2400	60	9600
VAL 206-2	240	4800	60	19200
VAL 256-1	240	1380	60	5520
VAL 256-2	240	2760	60	11040
VAL 256-3	240	4140	60	16560
VAL 256-4	240	5520	60	22080
MAGGALY 1	240	3960	90	10560
MAGGALY 2	240	7920	90	21120
Tramway 1	240	2610	90*	6960
Tramway 2	240	5220	90*	13920
Tramway 3	240	7830	90*	20880
MP 73-1	240	8775	90	23400
MP 73-2	240	10560	90	28160
MI 84-1	300	10320	90	25800
MI 84-2	300	20640	90	51600
MI 84-3	300	30960	90	77400

\* Nota: Nous prenons un intervalle mini pour le tramway de 90 secondes quand il se trouve en site propre intégral, en souterrain ou en viaduc dont les coûts sont l'objet de notre comparaison: une telle fréquence nécessite un système de télécommunications renforcé d'un niveau identique à celui que l'on trouve sur les métros exploités en conduite manuelle.

## 2.2 Classement des systèmes selon la plage de débit habituelle

Afin de comparer les coûts de génie civil de systèmes de transport équivalents du point de vue des débits de passagers transportés nous classons ces systèmes dans des plages de capacité offerte de 0 à 6000 pas./ h / sens, de 6000 à 15 000 pas. / h / sens, de 15 000 à 25 000 pas. / h / sens et au delà de 25 000 pas. / h / sens.

Nous trouvons ainsi dans le groupe I les systèmes suivants:

Système	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	passagers / h / sens						
SK 1	o	o	o	o	o	o	o
VAL 256-1	o	o	o	o	o	o	o
TRANS 1	o	o	o	o	o	o	o
SK 2	o	o	o	o	o	o	o

Nous trouvons dans le groupe II, les systèmes suivants:

Système	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000
	passagers / h / sens									
TRAM 1	o	o	o	o						
VAL 206-1	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
MAGG 1	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
VAL 256-2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
TRANS 2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
TRAM 2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o



Nous trouvons dans le groupe III, les systèmes suivants:

Système	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	25000
	passagers / h / sens									
VAL 256-3	□	□	□							
VAL 206-2	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
TRAM 3	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MAGG 2	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
VAL 256-4	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MP 73	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

Nous trouvons dans le groupe IV, les systèmes suivants:

Système	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000	70000	80000
	passagers / h / sens									
MI 84-1	□	□	□							
MP73-2	□	□	□	□	□					
MI 84-2	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MI 84-3	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□



### **3 - Le génie civil**

L'étude ci-après a nécessité de nombreuses hypothèses simplificatrices pour éviter un nombre de calcul trop fastidieux. Le rapport, dans sa première partie, présente de façon succincte les données retenues.

#### **3.1 - Tranchée couverte :**

Le principe de cette construction consiste à exécuter un cadre en béton armé à ciel ouvert, avec un profil en long le plus superficiel possible.

Cette réflexion nous amène à considérer deux niveaux de fond de fouille :

- l'un avec une couverture de 1,50m pour assurer le passage transversal de réseaux
- l'autre avec une couverture de 8m pour créer une liaison tunnel profond / tranchée couverte ou pour éviter de dévier des réseaux importants.

##### **3.1.1 - Déviation des réseaux, de la circulation**

L'exécution à ciel ouvert implique un tracé sous les voiries existantes. Des travaux préliminaires de déviation de réseaux des services publics et concessionnaires sont réalisés avant le terrassement.

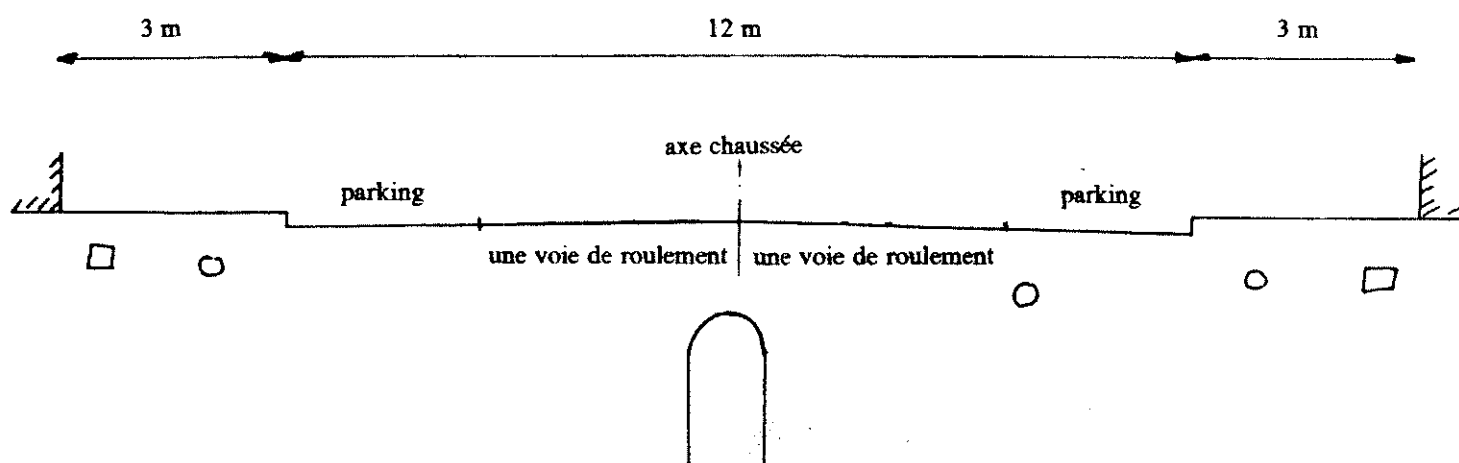
Cette disposition concerne les réseaux parallèles au tracé. Les réseaux perpendiculaires sont soutenus au-dessus de la fouille.

Des platelages sont disposés au-dessus de la fouille pour rétablir les circulations transversales, ceci pour gêner le moins possible les riverains ainsi que les automobilistes.

Des circulations parallèles sont déviées de part et d'autre de la fouille. Une méthode variante consiste à mettre en place le soutènement puis à bétonner la dalle de couverture du cadre sur le sol. La circulation en surface est rétablie après avoir remblayé au-dessus de cette dalle. L'excavation et le bétonnage du cadre sont réalisés en sous-œuvre (la dalle portant sur les soutènements). Cette solution onéreuse est réservée au cas où le rétablissement de la voirie doit être fait le plus rapidement possible. Ce type de réalisation n'est pas développé dans le cadre de cette étude.

Afin d'estimer le coût déviation de réseaux, nous avons établi une coupe type en milieu urbain (cf. Fig. 1 & 2):

- voirie de largeur 18m entre bâtiments,
- collecteur d'assainissement axé sous la chaussée
- réseaux d'eau, gaz, électricité,... sous les deux trottoirs.

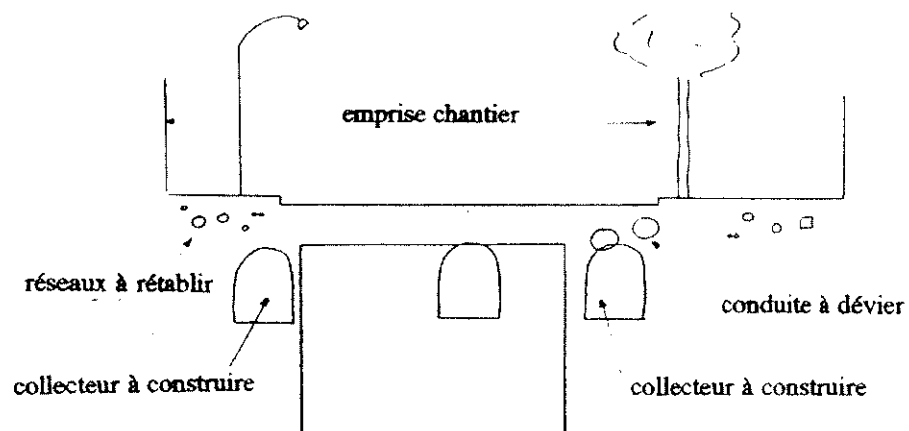


Pour la plupart des système de transport, le collecteur d'assainissement sera détruit pour être scindé en deux de part et d'autre du cadre afin de rétablir la desserte. Les cadres de faible largeur pourront être implantés de façon à ne pas détruire le collecteur existant. Cependant, il faudra construire un nouveau collecteur ne desservant qu'un seul côté de la rue.

L'exécution de celui-ci entrainera la démolition et la remise en place des autres réseaux présents sous le trottoir.

Il faudra également reconstituer les liaisons transversales au-dessus du cadre telles que les conduites d'eau, de gaz, d'électricité...

Le rétablissement de la voirie est supposé être effectué au droit des travaux de déviation des réseaux et de construction du cadre.



#### CAS DU CADRE DE GRANDE LARGEUR

Fig. 1

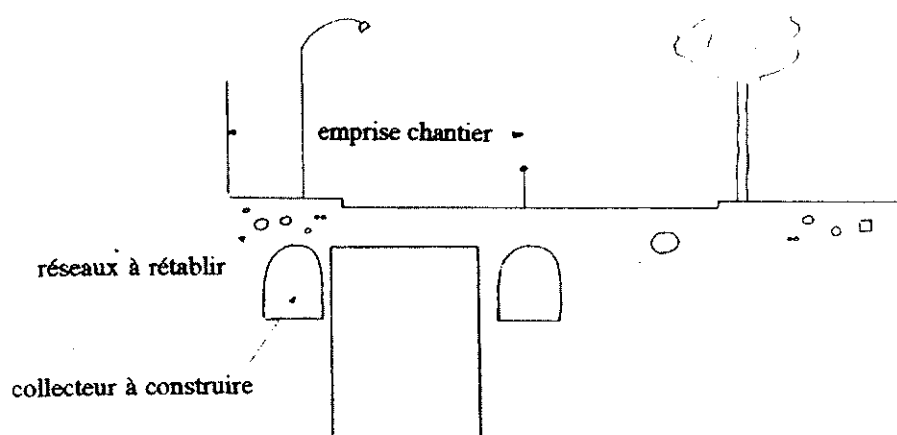
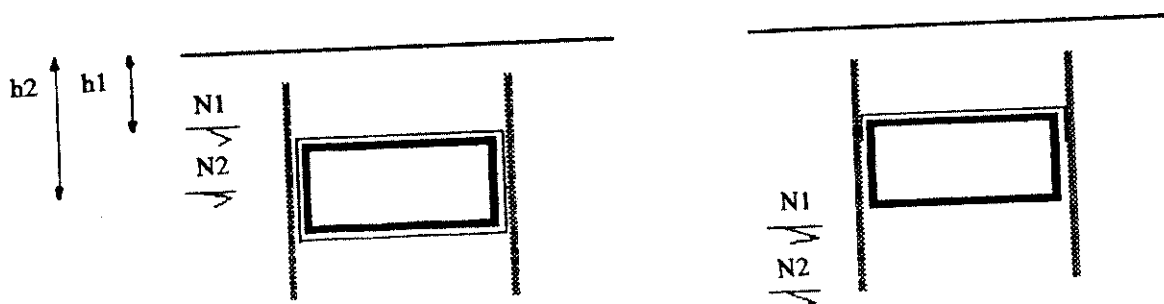


Fig. 2

#### CAS DU CADRE DE FAIBLE LARGEUR

### 3.1.2 - Etanchéité - Niveau de la nappe phréatique

Nous partons sur l'hypothèse d'une étanchéité extérieure au cadre qui présente l'avantage de protéger le béton ainsi que les armatures de toute agression extérieure. La hauteur de pose de l'étanchéité sur les piliers dépendant du niveau de la nappe phréatique, nous nous limitons à deux cas de niveau d'eau.



avec N1 : niveau de nappe de protection en exploitation

N2 : niveau de nappe maximum de protection en phase chantier.

Le niveau N1 est pris en compte pour calculer la stabilité du cadre vis à vis des pressions d'eau sous le radier.

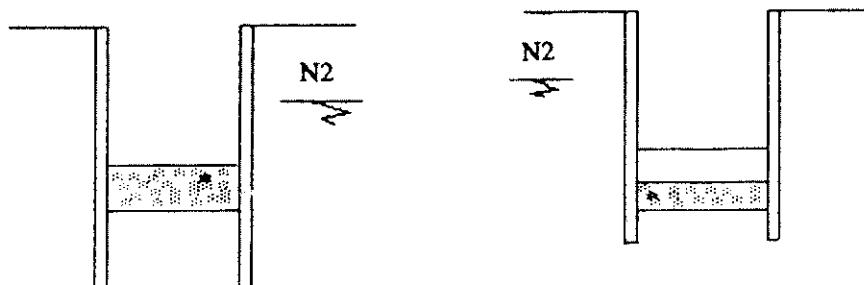
Le niveau N2 détermine le mode d'étanchement du fond de fouille pendant la durée des travaux. Au-delà de cette valeur, nous considérons que le chantier est inondé.

	"Sans eau"	"Avec eau"
h1	7,50m	1,50m
h2	9,50m	3,50m

### 3.1.3 - Etanchement du fond de fouille

L'étanchement est réalisé suivant deux procédés : le béton immergé et le radier injecté. Ils consistent à équilibrer la poussée hydrostatique :

- l'un par une masse de béton coulé dans l'eau sur le fond de fouille,
- l'autre par une couche de sol injecté depuis la surface avant le terrassement, surmontée par une couche de terrain.



Béton immergé

Radier injecté

Le choix entre ces deux méthodes est effectué d'après des critères économiques et de faisabilité.

Pour des sols pouvant admettre ces deux techniques, il existe une limite économique, fonction du niveau N2, au-dessous de laquelle il est préférable d'étancher à l'aide d'un béton immergé au lieu d'un radier injecté.

Il existe des terrains qui, ayant de forts taux d'argile et de limons, ne sont pas injectables, mais, par leur faible perméabilité et suivant l'emplacement de ce terrain dans le sous-sol, peuvent suffire à constituer un bouchon étanche au passage de l'eau.

### 3.1.4 - Géotechnique

Devant la diversité des terrains et coupes géologiques, nous proposons dans le cadre de cette étude théorique de déterminer deux types de terrains homogènes, de caractéristiques géotechniques moyennes suivantes :

- Terrain granulaire

$$C = 0 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad \varphi = 30^\circ$$

- Terrain cohérent

$$C = 0,05 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad \varphi = 20^\circ$$

Cette simplification sommaire de la classification des sols permet d'obtenir des ordres de grandeurs cohérents de coûts de génie civil. (cf. annexe le tableau des caractéristiques géotechniques retenues)

En effet, des graviers ou sables compacts appartiennent à la catégorie "terrain cohérent" (cohésion non nulle) tous comme les argiles, bien que ces deux types de sol aient un comportement différent.

### **3.1.5 - Soutènement**

Le tracé étant généralement implanté en site urbain, le terrassement de la tranchée ne peut être exécuté qu'à l'abri de rideaux de soutènement (une emprise au sol limitée élimine la solution de talutage).

Il existe deux sortes de murs de soutènement :

- soutènement discontinu, hors d'eau tel que les berlinoises,
- soutènement continu, étanche tel que les palplanches, les parois

moulées ou préfabriquées.

Le choix obéit à des critères de faisabilité puis économiques.

- ***Berlinoises :***

Les berlinoises sont constituées de profilés métalliques espacés tous les 2,50m à 3m, introduits dans le sol avant terrassement.

Le blindage entre les profilés est assuré par des planches en bois ou béton armé ou par un béton projeté armé d'un treillis soudé.

Ce soutènement est stabilisé par des tirants ancrés dans le sol à l'arrière du mur ou bien par des butons (profilés métalliques) disposés au travers de la fouille. Ces deux dispositifs s'appuient directement sur les profilés verticaux.

Ils peuvent également s'appuyer sur des liernes (profilés métalliques) disposées sur les rideaux parallèlement à l'axe longitudinal de la tranchée. Ces liernes répartissent les efforts appliqués sur les profilés verticaux aux tirants ou aux butons.

Les berlinoises sont utilisées dans les terrains granulaires et cohérents.

- ***Palplanches :***

Les palplanches sont des profilés métalliques à section particulière. La longueur totale excède rarement 12 à 15m. Au-delà de cette valeur, elles peuvent flamber lors de leur introduction dans le terrain. Elles sont généralement mise en oeuvre dans les terrains granulaires et nécessitent un maintien à l'aide de tirants ou de butons associés aux liernes.

- ***Parois moulées - parois préfabriquées :***

L'exécution des parois moulées consiste :

- à creuser une tranchée de l'épaisseur voulue,
- à remplir la tranchée d'une boue, au fur et à mesure de l'excavation, pour empêcher l'affaissement des parements,



- à mettre en place l'armature,
- à bétonner.

Pendant le terrassement, les déformées des parois sont limitées à l'aide de butons ou de tirants.

La mise en oeuvre des parois préfabriquées suit le même procédé décrit ci-dessus à l'exception du ferrailage et bétonnage in situ.

Cette technique assure un meilleur état de surface du parement après terrassement ainsi qu'une meilleure qualité du béton.

Les dimensions de ce type de paroi sont cependant limitées par les moyens de manutention, transport et levage. Les parois moulées tout comme les parois préfabriquées conviennent aux terrains granulaires et cohérents.

#### *Tableau récapitulatif*

Nous présentons dans ce tableau, les types de soutènements les plus courants et leur domaine d'utilisation:

SOUTENEMENT	TERRAIN GRANULAIRE	TERRAIN COHERENT	TERRAIN ROCHEUX	AVEC EAU	SANS EAU
TALUS			X		X
PALPLANCHE	X			X	X
PAROI MOULEE		X		X	X
PAROI PREFABRIQUEE		X		X	X
BERLINOISES	X	X			X

### 3.2 - Tunnel profond :

Cette méthode d'exécution permet de s'affranchir :

- des déviations de circulation automobile,
- des déviations des réseaux des services publics,
- des nuisances de travaux vis-à-vis des riverains (bruit, poussières....),
- de l'obligation de concevoir un tracé sous les voiries, moyennant une étude particulière pour les passages sous les fondations des bâtiments,
- de la recherche archéologique.

Par contre, afin d'assurer une couverture suffisante pour minimiser les tassements, il oblige à un approfondissement du profil en long qui se ressent au niveau des stations, avec leurs équipements (ascenseurs, escaliers mécaniques,...).

#### 3.2.1 - Méthode au tunnelier

##### a/ Différents types de bouclier

###### Boucliers ouverts

Ils sont utilisés dans les terrains hors d'eau ou à faible perméabilité. La stabilité du front de taille est assurée naturellement.

###### Boucliers fermés

Ils permettent l'excavation d'un tunnel dans des terrains perméables baignés dans la nappe phréatique.

###### Bouclier à pression de boue de bentonite

Le tunnelier est constitué à l'avant d'une chambre de travail étanche remplie de boue maintenue sous pression. L'abattage est effectué à l'aide d'un disque porteur d'outils adaptés à un type de terrain donné :

- l'usure des outils s'accélère en cas de traversée de terrains plus résistants,
- les outils ont tendance à s'encrasser pendant l'excavation d'un terrain plus "tendre".

Les blocs de dimensions supérieures aux ouvertures du bouclier sont réduits manuellement. Après arrêt du mécanisme, la boue est retirée de la chambre de travail, la pression étant assurée par air comprimé. Le front de taille est stabilisé par la pénétration sur quelques centimètres de boues dans le terrain (formation d'un cake).

En fonctionnement normal, la boue est également utilisée pour évacuer les déblais par marinage hydraulique.

Le diamètre des conduites étant réduit, les agrégats de dimension supérieure au diamètre maximum sont triés puis concassés. Les déblais récupérés en bout de chaîne sont tamisés et la boue purifiée est réinjectée dans le circuit.

Au fur et à mesure de l'avancement, un parement est mis en place. Ce parement peut être constitué de voussoir en fonte ou en béton armé.

Les voussoirs en fonte laisse la possibilité d'excaver partiellement pour exécuter une niche par exemple. Les voussoirs en béton armé sont, soit coulés sur place par plots, soit préfabriqués. Une injection entre le terrain et le revêtement est ensuite réalisée afin de minimiser la décompression des terrains et donc le tassement en surface.

### Bouclier à pression de terre

Contrairement au type de tunnelier décrit précédemment, le front de taille est maintenu à l'aide des déblais confinés dans une chambre.

Cet équilibre est assuré à condition que le volume excavé soit égal au volume de déblai évacué à l'arrière à l'aide d'une vis d'Archimède.

Quand le tunnelier rencontre des blocs de dimensions trop importantes, l'extraction ne peut s'opérer que depuis la surface en creusant un puits après injection du terrain autour du bouclier.

### **b/ Diamètre d'excavation - Monotube ou bitube**

La solution monotube consiste à excaver un tunnel de diamètre tel que deux axes de roulement puissent s'y insérer.

La solution bitube consiste à excaver deux tunnels de plus petit diamètre contenant chacun une voie de roulement.

Le choix entre grand ou petit diamètre résulte des caractéristiques du site :

- le bouclier étant adapté à un seul type de terrain "homogène", un petit diamètre permet une insertion aisée du tunnel dans l'épaisseur variable de cette couche de terrain.
- la couverture minimale d'un tunnelier étant d'un diamètre, un bouclier à petit diamètre peut être plus proche de la surface, notamment au droit des stations.
- la technique du bitube convient aux stations à quai central, l'écartement minimal entre deux tubes étant d'un diamètre.
- les communications entre les voies obligent la construction d'ouvrage particulier suivant la technique de tranchée couverte dans le cas d'un bitube.
- comme le phasage des travaux ci-après l'indique, le bitube double la longueur de l'ouvrage.

## Phasage des travaux :

Monotube	Bitube
	<ul style="list-style-type: none"><li>. installation des unités de traitement des déblais autour du puits d'entrée</li><li>. mise en place du tunnelier dans le puits d'entrée</li></ul>
Excavation du tunnel	<ul style="list-style-type: none"><li>. Excavation du 1er tunnel</li><li>. Transfert du tunnelier du puits de sortie au puits d'entrée</li><li>. Excavation du 2ème tunnel</li></ul> <p>Arrivée du bouclier au puits de sortie</p>

### 3.3 - Le viaduc

Les viaducs sont caractérisés par la nature du procédé de construction du tablier, telle que :

- tablier réalisé à l'aide de voussoirs préfabriqués, posés en encorbellement,
- tablier à poutres préfabriquées rendues continues,
- dalle en béton armé, coulée sur cintre,
- structure mixte acier - béton.

A chaque type de tablier, correspond une plage de longueur de portée économique:

Tablier en voussoirs précontraints	25 à 40m
Tablier à poutres continues	20 à 30m
Dalle en béton armé	10 à 15m
Structure mixte	supérieur à 60m

A la lecture de ce tableau, nous avons pris le parti d'exclure de cette étude les viaducs à tablier mixte. En effet, la manutention des poutres métalliques de grande longueur est une opération délicate à mettre en oeuvre en site urbain :

- déplacement et implantation des grues,
- approvisionnement en poutres par convoi exceptionnel,
- levage et mise en place des poutres à l'aide de grues.

Les parties métalliques, contrairement au béton, nécessitent un entretien soigné afin de prévenir la dégradation du viaduc.

Les hypothèses de calcul de prédimensionnement de ces ouvrages sont les suivantes :

- gabarit routier dégagé sous le tablier,
- les fondations sont superficielles ou profondes (le choix est effectué suivant la portance du sol),
- la largeur du tablier est supposée égale à la largeur intérieure d'un cadre en tranchée couverte.

### 3.4 - Stations souterraines et aériennes

Les stations sont implantées de telle sorte que les débouchés en surface :

- soient situées sous un trottoir ou une place,
- et perturbent le moins possible le flux piétonnier.

Le quai assure trois fonctions :

- stockage des voyageurs pendant l'attente d'une rame,
- croisement des flux entrant et sortant de la rame,
- évacuation des voyageurs vers la sortie.

La largeur des quais est dimensionnée au vu de ses trois fonctions et en prenant en compte la capacité maximale en voyageurs de cette station.

La longueur du quai correspond à la longueur du matériel roulant en exploitation.

Cependant, elle peut être dimensionnée pour des rames plus longues (ajout d'éléments) en prévision d'une augmentation de trafic.

Les stations proposées dans cette étude sont bien évidemment simplifiées : le coût est représentatif d'une solution de base.

#### 3.4.1 - Station souterraine

Le profil en long au droit des stations est relevé au maximum dans le but de diminuer la dénivelée entre le quai et la surface. C'est ainsi que les stations de tunnels profonds comportent au moins un niveau intermédiaire ou mezzanine, contrairement aux stations de tunnels superficiels.

La couverture des stations est limitée à 1m, d'une part pour permettre le passage transversal de réseaux et d'autre part pour diminuer les charges permanentes qui s'appliquent sur la dalle de couverture.

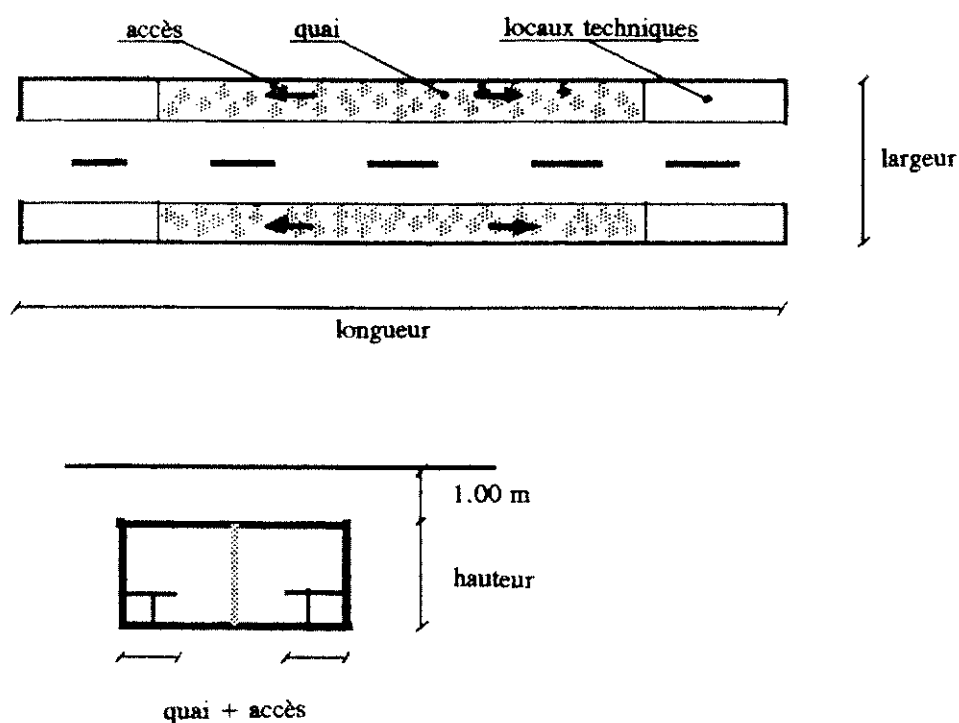
Le procédé de construction des stations souterraines à ciel ouvert correspond en tous points à celui de la tranchée couverte.

Le choix entre deux quais latéraux ou un quai central est fonction du mode de réalisation du cadre. En effet, pour une construction par tranchée couverte ou tunnelier à grand gabarit (monotube), un quai central oblige le dévoiement des axes de part et d'autre de la station et entraîne un élargissement de la section courante. Par contre, cet aménagement de station correspond bien à une construction par tunnelier de petit diamètre (bitube).

Les locaux techniques sont prévus en bout de quai.

## Vue en plan et coupe transversale d'une station type souterraine

### Quais latéraux



### 3.4.2 - Station aérienne

La station type est constituée de deux quais latéraux, d'accès et escaliers aboutissant sur un trottoir.

La couverture des quais est supposée être une superstructure légère.

Les locaux techniques sont enterrés.





## **4 - L'étude économique**

### **4.1 - Rappel des caractéristiques des matériels roulants**

Comme nous l'avons dit dans le chapitre 1 par. 1.3, les systèmes étudiés dans le cadre de cette étude sont :

- Le SK
- Le Transville
- Le VAL 206
- Le VAL 256
- Le MAGGALY
- Le Tramway
- Le métro sur pneus MP 73
- Le M1 84 du Réseau Express Régional

Nous regroupons dans le tableau page 37 les caractéristiques géométriques de chaque système ainsi que les débits maxima calculés pour une fréquence minimum : la charge des véhicules retenue est normale soit 4 passagers par m<sup>2</sup>.

Ces systèmes peuvent offrir une capacité qui croît avec le nombre de voitures accouplées en unité multiple : à chaque composition de train correspond donc une station particulière plus ou moins longue.

Les dimensions intérieures des ouvrages sont issues de coupes que nous ont transmis les constructeurs (SK et TRANSVILLE) ou bien de constructions existantes (tableau page 38).

Les largeurs du tablier des viaducs pour ces différents systèmes de transport sont prises égales aux largeurs des cadres en tranchée couverte.

TRANSPORT	CARACTERISTIQUES		CAPACITE (4 p/m <sup>2</sup> )	INTERVALLE MINI	DEBIT (p/h/sens)
LARGEUR	HAUTEUR				
SK1	1.60 m	2.90 m	16 voy.	15 s	3 840
SK2	1.85 m	3.10 m	25 voy.		6 000
TRANSVILLE1	2.30 m	2.70 m	162 voy.	100 s	5 832
TRANSVILLE2			354 voy.		12 744
VAL 206 (1)	2.06 m	3.25 m	160 voy.	1 min	9 600
VAL 206 (2)			320 voy.		19 200
VAL 256 (1)			92 voy.		5 520
VAL 256 (2)	2.56 m	3.53 m	184 voy.	1 min	11 040
VAL 256 (3)			276 voy.		16 560
VAL 256 (4)			368 voy.		22 080
MAGGALY (1)	2.90 m	3.40 m	264 voy.	90 s	10 560
MAGGALY (2)			528 voy.		21 120
TRAMWAY (1)			174 voy.		6 960
TRAMWAY (2)	2.30 m	3.37 m	348 voy.	90 s	13 920
TRAMWAY (3)			522 voy.		20 880
MP 73 (1)	2.46 m	3.46 m	585 voy.	90 s	23 400
MP 73 (2)			704 voy.		28 160
MI 84 (1) RER			860 voy.		25 800
MI 84 (2)	2.80 m	4.18 m	1720 voy.	2 min	51 600
MI 84 (3)			2580 voy.		77 400

ETUDE AFME

TRANSPORTS	QUAIS		DIMENSIONS DE LA STATION		CADRE DOUBLE (T. C.)		TUNNELIER		
	LARGEUR	LONGUEUR	LARGEUR	LONGUEUR	HAUTEUR	LARGEUR	HAUTEUR	MONOTUBE	BITUBE
SK1	2.00 m	10 m	13.20 m	46 m	4.00 m	4.50 m	3.40 m	5.10 m	3.90 m
SK2	2.50 m	11 m	14.70 m	47 m		5.00 m	3.60 m	5.65 m	4.25 m
TRANSVILLE1	3.70 m	22 m	18.00 m	58 m	4.60 m	5.80 m	4.40 m	6.30 m	4.30 m
TRANSVILLE2		46 m		82 m					
VAL 206 (1)	3.00 m	26 m	16.20 m	62 m	4.25 m	6.10 m	3.90 m	6.80 m	4.65 m
VAL 206 (2)		52 m		88 m					
VAL 256 (1)		14 m		50 m					
VAL 256 (2)	3.30 m	28 m	17.80 m	64 m	4.25 m	7.10 m	4.20 m	7.80 m	5.15 m
VAL 256 (3)		42 m		78 m					
VAL 256 (4)		56 m		92 m					
MAGGALY (1)	3.50 m	36 m	18.80 m	72 m	4.30 m	7.60 m	4.05 m	8.35 m	5.30 m
MAGGALY (2)		72 m		108 m					
TRAMWAY (1)		30 m		66 m					
TRAMWAY (2)	2.00 m	60 m	14.60 m	96 m	4.50 m	6.50 m	4.50 m	7.40 m	5.40 m
TRAMWAY (3)		90 m		126 m					
MP 73 (1)	3.30 m	76 m	17.60 m	112 m	4.50 m	7.00 m	4.25 m	7.00 m	5.00 m
MP 73 (2)		90 m		126 m					
MI 84 (1)		106 m		142 m					
MI 84 (2)	4.00 m	210 m	19.60 m	246 m	6.30 m	8.70 m	6.30 m	8.70 m	6.30 m
MI 84 (3)		314 m		350 m					



## 4.2 - Coûts unitaires des infrastructures souterraines

Les coûts communiqués ci-après sont établis par un logiciel de prédimensionnement METROS dont on trouvera la notice explicative en annexe: ils sont établis à partir du bordereau des prix joint en annexe, en Francs hors taxes, valeur janvier 1992.

Les hypothèses simplificatrices sont issues de l'étude théorique sur :

- la nature des terrains en place,
- le niveau de la nappe phréatique,
- la profondeur du profil en long.

Ces prix comprennent :

- les déviations de réseaux
- le soutènement,
- le terrassement ,
- l'étanchement du fond de fouille,
- les structures (coffrage, acier, béton),
- l'étanchéité,
- le rétablissement de la voirie,
- les aléas d'ordre technique.

Par contre, les équipements en station et en section courante ainsi que la pose de voie ne sont pas pris en compte dans ces coûts.

Enfin, nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que ces coûts sont des ordres de grandeur basés sur des hypothèses simplificatrices permettant néanmoins une comparaison homogène entre différents systèmes de transport.

#### 4.2.1 - Tranchée couverte - niveau superficiel

TRANSPORTS	DEBIT ( v/h/sens )	STATION SUPERFICIELLE ( coût en KF )			CADRE DOUBLE SUPERFICIEL ( coût en KF/ml )		
		TERRAIN COHERENT AVEC EAU	SANS EAU	TERRAIN GRANULAIRE AVEC EAU	TERRAIN COHERENT SANS EAU	TERRAIN GRANULAIRE AVEC EAU	TERRAIN GRANULAIRE SANS EAU
SK1	3 840	10 770	8 470	9 570	8 670	79.9	52.6
SK2	6 000	11 615	9 115	10 315	9 215	85.0	55.5
TRANSVILLE1	5 832	16 810	12 410	14 510	12 610	118.2	80.4
TRANSVILLE2	12 744	22 990	16 990	19 790	17 290		
VAL 206 (1)	9 600	16 090	12 290	14 190	12 490	111.8	80.3
VAL 206 (2)	19 200	22 060	17 060	19 760	17 360	73.3	
VAL 256 (1)	5 520	13 950	10 550	12 250	10 750		
VAL 256 (2)	11 040	17 480	13 280	15 480	13 480	126.1	88.0
VAL 256 (3)	16 560	21 010	15 910	18 510	16 110		
VAL 256 (4)	22 080	24 440	18 440	21 540	18 740		
MAGGALY (1)	10 560	20 240	15 040	17 640	15 340	126.2	89.5
MAGGALY (2)	21 120	29 760	22 060	25 960	22 460	82.0	119.3
TRAMWAY (1)	6 960	17 070	12 770	14 670	12 970		
TRAMWAY (2)	13 920	24 020	17 920	20 520	18 220	122.3	84.2
TRAMWAY (3)	20 880	36 370	26 070	30 670	26 570	79.3	
MP 73 (1)	23 400	30 340	22 440	26 240	22 840	123.0	84.4
MP 73 (2)	28 160	33 970	25 170	29 470	25 570	79.4	116.4
MI 84 (1)	25 800	52 990	34 490	41 290	35 090		
MI 84 (2)	51 600	90 070	58 270	70 070	59 270	186.5	116.0
						109.5	162.3

a) Coûts pour un linéaire de 800m comprenant une station + une interstation

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF )			
	STATION	SECTION COURANTE	STATION + CADRE			
			TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	46	754	71 014.6	45 265.2	66 723.2	48 330.4
SK2	47	753	75 620.0	48 195.7	70 479.7	51 006.5
TRANSVILLE1	58	742	104 514.4	68 431.0	96 797.8	72 266.8
TRANSVILLE2	82	718	107 857.6	71 199.0	99 416.2	75 017.2
VAL 206 (1)	62	738	98 598.4	66 385.4	93 082.2	71 751.4
VAL 206 (2)	88	712	101 661.6	69 249.6	95 872.8	74 533.6
VAL 256 (1)	50	750	108 525.0	71 375.0	100 600.0	76 750.0
VAL 256 (2)	64	736	110 289.6	72 969.6	102 180.8	78 248.0
VAL 256 (3)	78	722	112 054.2	74 464.2	103 561.6	79 646.0
VAL 256 (4)	92	708	113 718.8	75 858.8	104 942.4	81 044.0
MAGGALY 1	72	728	112 113.6	74 736.0	104 490.4	80 496.0
MAGGALY 2	108	692	117 090.4	78 804.0	108 515.6	84 394.0
TRAMWAY 1	66	734	106 838.2	70 976.2	99 960.8	74 772.8
TRAMWAY 2	96	704	110 119.2	73 747.2	102 324.8	77 496.8
TRAMWAY 3	126	674	118 800.2	79 518.2	108 988.8	83 320.8
MP 73 (1)	112	688	114 964.0	77 067.2	106 323.2	80 907.2
MP 73 (2)	126	674	116 872.0	78 685.6	107 923.6	82 455.6
MI 84 (1)	142	658	175 707.0	106 541.0	148 083.4	111 418.0
MI 84 (2)	246	554	193 391.0	118 933.0	159 984.2	123 534.0
MI 84 (3)	350	450	211 175.0	128 125.0	171 985.0	132 150.0

**b) Coûts pour un linéaire de 400m comprenant une station + une interstation**

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF )			
	STATION	SECTION COURANTE	STATION + CADRE			
			TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	46	354	39 054.6	25 745.2	36 403.2	27 290.4
SK2	47	353	41 620.0	27 435.7	38 519.7	28 806.5
TRANSVILLE1	58	342	57 234.4	38 231.0	52 437.8	40 106.8
TRANSVILLE2	82	318	60 577.6	40 999.0	55 056.2	42 857.2
VAL 206 (1)	62	338	53 878.4	37 065.4	50 322.2	39 631.4
VAL 206 (2)	88	312	56 941.6	39 929.6	53 112.8	42 413.6
VAL 256 (1)	50	350	58 085.0	38 935.0	53 480.0	41 550.0
VAL 256 (2)	64	336	59 849.6	40 529.6	55 060.8	43 048.0
VAL 256 (3)	78	322	61 614.2	42 024.2	56 441.6	44 446.0
VAL 256 (4)	92	308	63 278.8	43 418.8	57 822.4	45 844.0
MAGGALY 1	72	328	61 633.6	41 936.0	56 770.4	44 696.0
MAGGALY 2	108	292	66 610.4	46 004.0	60 795.6	48 594.0
TRAMWAY 1	66	334	57 918.2	39 256.2	53 480.8	41 092.8
TRAMWAY 2	96	304	61 199.2	42 027.2	55 844.8	43 816.8
TRAMWAY 3	126	274	69 880.2	47 798.2	62 508.8	49 640.8
MP 73 (1)	112	288	65 764.0	45 307.2	59 763.2	47 147.2
MP 73 (2)	126	274	67 672.0	46 925.6	61 363.6	48 695.6
MI 84 (1)	142	258	101 107.0	62 741.0	83 163.4	65 018.0
MI 84 (2)	246	154	118 791.0	75 133.0	95 064.2	77 134.0
MI 84 (3)	350	50	136 575.0	84 325.0	107 065.0	85 750.0



#### 4.2.2 - Tranchée couverte - niveau profond

TRANSPORTS	DEBIT ( v/h/sens )	STATION PROFONDE ( coût en KF )			CADRE DOUBLE PROFOND ( coût en KF/ml )		
		TERRAIN AVEC EAU	COHERENT SANS EAU	TERRAIN GRANULAIRE AVEC EAU	TERRAIN AVEC EAU	COHERENT SANS EAU	TERRAIN GRANULAIRE AVEC EAU
SK1	3 840	13 250	11 945	13 495	134.3	110.3	149.4
SK2	6 000	14 290	12 855	14 545	142.8	117.3	157.5
TRANSVILLE1	5 832	20 680	17 500	20 460	198.6	170.7	218.5
TRANSVILLE2	12 744	28 280	23 960	27 905			
VAL 206 (1)	9 600	19 795	17 330	20 010	187.0	162.9	209.9
VAL 206 (2)	19 200	27 160	24 060	27 560			
VAL 256 (1)	5 520	17 160	14 880	17 275			
VAL 256 (2)	11 040	21 480	18 780	21 780	207.0	181.5	230.7
VAL 256 (3)	16 560	25 845	22 435	26 100			
VAL 256 (4)	22 080	30 065	26 000	30 375			
MAGGALY (1)	10 560	24 895	21 210	24 875	211.4	185.6	234.9
MAGGALY (2)	21 120	35 060	30 660	35 660			
TRAMWAY (1)	6 960	21 000	18 010	20 685			
TRAMWAY (2)	13 920	29 545	25 270	28 935	205.5	179.3	229.0
TRAMWAY (3)	20 880	44 735	36 760	43 245			
MP 73 (1)	23 400	37 320	31 640	37 000	206.7	179.5	229.4
MP 73 (2)	28 160	41 785	35 490	41 555			
MI 84 (1)	25 800	65 180	48 635	58 220			
MI 84 (2)	51 600	110 790	82 165	98 800	313.4	247.5	319.8
MI 84 (3)	77 400	156 520	111 180	139 520			

a) Coûts pour un linéaire de 800m comprenant une station + une interstation

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF )			
	STATION	SECTION COURANTE	STATION + CADRE			
			TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	46	754	114 512.2	95 111.2	126 142.6	97 502.4
SK2	47	753	121 818.4	101 181.9	133 142.5	102 827.9
TRANSVILLE1	58	742	168 041.2	144 159.4	182 587.0	146 071.8
TRANSVILLE2	82	718	170 874.8	146 522.6	184 788.0	148 522.2
VAL 206 (1)	62	738	157 801.0	137 550.2	174 916.2	142 632.2
VAL 206 (2)	88	712	160 304.0	140 044.8	177 008.8	144 772.8
VAL 256 (1)	50	750	172 410.0	151 005.0	190 300.0	156 610.0
VAL 256 (2)	64	736	173 832.0	152 364.0	191 575.2	157 889.6
VAL 256 (3)	78	722	175 299.0	153 478.0	192 665.4	158 884.2
VAL 256 (4)	92	708	176 621.0	154 502.0	193 710.6	159 953.8
MAGGALY (1)	72	728	178 794.2	156 326.8	195 882.2	161 697.2
MAGGALY (2)	108	692	181 348.8	159 095.2	198 210.8	164 000.8
TRAMWAY (1)	66	734	171 837.0	149 616.2	188 771.0	151 217.4
TRAMWAY (2)	96	704	174 217.0	151 497.2	190 151.0	153 184.4
TRAMWAY (3)	126	674	183 242.0	157 608.2	197 591.0	159 526.4
MP 73 (1)	112	688	179 529.6	155 136.0	194 827.2	157 077.0
MP 73 (2)	126	674	181 100.8	156 473.0	196 170.6	158 386.0
MI 84 (1)	142	658	271 397.2	211 490.0	268 648.4	213 585.2
MI 84 (2)	246	554	284 413.6	219 280.0	275 969.2	221 742.6
MI 84 (3)	350	450	297 550.0	222 555.0	283 430.0	224 960.0

**b) Coûts pour un linéaire de 400m comprenant une station + une interstation**

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF )			
	STATION	SECTION COURANTE	STATION + CADRE			
			TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	46	354	60 792.2	50 991.2	66 382.6	52 262.4
SK2	47	353	64 698.4	54 261.9	70 142.5	55 107.9
TRANSVILLE1	58	342	88 601.2	75 879.4	95 187.0	76 911.8
TRANSVILLE2	82	318	91 434.8	78 242.6	97 388.0	79 362.2
VAL 206 (1)	62	338	83 001.0	72 390.2	90 956.2	74 872.2
VAL 206 (2)	88	312	85 504.0	74 884.8	93 048.8	77 012.8
VAL 256 (1)	50	350	89 610.0	78 405.0	98 020.0	81 170.0
VAL 256 (2)	64	336	91 032.0	79 764.0	99 295.2	82 449.6
VAL 256 (3)	78	322	92 499.0	80 878.0	100 385.4	83 444.2
VAL 256 (4)	92	308	93 821.0	81 902.0	101 430.6	84 513.8
MAGGALY (1)	72	328	94 234.2	82 086.8	101 922.2	84 737.2
MAGGALY (2)	108	292	96 788.8	84 855.2	104 250.8	87 040.8
TRAMWAY (1)	66	334	89 637.0	77 896.2	97 171.0	78 777.4
TRAMWAY (2)	96	304	92 017.0	79 777.2	98 551.0	80 744.4
TRAMWAY (3)	126	274	101 042.0	85 888.2	105 991.0	87 086.4
MP 73 (1)	112	288	96 849.6	83 336.0	103 067.2	84 477.0
MP 73 (2)	126	274	98 420.8	84 673.0	104 410.6	85 786.0
MI 84 (1)	142	258	146 037.2	112 490.0	140 728.4	113 825.2
MI 84 (2)	246	154	159 053.6	120 280.0	148 049.2	121 982.6
MI 84 (3)	350	50	172 190.0	123 555.0	155 510.0	125 200.0

### 4.2.3 - Tunnelier

TRANSPORTS	DEBIT ( v/h/sens )	STATION SOUTERRAINE coût en KF	SECTION COURANTE	
			terme fixe coût en KF	terme proportionnel coût en KF/ml
SK1	3 840	13 500	49 000	45
SK2	6 000	16 000	53 000	49
TRANSVILLE1	5 832	28 000	57 000	58
TRANSVILLE2	12 744	38 000		
VAL 206 (1)	9 600	30 500	60 000	64
VAL 206 (2)	19 200	42 000		
VAL 256 (1)	5 520	27 500	68 000	74
VAL 256 (2)	11 040	33 500		
VAL 256 (3)	16 560	40 500		
VAL 256 (4)	22 080	48 000		
MAGGALY (1)	10 560	46 000	72 000	84
MAGGALY (2)	21 120	66 500		
TRAMWAY (1)	6 960	43 500	66 000	71
TRAMWAY (2)	13 920	63 000		
TRAMWAY (3)	20 880	80 000		
MP 73 (1)	23 400	86 500	63 000	66
MP 73 (2)	28 160	97 500		
MI 84 (1)	25 800	141 500	75 000	88
MI 84 (2)	51 600	244 500		
MI 84 (3)	77 400	348 000		

Remarque : L'amortissement du tunnelier est réalisé, dans cette étude, pour deux linéaires de section courante : 800 ou 400m.

a) Coûts pour un linéaire de 800m comprenant une station + une interstation

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF ) GLOBAL
	STATION	SECTION COURANTE	
SK1	46	754	96 430
SK2	47	753	105 897
TRANSVILLE1	58	742	128 036
TRANSVILLE2	82	718	136 644
VAL 206 (1)	62	738	137 732
VAL 206 (2)	88	712	147 568
VAL 256 (1)	50	750	151 000
VAL 256 (2)	64	736	155 964
VAL 256 (3)	78	722	161 928
VAL 256 (4)	92	708	168 392
MAGGALY 1	72	728	179 152
MAGGALY 2	108	692	196 628
TRAMWAY 1	66	734	161 614
TRAMWAY 2	96	704	178 984
TRAMWAY 3	126	674	193 854
MP 73 (1)	112	688	194 908
MP 73 (2)	126	674	204 984
MI 84 (1)	142	658	274 404
MI 84 (2)	246	554	368 252
MI 84 (3)	350	450	462 600

**b) Coûts pour un linéaire de 400m comprenant une station + une interstation**

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF ) GLOBAL
	STATION	SECTION COURANTE	
SK1	46	354	78 430
SK2	47	353	86 297
TRANSVILLE1	58	342	104 836
TRANSVILLE2	82	318	113 444
VAL 206 (1)	62	338	112 132
VAL 206 (2)	88	312	121 968
VAL 256 (1)	50	350	121 400
VAL 256 (2)	64	336	126 364
VAL 256 (3)	78	322	132 328
VAL 256 (4)	92	308	138 792
MAGGALY 1	72	328	145 552
MAGGALY 2	108	292	163 028
TRAMWAY 1	66	334	133 214
TRAMWAY 2	96	304	150 584
TRAMWAY 3	126	274	165 454
MP 73 (1)	112	288	168 508
MP 73 (2)	126	274	178 584
MI 84 (1)	142	258	239 204
MI 84 (2)	246	154	333 052
MI 84 (3)	350	50	427 400

### 4.3 - Coûts unitaires des infrastructures aériennes

Les coûts communiqués ont été établis par un logiciel de prédimensionnement et d'estimation sommaire (METROV). (courbes page 50).

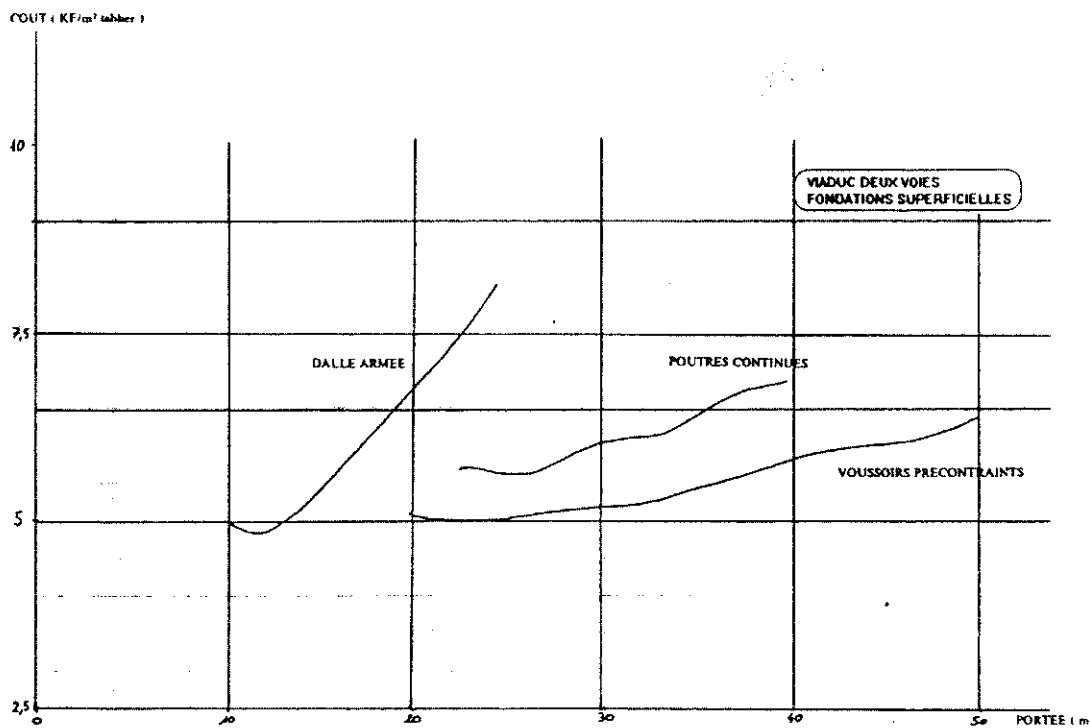
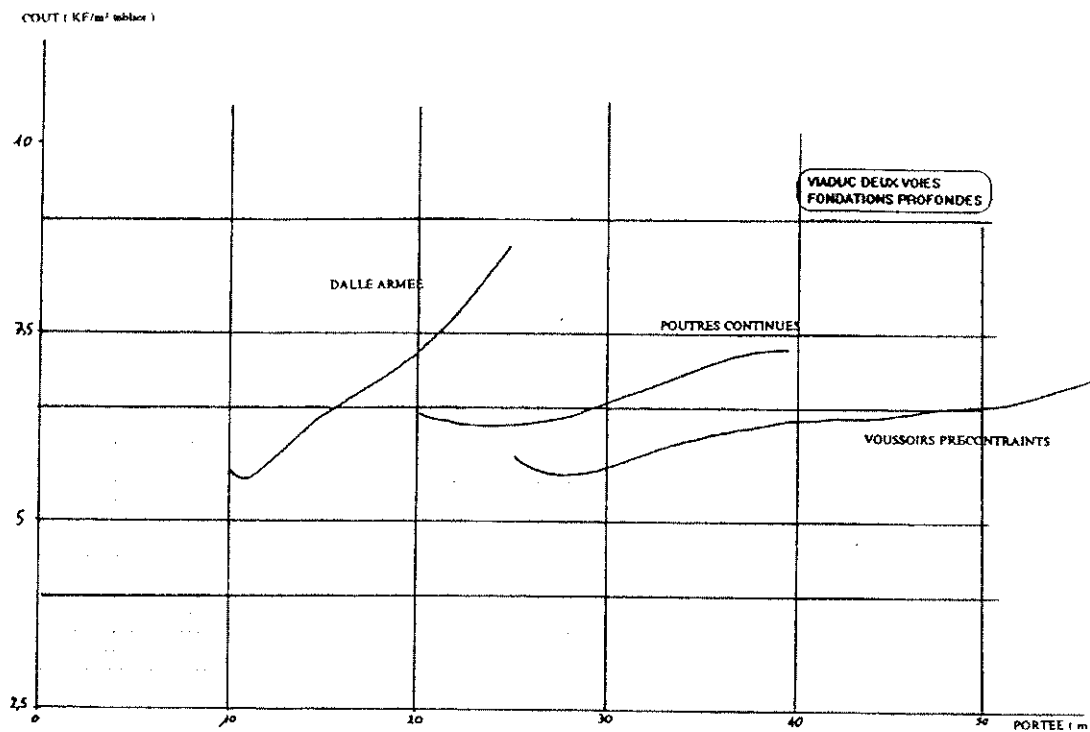
Les portées pour chaque type de tablier sont comprises dans la fourchette de "portée économique".

La comparaison des ratios en F. par mètre carré de tablier pour les divers types de construction montre que le prix moyen d'un viaduc en béton, fondations superficielles, est de l'ordre de 7000F/m<sup>2</sup> auquel on ajoute les déviations de réseaux et rétablissement de voirie estimés dans cette étude à 5000 F/ml de viaduc.

Le prix moyen d'une infrastructure viaduc (station et section courante) indiqué dans le tableau de la page 51 comprend donc:

- la déviation des réseaux et le rétablissement de la voirie,
- les terrassements,
- le génie civil,
- les aléas de travaux.

Les équipements tels que la pose de voie, la signalétique, les escaliers mécaniques, les ascenseurs ne sont pas pris en compte tout comme la couverture des stations supposée être de type léger.



Les courbes ci-dessus représentent des ratios sans aléas de travaux



TRANSPORTS	DEBIT ( v/h/sens )	STATION AERIENNE coût en KF	SECTION COURANTE coût en KF/ml
SK1	3 840	4 405	36.5
SK2	6 000	4 585	40.0
TRANSVILLE1	5 832	5 960	45.6
TRANSVILLE2	12 744	8 275	
VAL 206 (1)	9 600	6 925	47.7
VAL 206 (2)	19 200	9 260	
VAL 256 (1)	5 520	5 995	
VAL 256 (2)	11 040	7 440	54.7
VAL 256 (3)	16 560	8 820	
VAL 256 (4)	22 080	10 215	
MAGGALY (1)	10 560	9 645	58.2
MAGGALY (2)	21 120	13 560	
TRAMWAY (1)	6 960	7 715	
TRAMWAY (2)	13 920	10 070	50.5
TRAMWAY (3)	20 880	12 425	
MP 73 (1)	23 400	13 399	54.0
MP 73 (2)	28 160	14 785	
MI 84 (1)	25 800	19 096	
MI 84 (2)	51 600	31 759	65.9
MI 84 (3)	77 400	44 458	

a) Coûts pour un linéaire de 800m comprenant une station + une interstation

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF ) GLOBAL
	STATION	SECTION COURANTE	
SK1	46	754	31 926.0
SK2	47	753	34 705.0
TRANSVILLE1	58	742	39 795.2
TRANSVILLE2	82	718	41 015.8
VAL 206 (1)	62	738	42 127.6
VAL 206 (2)	88	712	43 222.4
VAL 256 (1)	50	750	47 020.0
VAL 256 (2)	64	736	47 699.2
VAL 256 (3)	78	722	48 313.4
VAL 256 (4)	92	708	48 942.6
MAGGALY 1	72	728	52 014.6
MAGGALY 2	108	692	53 834.4
TRAMWAY 1	66	734	44 782.0
TRAMWAY 2	96	704	45 622.0
TRAMWAY 3	126	674	46 462.0
MP 73 (1)	112	688	50 551.0
MP 73 (2)	126	674	51 181.0
MI 84 (1)	142	658	62 458.2
MI 84 (2)	246	554	68 267.6
MI 84 (3)	350	450	74 113.0

b) Coûts pour un linéaire de 400m comprenant une station + une interstation

TRANSPORTS	LONGUEUR ( m )		COUT ( KF ) GLOBAL
	STATION	SECTION COURANTE	
SK1	46	354	17 326.0
SK2	47	353	18 705.0
TRANSVILLE1	58	342	21 555.2
TRANSVILLE2	82	318	22 775.8
VAL 206 (1)	62	338	23 047.6
VAL 206 (2)	88	312	24 142.4
VAL 256 (1)	50	350	25 140.0
VAL 256 (2)	64	336	25 819.2
VAL 256 (3)	78	322	26 433.4
VAL 256 (4)	92	308	27 062.6
MAGGALY 1	72	328	28 734.6
MAGGALY 2	108	292	30 554.4
TRAMWAY 1	66	334	24 582.0
TRAMWAY 2	96	304	25 422.0
TRAMWAY 3	126	274	26 262.0
MP 73 (1)	112	288	28 951.0
MP 73 (2)	126	274	29 581.0
MI 84 (1)	142	258	36 098.2
MI 84 (2)	246	154	41 907.6
MI 84 (3)	350	50	47 753.0



#### 4.4 - Comparaison des coûts de génie civil des systèmes dans chacun des 4 groupes

Les différents systèmes de transport ont été classés par ordre croissant de débit dans quatre intervalles :

- Débit compris entre 0 et 6000 passagers/h/sens,
- Débit compris entre 6000 et 15000 passagers/h/sens,
- Débit compris entre 15000 et 25000 passagers/h/sens,
- Débit supérieur à 25000 passagers/h/sens.

##### 4.4.1 Tranchée couverte - niveau superficiel

Les tableaux de coûts de génie civil qui précèdent, permettent de classer les différents systèmes de transport de chacun des groupes définis par les fourchettes de capacité offerte.

Dans le groupe I, défini pour une capacité offerte inférieure à 6000 pas./ h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
Interstation de 800m				
T C + eau	71, 014	+ 6, 4	+ 47, 2	+ 52, 8
T G + eau	66, 723	+ 5, 6	+ 45, 1	+ 50, 7
T C - eau	45, 265	+ 6, 5	+ 51, 2	+ 57, 7
T G - eau	48, 330	+ 5, 5	+ 49, 5	+ 58, 8
Interstation de 400m				
T C + eau	39, 054	+ 6, 6	+ 46, 5	+ 48, 7
T G + eau	36, 403	+ 5, 8	+ 44, 1	+ 47
T C - eau	25, 745	+ 6,5	+ 48,5	+ 51, 2
T G - eau	27, 290	+ 5,6	+ 47	+ 52, 3

##### Nota Général:

On trouve en annexe § 4.4.1. les différents histogrammes représentant les coûts de génie civil pour chacun des systèmes du groupe I à IV, pour les 4 types de terrain retenus dans l'étude.

Lorsqu'on passe d'une interstation de 800 mètres à 400 mètres, le classement des coûts de génie civil des systèmes ne change pas: c'est le coût du génie civil du système SK1 qui est le moins élevé, suivi de celui du système SK2 et des systèmes Transville 1 et VAL 256-1.

Pour une interstation de 400 m, l'influence du coût fixe de la station est plus important sur le coût global de l'interstation, et l'écart entre le coût de génie civil du système VAL 256-1 et du système SK1 devient moins important, le coût d'une station étant plus sensible à la longueur des quais et de la station qu'au gabarit des véhicules.

Le coût des stations restant identique quelle que soit la longueur de l'interstation, seul le coût du tunnel varie en fonction de la longueur d'application, les différences entre les coûts de génie civil du VAL 256-1, Transville 1 par rapport au coût du génie civil pour SK1 diminuent sensiblement lorsque l'interstation diminue mais c'est surtout le coût du tunnel qui reste prépondérant ( le coût de la station représente 27,5% du coût d' une interstation de 400 ml et 15% du coût d'une interstation de 800 ml).

Nous examinons dans le tableau suivant les différences de coût entre les stations de chacun des systèmes et leur équivalence en linéaire de tunnel:

Système	Station superficielle (kF) Terrain cohérent avec eau	Cadre double superficiel ( en kF / ml) Terrain cohérent avec eau	Linéaire de cadre équivalent à une station
SK1	10 770	79,9	135 ml
SK2	11 615	85,0	137 ml
Transville 1	16 810	118, 2	142 ml
VAL 256-1	13 950	126,1	111 ml

On note dans ce tableau une progression du coût de la station par rapport au coût de la tranchée couverte de l'interstation, sauf pour le VAL 256: en effet dans ce groupe I, le VAL 256 est un véhicule de 14 m contre 21, 80 m pour le Transville1 ce qui entraîne une longueur de quai et de station plus longue, néanmoins le génie civil du cadre est plus cher pour le VAL 256.

En conclusion pour le groupe I, le coût de génie civil le moins élevé correspond à celui du système SK1 jusqu'à une offre de 4000 pas./ h / sens, suivi du SK2 pour une offre de 6000 pas./ h / sens.

Les 2 autres systèmes ne sont adaptés que si l'offre de 6000 pas./ h / sens est considérée comme une première étape: en effet, le Transville 2 peut transporter jusqu'à 13 000 pas./ h / sens et le VAL 256-4 jusqu'à 22 000 pas./ h / sens mais pour ce niveau d'offre les quais des stations doivent être prolongés.

**Dans le groupe II**, défini pour une capacité offerte située entre à 6000 pas./ h / sens et 15 000 pas. / h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
Interstation de 800m						
T C + eau	98, 598	+ 8, 4	+ 9, 4	+ 11, 9	+ 11, 7	+ 13, 7
T G + eau	93, 082	+ 7, 4	+ 6, 8	+ 9, 8	+ 9, 9	+ 12, 3
T C - eau	66, 385	+ 6, 9	+ 7, 3	+ 9, 9	+ 11, 1	+ 12, 6
T G - eau	71, 751	+ 4, 2	+ 4, 6	+ 9, 1	+ 8	+ 12, 2
Interstation de 400m						
T C + eau	53, 878	+ 7, 5	+ 12, 4	+ 11, 1	+ 13, 6	+ 14, 4
T G + eau	50, 322	+ 6, 3	+ 9, 4	+ 9, 4	+ 11	+ 12, 8
T C - eau	37, 065	+ 5, 9	+ 10, 6	+ 9, 3	+ 13, 4	+ 13, 1
T G - eau	39, 631	+ 3, 7	+ 8, 1	+ 8, 6	+ 10, 6	+ 12, 8

Nota: Cf les histogrammes de ces coûts en annexe:§ 4.4.1.

Dans ce groupe II, le coût de génie civil le moins élevé est celui du VAL 206-1 suivi dans un ordre croissant des systèmes Tram 1, Trans 2, VAL 256-2, Tram 2 et MAG 1.

Le coût du génie civil du Tram 1 est 4,2 à 8,4 % plus élevé que celui du VAL pour une capacité offerte de 7000 contre 9 600 pas./ h / sens pour le VAL sur une interstation de 800 mètres.

Le coût du génie civil du Trans 2 est 4,6 à 9,4 % plus élevé que celui du VAL mais la capacité maximum du Trans 2 est de 12 700 pas./ h / sens, celle du VAL 206-1 dans ce cas étant de 9 600 pas. / h / sens: si l'on compare le coût du génie civil du Trans 2 avec celui du VAL 206-2, le coût du génie civil du VAL 206-2 est inférieur de 6% à celui d'un Trans 2 pour une interstation de 800 m, le VAL 206-2 offrant une capacité de 19 200 pas./ h / sens.

Nous examinons dans le tableau suivant les différences de coût entre les stations de chacun des systèmes et leur équivalence en linéaire de tunnel:

Système	Station superficielle (kF) Terrain cohérent avec eau	Cadre double superficiel ( en kF / ml) Terrain cohérent avec eau	Linéaire de cadre équivalent à une station
VAL 206-1	16 090	111, 8	144 ml
Tram 1	17 070	122, 3	140 ml
Transville 2	22 990	118, 2	195 ml
VAL 256-2	17 480	126, 1	139 ml
Tram 2	24 020	122, 3	196 ml
MAG 1	20 240	126, 2	160 ml

Lorsqu'on passe d'une interstation de 800 mètres à une interstation de 400 mètres le coût inchangé des stations vient augmenter sensiblement les variations entre le coût des systèmes VAL 206-1 avec Tram 2, Trans 2 et MAG 1: d'après le tableau ci dessus le coût des stations pour VAL 206-1, Tram 1 et VAL 256-2 sont équivalents, supérieur pour MAG 1 (11%), pour Trans 2 (35%) et Tram 2 (36%).

En conclusion, dans le groupe II les coûts des ouvrages pour une interstation de 800 mètres et de 400 mètres sont assez homogènes, ils se situent entre 4 et 14 % au dessus de celui du VAL 206-1.

**Dans le groupe III**, défini pour une offre située entre 15 000 et 25 000 pas. / h / sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût de Génie Civil	VAL 206-2 en MF	VAL 256-3 %	256-4 %	MP 73-1 %	MAG 2 %	Tram 3 %
Interstation de 800m						
T C + eau	101, 661	+ 10, 2	+ 11, 9	+ 13, 1	+ 15, 2	+ 16, 9
T G + eau	95, 872	+ 8	+ 9, 5	+ 10, 9	+ 13, 2	+ 13, 7
T C - eau	69, 249	+ 7, 5	+ 9, 5	+ 11, 3	+ 13, 8	+ 14, 8
T G - eau	74, 533	+ 6, 9	+ 8, 7	+ 8, 6	+ 13, 2	+ 11, 8
Interstation de 400m						
T C + eau	56, 942	+ 8, 2	+ 11, 1	+ 15, 5	+ 16, 9	+ 22, 7
T G + eau	53, 113	+ 6, 3	+ 8, 8	+ 12, 5	+ 14, 4	+ 17, 7
T C - eau	39, 930	+ 5, 2	+ 8, 7	+ 13, 5	+ 15, 2	+ 19, 7
T G - eau	42, 414	+ 4, 8	+ 8	+ 11, 1	+ 14, 6	+ 17

Nota: Cf les histogrammes de ces coûts en annexe:§ 4.4.1.

Dans ce groupe III, le coût de génie civil le moins élevé pour des systèmes de capacité équivalente, est celui du système VAL 206-2, suivi du VAL 256-4 (entre 9 et 12% de plus), le MP 73-1 (entre 9 et 13% de plus), le MAG 2 (entre 13 et 15% de plus) et le Tram 3 (entre 12 et 17% de plus). Le VAL 256-3 dont le coût de génie civil est supérieur à celui du VAL 206-2 de 7 à 10% n'offre qu'une capacité de 16 560 pas./h/sens: à ce niveau de capacité, le coût du génie civil est supérieur à celui du VAL 206-2 mais inférieur au coût de génie civil des systèmes VAL 256-4, MP 73-1, MAG 2, et Tram 3. Le système VAL 256-3 n'est intéressant du point de vue coût de génie civil que s'il est considéré comme transitoire avant l'adoption du VAL 256-4.

Nous examinons dans le tableau suivant les différences de coût entre les stations de chacun des systèmes et leur équivalence en linéaire de tunnel:



Système	Station superficielle (kF) Terrain cohérent avec eau	Cadre double superficiel ( en kF / ml) Terrain cohérent avec eau	Linéaire de cadre équivalent à une station
VAL 206-2	22 060	111, 8	197 ml
VAL 256-3	21 010	126, 1	167 ml
VAL 256-4	24 440	126, 1	194 ml
MP 73-1	30 340	123, 0	247 ml
MAG 2	29 760	126, 2	236 ml
TRAM 3	36 370	122, 3	297 ml

On note dans ce tableau que le coût des stations VAL 206-2 et VAL 256-4 sont équivalents, celui pour le VAL 256-3 est légèrement inférieur (15%), ceux des stations pour MP 73-1 supérieur de 25%, pour MAG 2 supérieur de 20%, pour TRAM 3 supérieur de 51% au coût d'une station pour VAL 206-2 pour une capacité offerte respectivement de 20 880 pas./h/sens et 19 200 pas./h/sens.

En conclusion dans le groupe III, le coût de génie civil le moins élevé est celui du VAL 206-2, suivi du VAL 256-4: le coût des stations de ces systèmes reste équivalent. Les systèmes MP 73-1, MAG 2 et surtout TRAM 3 ont un coût supérieur de 13% à 17% dans le terrain le plus défavorable. Le système MP 73-1 garde la possibilité d'augmenter sa capacité de 23 400 à 28 160 pas./ h / sens mais les systèmes MAG 2 et TRAM 3 sont respectivement limités à 21 120 et 20 880 pas./ h / sens, le VAL 206-2 offrant une capacité de 19 200 pas./h/sens garde l'avantage en ce qui concerne le coût du génie civil ( station et tunnel).

**Dans le groupe IV**, défini pour une offre de capacité située entre 25 000 et 80 000 pas./h/sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 ml puis de 400 ml, donne:

Coût de Génie Civil	MP 73-2 en MF	MI 84-1 %	MI 84-2 %	MI 84-3 %
Interstation de 800m				
T C + eau	116 872	+ 50, 3	+ 65, 5	+ 80, 7
T G + eau	107 923, 6	+ 37, 2	+ 48, 2	+ 59, 4
T C - eau	78 685, 6	+ 35, 4	+ 51, 1	+ 62, 8
T G - eau	82 455, 6	+ 35, 1	+ 49, 8	+ 60, 3
Interstation de 400m				
T C + eau	67 672, 0	+ 49, 4	+ 75, 5	+ 101, 2
T G + eau	61 363, 6	+ 35, 5	+ 54, 9	+ 74, 5
T C - eau	46 925, 6	+ 33, 7	+ 60, 1	+ 79, 7
T G - eau	48 695, 6	+ 33, 5	+ 58, 4	+ 76, 1

Nota: Cf les histogrammes de ces coûts en annexe § 4.4.1..

Dans ce groupe IV, le coût de génie civil le moins élevé est celui du système MP 73-2, suivi des MI 84-1 (entre 33 et 50% de plus), MI 84-2 (entre 50 et 75% de plus), le MI 84-3 (entre 60 et 100% de plus).

L'offre de capacité n'est pas identique puisque les systèmes MP 73-2, MI 84-1, MI 84-2 et MI 84-3 ont une capacité respective de: 28 160 pas./h/sens, 25 800 pas./h/sens, 51 600 pas./h/sens et 77 400 pas./h/sens. soit pour le MI 84-2 83% de plus que le MP 73-2 et pour le MI 84-3 174% de plus que le MP 73-2.

En conclusion, le système MP 73-2 a son coût de génie civil moins cher par rapport à celui des systèmes MI 84 jusqu'à une offre de capacité de 28 000 pas./h/sens, au delà de cette capacité le génie civil des systèmes MI 84-2 et MI 84-3 est moins cher étant donné l'offre de capacité de ces systèmes.

Nous examinons dans le tableau suivant les différences de coût entre les stations de chacun des systèmes et leur équivalence en linéaire de tunnel

Système	Station superficielle (kF) Terrain cohérent avec eau	Cadre double superficiel ( en kF / ml) Terrain cohérent avec eau	Linéaire de cadre équivalent à une station
MP 73-2	33 970	123, 0	276 ml
MI 84-1	52 990	186, 5	284 ml
MI 84-2	90 070	186, 5	483 ml
MI 84-3	127 250	186, 5	682 ml

On note dans ce tableau que le coût des stations est en augmentation constante à partir du MP 73-2, le coût du génie civil de la station du MI 84-1 est supérieur de 56% , celui pour le MI 84-2 est supérieur de 75%, celui pour le MI 84-3 est supérieur de 147 % .

Ces écarts expliquent l'accroissement des variations entre le coût de génie civil du MP 73-2 et des systèmes MI 84-2 et MI 84-3 lorsqu'on passe d'une interstation de 800 mètres à une interstation de 400 mètres.

Le coût important du génie civil de ces systèmes exploités sur le réseau express régional parisien et le besoin d'avoir une vitesse commerciale élevé nécessitent des interstations supérieures à 2000 mètres.

**En conclusion générale,** les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil dans chacun des groupes sont:

Groupe	Système	Capacité pas./h/sens
I	SK 1	4000
I	SK 2	6000
II	VAL 206-1	9600
III	VAL 206-2	19 200
III	VAL 256-4	22 080
III	MP 73-1	23 400
IV	MP 73-2	28 160
IV	MI 84-2	51 600
IV	MI 84-3	77 400

#### 4.4.2 Tranchée couverte-niveau profond (radier à -14 m sous niveau T.N.)

De la même façon que précédemment nous allons comparer dans chacun des groupes les coûts de génie civil de chacun des systèmes.

Dans le groupe I, défini pour une capacité offerte inférieure à 6000 pas./ h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
Interstation de 800m				
T C + eau	114, 512	+ 6, 4	+ 46, 7	+ 50, 6
T G + eau	126, 142	+ 5, 5	+ 44, 7	+ 50, 9
T C - eau	95, 111	+ 6, 4	+ 51, 6	+ 58, 8
T G - eau	97, 502	+ 5, 5	+ 49, 8	+ 60, 6
Interstation de 400m				
T C + eau	60, 792	+ 6, 4	+ 45, 7	+ 47, 4
T G + eau	66, 382	+ 5, 7	+ 43, 4	+ 47, 7
T C - eau	50, 991	+ 6, 4	+ 48, 8	+ 53, 8
T G - eau	52, 262	+ 5, 4	+ 47, 2	+ 55, 3

Nota: Les histogrammes de ces coûts sont rassemblés au § 4.4.2. en annexe.

Lorsqu'on passe au niveau profond, le classement entre les différents coûts de génie civil ne change pas, les écarts entre le coût de génie civil du système SK1 avec les systèmes SK2, Transville 1 et VAL 256-1 ne changent pratiquement pas par rapport aux coûts calculés pour la tranchée couverte au niveau superficiel.

Par contre les coûts de génie civil augmentent pour une tranchée couverte réalisée à un niveau profond dans un terrain (cohérent + eau) en relation avec la hauteur des parois à réaliser, pour une interstation de 800 m dans un terrain (cohérent + eau) on note:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
T C superficielle	71, 014	75, 620	104, 514	108, 525
T C profonde	+ 61, 2%	+ 61, 1%	+ 60, 7%	+ 58, 9%

Pour une interstation de 400 m dans un terrain (cohérent + eau) on note:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
T C superficielle	39, 054	41, 620	57, 234	58, 085
T C profonde	+ 55, 6%	+ 55, 5%	+ 54, 8%	+ 54, 3%

En conclusion, l'approfondissement des stations et de la tranchée couverte entraîne un surcoût de 55 à 60% par rapport aux coûts calculés pour une tranchée superficielle, les coûts des systèmes SK1 et SK2 restent inférieurs à ceux des systèmes Transville 1 et VAL 256-1.

**Dans le groupe II**, défini pour une capacité offerte située entre à 6000 pas./ h / sens et 15 000 pas. / h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres donne:

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
Interstation de 800m						
T C + eau	157, 801	+ 8, 9	+ 8, 3	+ 10,2	+ 10, 4	+ 13, 3
T G + eau	174, 916	+ 7, 9	+ 5, 6	+ 9, 5	+ 8, 7	+ 12, 0

Nota: Les histogrammes de ces coûts sont réunis au § 4.4.2. en annexe.

Dans ce groupe II, on constate que les écarts entre le coût de génie civil le moins élevé (VAL 206-1) et le coût de génie civil des autres systèmes restent sensiblement identiques à ceux constatés pour la tranchée superficielle.

Par contre les coûts de génie civil d'une interstation de 800 m augmentent pour une tranchée couverte réalisée à un niveau profond dans un terrain (cohérent + eau) de:

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
T C superficielle	98, 598	106, 838	107, 857	110, 289	110, 119	112, 113
T C profonde	+ 60%	+ 60, 8%	+ 58, 4%	+ 57, 6%	+ 58, 2%	+ 59, 5%

En conclusion, le classement constaté pour les coûts de génie civil des différents systèmes du groupe II pour une construction en tranchée superficielle reste inchangé pour une construction en tranchée profonde.

**Dans le groupe III**, défini pour une offre située entre 15 000 et 25 000 pas. / h / sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-2	VAL 256-3	256-4	MP 73-1	MAG 2	Tram 3
Interstation de 800m						
T C + eau	160, 304	+ 9, 3	+ 10, 2	+ 11, 9	+ 13, 1	+14, 3
T G + eau	177, 008	+ 8, 9	+ 9, 4	+ 10, 1	+ 11, 9	+ 11, 6

Nota: Les histogrammes de ces coûts sont réunis dans le § 4.4.2. en annexe.

Dans ce groupe III, on note que les écarts entre le coût de génie civil le moins élevé (VAL 206-2) et le coût de génie civil des autres systèmes restent sensiblement identiques à ceux constatés pour la tranchée superficielle.

Par contre les coûts de génie civil d'une interstation de 800 m augmentent pour une tranchée couverte réalisée à un niveau profond dans un terrain (cohérent + eau) de:

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-2	VAL 256-3	256-4	MP 73-1	MAG 2	Tram 3
T C superficielle	101, 661	112, 054	113, 719	114, 964	117, 090	118, 800
T C profonde	57, 7%	56, 4%	55, 3%	56, 2%	54, 8%	54, 2%

En conclusion, le classement constaté pour les coûts de génie civil des différents systèmes du groupe III pour une construction en tranchée superficielle reste inchangé pour une construction en tranchée profonde.

Dans le groupe IV, défini pour une offre de capacité située entre 25 000 et 80 000 pas./h/sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 ml puis de 400 ml, donne:

Coût de Génie Civil	MP 73-2 en MF	MI 84-1 %	MI 84-2 %	MI 84-3 %
Interstation de 800m				
T C + eau	181, 100	+ 49, 8	+ 57, 1	+ 64, 3
T G + eau	196, 171	+ 36, 9	+ 40, 7	+ 44, 5

Nota: Les histogrammes de ces coûts apparaissent dans le § 4.4.2.

Dans ce groupe IV, on note que les écarts entre le coût de génie civil le moins élevé (MP 73-2) et le coût de génie civil des autres systèmes restent sensiblement identiques à ceux constatés pour la tranchée superficielle.

Par contre les coûts de génie civil d'une interstation de 800 m augmentent pour une tranchée couverte réalisée à un niveau profond dans un terrain (cohérent + eau) de:

Coût en MF Génie Civil	MP 73-2	MI 84-1	MI 84-2	MI 84-3
T C superficielle	116, 872	175, 707	193, 391	211, 175
T C profonde	54, 9%	54, 5%	47%	40, 9%

En conclusion, le classement constaté pour les coûts de génie civil des différents systèmes du groupe IV pour une construction en tranchée superficielle reste inchangé pour une construction en tranchée profonde.

**En conclusion générale,** le classement des systèmes du point de vue du coût de génie civil à capacité égale ne change pas: seul le coût de génie civil pour chacun des systèmes augmente de 40 à 60% par rapport à la tranchée superficielle, aussi ce type de construction ne sera utilisé qu'exceptionnellement lorsqu'on doit raccorder un tunnel profond avec un ouvrage superficiel (station ou tranchée superficielle) ou passer sous un réseau de concessionnaire ne pouvant pas être dévié.

#### 4.4.3 Souterrain réalisé au tunnelier

De la même façon que précédemment nous allons comparer dans chacun des groupes les coûts de génie civil de chacun des systèmes.

Dans le groupe I, défini pour une capacité offerte inférieure à 6000 pas./ h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
Interstation de 800 m				
T G + eau	96, 43	+ 9, 8	+ 32, 7	+ 56, 6
Interstation de 400 m				
TG + eau	78, 43	+ 10	+ 33, 6	+ 54, 8

Nota: Les histogrammes de coûts de génie civil des différents systèmes sont réunis au § 4.4.3. en annexe.

Dans ce type de construction, le gabarit des véhicules a une incidence sur l'ouverture du tunnel à construire et donc sur le coût du tunnelier et sa vitesse d'avancement: cette vitesse est liée à la nature du sol et aux volumes de déblais et matériaux à transporter.

Le classement des coûts de génie civil des 4 systèmes du groupe reste identique à ceux constatés pour les méthodes de construction en tranchée couverte superficielle et profonde.

Les écarts entre le coût du génie civil du SK1 et des autres systèmes restent similaires sauf pour le système Transville 1 où l'écart qui est de 45% en tranchée superficielle et profonde, passe à 32, 7% dans une construction au tunnelier.

Si on compare les coûts de génie civil des 4 systèmes du groupe avec les méthodes en tranchée couverte, on note:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 MF	Transville 1 MF	VAL 256-1 MF
Interstation de 800 m, tranchée superficielle				
T G + eau	66, 723	70, 479	96, 798	100, 600
Interstation de 800 m, tranchée profonde				
TG + eau	126, 142	133, 142	182, 587	190, 300
Interstation de 800 m, au tunnelier				
TG + eau	96, 43	105, 897	128, 036	151, 000



Le coût de construction au tunnelier d'une interstation de 800 mètres se situe entre les coûts de construction en tranchée superficielle et en tranchée profonde, avec des écarts de:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
Interstation de 800 m, au tunnelier				
TG + eau	96, 43	105, 897	128, 036	151, 000
en tranchée superficielle	- 44, 5%	- 50, 25%	- 32, 27%	- 50, 01%
en tranchée profonde	+ 30, 8%	+ 25, 7%	+ 42, 6%	+26, 02%

Si on double la longueur de l'interstation, le coût du tunnelier et de son amenée sur le site représenté dans le tableau des coûts par un terme fixe, est mieux amorti, le coût de l'interstation de 1600 m devient dans les 3 cas:

Coût en MF Génie Civil	SK1	SK2	Transville 1	VAL 256-1
Interstation de 1600 m, au tunnelier				
TG + eau	132, 430	145, 097	174, 436	210, 200
en tranchée superficielle	127, 363	134, 399	185, 517	194, 840
en tranchée profonde	245, 662	259, 142	357, 387	374, 860

On note sur ce tableau que pour une interstation supérieure à 1500 m le coût du génie civil réalisé au tunnelier dans le cas du Transville 1 est inférieur à celui réalisé par la méthode tranchée superficielle, il y a ainsi une distance minimum au delà de laquelle le tunnelier devient intéressant par rapport au coût et aux inconvénients de la méthode de construction en tranchée couverte.

Ainsi si on retient un coût de dévoiement de réseaux de concessionnaires supplémentaire de l'ordre de 15% du montant du génie civil (tranchée couverte + station superficielle), ce coût de dévoiement s'ajoutant au coût du dévoiement standard retenu pour le calcul des coûts des travaux effectués en tranchée couverte, le tunnelier devient intéressant, malgré le coût important de la station profonde qui est inclus dans l'interstation type, du point de vue prix pour une interstation supérieure à :

pour le système SK1, on a:  $1, 15 (9570 + 75, 8 X) = 13\ 500 + 49\ 000 + 45 X$

$$X = 1221 \text{ m.}$$

pour le système SK2, on a:  $1, 15 (10\ 315 + 79, 9 X) = 16\ 000 + 53\ 000 + 49 X$

$$X = 1332 \text{ m}$$

pour le système Transville 1:  $1, 15 (14510 + 110, 9 X) = 28\ 000 + 57\ 000 + 58 X$

$$X = 982 \text{ m}$$

pour le système VAL 256-1:  $1,15(12250 + 117,8 X) = 27\,500 + 68\,000 + 74 X$

$$X = 1324 \text{ m.}$$

Si on multiplie le nombre d'interstations pour faire une ligne, l'amortissement du tunnelier est meilleur mais il y a quelques contraintes:

- les stations sont profondes notamment pour les tunnels de gros diamètre afin de conserver une couverture au dessus du tunnel de 1 diamètre: exemple pour le RER le radier du tunnel se situe à - 18 mètres du niveau du terrain naturel. Cette profondeur a une incidence sur le coût de construction mais aussi sur l'exploitation (escaliers mécaniques, ascenseurs, signalétique, éclairage,...etc)

- le passage dans les stations doit se faire avec le gros oeuvre au droit du débouché du tunnel achevé, ou le gros oeuvre de la station non commencé (ce qui entraîne des contraintes lors de la construction de la station et donc un surcoût).

- le sous sol doit être bien connu et les paramètres du terrain doivent être pris en compte par le tunnelier dès le début du chantier pour éviter des ralentissements ou des arrêts,

- le planning général de réalisation du métro à mettre en service est tributaire du chemin critique défini par la vitesse d'avancement du tunnelier et tous les aléas,

- l'utilisation d'un seul tunnelier n'est pas favorable à la mise en place de marché à plusieurs lots de réalisation de stations et d'interstations pour multiplier le nombre d'entreprises et baisser le délai global de réalisation et les coûts: mais c'est possible (cf Tunnel sous la Manche) avec une coordination générale importante qui doit être rémunérée.

En conclusion, le classement constaté pour les coûts de génie civil des différents systèmes du groupe I reste inchangé par rapport au classement constaté dans la méthode de construction en tranchée couverte.

**Dans le groupe II**, défini pour une capacité offerte située entre à 6000 pas./ h / sens et 15 000 pas. / h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres donne:

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
Interstation de 800m						
T G + eau	137, 73	+ 17, 3	- 0, 8%	+ 13, 2	+ 29, 9	+ 30
Interstation de 400m						
T G + eau	112, 13	+ 18, 8	+ 1, 15	+ 12, 7	+ 34, 3	+ 29, 8

Nota: Les histogrammes des coûts de génie civil sont réunis au § 4.4.3. de l'annexe.

Dans ce groupe II, on constate que les écarts entre le coût de génie civil le moins élevé (VAL 206-1) et le coût de génie civil des autres systèmes dans la méthode au tunnelier comparée à la méthode tranchée couverte superficielle augmentent sensiblement (de 7,4% à 17, 3% pour le tram, de 9, 8 à 13, 2% pour le VAL 256-2, de 12, 3 à 30% pour le MAG 1.

Par contre pour le système Trans 2 l'écart diminue de 9,8% à -0,8% ceci est dû à une meilleure inscription de la voie du Transville dans le tunnel circulaire, l'évacuation en tunnel se faisant par la voie et non sur des cheminements latéraux (2 x 0,70 m).

Dans le cas de la tranchée couverte, la surlargeur de 1,40 m n'a pas la même incidence sur le coût global, c'est surtout la profondeur des parois qui a une incidence sur le coût de la tranchée couverte (cf: comparaison tranchée superficielle avec tranchée profonde).

Comme pour le groupe I, nous calculons la longueur de l'interstation au delà de laquelle le coût du tunnelier devient intéressant compte tenu du terme fixe (coût du tunnelier).

Si on retient un coût de dévoiement supplémentaire de réseaux de concessionnaires de l'ordre de 15% du montant du génie civil (tranchée couverte superficielle), le tunnelier devient intéressant malgré le coût de la station profonde du point de vue prix pour une interstation supérieure à :

pour le système Val 206-1, on a:  $1,15(14\,190 + 106,9 X) = 30\,500 + 60\,000 + 64 X$

$$X = 1259 \text{ m.}$$

pour le système Tram 1, on a:  $1,15(14\,670 + 116,2 X) = 43\,500 + 66\,000 + 71 X$

$$X = 1479 \text{ m}$$

pour le système Transville 2:  $1,15(19\,790 + 110,9 X) = 38\,000 + 57\,000 + 58 X$

$$X = 1039 \text{ m}$$

pour le système VAL 256-2:  $1,15(15\,480 + 117,8 X) = 33\,500 + 68\,000 + 74 X$

$$X = 1362 \text{ m.}$$

pour le système Tram 2:  $1,15(20\,520 + 116,2 X) = 63\,000 + 66\,000 + 71 X$

$$X = 1683 \text{ m.}$$

pour le système MAG1:  $1,15(17\,640 + 119,3 X) = 46\,000 + 72\,000 + 84 X$

$$X = 1837 \text{ m}$$

Les résultats précédents montrent que plus la section du tunnelier augmente et plus le coût du génie civil de la station et des ouvrages en ligne augmente, ce qui influe sur la longueur de l'interstation au delà de laquelle l'utilisation d'un tunnelier devient intéressante.

Pour un linéaire de 5496 mètres de tunnel avec 8 stations (496 ml) pour le VAL 206-1 réalisés au tunnelier, on a:

$64 \times 5000 + 60\,000 + 8 \times 30\,500 = 624\,000 \text{ kF. (avec stations profondes). soit } 113,537 \text{ F/ml. (stations profondes comprises)}$

Pour un linéaire de 5496 mètres de tunnel réalisé en tranchée couverte avec 8 stations superficielles pour le VAL 206-1:

$1,15(106,9 \times 5000 + 8 \times 14\,190) = 745\,223 \text{ kF (avec stations superficielles et les dévoiements de réseaux) soit } 135\,594 \text{ F/ml.}$

Le gain avec l'utilisation du tunnelier au ml est de 19,4% dans ce cas; si on portait le linéaire d'utilisation à 7000 ml et 10 stations, le gain serait de 26 %, au delà l'augmentation du gain plafonne par ailleurs le planning de réalisation se prolonge, d'autres surcoûts apparaissent.

En résumé, l'utilisation du tunnelier paraît intéressante dans ce groupe de systèmes pour des linéaires supérieurs aux interstations définies ci dessus à condition de coordonner le passage du tunnelier avec la réalisation des stations et de s'assurer de l'homogénéité des terrains rencontrés pour garder le même tunnelier.

**Dans le groupe III**, défini pour une offre située entre 15 000 et 25 000 pas. / h / sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-2	VAL 256-3 %	256-4 %	MP 73-1 %	MAG 2 %	Tram 3 %
Interstation de 800m						
T G + eau	147, 568	+ 9, 7	+ 14, 1	+ 32, 08	+ 33, 2	+ 31, 4
Interstation de 400m						
T G + eau	121, 968	+ 8, 5	+ 13, 8	+ 38, 15	+ 33, 7	+ 35, 6

Nota: Les histogrammes des coûts de génie civil des systèmes ci dessus apparaissent au § 4.4.3. de l'annexe.

Dans ce groupe III, on note que les écarts entre le coût de génie civil le moins élevé (VAL 206-2) et le coût de génie civil des autres systèmes augmentent plus rapidement que dans le cas de travaux en tranchée couverte.

Les écarts entre VAL 206-2 et VAL 256-4, MP 73-1, MAG 2 et Tram 3 sont respectivement en Tranchée couverte superficielle de + 9, 5%, + 10, 9%, + 13, 2% et 13, 7% dans un terrain granulaire avec de l'eau; avec la méthode de construction au tunnelier les écarts s'accroissent entre VAL 206-2 et MP 73-1, MAG 2, Tram 3, ils sont respectivement de 32, 08%, 33, 2% et 31, 4%.

Comme pour le groupe II, nous calculons la longueur de l'interstation au delà de laquelle le coût du tunnelier devient intéressant compte tenu du terme fixe (coût du tunnelier).

Si on retient un coût de dévoiement de réseaux de concessionnaires de l'ordre de 15% du montant du génie civil (tranchée couverte superficielle), le tunnelier devient intéressant du point de vue prix pour une interstation supérieure à:

pour le système VAL 206-2, on a:  $1, 15(19\ 760 + 106, 9 X) = 42\ 000 + 60\ 000 + 64 X$

$$X = 1345 \text{ m.}$$

pour le système VAL 256-3, on a:  $1, 15(18\ 510 + 117, 8 X) = 40\ 500 + 68\ 000 + 74 X$

$$X = 1419 \text{ m}$$

pour le système VAL 256-4:  $1, 15(21\ 540 + 117, 8X) = 48\ 000 + 68\ 000 + 74 X$

$$X = 1484 \text{ m}$$

pour le système MP 73-1:  $1,15(26\ 240 + 116, 4X) = 86\ 500 + 63\ 000 + 66 X$

$$X = 1758 \text{ m.}$$

pour le système MAG 2:  $1, 15(25\ 960 + 119, 3X) = 66\ 500 + 72\ 000 + 84\ X$   
 $X = 2042\ m.$

pour le système Tram 3:  $1, 15(30\ 670 + 116, 2X) = 80\ 000 + 66\ 000 + 71\ X$   
 $X = 1768\ m$

**Dans le groupe IV**, défini pour une offre de capacité située entre 25 000 et 80 000 pas./h/sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 ml puis de 400 ml, donne:

Coût de Génie Civil	MP 73-2 en MF	MI 84-1 %	MI 84-2 %	MI 84-3 %
Interstation de 800m T G + eau	204, 984	+ 33, 9	+ 79, 6	+ 125, 6
Interstation de 400m T G + eau	178, 584	+ 33, 9	+ 86, 5	+ 139

Dans ce groupe IV, on note que les écarts entre le coût de génie civil le moins élevé (MP 73-2) et le coût de génie civil des autres systèmes sont plus élevés à ceux constatés pour la tranchée superficielle: ceci est dû à l'incidence du coût des stations profondes et au terme fixe du coût du tunnelier qui ne peut s'amortir sur 800 mètres, notamment pour les systèmes MI 84-2 et 84-3 qui passent respectivement de 48, 2% et 59, 4% en tranchée superficielle à 79, 6% et 125,6% avec la méthode au tunnelier.

Comme pour le groupe III, nous calculons la longueur de l'interstation au delà de laquelle le coût du tunnelier devient intéressant compte tenu du terme fixe (coût du tunnelier).

Si on retient un coût de dévoiement de réseaux de concessionnaires de l'ordre de 15% du montant du génie civil (tranchée couverte superficielle), le tunnelier devient intéressant du point de vue prix pour une interstation supérieure à:

pour le système MP 73-2, on a:  $1, 15(29\ 470 + 116, 4\ X) = 97\ 500 + 63\ 000 + 66\ X$   
 $X = 1866\ m.$

pour le système MI 84-1, on a:  $1, 15(41\ 290 + 162, 3\ X) = 141\ 500 + 75\ 000 + 88\ X$   
 $X = 1713\ m$

pour le système MI 84-2:  $1, 15(70\ 070 + 162, 3\ X) = 244\ 500 + 75\ 000 + 88\ X$   
 $X = 2\ 422\ m$

pour le système MI 84-3:  $1, 15(98\ 950 + 162, 3\ X) = 348\ 000 + 75\ 000 + 88\ X$   
 $X = 3135\ m.$

En conclusion, le classement constaté pour les coûts de génie civil des différents systèmes du groupe IV pour une construction au tunnelier reste inchangé par rapport à une construction en tranchée couverte. Pour des interstations supérieures à 1700 mètres pour le MI 84-1, 3100 mètres pour le MI 84-3, la méthode de réalisation au tunnelier devient plus économique que la méthode en tranchée couverte. Le coût important des stations profondes (- 18m par rapport au T.N.) incite les projeteurs à limiter le linéaire de souterrain profond pour le RER ou à réaliser des stations et ouvrages en ligne en tranchée superficielle.

**En conclusion générale,** les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil dans chacun des groupes sont:

Groupe	Système	Capacité pas./h/sens
I	SK1	4000
I	SK2	6000
II	VAL 206-1	9600
II	Trans 2	12 744
III	VAL 206-2	19 200
III	VAL 256-4	22 080
III	MP 73-1	23 400
IV	MP 73-2	28 160
IV	MI 84-2	51 600
IV	MI 84-3	77 400

#### 4.4.4 Etude comparative entre monotube et bitube.

Dans l'hypothèse de l'utilisation d'un tunnelier pour réaliser la section courante d'un ouvrage, il est possible de choisir entre un monotube à 2 voies et un bitube avec une voie dans chaque tube.

Ce choix est à faire après une analyse multicritère dont les principaux éléments sont les suivants:

- profondeur du plan de roulement en fonction des contraintes de site. La charge sur le tube étant de l'ordre du diamètre pour éviter tout désordre.

- conception des stations, à quais latéraux en monotube, à quai central en bi-tube.

- planning et aspect financier en fonction de la longueur à creuser et du nombre de machines à mettre en place.

L'étude ci-après est menée pour les types de matériel suivants:

SK1

Transville

VAL 206

MAGGALY

### 1- Aspects fonctionnels

#### 1.1 - Géométrie

Matériel Roulant	Monotube		Bitube	
	$\phi$ intérieur en m	$\phi$ extérieur	$\phi$ intérieur	$\phi$ extérieur
SK1	5, 10	5, 80	3, 90	4, 50
Transville	6, 30	7, 10	4, 30	4, 90
VAL 206	6, 80	7, 60	4, 65	5, 35
Maggaly	8, 35	9, 15	5, 30	6, 00

En ce qui concerne la profondeur du plan de roulement, on admet en règle générale que la charge au dessus du tunnelier doit être égale à un diamètre en zone critique.

On aurait donc, en théorie:



Matériel Roulant	Monotube		Bitube	
	charge en m	profondeur Plan roulement	charge en m	profondeur Plan roulement
SK1	6, 00	9, 50	4, 50	8, 00
Transville	7, 00	11, 50	5, 00	9, 00
VAL 206	8, 00	13, 20	5, 5	9, 70
Maggaly	9, 00	15, 50	6, 00	10, 60

Ces valeurs sont à pondérer en fonction des contraintes en surface.

Pour le tracé deux considérations sont à prendre en compte:

- l'utilisation d'un tunnelier implique de limiter les rayons en fonction du diamètre, par exemple à environ 250 m pour le monotube de 9 m et 200 m pour le bitube de 6 mètres.

- dans le cas du bitube, il convient de prévoir une distance égale à environ un diamètre entre les deux tubes.

## 1.2 Les stations

Deux aspects principaux pour les stations:

- la conception des quais
- la profondeur des quais

En ce qui concerne la conception des quais:

- le monotube se marie avec des quais latéraux et le contour de la station peut alors s'adapter aux contraintes fonctionnelles et architecturales.

- le bitube quant'à lui implique quasiment un quai central avec donc un contour de station beaucoup plus strict. Le passage du tunnelier impose de plus une surlargeur le long des parois moulées.

Pour ce qui est de la profondeur des quais, en théorie la différence est égale à celle des plans de roulement soit:

Systèmes	Différence de profondeur en faveur du bitube en m
SK1	1, 50
Transville	2, 50
VAL 206	3, 50
Maggaly	4, 90

### **1.3 Le terminus**

Le terminus doit comporter des communications pour le retournement des trains et une zone de garage.

Dans la solution en monotube, les communications et le garage peuvent être implantées dans le tunnel sans problème autre que la suppression des poteaux axiaux dans la station pour garder un entraxe limité permettant de dégager des trottoirs de 1,00 m de large dans le tube (dimensionné pour les largeurs en courbe).

Dans la solution en bi-tube, le terminus et la zone de manoeuvre d'avant gare devront être réalisés à ciel ouvert.

### **1.4 Exploitation**

Le problème principal concerne les communications entre voies pour les services provisoires: s'il n'y a pas de difficultés dans la solution monotube, il n'en va pas de même dans le cas du bi-tube: il faut réaliser un ouvrage à ciel ouvert de dimensions très importantes en raison de l'entraxe des voies.

## **2. Aspects techniques**

### **2.1 Définition du tunnelier**

Le tunnelier utilisé dans des terrains composés d'alluvions sablo-graveleuses baignés par la nappe phréatique est un tunnelier à pression de boue bentonitique.

Le tunnelier a les fonctions suivantes:

- le soutènement de front de taille et des parois latérales
- l'abattage du terrain
- le marinage des déblais
- la propulsion et le revêtement par voussoirs préfabriqués

Des injections de blocage entre les voussoirs et le terrain seront nécessaires pour réduire les tassements.

Les voussoirs seront en outre conçus et équipés pour assurer une parfaite étanchéité du tube vis à vis de la nappe phréatique.

### **2.2 Tassements**

Le creusement induit des tassements qui ont une incidence sur l'environnement.

Ces tassements sont à priori supérieurs avec le monotube, la section d'excavation étant quasiment le double de celle du bi-tube.

Cependant, il apparaît que, aussi bien par la maîtrise du front de taille que par la qualité du revêtement mis en place, la technique actuelle permette des résultats acceptables pour un diamètre excavé de l'ordre de 9 m, ceci d'autant plus que le tracé du monotube permet de mieux s'affranchir du bâti existant en restant sous la voirie.

### **2.3 Puits de sortie**

Le puits de sortie est plus large dans la solution bi-tube et moins profond.

## 2.4 Obstacles

Le choix du monotube et du bitube devra tenir compte, au cas par cas, des contraintes et obstacles existants en surface ou dans le sous-sol.

## 3. Aspect financier

La comparaison entre les montants des 2 solutions est faite avec les hypothèses suivantes:

- utilisation d'un seul tunnelier dans les deux cas, ce qui renchérit la solution monotube pour le terme fixe,
- estimation sur les quantités mises en place en ce qui concerne le terme proportionnel à la longueur,
- prise en compte de la surprofondeur des stations.

On obtient alors le tableau comparatif suivant (hors taxes, valeur janvier 1991, en millions de francs) pour un tronçon de 1000 mètres.

Système	SK 1		Transville		VAL 206		MAGGALY	
	mono	bitube	mono	bitube	mono	bitube	mono	bitube
φ intérieur en m	5, 10	3, 90	6, 30	4, 30	6, 80	4, 65	8, 35	5, 30
Mise à disposition	37	28	45	31	48	34	60	39
Amenée	10	10	10	10	10	10	10	10
Repli	2	2	2	2	2	2	2	2
Transfert	-	4	-	4	-	4		4
<b>Terme fixe</b>	49	44	57	47	60	50	72	55
Excavation	12, 5	14, 5	18	17	20, 5	22	30	26
Bentonite	2	2	3	2	3	4	4	4
Voussoirs	20	31	24, 5	33	26, 5	37, 5	32	42
Injection bourrage	4	6	4	6	5	8	5	8
béton rechargement	2, 5	-	3, 5	-	3,5	-	5	-
divers	4	5,5	5	6	5,5	6,5	8	8
<b>Terme proportionnel</b>	45	59	58	64	64	78	84	88

Si nous appliquons ces coûts sur un tronçon de 1000 mètres avec une station:

## SK 1

<b>Monotube:</b>	49 MF + 45 MF =	94 MF
Station:	volume: $615 \text{ m}^2 \times 12 = 7\,400 \text{ m}^3$	
	coût: $7\,400 \times 1800 =$	13,5 MF
		<b>Total: 107,5 MF</b>

<b>Bitube:</b>	44 MF + 59 MF =	103 MF
Station:	volume: $610 \text{ m}^2 \times 9 = 5\,500 \text{ m}^3$	
	coût: $5\,500 \text{ m}^3 \times 1800 =$	10 MF
		<b>Total: 113 MF</b>

## Transville

<b>Monotube</b>	57 MF + 58 MF =	115 MF
Station:	volume: $1100 \text{ m}^2 \times 14 = 15\,400 \text{ m}^3$	
	coût: $15\,400 \text{ m}^3 \times 1800 =$	28 MF
		<b>Total: 143 MF</b>

<b>Bitube</b>	47 MF + 64 MF =	111 MF
Station:	volume: $1100 \text{ m}^2 \times 10 = 11\,000 \text{ m}^3$	
	coût: $11\,000 \text{ m}^3 \times 1800 =$	20 MF
		<b>Total: 131 MF</b>

## VAL 206

<b>Monotube</b>	60 MF + 64 MF =	124 MF
Station:	volume: $1\,000 \text{ m}^2 \times 16 = 16\,000 \text{ m}^3$	
	coût: $16\,000 \text{ m}^3 \times 1800 =$	29 MF
		<b>Total: 153 MF</b>

<b>Bitube</b>	50 MF + 78 MF =	128 MF
Station:	volume: $1\,000 \text{ m}^2 \times 11 = 11\,000 \text{ m}^3$	
	coût: $11\,000 \text{ m}^3 \times 1800 =$	20 MF
		<b>Total: 148 MF</b>

## MAGGALY

<b>Monotube</b>	72 MF + 84 MF =	156 MF
Station:	volume: $1\,400 \text{ m}^2 \times 18 = 25\,200 \text{ m}^3$	
	coût: $25\,200 \text{ m}^2 \times 1800 =$	46 MF
		<b>Total: 202 MF</b>

<b>Bitube</b>	55 MF + 88 MF =	143 MF
Station:	volume: $1\,400 \text{ m}^2 \times 12 = 16\,800 \text{ m}^3$	
	coût: $16\,800 \text{ m}^3 \times 1800 =$	31 MF
		<b>Total: 174 MF</b>

Les exemples ci-dessus montrent l'intérêt du bi-tube au niveau financier pour le génie civil pour une section courante type.

Le gain financier tend cependant très vite vers zéro en fonction des contraintes locales et du surcoût qu'il apporte au niveau des équipements (pose de voie, communications, ventilation...).

#### 4. Aspect planning

Le monotube est favorable au planning puisque le creusement se réalise en une seule fois, même si on peut admettre que la vitesse d'avancement est plus faible, et que le bitube nécessite un transfert du tunnelier entre les 2 tubes.

La pose de voie et des équipements est également facilitée dans le cas du monotube, mais cet avantage disparaît puisqu'il est possible d'équiper le 1er tube pendant le creusement du second tube dans l'autre solution.

L'exemple ci-après donne une idée pour un tronçon de 1000 m:

le temps de creusement du monotube est de 10 mois pour 1000 m sur la base d'une vitesse de 150 m/mois et de 3 mois de démarrage, tandis qu'il est plutôt de 15 mois pour les 2000 m du bitube sur la base d'une vitesse de 200 m / mois, de 2 mois de démarrage et de 3 mois de transfert et redémarrage.

#### 5. Conclusion

Nous avons décrits les avantages et inconvénients des solutions monotube et bitube, l'avantage financier pour une solution bitube n'est pas négligeable puisqu'on trouve pour une interstation de 1000 mètres (avec une station) des écarts de 3,4 à 16 % en faveur de cette solution.

Si on peut réutiliser le même tunnelier dans la solution bitube pour réaliser le 2ième tunnel, le terme fixe du coût du tunnelier s'amortit 2 fois plus vite. Par ailleurs, le tunnelier dont le diamètre est plus petit que celui utilisé dans la solution monotube est moins cher: ainsi pour le SK1, il est 11,4 % moins cher, 21,3 % pour le Transville, 20 % pour le VAL, et 30 % pour MAGGALY.

Le creusement d'un tunnel induit des tassements qui ont une incidence sur l'environnement, ces tassements sont supérieurs avec le monotube. Le bitube permet de remonter le profil en long, le tunnel ayant sa clé de voûte à au moins une profondeur d'un diamètre du niveau du sol naturel pour éviter tout désordre. La réalisation d'un premier tube peut permettre d'obtenir une meilleure connaissance du terrain, d'ajuster les paramètres du tunnelier et d'améliorer la progression du tunnelier lors de la construction du 2ième tunnel.

La réalisation d'un bitube implique souvent des stations à quai central ce qui peut être un avantage, la largeur du quai central pouvant être inférieure à la somme des largeurs des 2 quais latéraux surtout si les trafics sont dissymétriques ou faibles. Dans les stations à fort trafic il est souhaitable en général d'avoir des quais latéraux.

Dans une solution bitube le terminus et la zone de manoeuvre d'avant gare doivent être réalisés comme une station, à ciel ouvert. Pour réaliser des services provisoires c'est à dire des communications entre voies on doit réaliser des ouvrages à ciel ouvert de dimensions importantes en raison de l'entraxe des voies.

En définitive, c'est au cas par cas que l'on peut évaluer les avantages de chacune des solutions, c'est aussi la remise de l'offre de l'entreprise qui peut faire pencher vers l'une des 2 solutions en fonction de son parc de matériel pour la réalisation du tunnel, de la proposition de planning de creusement s'insérant dans le planning général de l'opération et des surcoûts induits sur les stations et les différents ouvrages en ligne.

#### 4.4.5 Tunnel traditionnel

Dans l'étude de coût avec la méthode de construction en tunnel traditionnel nous comparons les coûts de réalisation de tunnel pour les sections nécessaires à chacun des systèmes étudiés dans 3 types de terrain différents des terrains granulaires ou cohérents retenus dans les chapitres précédents.

Aussi nous ne pouvons pas comparer les coûts obtenus pour la méthode traditionnelle avec ceux obtenus au tunnelier ou avec la tranchée couverte.

Par ailleurs cette étude de coût porte sur la réalisation d'un tunnel à double voie dont le coût est toujours inférieur à celui de la réalisation de 2 tunnels à voie unique (+ 35%).

##### *Les différents types de creusement et de soutènement possible*

Suivant la résistance des terrains traversés plusieurs types d'excavation sont possibles: explosif, machine à attaque ponctuelle, engins de terrassement (pelle, brise roche...).

L'excavation peut selon les cas être réalisée en section entière ou en section divisée.

Pour caractériser les terrains, on utilise la classification de l'Association Française des Travaux Souterrains (cf: annexe § 3.1.4.) qui va de R1 pour les roches de résistance élevée à R5 pour les roches de faible résistance et sols cohérents consolidés. Les classes R5b et R6 étant réservées pour les sols traités au bouclier.

Nous retenons 3 profils de soutènement pour avoir un éventail de coûts considéré comme normal entre les extrêmes des classes de terrain et ceci pour chaque type de système auquel correspond une géométrie type:

**1. Pour un terrain de la classe R 2**, roches très résistantes, le creusement est considéré être réalisé à l'explosif sur la section entière, les caractéristiques prises en compte pour l'établissement du coût sont:

- Profil N°1 :
  - Soutènement par béton projeté (15 cm)
  - Boulons de 25 mm de 3 m de long.
  - Etanchéité P.V.C.
  - Béton coffré 30 cm.

**2. Pour un terrain de la classe R 3**, roches de bonne résistance mais fracturées, le creusement se fait sur la section entière ou par demi section à l'explosif ou à la machine, les caractéristiques retenues sont:

- Profil N°2:
  - Soutènement par cintres lourds tous les mètres
  - Blindages avec tôles de 3 mm en voûte
  - Béton projeté en piedroits
  - Etanchéité P.V.C.
  - Béton coffré 30 cm.

**3. Pour un terrain de la classe R 6**, roches peu résistantes, le creusement se fait par demi section avec des moyens mécanisés, les caractéristiques retenues sont:

- Profil N°3:
  - Soutènement par cintres lourds tous les 0, 80 m
  - Blindage tôles de 5 mm
  - Contre voûte provisoire en demi section supérieure
  - Contre voûte ferrailée définitive
  - Injections préalables à l'avancement
  - Etanchéité P.V.C.
  - Béton coffré 50 cm

Compte tenu de ces hypothèses, le tableau suivant donne le coût hors taxes du génie civil d'un mètre linéaire de galerie pour chaque système envisagé.

Ces coûts ne prennent en compte aucun équipement (voies) ni les sujétions de travail en site urbain (horaires ...) ou depuis un puits d'attaque.

Les histogrammes représentant les différences de coûts par systèmes sont joints en annexe au § 4.4.5. Tunnel traditionnel, ainsi que la notice du programme ESTIM ayant permis d'établir ces coûts selon les différents gabarits et les 3 types de terrain retenus.

**Coût au mètre en F. H.T. (Val 1/1/90)**

	Tunnel 2 voies		Profil 1	Profil 2	Profil 3
	hauteur centre	rayon voute	F	F	F
SK1	1,70	2,82	27 400	39 500	95 500
SK2	1,80	3,08	30 300	43 300	103 000
TRANSVILLE	2,20	3,65	39 500	55 000	127 100
VAL 206	1,95	3,62	39 500	52 500	124 000
VAL 256	2,10	4,12	41 200	63 200	150 000
MAGGALY	1,95	4,40	48 500	66 000	164 000
TRAM	2,25	3,95	41 200	60 500	150 000
MP 73	2,33	4,09	40 200	60 000	150 000
MI 84	3,15	5,37	63 000	89 200	203 200

Les coûts obtenus au mètre linéaire de tunnel sont valables pour des longueurs situées entre 500 et 2000 mètres pour des longueurs moins importantes ou plus importantes les prix unitaires sont plus élevés.

Le calcul du coût de stations profondes dans les types de terrains rocheux retenus n'a pas été fait, aussi nous ne comparons pas des interstations de 800 m ou 400 m mais simplement des coûts d'ouvrages en section courante adaptés aux différents systèmes de transport étudiés.

D'après le tableau ci dessus qui donnent les différents coûts de génie civil de tunnel (hors station) pour les 3 types de terrain rocheux décrits ci dessus, on a dans le cas du profil 1:

Dans le groupe I, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) du système SK1 et SK2 qui sont les moins élevés, on peut écrire pour un tronçon de 1000 m sans station la progression suivante:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
Terrain R2	27,4	10, 6	44, 2	50, 4

On peut comparer la progression des coûts dans un terrain granulaire d'une construction au tunnelier sur un tronçon de 1000 m sans station:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
T G + eau	94	8, 5	22, 3	51

La progression des coûts par rapport au coût de génie civil du SK1 est moins importante avec la méthode au tunnelier, par contre les coûts de construction au tunnelier dans un terrain granulaire avec de l'eau sont de 243% plus élevé que le coût avec un profil N°1, 138% avec un profil N° 2, et 1, 6% moins cher avec un profil N° 3 pour le SK1.

On note ainsi que la géométrie des ouvrages et la qualité des terrains rencontrés influent sur le coût de la construction: pour une même section de tunnel la différence de coût notée sur le tableau des coûts au ml est de 248 % entre un profil N° 1 et N° 3 pour le SK1, 264 % pour le Tram, et jusqu'à 273 % pour le MP 73.

Dans le groupe II, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) adapté aux dimensions du système Transville et du VAL 206 qui sont les moins élevés, on peut écrire pour un tronçon de 1000 m sans station la progression suivante:

Coût de Génie Civil	Transville en MF	VAL 206 en MF	Tram %	VAL 256 %	MAG %
	39, 5	39, 5	4, 3	4, 3	22, 8

Dans le groupe III, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) adapté aux dimensions du VAL 206 et du MP 73 qui sont les moins élevés, on peut écrire pour un tronçon de 1000 m sans station la progression suivante:

Coût en MF Génie civil	VAL 206-1 en MF	MP 73 %	Tram %	VAL 256 %	MAG %
	39, 5	1, 8	4, 3	4, 3	22, 8

Dans le groupe IV, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) adapté aux dimensions du MP 73 qui est le moins élevé, pour un tronçon de 1000 m sans station on écrit la progression suivante:

Coût de Génie Civil	MP 73 en MF	MI 84 %
	40, 2	56, 7



Dans le cas du profil 3, le terrain le moins favorable, on a:

Dans le groupe I, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) du système SK1 et SK2 qui sont les moins élevés, on peut écrire pour un tronçon de 1000 m sans station la progression suivante

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville %	VAL 256 %
Terrain R6	95, 5	7, 9	33, 1	57

On peut comparer la progression des coûts dans un terrain granulaire d'une construction au tunnelier sur un tronçon de 1000 m sans station:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
T G + eau	94	8, 5	22, 3	51

La progression des coûts par rapport au coût de génie civil du SK1 est symétrique avec ceux obtenus par la méthode au tunnelier.

Les coûts obtenus par la méthode traditionnelle sont équivalents à ceux obtenus au tunnelier or les terrains de la classe 6 ont une meilleure résistance mécanique (3 à 1,3 bars) que les terrains granulaires de la classe 9 (0,7 à 0,5 bars) retenus pour les calculs de coûts avec la méthode au tunnelier.

Ceci permet de dire que la méthode traditionnelle a une limite dans son application, dès que les terrains sont dans l'eau avec une résistance mécanique faible l'utilisation de la méthode au tunnelier devient intéressante.

Dans le groupe II, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) du VAL et du Transville qui sont les moins élevés, on peut écrire pour un tronçon de 1000 m sans station la progression suivante:

Coût de Génie Civil	VAL en MF	Transville %	VAL 256 %	MAG %	Tram %
	124	2, 5	20, 9	32, 3	20, 9

Dans le groupe III, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) du VAL 206 qui est le moins élevé, on peut écrire pour un tronçon de 1000 m sans station la progression suivante:

Coût en MF Génie civil	VAL 206	VAL 256 %	MAG %	Tram %	MP 73 %
	124	20, 9	32, 3	20, 9	20, 9

Dans le groupe IV, c'est le coût du génie civil du tunnel (hors station) du MP 73 qui est le moins élevé, pour un tronçon de 1000 m sans station on écrit la progression suivante:

Coût de Génie Civil	MP 73 en MF	MI 84 %
	150	35, 5

On peut comparer la progression des coûts dans un terrain granulaire d'une construction au tunnelier sur un tronçon de 1000 m sans station pour ce groupe:

Coût de Génie Civil	MP 73 en MF	MI 84 %
	129	26, 4

Dans ce cas pour des sections de creusement importantes la méthode au tunnelier paraît intéressante mais les caractéristiques des terrains sont différentes, la méthode de construction traditionnelle s'appliquant ici aux terrains de meilleure qualité selon la classification, s'avère être plus chère que la méthode au tunnelier appliquée à des terrains de moins bonne qualité dans l'eau.

Par ailleurs le tableau des coûts selon les 3 profils adoptés fait apparaître d'importantes différences selon la classification du terrain traversé, différences beaucoup plus importantes que celles engendrées par les différences de gabarit des systèmes étudiés, ainsi on a pour une distance de 1000 mètres sans station:

Système	Section Intrados en m <sup>2</sup>	Profil 1 coût en MF	Profil 2 en %	Profil 3 en %
SK 1	21, 5	27, 4	+ 44	+ 248
SK 2	25, 3	30, 3	+ 42, 9	+ 239
Transville	36	39, 5	+ 39, 2	+ 221
VAL 206	34	39, 5	+ 32, 9	+ 214
VAL 256	43, 1	46, 2	+ 36, 8	+ 195
MAGGALY	47	48, 5	+ 36	+ 197
Tramway	41, 5	41, 2	+ 46, 8	+ 264
MP 73	43	40, 2	+ 49, 3	+ 273
MI 84	77	63	+ 41, 6	+ 223

Pour un même profil les différences notées entre le coût du génie civil du SK1 et du MI 84 sont pour une distance de 1000 mètres sans station:

Profil 1:	SK 1	MI 84
	27, 4 MF	+ 129 %
Profil 2:	39, 5 MF	+ 126 %
Profil 3:	95, 5 MF	+ 112 %

**En conclusion générale**, les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil en section courante sans tenir compte de la capacité de chacun des systèmes dans chacun des groupes et pour chaque profil retenu, sont:

	Profil N°1	Profil N°2	Profil N°3
Groupe	Système	Système	Système
I	SK1	SK1	SK1
I	SK2	SK2	SK2
II	VAL 206	VAL 206	VAL 206
II	Transville		
III	VAL 206	VAL 206	VAL 206
III	MP 73	MP 73	VAL 256
III			MP 73
IV	MP 73	MP 73	MP 73
IV	MI 84	MI 84	MI 84

#### 4.4.6 Le viaduc

De la même façon que précédemment nous allons comparer dans chacun des groupes les coûts de génie civil de chacun des systèmes.

Dans le groupe I, défini pour une capacité offerte inférieure à 6000 pas./ h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 %	Transville 1 %	VAL 256-1 %
Interstation de 800 m	31, 926	+ 8, 7	+ 24, 6	+ 47, 3
Interstation de 400 m	17, 326	+ 7, 9	+ 24, 4	+ 45, 1

Nota: Les histogrammes représentant les coûts de génie civil des systèmes ci dessus sont réunis au § 4.4.5. de l'annexe.

Le classement des coûts de génie civil des 4 systèmes du groupe reste identique à ceux constatés pour les méthodes de construction en tranchée couverte superficielle et profonde et avec le tunnelier.

Les écarts entre le coût du génie civil du SK1 et des autres systèmes restent similaires sauf pour le système Transville 1 où l'écart qui est de 45% en tranchée superficielle et profonde, passe à 28% avec une méthode de construction au tunnelier et 24% sur un viaduc: le cheminement d'évacuation se fait sur la voie, la largeur du viaduc prise en compte est de 5, 80 m pour le Transville contre 7, 10 m pour le VAL 256; la charge du Transville 1 est 36,5 tonnes en C.E. et 30, 6 tonnes en C.E. pour le VAL 256-1.

Le coût du viaduc est inférieur aux coûts des autres méthodes de construction, en effet:

Coût de Génie Civil	SK1 en MF	SK2 en MF	Transville 1 en MF	VAL 256-1 en MF
Interstation de 800 m Viaduc	31, 926	34, 705	39, 795	47, 020
Interstation de 800 m T C superficielle T G + eau	+ 108%	+ 103%	+ 143%	+ 114%
Interstation de 800 m Tunnelier	+ 193%	+ 183%	+ 200%	+196%

Le viaduc présente un avantage économique certain au vu des ratios entre le coût du viaduc, de la tranchée couverte et du tunnelier dans le tableau ci dessus: le système Transville est particulièrement adapté au viaduc.

Dans le groupe II, défini pour une capacité offerte située entre à 6000 pas./ h / sens et 15 000 pas. / h / sens, le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres donne:

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
Interstation de 800m						
Viaduc	42, 128	+ 6, 3	- 2, 7	+ 13, 2	+ 8, 3	+ 23, 4
Interstation de 400m						
Viaduc	23, 047	+ 6, 6	- 1, 2	+ 12	+ 10, 3	+ 24, 6

Nota: Les histogrammes des coûts de génie civil des systèmes ci dessus sont réunis au § 4.4.5. en annexe.

Dans ce groupe II, on constate que le coût du génie civil du système VAL 206-1 n'est plus le moins cher, le système Trans 2 est moins cher de 2, 7% pour l'interstation de 800 m: en effet la largeur de viaduc retenue pour le VAL est de 6, 10 m contre 5, 80 m pour le Transville, les charges respectives étant de 47, 1 tonnes en CE et 54, 7 tonnes en CE. Pour le système MAGGALY la largeur est de 7, 60 m avec une charge en CE de 80 tonnes.

Le coût du viaduc reste économique:

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
Interstation de 800m						
Viaduc	42, 127	44, 782	41, 015	47, 699	45, 622	52, 014
Interstation de 800m						
T C sup.	+ 121%	+ 123%	+ 142%	+114%	+ 124%	+ 101%
TG + eau						
Interstation de 800m						
Tunnelier	+193%	+ 206%	+ 206%	+199%	+ 214%	+ 199%

Dans le groupe III, défini pour une offre située entre 15 000 et 25 000 pas. / h / sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres puis de 400 mètres donne:

Coût en MF Génie civil	VAL 206-2	VAL 256-3 %	256-4 %	MP 73-1 %	MAG 2 %	Tram 3 %
Largeur du Viaduc en m	6, 10	7, 10	7, 10	7, 00	7, 60	6, 60
-Interstation de 800m Viaduc	43, 222	+ 11, 7	+ 13, 2	+ 16, 9	+ 24, 5	+ 7, 4
Interstation de 400m Viaduc	24, 142	+ 9, 5	+ 12	+ 19, 9	+ 26, 5	+ 8, 8

Nota: Les histogrammes correspondants sont dans le § 4.4.5. de l'annexe.

Dans ce groupe III, on note que le classement des différents systèmes du point de vue coût de génie civil constaté avec les méthodes de construction précédentes reste inchangé sauf pour le tramway qui se place immédiatement au dessus du VAL 206-2: a largeur prise en compte pour le Tram est de 6, 50 m, avec une charge de 195 tonnes en CE sur 18 essieux, pour MAGGALY 7, 60 m avec une charge de 160 tonnes en CE sur 16 essieux.

**Dans le groupe IV**, défini pour une offre de capacité située entre 25 000 et 80 000 pas./h/sens le classement des systèmes en fonction de leur coût de génie civil pour une interstation de 800 ml puis de 400 ml, donne:

Coût de Génie Civil	MP 73-2 en MF	MI 84-1 %	MI 84-2 %	MI 84-3 %
Interstation de 800m Viaduc	51, 181	+ 22	+ 33, 4	+ 44, 8
Interstation de 400m Viaduc	29, 581	+ 22	+ 41, 6	+ 61, 4

Nota: Les histogrammes correspondants sont dans le § 4.4.5. de l'annexe.

Le classement constaté avec les méthodes de construction précédentes reste inchangé, dans ce groupe le viaduc reste encore une solution économique par rapport à la tranchée couverte superficielle et par rapport au tunnelier:

Coût de Génie Civil	MP 73-2 en MF	MI 84-1 %	MI 84-2 %	MI 84-3 %
Interstation de 800m Viaduc	51, 181	62, 458	68, 267	74, 113
Interstation de 800m TC superficielle TG + eau	106, 323	+137%	+ 134%	+ 132%
Interstation de 800m Tunnelier	143, 995	+207%	+ 218%	+ 236%

En conclusion générale, le classement des coûts de génie civil reste inchangé dans le groupe I et le groupe IV.

Dans le groupe II, le coût du génie civil du système Transville 2 est inférieur de 1, 2 à 2,7% (interstation de 400 m ou de 800 m) au coût de génie civil du VAL 206-1.

Dans le groupe III, le coût de génie civil pour le VAL 206-2 reste le moins cher pour une largeur de viaduc de 6, 10 m et une charge de 94 tonnes en C.E.; le coût du génie civil du tramway devient inférieur par rapport aux systèmes VAL 256-3 et 4, MP 73-1 et MAG 2: en effet les largeurs de viaduc et les charges prises en compte sont respectivement de 6, 50 m et 195 tonnes en C.E. pour le Tram 3, de 7, 10 m et 92 et 123 tonnes en C.E. pour le VAL 256-3 et 4, 7, 00 m et 176 tonnes en C.E. pour le MP 73-1, et enfin 7, 60 m et 160 tonnes en C.E. pour le MAG 2.

**En conclusion générale,** les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil du viaduc dans chacun des groupes sont:

Groupe	Système	Capacité pas./h/sens
I	SK 1	4000
I	SK 2	6000
II	Trans 2	12 744
III	VAL 206-2	19 200
III	Tram 3	20 880
III	VAL 256-4	22 080
III	MP 73-1	23 400
IV	MP 73-2	28 160
IV	MI 84-2	51 600
IV	MI 84-3	77 400





#### 4.5 Comparaison des coûts de génie civil à la place offerte par chacun des systèmes.

##### 4.5.1 - Tranchée couverte - niveau superficiel

longueur entraxe = 800 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte STATION + CADRE			
		TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	3 840	18 493	11 788	17 376	12 586
SK2	6 000	12 603	8 033	11 747	8 501
TRANSVILLE1	5 832	17 921	11 734	16 598	12 391
TRANSVILLE2	12 744	8 463	5 587	7 801	5 886
VAL 206 (1)	9 600	10 271	6 915	9 696	7 474
VAL 206 (2)	19 200	5 295	3 607	4 993	3 882
VAL 256 (1)	5 520	19 660	12 930	18 225	13 904
VAL 256 (2)	11 040	9 990	6 610	9 256	7 088
VAL 256 (3)	16 560	6 767	4 497	6 254	4 810
VAL 256 (4)	22 080	5 150	3 436	4 753	3 670
MAGGALY 1	10 560	10 617	7 077	9 895	7 623
MAGGALY 2	21 120	5 544	3 731	5 138	3 996
TRAMWAY 1	6 960	15 350	10 198	14 362	10 743
TRAMWAY 2	13 920	7 911	5 298	7 351	5 567
TRAMWAY 3	20 880	5 690	3 808	5 220	3 990
MP 73 (1)	23 400	4 913	3 293	4 544	3 458
MP 73 (2)	28 160	4 150	2 794	3 833	2 928
MI 84 (1)	25 800	6 810	4 129	5 740	4 319
MI 84 (2)	51 600	3 748	2 305	3 100	2 394
MI 84 (3)	77 400	2 728	1 655	2 222	1 707

longueur entraxe = 400 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte STATION + CADRE			
		TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	3 840	10 170	6 704	9 480	7 107
SK2	6 000	6 937	4 573	6 420	4 801
TRANSVILLE1	5 832	9 814	6 555	8 991	6 877
TRANSVILLE2	12 744	4 753	3 217	4 320	3 363
VAL 206 (1)	9 600	5 612	3 861	5 242	4 128
VAL 206 (2)	19 200	2 966	2 080	2 766	2 209
VAL 256 (1)	5 520	10 523	7 053	9 688	7 527
VAL 256 (2)	11 040	5 421	3 671	4 987	3 899
VAL 256 (3)	16 560	3 721	2 538	3 408	2 684
VAL 256 (4)	22 080	2 866	1 966	2 619	2 076
MAGGALY 1	10 560	5 837	3 971	5 376	4 233
MAGGALY 2	21 120	3 154	2 178	2 879	2 301
TRAMWAY 1	6 960	8 322	5 640	7 684	5 904
TRAMWAY 2	13 920	4 396	3 019	4 012	3 148
TRAMWAY 3	20 880	3 347	2 289	2 994	2 377
MP 73 (1)	23 400	2 810	1 936	2 554	2 015
MP 73 (2)	28 160	2 403	1 666	2 179	1 729
MI 84 (1)	25 800	3 919	2 432	3 223	2 520
MI 84 (2)	51 600	2 302	1 456	1 842	1 495
MI 84 (3)	77 400	1 765	1 089	1 383	1 108

Les coûts de génie civil des tableaux précédents sont ramenés à la place offerte, ce qui permet d'affiner dans chacun des groupes la position du système en fonction de son coût de génie civil à la place.

### Groupe I

Système	SK1	SK2	Transville 1	VAL 256-1
Capacité pas/h/sens	3 840	6000	5832	5520
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m				
T C + eau	18 500	12 600	17 900	19 700
Interstation de 400m				
T C + eau	10 200	6 900	9 800	10 500

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au système SK1 dans la catégorie inférieure à 4000 pas./h/sens et au système SK2 dans la catégorie inférieure à 6000 pas./h/sens.

### Groupe II

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	9 600	6960	12 744	11 040	13 920	10 560
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TC + eau	10 300	15 400	8 500	10 000	7 900	10 600
Interstation de 400m						
T C + eau	5 600	8 300	4 800	5 400	4 400	5 800

Si on retient une capacité de 7000 pas/h/sens dans ce groupe II, le coût de génie civil à la place offerte d'une interstation de 800 m pour chacun des systèmes devient:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TC + eau	14 100	15 400	15 400	15 800	15 700	16 000

Si on retenait une capacité de 13 000 pas./h/sens, le coût de génie civil à la place offerte baisse mais seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 sont alors en charge normale:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000
Coût G.C / place en Frcs Interstation de 800m TC + eau	7 600	8 200	8 300	8 500	8 500	8 300

Dans ce groupe, la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale choisie à 7000 pas./h/sens correspond au VAL 206-1 suivie du Tram1, Trans 2, Tram 2, VAL 256-2 et MAG1 mais tous les systèmes sauf le Tram 1 sont en sous capacité.

Jusqu'à 13 000 pas./h/sens c'est le coût à la place du VAL 206-1 qui est le mieux placé suivie de celui du VAL 206-2 (7 820 F/place pour 13 000 pas/h/sens) et non le coût des autres systèmes du Groupe II.

### Groupe III

Système	VAL 206-2	VAL 256-3	256-4	MP 73-1	MAG 2	Tram 3
Capacité pas/h/sens	19 200	16 560	22 080	23 400	21 120	20 880
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m TC + eau	5 300	6 800	5 200	5 000	5 600	5 700
Interstation de 400m T C + eau	3 000	3 700	2 900	2 800	3 200	3 400

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au VAL 206-2 suivi de VAL 256-4; en effet pour une capacité de 19 200 pas./h/sens la place dans le système VAL 256-4 reviendrait à 5 922 F et à 5 988 F pour le MP 73-1.

### Groupe IV

Système	MP 73-2	MI 84-1	MI 84-2	MI 84-3
Capacité pas/h/sens	28 160	25 800	51 600	77 400
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m TC + eau	4 200	6 800	3 800	2 700
Interstation de 400m T C + eau	2 400	3 900	2 300	1 800

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale correspond au système MP 73-2 suivi des systèmes MI 84-2 et MI 84-3: en effet pour une capacité de 28 160 pas./h/sens la place dans le système MI 84-2 reviendrait à 6 868 F (interstation de 800 m et TC + eau), la place dans le système MI 84-3 reviendrait à 7 498 F.

Si on trace la courbe (cf. annexe §4.5.1) Coût du génie civil à la place offerte en fonction de la capacité offerte par les différents systèmes des 4 groupes définis précédemment sur une interstation (1 station + X ml d'ouvrage en ligne = 800 ml), on note:

- **Pour une offre de capacité inférieure à 6 000 pas./h/sens (Groupe I)**, les coûts de génie civil sont élevés, ils se situent entre 19 700 F/place pour le VAL 256-1 et 12 600 F/place pour le SK2: pour une capacité de 6 000 pas./h/sens c'est le coût du génie civil du SK2 par place offerte qui est le moins élevé.

- **Pour une offre de capacité qui se situe entre 6 000 et 15 000 pas./h/sens (Groupe II)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 8463 F/place pour le Trans 2 (12 750 pas./h/sens) et 15 350 F/place pour le Tram 1 (6 960 pas./h/sens):

Dans ce groupe II, jusqu'à une offre de 9 600 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du VAL 206-1 qui est le moins élevé.

Jusqu'à une offre de 12 750 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du Trans 2. (7977 F/place pour le VAL 206-2 contre 8 463 pour le Trans 2).

Jusqu'à une offre de 13 920 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du Tram 2. (7 303 F/place pour le VAL 206-2 contre 7 911 F/place pour le Tram 2).

- **Pour une offre de capacité qui se situe entre 15 000 et 25 000 pas./h/sens (Groupe III)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 5 150 F/place pour le système VAL 256-4 (22 080 pas./h/sens) et 6 767 F/place pour le système VAL 256-3 (16 560 pas./h/sens):

Dans ce groupe III, jusqu'à une offre de 16 560 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du VAL 256-3.

Jusqu'à une offre 19 200 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 206-2 qui est le moins élevé

Jusqu'à une offre de 20 880 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 256-4 qui est le moins élevé et non celui du Tram 3.

Jusqu'à une offre de 22 080 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du Val 256-4 qui est le moins élevé.

Jusqu'à une offre de 23 400 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-1 qui est le moins élevé.

- **Pour une offre de capacité qui se situe au dessus de 25 000 pas./h/sens (Groupe IV)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 2 728 F/place pour le système MI 84-3 (77 400 pas./h/sens) et 6 810 F/place pour le système MI 84-1 (25 800 pas./h/sens):

Jusqu'à une offre de 25 800 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-2 qui est le moins élevé et non celui du MI 84-1.

Jusqu'à une offre de 28 160 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-2 qui est le moins élevé.

Pour une offre supérieure il n'y a que le système MI 84-2 et 3 qui sont dimensionnés pour une telle capacité respectivement de 51 600 et 77 400 pas./h/sens, le coût du génie civil à la place baisse d'autant.

**En conclusion générale,** dans le cas de la Tranchée couverte - niveau superficiel la comparaison des coûts de génie civil à la place offerte permet de confirmer les résultats précédents, à savoir: le coût de génie civil le moins élevé, à capacité égale correspond aux systèmes suivants:

- Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens  
SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.
- Groupe II VAL 206-1 jusqu'à une capacité de 9 600 pas./h/sens  
VAL 206-2 au dessus d'une capacité de 9 600 pas./h/sens
- Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens  
VAL 256-4 jusqu'à une capacité de 22 080 pas./h/sens  
MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas/h/sens.
- Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens  
MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.

#### 4.5.2 Tranchée couverte - niveau profond

longueur entraxe = 800 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte STATION + CADRE			
		TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	3 840	29 821	24 769	32 850	25 391
SK2	6 000	20 303	16 864	22 190	17 138
TRANSVILLE1	5 832	28 814	24 719	31 308	25 047
TRANSVILLE2	12 744	13 408	11 497	14 500	11 654
VAL 206 (1)	9 600	16 438	14 328	18 220	14 858
VAL 206 (2)	19 200	8 349	7 294	9 219	7 540
VAL 256 (1)	5 520	31 234	27 356	34 475	28 371
VAL 256 (2)	11 040	15 746	13 801	17 353	14 302
VAL 256 (3)	16 560	10 586	9 268	11 634	9 594
VAL 256 (4)	22 080	7 999	6 997	8 773	7 244
MAGGALY 1	10 560	16 931	14 804	18 549	15 312
MAGGALY 2	21 120	8 587	7 533	9 385	7 765
TRAMWAY 1	6 960	24 689	21 497	27 122	21 727
TRAMWAY 2	13 920	12 516	10 883	13 660	11 005
TRAMWAY 3	20 880	8 776	7 548	9 463	7 640
MP 73 (1)	23 400	7 672	6 630	8 326	6 713
MP 73 (2)	28 160	6 431	5 557	6 966	5 625
MI 84 (1)	25 800	10 519	8 197	10 413	8 278
MI 84 (2)	51 600	5 512	4 250	5 348	4 297
MI 84 (3)	77 400	3 844	2 875	3 662	2 906

longueur entraxe = 400 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte STATION + CADRE			
		TC + EAU	TC - EAU	TG + EAU	TG - EAU
SK1	3 840	15 831.3	13 279.0	17 287.1	13 610.0
SK2	6 000	10 783.1	9 043.7	11 690.4	9 184.7
TRANSVILLE1	5 832	15 192.2	13 010.9	16 321.5	13 187.9
TRANSVILLE2	12 744	7 174.7	6 139.6	7 641.9	6 227.4
VAL 206 (1)	9 600	8 645.9	7 540.6	9 474.6	7 799.2
VAL 206 (2)	19 200	4 453.3	3 900.3	4 846.3	4 011.1
VAL 256 (1)	5 520	16 233.7	14 203.8	17 757.2	14 704.7
VAL 256 (2)	11 040	8 245.7	7 225.0	8 994.1	7 468.3
VAL 256 (3)	16 560	5 585.7	4 883.9	6 061.9	5 038.9
VAL 256 (4)	22 080	4 249.1	3 709.3	4 593.8	3 827.6
MAGGALY 1	10 560	8 923.7	7 773.4	9 651.7	8 024.4
MAGGALY 2	21 120	4 582.8	4 017.8	4 936.1	4 121.3
TRAMWAY 1	6 960	12 878.9	11 192.0	13 961.4	11 318.6
TRAMWAY 2	13 920	6 610.4	5 731.1	7 079.8	5 800.6
TRAMWAY 3	20 880	4 839.2	4 113.4	5 076.2	4 170.8
MP 73 (1)	23 400	4 138.9	3 561.4	4 404.6	3 610.1
MP 73 (2)	28 160	3 495.1	3 006.9	3 707.8	3 046.4
MI 84 (1)	25 800	5 660.4	4 360.1	5 454.6	4 411.8
MI 84 (2)	51 600	3 082.4	2 331.0	2 869.2	2 364.0
MI 84 (3)	77 400	2 224.7	1 596.3	2 009.2	1 617.6



Les coûts de génie civil des tableaux précédents sont ramenés à la place offerte, ce qui permet d'affiner dans chacun des groupes la position du système en fonction de son coût de génie civil à la place.

### Groupe I

Système	SK1	SK2	Transville 1	VAL 256-1
Capacité pas/h/sens	3 840	6000	5832	5520
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m				
T C + eau	29 800	20 300	28 800	31 200
Interstation de 400m				
T C + eau	15 800	10 800	15 200	16 200

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au système SK1 dans la catégorie inférieure à 4000 pas./h/sens et au système SK2 dans la catégorie inférieure à 6000 pas./h/sens.

### Groupe II

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	9 600	6960	12 744	11 040	13 920	10 560
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TC + eau	16 400	24 700	13 400	15 800	12 500	17 000
Interstation de 400m						
T C + eau	8 700	12 900	7 200	8 300	6 600	8 900

Si on retient une capacité de 7000 pas/h/sens dans ce groupe II, le coût de génie civil à la place offerte d'une interstation de 800 m pour chacun des systèmes devient:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TC + eau	22 600	24 600	24 400	24 800	24 900	25 500

Si on retenait une capacité de 13 000 pas./h/sens, le coût de génie civil à la place offerte baisse mais seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 sont alors en charge normale:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000
Coût G.C / place en Frs						
Interstation de 800m						
TC + eau	12 100	13 200	13 100	13 400	13 400	13 800

Dans ce groupe, la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale choisie à 7000 pas./h/sens correspond au VAL 206-1 suivie du Trans 2, Tram 1, VAL 256-2, Tram 2 et MAG1 mais tous les systèmes sauf le Tram 1 sont en sous capacité.

Lorsque la capacité est de 13 000 pas./h/sens seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 conviennent, mais c'est le coût à la place du système VAL 206-2 qui est le moins élevé (12 330 F/place) contre 13 143F/place pour le Trans 2 et 13 401 pour le Tram 2.

### Groupe III

Système	VAL 206-2	VAL 256-3	256-4	MP 73-1	MAG 2	Tram 3
Capacité pas/h/sens	19 200	16 560	22 080	23 400	21 120	20 880
Coût G.C / place en Francs						
Interstation de 800m						
TC + eau	8 300	10 600	8 000	7 700	8 600	8 800
Interstation de 400 m						
T C + eau	4 500	5 600	4 200	4 100	4 600	4 800

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au VAL 206-2 suivi de VAL 256-4: en effet pour une capacité de 19 200 pas./h/sens la place dans le système VAL 256-4 reviendrait à 9 199 F et à 9 350 F pour le MP 73-1.

## Groupe IV

Système	MP 73-2	MI 84-1	MI 84-2	MI 84-3
Capacité pas/h/sens	28 160	25 800	51 600	77 400
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m TC + eau	6 400	10 500	5 500	3 800
Interstation de 400m T C + eau	3 500	5 700	3 100	2 200

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale correspond au système MP 73-2 suivi des systèmes MI 84-2 et MI 84-3; en effet pour une capacité de 28 160 pas./h/sens la place dans le système MI 84-2 reviendrait à 10 100 F (interstation de 800 m et TC + eau), la place dans le système MI 84-3 reviendrait à 10 565 F.

**En conclusion générale**, dans le cas de la Tranchée couverte - niveau profond la comparaison des coûts de génie civil à la place offerte permet de confirmer les résultats précédents, à savoir: le coût de génie civil le moins élevé, à capacité égale correspond aux systèmes suivants:

Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens

SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.

Groupe II VAL 206-1 jusqu'à une capacité de 9 600 pas./h/sens

VAL 206-2 au dessus de 9 600 pas./h/sens.

Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens

VAL 256-4 jusqu'à une capacité de 22 080 pas./h/sens

MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas./h/sens

Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens

MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.

### 4.5.3 - Tunnelier

longueur entraxe = 800 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte
SK1	3 840	25 112
SK2	6 000	17 650
TRANSVILLE1	5 832	21 954
TRANSVILLE2	12 744	10 722
VAL 206 (1)	9 600	14 347
VAL 206 (2)	19 200	7 686
VAL 256 (1)	5 520	27 355
VAL 256 (2)	11 040	14 127
VAL 256 (3)	16 560	9 778
VAL 256 (4)	22 080	7 626
MAGGALY 1	10 560	16 965
MAGGALY 2	21 120	9 310
TRAMWAY 1	6 960	23 220
TRAMWAY 2	13 920	12 858
TRAMWAY 3	20 880	9 284
MP 73 (1)	23 400	8 329
MP 73 (2)	28 160	7 279
MI 84 (1)	25 800	10 636
MI 84 (2)	51 600	7 137
MI 84 (3)	77 400	5 977

longueur entraxe = 400 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte
SK1	3 840	20 424
SK2	6 000	14 383
TRANSVILLE1	5 832	17 976
TRANSVILLE2	12 744	8 902
VAL 206 (1)	9 600	11 680
VAL 206 (2)	19 200	6 353
VAL 256 (1)	5 520	21 993
VAL 256 (2)	11 040	11 446
VAL 256 (3)	16 560	7 991
VAL 256 (4)	22 080	6 286
MAGGALY 1	10 560	13 783
MAGGALY 2	21 120	7 719
TRAMWAY 1	6 960	19 140
TRAMWAY 2	13 920	10 818
TRAMWAY 3	20 880	7 924
MP 73 (1)	23 400	7 201
MP 73 (2)	28 160	6 342
MI 84 (1)	25 800	9 271
MI 84 (2)	51 600	6 454
MI 84 (3)	77 400	5 522

Les coûts de génie civil des tableaux précédents sont ramenés à la place offerte, ce qui permet d'affiner dans chacun des groupes la position du système en fonction de son coût de génie civil à la place.

### Groupe I

Système	SK1	SK2	Transville 1	VAL 256-1
Capacité pas/h/sens	3 840	6000	5832	5520
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m				
T G + eau	25 100	17 700	22 000	27 400
Interstation de 400m				
T G + eau	20 400	14 400	18 000	22 000

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au système SK1 dans la catégorie inférieure à 4000 pas./h/sens et au système SK2 dans la catégorie inférieure à 6000 pas./h/sens.

### Groupe II

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	9 600	6960	12 744	11 040	13 920	10 560
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TG + eau	14 350	23 200	10 700	14 100	12 900	17 000
Interstation de 400m						
T G + eau	11 700	19 100	8 900	11 400	10 800	13 800

Si on retient une capacité de 7000 pas/h/sens dans ce groupe II, le coût de génie civil à la place offerte d'une interstation de 800 m pour chacun des systèmes devient:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TG + eau	19 700	23 100	19 500	22 300	25 600	25 600

Si on retenait une capacité de 13 000 pas./h/sens, le coût de génie civil à la place offerte baisse mais seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 sont alors en charge normale:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000
Coût G.C / place en Frs Interstation de 800m						
TG + eau	10 600	12 400	10 500	12 000	13 800	13 800

Dans ce groupe, la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale choisie à 7000 pas./h/sens correspond au Trans 2 suivie du Val 1, VAL 256-2, Tram 1, Tram 2 et MAG1 mais tous les systèmes sauf le Tram 1 sont en sous capacité.

Lorsque la capacité est de 13 000 pas./h/sens seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 conviennent, c'est le coût à la place du système Trans 2 qui est le moins élevé.

### Groupe III

Système	VAL 206-2	VAL 256-3	256-4	MP 73-1	MAG 2	Tram 3
Capacité pas/h/sens	19 200	16 560	22 080	23 400	21 120	20 880
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m						
TG + eau	7 700	9 800	7 600	8 300	9 300	9 300
Interstation de 400 m						
T G + eau	6 400	8 000	6 300	7 200	7 700	7 900

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au VAL 206-2 suivi du VAL 256-4: en effet pour une capacité de 19 200 pas./h/sens la place dans le système VAL 256-4 reviendrait à 8 769 F et à 10 150 F pour le MP 73-1 pour une interstation de 800 m.

### Groupe IV

Système	MP 73-2	MI 84-1	MI 84-2	MI 84-3
Capacité pas/h/sens	28 160	25 800	51 600	77 400
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m				
TG + eau	7 300	10 600	7 100	6 000
Interstation de 400m				
T G + eau	6 300	9 300	6 500	5 500

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale correspond au système MP 73-2 suivi des systèmes MI 84-2 et MI 84-3: en effet pour une capacité de 28 160 pas./h/sens la place dans le système MI 84-2 reviendrait à 13 077 F (interstation de 800 m et TG + eau), la place dans le système MI 84-3 reviendrait à 16 428 F.

Si on trace la courbe (cf. § 4.5.3 en annexe) Coût du génie civil à la place offerte en fonction de la capacité offerte par les différents systèmes des 4 groupes définis précédemment sur une interstation (1 station + X ml d'ouvrage en ligne = 800 ml), on note:

- **Pour une offre de capacité inférieure à 6 000 pas./h/sens (Groupe I)**, les coûts de génie civil sont élevés, ils se situent entre 27 355 F/place pour le VAL 256-1 et 17 649 F/place pour le SK2: pour une capacité de 6 000 pas./h/sens c'est le coût du génie civil du SK2 par place offerte qui est le moins élevé.

- **Pour une offre de capacité qui se situe entre 6 000 et 15 000 pas./h/sens (Groupe II)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 23 220 F/place pour le Tram 1 (6 960 pas/h/sens) et 10 722 F/place pour le Trans 2 (12 744 pas./h/sens):

Dans ce groupe II, jusqu'à une offre de 9 600 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du Trans 2 qui est le moins élevé et non celui du VAL 206-1.

Jusqu'à une offre de 12 750 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du Trans 2 qui est le moins élevé. (10 722 F/place contre 11 580 F/place pour le VAL 206-2.

Jusqu'à une offre de 13 920 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du Tram 2. (10 601 F/place pour le VAL 206-2 contre 12 858 F/place pour le Tram 2).

- **Pour une offre de capacité qui se situe entre 15 000 et 25 000 pas./h/sens (Groupe III)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 8 329 F/place pour le système MP 73-1 (23 400 pas./h/sens) et 9 778 F/place pour le système VAL 256-3 (16 560 pas./h/sens):

Dans ce groupe III, jusqu'à une offre de 16 560 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du VAL 256-3.

Jusqu'à une offre 19 200 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 206-2 qui est le moins élevé

Jusqu'à une offre de 20 880 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 256-4 qui est le moins élevé.

Jusqu'à une offre de 22 080 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du Val 256-4 qui est le moins élevé.

Jusqu'à une offre de 23 400 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-1 qui est le moins élevé.

- **Pour une offre de capacité qui se situe au dessus de 25 000 pas./h/sens (Groupe IV)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 5 977 F/place pour le système MI 84-3 (77 400 pas./h/sens) et 10 636 F/place pour le système MI 84-1 (25 800 pas./h/sens):

Jusqu'à une offre de 25 800 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-2 qui est le moins élevé et non celui du MI 84-1.

Jusqu'à une offre de 28 160 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-2 qui est le moins élevé.

Pour une offre supérieure il n'y a que le système MI 84-2 et 3 qui sont dimensionnés pour une telle capacité respectivement de 51 600 et 77 400 pas./h/sens, le coût du génie civil à la place baisse d'autant.



**En conclusion générale**, dans le cas de la Tunnel profond la comparaison des coûts de génie civil à la place offerte permet de confirmer les résultats précédents, à savoir: le coût de génie civil le moins élevé, à capacité égale correspond aux systèmes suivants:

- Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens  
SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.
- Groupe II Trans 2 jusqu'à une capacité de 12 750 pas./h/sens  
Val 206-2 au dessus de 12 750 pas./h/sens.
- Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens  
VAL 256-4 jusqu'à une capacite de 22080 pas./h/sens  
MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas./h/sens
- Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens  
MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.

#### 4.5.4 - Viaduc

longueur entraxe = 800 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte
SK1	3 840	8 314
SK2	6 000	5 784
TRANSVILLE1	5 832	6 824
TRANSVILLE2	12 744	3 218
VAL 206 (1)	9 600	4 388
VAL 206 (2)	19 200	2 251
VAL 256 (1)	5 520	8 518
VAL 256 (2)	11 040	4 321
VAL 256 (3)	16 560	2 917
VAL 256 (4)	22 080	2 217
MAGGALY 1	10 560	4 926
MAGGALY 2	21 120	2 549
TRAMWAY 1	6 960	6 434
TRAMWAY 2	13 920	3 277
TRAMWAY 3	20 880	2 225
MP 73 (1)	23 400	2 160
MP 73 (2)	28 160	1 818
MI 84 (1)	25 800	2 421
MI 84 (2)	51 600	1 323
MI 84 (3)	77 400	958

longueur entraxe = 400 m

TRANSPORTS	CAPACITE MAXI ( v/h/sens )	COUT en F/place offerte
SK1	3 840	4512
SK2	6 000	3118
TRANSVILLE1	5 832	3696
TRANSVILLE2	12 744	1787
VAL 206 (1)	9 600	2401
VAL 206 (2)	19 200	1257
VAL 256 (1)	5 520	4554
VAL 256 (2)	11 040	2339
VAL 256 (3)	16 560	1596
VAL 256 (4)	22 080	1226
MAGGALY 1	10 560	2721
MAGGALY 2	21 120	1447
TRAMWAY 1	6 960	3532
TRAMWAY 2	13 920	1826
TRAMWAY 3	20 880	1258
MP 73 (1)	23 400	1237
MP 73 (2)	28 160	1050
MI 84 (1)	25 800	1399
MI 84 (2)	51 600	812
MI 84 (3)	77 400	617

Les coûts de génie civil des tableaux précédents sont ramenés à la place offerte, ce qui permet d'affiner dans chacun des groupes la position du système en fonction de son coût de génie civil à la place.

### Groupe I

Système	SK1	SK2	Transville 1	VAL 256-1
Capacité pas/h/sens	3 840	6000	5832	5520
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m	8 300	5 800	6 800	8 500
Interstation de 400m	4 500	3 100	3 700	4 600

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au système SK1 dans la catégorie inférieure à 4000 pas./h/sens et au système SK2 dans la catégorie inférieure à 6000 pas./h/sens.

### Groupe II

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	9 600	6960	12 744	11 040	13 920	10 560
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m	4 400	6 400	3 200	4 300	3 300	4 900
Interstation de 400m	2 400	3 500	1 800	2 300	1 800	2 700

Si on retient une capacité de 7000 pas/h/sens dans ce groupe II, le coût de génie civil à la place offerte d'une interstation de 800 m pour chacun des systèmes devient:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	7000	7000	7000	7000	7000	7000
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m	6 000	6 400	5 900	6 800	6 500	7 400

Si on retenait une capacité de 13 000 pas./h/sens, le coût de génie civil à la place offerte baisse mais seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 sont alors en charge normale:

Système	VAL 206-1	Tram 1	Trans 2	VAL 256-2	Tram 2	MAG 1
Capacité pas/h/sens	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000
Coût G.C / place en Frs Interstation de 800m	3 200	3 400	3 200	3 700	3 500	4 000

Dans ce groupe, la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale choisie à 7000 pas./h/sens correspond au Trans 2 suivie du VAL 206-1, Tram 1, Tram 2, VAL 256-2 et MAG1 mais tous les systèmes sauf le Tram 1 sont en sous capacité.

Lorsque la capacité est de 13 000 pas./h/sens seul les systèmes Trans 2 et Tram 2 conviennent, c'est le coût à la place du système Trans 2 qui est le moins élevé.

Au delà de cette capacité c'est le coût de génie civil du VAL 206-2 qui reste le moins élevé.

### Groupe III

Système	VAL 206-2	VAL 256-3	256-4	MP 73-1	MAG 2	Tram 3
Capacité pas/h/sens	19 200	16 560	22 080	23 400	21 120	20 880
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m	2 300	2 900	2 200	2 200	2 500	2 200
Interstation de 400 m	1 300	1 600	1 200	1 200	1 400	1 300

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil correspond au VAL 206-2 suivi de Tram 3: en effet pour une capacité de 19 200 pas./h/sens la place pour le Tram 3 reviendrait à 2 419 F pour le système VAL 256-4 à 2 549 F et pour le MP 73-1 à 2 632 F pour une interstation de 800 m.

### Groupe IV

Système	MP 73-2	MI 84-1	MI 84-2	MI 84-3
Capacité pas/h/sens	28 160	25 800	51 600	77 400
Coût G.C / place en Francs Interstation de 800m	2 200	2 400	1 300	1 000
Interstation de 400m	1 100	1 400	800	600

Dans ce groupe la place la moins chère en coût de génie civil à capacité égale correspond au système MP 73-2 suivi des systèmes MI 84-2 et MI 84-3: en effet pour une capacité de 28 160 pas./h/sens la place dans le système MI 84-2 reviendrait à 2 424 F(interstation de 800 m), la place dans le système MI 84-3 reviendrait à 2 633 F.

Si on trace la courbe (cf.§ 4.5.4. en annexe) Coût du génie civil à la place offerte en fonction de la capacité offerte par les différents systèmes des 4 groupes définis précédemment sur une interstation (1 station + X ml d'ouvrage en ligne = 800 ml), on note:

- **Pour une offre de capacité inférieure à 6 000 pas./h/sens (Groupe I)**, les coûts de génie civil sont élevés, ils se situent entre 8 518 F/place pour le VAL 256-1 et 5 784 F/place pour le SK2: pour une capacité de 6 000 pas./h/sens c'est le coût du génie civil du SK2 par place offerte qui est le moins élevé.

- **Pour une offre de capacité qui se situe entre 6 000 et 15 000 pas./h/sens (Groupe II)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 6 434 F/place pour le Tram 1 ( 6 960 pas/h/sens) et 3 218 F/place pour le Trans 2 (12 744 pas./h/sens):

Dans ce groupe II, jusqu'à une offre de 9 600 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du Trans 2 qui est le moins élevé et non celui du VAL 206-1.

Jusqu'à une offre de 12 750 pas./h/sens c'est le coût de génie civil du Trans 2 qui est le moins élevé.(3 218 F/place contre 3 391 F/place pour le VAL 206-2.

Jusqu'à une offre de 13 920 pas/h/sens c'est le coût de génie civil du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du Tram 2. (3 105 F/place pour le VAL 206-2 contre 3 277 F/place pour le Tram 2).

- **Pour une offre de capacité qui se situe entre 15 000 et 25 000 pas./h/sens (Groupe III)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 2 160 F/place pour le système MP 73-1(23 400pas./h/sens) et 2 917 F/place pour le système VAL 256-3 (16 560 pas./h/sens):

Dans ce groupe III, jusqu'à une offre de 16 560 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 206-2 qui est le moins élevé et non celui du VAL 256-3.

Jusqu'à une offre 19 200 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du VAL 206-2 qui est le moins élevé

Jusqu'à une offre de 20 880 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du Tram 3 qui est le moins élevé .

Jusqu'à une offre de 22 080 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du Val 256-4 qui est le moins élevé.

Jusqu'à une offre de 23 400 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-1 qui est le moins élevé.

- **Pour une offre de capacité qui se situe au dessus de 25 000 pas./h/sens (Groupe IV)**, les coûts de génie civil à la place offerte se situent entre 958 F/place pour le système MI 84-3 (77 400 pas./h/sens) et 2 421 F/place pour le système MI 84-1 (25 800 pas./h/sens):

Jusqu'à une offre de 25 800 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-2 qui est le moins élevé et non celui du MI 84-1.

Jusqu'à une offre de 28 160 pas./h/sens c'est le coût du génie civil à la place du MP 73-2 qui est le moins élevé.

Pour une offre supérieure il n'y a que le système MI 84-2 et 3 qui sont dimensionnés pour une telle capacité respectivement de 51 600 et 77 400 pas./h/sens, le coût du génie civil à la place baisse d'autant.

**En conclusion générale**, dans le cas du Viaduc la comparaison des coûts de génie civil à la place offerte permet de confirmer les résultats précédents, à savoir: le coût de génie civil le moins élevé, à capacité égale correspond aux systèmes suivants:

- Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens  
SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.
- Groupe II Trans 2 jusqu'à une capacité de 12 750 pas./h/sens  
VAL 206-2 au dessus de 12 750 pas./h/sens
- Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens  
Tram 3 jusqu'à une capacité de 20 880 pas./h/sens  
VAL 256-4 jusqu'à une capacité de 22 080 pas./h/sens  
MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas./h/sens
- Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens  
MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.





## 5- Conclusions

### 5.1 Les limites de la comparaison

1. La capacité unitaire des véhicules et des rames en charge normale et l'intervalle acceptable pour exploiter chaque système permettent de définir la capacité horaire maximum à prendre en compte pour la comparaison des coûts de génie civil. Or cet intervalle varie selon le niveau d'automatisation du système, des caractéristiques de la voie, des longueurs d'interstations, des longueurs des véhicules: tous les systèmes retenus sont pour le niveau de capacité indiqué en site propre intégral.

Dans le groupe I les paramètres retenus pour définir la capacité sont, par exemple,

Groupe I	SK2 6000	Transville 1	VAL 256-1
Capacité nominale d'1 véhicule en places	25	162	92
Intervalle en sec.	15	100	60
Capacité horaire	6000	5832	5520

On note sur ce tableau que l'intervalle varie de 1 à 7 suivant les systèmes ce qui donne donc des niveaux de service très différents.

Par ailleurs, le fait de retenir l'intervalle le plus faible optimise la capacité du système et son classement dans les 4 groupes de systèmes, ce qui réduit en proportion le coût à la place du génie civil du système:

- ainsi dans le cas du Transville 1 si l'intervalle est réduit à 60 secondes, la capacité horaire peut être portée à 9 720 pas./h/sens ce qui positionne ce système dans le groupe II où son coût de génie civil se positionne selon le tableau ci-après:

a/ en tranchée superficielle pour une interstation de 800 m dans un terrain granulaire + eau

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Trans 1 %	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
T G + eau	93, 082	+ 3, 9	+ 7, 4	+ 6, 8	+ 9, 8	+ 9, 9	+ 12, 3

b/ tunnelier pour une interstation de 800 m

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Trans 1 %	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
T G + eau	137, 73	- 7, 5	+ 17, 3	- 0, 8%	+ 13, 2	+ 29, 9	+ 30

c/ viaduc pour une interstation de 800 m

Coût de Génie Civil	VAL 206-1 en MF	Trans 1 %	Tram 1 %	Trans 2 %	VAL 256-2 %	Tram 2 %	MAG 1 %
	42, 128	- 5, 9	+ 6, 3	- 2, 7	+ 13, 2	+ 8, 3	+ 23, 4

De la même façon on peut faire le calcul pour le Transville 2: une diminution de l'intervalle à 60 secondes situerait ce système dans le groupe III, la capacité horaire étant portée à 21 240 pas./h/sens. Le coût du génie civil du système Transville 2 se positionne selon les méthodes de construction suivant le tableau ci-après:

a/ en tranchée superficielle pour une interstation de 800 m

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-2	Trans 2 %	VAL 256-3 %	256-4 %	MP 73-1 %	MAG 2 %	Tram 3 %
T G + eau	95, 872	+3, 7	+ 8	+ 9, 5	+ 10, 9	+ 13, 2	+ 13, 7

b/ tunnelier pour une interstation de 800 m

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-2	Trans 2 %	VAL 256-3 %	256-4 %	MP 73-1 %	MAG 2 %	Tram 3 %
T G + eau	147, 568	- 8	+ 9, 7	+ 14, 1	+ 32, 08	+ 33, 2	+ 31, 4

c/ viaduc pour une interstation de 800 m

Coût en MF Génie Civil	VAL 206-2	Trans 2 %	VAL 256-3 %	256-4 %	MP 73-1 %	MAG 2 %	Tram 3 %
	43, 222	- 5, 3	+ 11, 7	+ 13, 2	+ 16, 9	+ 24, 5	+ 7, 4

On note que les caractéristiques géométriques des systèmes VAL-1 et VAL-2 sont favorables au coût du génie civil effectué selon la tranchée couverte superficielle (hauteur plus faible), tandis que les caractéristiques géométriques des systèmes Transville 1 et Transville 2 sont favorables au coût de génie civil réalisé selon les méthodes de construction au tunnelier et viaduc (largeur plus faible).

- dans le cas du tramway, si l'intervalle est augmenté à 180 secondes ce qui est plus proche d'une exploitation classique d'un métro léger qui parcourt des tronçons en site protégé au sol, le tramway traversant des carrefours à niveaux régulés mais tributaires de conflits avec la circulation générale, la capacité des systèmes Tram1, Tram2 et Tram3 devient alors:

- Tram 1: 3 480 pas./h/sens, il entre alors dans le groupe I

- Tram 2: 6 960 pas./h/sens, il entre alors dans le groupe II

- Tram 3: 10 440 pas./h/sens, il entre alors dans le groupe II.

Le coût du génie civil de ce système augmente nettement par rapport à celui des systèmes de transport de capacité équivalente dans le même groupe soit pour une interstation de 800 m dans un terrain granulaire avec de l'eau en tranchée superficielle:

Groupe I	SK 1	Tram 1	Ecart en %
Coût en MF	66, 723	99, 960	+ 49, 8

Groupe II	VAL 206-1	Tram 2	Tram 3
Coût en MF	93, 08	102, 32	108, 98
Ecart en %		+ 9, 9	+ 17

2. Les caractéristiques géométriques des ouvrages sont liées au gabarit des véhicules qui circulent dans ces ouvrages mais aussi aux règles concernant les gabarits statiques et dynamiques et au type d'évacuation retenu en cas d'incident pour les usagers.

Ainsi pour les systèmes SK 1 et SK 2 une évacuation centrale de 0, 70 m et une lame d'air de 0, 30 m le long de chaque piedroit de l'ouvrage sont retenus soit 1, 30 m à ajouter au gabarit statique des véhicules.

- Pour les systèmes Transville 1 et 2, l'évacuation se fait sur la voie, une lame d'air de 0, 50 m entre 2 véhicules qui se croisent et une lame d'air de 0, 30 m le long de chaque piedroit sont retenues soit 1, 10 m à ajouter au gabarit statique des véhicules.

- Ainsi on peut résumer dans le tableau suivant les largeurs prises en compte pour chacun des systèmes étudiés:

Système	SK1	SK 2	Transville	VAL 206	VAL 256	MAG	Tram	MP 73	MI 84
Gabarit en m d'1 véhicule	1,6	1,85	2,35	2,06	2,56	2,9	2,3	2,4	2,8
Largeur évac. Lame d'air	1,3	1,3	1,1	1,9	1,9	1,8	1,9	2,2	3,1
Largeur cadre	4,5	5	5,8	6,1	7,1	7,6	6,5	7	8,7

S'il était possible d'adopter pour chaque système une évacuation par le centre de la voie, la largeur des ouvrages serait réduite d'autant et **un gain substantiel pourrait être obtenu bouleversant le classement des coûts de génie civil des systèmes retenus dans notre étude.**

3. Les hypothèses simplificatrices prises en compte dans la définition des terrains et les dévoiement de réseaux sont aussi une limite à la comparaison.

Chaque projet souterrain en milieu urbain est un cas particulier, le profil en long varie selon les obstacles, les couches de terrain étant plus ou moins favorables aux techniques

retenues, les sondages plus ou moins nombreux permettant ou pas de choisir la meilleure méthode de construction, un certain nombre d'aléas viennent se greffer aux estimations de l'étude d'un projet souterrain.

Néanmoins cette comparaison pour tel ou tel type de terrain avec telle ou telle méthode de construction permet de fixer des fourchettes de coût de génie civil en fonction de la demande de transport et d'aider à la décision en faveur de tel ou tel système, mais il y a bien d'autres aspects qui mènent à cette décision.

## **5.2 Les résultats de la comparaison**

### **5.2.1 Rappel des résultats de l'étude pour chacune des méthodes de construction**

Les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil dans chacun des groupes définis pour une certaine fourchette d'offre de capacité, pour une interstation de 800 mètres avec une station ont été classés à partir du calcul effectué à l'aide du modèle Metros et après comparaison des coûts à capacité égale des systèmes: chaque système ayant un intervalle maximum d'exploitation particulier, un véhicule avec ses propres contraintes géométriques et donc des stations et des ouvrages en ligne adaptés à ces contraintes.

#### **a/ Construction avec la méthode en tranchée couverte superficielle**

Les systèmes les mieux placés en coût de génie civil dans le cas de la méthode tranchée couverte superficielle avec station superficielle sont rappelés ci-après.

La comparaison des coûts de génie civil pour une interstation de 800 mètres, de 400 mètres, et à la place offerte pour chaque système montre par exemple, que le système VAL 206-2 du groupe III a son coût de génie civil inférieur à celui des systèmes du groupe II autres que le système VAL 206-1.

Les résultats de la comparaison sont :

Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens

SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.

Groupe II VAL 206-1 jusqu'à une capacité de 9 600 pas./h/sens

VAL 206-2 au dessus d'une capacité de 9 600 pas./h/sens

Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens

VAL 256-4 jusqu'à une capacité de 22 080 pas./h/sens

MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas/h/sens.

Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens

MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.

#### **b/ Construction avec la méthode tranchée couverte à un niveau profond**

Le classement des systèmes du point de vue du coût de génie civil à capacité égale ne change pas par rapport aux résultats précédents: seul le coût de génie civil pour chacun des systèmes augmente de 40 à 60% par rapport à la tranchée superficielle.

Ce type de construction ne sera utilisé qu'exceptionnellement lorsqu'on doit raccorder un tunnel profond avec un ouvrage superficiel (station ou tranchée superficielle) ou passer sous un réseau de concessionnaire ne pouvant pas être dévié.

#### **c/ Construction avec la méthode au tunnelier**

Les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil pour une interstation de 800 mètres avec une station profonde sont rappelés ci-après.

La comparaison des coûts de génie civil à la place offerte montre que le système VAL 206-2 du groupe III a son coût de génie civil inférieur à celui des systèmes du groupe II autres que le système Transville 2.

Les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil, à capacité égale, dans chacun des groupes sont:

- Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens  
SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.
- Groupe II Trans 2 jusqu'à une capacité de 12 750 pas./h/sens  
Val 206-2 au dessus de 12 750 pas./h/sens.
- Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens  
VAL 256-4 jusqu'à une capacité de 22080 pas./h/sens  
MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas./h/sens
- Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens  
MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.

#### **d/ Construction avec la méthode tunnel traditionnel**

Les résultats obtenus ne peuvent être comparés avec les coûts obtenus précédemment car ils ne donnent que les coûts de l'ouvrage souterrain en ligne entre 2 stations, le modèle ESTIM du CETU ne permettant pas de calculer le coût des stations.

Par ailleurs les terrains retenus sont différents des terrains granulaires ou cohérents choisis pour la comparaison avec les autres méthodes de construction.

Dans ce cas, nous ne comparons les systèmes que **d'après les gabarits des véhicules sans tenir compte des capacités de chacun des systèmes.**

Les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil **en section courante** dans chacun des groupes pour les 3 types de profil retenus sont:

Groupe	Systèmes Profil N°1	Systèmes Profil N°2	Systèmes Profil N°3
I	SK1	SK1	SK1
I	SK2	SK2	SK2
II	VAL 206	VAL 206	VAL 206
II	Transville		
III	VAL 206	VAL 206	VAL 206
III	MP 73	MP 73	VAL 256
III			MP 73
IV	MP 73	MP 73	MP 73
IV	MI 84	MI 84	MI 84

Nota: les systèmes considérés dans chacun des groupes ont leur coût de génie civil inférieur ou égal au coût du système qui le suit immédiatement dans la colonne relative à un profil donné, le N° du groupe rappelle simplement l'offre de capacité du système.

#### **e/ Construction en viaduc**

Les systèmes les mieux placés du point de vue du coût de génie civil dans le cas du viaduc pour chacun des groupes sont rappelés ci-après.

La comparaison des coûts de génie civil à la place offerte montre que le système Val 206-2 du groupe III a son coût de génie civil inférieur à celui des systèmes du groupe II autres que le système Transville 2.

On peut rappeler que les coûts annoncés ne tiennent compte que du gros oeuvre des stations et du viaduc sans pose de la voie qui peut être plus ou moins onéreuse selon les systèmes ( pistes et rails de guidage latéraux fixés sur le tablier pour le VAL, rails sur blochets noyés dans le tablier pour le tramway et le RER, voie en caisson de 1, 30 m d'épaisseur soit posée sur un tablier normal soit faisant partie intégrante du tablier avec les sujétions d'implantation des câbles de précontrainte pour le Transville).

Le coût du viaduc ne comprend donc que la construction du tablier en béton armé ou précontraint selon les portées entre piles, les garde corps, les piles et semelles avec les terrassements, les déviations de réseaux et remises en état correspondantes.

Groupe I: SK1 jusqu'à une capacité de 4000 pas./h/sens

SK2 jusqu'à une capacité de 6000 pas./h/sens.

Groupe II Trans 2 jusqu'à une capacité de 12 750 pas./h/sens

VAL 206-2 au dessus de 12 750 pas./h/sens

Groupe III VAL 206-2 jusqu'à une capacité de 19 200 pas./h/sens

Tram 3 jusqu'à une capacité de 20 880 pas./h/sens

VAL 256-4 jusqu'à une capacité de 22 080 pas./h/sens

MP 73-1 jusqu'à une capacité de 23 400 pas./h/sens

Groupe IV MP 73-2 jusqu'à une capacité de 28 160 pas./h/sens

MI 84-2 jusqu'à une capacité de 51 600 pas./h/sens.

### **5.2.2 Incidence de la variation du gabarit d'un système sur le coût du génie civil**

Cette étude est établie sur les caractéristiques de systèmes existants depuis de nombreuses années, le métro parisien est centenaire, de nombreux réseaux à travers le Monde ont adopté ce système, sur le métro Lyonnais, Lillois, le Tramway de Nantes et Grenoble, le système lourd du réseau express régional Parisien, et d'après 3 systèmes à l'étude ou à l'état de prototype: les systèmes SK1, SK2 et le système Transville. Les caractéristiques géométriques des ouvrages utilisés par ces systèmes sont connues et sont issues d'une longue expérience d'exploitation et de l'utilisation sur le réseau Parisien par exemple, de différents types de matériel roulant ayant chacun un gabarit dynamique différent.

Nous avons donc une panoplie de véhicules dont les gabarits varient de 1, 60 m à 2, 90 m de large, de 2, 90 m à 4, 20 m de hauteur et des longueurs de rame qui varient de 3, 12 m pour le SK1 à 312 m pour le RER .

Selon le type d'évacuation en ligne, centrale ou latérale dans un ouvrage en ligne, selon l'alimentation en énergie électrique par caténaire ou 3<sup>ème</sup> rail, l'adoption de lames d'air entre 2 véhicules et entre un véhicule et le piédroit d'un ouvrage selon le gabarit dynamique des véhicules de chaque système nous avons recueilli les dimensions des ouvrages des systèmes existants ou en cours d'étude: on note que les nouveaux systèmes à l'étude adoptent soit un cheminement d'évacuation en ligne central dont la largeur se confond avec la lame d'air prévue entre 2 véhicules qui se croisent, le gain obtenu sur la largeur d'un ouvrage prévu pour 2 voies pour le système SK1 et pour le SK2 est de 60 cm.

En ce qui concerne le système Transville qui adopte une évacuation directe sur la voie, le gain par rapport aux systèmes classiques avec 2 évacuations latérales est plus important: par rapport au système MAGGALY le gain est de 70 cm, par rapport au VAL 206 et VAL 256 le gain est de 80 cm, par rapport au tramway de Grenoble le gain est de 80 cm, par rapport au métro de Paris le gain est de 110 cm, et dans le cas du RER le gain est de 200 cm.

Ces surdimensionnements entraînent des surcoûts de génie civil non négligeables notamment avec la méthode de construction au tunnelier et en viaduc.

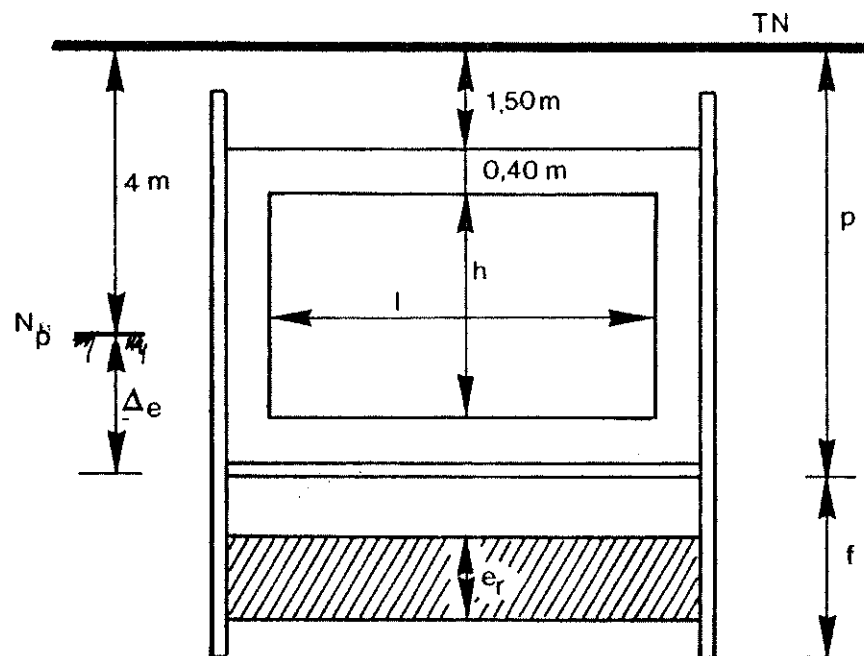
Nous définissons ci-après à partir des différents résultats obtenus dans les chapitres précédents quels sont les surcoûts de génie civil dus aux variations de largeur, de hauteur et de section pour chacune des méthodes constructives.

#### **a/ Méthode de construction en tranchée couverte superficielle**

Si nous traçons les courbes des coûts de construction d'un cadre pour voie double issus des valeurs des systèmes étudiés, en fonction de la progression de la largeur, de la hauteur et de la section, dimensions intérieures de l'ouvrage (cf. courbes du § 5.2.2 a de l'annexe) dans un terrain cohérent avec de l'eau où les coûts de génie civil sont les plus élevés, on note une augmentation linéaire du coût en fonction de l'augmentation de la section: ainsi pour une hauteur intérieure donnée d'un cadre superficiel on note une certaine augmentation du coût de construction en fonction de l'accroissement de la largeur, pour une largeur donnée on note une augmentation plus faible du coût en fonction de l'augmentation de la

hauteur intérieure de l'ouvrage. Mais ces 2 dernières courbes dont les points sont issus de 9 cas différents ou la largeur se situe entre 4,50 m et 8,70 m, la hauteur se situe entre 3,40 m et 6,30 m, ne sont pas directement exploitables pour mesurer l'incidence d'une petite surlargeur à hauteur constante ou inversement une augmentation de hauteur à largeur constante, nous allons donc faire le calcul de l'incidence sur le coût de génie civil d'une tranchée superficielle en fonction des variations de hauteur puis de largeur entre 6,00 m et 7,50 m de largeur de cadre et entre 4,00 m et 5,50 m de hauteur du cadre.

Soit un cadre en tranchée superficielle, en terrain granulaire dans la nappe, nous allons examiner quelle est l'incidence d'une surlargeur de 0,50 m pour un ouvrage de 6,00 m à 7,50 m de large lorsque la hauteur du cadre reste constante égale à 4,00 m par exemple, nous pouvons établir le coût au ml de cet ouvrage selon le détail de calcul dans le tableau ci-après: fixons les paramètres de position de l'ouvrage dans le terrain, la profondeur de fouille  $p$ , la hauteur de fiche  $f$ , la hauteur d'eau par rapport au niveau du radier  $\Delta e$ , l'épaisseur du radier injecté  $e_r$ , le niveau de la nappe phréatique  $N_p$ , selon la figure suivante:



$h = 4 \text{ m}$	$p = 6,50 \text{ m}$	$\Delta e = 2,50 \text{ m}$	$e_r = 2 \text{ m}$	$f = 3 \text{ m}$
largeur	6,00 m	6,50 m	7,00 m	7,50 m
Terrassement	$6,5 \times 7 \times 100 = 4\,550 \text{ F}$	$6,5 \times 7,5 \times 100 = 4\,875 \text{ F}$	$6,5 \times 8 \times 100 = 5\,200 \text{ F}$	$6,5 \times 8,5 \times 100 = 5\,525 \text{ F}$
Remblai	$1,5 \times 7 \times 70 = 735 \text{ F}$	$1,5 \times 7,5 \times 70 = 788 \text{ F}$	$1,5 \times 8 \times 70 = 840 \text{ F}$	$1,5 \times 8,5 \times 70 = 893 \text{ F}$
Soutènements	$2 \times 9,5 \times 2\,000 = 38\,000 \text{ F}$	38 000 F	38 000 F	38 000 F
Radier injecté	$7 \text{ m}^2 \times 1\,200 = 8\,400 \text{ F}$	$7,5 \text{ m}^2 \times 1\,200 = 9\,000 \text{ F}$	$8 \times 1\,200 = 9\,600 \text{ F}$	$8,5 \times 1\,200 = 10\,200 \text{ F}$
Epuisement	$7 \times 2,5 \times 50 = 875 \text{ F}$	$7,5 \times 2,5 \times 50 = 938 \text{ F}$	$8 \times 2,5 \times 50 = 1\,000 \text{ F}$	$8,5 \times 2,5 \times 50 = 1\,063 \text{ F}$



largeur	6, 00 m	6, 50 m	7, 00 m	7, 50 m
Béton, aciers coffrage	$(6, 8+4) \times 2 \times 0, 4$ $\times 2\ 000 =$ 17 280 F	$(7, 3+4) \times 0, 8$ $\times 2\ 000 =$ 18 080 F	$(7, 8+4) \times 0, 8$ $\times 2\ 000 =$ 18 880 F	$(8, 3+4) \times 0, 8$ $\times 2\ 000 =$ 19 680 F
Etanchéité	$(6, 8 + 4, 8) \times 2$ $\times 200 =$ 4 640 F	$(7, 3+4, 8) \times 2$ $\times 200 =$ 4 840 F	$(7, 8+4, 8) \times 2$ $\times 200 =$ 5 040 F	$(8, 3+4, 8) \times 2$ $\times 200 =$ 5 240 F
Divers	4 000 F	4 000 F	4 000 F	4 000 F
Total	78 480 F	80 520 F	82 560 F	84 600 F

La progression du coût de l'ouvrage cadre ci-dessus est de 2, 5 % env. par tranche de 0, 50 m de surlargeur.

Fixons les nouveaux paramètres de position de l'ouvrage dans le terrain,

$h = 4, 5\text{ m}$        $p = 7\text{ m}$        $\Delta e = 3\text{ m}$        $e_r = 2, 5\text{ m}$        $f = 3, 5\text{ m}$

largeur	6, 00 m	6, 50 m	7, 00 m	7, 50 m
Terrassement	$7 \times 7 \times 100 =$ 4 900 F	$7 \times 7, 5 \times 100 =$ 5 250 F	$7 \times 8 \times 100 =$ 5 600 F	$7 \times 8, 5 \times 100 =$ 5 950 F
Remblai	$1, 5 \times 7 \times 70 =$ 735 F	$1, 5 \times 7, 5 \times 70 =$ 788 F	$1, 5 \times 8 \times 70 =$ 840 F	$1, 5 \times 8, 5 \times 70 =$ 893 F
Soutènements	$2 \times 10, 5 \times 2\ 000 =$ 42 000 F	42 000 F	42 000 F	42 000 F
Radier injecté	$7\text{m}^2 \times 1\ 400 =$ 9 800 F	$7, 5\text{m}^2 \times 1\ 400 =$ 10 500 F	$8 \times 1\ 400 =$ 11 200 F	$8, 5 \times 1\ 400 =$ 11 900 F
Epuisement	$7 \times 3 \times 50 =$ 1 050 F	$7, 5 \times 3 \times 50 =$ 1 125 F	$8 \times 3 \times 50 =$ 1 200 F	$8, 5 \times 3 \times 50 =$ 1 275 F
Béton, aciers coffrage	$(6, 8+4, 5) \times 2 \times 0, 4$ $\times 2\ 000 =$ 18 080 F	$(7, 3+4, 5) \times 0, 8$ $\times 2\ 000 =$ 18 880 F	$(7, 8+4, 5) \times 0, 8$ $\times 2\ 000 =$ 19 680 F	$(8, 3+4, 5) \times 0, 8$ $\times 2\ 000 =$ 20 480 F
Etanchéité	$(6, 8 + 5, 3) \times 2$ $\times 200 =$ 4 840 F	$(7, 3+5, 3) \times 2$ $\times 200 =$ 5 040 F	$(7, 8+5, 3) \times 2$ $\times 200 =$ 5 240 F	$(8, 3+5, 3) \times 2$ $\times 200 =$ 5 440 F
Divers	4 000 F	4 000 F	4 000 F	4 000 F
Total	85 405 F	87 583 F	89 760 F	91 938 F

La progression du coût de l'ouvrage cadre ci-dessus est de 2, 5 % env. par tranche de 0, 50 m de surlargeur.

Par contre la progression du coût de l'ouvrage pour une augmentation de hauteur de 0, 50 m est de 8, 8 % env. pour chacune des largeurs du tableau ci-dessus.

Fixons les nouveaux paramètres de position de l'ouvrage dans le terrain,

	$h = 5 \text{ m}$	$p = 7,50 \text{ m}$	$\Delta e = 3,5 \text{ m}$	$e_r = 2,5 \text{ m}$	$f = 4 \text{ m}$
largeur		6,00 m	6,50 m	7,00 m	7,50 m
Terrassement		5 250 F	5 625 F	6 000 F	6 375 F
Remblai		735 F	788 F	840 F	893 F
Soutènements		46 000 F	46 000 F	46 000 F	46 000 F
Radier injecté		10 500 F	11 250 F	12 000 F	12 750 F
Epuisement		1 225 F	1 313 F	1 400 F	1 488 F
Béton, ac., cof.		18 880 F	19 680 F	20 480 F	21 280 F
Etanchéité		5 040 F	5 240 F	5 440 F	5 640 F
Divers		4 000 F	4 000 F	4 000 F	4 000 F
Total		91 630 F	93 896 F	96 160 F	98 426 F

La progression du coût de l'ouvrage cadre ci-dessus est de 2,4 % env. par tranche de 0,50 m de surlargeur.

Par contre la progression du coût de l'ouvrage pour une augmentation de hauteur de 0,50 m est de 7,2 % env. pour chacune des largeurs du tableau ci-dessus.

Fixons les nouveaux paramètres de position de l'ouvrage dans le terrain,

	$h = 5,5 \text{ m}$	$p = 8 \text{ m}$	$\Delta e = 4 \text{ m}$	$e_r = 2,5 \text{ m}$	$f = 4,5 \text{ m}$
largeur		6,00 m	6,50 m	7,00 m	7,50 m
Terrassement		5 600 F	6 000 F	6 400 F	6 800 F
Remblai		735 F	788 F	840 F	893 F
Soutènements		50 000 F	50 000 F	50 000 F	50 000 F
Radier injecté		11 200 F	12 000 F	12 800 F	13 600 F
Epuisement		1 400 F	1 500 F	1 600 F	1 700 F
Béton, ac., cof.		19 680 F	20 480 F	21 280 F	22 080 F
Etanchéité		5 240 F	5 440 F	5 640 F	5 840 F
Divers		4 000 F	4 000 F	4 000 F	4 000 F
Total		97 855 F	100 208 F	102 560 F	104 913 F

La progression du coût de l'ouvrage cadre ci-dessus est de 2,3 % env. par tranche de 0,50 m de surlargeur.

Par contre la progression du coût de l'ouvrage pour une augmentation de hauteur de 0,50 m est de 6,7 % env. pour chacune des largeurs du tableau ci-dessus.

**En résumé,** le coût de l'ouvrage augmente de 2, 5 % par tranche de 0, 50 m entre une largeur d'ouvrage de 6, 00 m à 7, 50 m pour une hauteur constante de 4, 00 m.

Pour une hauteur constante fixée à  $h = 4, 50$  m l'accroissement de coût devient 2, 5 % par tranche de 0, 50 m pour les mêmes largeurs d'ouvrage, pour  $h = 5, 00$  m l'accroissement de coût devient 2, 4 %, pour  $h = 5, 50$  m l'accroissement de coût devient 2, 3 % : il y a une diminution sensible de la progression de coût avec une surlargeur de 0, 50 m lorsque le produit  $h \times l$  devient plus grand.

Le coût de l'ouvrage augmente 8, 8 % pour un accroissement de la hauteur intérieure de 0, 50 m entre  $h = 4, 00$  m et  $h = 4, 50$  m, de 7, 2 % entre  $h = 4, 50$  m et  $h = 5, 00$  m, de 6, 7 % entre  $h = 5, 00$  m et  $h = 5, 50$  m.

Comme précédemment il y a une diminution sensible de la progression du coût, on passe de 8, 8 % à 6, 7 % pour des augmentations de hauteur de 0, 50 m, lorsque le coût représenté par le produit  $l \times h$  devient plus grand.

En définitive on trouve qu'un accroissement de hauteur de 0, 50 m est 3 à 3, 5 fois plus cher qu'une surlargeur de 0, 50 m dans un ouvrage réalisé selon la méthode en tranchée couverte superficielle dans un terrain cohérent dans la nappe phréatique.

La courbe du coût en fonction de la section du cadre (cf annexe § 5.2.2.a) montre que le coût augmente en fonction de la section de l'ouvrage, mais cette courbe n'est pas directement exploitable pour les faibles écarts de section car pour une même section de cadre le coût le plus bas correspond à la hauteur la plus faible à section égale.

Si on trace les courbes coût de l'ouvrage au ml en fonction de la section pour chacune des hauteurs  $h = 4, 00$  m,  $h = 4, 50$  m,  $h = 5, 00$  m,  $h = 5, 50$  m on constate que l'on a 4 courbes en progression linéaire du coût en fonction de la section, ces courbes se superposent sur le diagramme, la courbe supérieure (coût en ordonnée fonction de la section) correspond à la hauteur intérieure d'ouvrage la plus forte (cf annexe § 5.2.2.a).

**En résumé, dans la méthode en tranchée couverte superficielle** nous constatons une progression des coûts en fonction de la section des ouvrages l'une des dimensions étant constante : à section égale c'est l'ouvrage qui a la hauteur la plus faible qui doit avoir son coût le moins élevé, en effet une surlargeur de 0, 50 m d'ouvrage à hauteur constante entraîne un surcoût de l'ordre de 2, 5 %, une augmentation de hauteur de 0, 50 m à largeur constante entraîne un surcoût de l'ordre de 7 à 9 % dans la gamme des dimensions des ouvrages étudiés ici.

#### **b/ Méthode de construction en tranchée couverte profonde**

Comme nous l'avons dit dans le chapitre 4.4.2. les coûts de génie civil augmentent pour une tranchée couverte réalisée à un niveau profond dans un terrain (cohérent + eau) en relation avec la hauteur des parois à réaliser ce qui se traduit sur les 3 courbes jointes en annexe § 5.2.2.b identiques à celles obtenues pour la méthode superficielle seule l'ordonnée représentant le coût de construction change puisque le coût augmente de l'ordre de 70 %.

#### **c/ Méthode de construction au tunnelier**

Si nous traçons la courbe jointe en annexe § 5.2.2.c du coût de construction d'un ouvrage en ligne (hors station) en fonction du diamètre intérieur de chaque tunnel adapté aux gabarits des différents systèmes étudiés nous constatons une augmentation linéaire du coût en fonction de l'augmentation du diamètre intérieur. Cette courbe est complétée par les coûts de bitube étudiés dans le chapitre 4.4.4 dont les diamètres sont de 3, 90 m (v.u. SK1), 4, 30 m (v.u. Transville), 4, 65 m (v.u. VAL 206) et 5, 30 m (v.u. MAGGALY); les coûts respectifs en section courante calculée d'après le tableau 4.4.4.3 pour un linéaire de 1000 mètres sont 73 500 kF, 79 000 kF, 89 000 kF, 99 000 kF.

v.u. = voie unique.

Variation du diamètre à partir de 4 m tous les 0, 50 m	Variation du coût pour 0, 5 m du diamètre du tunnel en kF	Coût de 1000ml pour le diamètre correspondant en kF	Variation en %
pour 4, 00 m		75 000	
de 4, 00 à 4, 50 m	10	85 000	13, 3
de 4, 50 à 5, 00 m	7, 5	92 500	8, 8
de 5, 00 à 5, 50 m	8	100 000	8, 7
de 5, 50 à 6, 00 m	9	109 000	9
de 6, 00 à 6, 50 m	11	120 000	10, 1
de 6, 50 à 7, 00 m	10	130 000	8, 3
de 7, 00 à 7, 50 m	10	140 000	7, 1
de 7, 50 à 8, 00 m	7	147 000	5
de 8, 00 à 8, 50	13	160 000	8, 8

Nous constatons sur le tableau ci-dessus que la progression est assez homogène, l'augmentation la plus forte correspond aux diamètres les moins grands; ainsi pour une augmentation de diamètre située entre 4, 00 m et 5, 00 m la variation du coût est de 23,3 %, entre 5, 50 m et 6, 50 m de 20 %, entre 6, 50 m et 7, 50 m de 16, 7 %, entre 7, 50 m et 8, 50 m de 14, 3 %, l'augmentation la plus faible étant pour un diamètre situé entre 7, 00 m et 8, 00 m, elle est de 13 %.

Si on trace la courbe en annexe au § 5.2.2. c du coût de construction au m<sup>2</sup> de section en fonction du diamètre intérieur on note une baisse linéaire du coût au m<sup>2</sup> en fonction de l'augmentation du diamètre: ainsi une variation de la section pour un tunnel de diamètre supérieur à 8, 00 m sera moins sensible sur le coût du tunnel qu'une même variation de la section sur un tunnel de diamètre de l'ordre de 5, 50 m: d'après le tableau ci-dessus le coût d'une variation de 1m<sup>2</sup> dans un tunnel de 5, 10 m de diamètre est égal au coût d'une variation de 1, 64 m<sup>2</sup> dans un tunnel de 8, 00 m de diamètre.

#### **d/ Méthode de construction en tunnel traditionnel**

Si nous traçons les courbes jointes en annexe au § 5.2.2. d du coût d'un tunnel traditionnel en section courante (hors station) en fonction des sections intrados nécessaires à chacun des systèmes étudiés nous constatons une progression linéaire du coût en fonction de la section.

**Pour le profil N°1** réalisé dans un terrain de la classe R2, roches très résistantes nous obtenons:

Section intrados de tunnel en m <sup>2</sup>	Variation du coût pour 1 section de 5 m <sup>2</sup> de tunnel en F/ml	Coût de 1ml de tunnel pour la section correspondante en F	Variation en %
20		26 000	
25	4 000	30 000	15, 4
30	5 000	35 000	16, 7
35	4 200	39 200	12
40	1 800	41 000	4, 6
45	2 500	43 500	6, 1
50	6 500	50 000	14, 9
55	2 500	52 500	5
60	2 500	55 000	4, 8
65	2 500	57 500	4, 5
70	2 500	60 000	4, 3
75	2 500	62 500	4, 2

Nous constatons sur ce tableau qu'il y a une progression homogène du coût en fonction de l'augmentation de section, néanmoins de 20 à 35 m<sup>2</sup> (sections compatibles avec SK1, SK2, Transville et VAL 206) l'augmentation de coût du tunnel est de l'ordre de 15 % par tranche de 5 m<sup>2</sup>.

Au dessus de 35 m<sup>2</sup> de section l'augmentation n'est plus que de 5 % par tranches de 5 m<sup>2</sup> avec une exception de 15 % d'augmentation entre 45 et 50 m<sup>2</sup> puis une baisse en dessous de 5 % par tranche de 5 m<sup>2</sup> jusqu'à 75 m<sup>2</sup>.

Pour le profil N° 3 réalisé dans un terrain de la classe R6, roches peu résistantes, nous obtenons:

Section intrados de tunnel en m <sup>2</sup>	Variation du coût pour 1 section de 5 m <sup>2</sup> de tunnel en F/ml	Coût de 1ml de tunnel pour la section correspondante en F	Variation en %
20		92 500	
25	9 500	102 000	10, 3
30	11 000	113 000	10, 8
35	12 000	125 000	10, 6
40	15 000	140 000	12
45	10 000	150 000	7, 1

Section intrados de tunnel en m <sup>2</sup>	Variation du coût pour 1 section de 5 m <sup>2</sup> de tunnel en F/ml	Coût de 1ml de tunnel pour la section correspondante en F	Variation en %
50	17 500	167 500	11, 7
55	6 500	174 000	3, 8
60	6 000	180 000	3, 5
65	7 500	187 500	4, 2
70	5 000	192 500	2, 7
75	2 500	195 000	1, 3

Sur ce tableau nous constatons une progression homogène du coût en fonction de la section, de 20 à 50 m<sup>2</sup> l'augmentation du coût est de l'ordre de 10 % par tranche de 5 m<sup>2</sup> d'augmentation de section. Au delà d'une section de 50 m<sup>2</sup> l'augmentation n'est plus que de l'ordre de 4 % par tranche de 5 m<sup>2</sup>, pour les 2 dernières tranches l'augmentation n'est plus que de 2, 7 et 1, 3 %.

Un même profil ne se rencontre que sur quelques dizaines de mètres et on doit donc constamment adapter la méthode de soutènement au terrain rencontré ce qui est une difficulté importante pour estimé le coût global d'un projet de tunnel en traditionnel sur plusieurs km.

#### e/ Méthode de construction en viaduc

Si nous traçons la courbe du coût d'un viaduc en fonction de la largeur du tablier, courbe en annexe § 5.2.2.e pour un ouvrage en ligne de 1000 mètres (hors station) à partir des résultats du chapitre 4.4.6. pour les différents systèmes étudiés en voie double auxquels on ajoute les résultats obtenus dans l'étude VULCAIN (annexe 3 chapitre VI: solutions aériennes p. 47) pour le viaduc voie unique pour 3 systèmes: le VAL 206, le VAL 256, MAGGALY dont on joint les principaux résultats :

VAL 206:

- Largeur du tablier pour voie unique: 3, 10 m
- Coût de l'ouvrage : 9000 F/m<sup>2</sup>
- Dévoiement des réseaux: 5000 F/ml de viaduc
- Coût du viaduc voie unique en 3, 10 m de large: 32 900 F/ml

VAL 256:

- Largeur du tablier pour voie unique: 3, 60 m
- Coût de l'ouvrage: 9000 F/m<sup>2</sup>
- Dévoiement de réseaux: 5000 F/ml de viaduc
- Coût du viaduc voie unique en 3, 60 m de large: 37 400 F/ml

MAGGALY:

- Largeur du tablier pour voie unique: 3, 90 m
- Coût de l'ouvrage: 9000 F/m<sup>2</sup>
- Dévoiement de réseaux: 5000 F/ml de viaduc
- Coût du viaduc voie unique en 3, 90 m de large: 40 100 F/ml

- Pour une largeur de tablier comprise entre 4, 00 m et 5, 00 m le coût du viaduc est de l'ordre de 8 000 F/m<sup>2</sup>

- Pour une largeur de tablier supérieure à 5,00 m le coût du viaduc est de l'ordre de 7000 F/m<sup>2</sup>

- Le dévoiement des réseaux au ml de viaduc revient à 5 000 F/ml

Ces différents prix ont permis d'établir les coûts de viaduc pour les différents systèmes étudiés (§ 4.3 pages 49 à 51) et les courbes en annexe § 5.2.2.e

Variation de la largeur du tablier à partir de 3 m tous les 0,50 m	Variation du coût pour 0,5 m de largeur de viaduc en kF	Coût de 1000ml pour la largeur correspondante en kF	Variation en %
l = 3,00 m		32 000	
l = 3,50 m	4 500	36 500	14
l = 4,00 m	500	41 000	12,3
l = 4,50 m	2 250	43 250	5,5
l = 5,00 m	1 750	45 000	4
l = 5,50 m	1 250	46 250	2,7
l = 6,00 m	750	47 000	1,6
l = 6,50 m	3 500	50 500	7,4
l = 7,00 m	3 500	54 000	6,9
l = 7,50 m	3 500	57 500	6,5
l = 8,00 m	3 500	61 000	6,1
l = 8,50 m	3 500	64 500	5,7

Ce tableau montre que les surlargeurs de tablier n'ont pas la même incidence de coût lorsque la largeur de l'ouvrage se situe :

- entre 3,00 m et 4,00 mètres de largeur de tablier, une surlargeur de 0,50 m entraîne une augmentation de coût du viaduc de 12 à 14 %.
- entre 4,00 m et 5,00 mètres de largeur de tablier, une surlargeur de 0,50 m entraîne une augmentation de coût du viaduc de 4 à 5,5 %.
- entre 5,00 m et 6,00 m de largeur de tablier, une surlargeur de 0,50 m entraîne une augmentation de coût du viaduc de 1,6 à 2,7 %.
- entre 6,00 m et 7,00 m de largeur de tablier, une surlargeur de 0,50 m entraîne une augmentation de coût du viaduc de 6,9 à 7,4 %.
- entre 7,00 m et 8,50 m de largeur de tablier, une surlargeur de tablier de 0,50 m entraîne une augmentation de coût du viaduc de 5,7 % à 6,5 %.

On remarque ainsi qu'une surlargeur de tablier a une forte incidence (12 à 14 %) sur le coût du viaduc lorsque la largeur du tablier est inférieure à 4,00 mètres, entre 4,00 et 6,00 m l'incidence sur le coût est la plus faible (de 2 à 6 %).

Entre 6,00 m et 8,50 m l'incidence sur le coût se situe entre 5,7 à 7,4 %, l'incidence la plus faible correspondant au tablier le plus large.

Si on trace la courbe en annexe au § 5.2.2. e du coût de construction au  $m^2$  de surface de viaduc, on note une baisse linéaire du coût au  $m^2$  en fonction de l'augmentation de la largeur du tablier du viaduc: pour une largeur de tablier située entre 3, 00 m et 4, 00 m le coût au  $m^2$  baisse de 10 650 F à 10 200 F (4, 4 %), pour une largeur située entre 4, 00 m et 6, 00 m le coût au  $m^2$  baisse de 10 200 F à 7 800 F (30,7%), pour une largeur située entre 6, 00 m et 8, 50 m le coût au  $m^2$  baisse de 7 800 F à 7 600 F (2, 6%).

La baisse la plus importante du coût au  $m^2$  se situe entre 4, 00 m et 6, 00 m de largeur de tablier c'est dans cette fourchette de dimensions de viaduc qu'une surlargeur aura le moins d'incidence sur le coût de construction du viaduc.

Nota: il ne faut pas sous-estimer l'incidence de la hauteur du véhicule sur un viaduc car les efforts dûs au vent peuvent être importants, ces efforts sont repris par la voie et le viaduc et peuvent éventuellement être diminués par un imposant garde corps qui a son poids propre et son coût.

#### **f/ Construction des stations**

Les différents gabarits des véhicules ont une incidence sur les sections des ouvrages en ligne mais aussi sur la largeur des stations. Mais c'est la longueur des véhicules ou rames qui devient primordiale pour le dimensionnement des stations dont la longueur et la largeur des quais. Le coût d'une station est directement lié au volume excavé nécessaire à la réalisation de cette station, on a donc intérêt pour limiter le coût du génie civil à augmenter la fréquence de passage des rames pour une offre horaire de capacité égale au lieu de proposer un intervalle double avec des rames de 2 véhicules par exemple.

Nous joignons en annexe § 5.5.2.f un tableau rappelant les volumes intérieurs des stations pour chacun des systèmes et le coût de construction de la station superficielle et la station très profonde correspondante: la profondeur d'une station profonde est égale à 2 x le diamètre du tunnel qui débouche dans la station.

Si on trace la courbe ( cf. annexe § 5.5.2.f) du coût unitaire d'une station superficielle en fonction du volume intérieur de la station ( les volumes sont obtenus à partir des données de la p.38) on constate une progression linéaire des coûts en fonction des volumes:

de 2 500  $m^3$  à 3 500  $m^3$  l'augmentation de coût est de 19, 8 %

de 3 500  $m^3$  à 4 500  $m^3$  l'augmentation de coût est de 25, 2 %

de 5 000  $m^3$  à 6 000  $m^3$  l'augmentation de coût est de 15 %

de 6 000  $m^3$  à 7 000  $m^3$  l'augmentation de coût est de 22, 6 %

de 7 000  $m^3$  à 8 000  $m^3$  l'augmentation de coût est de 11, 4 %

de 8 000  $m^3$  à 9 000  $m^3$  l'augmentation de coût est de 8, 2 %

de 9 000  $m^3$  à 10 000  $m^3$  l'augmentation de coût est de 9, 4 %

L' augmentation de coût de construction est plus forte pour les variations de volume situées au dessous de 7 000  $m^3$  ( de 15 à 25 % d'augmentation par tranche de 1000  $m^3$  ).

Au dessus de 7 000  $m^3$  et jusqu'à 17 000  $m^3$ , les variations de coût se situent en dessous de 11 % pour diminuer jusqu'à 6 % pour des volumes supérieurs à 15 000  $m^3$ .



Si on trace la courbe ( cf. annexe § 5.5.2.f) du coût unitaire d'une station profonde en fonction du volume intérieur de la station on constate une progression linéaire des coûts en fonction des volumes:

de 5 000 m<sup>3</sup> à 10 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 86, 9 %

de 10 000 m<sup>3</sup> à 15 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 46, 5 %

de 15 000 m<sup>3</sup> à 20 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 31, 7 %

de 20 000 m<sup>3</sup> à 25 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 31, 3 %

de 25 000 m<sup>3</sup> à 30 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 49, 5 %

de 30 000 m<sup>3</sup> à 35 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 21, 2 %

de 35 000 m<sup>3</sup> à 40 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 10 %

de 40 000 m<sup>3</sup> à 60 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 50 %

de 60 000 m<sup>3</sup> à 80 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 42, 4 %

de 80 000 m<sup>3</sup> à 100 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 19, 1 %

de 100 000 m<sup>3</sup> à 120 000 m<sup>3</sup> l'augmentation de coût est de 21, 4 %

L' augmentation de coût de construction est plus forte pour les variations de volume situées en dessous de 20 000 m<sup>3</sup> (de 30 à 86 %),

- Au dessus de 20 000 m<sup>3</sup> jusqu'à 30 000 m<sup>3</sup> (de 50 à 30 %)

- puis au dessus de 30 000 m<sup>3</sup>, les variations de coût diminuent progressivement de 21 % à 6 % par tranches de 5000 m<sup>3</sup>.

Les stations profondes dont le volume intérieur est inférieur à 20 000 m<sup>3</sup> intéressent les systèmes des groupes I et II, c'est donc les variations de longueur de quai, de hauteur de station, de profondeur de station par rapport au niveau du terrain naturel, de largeur de quai et de station des systèmes du groupe I et II qui entraîneront des variations de coût plus importantes que pour les systèmes des groupes III et IV.

Le coût des stations ne dépend pas uniquement du volume excavé mais des quantités de béton mises en oeuvre, du mode de soutènement, des surfaces d'étanchéité, de la forme de la station, ceci explique que les courbes commentées ci dessus ne soient pas parfaitement linéaires.

De la même manière on constate que le coût des stations aériennes augmente avec la progression des dimensions de la station. Nous joignons en annexe § 5.2.2.f la courbe du coût d'une station aérienne en fonction de sa surface.

Cette courbe montre que la progression des coûts est forte jusqu'à 1600 m<sup>2</sup> de surface c'est à dire pour les systèmes des groupes I, II et en partie III, cette augmentation est de 60 % de 700 à 1 200 m<sup>2</sup> et de 32 % de 1 650 à 2 150 m<sup>2</sup>.

### 5.3 Conclusion générale

Nous constatons tout au long de cette étude que de nombreux paramètres influent sur le coût de construction de stations et d'ouvrages en ligne adaptés à l'exploitation de système de transport urbain en site propre intégral.

Ces paramètres sont d'abord les dimensions des véhicules, leur poids, le nombre d'essieux, la capacité unitaire et la capacité offerte avec un intervalle fixé qui est lui même lié à la longueur des rames, à la cinématique des véhicules et au niveau d'automatisation de l'exploitation.

On trouve ensuite les méthodes de construction qui doivent s'adapter à l'environnement urbain et à la géologie du sol.

Pour chaque méthode nous avons noté que le type de terrain, le niveau de la nappe phréatique, les dimensions des ouvrages, leur niveau de profondeur ont une influence sur le coût final de l'ouvrage.

Tout d'abord nous évoquons la méthode de **construction en viaduc** qui est le procédé le moins onéreux, de 108 % à 142 % moins cher pour une interstation de 800 m que la même interstation réalisée en tranchée couverte superficielle dans un terrain granulaire avec de l'eau et de 193 % à 236 % moins cher pour la même interstation réalisée au tunnelier dans le même terrain.

Pour ce procédé, les variations de gabarit de véhicule ont une moindre incidence sur le coût du viaduc lorsque son tablier a une largeur comprise entre 4, 00 m et 6, 00 m. En dessous de 4, 00 m de largeur toute variation de largeur a une incidence importante sur le coût de l'ouvrage, il est intéressant alors d'optimiser le gabarit du véhicule et l'utilisation de l'espace sur le viaduc en améliorant l'implantation des équipements sur la voie, notamment en positionnant l'évacuation des usagers dans l'entre-voie ou directement sur chacune des voies.

Mais le viaduc est de moins en moins accepté sur les sites très urbanisés et notamment dans les centres historiques, les Responsables de la cité décident alors d'enterrer leur système de transport.

Nous avons décrit 5 méthodes de construction regroupées en 3 types de construction permettant d'enterrer le tracé d'un axe lourd de transport:

- la tranchée couverte superficielle et profonde,
- le tunnel réalisé au tunnelier ou en méthode traditionnelle,
- le tunnel réalisé en monotube ou en bitube.

La **méthode de construction en tranchée superficielle** est la méthode la moins onéreuse jusqu'à un certain linéaire de travaux au delà c'est la méthode au tunnelier qui devient intéressante.

Cette méthode comporte de nombreux inconvénients dont la phase de chantier en surface avec le dévoiement des réseaux et la construction qui entraînent des désagréments toujours de moins en moins bien vécus par les riverains, pouvant entraîner des changements radicaux quant au bien fondé de la décision sur le choix du système.

Nous avons constaté une progression des coûts en fonction de la section des ouvrages l'une des dimensions étant constante: à section égale c'est l'ouvrage qui a la hauteur la plus faible qui doit avoir son coût le moins élevé, en effet une sur largeur de 0, 50 m d'ouvrage à hauteur constante entraîne un surcoût de l'ordre de 2, 5 % , une augmentation de hauteur de

0, 50 m à largeur constante entraîne un surcoût de l'ordre de 7 à 9 % dans la gamme des dimensions des ouvrages adoptés pour les 9 véhicules retenus ici.

**La méthode de construction en tranchée couverte profonde** est très onéreuse et ne peut donc être utilisée que pour des ouvrages spéciaux, ouvrages de jonction entre un tronçon en tunnel et un tronçon en tranchée superficielle, un tronçon en tunnel et une station superficielle à quai central ou à quais latéraux, pour passer sous un obstacle avec un changement de profil en long.

Le coût de ce type de construction augmente de l'ordre de 70 % par rapport au coût de la tranchée superficielle avec les mêmes contraintes géotechniques et géométriques.

**La méthode de construction au tunnelier** est plus coûteuse à première vue que la méthode de construction en tranchée superficielle: on a calculé dans le chapitre 4.4.3 pour certaines conditions (coût de dévoiement de réseaux important, par exemple) l'intérêt d'utiliser le tunnelier au delà d'une certaine distance ce qui permet l'amortissement du coût important du tunnelier. Ces distances varient selon la section du tunnelier entre 1000 et 3000 m minimum, distances au delà desquelles les travaux en tranchée superficielle deviennent plus coûteux et sont de toute façon une contrainte de plusieurs mois pour l'activité économique de la cité.

Les travaux au tunnelier nécessitent une préparation de chantier beaucoup plus spécialisée quant'à la connaissance du sous-sol, à la planification de la réalisation des puits et des stations de façon à éviter au maximum les temps d'arrêt du tunnelier, le coût du tunnel étant directement lié à sa vitesse d'avancement.

Le coût du tunnel est lié à la vitesse d'avancement du tunnelier c'est à dire au type de terrain rencontré, mais aussi à la section du tunnel définie par les différents systèmes de transport. Nous avons noté une progression linéaire du coût avec l'augmentation de section, mais une progression moins rapide des coûts pour les tunnels de grande section: une augmentation du diamètre de 1 mètre entre 4,00 m et 5,00 m (+ 7 m<sup>2</sup>) donne une élévation du coût de 23,3 % soit 3,3 % par m<sup>2</sup> de plus, la même augmentation de diamètre entre 7,00 m et 8,00 m (+ 11,8 m<sup>2</sup>) donne une élévation de coût de 13 % soit 1,1 % par m<sup>2</sup> de plus.

Les variations de section dans un tunnel de 4,00 à 5,00 m de diamètre sont 3 fois plus onéreuses que les mêmes variations dans un tunnel de 7,00 m à 8,00 m de diamètre: ceci doit inciter les concepteurs à optimiser les gabarits des matériels et équipements quel que soit le diamètre du tunnel, mais le gain sur le coût global du tunnel sera d'autant plus significatif que le diamètre du tunnel est proche de 4,00 mètres.

**La méthode de construction traditionnelle** est réservée aux terrains très résistants, les coûts obtenus ne peuvent être comparés avec ceux obtenus au tunnelier, le tunnelier étant utilisé dans des terrains de moins bonne qualité dans la nappe phréatique.

On note une progression linéaire des coûts en fonction de la section excavée. Comme pour la méthode au tunnelier l'augmentation des coûts est plus rapide pour des sections de 20 à 35 m<sup>2</sup> (15 % d'augmentation du coût par tranche de 5 m<sup>2</sup>) que pour des sections situées entre 50 et 75 m<sup>2</sup> (5 % d'augmentation par tranche de 5 m<sup>2</sup>).

**L'évaluation entre un procédé de construction en monotube ou en bitube avec la méthode de construction au tunnelier** permet de dire que la solution bitube peut s'avérer intéressante sous certaines conditions: le creusement d'un tunnel induit des tassements qui ont une incidence sur l'environnement, ces tassements sont plus importants avec le monotube qu'avec un bitube, lequel permet de remonter le profil en long général du tracé y compris des stations.

Malgré les surcoûts induits sur les stations, les puits, les terminus et les communications de voie intermédiaires nous constatons dans le chapitre 4.4.4 que la solution bitube peut être de

3, 4 à 16 % moins chère que la solution monotube pour une interstation de 1000 m comportant une station.

En fait, c'est au cas par cas que l'on peut évaluer les avantages de chacune des deux solutions, c'est aussi la remise de l'offre de l'entreprise qui peut faire pencher vers l'une des 2 solutions en fonction de son parc de matériel et de son savoir faire pour la réalisation du tunnel dans un terrain plus ou moins bien connu, de la proposition de planning de creusement s'insérant dans le planning général de l'opération et des surcoûts induits sur les stations et les différents ouvrages en ligne.

Pour mémoire, nous rappelons qu'avec la **méthode traditionnelle** (cf chapitre 4.4.5) le choix entre un tunnel monotube ou bitube ne se pose pas puisque le coût du bitube est de l'ordre de 35 % plus cher que le monotube, le coût étant lié directement au linéaire de cintres et surfaces de revêtement à mettre en place: la construction d'un bitube ne peut être qu'exceptionnelle pour des raisons de géologie, de planning de financement,...etc.

**En définitive**, cette étude a permis en premier lieu de rappeler les principales caractéristiques géométriques, de charge des matériels roulants, de capacité unitaire et d'exploitation de la plupart des différents systèmes de transport urbain en exploitation ou à l'étude en France ainsi que les caractéristiques des ouvrages souterrains et aériens adoptés pour l'exploitation de ces systèmes.

A partir de 9 types de véhicules qui sont distribués en 20 systèmes différents nous avons évalué le coût du génie civil correspondant à une interstation de 800 m et 400 m pour les différentes méthodes de construction en souterrain et en aérien dans 7 types de terrain.

Nous avons effectué un classement de ces systèmes en fonction des coûts de génie civil à capacité équivalente mesurée à partir de la capacité unitaire en charge normale avec un intervalle d'exploitation maximum possible avec un niveau de signalisation plus ou moins sophistiqué.

Les résultats de l'étude nous montrent que ces coûts sont étroitement liés aux quantités de terrassements et de structures mises en oeuvre et donc aux sections des ouvrages à réaliser mais aussi à la qualité des terrains sur lesquels ces ouvrages se font.

Nous constatons ainsi que tous les systèmes étudiés ne sont pas optimisés du point de vue de leur insertion dans les ouvrages souterrains ou en viaduc, il existe par exemple 2 cheminements latéraux d'évacuation dans les métros de Paris, de Lyon, de Lille, tandis que les nouveaux systèmes SK adoptent l'évacuation centrale entre les voies, le système Transville adopte l'évacuation directe sur la voie.

Si les extensions des systèmes actuels ou les futurs systèmes adoptaient une optimisation de l'utilisation de l'espace avec l'implantation des équipements de voie et des cheminements d'évacuation on pourrait réduire les dimensions des ouvrages: une réduction en largeur d'un ouvrage cadre de 0,70 à 1,10 mètre entraîne une économie de 4 à 7 % selon la géométrie du cadre sur le coût initial de l'ouvrage en section courante hors station.

De la même manière si les nouveaux systèmes adoptaient le plancher bas ou l'alimentation en énergie par 3<sup>ème</sup> rail pour le tramway par exemple, un abaissement de la hauteur de 0,70 m entraînerait une économie de 10 à 13 % sur le coût initial de l'ouvrage.

Ainsi à partir des 400 coûts d'interstations établis dans cette étude, les 140 coûts d'ouvrage au mètre linéaire hors station, les 200 coûts unitaires de station pour les 20 systèmes dont le gabarit varie entre 1,60 m et 2,90 m de large, entre 2,80 et 4,20 m de hauteur, 3,12 m et 312 mètres de long, nous avons quadrillé l'évaluation du point de vue coût de génie civil de ces systèmes: cette étude comporte le bordereau des prix unitaires utilisés par le modèle METROS valeur Janvier 1992.

A partir des courbes donnant l'évolution des coûts en fonction des paramètres géométriques nous serions en mesure d'établir le coût sommaire d'un ouvrage dans un terrain ayant les mêmes caractéristiques géotechniques que celles de l'étude: néanmoins chaque ouvrage en ligne ayant ses propres caractéristiques de terrain, de niveau de la nappe phréatique, de géométrie, chaque station ayant ses caractéristiques géométriques en fonction du système mais aussi de l'environnement, on devra réutiliser le modèle METROS ou similaire pour établir le coût des ouvrages correspondants à un nouveau système.

Cette étude nous rappelle aussi qu'il est important de bien dimensionner les ouvrages en fonction du trafic existant et à venir et donc de faire des études de trafic, des enquêtes ménages, de démographie, d'emplois, d'avoir un Plan directeur de l'agglomération à long terme...etc avant de dimensionner et évaluer le futur système de transport dont le génie civil devra durer quelques dizaines d'années.

La fréquentation d'un métro étant variable, augmentant généralement au cours des ans, on doit prévoir la possibilité d'accroître l'offre de transport en utilisant les possibilités du système, réduction de l'intervalle, allongement des rames et donc prévoir le gros oeuvre des stations dès le début pour minimiser les coûts globaux de génie civil de l'opération Métro.

Donc si on est amené à choisir un système parmi d'autres, en fonction d'une offre de capacité nécessaire aujourd'hui et d'une autre offre dans plusieurs années, et du coût de génie civil on ne doit pas perdre de vue l'aspect souplesse d'exploitation de tel ou tel système qui devra permettre d'absorber si possible sans modification du génie civil toute demande supplémentaire.



## BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- Etude VULCAIN par l'INRETS-CRESTA: G. Uster, F. Kühn, J. Rodriguez, avec la collaboration de METRAM: Mme C. Martinet, MM P. Marx, J. Berbudeau, A. Brenier, et V. Gascon, Février 1992.

- Coût des divers types d'infrastructures de transports ferroviaires en zones urbaine et suburbaine: bilan des principales réalisations françaises au cours de la décennie 1970-1980, par J.P. Godard Journées Internationales AFTES: la recherche d'économies dans les travaux en souterrain, Nice 10-14 mai 1981.

- Construction des Métros: établissement des projets par M. Bigey, F. Guittoneau, M. Vanel, J. Veinberg, Ed. RATP 1973.

- Physique du sol pour l'aménagement, par R. Gras Ed. Masson 1988.

- Dimensions optimales du matériel de Métropolitain, par M. Bigey dans le Forum des Transports Publics 1973.

- Cost-Benefit Methods for underground urban public transportation systems by ITA working group on costs-benefits of underground urban transportation ( Dr F. Blennemann of STUVA Köln and J.P. Godard de la RATP) in Tunneling and Underground Space Technology, Vol 5, N° 1/2 pp 39-68, 1990.

- Le point sur les tunnels routiers en France, par M. Marec Dir. du CETU dans la Revue Travaux d'octobre 1991 N° 669.

- Dossier Pilote des Tunnels par le Ministère de l'Equipeement, Direction des Routes et de la circulation routière 1976.

- Kostensenkung im Tunnelbau, par Dr. Ing. F. Blennemann in Forschung+ Praxis U-Verkehr und Unterirdisches Bauen N°31 STUVA ed. Alba. jan.1986.

- Unterirdisches Bauen-Technik und Wirtschaftlichkeit N°29 Vorträge der STUVA-TAGUNG'83 in Nürnberg veranstaltet von der STUVA, Köln Ed. Alba Jan. 1984.

- Tunnelbaukosten und deren wichtigste Abhängigkeiten N° 22 STUVA 1977.

- Baukosten von Verkehrstunneln N°16, Prof. Dr. Ing. Günter Girnau, Dr. Ing. Alfred Haack, Ing. Grad K.F. Emig, Ing.Grad. M. Forner Ed Alba, Okt. 1974.

- Tunnel and Station Cost Methodology, Mined tunnels, by M. Ziad Ramadan, B.M. Parness, Y.E. Nassar U.S. Department of Transportation Oct. 1983

- Tunnel Engineering Handbook, edited by John O. Bickel and T.R. Kuesel, Parsons Brinckerhoff, Quade and Douglas, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

- Fortschritte beim mechanischen Vortrieb großer Tunnelquerschnitte, bei Siegmund Babendererde in ETR 38 H 10 1989 Oktober.

- Reconnaissance pour les tunnels à faible profondeur, par F. Descoedres Institut des sols, roches et fondations EPFL Séminaire géotechnique des tunnels, Paris mars 1986.

- Méthodes de construction de tunnels, par M. Odier de Géotechnique appliquée P&C Deriaz & Cie, Genève et par M. Legrand CETU Lyon, Séminaire géotechnique des tunnels, Paris mars 1986.
- Coûts constatés sur les tunnels routiers récemment construits en France : utilisation dans les projets futurs, par B. Constantin, CETU, dans la Revue Générale des Routes et Aérodrômes N° 580 Juillet-Août 1982.
- Estimations prévisionnelles aux différents niveaux des études par B. Constantin CETU, Journées Internationales de l'AFTES, Nice 10-14 mai 1981.
- Etude de faisabilité d'un métro à petit gabarit à Karlsruhe: annexe A Méthodes et coûts de construction des tunnels, Ed. STUVA par Dr. Ing N. Klawe et Dr J. Schreyer, Köln . 1981.
- Rapport du comité technique des tunnels routiers au XVI<sup>e</sup> Congrès Mondial de la route Vienne Sept.1979.
- Hannover bores twin tubes under compressed air: Pressurized shield overcomes water table, by Roon Lewald in Bonn in ENR/ January 22, 1987.
- Performance Characteristics of a Tunnel Boring Machine from Geomechanical Viewpoint, par T. Morimoto et M. Hori Electric Power Development Co. Ltd, Japan in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 23 N°1-1986.
- Small-profile metro cuts construction costs: although rolling stock costs are higher, a small-profile metro line now under construction in Tokyo offers major savings in civil engineering costs in R.G.I. May 1987.
- La standardisation des profils de souterrains par J.N. Plichon Contrôleur Général Honoraire à EDF, Journées internationales de l'AFTES Nice 1981.
- Choix d'un type de tunnelier ou de bouclier mécanisé, par M. Gesta et M. De La Ménardièrre dans Recommandations de l'AFTES Groupe de travail N°4 Mécanisation de l'excavation.
- Importance économique du choix optimal du soutènement et du revêtement, par M. Gesta SGE in Tunnels et Ouvrages souterrains, Avril 1981.
- Systems and practices for rapid transit tunneling par T.D. O'Rourke, Cornell University Ithaca USA in Underground Space Vol.4 N° 1 pp33-44, Pergamon Press 1979.
- An experimental Study of Multi-Circular Face Shield Tunnelling, by Tokio Arai, Hideo Ishizaki, Hiroshi Ohta, Kenji Kishi et Nobuhito Kita., Design & Planning Department Civil Engineering Division , Osaka Municipal Transportation Bureau. Février 1990.
- Subway Construction in Osaka city , by Osaka Municipal Transportation Bureau, April 1985.



## ANNEXES



## Annexe au chapitre 3: Le génie civil.

### 3.1.4 - Géotechnique

Nous adoptons dans cette étude la classification des sols suivant leur résistance mécanique:

Catégorie	Détermination	Exemples	f bars
I	Roches de résistance supérieure	Quartzites et basaltes de résistance élevée	20
II	Roches très résistantes	Granites très résistants porphyres, grès et calcaires de très haute résistance	19 à 13
III	Roches de bonne résistance	Granites, grès et calcaires de très bonne tenue ou légèrement délités, marbres, dolomies, conglomérats compacts	13 à 7
IV	Roches assez résistantes	Grès ordinaires, schistes siliceux ou grès schisteux	7 à 5
V	Roches de résistance moyenne	Schistes argileux, grès et calcaires de résistance moyenne, marnes compactes, conglomérats peu consistants	5 à 3
VI	Roches peu résistantes	Schistes ou calcaires peu consistants ou très fracturés, marnes communes, gypses, grès très fracturés. Poudingues et sols graveleux comprimés. Argiles dures. Craie	3 à 1,3
VII	Roches broyées Sols très consolidés	Argiles, alluvions cohérentes Sables argileux consolidés Sables et graviers compacts	1,3 à 0,9
VIII	Sols moyennement consolidés	Tourbes, sables argileux Sables humides moyennement consolidés	0,9 à 0,7
IX	Sols peu consolidés	Remblais plastiques peu consolidés, sables ou graviers gorgés d'eau	0,7 à 0,5
X	Terrains coulants	Vases et autres sols plastiques saturés d'eau	0,5

$$p = \frac{\sigma_K}{100}$$

$$p = \frac{c}{\sigma_c} + \frac{c}{\sigma_c}$$

avec :

- $\sigma_K$  : Coefficient de résistance
- $\phi$  : Angle de frottement du terrain
- $c$  : Cohésion (bars)
- $\sigma_c$  : Résistance à la compression simple du sol (bars)
- $\sigma_K$  : Résistance à la compression simple de la roche (bars)

### - Tranchée couverte

Les valeurs géotechniques adoptées sont les suivantes :

- Les terrains cohérents (catégories VII, VIII et X)	$\gamma_h = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10,7 \text{ kN/m}^3$ $c = 0,05 \text{ MPa}$ $\varphi = 20^\circ$
- Les terrains granulaires (catégorie IX)	$\gamma_h = 21,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 13,5 \text{ kN/m}^3$ $c = 0 \text{ MPa}$ $\varphi = 30^\circ$

$\gamma_h$  : Poids volumique humide

$\gamma'$  : Poids volumique déjaugé

$c$  : Cohésion interne

$\varphi$  : angle de frottement interne

### - Viaduc

La nature du terrain aura une influence sur le type de fondation adopté. Une étude géotechnique devra être menée afin de déterminer la contrainte admissible du sol en compression ainsi que les tassements.

En première approximation, nous admettons :

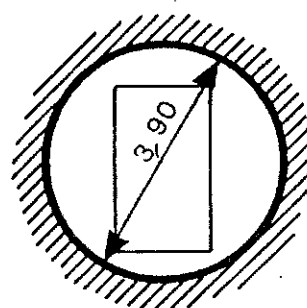
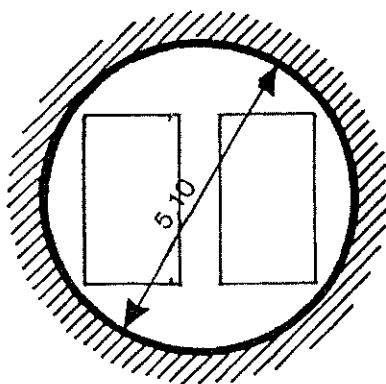
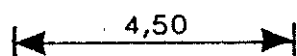
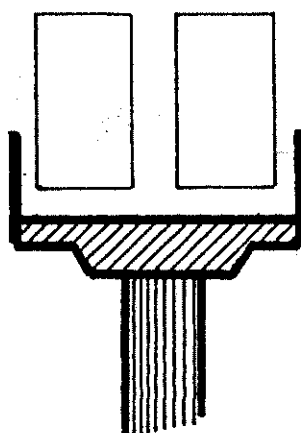
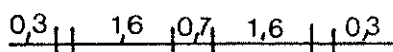
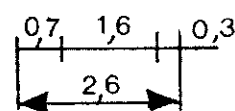
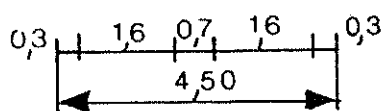
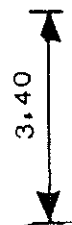
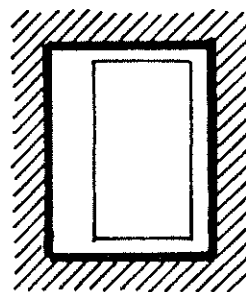
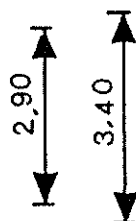
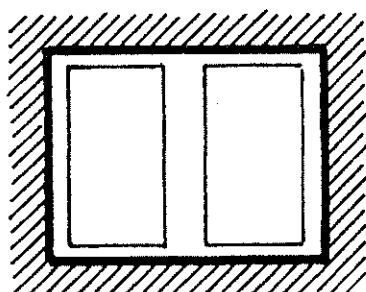
- qu'une fondation superficielle est réalisable pour les terrains de la catégorie I à VI,
- que des fondations profondes seront mises en oeuvre pour les autres terrains.

## **Annexe au chapitre 4 : l'étude économique**

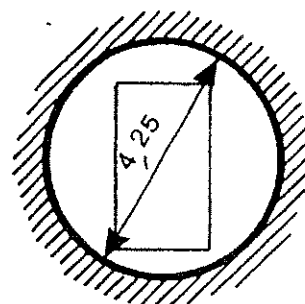
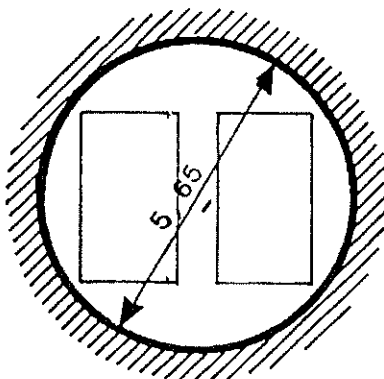
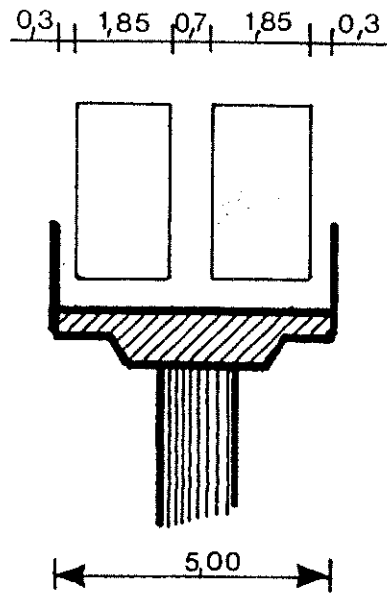
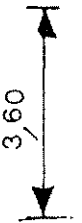
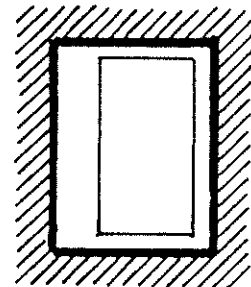
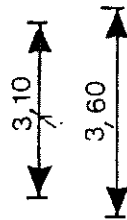
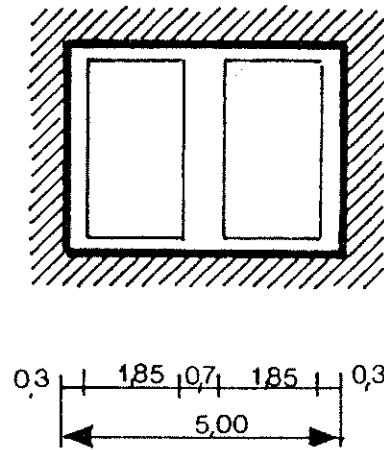
### **4.1 Rappel des caractéristiques des matériels roulants**



# SK 1

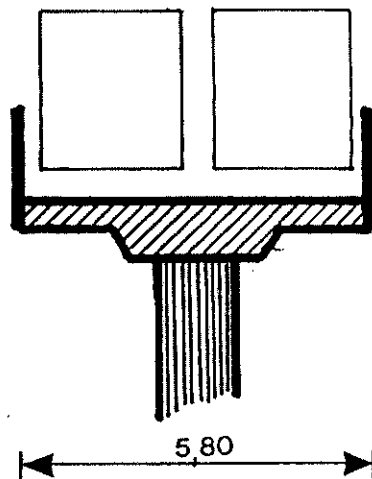
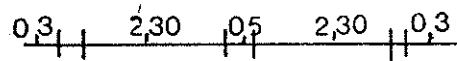
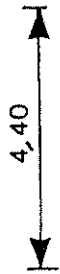
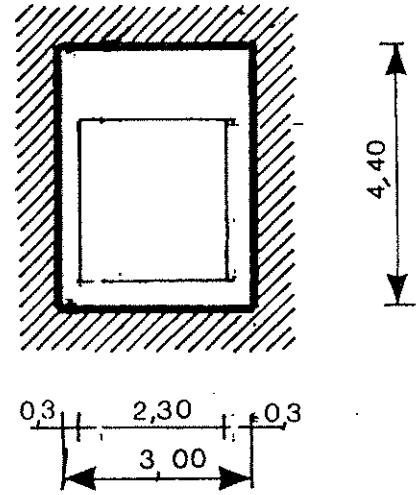
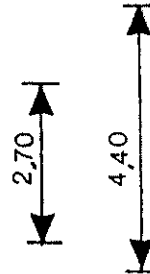
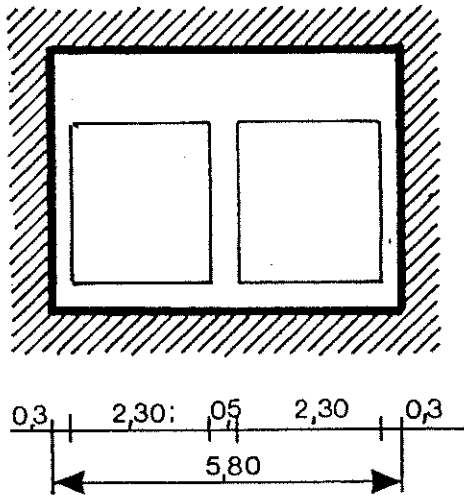


# SK 2

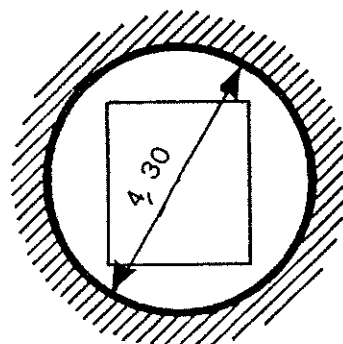
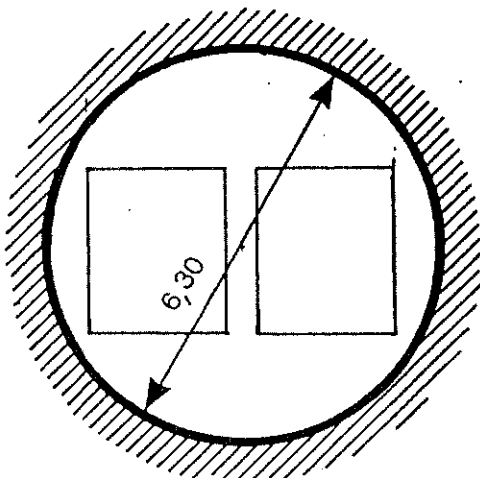




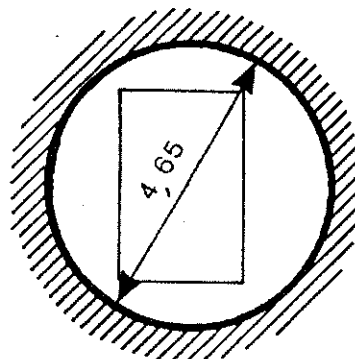
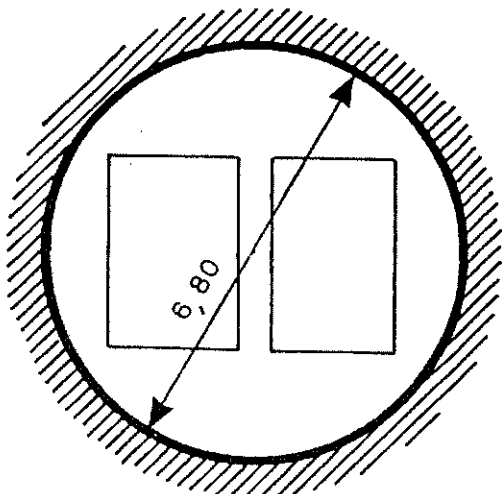
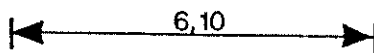
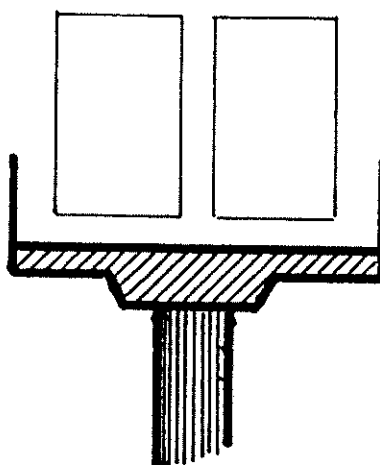
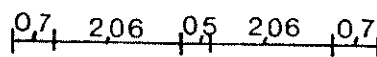
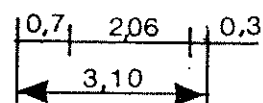
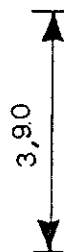
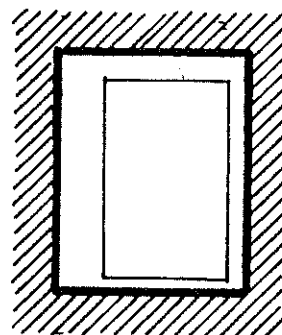
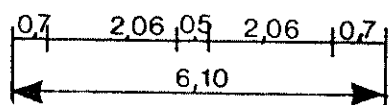
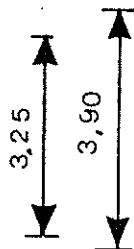
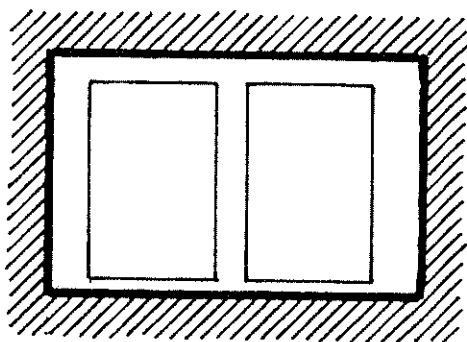
# TRANSVILLE



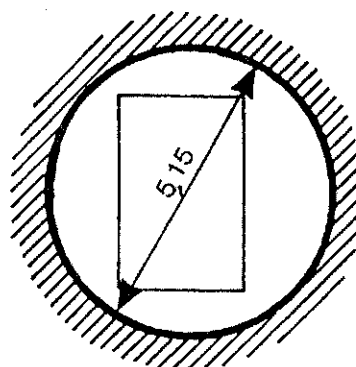
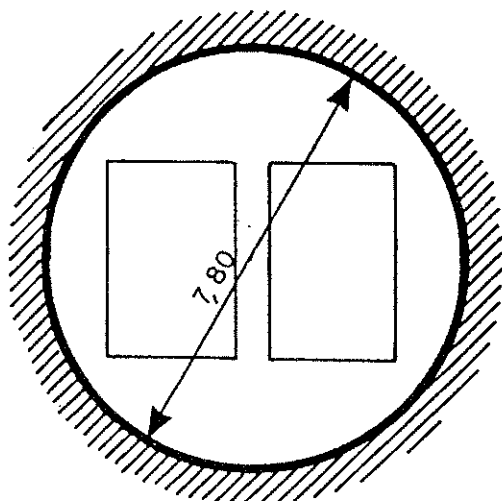
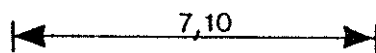
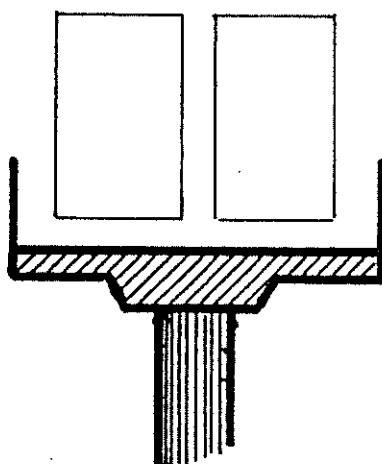
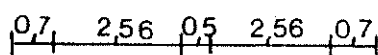
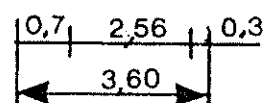
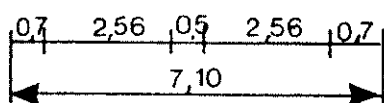
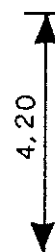
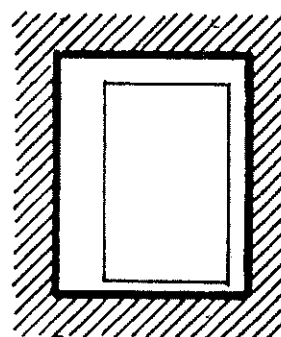
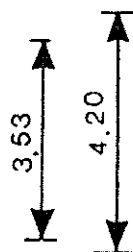
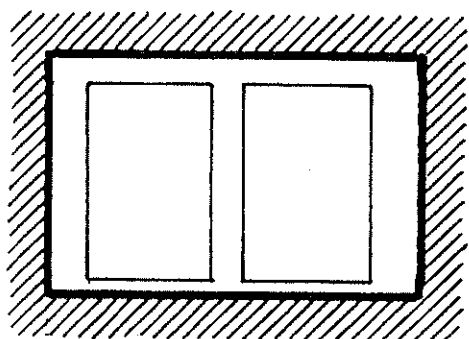
Profil pris en compte  
pour le calcul des coûts



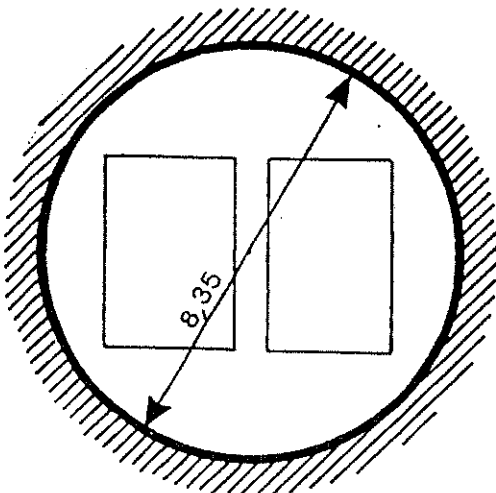
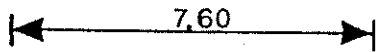
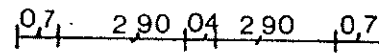
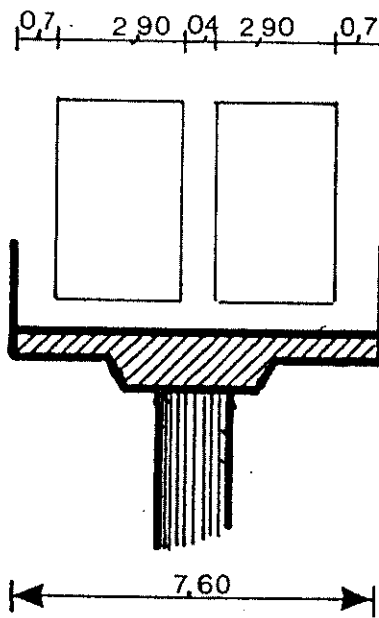
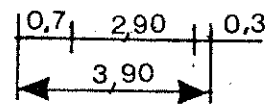
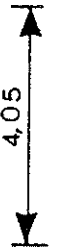
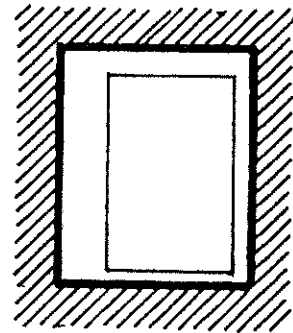
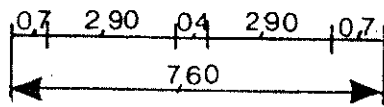
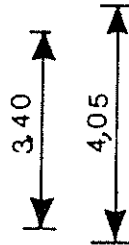
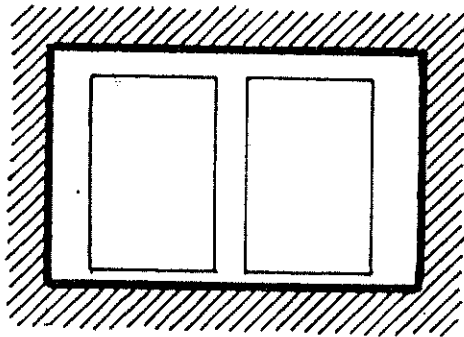
# VAL 206



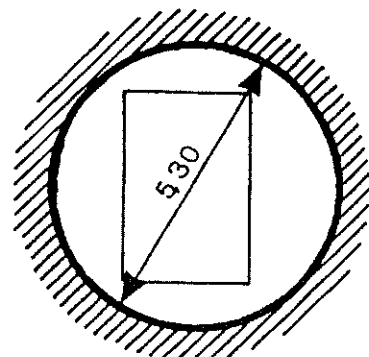
# VAL 256



# MAGGALY

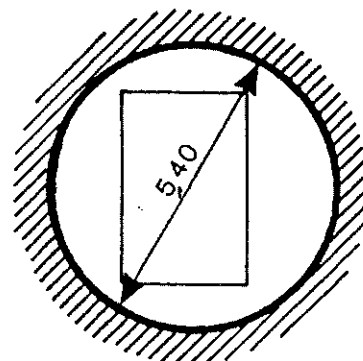
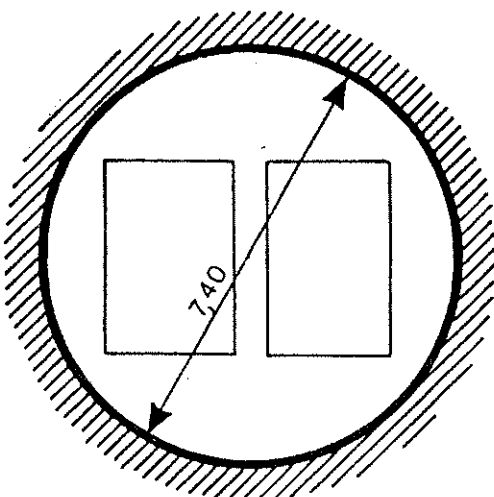
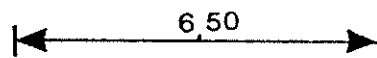
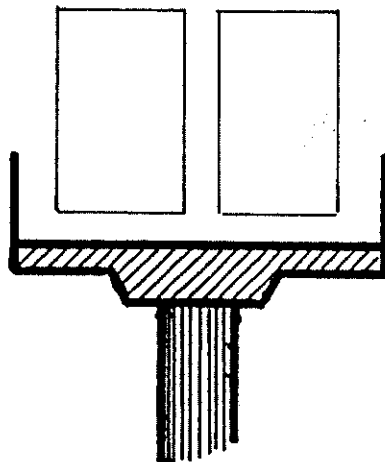
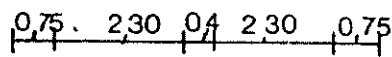
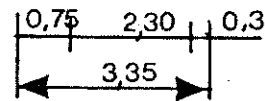
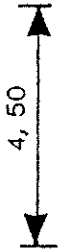
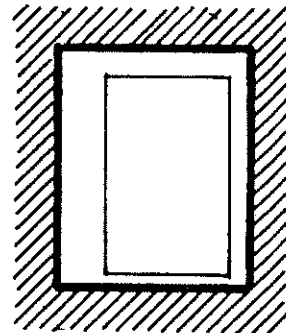
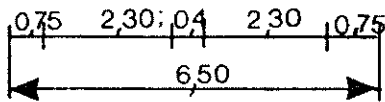
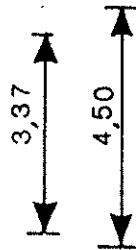
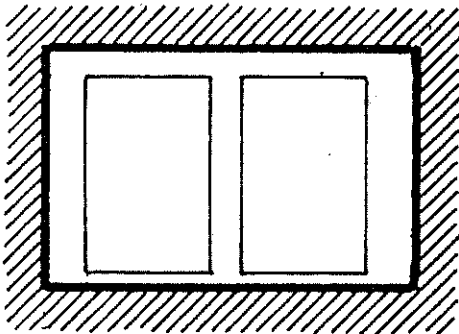


8.35

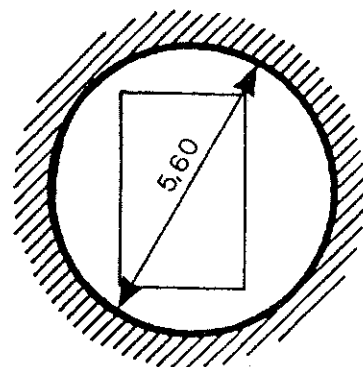
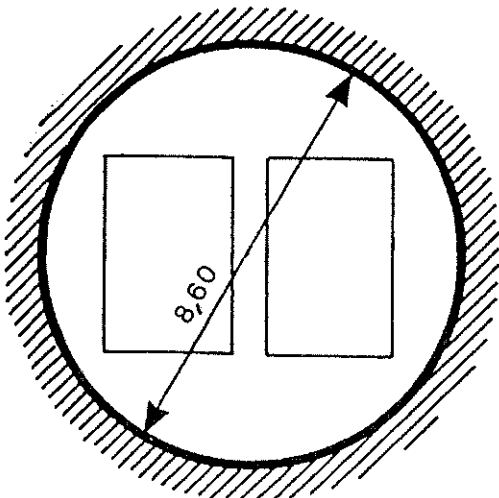
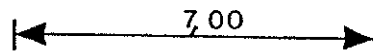
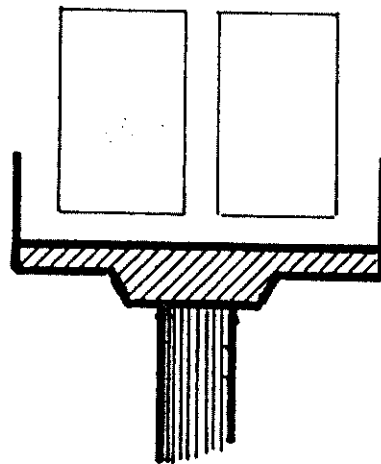
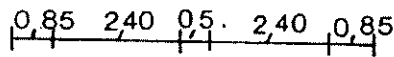
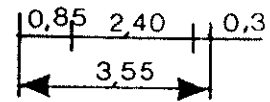
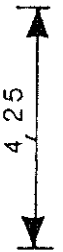
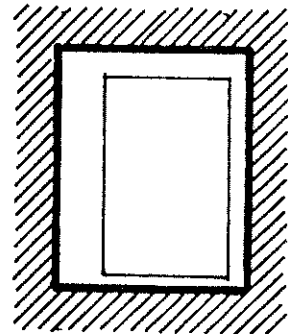
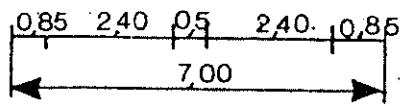
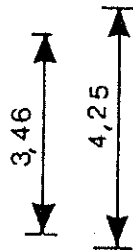
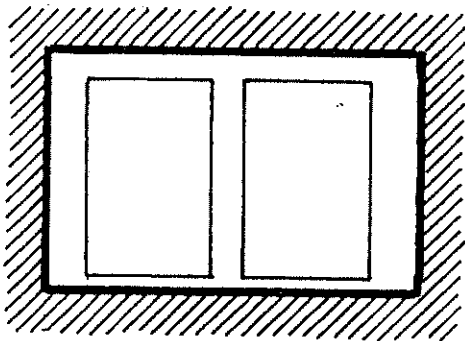


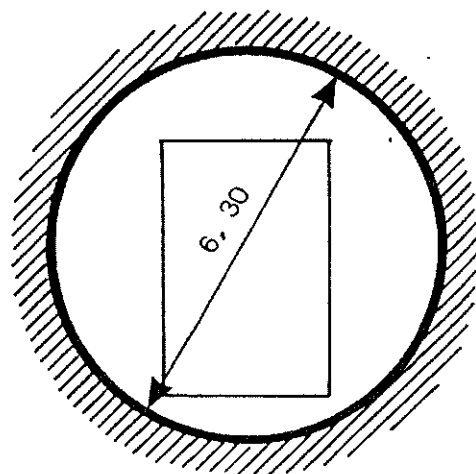
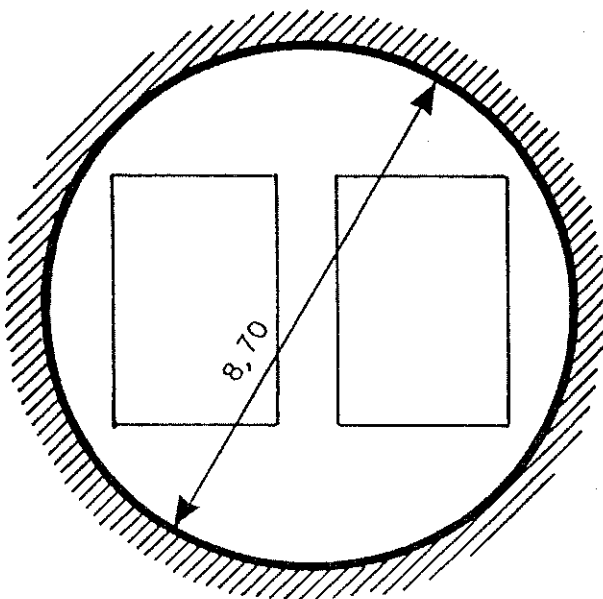
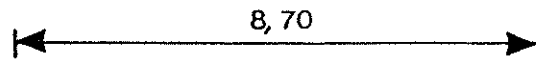
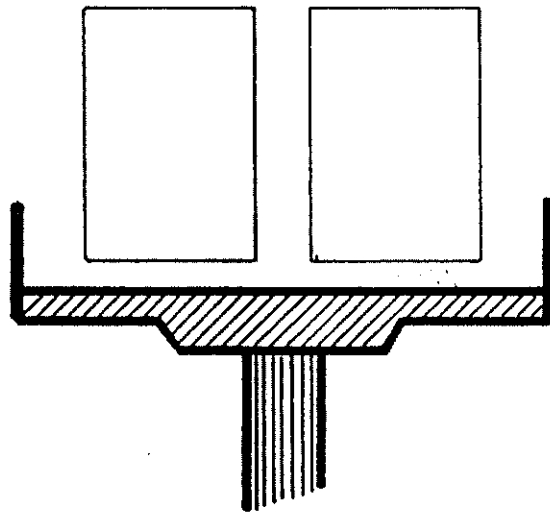
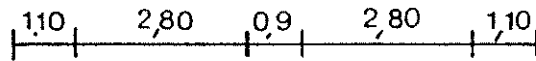
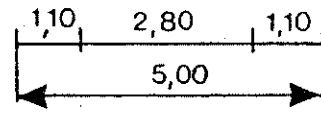
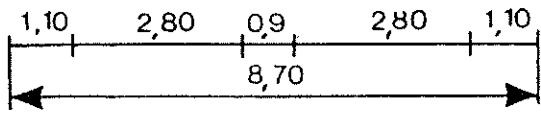
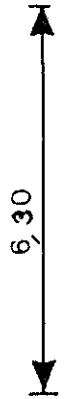
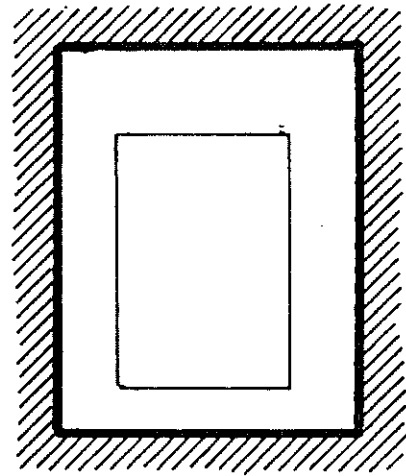
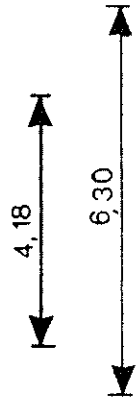
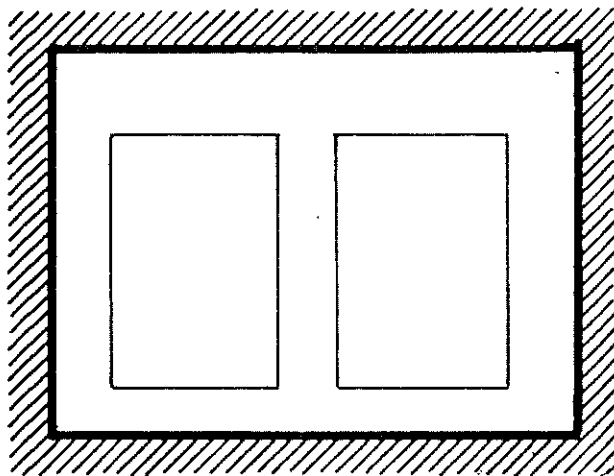
5.30

# TRAMWAY



# MP 73







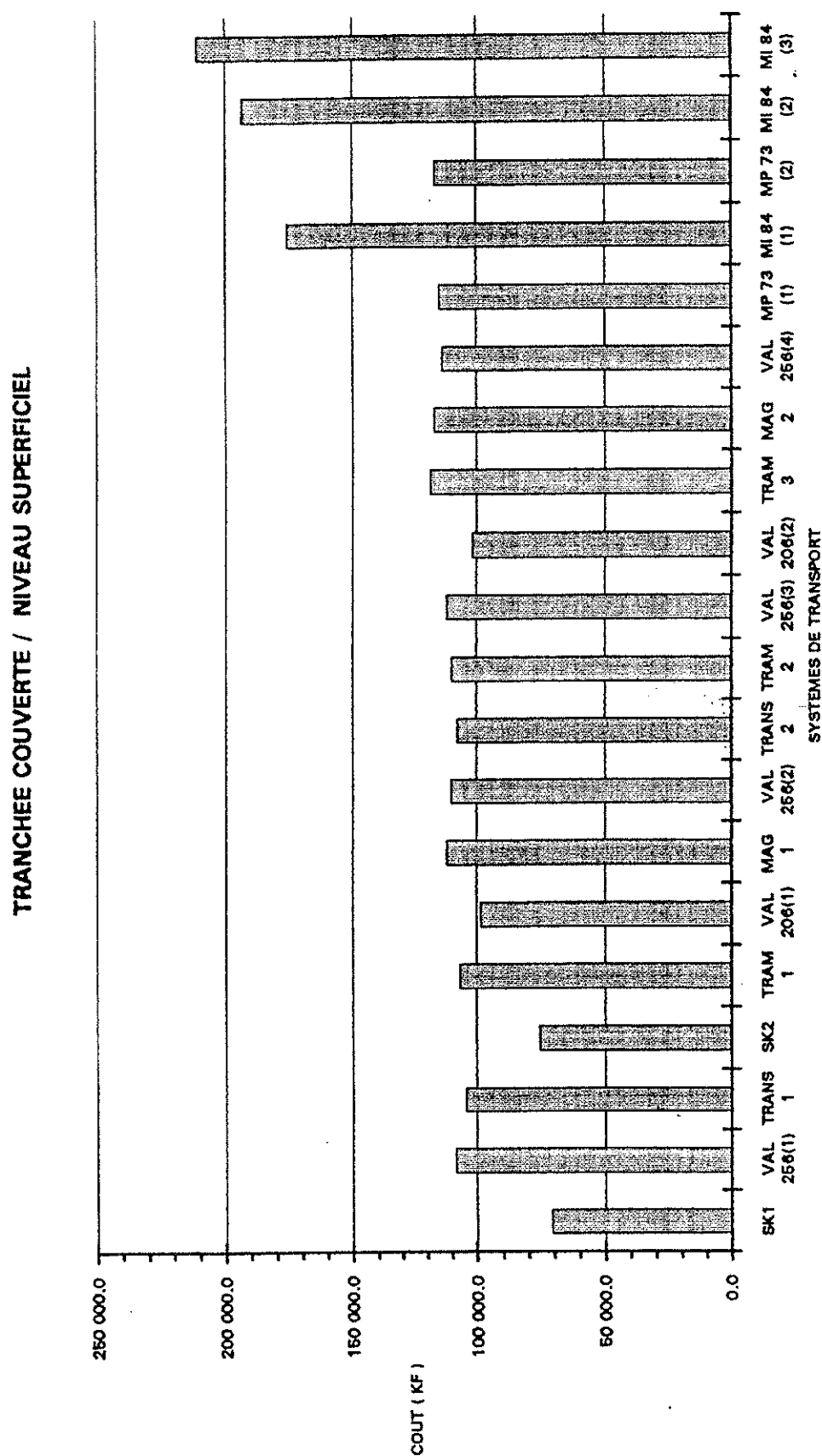


#### **4.4 Comparaison des coûts de génie civil des systèmes de chacun des 4 groupes**

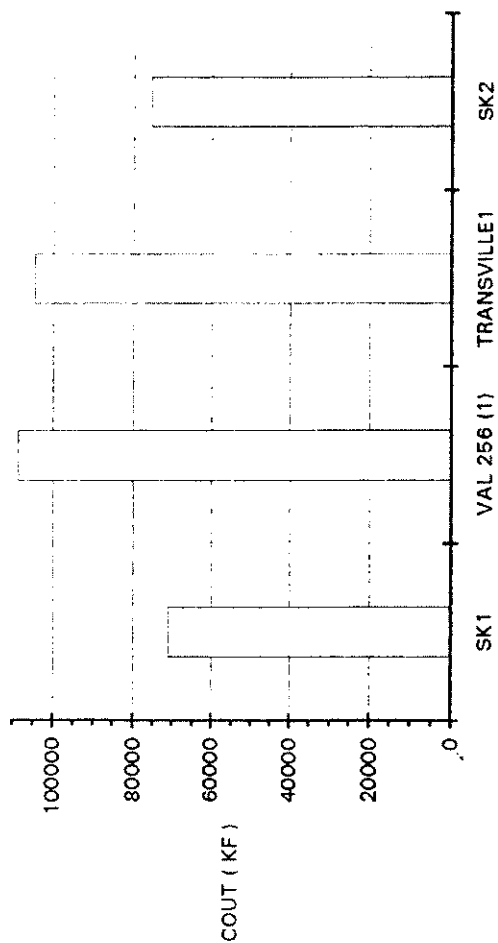
##### **4.4.1 Tranchée couverte - niveau superficiel**



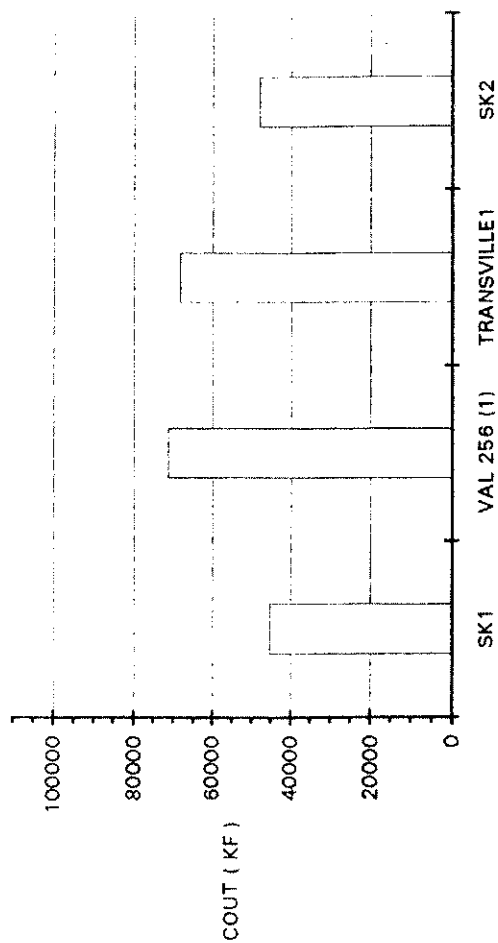
Tableau général: histogramme des coûts de génie civil dans un terrain granulaire avec de l'eau d'une interstation de 800 mètres.



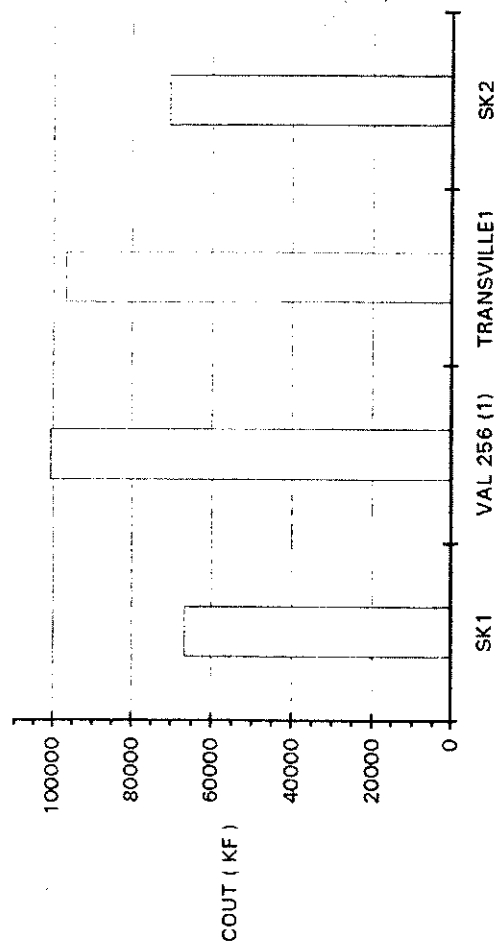
TC + EAU (longueur entraxe = 800 m)



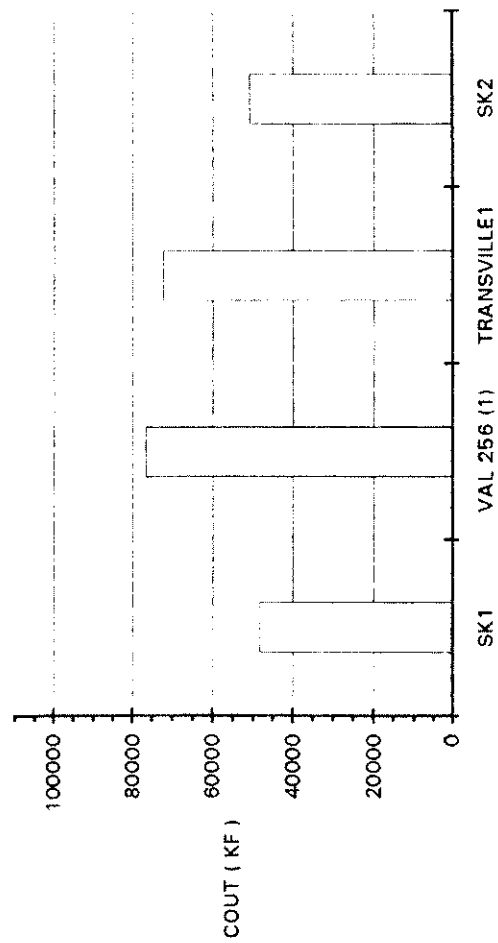
TC - EAU



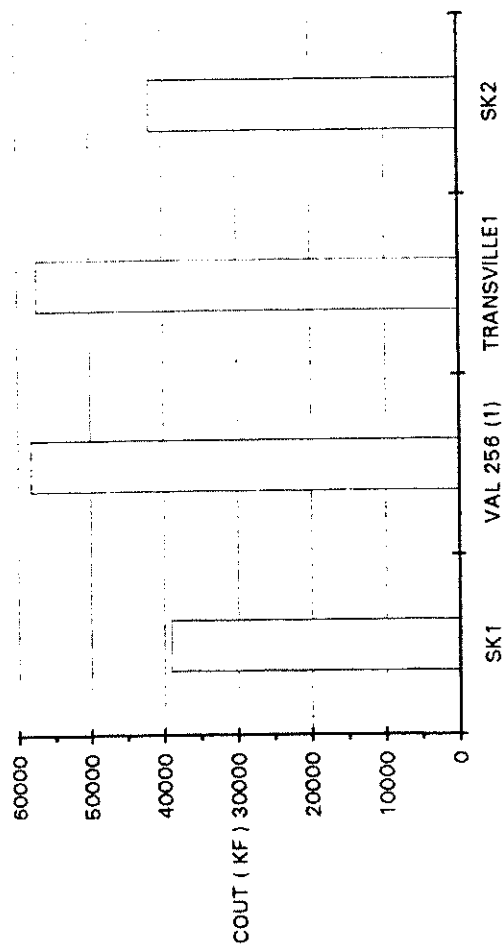
TG + EAU



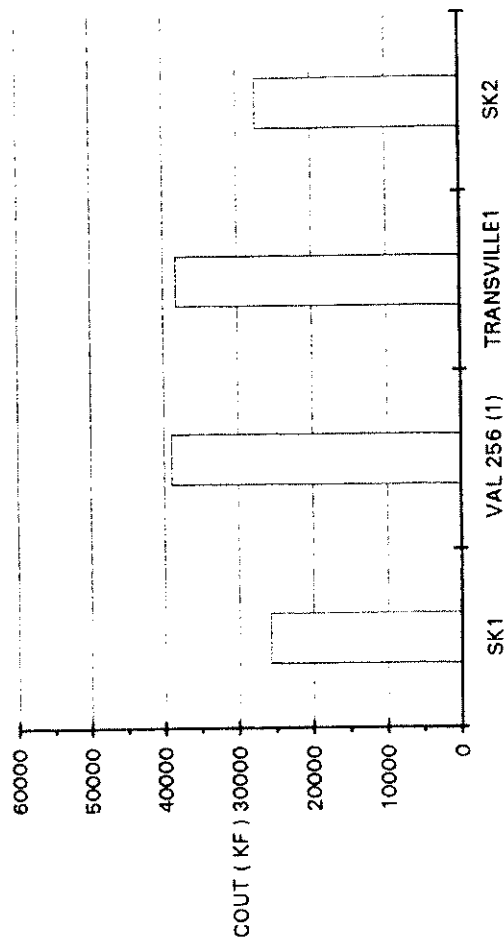
TG - EAU



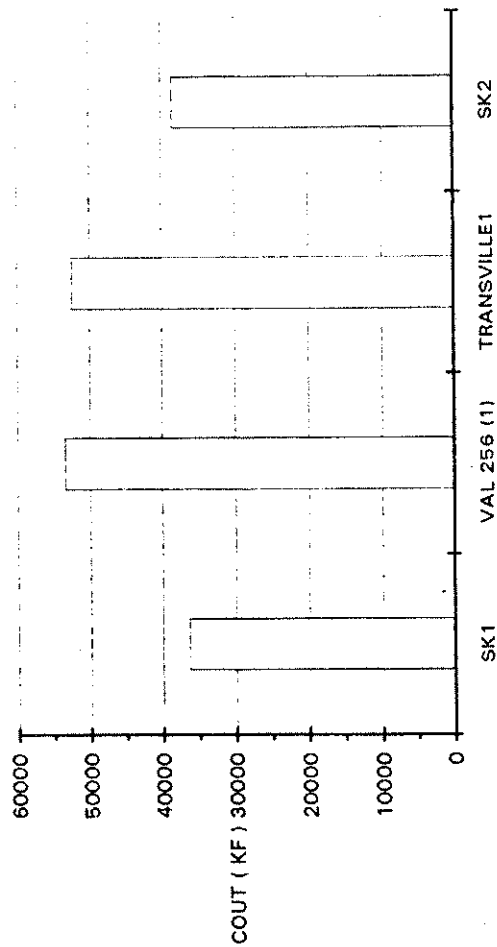
TC + EAU ( longueur entraxe = 400 m )



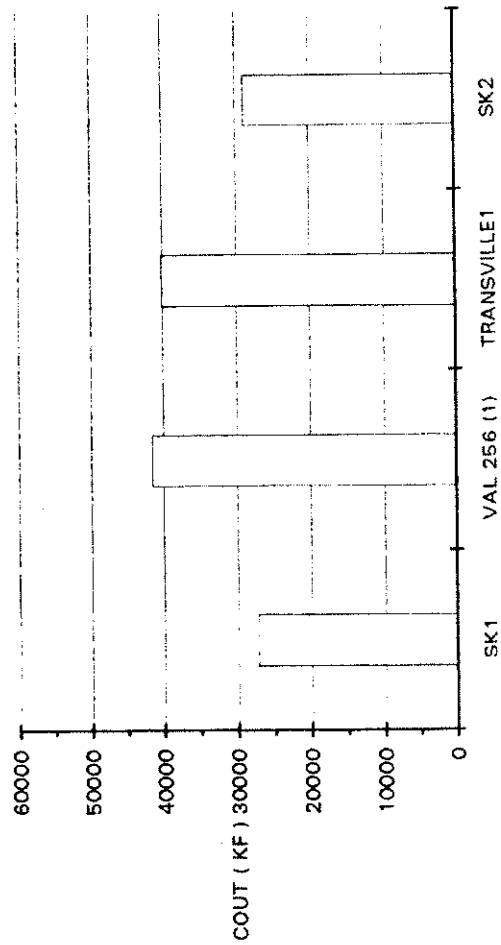
TC - EAU



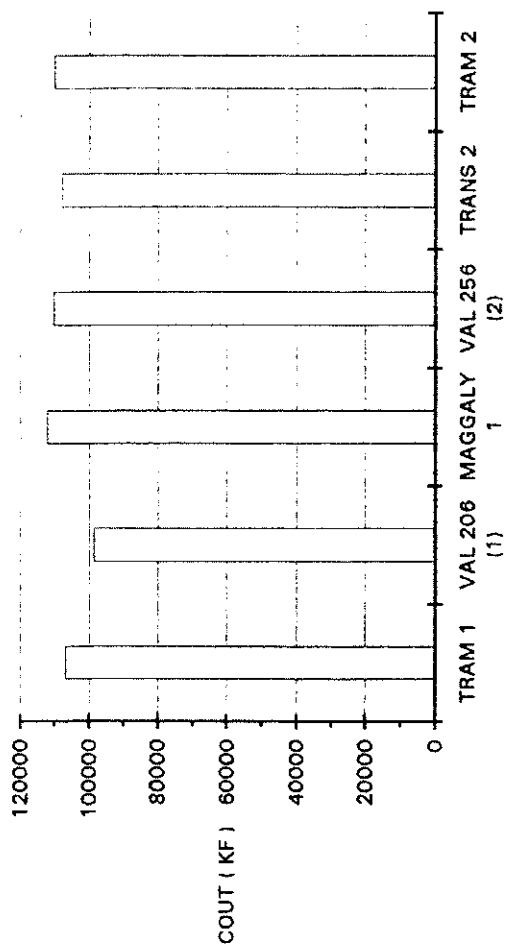
TG + EAU



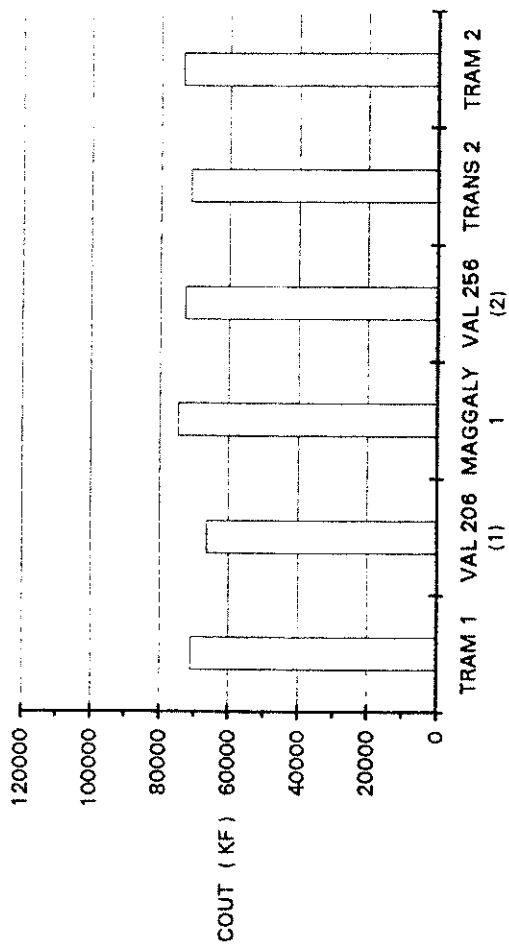
TG - EAU



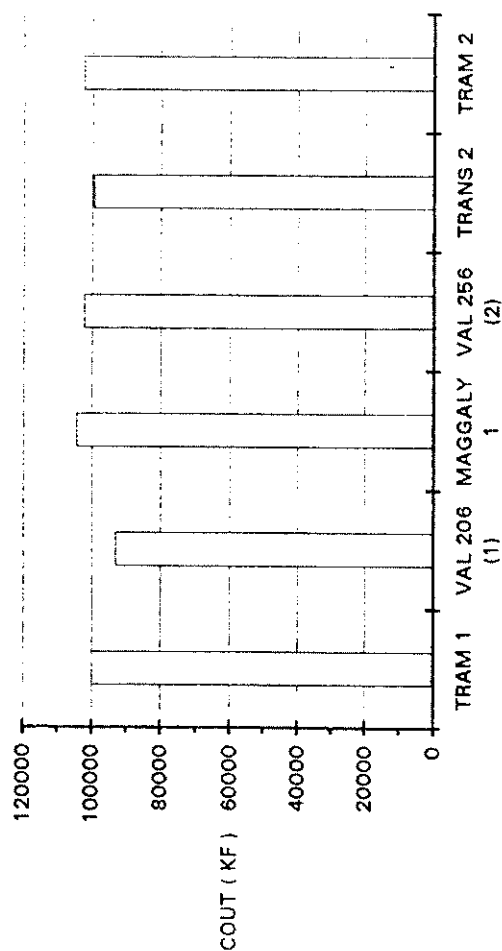
TC + EAU (longueur entraxe = 800 m)



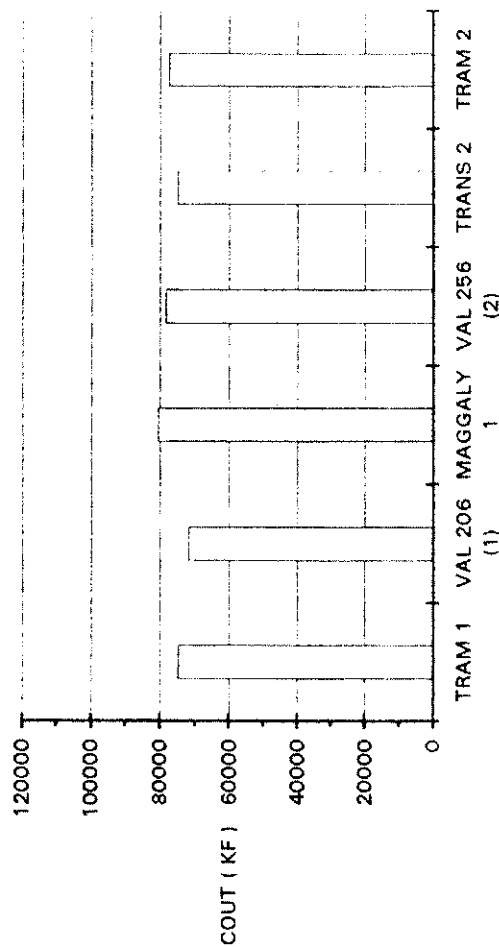
TC - EAU



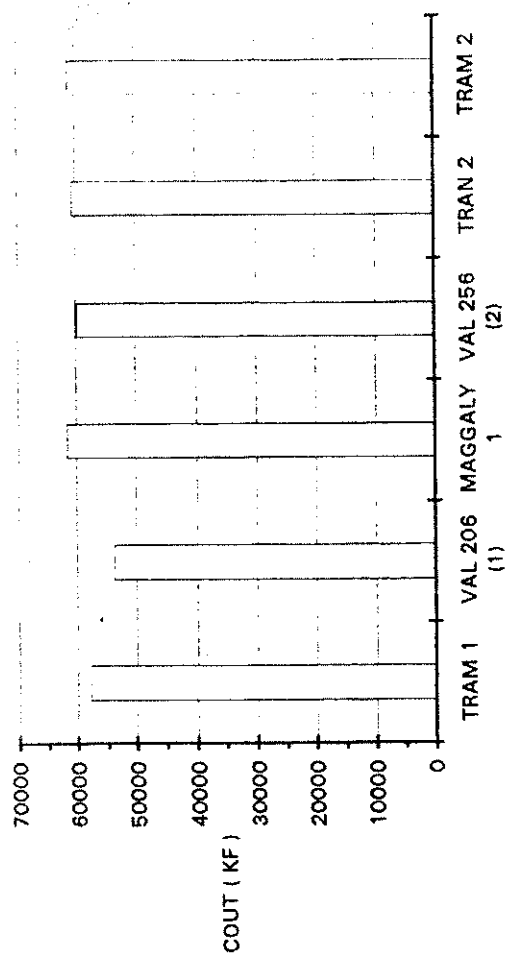
TG + EAU



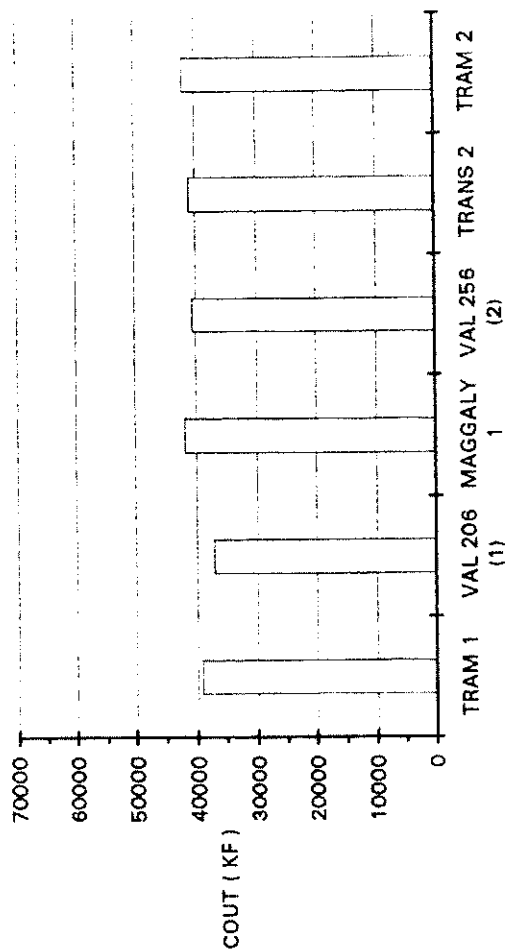
TG - EAU



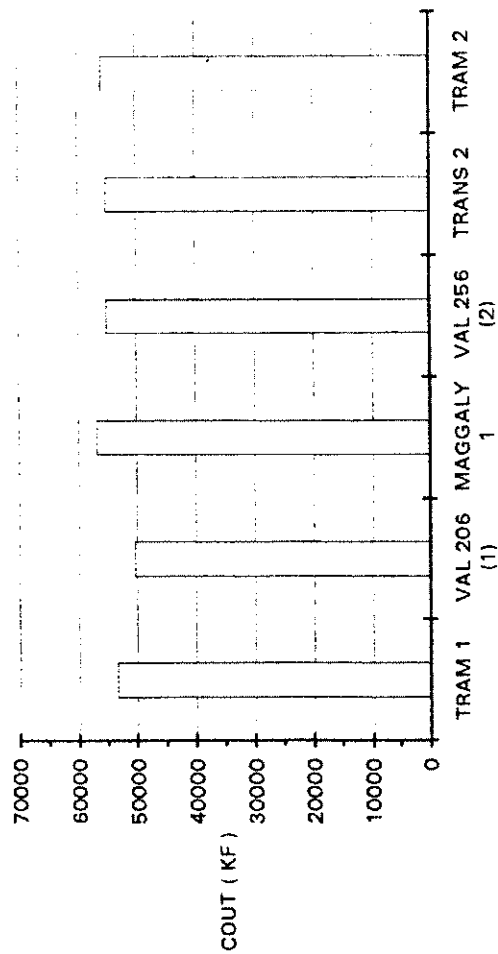
TC + EAU ( longueur entraxe = 400 m )



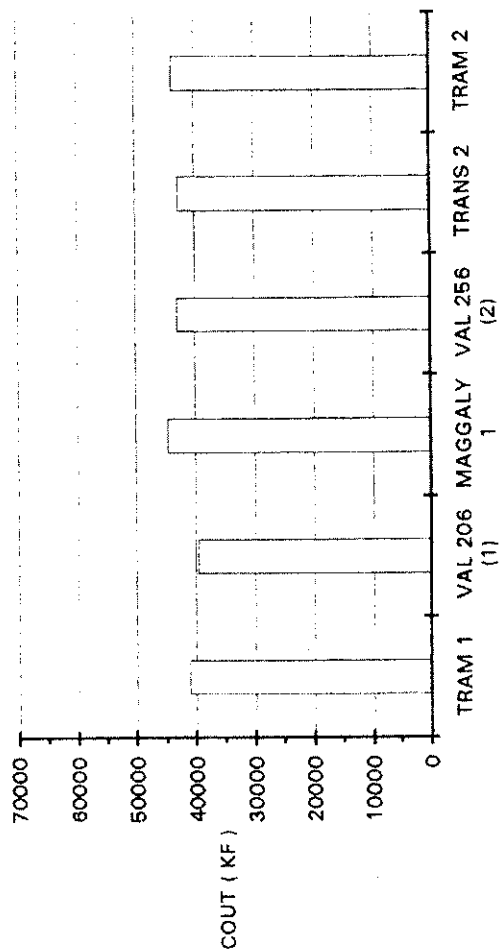
TC - EAU



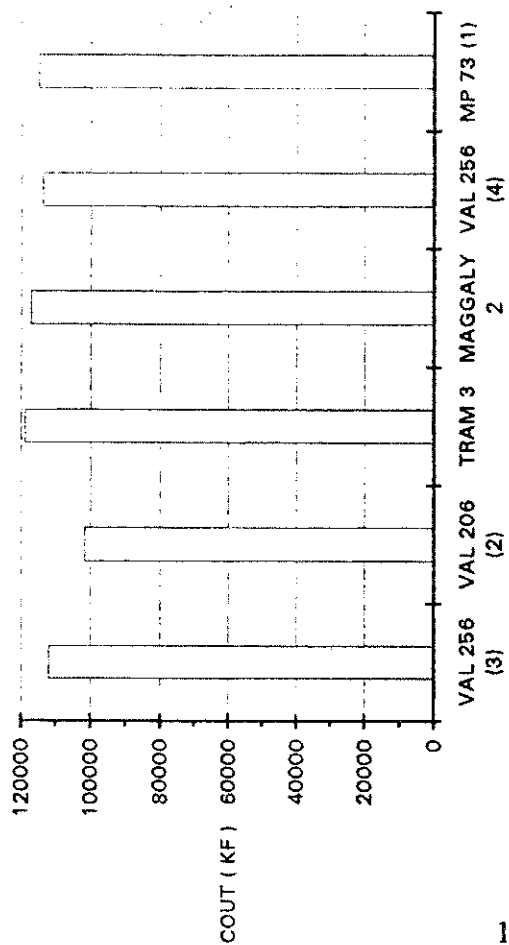
TG + EAU



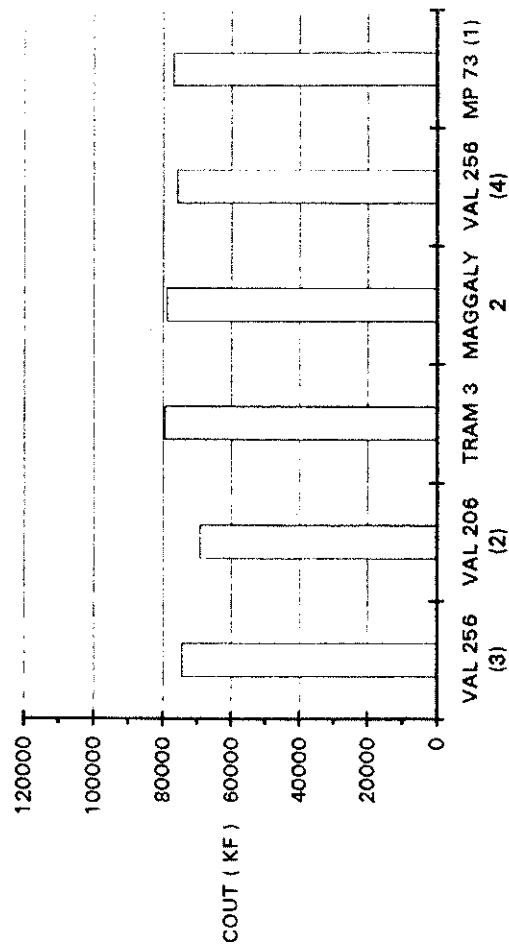
TG - EAU



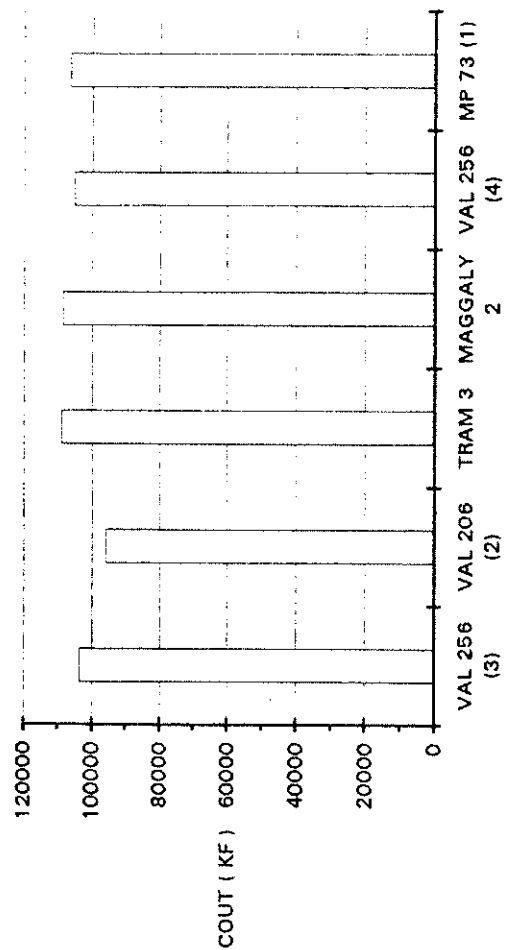
TC + EAU ( longueur entraxe = 800 m )



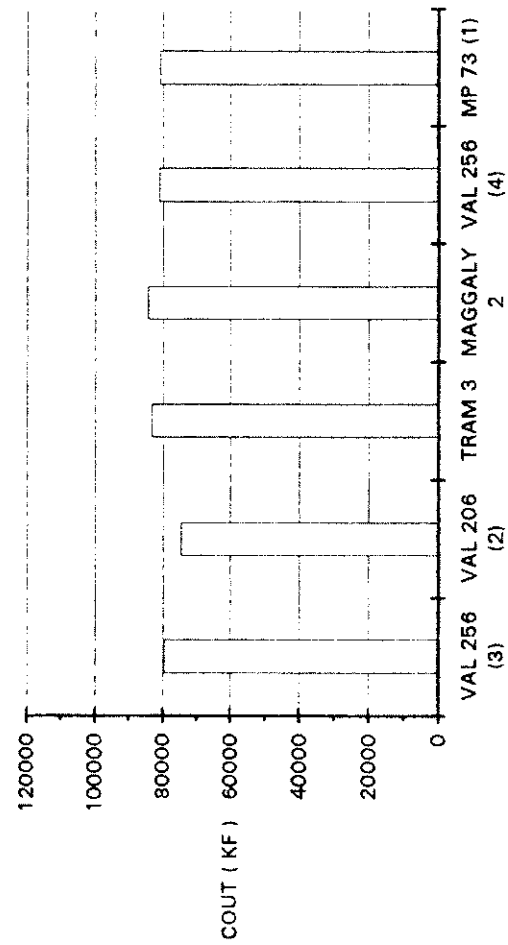
TC - EAU



TG + EAU

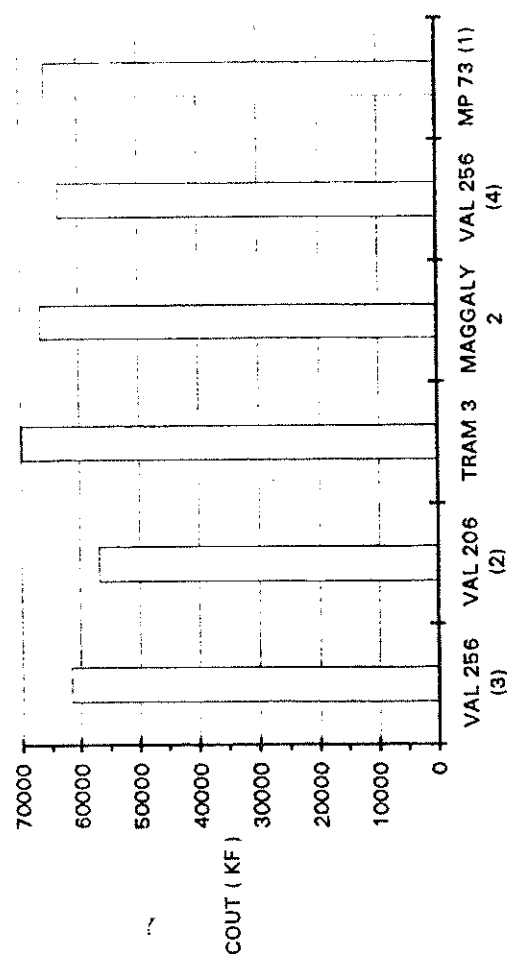


TG - EAU

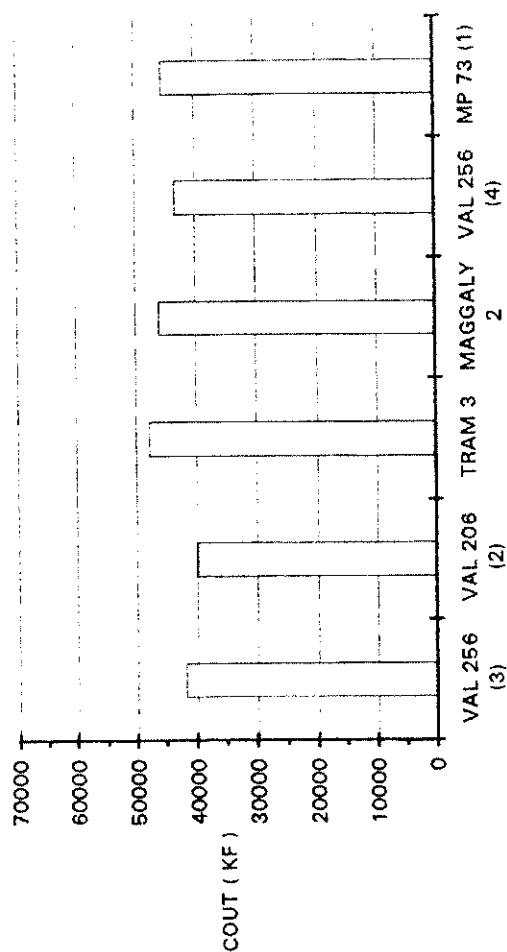




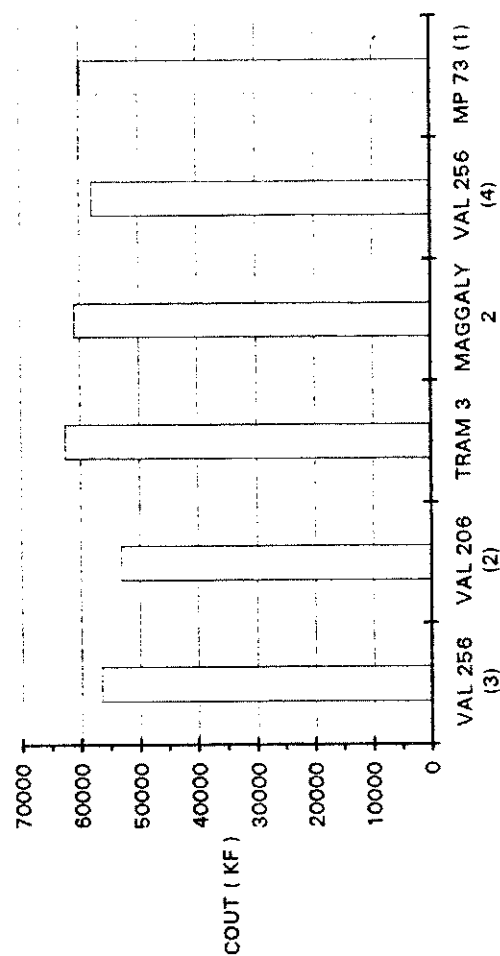
TC + EAU ( longueur entraxe = 400 m )



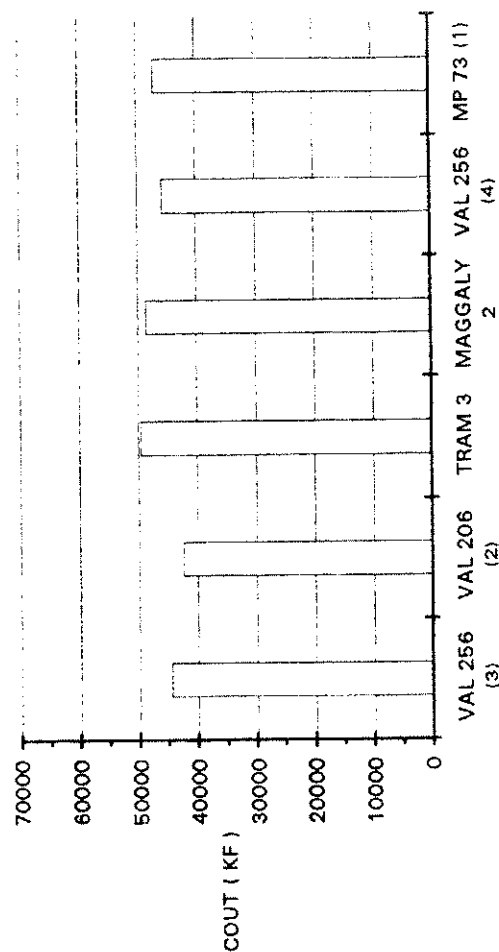
TC - EAU



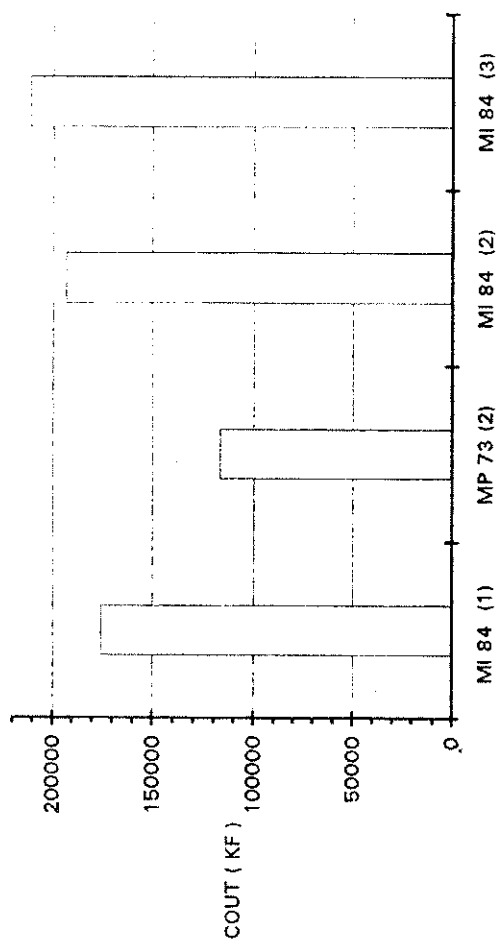
TG + EAU



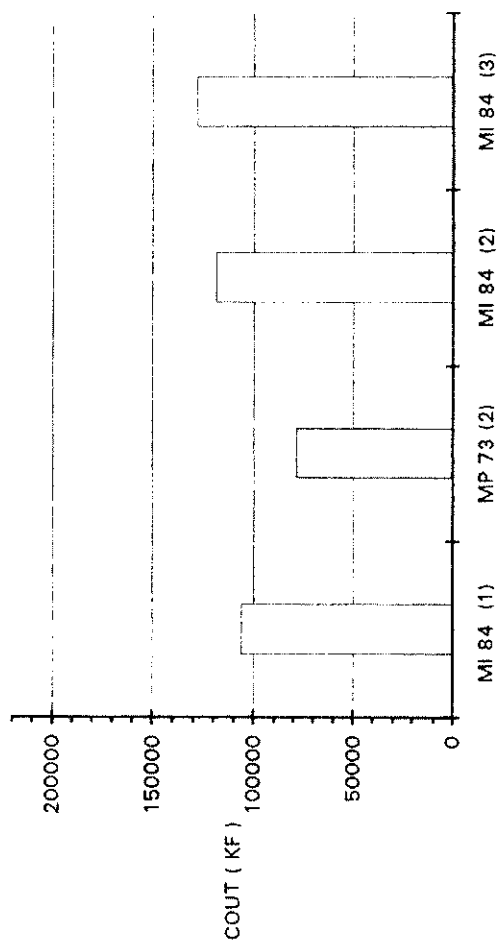
TG - EAU



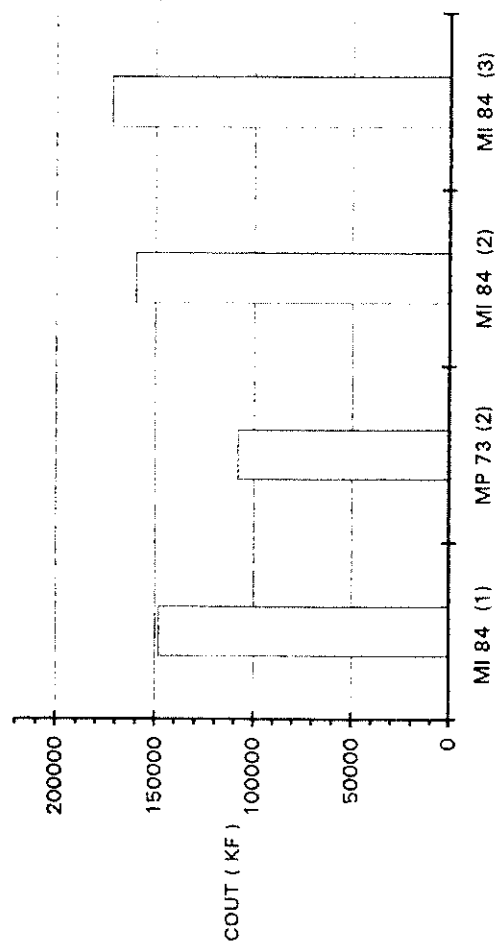
TC + EAU ( longueur entraxe = 800 m )



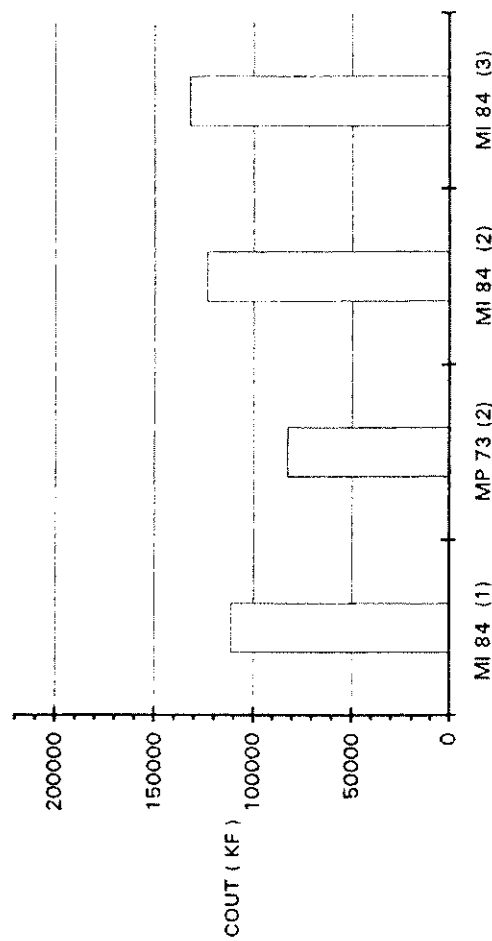
TC - EAU



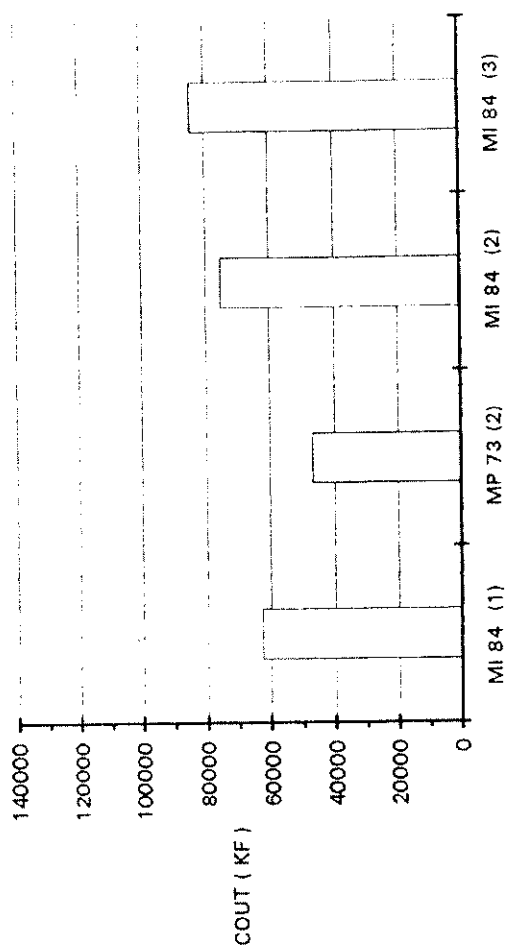
TG + EAU



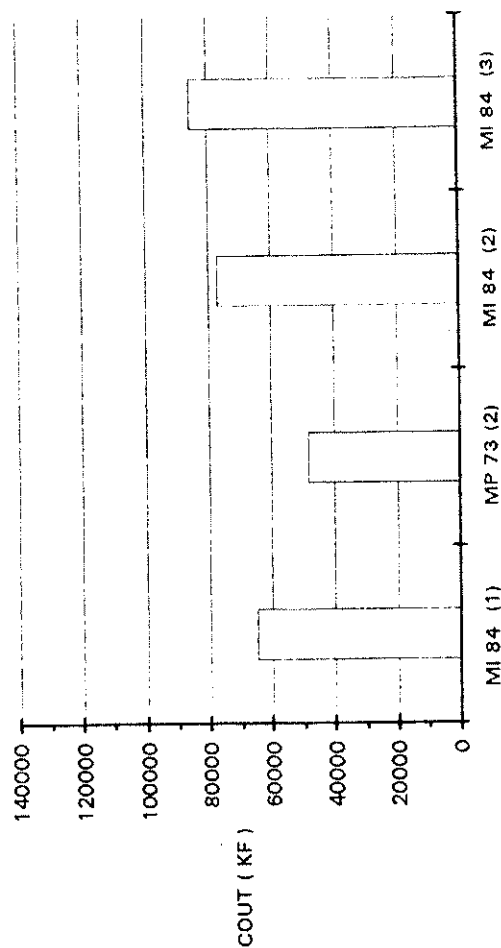
TG - EAU



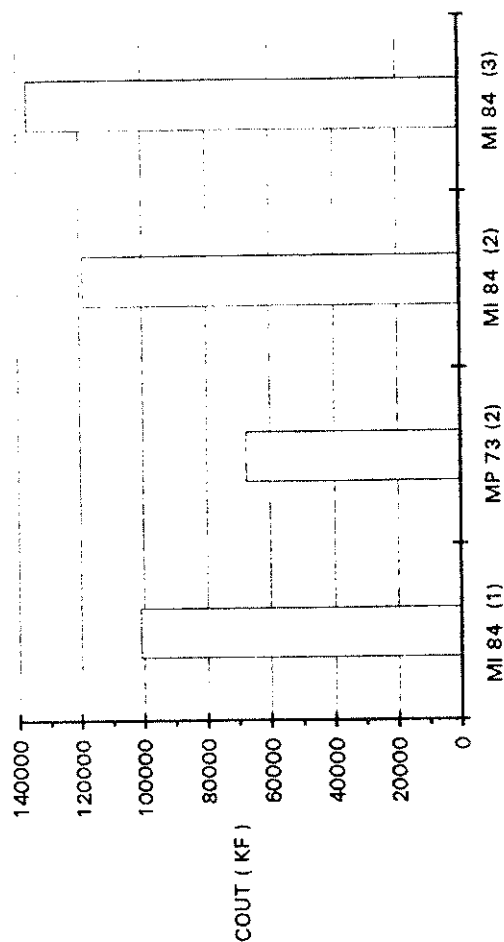
TC - EAU



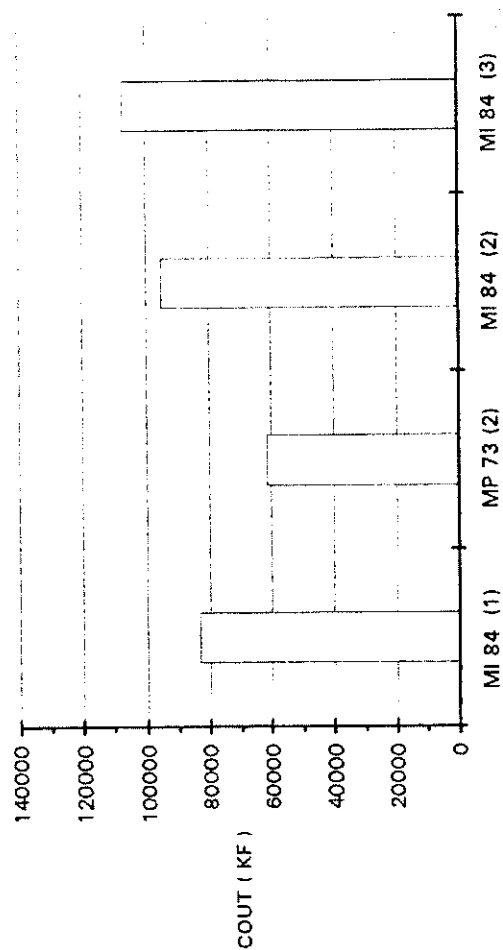
TG - EAU



TC + EAU ( longueur entraxe = 400 m )



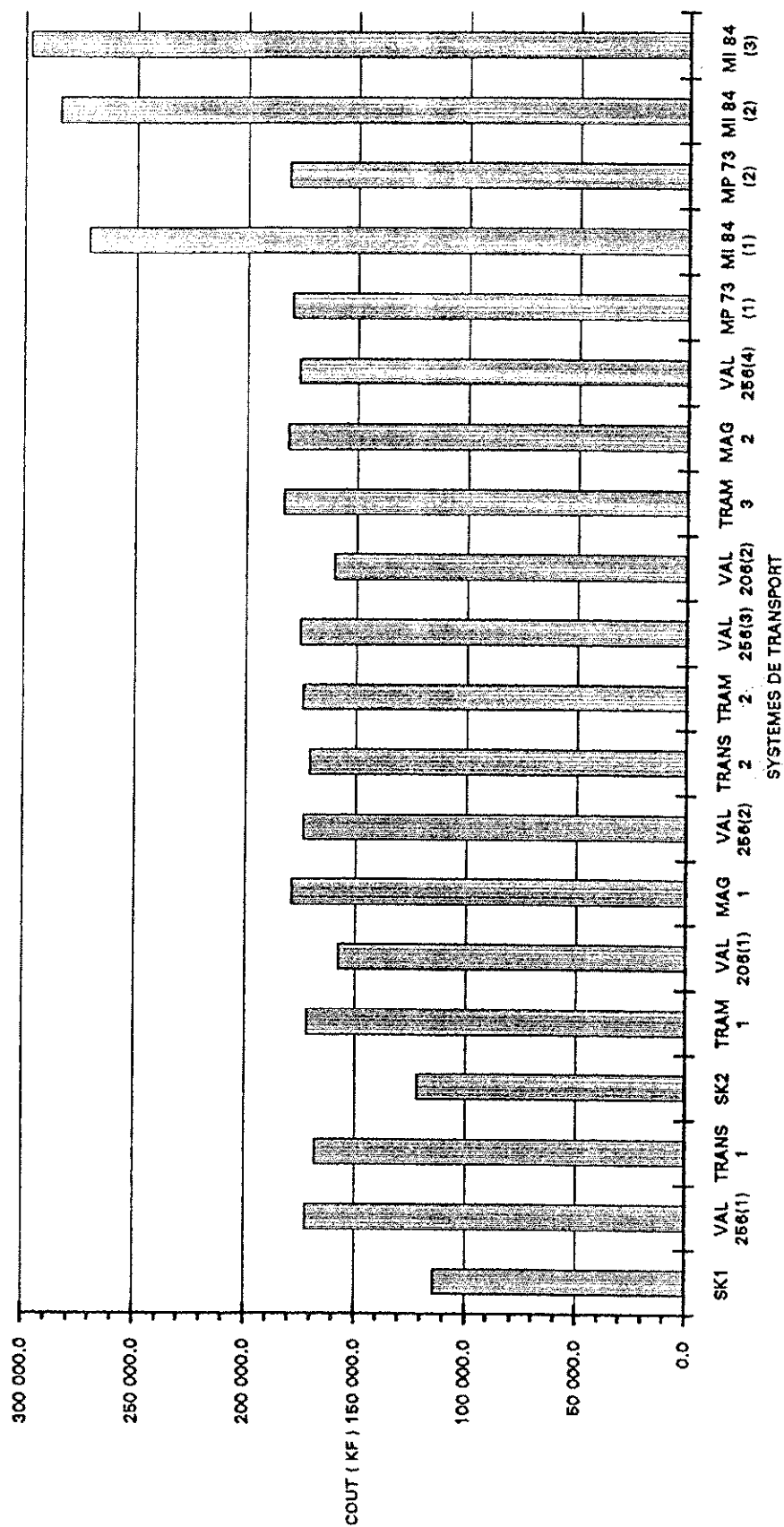
TG + EAU



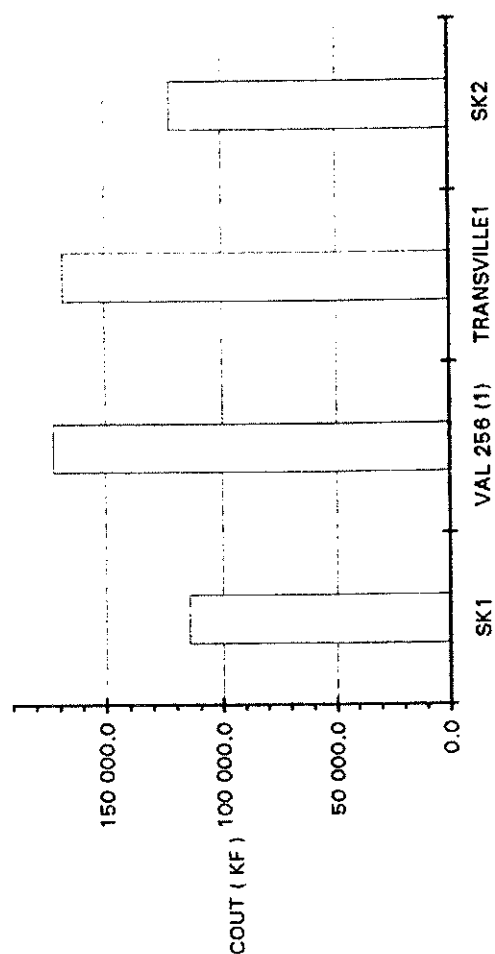
#### 4.4.2 Tranchée couverte - niveau profond

Tableau général: histogramme des coûts de génie civil dans un terrain granulaire avec de l'eau d'une interstation de 800 mètres.

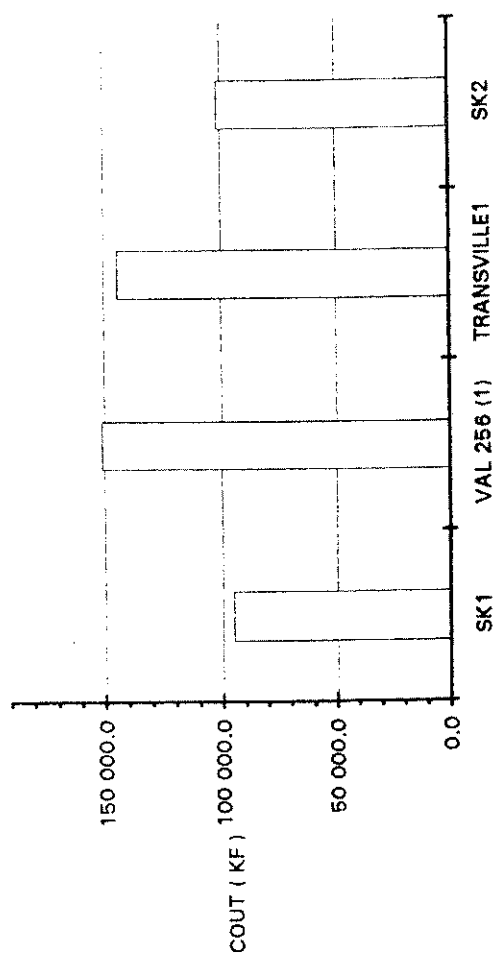
#### TRANCHEE COUVERTE / NIVEAU PROFOND



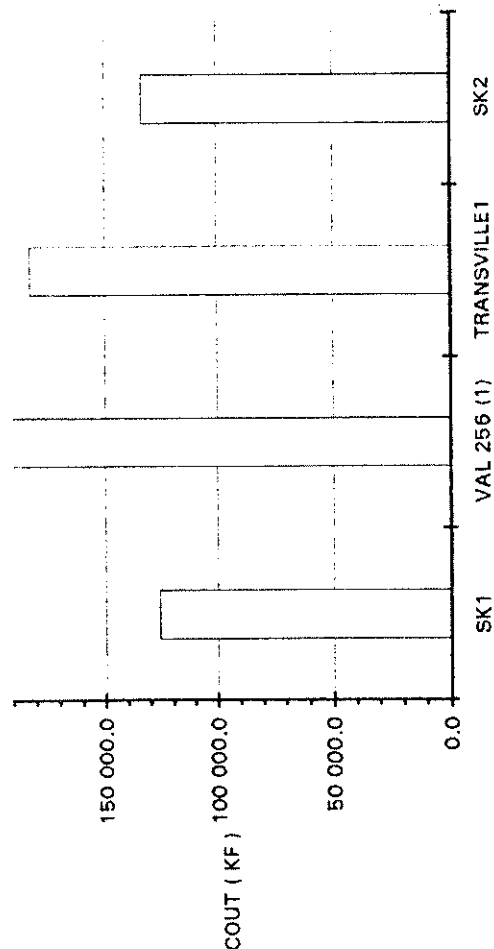
TC + EAU (longueur entraxe = 800 m)



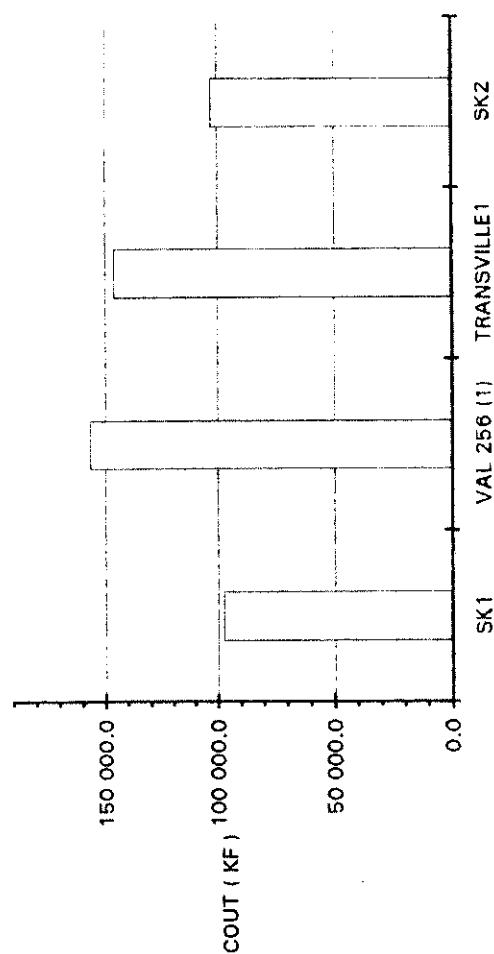
TC - EAU



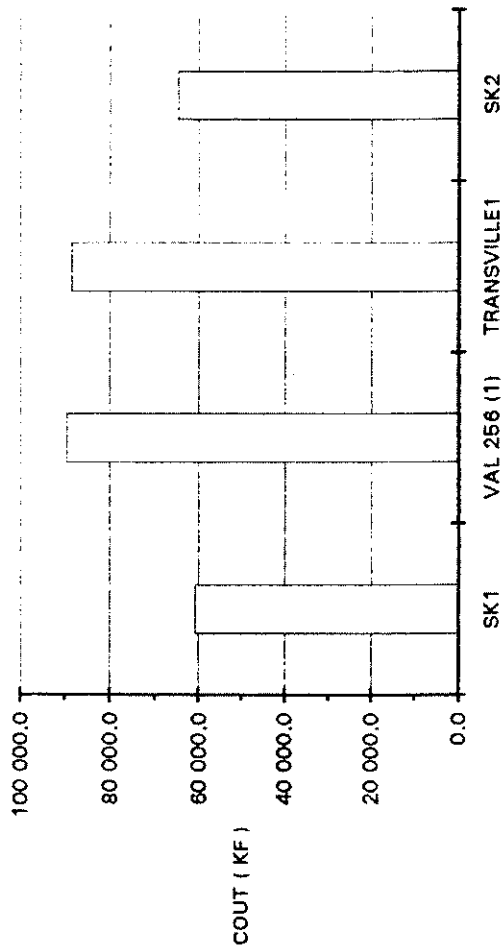
TG + EAU



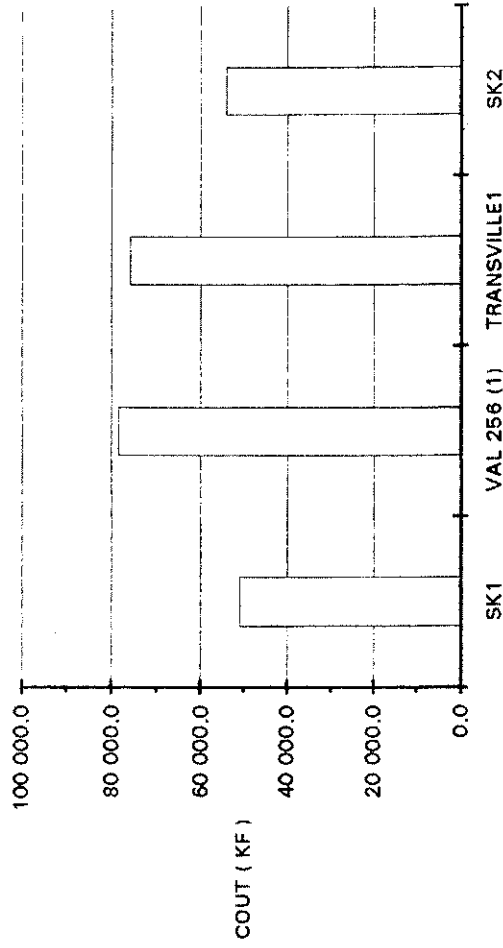
TG - EAU



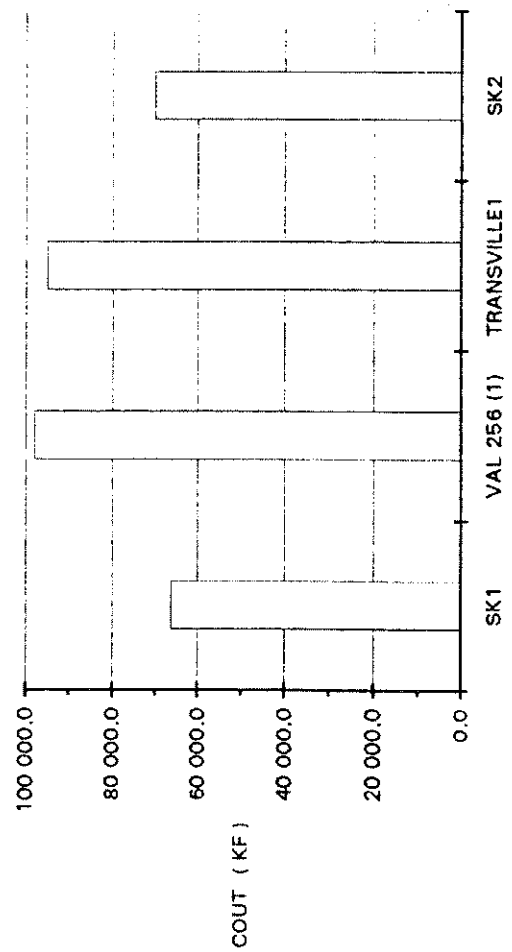
TC + EAU ( longueur entraxe = 400 m )



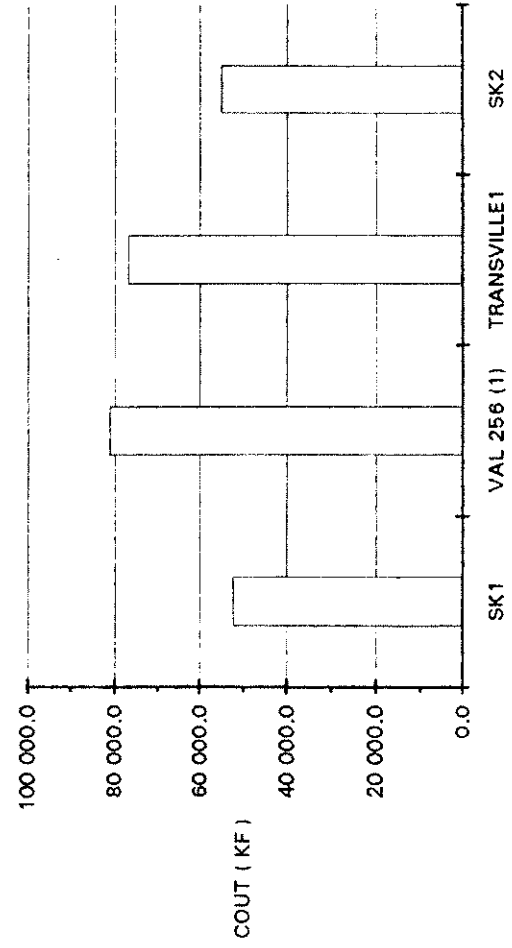
TC - EAU



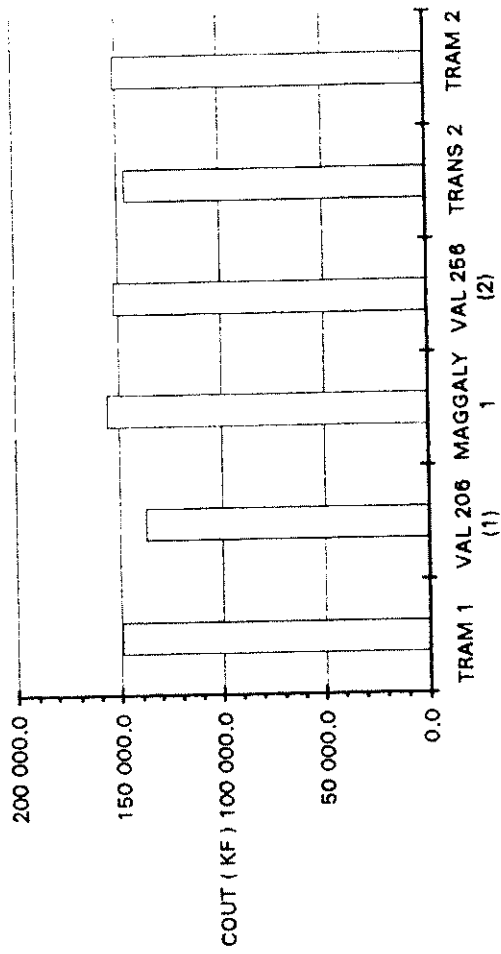
TG + EAU



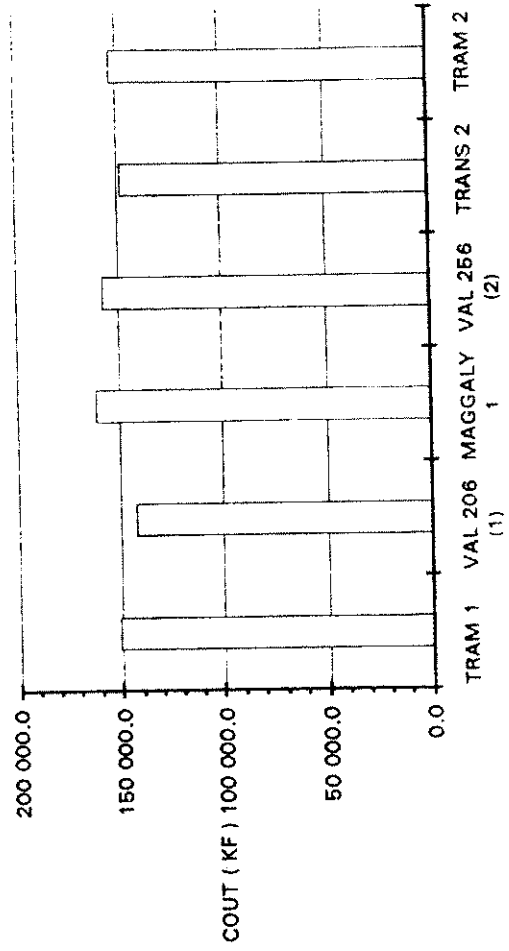
TG - EAU



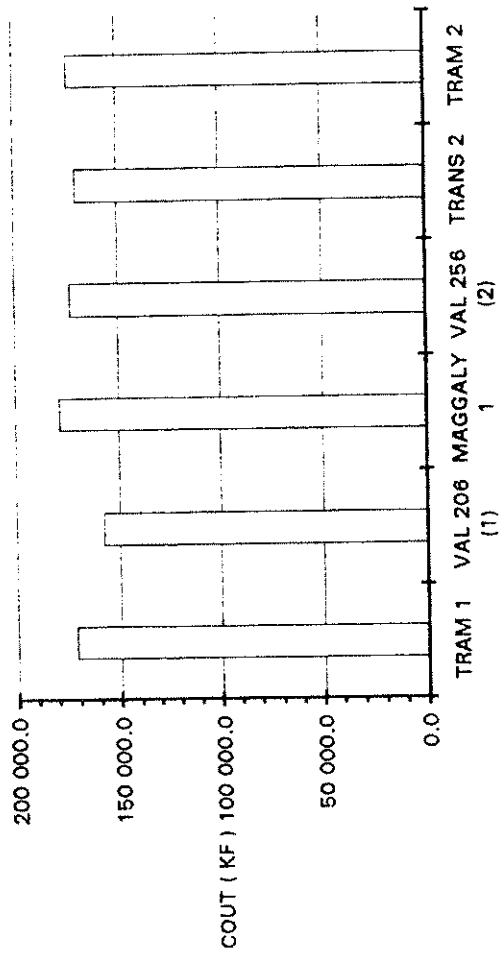
TC - EAU



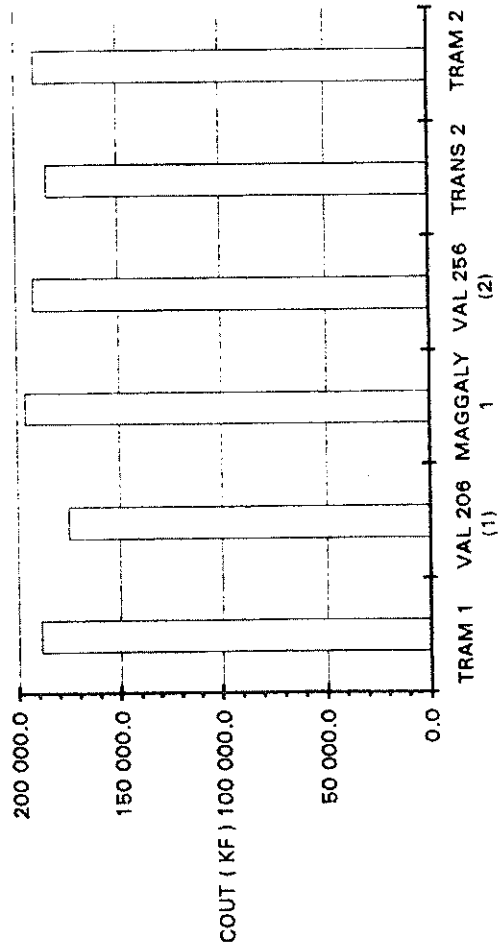
TG - EAU



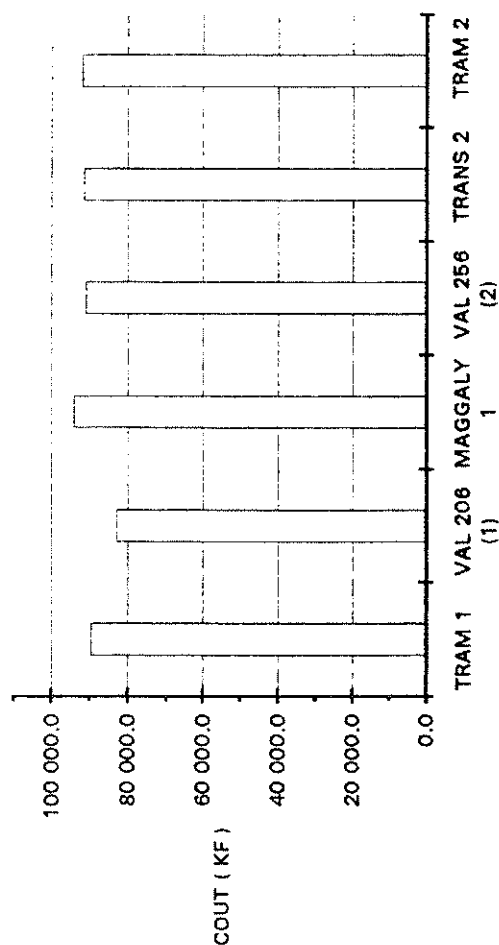
TC + EAU (longueur entraxe = 800 m)



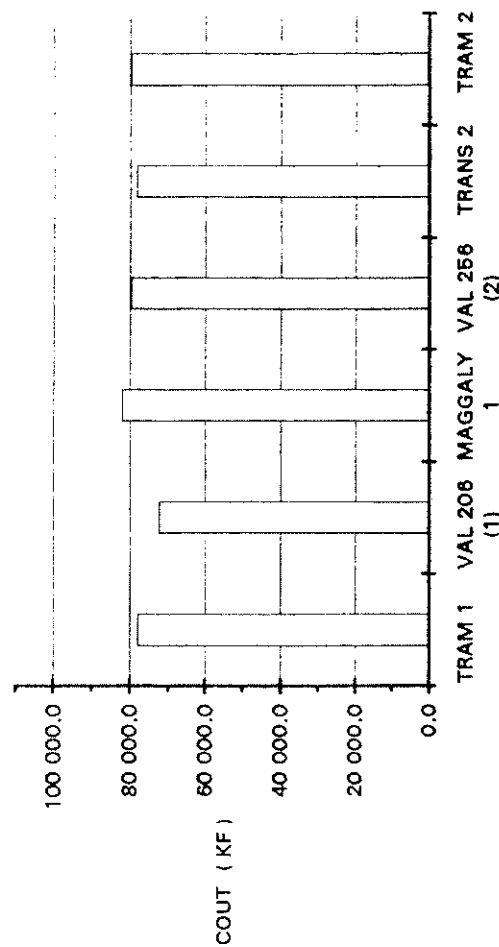
TG + EAU



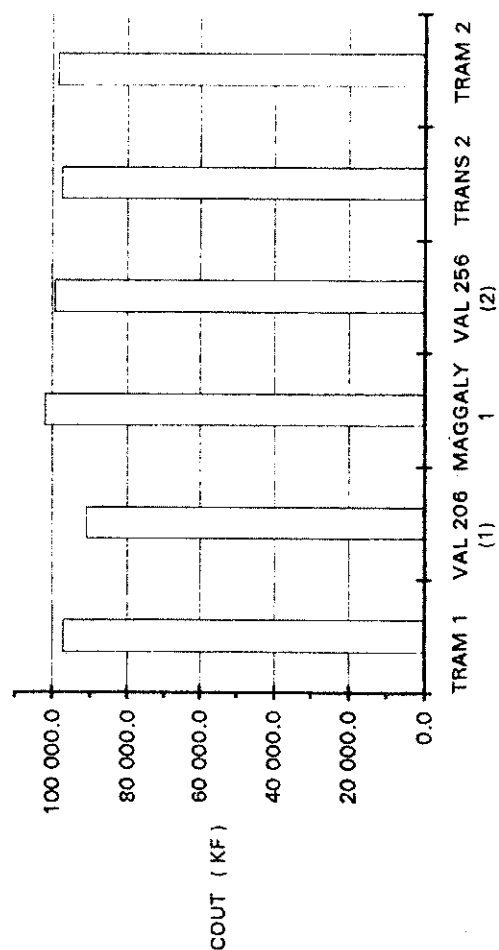
TC + EAU (longueur entraxe = 400 m)



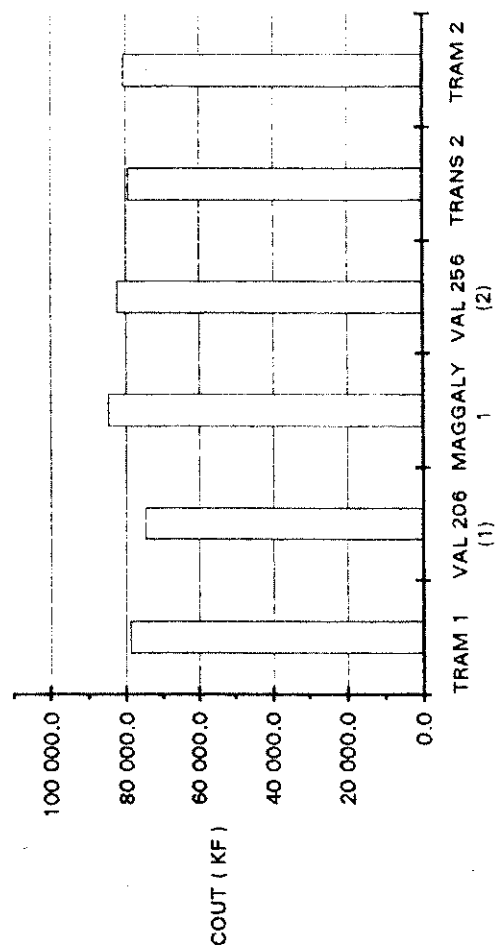
TC - EAU



TG + EAU

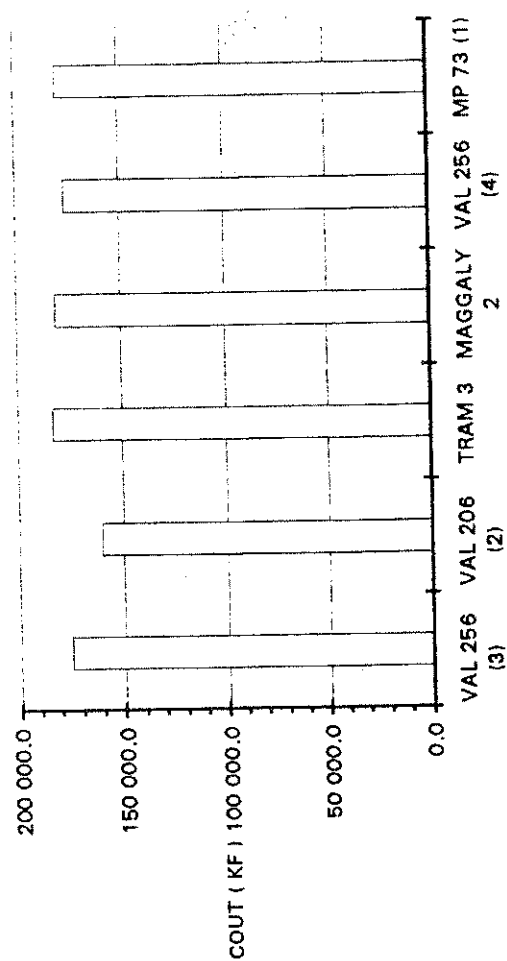


TG - EAU

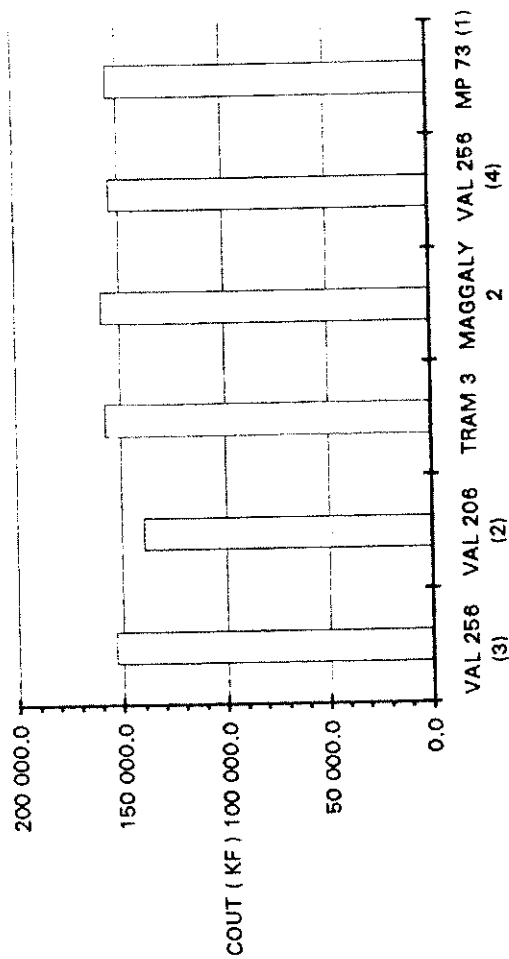




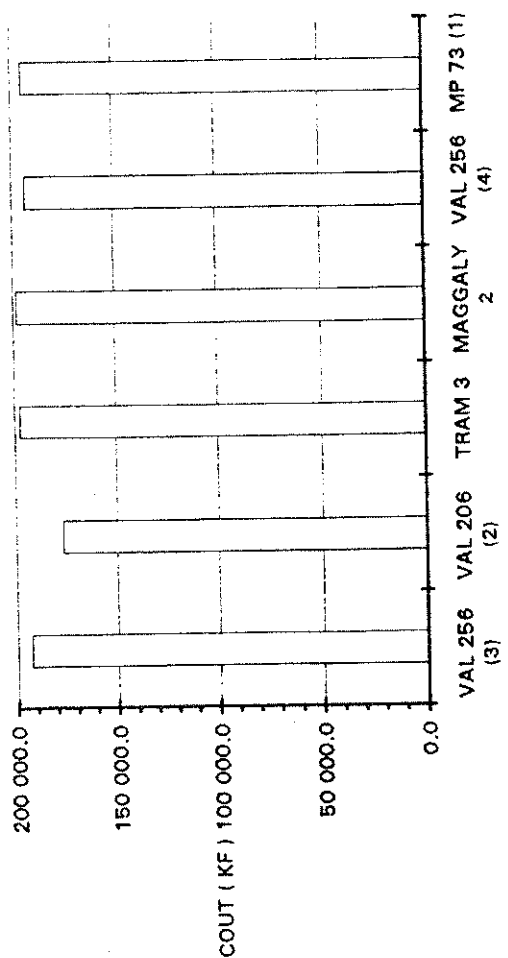
TC + EAU ( longueur entraxe = 800 m )



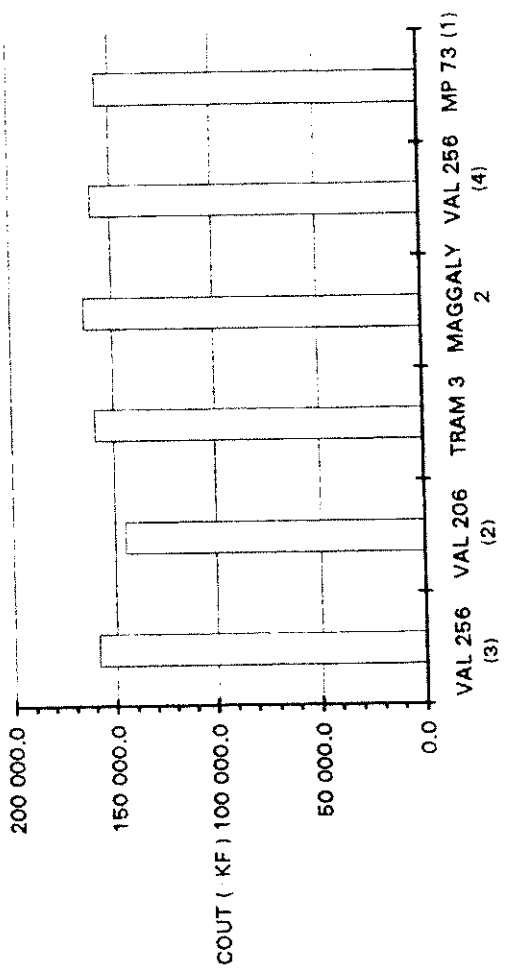
TC - EAU



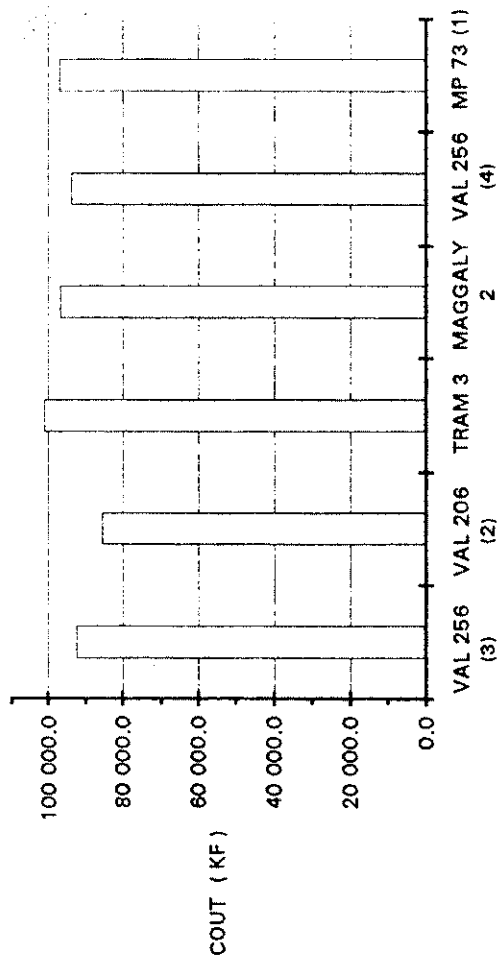
TG + EAU



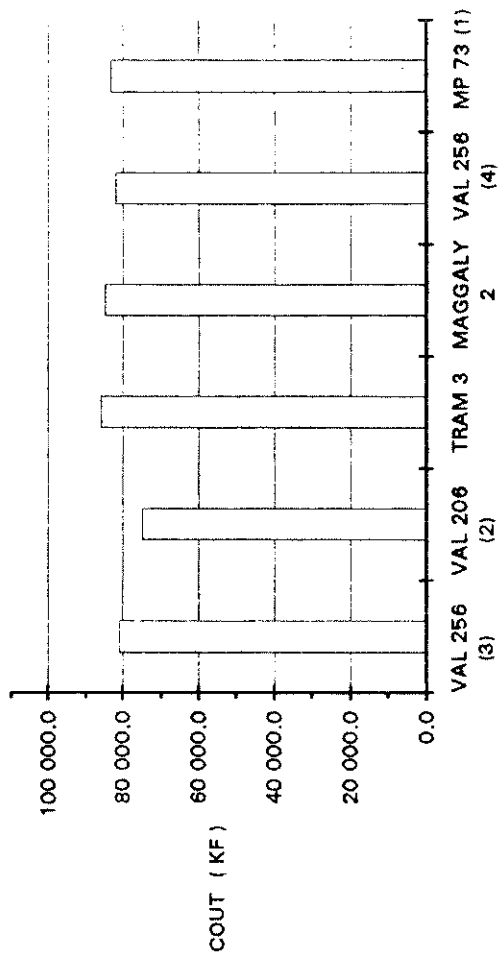
TG - EAU



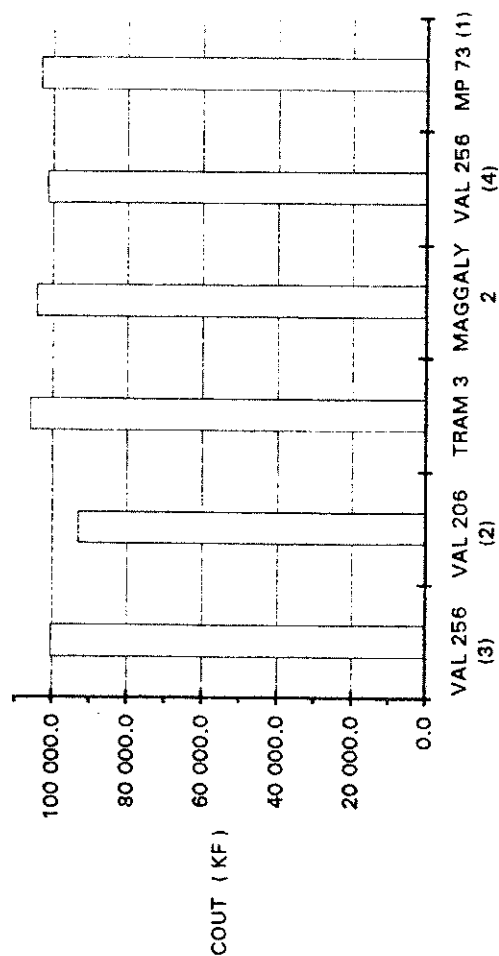
TC + EAU (longueur entraxe = 400 m)



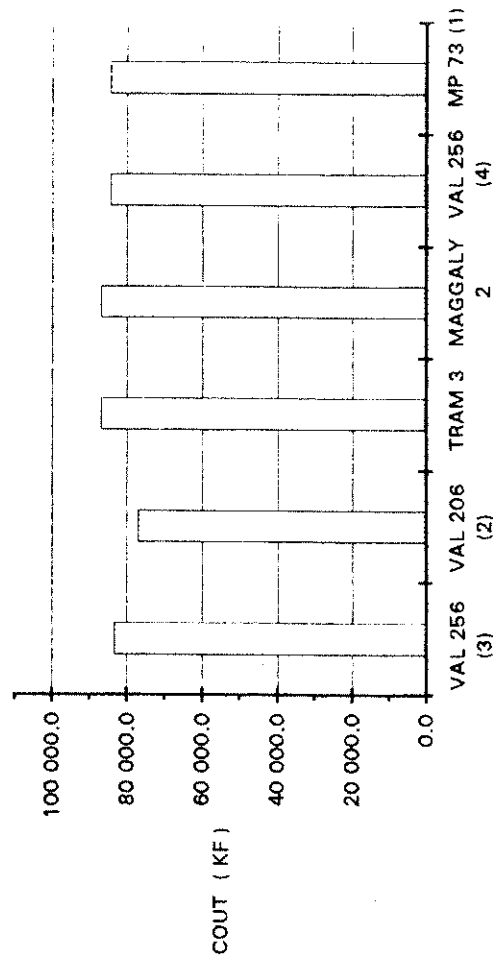
TC - EAU



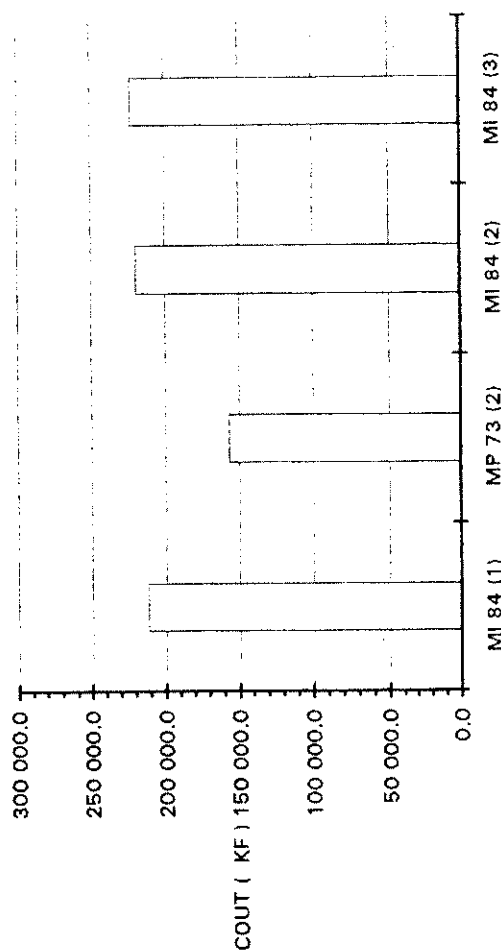
TG + EAU



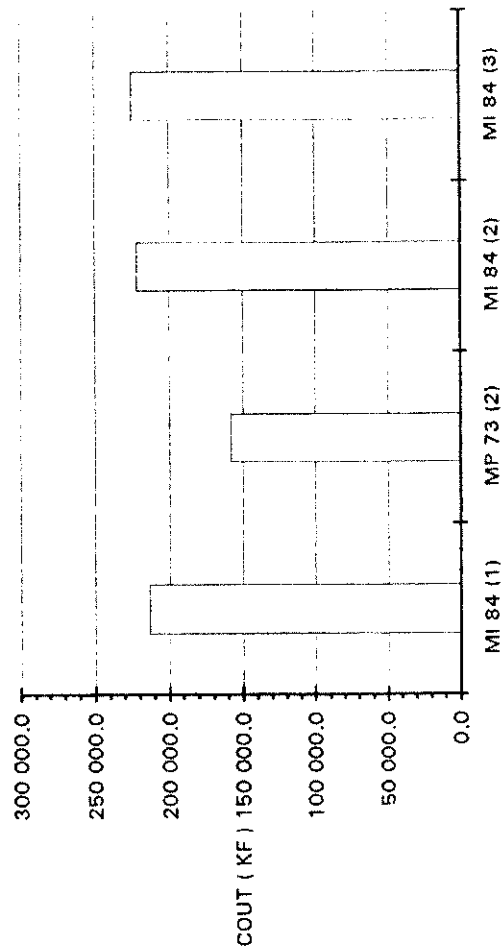
TG - EAU



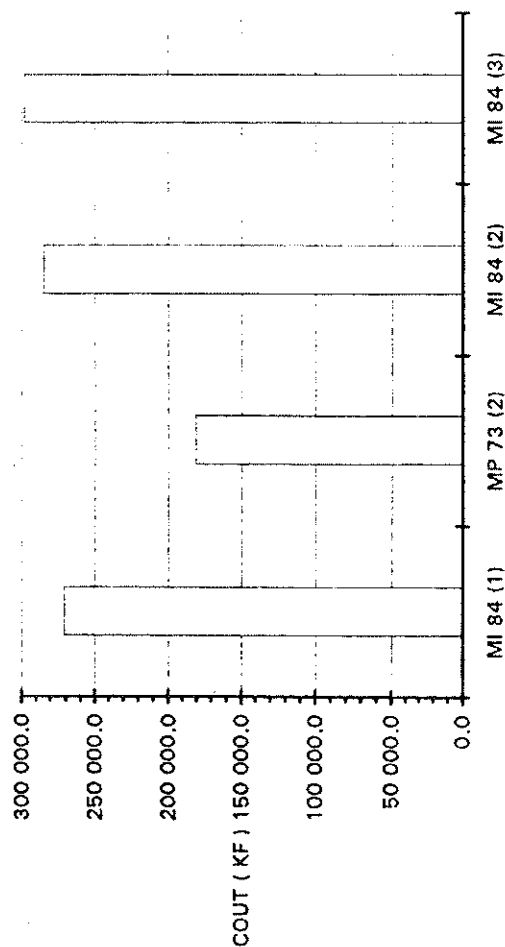
TC - EAU



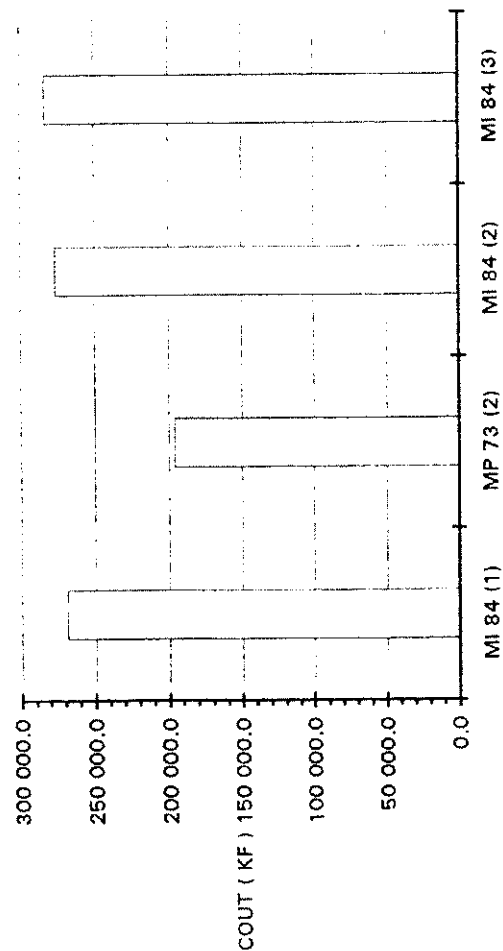
TG - EAU



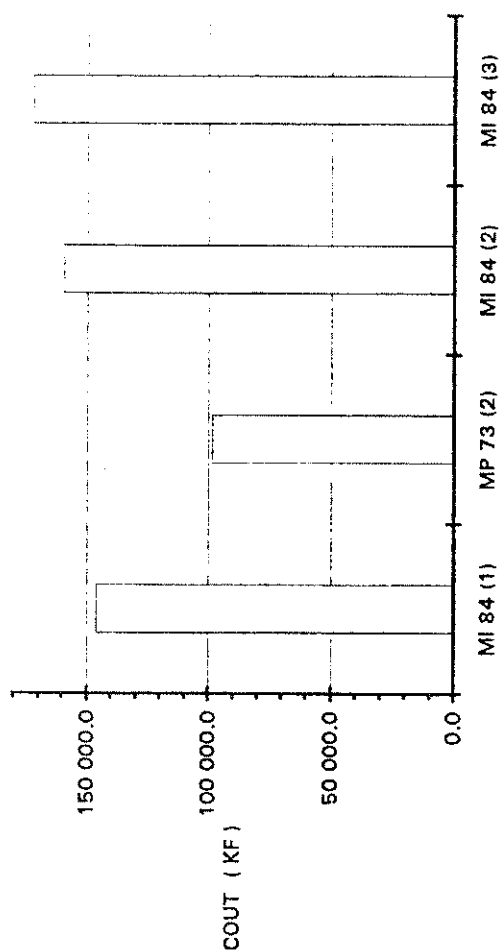
TC + EAU ( longueur entraxe = 800 m )



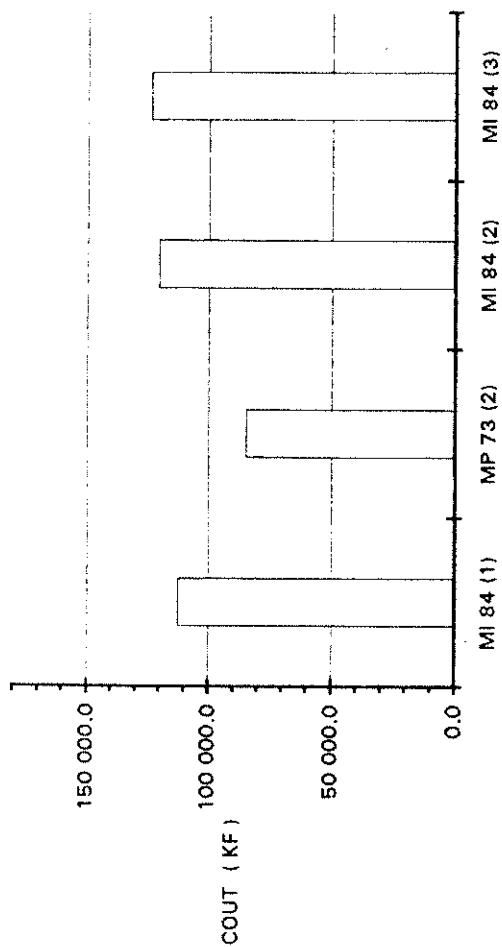
TG + EAU



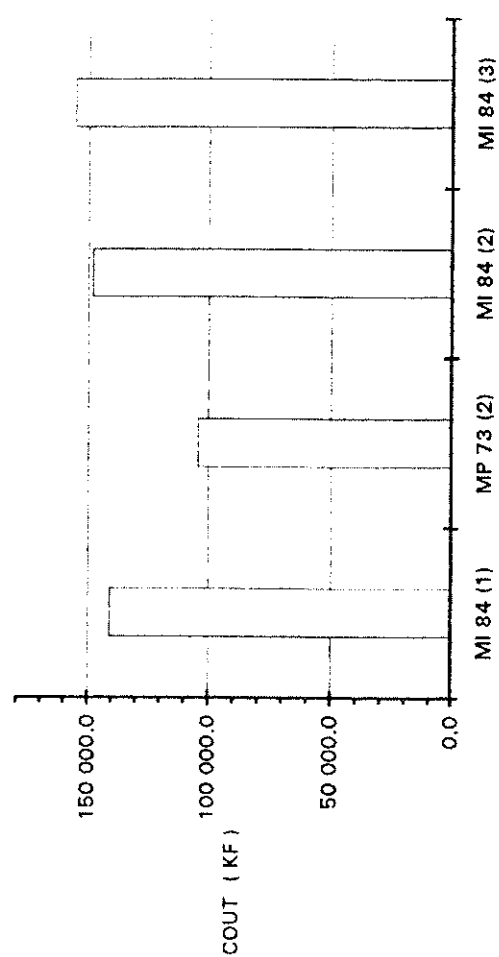
TC + EAU (longueur entraxe = 400 m)



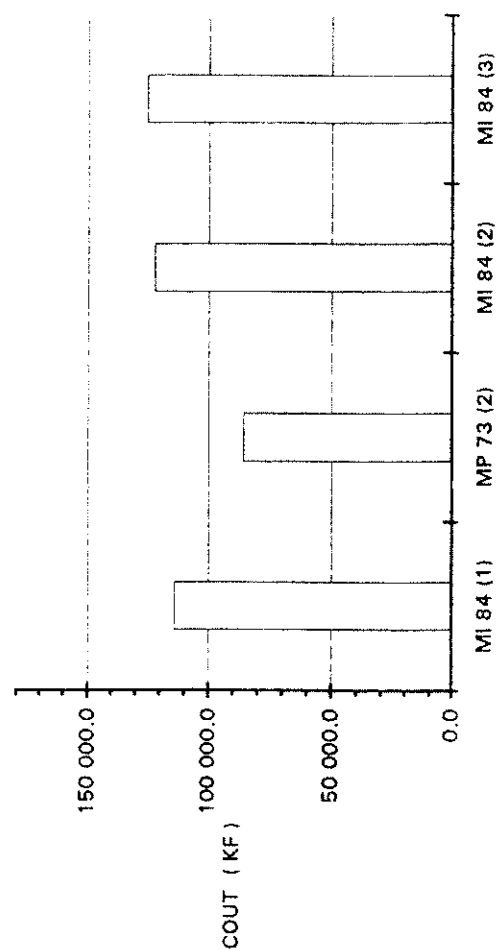
TC - EAU



TG + EAU



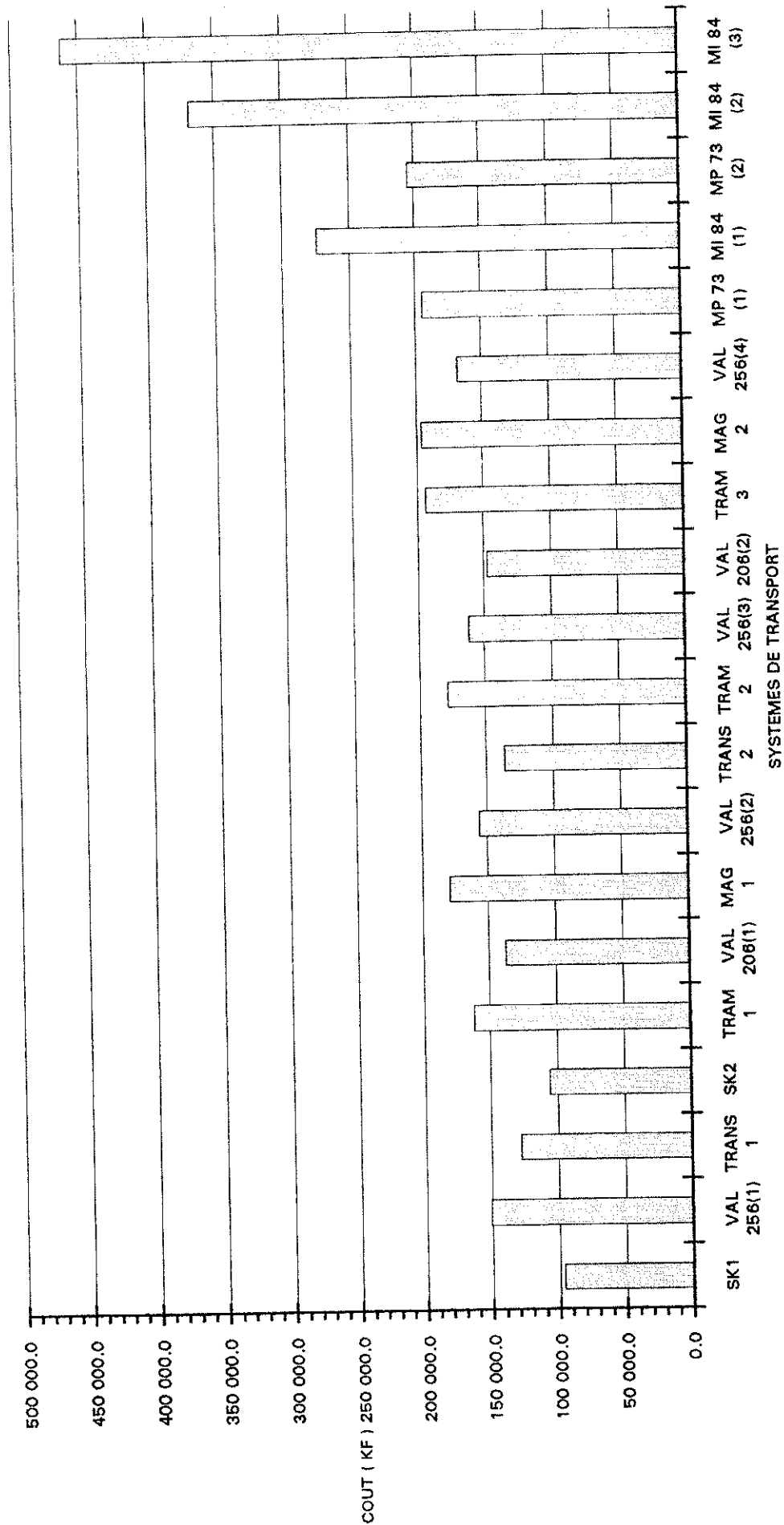
TG - EAU



#### 4.4.3 Travaux au tunnelier

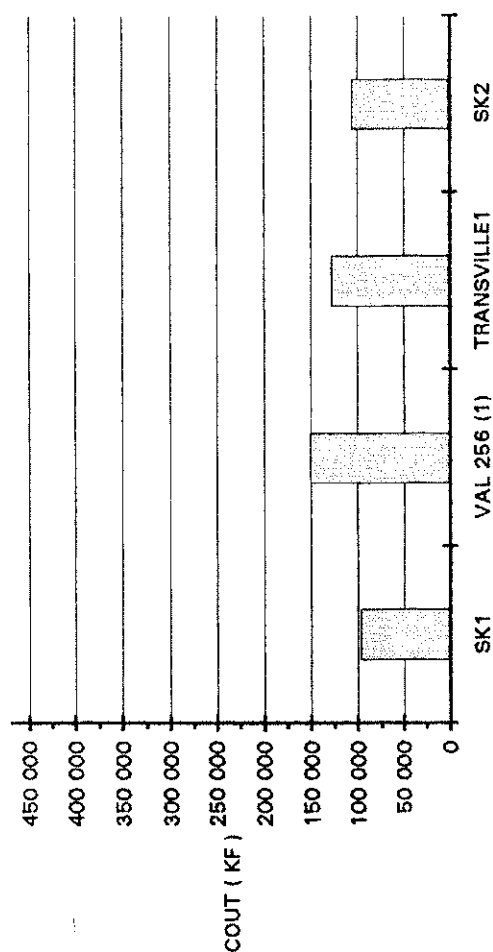
Tableau général: histogramme des coûts de génie civil dans un terrain granulaire avec de l'eau d'une interstation de 800 mètres.

### TUNNELIER

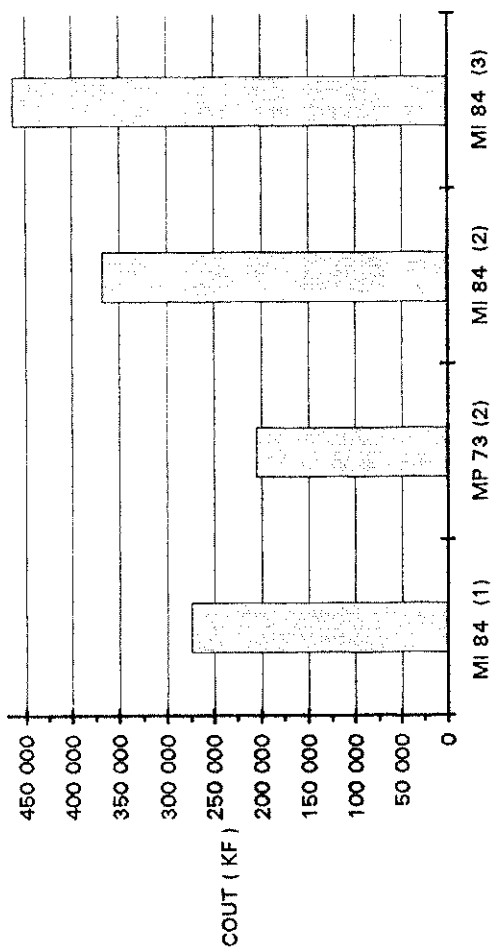


AFME : tunnelier ( longueur entraxe = 800 m )

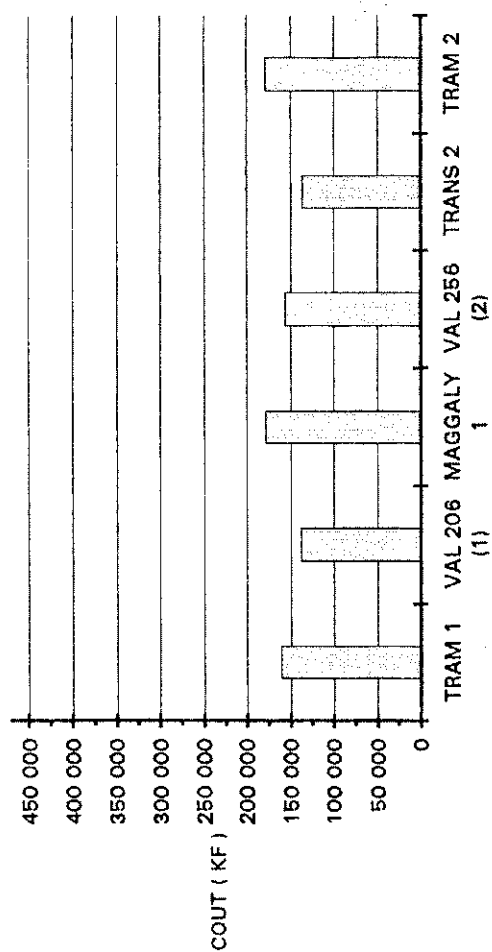
catégorie 0 à 6000 p/h/sens



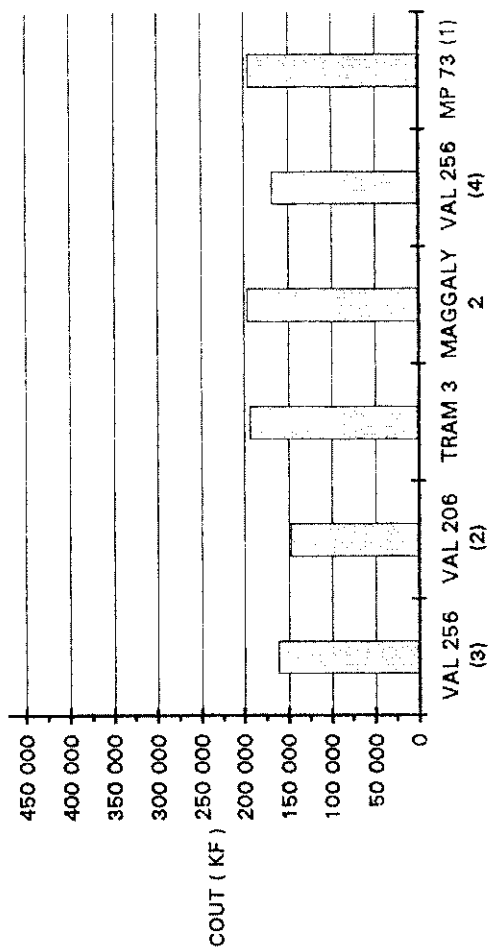
catégorie + 25000 p/h/sens



catégorie 6000 à 15000 p/h/sens

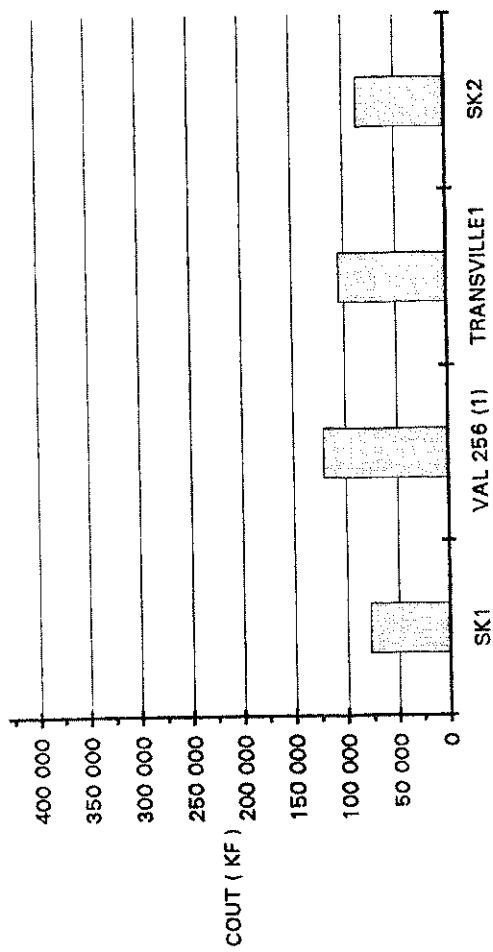


catégorie 15000 à 25000 p/h/sens

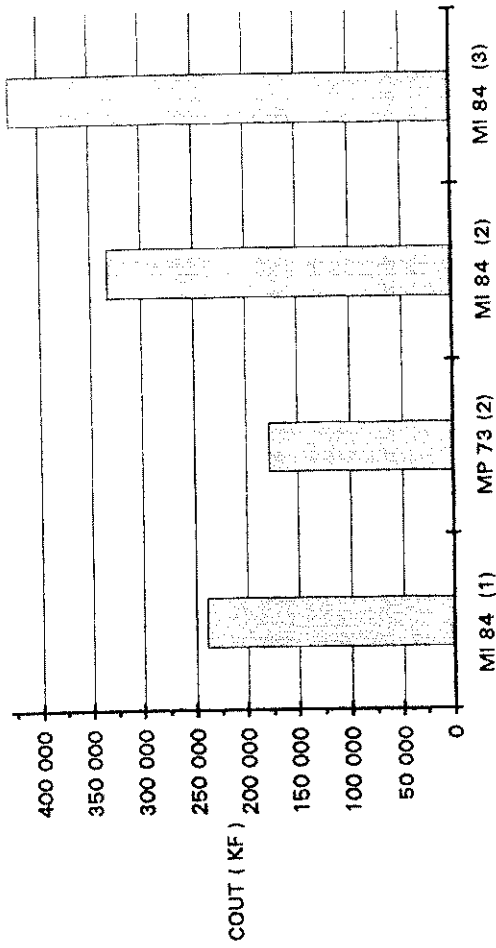


AFME : tunnelier ( longueur entraxe = 400 m )

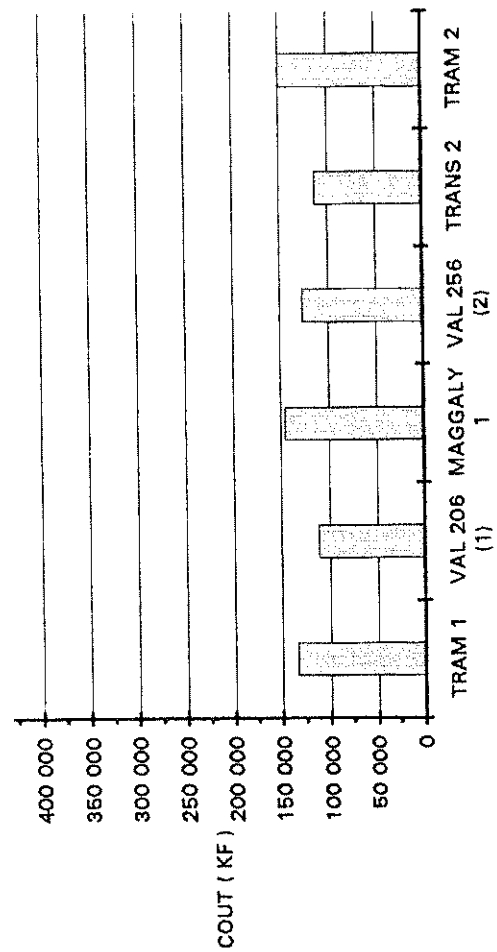
catégorie 0 à 6000 p/h/sens



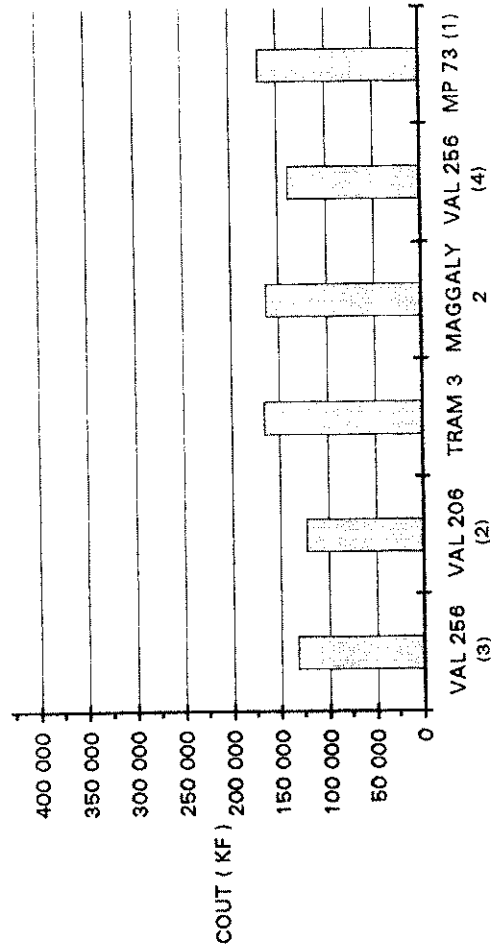
catégorie + 25000 p/h/sens



catégorie 6000 à 15000 p/h/sens



catégorie 15000 à 25000 p/h/sens

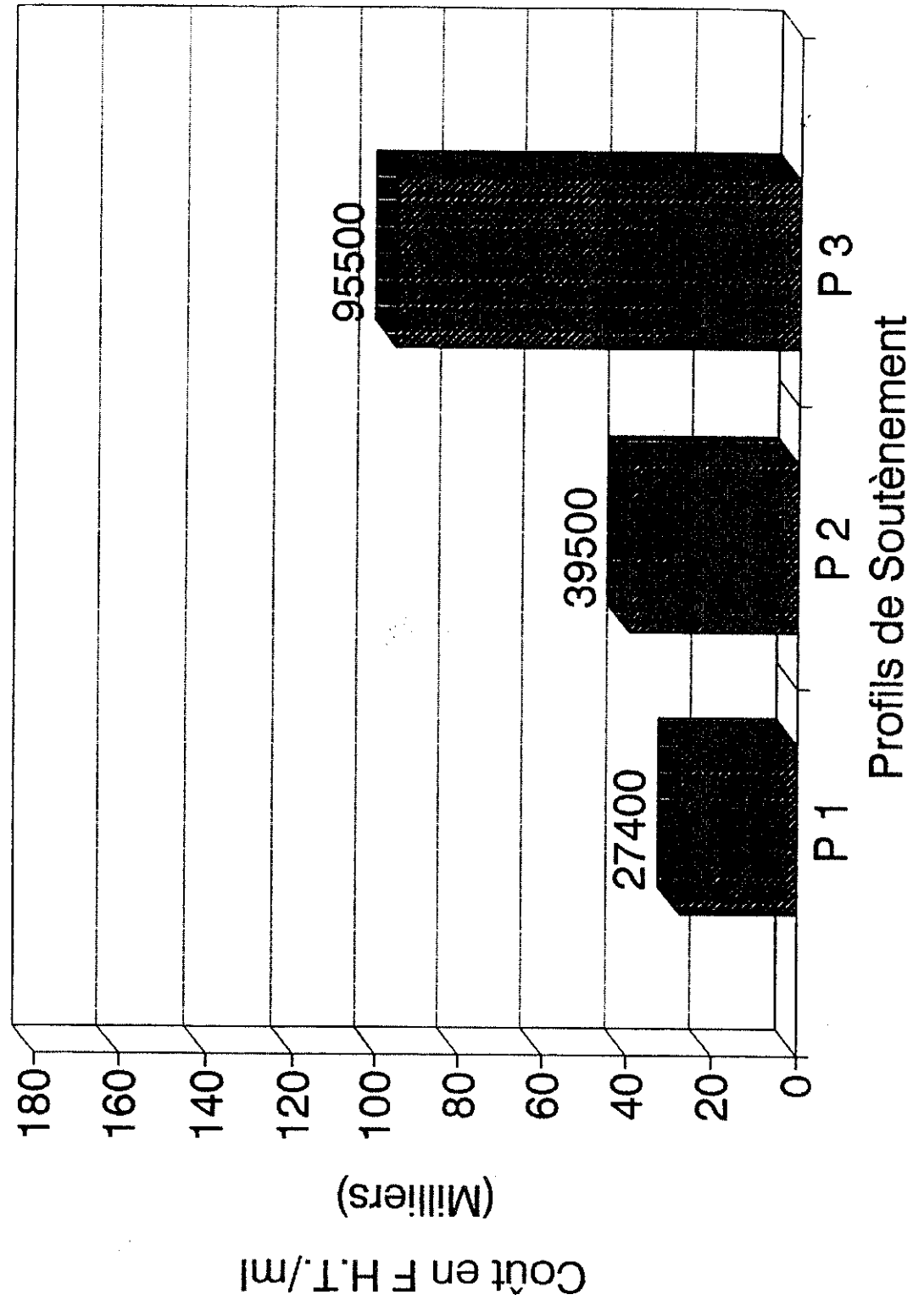


# SK 1

## Variation des Coûts

### 4.4. 5 Tunnel traditionnel

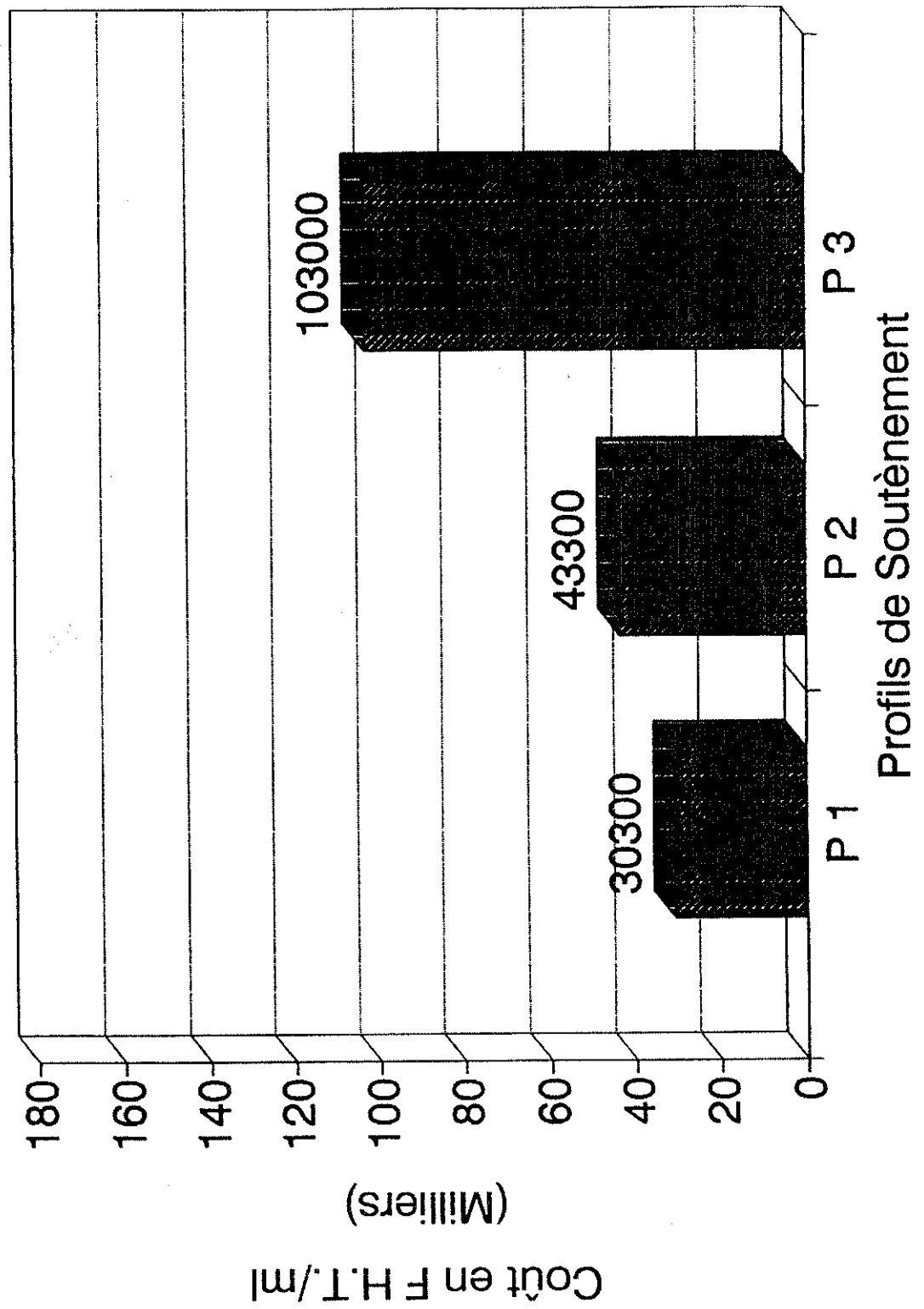
Histogramme des coûts du tunnel selon les trois profils





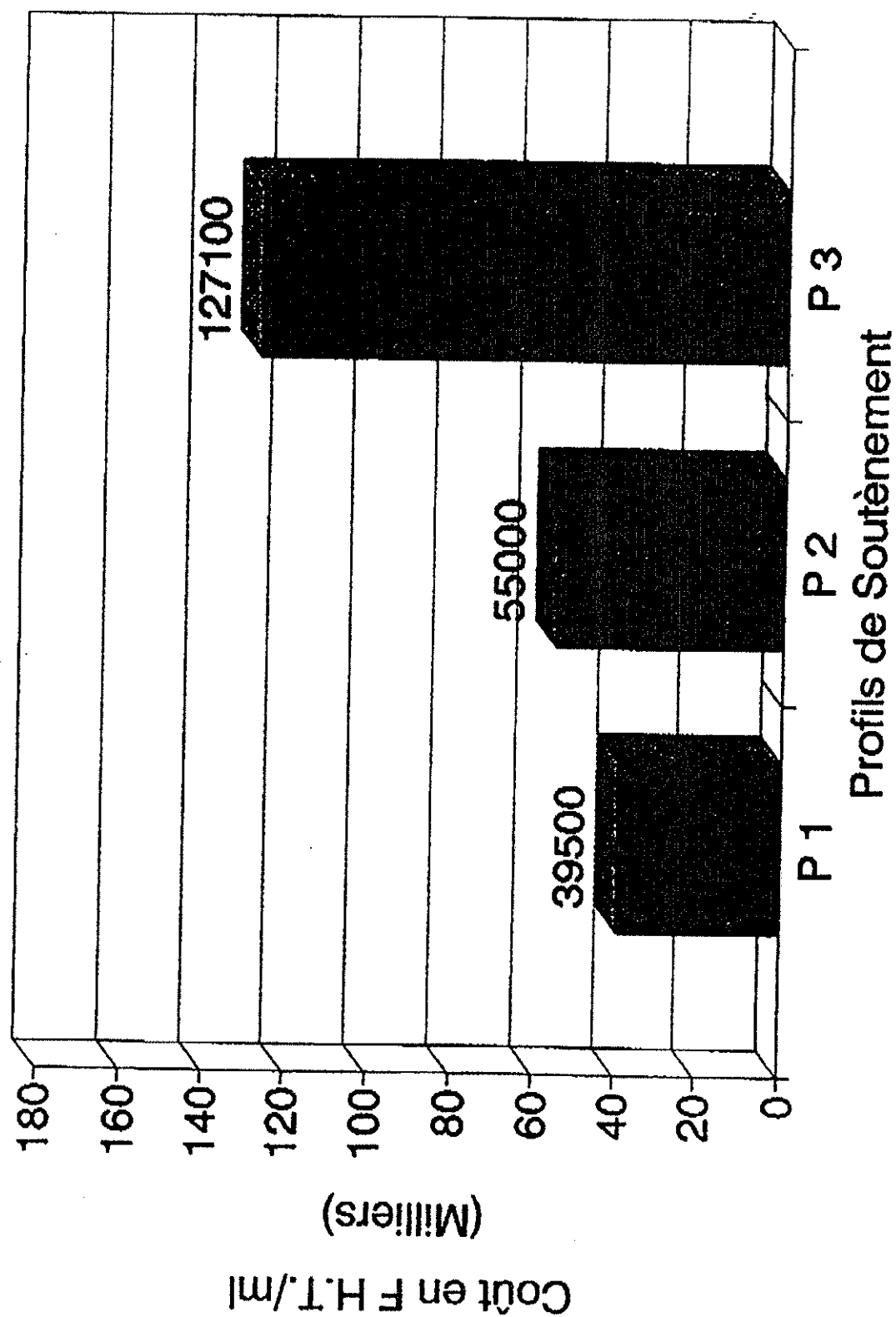
# SK 2

## Variation des Coûts



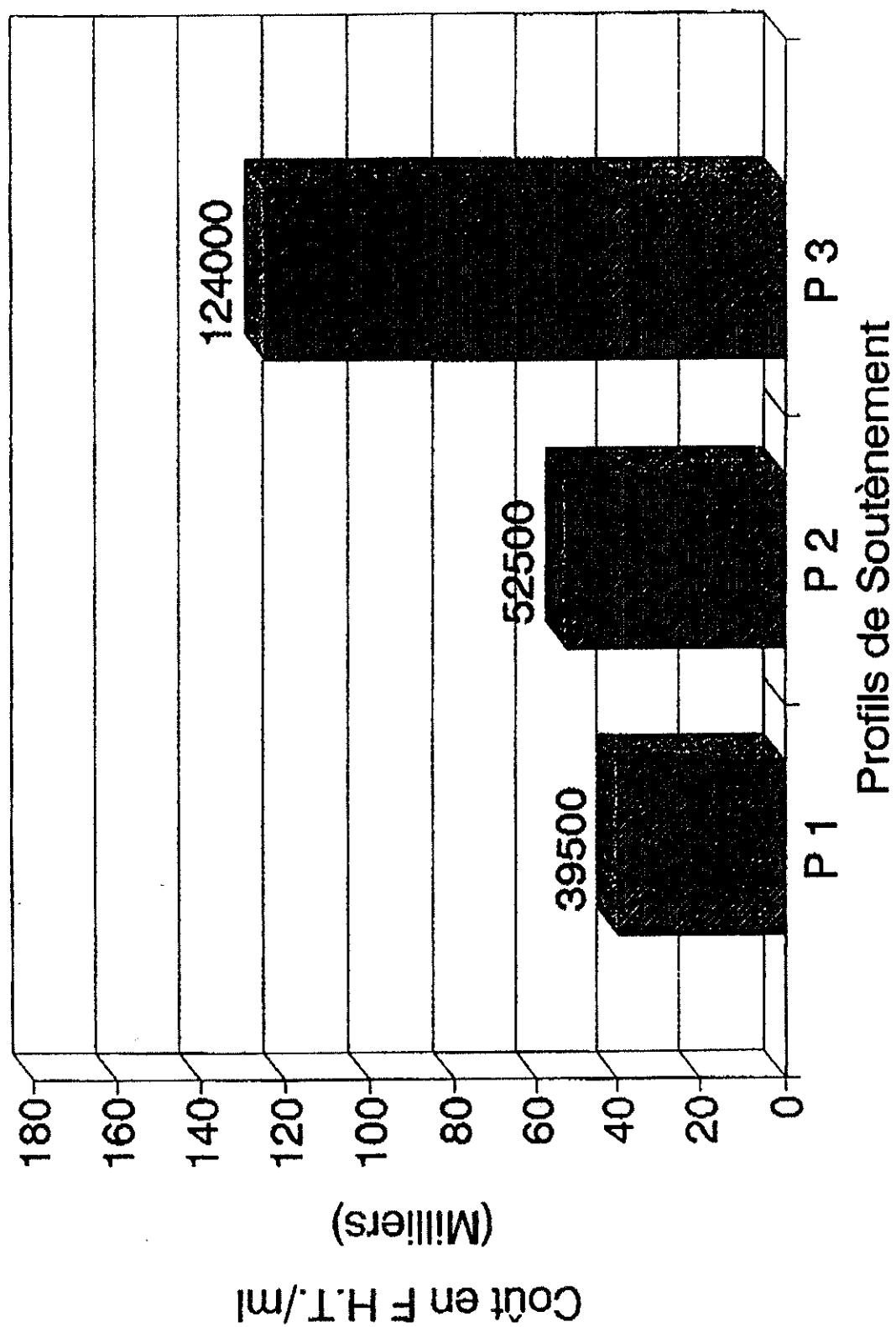
# TRANSVILLE

## Variation des Coûts



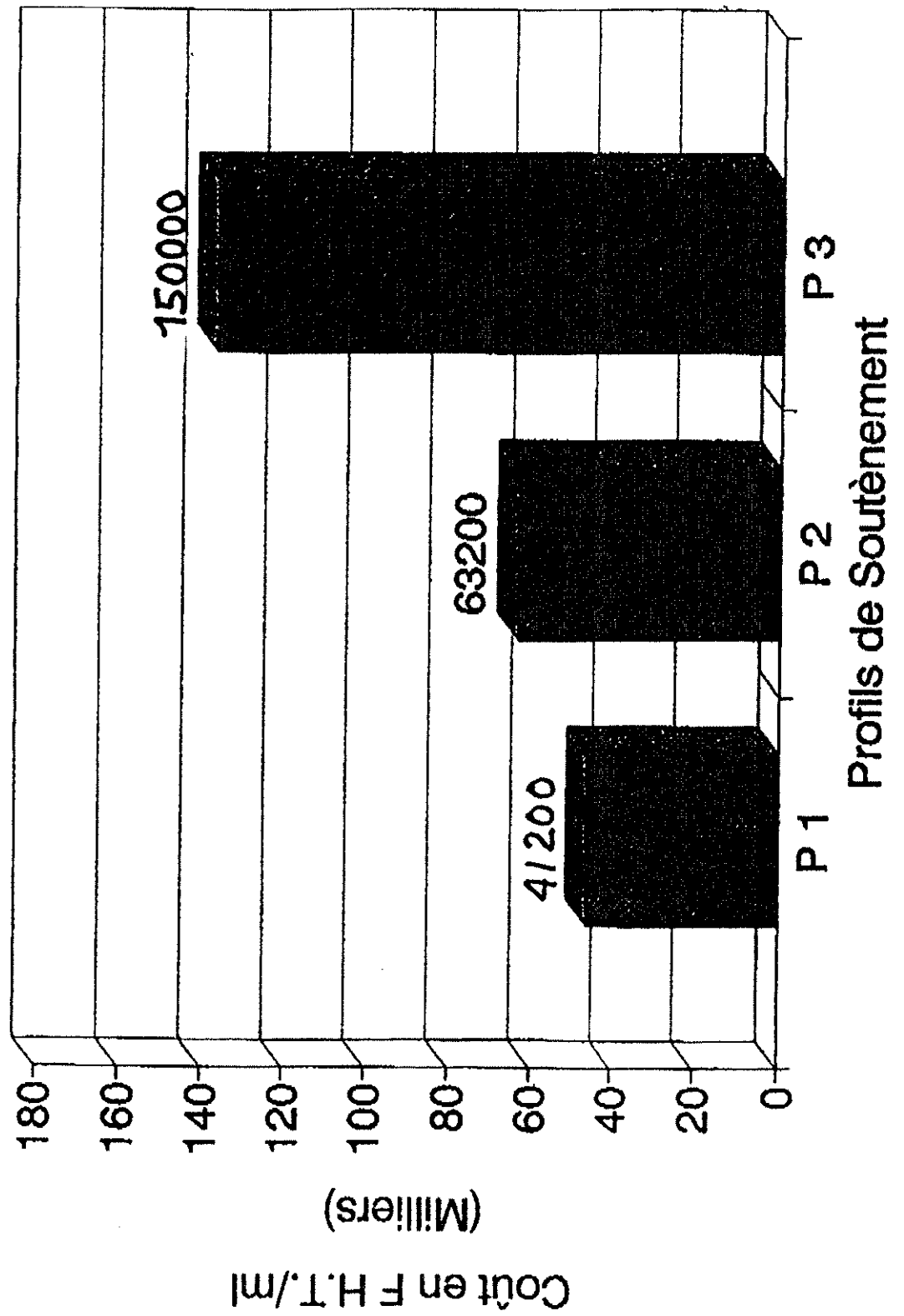
# VAL 206

## Variation des Coûts



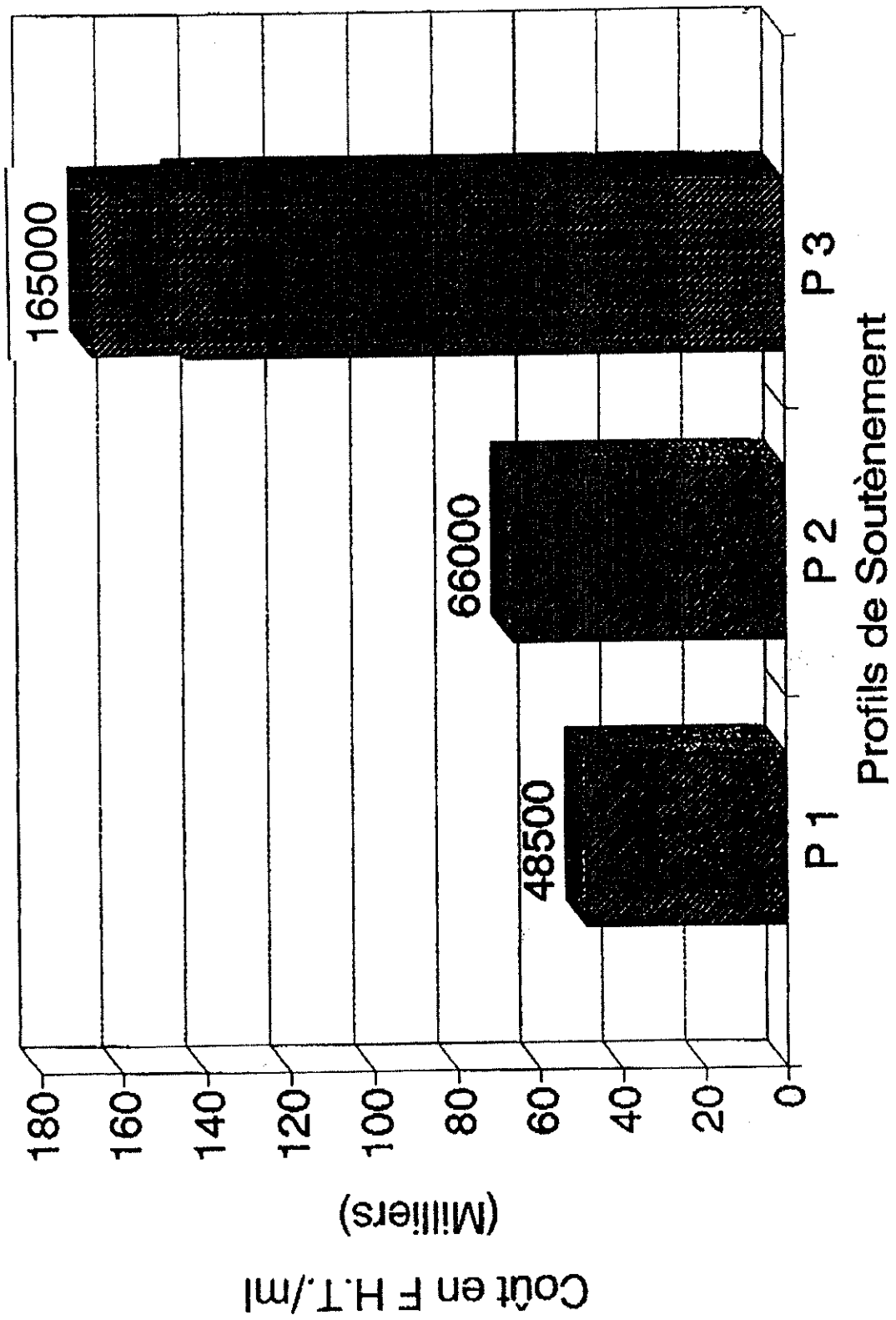
# VAL 256

## Variation des Coûts



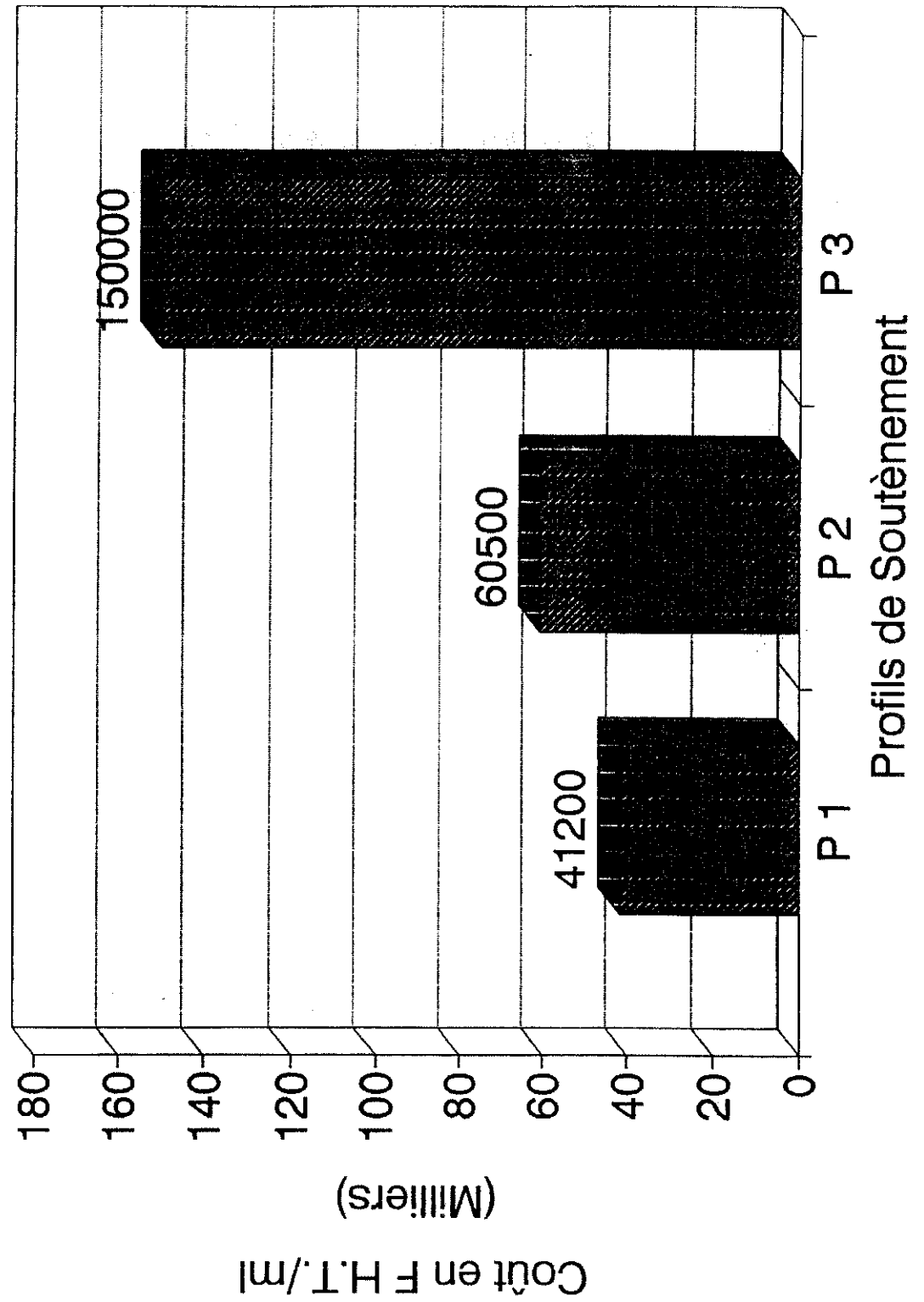
# MAGALY

## Variation des Coûts



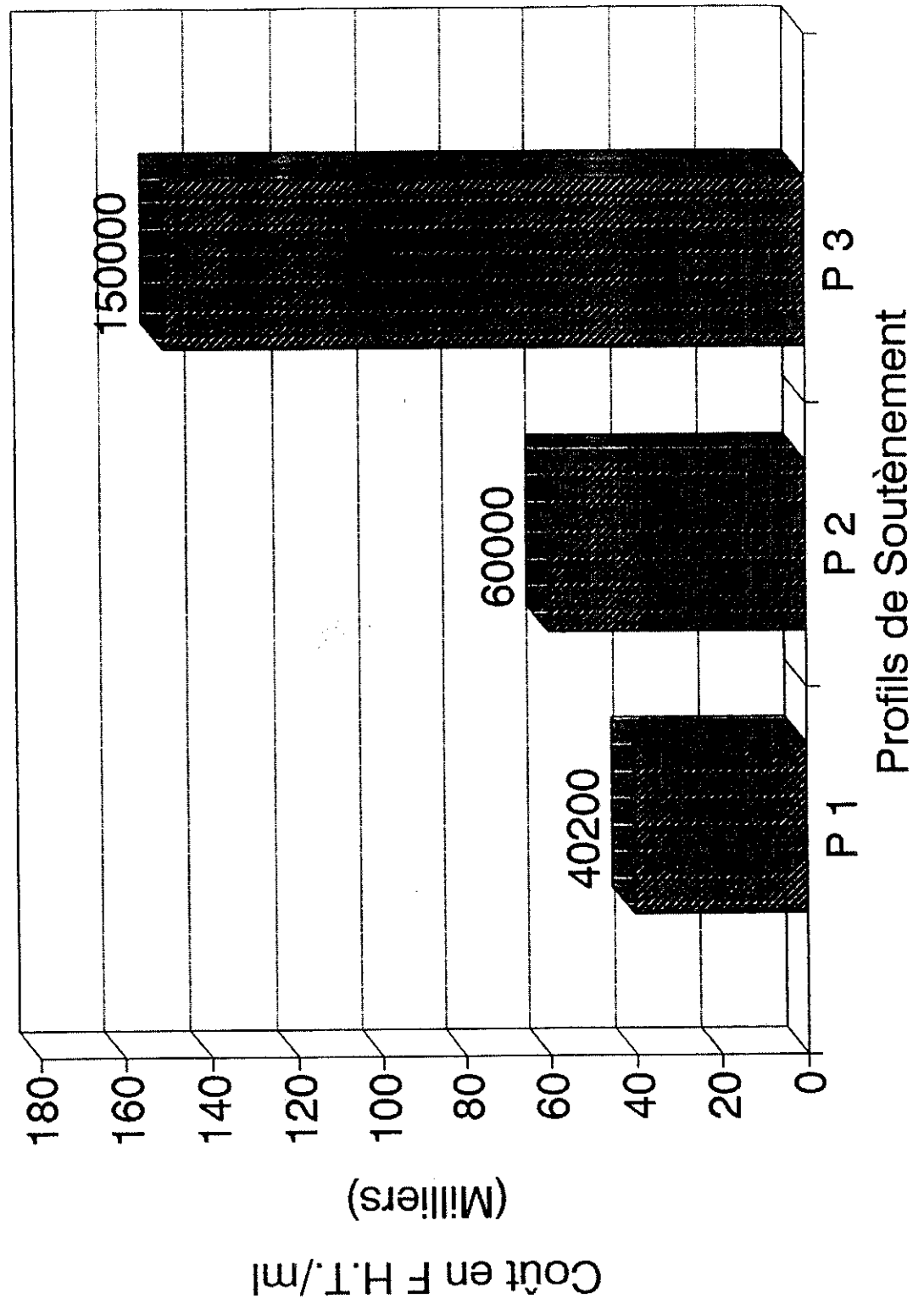
# TRAMWAY

## Variation des Coûts



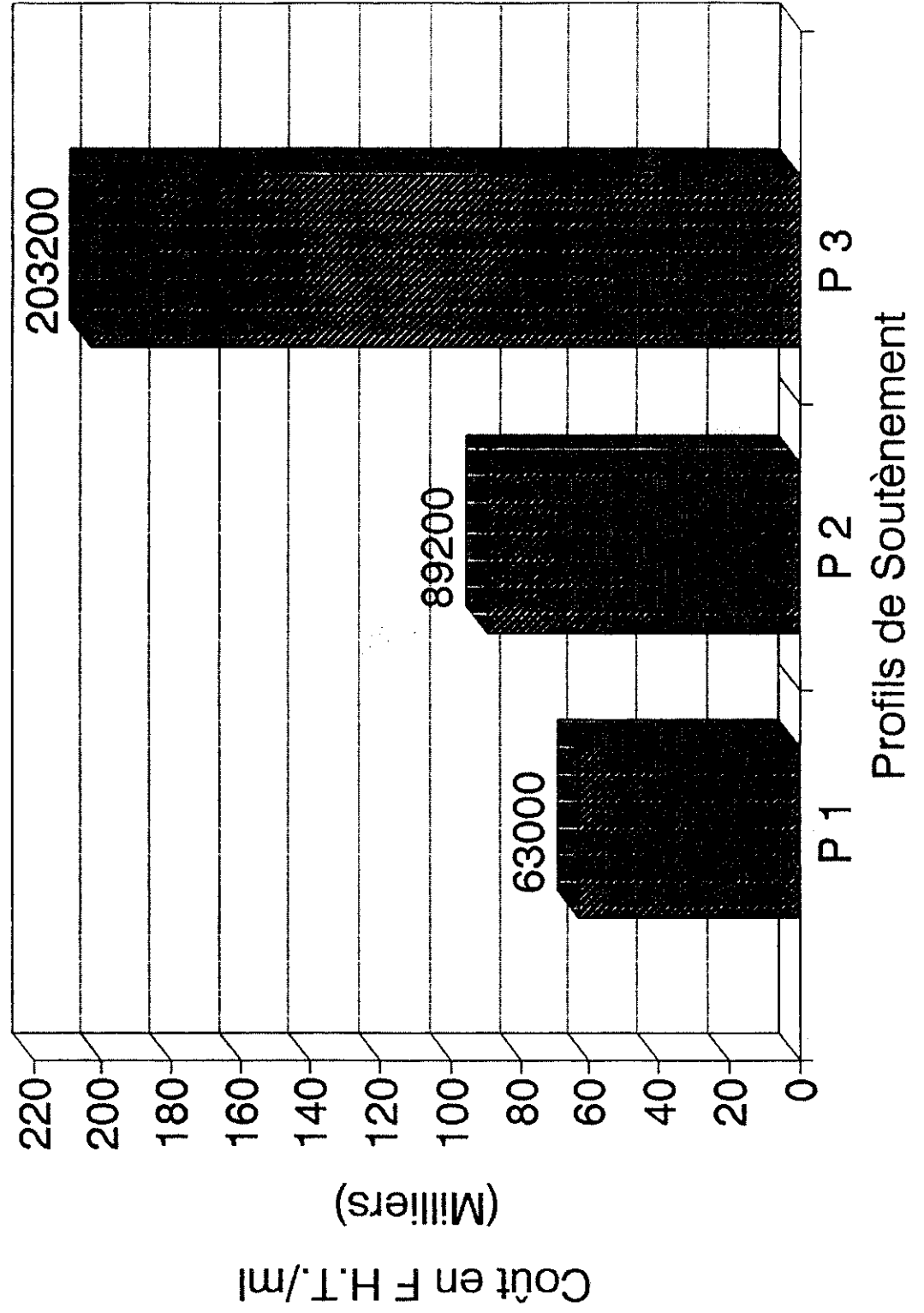
# MP 73

## Variation des Coûts



# MI 84

## Variation des Coûts

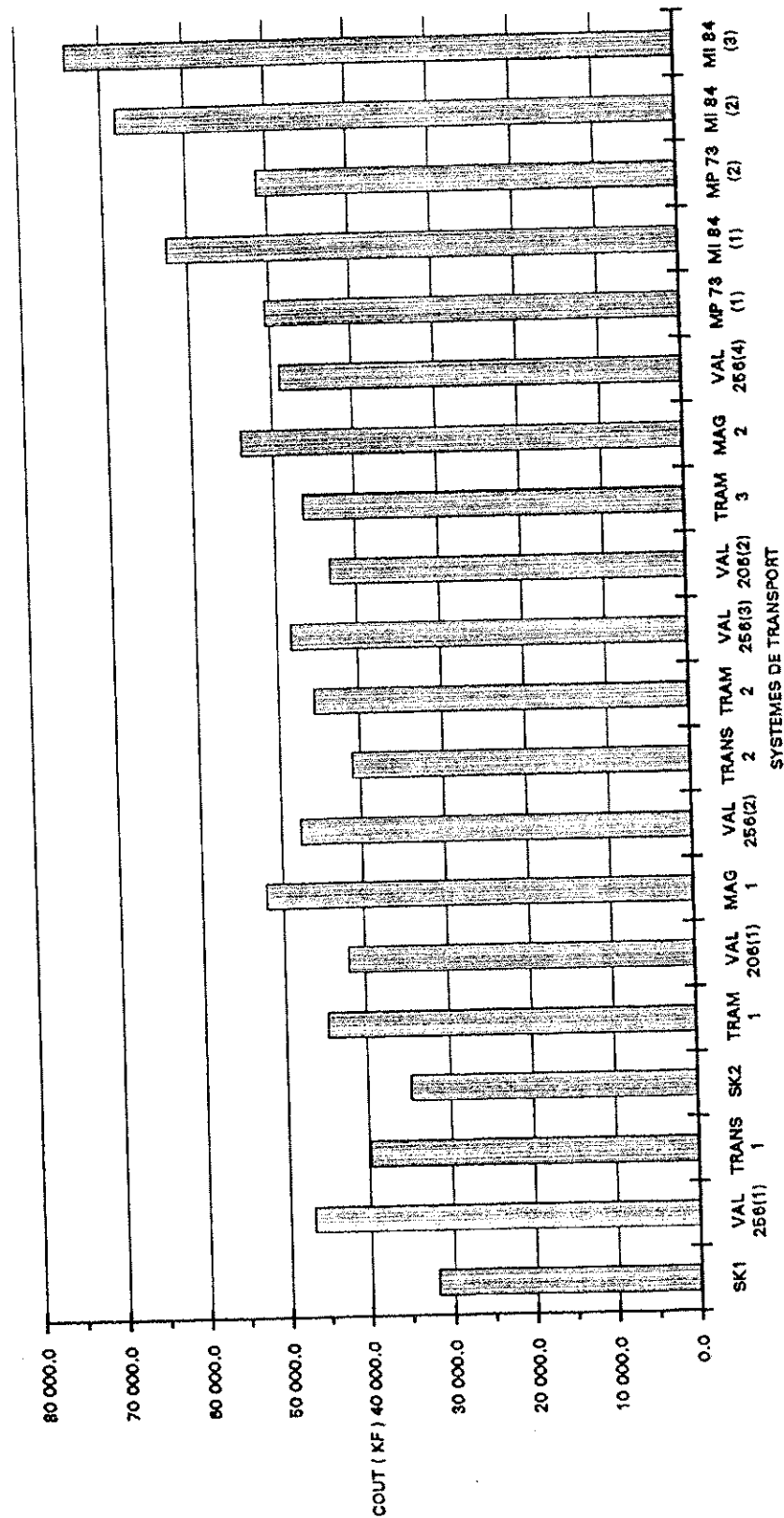




#### 4.4.6 Viaduc

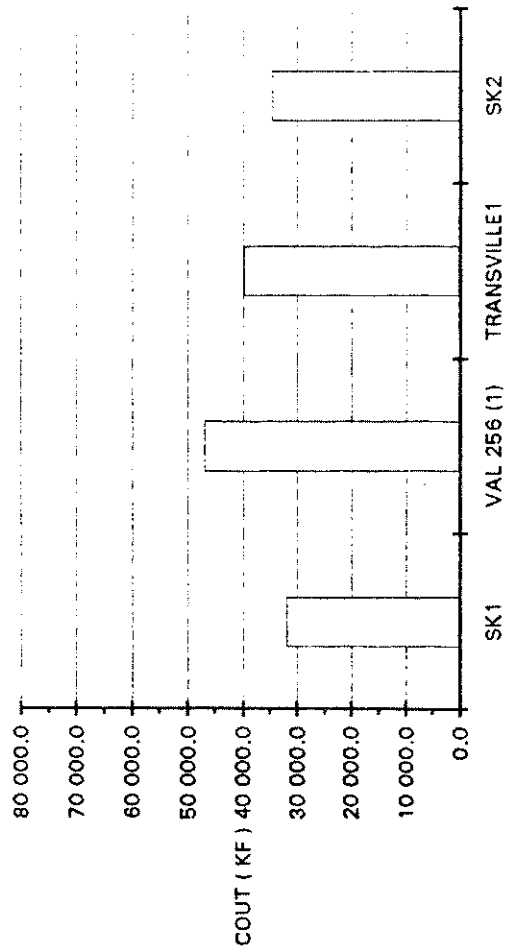
Tableau général: histogramme des coûts de génie civil dans un terrain granulaire avec de l'eau d'une interstation de 800 mètres.

#### VIADUC

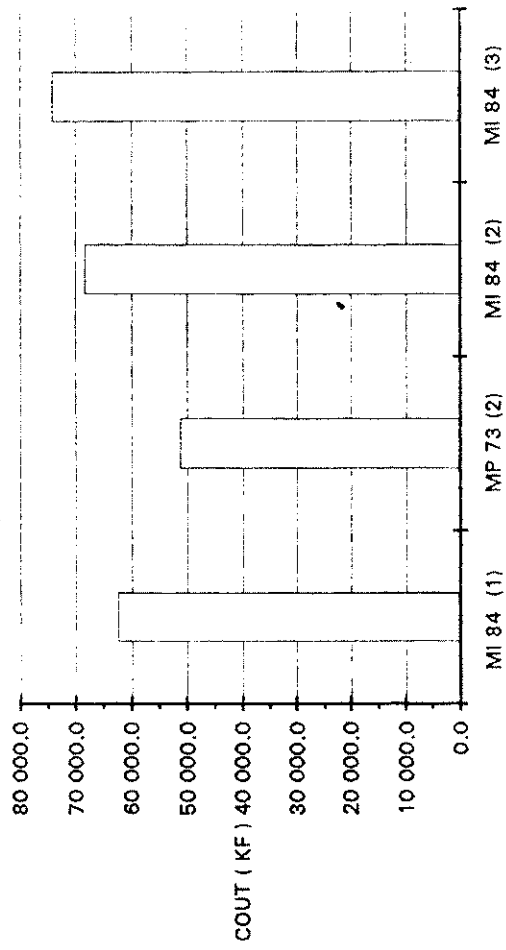


AFME : viaduc ( longueur entraxe = 800 m )

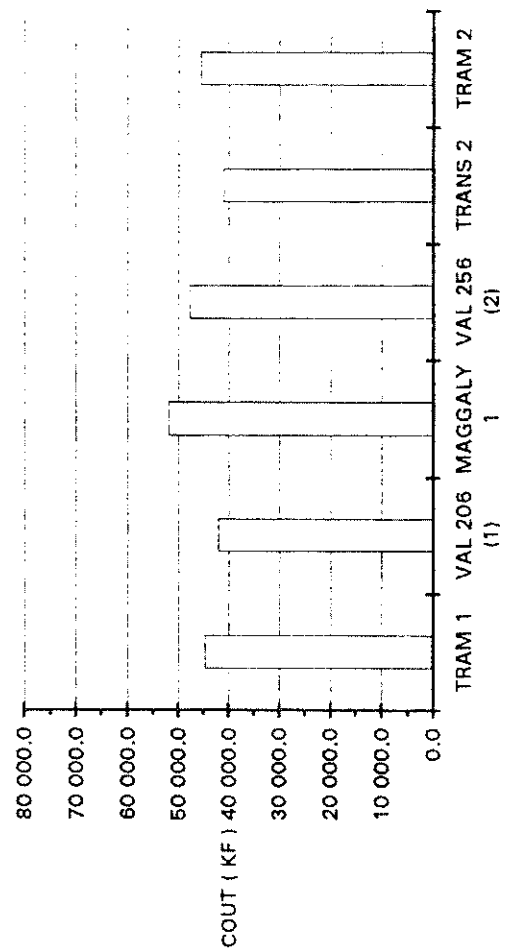
catégorie 0 à 6000 p/h/sens



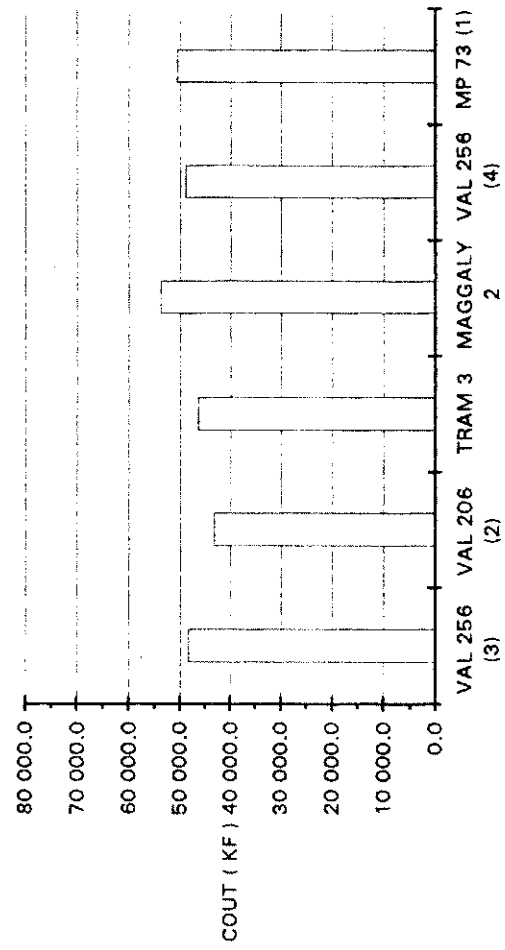
catégorie + 25000 p/h/sens



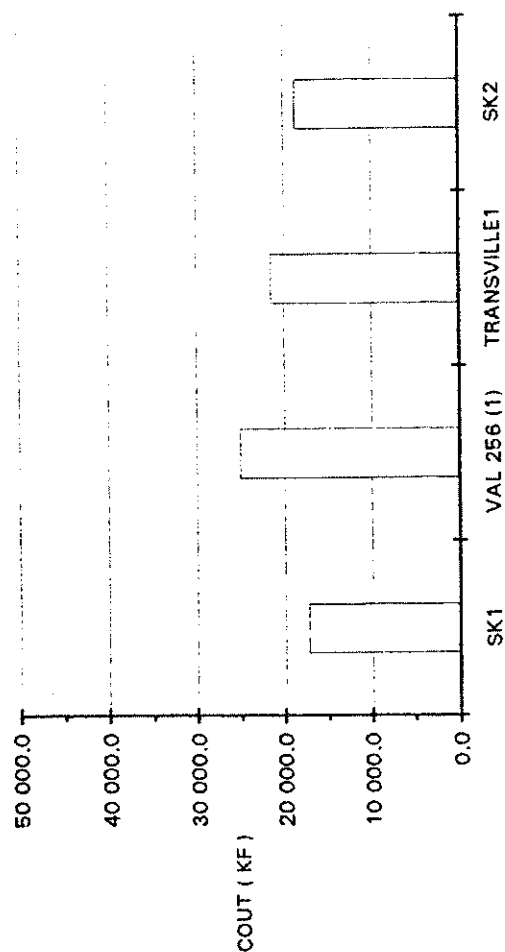
catégorie 6000 à 15000 p/h/sens



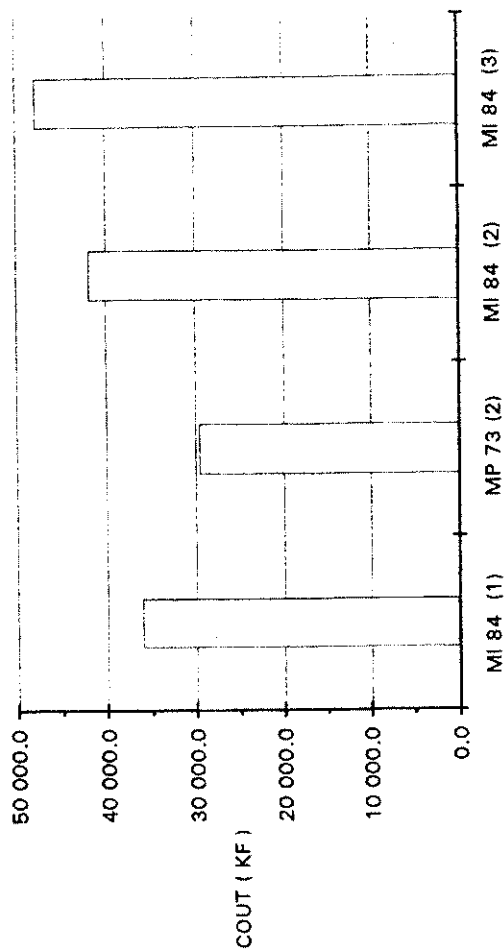
catégorie 15000 à 25000 p/h/sens



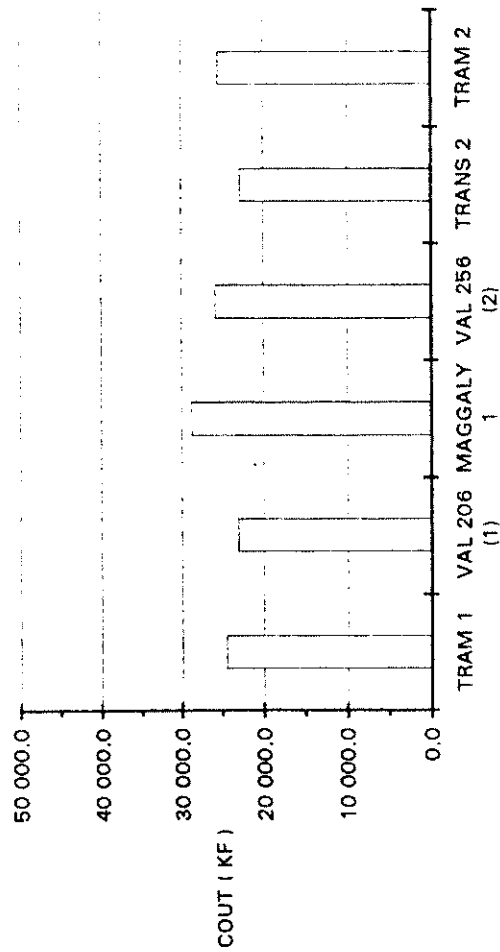
catégorie 0 à 6000 p/h/sens



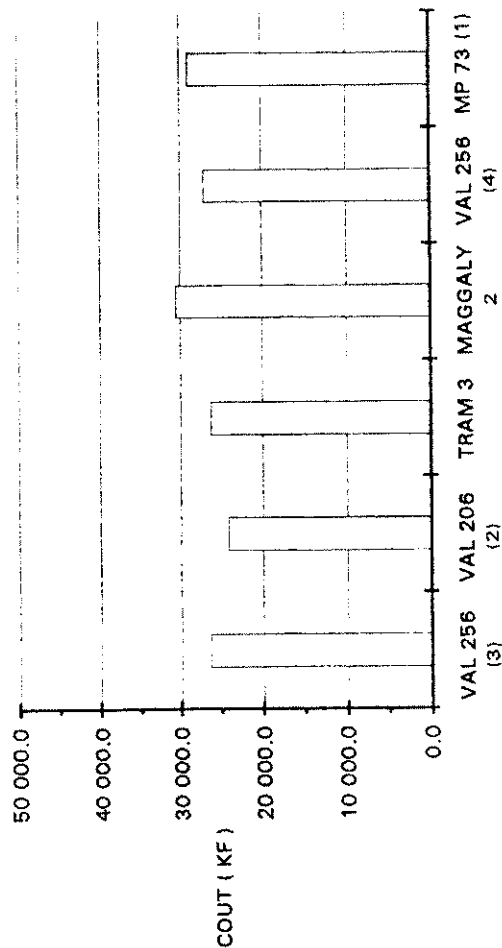
catégorie + 25000 p/h/sens



catégorie 6000 à 15000 p/h/sens



catégorie 15000 à 25000 p/h/sens





## **4.5. Comparaison des coûts de génie civil à la place offerte par chacun des systèmes.**

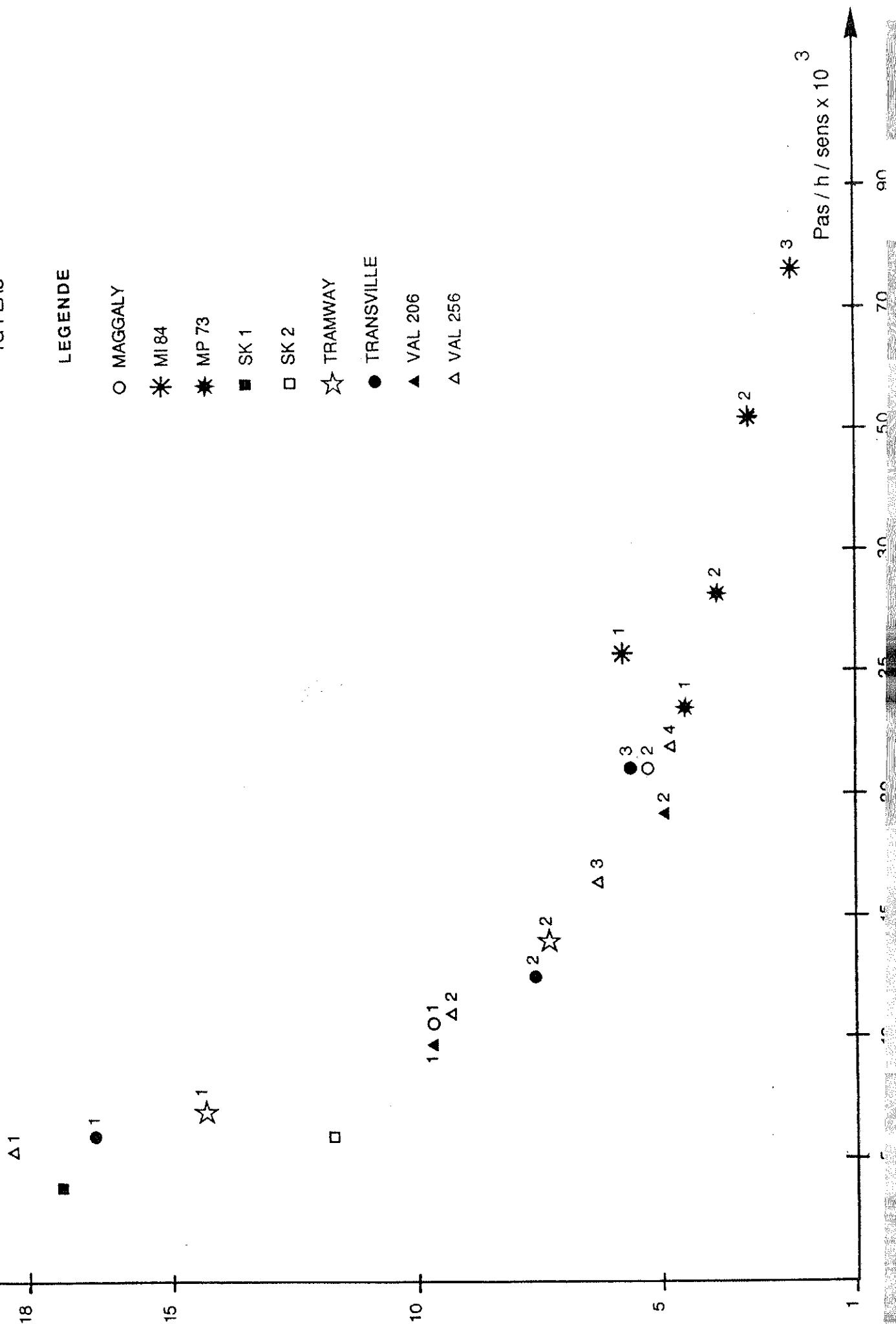
### **4.5.1. Tranchée couverte superficielle**



COUT DU GENIE CIVIL A LA PLACE POUR  
UNE INTERSTATION DE 800 m  
EN TRANCHEE COUVERTE SUPERFICIELLE  
TG + EAU

LEGENDE

- MAGGALY
- \* MI 84
- \* MP 73
- SK 1
- SK 2
- ☆ TRAMWAY
- TRANSVILLE
- ▲ VAL 206
- △ VAL 256







**4.5. Comparaison des coûts de génie civil à la place offerte par chacun des systèmes.**

**4.5.3. Tunnel au tunnelier**

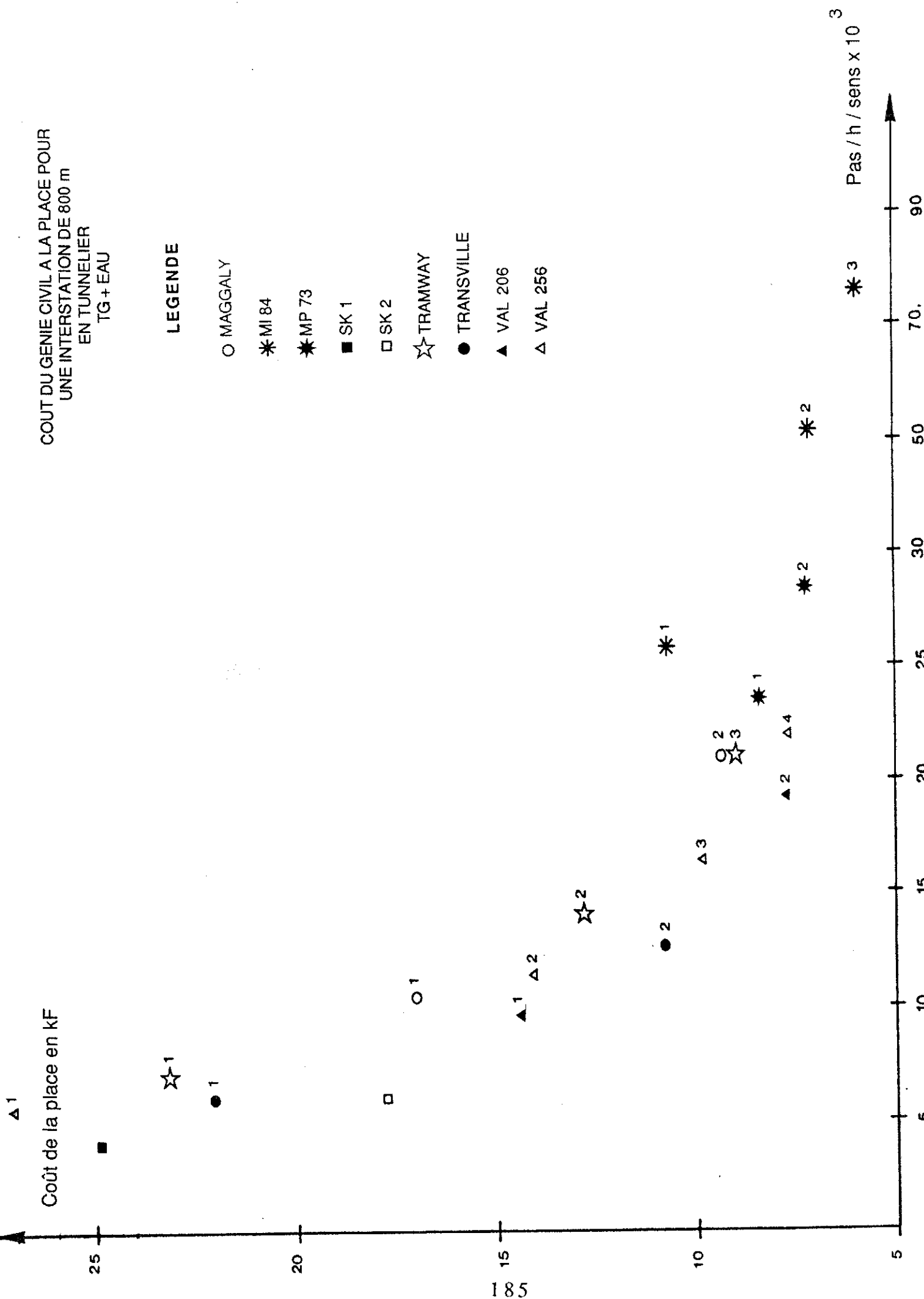


COUT DU GENIE CIVIL A LA PLACE POUR  
UNE INTERSTATION DE 800 m  
TG + EAU

Coût de la place en kF

LEGENDE

- O MAGGALY
- \* MI 84
- \* MP 73
- SK 1
- SK 2
- ☆ TRAMWAY
- TRANSVILLE
- ▲ VAL 206
- △ VAL 256





#### **4.5. Comparaison des coûts de génie civil à la place offerte par chacun des systèmes.**

##### **4.5.4. Viaduc**



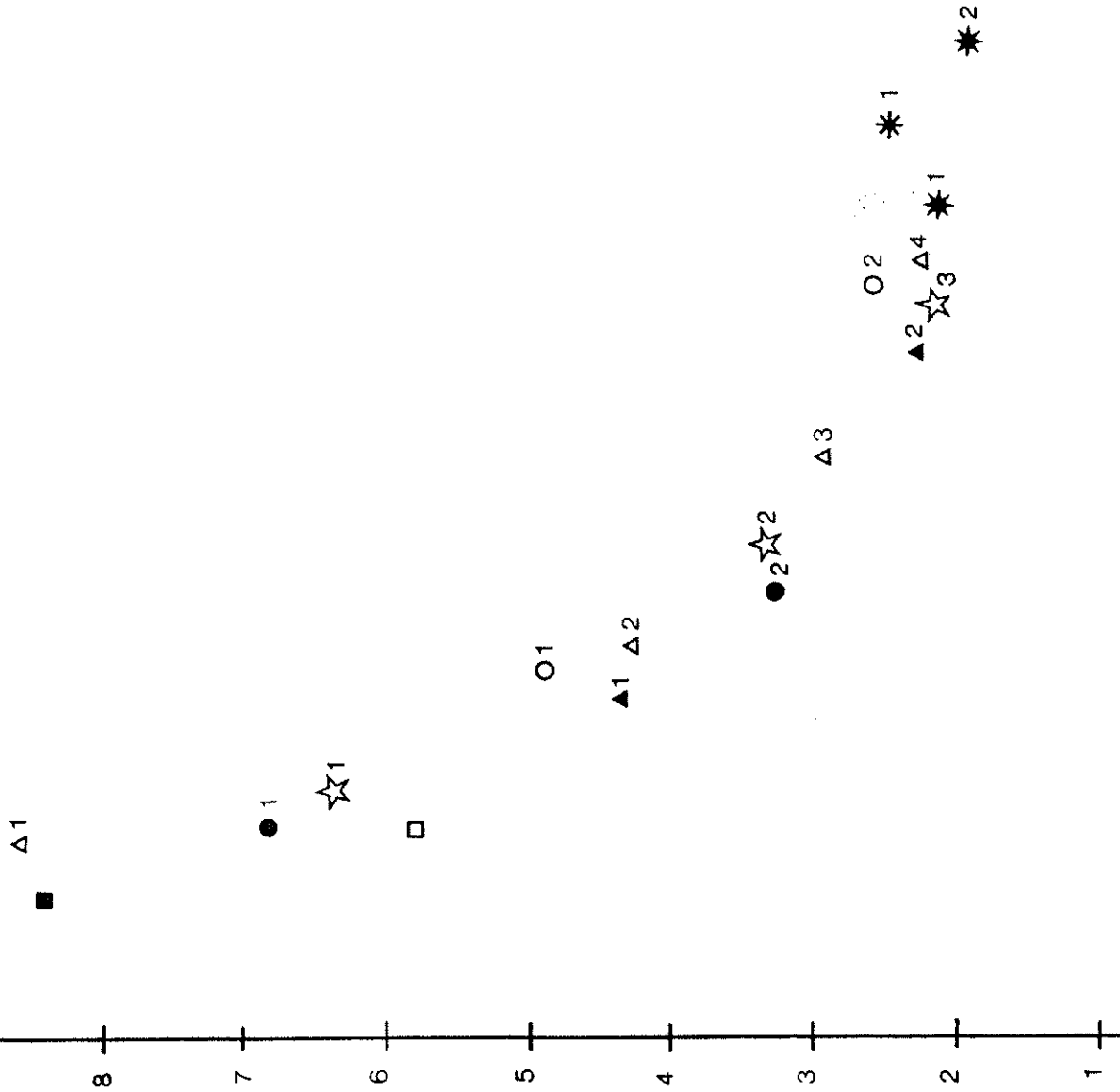
Coût de la place en kF

COÛT DU GENIE CIVIL A LA PLACE POUR  
UNE INTERSTATION DE 800 m  
EN VIADUC

LEGENDE

- MAGGALY
- \* MI 84
- \* MP 73
- SK 1
- SK 2
- ☆ TRAMWAY
- TRANSVILLE
- ▲ VAL 206
- △ VAL 256

Pas / h / sens x 10<sup>3</sup>







## **5 - Conclusions**

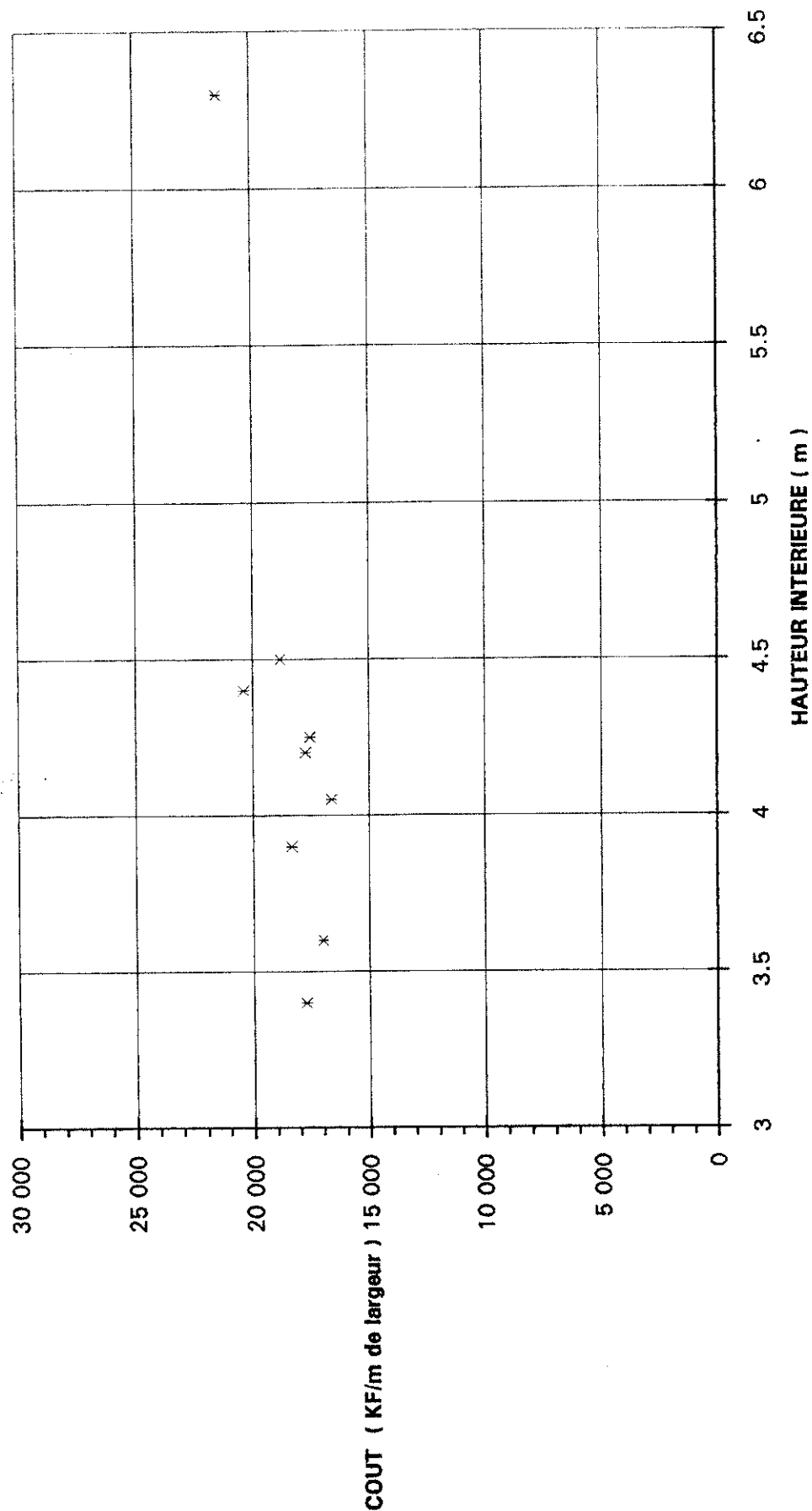
### **5.2.2. Incidence de la variation de gabarit d'un système sur le coût du génie civil**



#### **5.2.2.a Méthode de construction en tranchée couverte superficielle**

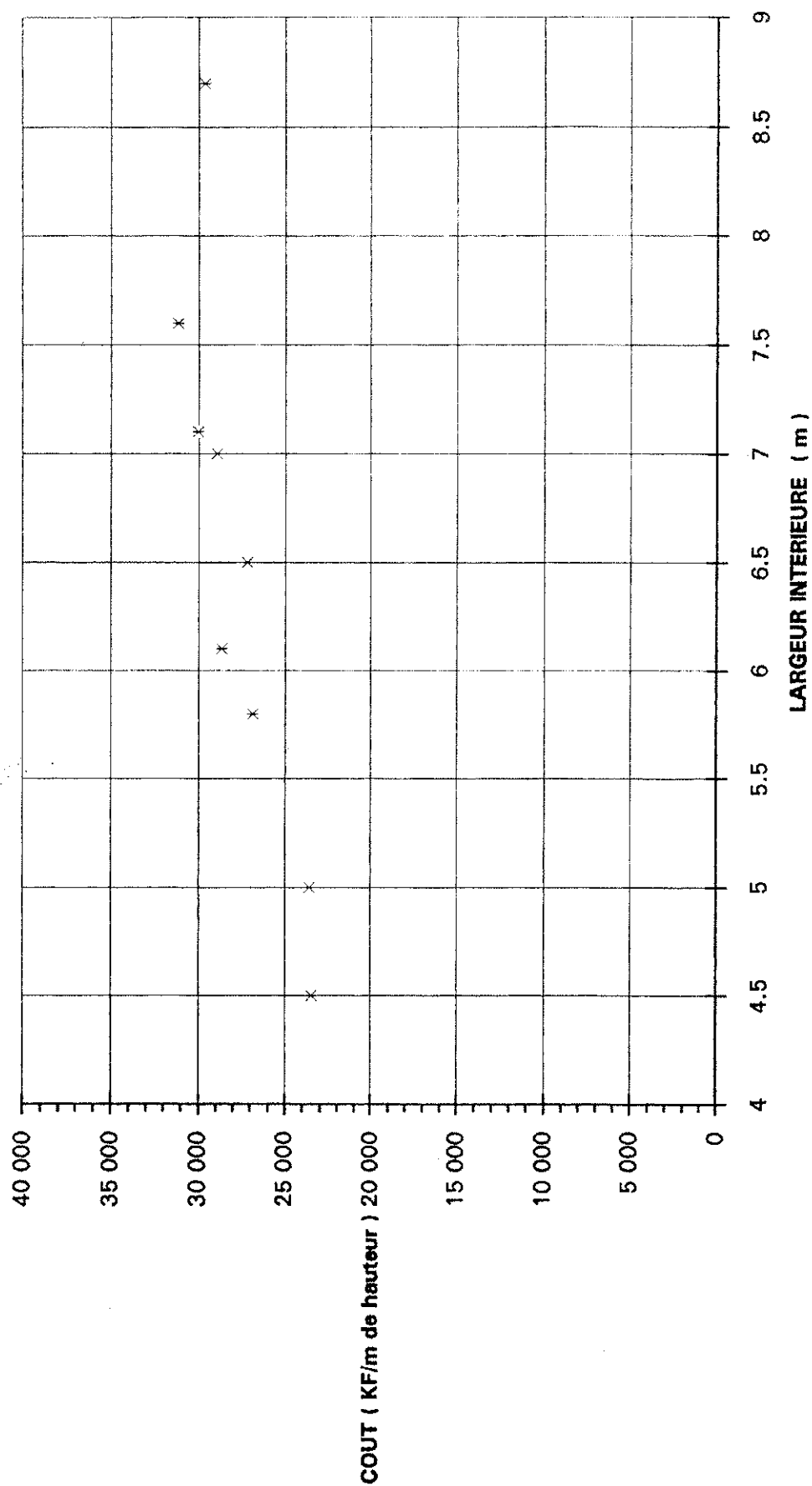


**CADRE DOUBLE : section courante de longueur 1000 m**

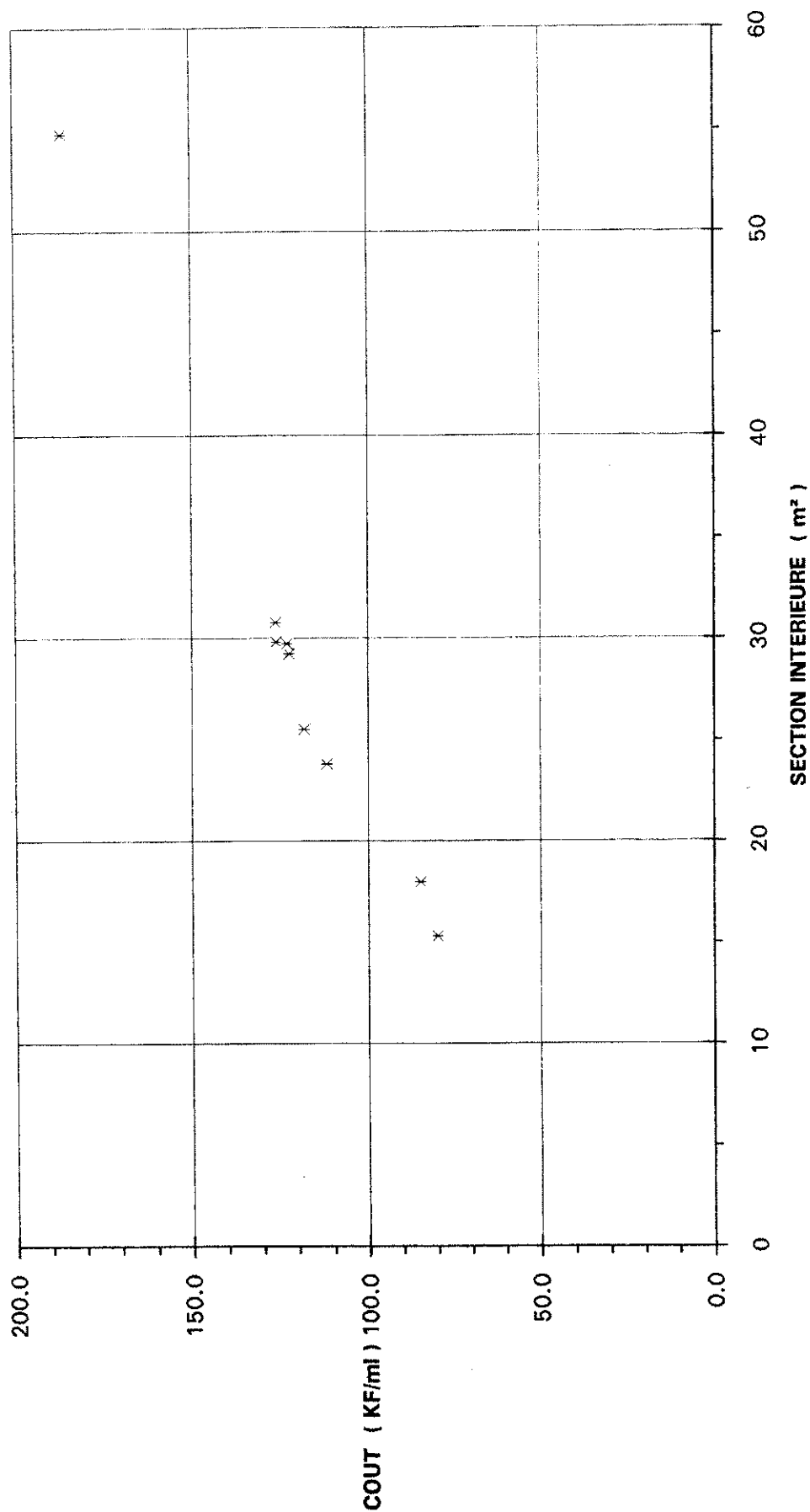


AFME : tranchée couverte / niveau superficiel

**CADRE DOUBLE : section courante de longueur 1000 m**



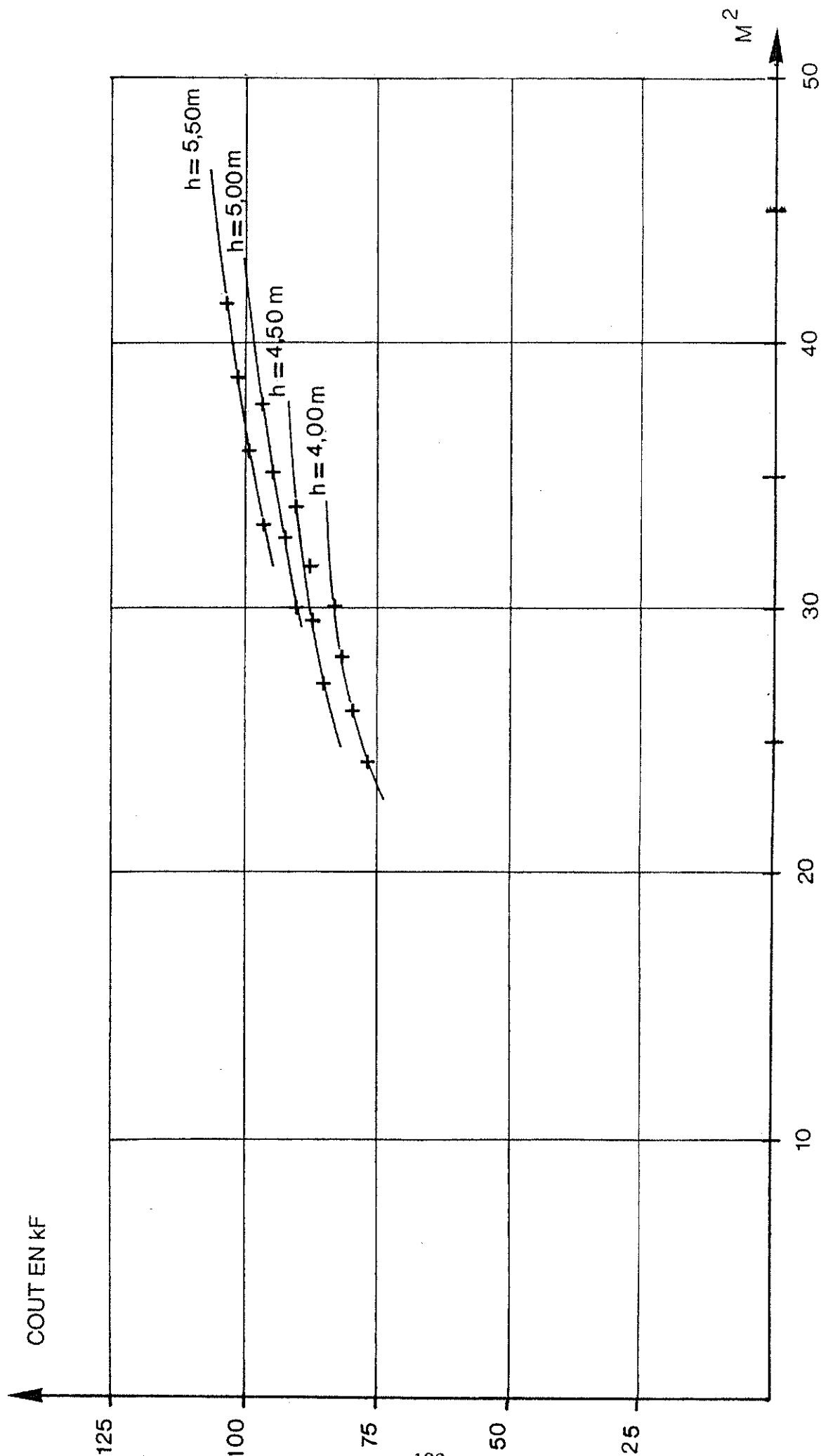
**CADRE DOUBLE : section courante**



# COUT AU ML DE CADRE EN FONCTION DE LA SECTION

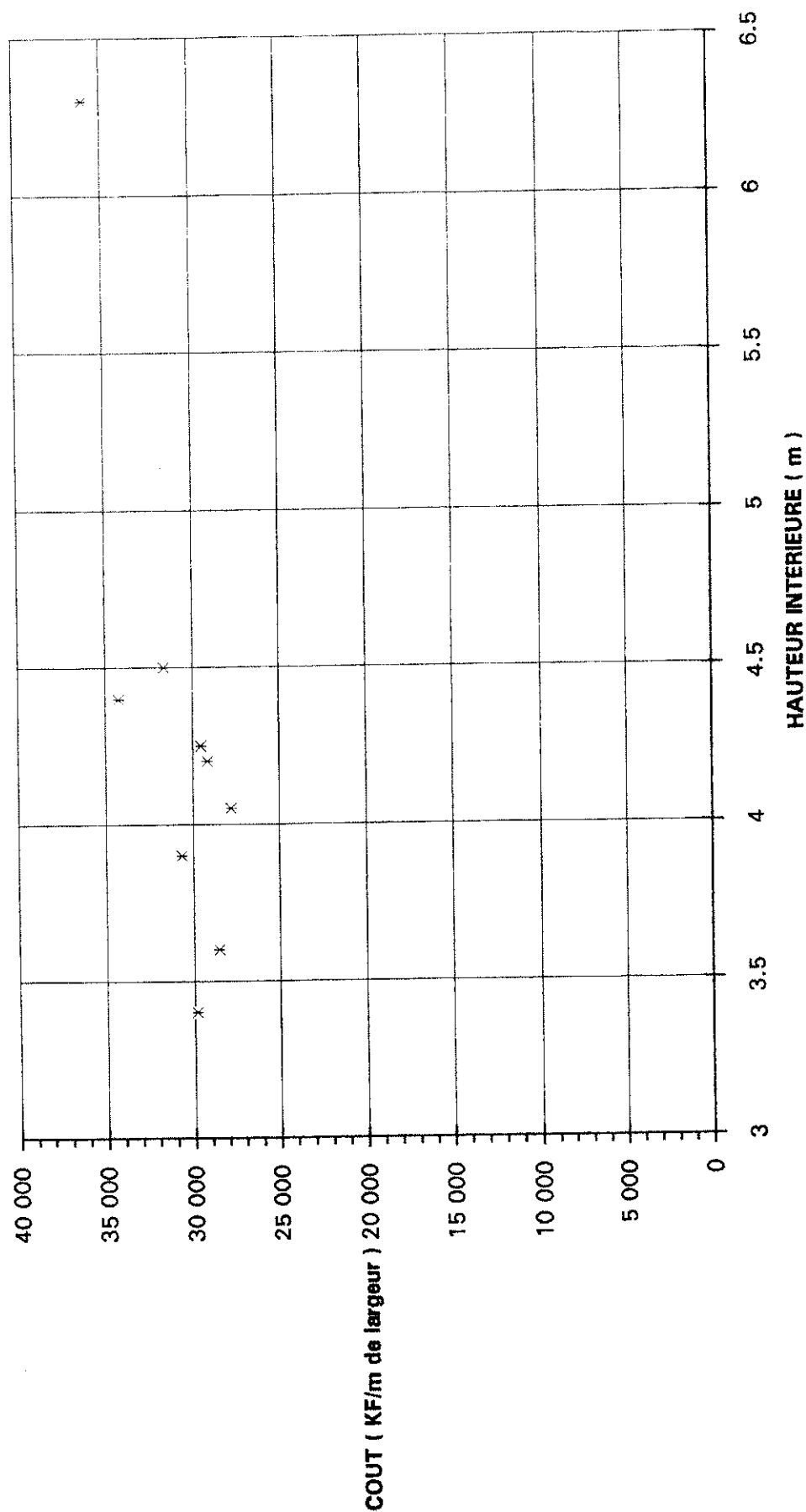
Pour h variant de 4 à 5,50 m

L variant de 6 à 7,50 m

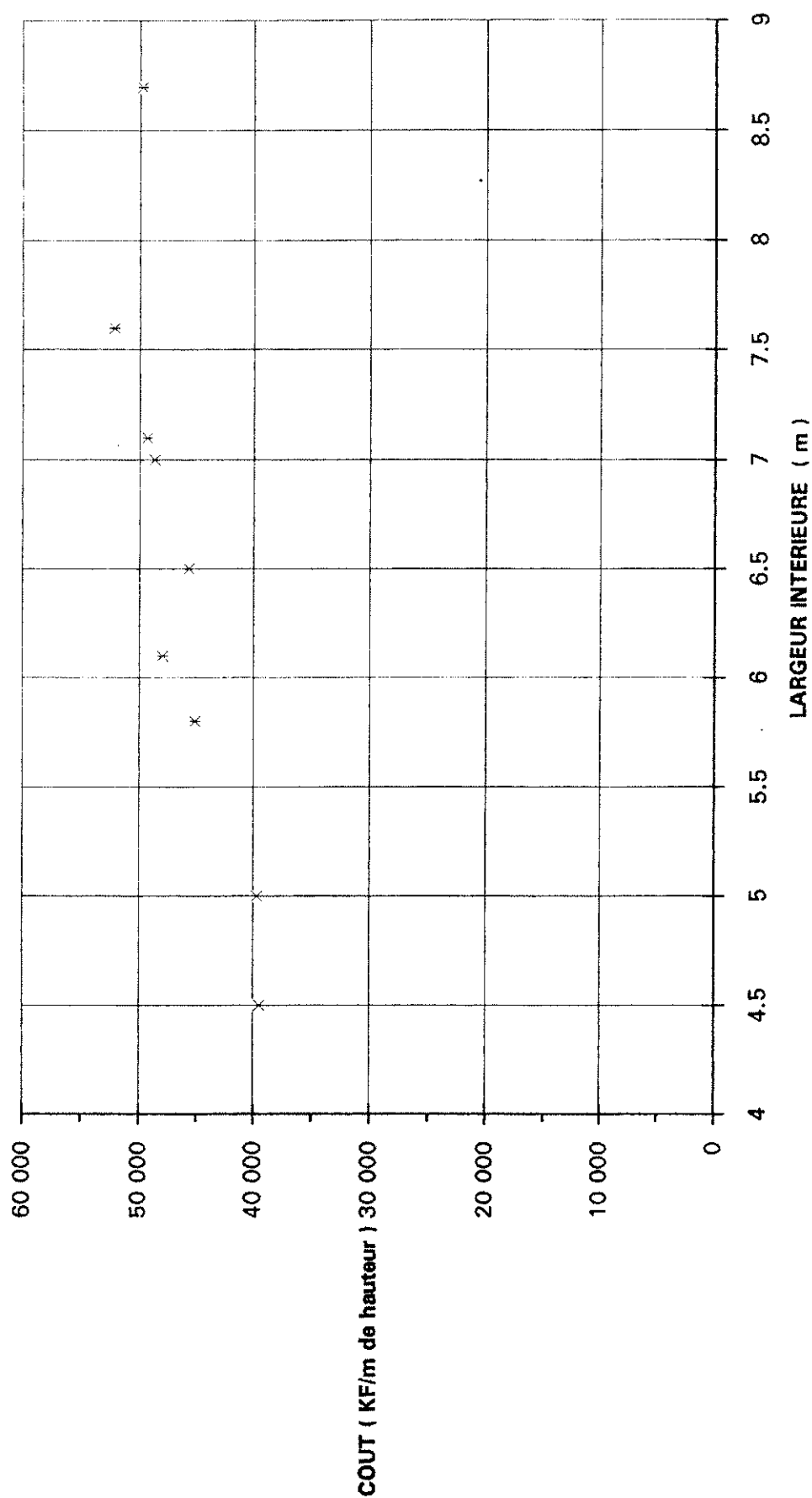




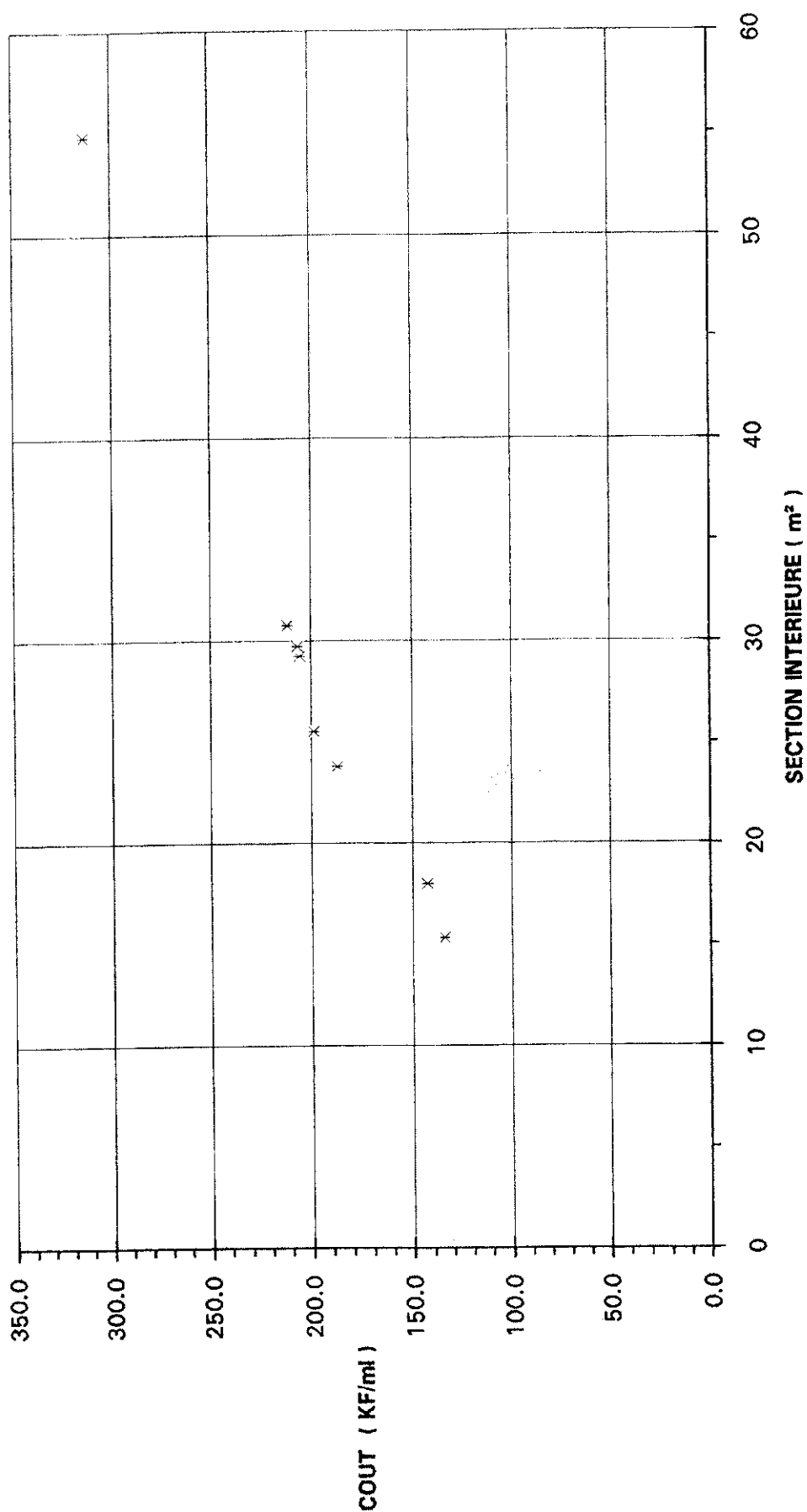
### CADRE DOUBLE : section courante de longueur 1000 m



**CADRE DOUBLE : section courante de longueur 1000 m**



**CADRE DOUBLE : section courante**

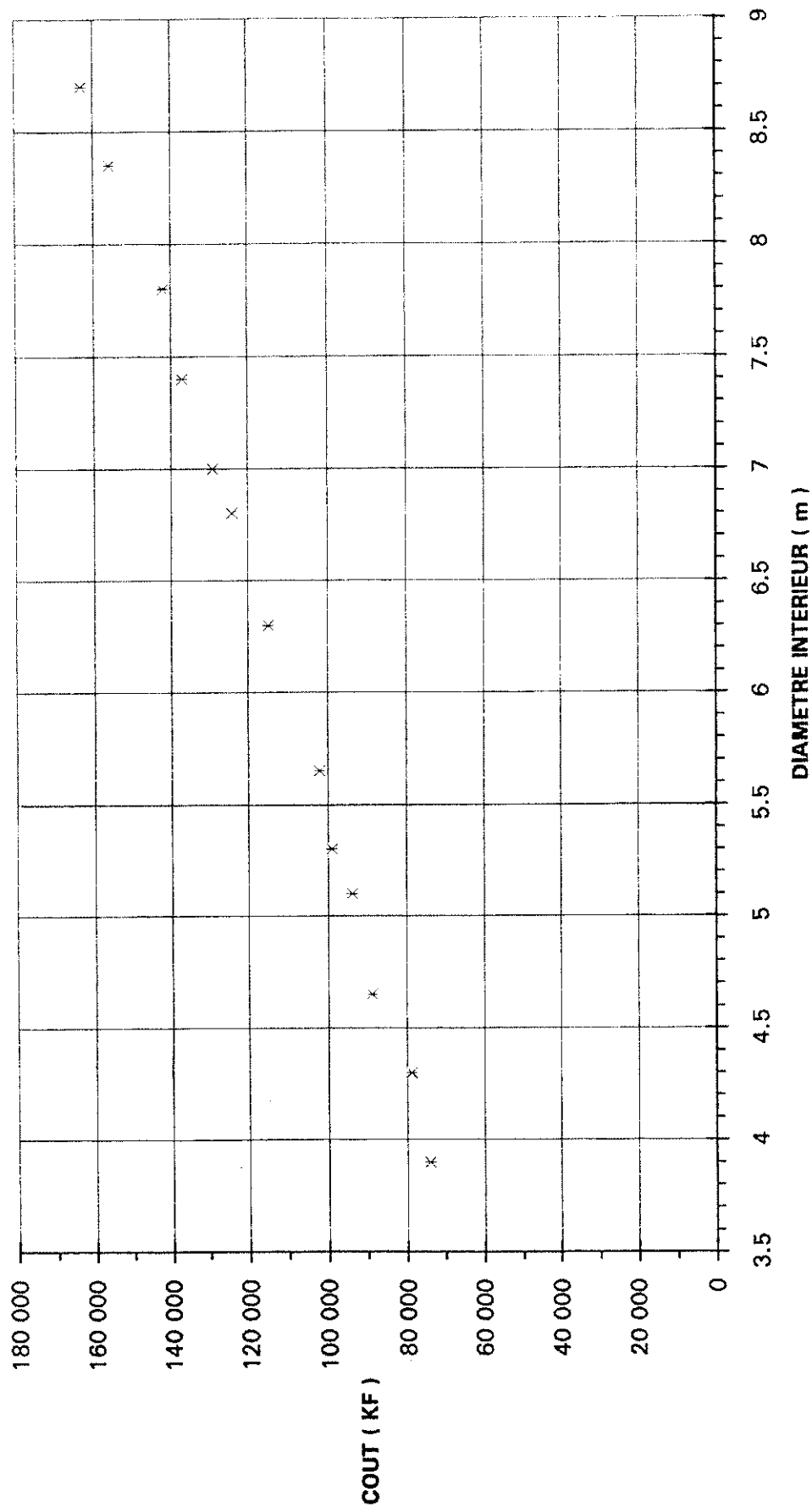




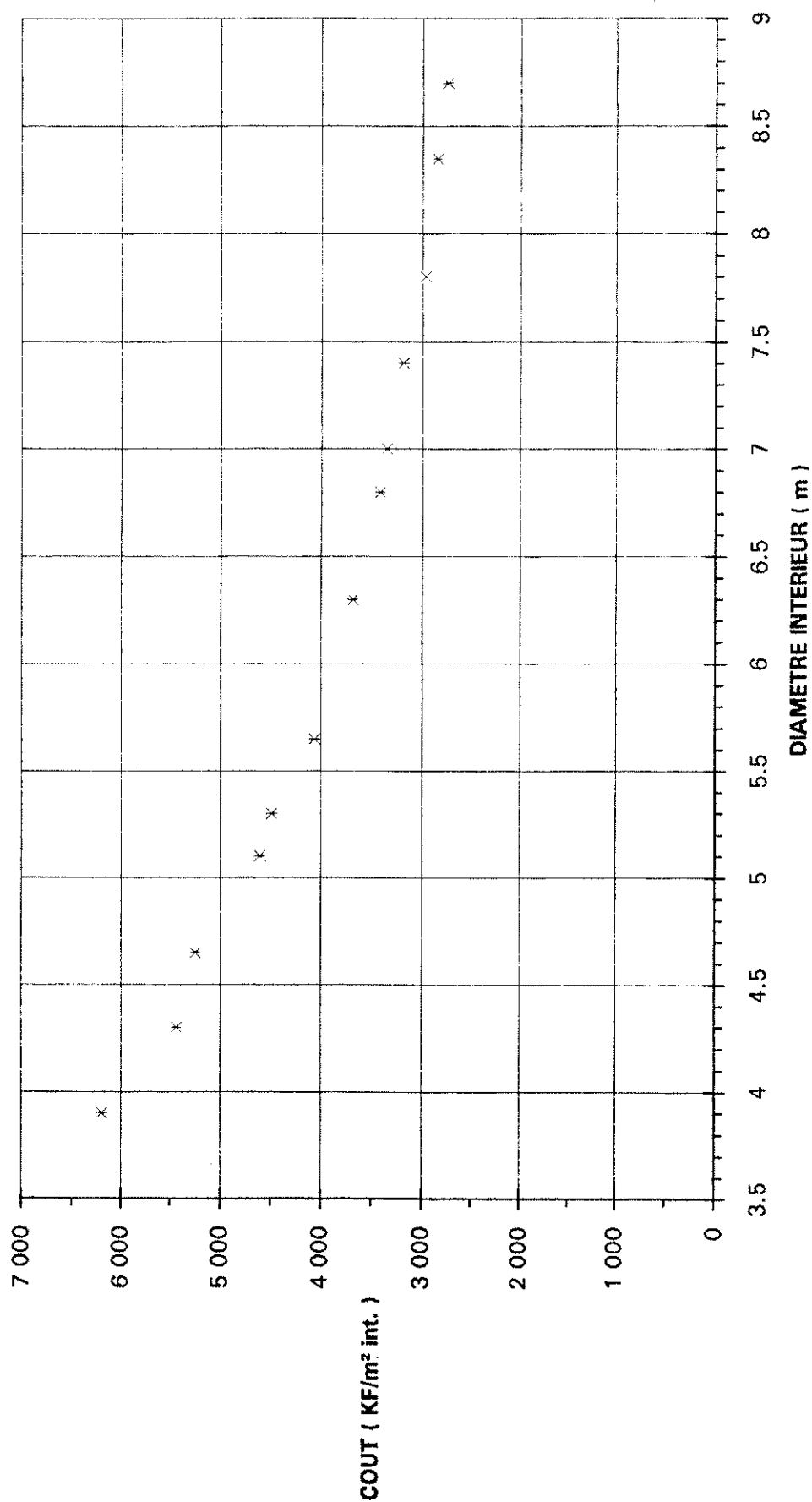
#### **5.2.2.c Méthode de construction au tunnelier**



**TUNNELIER MONOTUBE : section courante de longueur 1000 m**



**TUNNELIER MONOTUBE : section courante de longueur 1000 m**

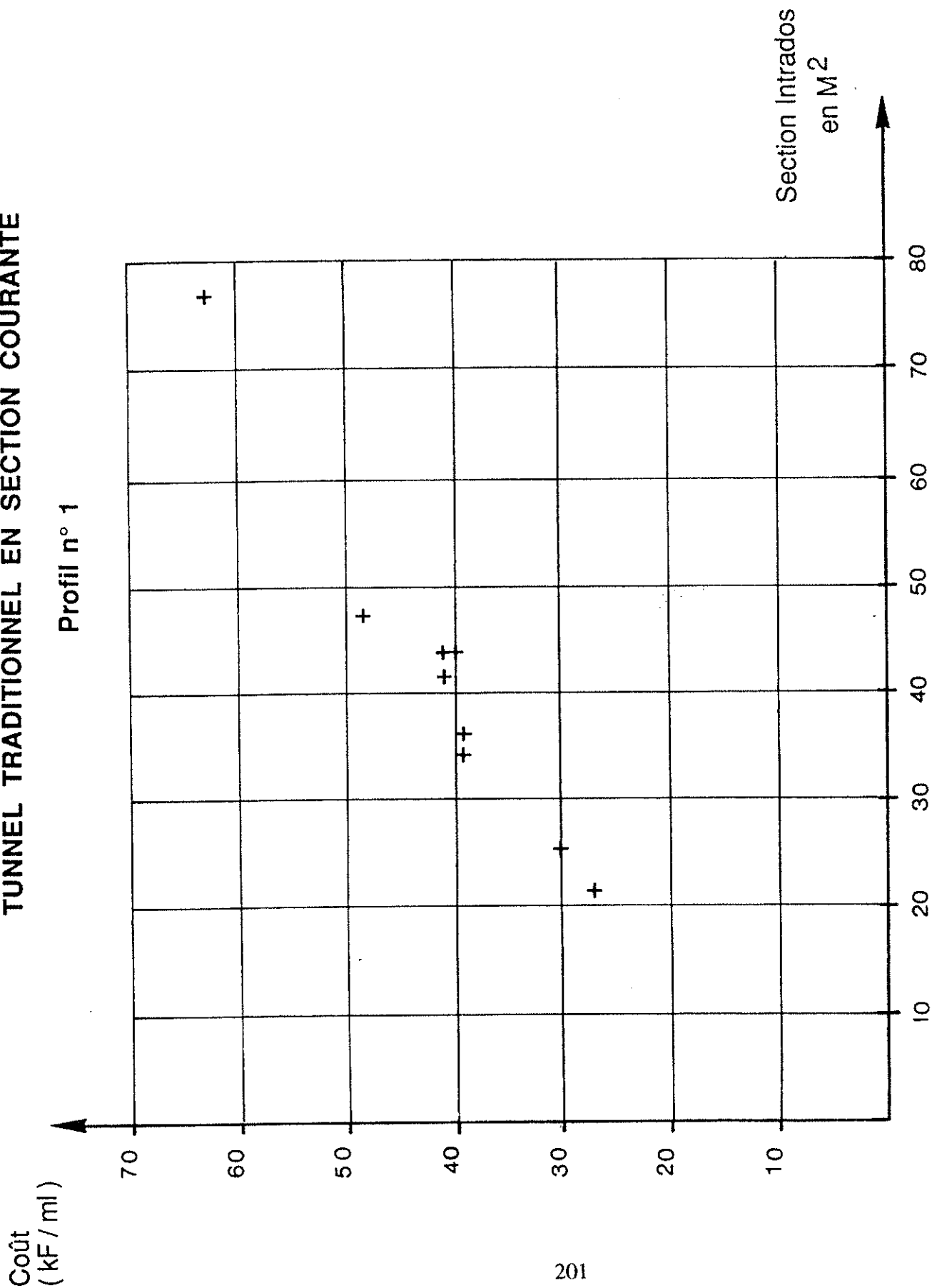




#### **5.2.2.d Méthode de construction en tunnel traditionnel**

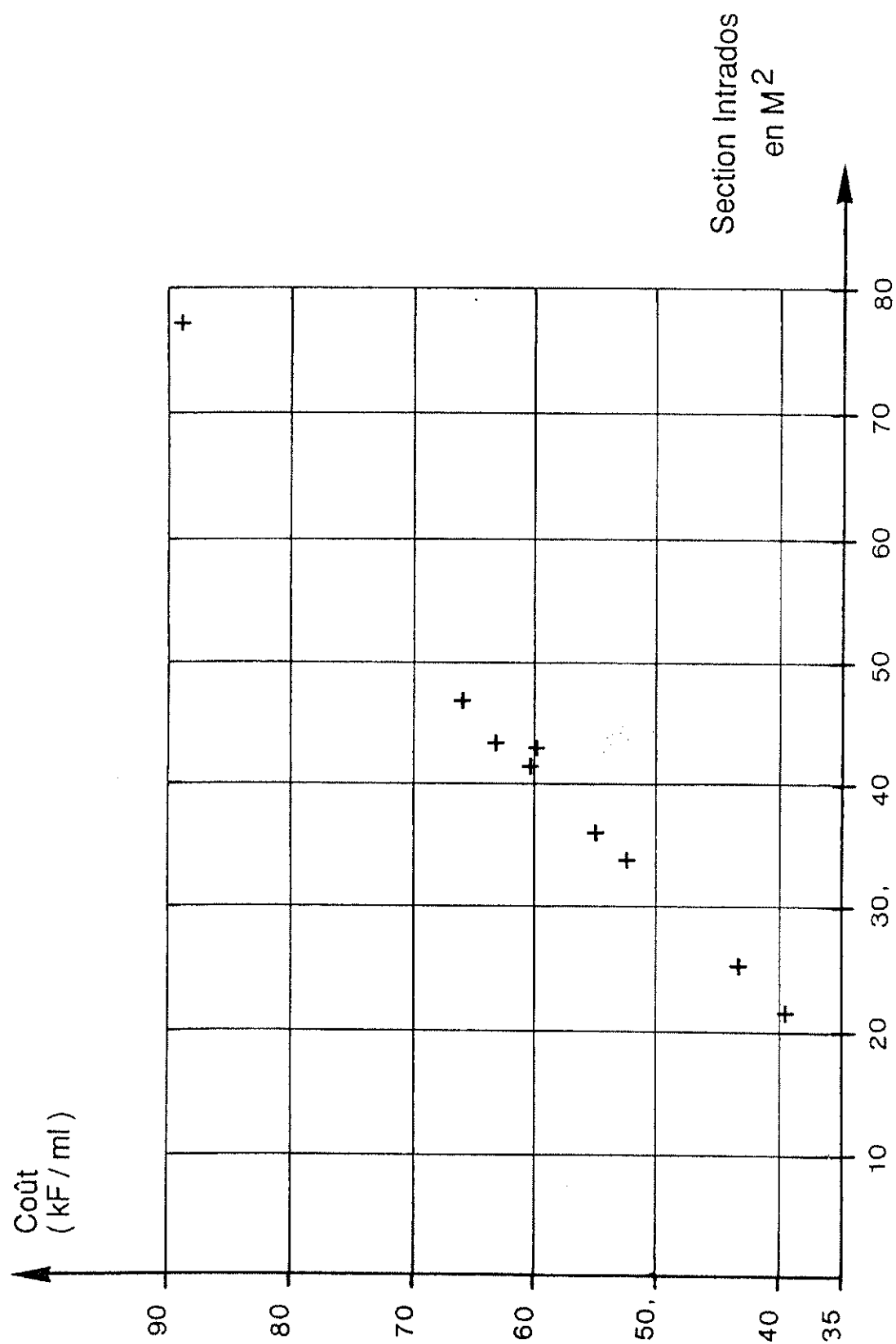


# TUNNEL TRADITIONNEL EN SECTION COURANTE



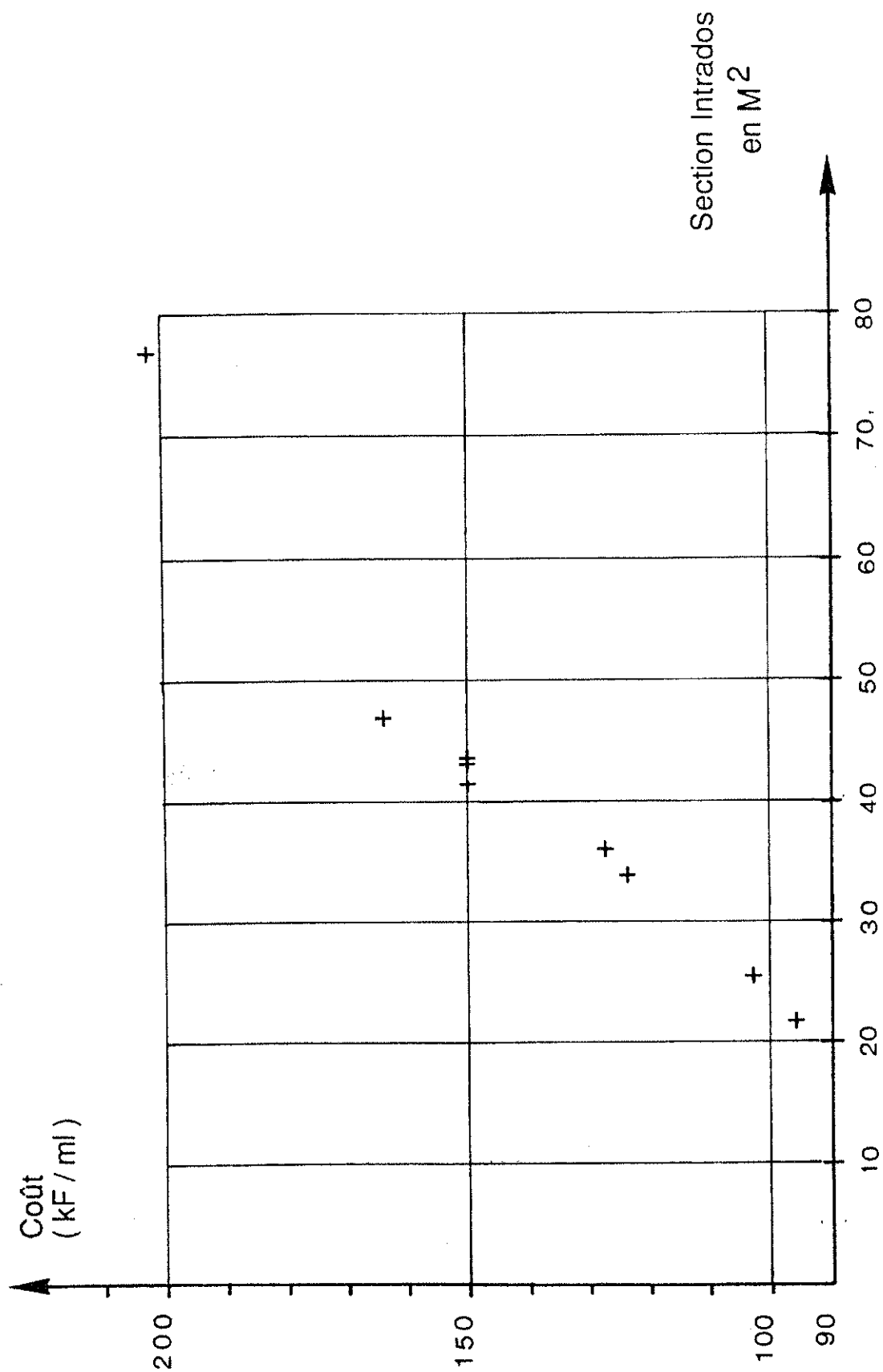
# TUNNEL TRADITIONNEL EN SECTION COURANTE

Profil n° 2



# TUNNEL TRADITIONNEL EN SECTION COURANTE

Profil n° 3



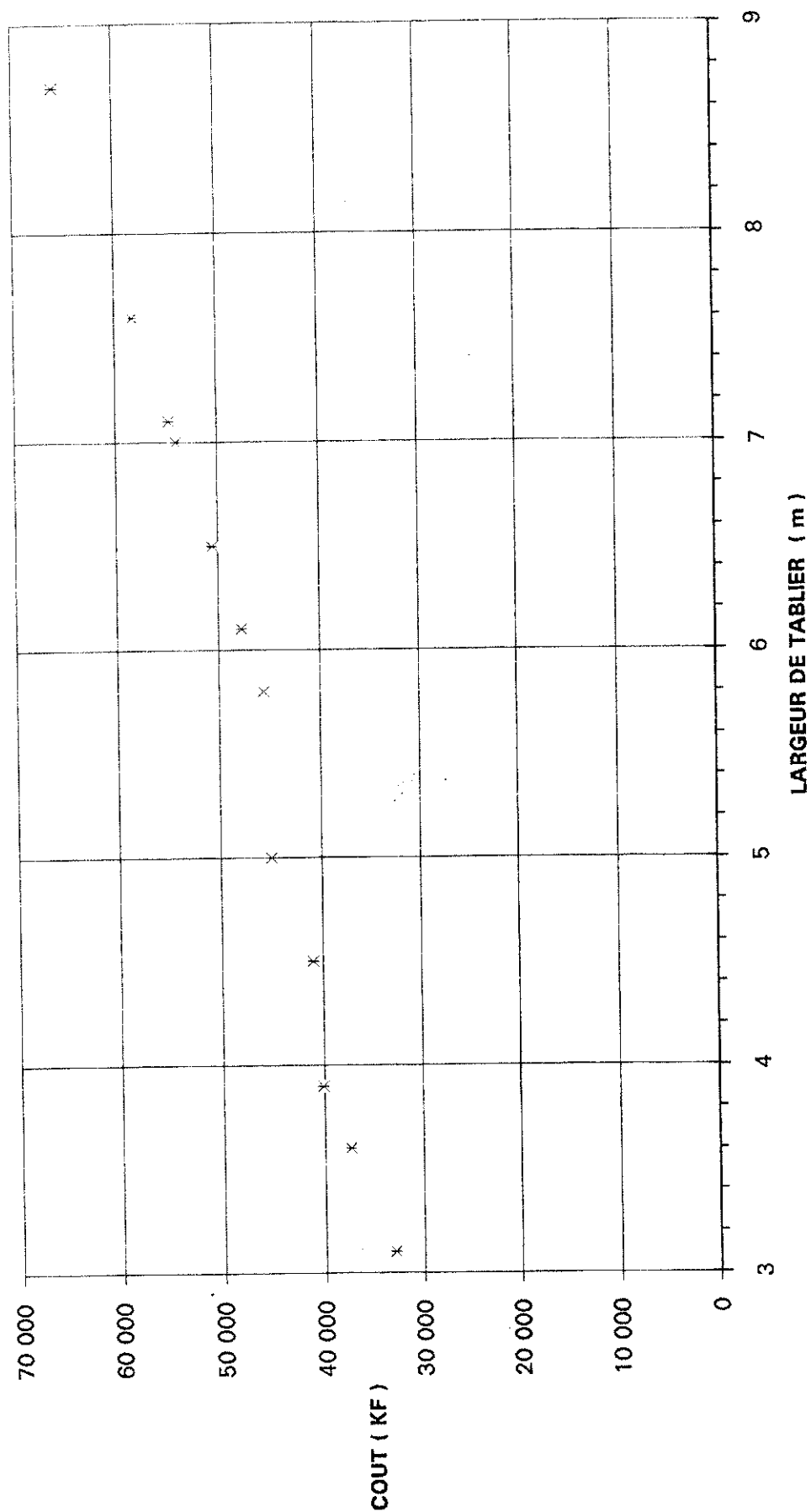


#### **5.2.2.e Méthode de construction en viaduc**



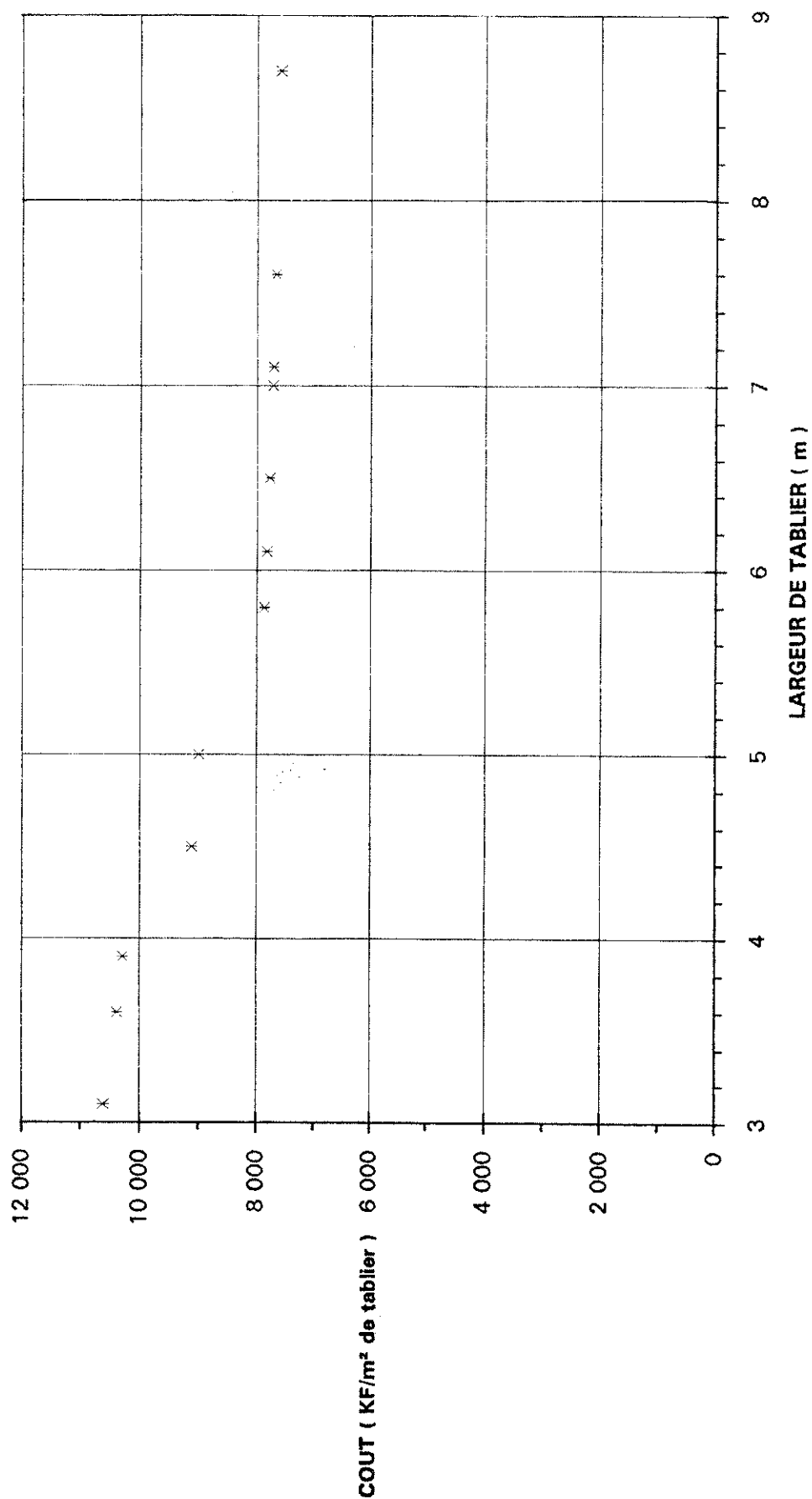


**VIADUC : section courante de longueur 1000 m**



AFME : viaduc

**VIADUC : section courante de longueur 1000 m**



## 5.5.2 f Construction de stations

### Stations souterraines superficielles et profondes

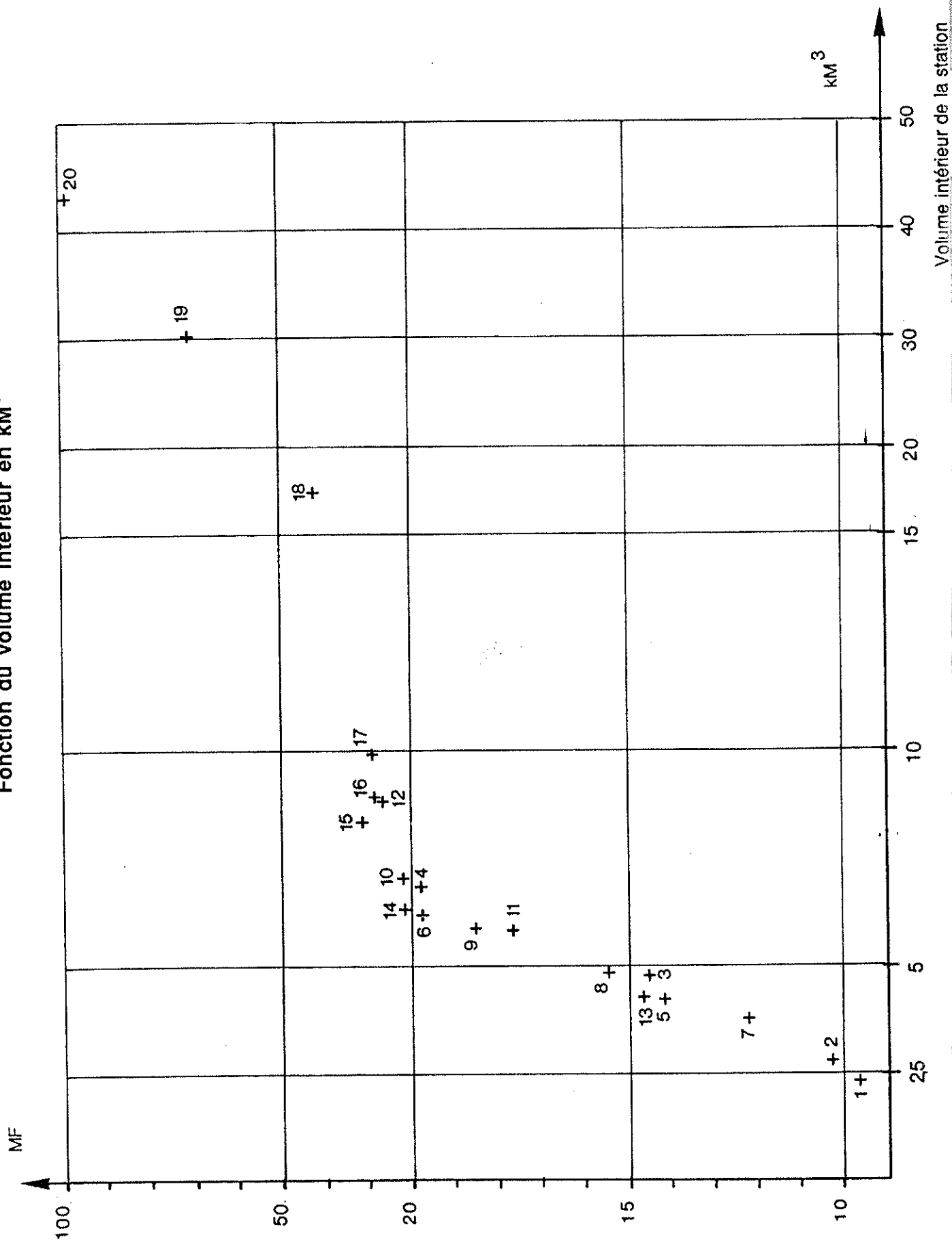
N° Pt	Système	Station superficielle		Station profonde pour tunnel	
		volume int. en m <sup>3</sup>	coût en kF	volume int. en m <sup>3</sup>	coût en kF
1	SK1	2 429	9 570	6 193	13 500
2	SK2	2 764	10 315	7 807	16 000
3	Trans-1	4 802	14 510	13 154	28 000
4	Trans-2	6 790	19 790	18 598	38 000
5	VAL 206-1	4 269	14 190	13 660	30 500
6	VAL 206-2	6 059	19 760	19 388	42 000
7	VAL 256-1	3 783	12 250	13 884	27 500
8	VAL 256-2	4 842	15 480	17 771	33 500
9	VAL 256-3	5 901	18 510	21 659	40 500
10	VAL 256-4	6 960	21 540	25 547	48 000
11	MAG-1	5 821	17 640	22 605	46 000
12	MAG-2	8 731	25 960	33 908	66 500
13	Tram-1	4 336	14 670	14 261	43 500
14	Tram-2	6 307	20 520	20 744	63 000
15	Tram-3	8 278	30 670	27 226	80 000
16	MP 73-1	8 871	26 240	27 597	86 500
17	MP 73-2	9 979	29 470	31 046	97 500
18	MI 84-1	17 534	41 290	48 428	141 500
19	MI 84-2	30 376	70 070	83 896	244 500
20	MI 84-3	43 218	98 950	119 364	348 000



#### **5.2.2.f Coût d'une station superficielle en fonction du volume intérieur**



**COUT D'UNE STATION SUPERFICIELLE**  
 (Terrain granulaire + Eau ) en MF  
 Fonction du volume intérieur en  $\text{km}^3$



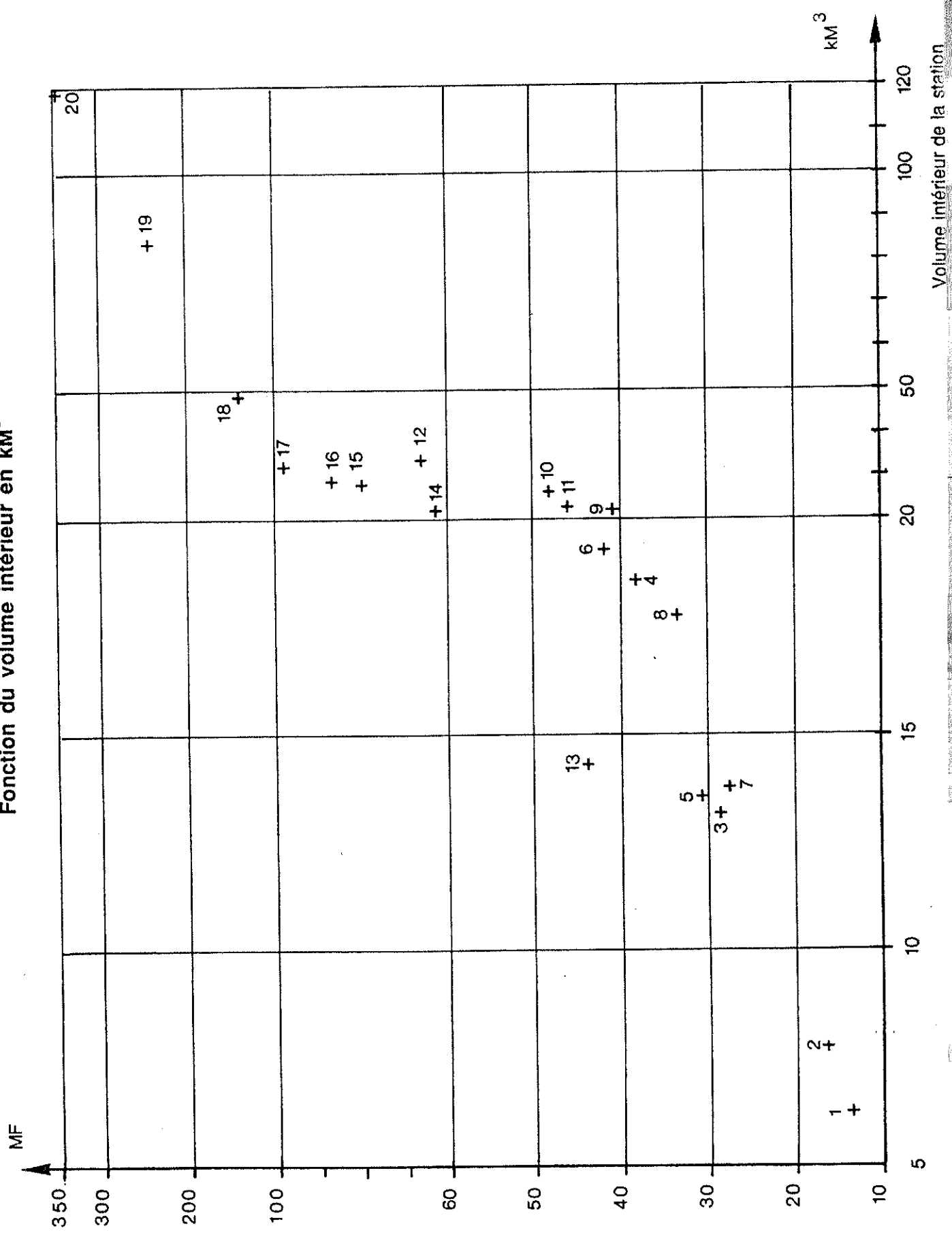




#### **5.2.2.f. Coût d'une station profonde en fonction du volume intérieur**



**COUT D'UNE STATION PROFONDE**  
 (Terrain granulaire + Eau ) en MF  
 Fonction du volume intérieur en  $\text{km}^3$



### 5.2.2.f Stations aériennes

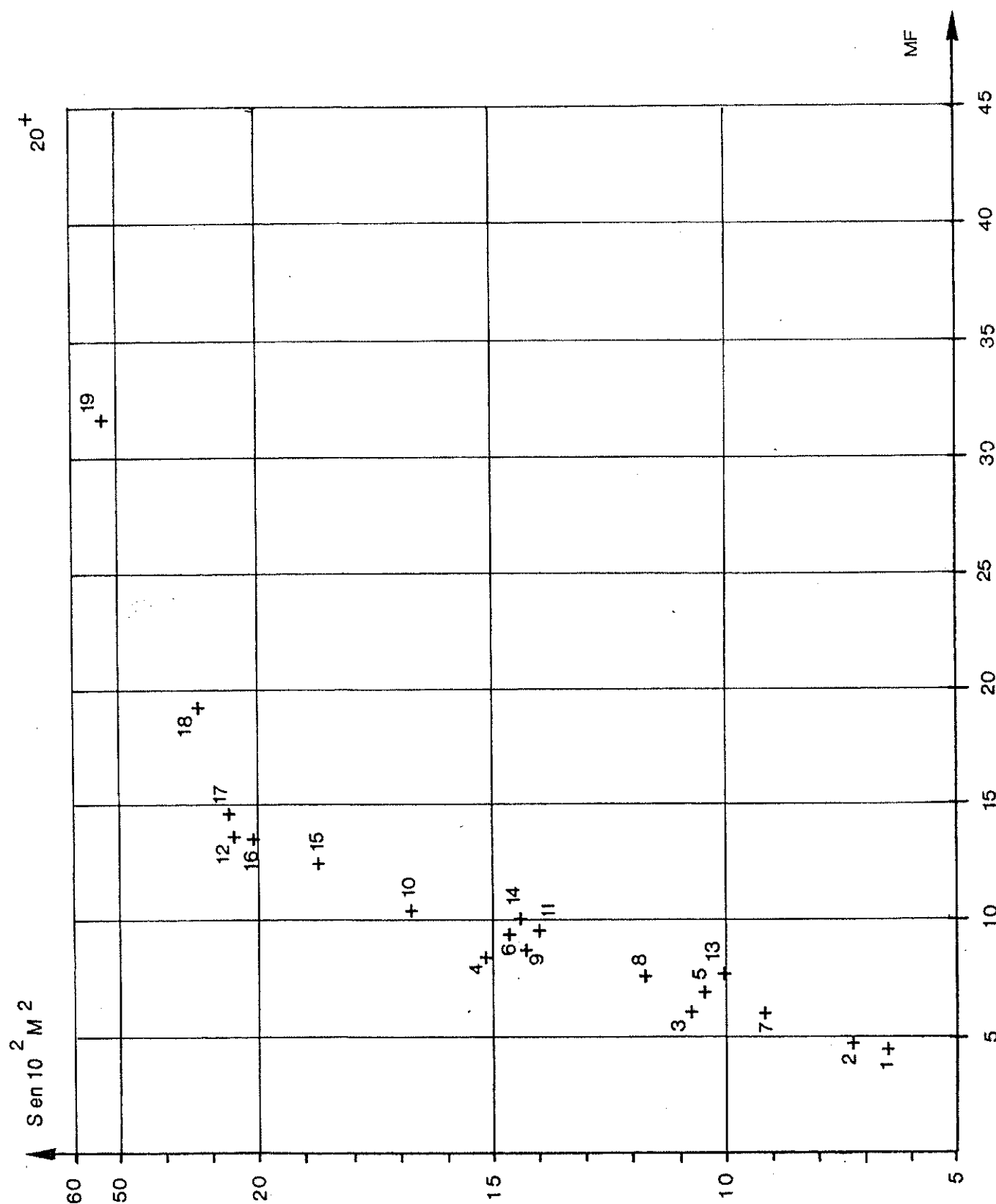
N° Pt	Système	Surface de la station aérienne en m <sup>2</sup>	Coût de la station en kF
1	SK1	607	4 405
2	SK2	690	4 585
3	Trans-1	1 044	5 960
4	Trans-2	1 476	8 275
5	VAL 206-1	1 004	6 925
6	VAL 206-2	1 427	9 260
7	VAL 256-1	890	5 995
8	VAL 256-2	1 139	7 440
9	VAL 256-3	1 388	8 820
10	VAL 256-4	1 638	10 215
11	MAG-1	1 354	9 645
12	MAG-2	2 030	13 560
13	Tram-1	964	7 715
14	Tram-2	1 401	10 070
15	Tram-3	1 839	12 425
16	MP 73-1	1 971	13 399
17	MP 73-2	2 217	14 785
18	MI 84-1	2 783	19 096
19	MI 84-2	4 821	31 759
20	MI 84-3	6 860	44 458

#### **5.2.2.f Coût d'une station aérienne en fonction de sa surface**



# COUT EN MF D'UNE STATION AERIENNE

Fonction de sa surface en  $M^2$







## **6. Présentation des logiciels utilisés**

### **6.1 Présentation du logiciel METROS**



# LOGICIEL D'ESTIMATION D'INFRASTRUCTURES DE METRO

M.E.T.R.O.S

Christophe	ACCART
Charles	AH-SANE

Ecole Centrale de Lyon

## I. INTRODUCTION

L'objet de cet article est de présenter le logiciel METROS, Méthode d'Estimation Très Rapide d'Ouvrages Souterrains. Ce logiciel est conçu pour répondre aux besoins des bureaux d'études effectuant des pré-études d'estimation d'infrastructures de métro réalisées en tranchée couverte ou à l'avancement au tunnelier.

Le logiciel permet d'estimer à un niveau de définition situé entre les études de faisabilité et les avants projets sommaires (APS). Il s'adresse en particulier aux ingénieurs et aux techniciens chargés de ces études et est destiné avant tout à des spécialistes.

METROS a été écrit en vue d'assurer

- la fiabilité
- la rapidité d'exécution
- la facilité d'emploi
- la possibilité d'extensions futures

Sa structure autorisera la prise en compte des réalisations telles que des stations, des plate-formes à l'air libre et des viaducs. Il fournit actuellement une estimation du coût génie civil d'un tronçon de métro en section courante, ce qui représente environ quarante pour cent du coût total de l'ouvrage. Le logiciel permet de faire varier tous les paramètres qui entrent en ligne de compte afin d'optimiser ce coût de génie civil.

## II. POSSIBILITES PROPRES

Les réalisations traitées par METROS sont la tranchée couverte et le tunnelier en section courante. La structure d'une session de travail est constituée de l'enchaînement suivant: *entrée des données, prédimensionnement, métré, estimation et sortie.*

L'entrée des données indispensables au prédimensionnement s'effectue en premier. Il s'agit tout d'abord des données géométriques concernant l'ouvrage, puis des valeurs des paramètres du sol et enfin des contraintes supplémentaires. Les données géométriques sont la longueur du tronçon, le type de réalisation; pour la

tranchée couverte le nombre d'alvéoles et les gabarits intérieurs du cadre tandis que pour le tunnelier il faut prendre en compte le nombre de tubes, leur diamètre intérieur et l'épaisseur du revêtement. Les contraintes de sol nécessaires sont le type de sol (granulaire, cohérent, rocheux), sa cohésion, son angle de frottement interne, ses poids volumiques humide et déjaugé, les niveaux de nappe (E300 et THEC) ainsi que la profondeur du substratum. Enfin, les contraintes supplémentaires sont, pour le tunnelier: le nombre de puits, leurs surfaces, les périmètres de soutènement, les profondeurs ainsi que la vitesse d'avancement du creusement, le nombre de postes et le nombre d'hommes par poste. Pour la tranchée couverte, il s'agit des surcharges (routières, dues aux constructions voisines...) et des espaces disponibles.

A partir de toutes ces données, METROS effectue un prédimensionnement.

Pour la tranchée couverte, ce prédimensionnement porte sur le cadre, les soutènements, l'étanchement de fond de fouille et l'étanchéité de la structure. Pour le cadre, la dalle, le radier, les piédroits et éventuellement le voile central sont dimensionnés suivant les règles BAEL 1983. Le programme calcule les épaisseurs et les taux de ferrailage. Il est possible d'intervenir tout au long du prédimensionnement. Par exemple, on peut changer les épaisseurs de béton et le programme recalcule les ferrailages. Les soutènements sont scindés en deux groupes: ceux qui sont dimensionnés et ceux qui ne le sont pas (ceux-ci font quand même l'objet d'un mètre et d'une estimation). Ce dernier type de soutènement est constitué par le jet grouting et le cloutage. Quant aux soutènements dimensionnés, il s'agit du talus, des palplanches, des parois préfabriquées, des parois moulées et des berlinoises. Les quatre derniers types sont dimensionnés à des valeurs standard d'épaisseurs, de ferrailage... Le talus est dimensionné au glissement plan. Il suffit de choisir le type de soutènement désiré et le programme fournit les valeurs de tous les paramètres. L'étanchement de fond de fouille porte sur le béton immergé, le radier injecté et l'ancrage au substratum étanche. Quant à l'étanchéité du cadre, le calcul est conduit entièrement automatiquement sans que l'utilisateur n'intervienne.

Pour le tunnelier, le dimensionnement est mené pour les puits de la même manière que pour la tranchée couverte. Simplement, le talus et les butons ne sont pas autorisés pour les puits.

Les résultats du prédimensionnement sont ensuite utilisés pour le mètre.

Le mètre et l'estimation des prix sont très liés. METROS affiche le mètre de chaque poste et le prix correspondant. Cet affichage et la méthode de calcul du mètre conduisent à séparer les coûts variables des coûts forfaitaires. Les coûts variables ne sont pas modifiables par l'utilisateur tandis que les coûts fixes le sont grâce à l'emploi de coefficients forfaitaires de pondération. Ainsi il est possible de répartir un coût fixe comme celui de la fabrication du tunnelier. En effet, un tunnelier qui sert sur deux tronçons différents peut être amorti de plusieurs manières. Il est envisageable de compter le coût de fabrication sur un seul des deux tronçons, ou alors de répartir ce coût de manière proportionnelle à la longueur de ces tronçons. Cette répartition est permise par METROS. En revanche, la quantité de revêtement nécessaire ne sera pas modifiable sans changer la géométrie de l'ou-

vrage.

Les atouts de METROS sont multiples. Son module de prédimensionnement intégré permet de résoudre la plupart des cas courants, ceci sans intervention de logiciels de dimensionnement spécialisés. La structure de la base de données est très souple. Elle permet de gérer des variantes pour chaque tronçon. En effet la démarche première de l'utilisateur de METROS sera de comparer plusieurs variantes de conception différentes. La comparaison entre tranchée couverte et tunnelier ou même entre différents gabarits ou divers modes de soutènement n'en sera que plus aisée.

### III. RESULTATS

Chaque module de calcul a été soigneusement testé. Il convient toutefois d'attirer l'attention sur les deux points suivants:

- le radier peut être surdimensionné par rapport à un calcul plus exact. Ceci vient de la représentation des contraintes sous ce même radier.

- le calcul des soutènements tels que les palplanches, les parois moulées, les parois préfabriquées et les berlinoises se fait avec un lit d'appuis. La modélisation avec plus d'un lit d'appuis nécessite la résolution d'un modèle hyperstatique. La précision s'obtient au détriment du temps de calcul.

Dans le cas où la fouille nécessite plus d'un lit de tirants ou de butons, il appartient à l'utilisateur de changer les valeurs des paramètres de soutènement proposées par le programme. L'utilisateur peut encore consulter un logiciel spécialisé comme RIDO (logiciel de dimensionnement de parois verticales) mais dont le temps de réponse sera de plusieurs minutes alors que METROS dimensionne les soutènements en quelques centièmes de seconde.

Après la vérification des modules de calcul, le logiciel a été testé dans son ensemble. Nous avons vérifié les résultats globaux qu'il fournissait.

Nous sommes partis, pour une première comparaison, de deux tronçons de la ligne D du métro de Lyon entre Guillotière et Saxe-Gambetta. Ces deux tronçons font respectivement 209 m et 88 m de long. Les sections de ces tronçons sont données figure 1. Nous avons pris pour les valeurs inconnues les valeurs moyennes pour Lyon. Cette figure comporte aussi des comparaisons entre les valeurs des métrés calculées par le logiciel et celles déduites des décomptes effectifs. Globalement, les résultats sont très proches. Les légères différences proviennent du fait que le logiciel a utilisé des données correspondant à des valeurs moyennes, alors que les valeurs correspondant à la réalité sont issues du décompte exact de la ligne. La seule différence notable à observer est celle qui concerne le tonnage des aciers de structure. Le programme n'a pas dimensionné le radier (pour le tronçon de 209 mètres) à 50 cm mais à 58 cm (nous avons choisi 55 cm en nous mettant à la place de la personne chargée de l'étude). Cette différence vient d'un point déjà mentionné plus haut: le modèle de répartition des contraintes sous le radier donne lieu à une surestimation de ces mêmes contraintes.

Pour le tronçon de 88 mètres, le problème de surferrailage du

radier n'apparaît pas et le logiciel propose 72 cm par exemple pour le radier au lieu des 75 cm de la coupe type.

Nous avons résumé les métrés, les prix et les ratios correspondant au total de ces deux tronçons sur la figure 2. Le tableau regroupe différents postes tels que structure, terrassement et étanchement de fond de fouille, soutènements, étanchéité et divers.

Trois colonnes sont importantes pour ce tableau. En premier lieu il faut s'attacher aux métrés. Ce sont les quantités que nous venons de commenter. En un second temps, il convient de s'intéresser aux prix. En effet, le fichier de prix qui a été utilisé pour cette comparaison était un premier fichier comportant des prix réactualisés. Cependant tous les prix n'évoluent pas de la même manière et il faut les réactualiser correctement. Ainsi le tableau fait ressortir une légère faiblesse des prix de l'étanchéité et des soutènements (quantités proches, prix éloignés). Le poste *structure* est au départ sur-évalué à cause du surdimensionnement du radier pour le tronçon de 209 mètres. L'écart final sur ce tableau est de huit pour cent si le logiciel prend en compte les cinq pour cent d'aléas et de trois pour cent sinon. Cependant depuis cet essai, le fichier de prix a été légèrement corrigé (indépendamment de cette comparaison). Le résultat est maintenant le suivant: la différence entre le coût réel des deux tronçons et celui donné par le logiciel (aléas à cinq pour cent) est de quatre pour cent! Enfin des résultats dignes d'intérêt peuvent être tirés des ratios donnés par le programme. En effet, une méthode de calcul de coût de tronçon peut prendre comme point de départ les ratios globaux au lieu de dimensionner puis d'effectuer un mètre couplé avec une multiplication de prix unitaires. La méthode qui consiste à prendre des ratios globaux peut être a priori moins efficace que celle du logiciel. Cependant le logiciel peut servir à établir ces ratios globaux (prix du mètre carré de soutènement, du mètre cube de structure...).

Nous avons évalué ensuite des tronçons de caractéristiques différentes. Nous avons fait varier les gabarits intérieurs et nous avons comparé les résultats donnés pour un gabarit de métro (figure 3) et un gabarit de VAL (figure 4). Cette comparaison a été menée pour un kilomètre de tronçon sans eau en tranchée couverte peu profonde. Entre les deux variantes, seuls les gabarits entrés et les épaisseurs de cadre fournies par le programme ont changé, nous avons repris les mêmes soutènements (berlinoises) ainsi que le niveau supérieur du radier qui aurait pu être relevé. On peut faire quelques remarques intéressantes sur les figures 3 et 4. Chacune d'entre elle fournit un récapitulatif des coûts et des ratios significatifs concernant le soutènement, les structures béton, le terrassement-étanchement de fouille, l'étanchéité, les VRD et Divers. La section la plus chère est bien sûre celle du métro dont le gabarit est plus important. La différence entre les deux gabarits donne environ quinze pour cent. Quant on regarde les prix de chaque poste, les grandes différences proviennent essentiellement des structures béton. Cependant si on regarde les pourcentages de chaque grand poste dans les ratios significatifs, on s'aperçoit que la part du coût du *terrassement et étanchement de fond de fouille*, de *l'étanchéité*, des *VRD et Divers* est sensiblement la même. Ce n'est qu'une petite idée des informations qu'il est possible de tirer du logiciel.

La troisième comparaison qui a été effectuée concerne neuf tron-

çons. Nous avons comparé les résultats du programme avec les estimations d'un ingénieur. Sur les neuf tronçons, huit sont en tranchée couverte et un est au tunnelier. Les écarts sur les tronçons de la tranchée couverte s'échelonnent de zéro à dix pour cent. Les résultats donnés par le programme sur les tronçons en tranchée couverte sont inférieurs à ceux trouvés à la main car l'ingénieur qui a fait les calculs a pris des prix de terrassement et d'injection plus importants que ceux du programme pour le terrain considéré. Quant au tunnelier, la différence entre les prix finaux est inférieure à un pour cent!

L'occasion d'une quatrième comparaison nous a été fournie lors de l'assemblée de l'AFTES du 29 juin à Strasbourg. Le logiciel a estimé le coût de deux puits du tunnelier. Il a trouvé 12,8 millions tandis que les estimations déjà effectuées donnaient 13 millions de francs pour ces deux puits. Enfin, l'application du logiciel au métro de Marseille a donné, pour un tronçon de 1600 mètres de long, un coût de 62000 F au mètre linéaire contre 65000 F pour l'estimation existante.

#### IV. CONCLUSIONS

Nous nous étions donné à l'origine l'objectif suivant: le logiciel devait permettre d'obtenir un coût de tronçon de métro à dix ou même vingt pour cent dans certains cas. Nous plaçons le logiciel à un niveau de pré-étude, avant l'APS. Or il s'avère que, grâce au foisonnement de prix unitaires du fichier de prix qui a été établi, l'estimation est plus précise qu'on ne l'attendait. Nous avons obtenu moins de cinq pour cent pour des essais sur la ligne D du métro de Lyon, des puits de tunnelier à Strasbourg et pour une application au métro de Marseille.

Le fichier en question comporte soixante dix huit prix unitaires. Il est très détaillé car nous avons eu la chance d'avoir sous la main des décomptes assez précis. Le nombre de prix unitaires n'influe pas sur le temps d'exécution. Le logiciel permet l'estimation instantanée d'un tronçon de métro déjà référencé, avec un ou plusieurs fichiers de prix. Il est ainsi possible d'obtenir un prix HT ou TTC, ou même d'adapter le coût d'un projet à l'endroit où il sera construit.

Il serait intéressant à ce point de vue d'unifier, au sein de l'AFTES, les postes des prix unitaires servant à l'évaluation finale. Le prix unitaire d'un poste peut dépendre de la région (le prix de la tonne d'acier peut être différent à Marseille ou à Strasbourg). Ainsi l'établissement de fichiers de prix unitaires dont les postes seraient identiques mais dont les prix dépendraient de la région permettrait de chiffrer les projets à l'échelle française voire internationale.

METROS peut être utilisé directement à deux niveaux. En premier lieu, si l'utilisateur n'a qu'une vague idée de son projet, il arrive avec une poignée de données et profitera du module de pré-dimensionnement pour bâtir le projet. Une seconde approche consiste à utiliser le programme avec une coupe type. Il suffit d'entrer les données et les paramètres de cette coupe pour en tirer les coûts.

Un des avantages de METROS, et non des moindres, est d'être polyvalent: les prédimensionnements, les métrés et les coûts sont

réunis dans un seul et même logiciel.

METROS conjugue l'aisance et la rapidité d'exécution. L'aisance est assurée grâce à un système d'affichage de résultats et de menus par fenêtres et grâce à la possibilité de retour en arrière. En ce qui concerne la rapidité, l'unité de temps pour METROS est le dixième de seconde. En outre, le dialogue avec l'utilisateur est constant, ce dernier ayant la possibilité d'intervenir sur les valeurs proposées. Enfin, la portabilité est assurée sur tout IBM-PC ou compatible, ce qui ne nécessite qu'un investissement minime.

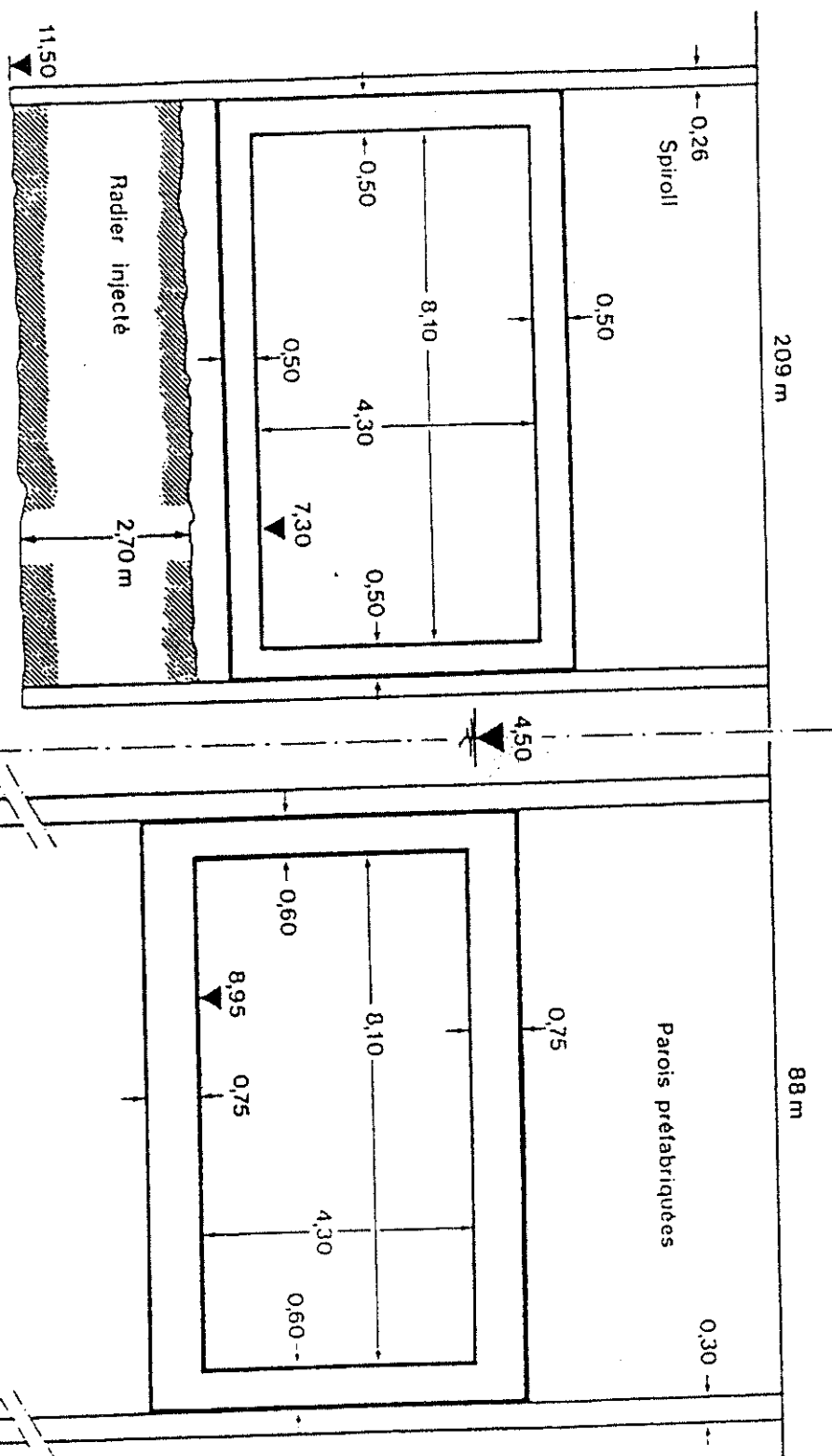
METROS a été conçu pour éventuellement être complété par la prise en compte de réalisations telles que les plate-formes à l'air libre, les viaducs et les stations. L'idée d'écrire un logiciel équivalent pour le matériel roulant et l'équipement serait intéressante car elle permettrait d'avoir une idée d'une part importante du coût total de la ligne.

L'apparition de nouveaux moyens techniques pourra autoriser l'écriture du module de prédimensionnement avec une méthode aux éléments finis. Cette méthode pourrait prendre en compte plus d'un lit d'appuis pour le dimensionnement des soutènements, ceci tout en étant rapide et précise.

Grâce à METROS, il sera possible d'établir des relations entre des ratios financiers significatifs (prix au mètre carré soutenu...) et des données physiques (nature du terrain, présence d'eau, profondeur de fouille...). Une meilleure connaissance de ces relations permettra d'optimiser les projets dès leur phase d'études préliminaires.

Souhaitons que l'établissement de ces relations soit concluant de même que l'unification des bordereaux de prix unitaires permette un bon développement des travaux en souterrains. Il serait de bon augure que les bureaux d'études ainsi que les entreprises utilisent ce même bordereau de prix unitaires.





- volume excavé:
- volume béton structures
- surface de coffrage
- poids d'aciers
- surface d'etanchéité
- surface soutènement vue

Logiciel

Réalisé

22.929 m <sup>3</sup>	23.516 m <sup>3</sup>
4.542 m <sup>3</sup>	4.365 m <sup>3</sup>
5.245 m <sup>2</sup>	5.300 m <sup>2</sup>
360 t	313 t
8.638 m <sup>2</sup>	8.655 m <sup>2</sup>
4.967 m <sup>2</sup>	4.939 m <sup>2</sup>

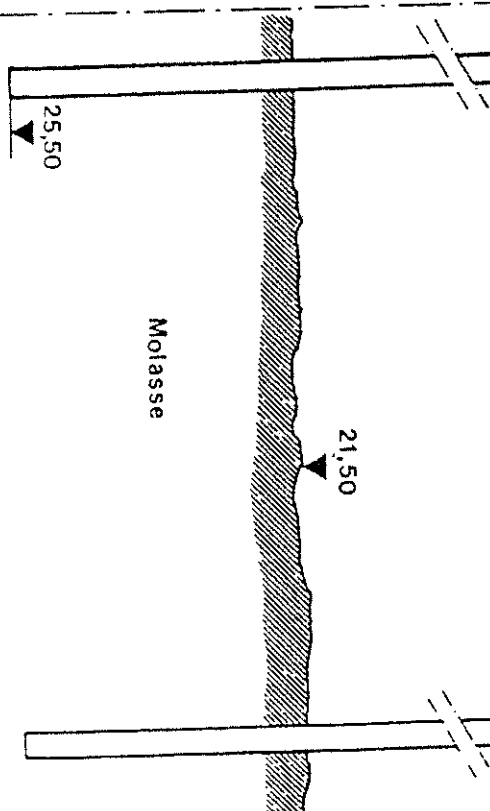


figure 2

RESULTATS DU LOGICIEL					REALITE				
	Quantité	Prix (F)	Prix Quantité	% du prix total	Quantité	Prix	Prix Quantité	% du Prix total	
Structure	4542 m3 Béton	8 291 577	1826 F/m3 de béton	24 %	4365 m3 Béton	6 794 218	1555 F/m3 de béton	22 %	
Terrassement Etanchement de FF	22929 m3	5 966 050	260 F/m3	18 %	23516 m3	5 918 737	252 F/m3	19 %	
Soutènement	4967 m2 vus	13 283 299	2674 F/m2 vus	39 %	4939 m2	14 172 697	2870 F/m2 vus	45 %	
Etanchéité	8638 m2 étanchéité	1 247 798	145 F/m2 étanchéité	4 %	8655 m2 étanchéité	1 458 967	167 F/m2 étanchéité	5 %	
TOTAL		28 788 724			28 344 619				
Divers dont Aléas 5 %	(297 m )	5 063 658	17049 F/m	15 %	( 297 m )	2 855 164	9613 F/m	9 %	
TOTAL GENERAL	(297 m )	33 852 382	113981 F/m	100 %	( 297 m )	31 199 783	105050 F/m	100 %	
Total sans Aléas	(297 m )	32 240 364	108553 F/m						

GUILLOTIERE - SAXE GAMBETTA (2 tronçons : 209m + 88m)

Ecart par rapport au coût réel : + 8 % avec les aléas à 5 %  
+ 3 % avec les aléas à 0 %

figure 3

M.E.T.R.O.S Version 1.00		Copyright (c) 1989, SEMALY
METRO sans eau		
Récapitulatif des coûts		
Soutènement		15790326 F
Structures béton		23697171 F
Terrassement et étanchement de fouille		6608192 F
Etanchéité		901986 F
Voiries et réseaux divers		4101909 F
Divers		2344883 F
Aléas		2812867 F
Total		56257333 F

M.E.T.R.O.S Version 1.00		Copyright (c) 1989, SEMALY
METRO sans eau		
Ratios significatifs		
Soutènement	1203 F/m <sup>2</sup>	28.1 %
Structures béton	1915 F/m <sup>3</sup>	42.1 %
Terrassement et étanchement de fouille	118 F/m <sup>3</sup>	11.7 %
Etanchéité	108 F/m <sup>2</sup>	1.6 %
VRD et Divers	6447 F/m	11.5 %
Aléas	2813 F/m	5.0 %
Section	56257 F/m	100.0 %

figure 4

M.E.T.R.O.S Version 1.00		Copyright (c) 1989, SEMALY
VAL sans eau		
Récapitulatif des coûts		
Soutènement		15322923 F
Structures béton		18521314 F
Terrassement et étanchement de fouille		5602746 F
Etanchéité		736380 F
Voiries et réseaux divers		3370604 F
Divers		2262002 F
Aléas		2411319 F
Total		48226388 F

M.E.T.R.O.S Version 1.00		Copyright (c) 1989, SEMALY
VAL sans eau		
Ratios significatifs		
Soutènement	1182 F/m <sup>2</sup>	31.8 %
Structures béton	2036 F/m <sup>3</sup>	38.4 %
Terrassement et étanchement de fouille	124 F/m <sup>3</sup>	11.6 %
Etanchéité	108 F/m <sup>2</sup>	1.5 %
VRD et Divers	5633 F/m	11.7 %
Aléas	2411 F/m	5.0 %
Section	48226 F/m	100.0 %

### **6.1.1. Manuel de l'utilisateur du logiciel METROS**



# **M.E.T.R.O.S.**

## **MANUEL DE L'UTILISATEUR**

SEMALY  
25, Cours Emile Zola  
69625 VILLEURBANNE CEDEX

Version 1.00  
Juin 1989





# INTRODUCTION

Le logiciel **METROS**, acronyme de Méthode d'Estimation Très Rapide d'Ouvrages Souterrains, est conçu pour répondre aux besoins des bureaux d'études effectuant des pré-études d'estimation d'infrastructures de métros réalisées en tranchée couverte ou au tunnelier. **METROS** trouvera pleinement son utilité dans la phase de pré-étude des projets. Il s'adresse donc tout particulièrement aux ingénieurs ou techniciens chargés de ces études.

Ce manuel décrit comment installer **METROS** et comment l'utiliser. Lisez le attentivement, il vous permettra de vous familiariser avec le logiciel **METROS**. Cette notice comprend six chapitres :

- Installation de **METROS**  
Vous indique comment installer **METROS** sur votre disque dur
- Débuter avec **METROS**  
Vous permet d'effectuer vos premiers pas avec **METROS**
- Gestion de la base de données  
Décrit la structure et la façon de gérer la base de données de **METROS**
- Détail des fonctions de **METROS**  
Recense toute les fonctions de **METROS**
- Définition et prédimensionnement  
Entre dans le détail de la définition des tronçons ou variantes
- Utilisation du micro éditeur de **METROS**  
Vous indique comment utiliser le micro éditeur intégré

## IMPORTANT

*Ce manuel est fourni à titre documentaire.  
Les informations contenues peuvent être  
soumises à modification sans préavis.*



# SOMMAIRE

<b>INSTALLATION DE METROS</b>	<b>4</b>
<b>DEBUTER AVEC METROS</b>	<b>6</b>
La structure de données	6
Structure principale des menus de METROS	7
<b>GESTION DE LA BASE DE DONNEES</b>	<b>12</b>
Tronçons et tronçons actifs	12
Variantes et variantes actives	12
Exemple de gestion de base de données	12
<b>DETAIL DES FONCTIONS DE METROS</b>	<b>14</b>
Définition de ligne	14
Ajouter nouveau tronçon	14
Sélection tronçon actif	15
Variantes	15
Ajouter variante	15
Variante active	15
Consultation	15
Retour	16
Prix de la ligne	16
Retour au menu principal	16
Bordereaux	16
Impression de la ligne	16
Variante particulière	16
Sélection tronçon	16
Variante active	16
Impression	17
Retour	17
Total seul	17
Retour au menu principal	17
Prix	17
Entrée des prix	17
Impression	17
Retour au menu principal	18
Fin	18
<b>DEFINITION ET PREDIMENSIONNEMENT</b>	<b>19</b>
Souterrain réalisé au tunnelier	19
Tranchée couverte	20
Le soutènement	20
Le cadre	22
Etanchement de fond de fouille	22
Etanchéité du cadre	22
<b>UTILISATION DU MICRO EDETEUR DE METROS</b>	<b>23</b>



# INSTALLATION DE METROS

METROS fonctionne sur tout IBM-PC ou compatible PC avec la configuration minimale suivante :

- \* taille mémoire : 256 Ko
- \* un disque dur 10 Mo
- \* un lecteur de disquettes
- \* une imprimante 80 colonnes

Vous devez copier les fichiers **METROS.EXE** et **METROS.OVR** dans un sous-répertoire que vous devez créer. Pour cela placez-vous sur le disque dur puis tapez:

```
MD METROS <entrée>
CD METROS <entrée>
```

Sur certains claviers, la touche <entrée> est remplacée par la touche <return> ou <enter>.

Placez la disquette **METROS** dans l'unité A puis faites:

```
COPY A:*. * C: <entrée> (si votre disque dur est C:)
```

Vous devez ensuite vérifier le fichier **CONFIG.SYS** qui doit se trouver dans le répertoire racine de votre disque dur. Ce fichier doit contenir les informations suivantes:

```
FILES=20
BUFFERS=20
```

Pour le vérifier, tapez:

```
TYPE CONFIG.SYS <entrée>
```

- Si vous n'avez pas de fichier **CONFIG.SYS** sur votre disque dur, vous devez le créer. Pour cela, vous pouvez utiliser un éditeur de texte comme **EDLIN** pour bien taper:

```
COPY CON CONFIG.SYS <entrée>
FILES=20 <entrée>
BUFFERS=20 <entrée>
<Ctrl> Z <entrée> ou bien <F6> <entrée>
```

à ce moment le système vous répondra:

1 fichier copié

- Si les instructions existent mais ont des valeurs inférieures à 20, vous devez alors modifier votre **CONFIG.SYS** avec un éditeur comme **EDLIN** pour les mettre à 20. Ne modifiez pas les autres instructions, elles sont là pour la bonne marche des autres logiciels installés sur votre disque dur.

- Si les valeurs sont supérieures, vous pouvez les laisser.

Réinitialisez alors votre système en appuyant simultanément sur les trois touches <Ctrl> <Alt> <Del>. Sur certains claviers la touche <Del> est remplacée par la touche <Suppr>.

Vous pouvez alors utiliser **METROS**, pour cela il vous suffira de taper **METROS** <entrée> .

Cette opération effectuée, rangez soigneusement votre disquette **METROS** dans un lieu sûr.

## NOTES IMPORTANTES

\* Lorsque vous utilisez **METROS**, veillez à ne **JAMAIS** éteindre la machine sans être sorti de **METROS**, vous perdriez alors toute votre session de travail !

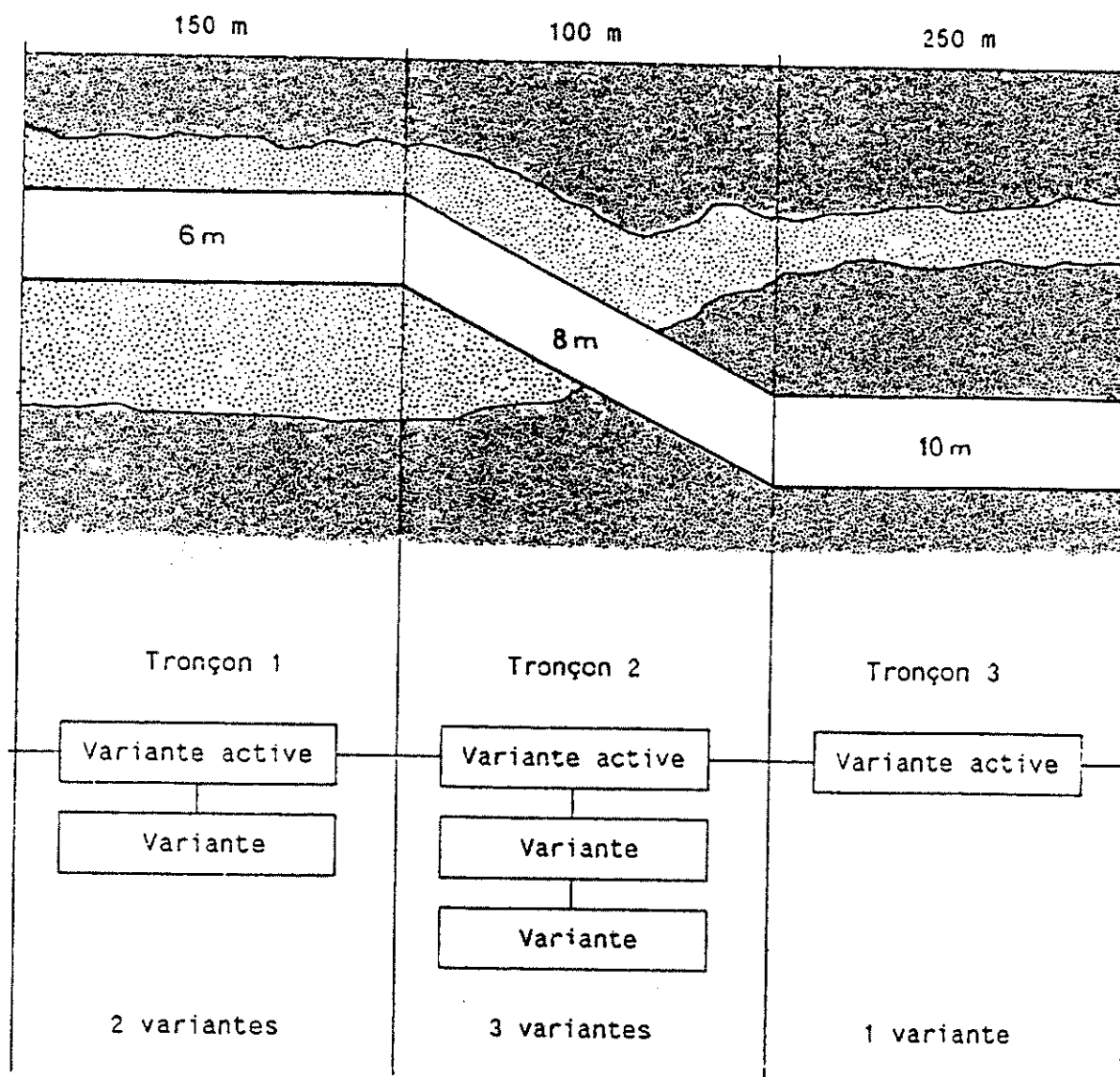
\* **METROS** détecte automatiquement les cartes couleurs. Si toutefois vous avez un écran noir et blanc avec une carte graphique couleurs, il est possible que vous ayez des problèmes de lecture à l'écran. Dans ce cas, lancez **METROS** avec le paramètre NB afin de lui indiquer que vous avez un écran noir et blanc:

**METROS NB <entrée>**

# DEBUTER AVEC METROS

## La structure de données

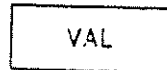
METROS a été conçu de façon que l'utilisateur ne se trouve jamais perdu dans les dédales de la programmation informatique. Mais avant de débiter, vous devez vous familiariser avec la base de données de METROS ainsi qu'avec la structure des menus de METROS.



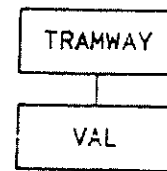
Les profils en long sont découpés en tronçons. Par exemple, pour une interstation de 500 m dont 200 m sont à 6 m de profondeur et 300 m à 10 m de profondeur, on pourra avoir 3 tronçons qui reprennent les caractéristiques moyennes de chaque coupe (figure ci-dessus).

Les tronçons ainsi formés supportent plusieurs variantes de réalisation. Vous pouvez, par exemple, changer les gabarits afin de comparer les solutions VAL et TRAMWAY. Pour cela, il faut définir d'abord la variante VAL puis sur le même tronçon vous ajoutez une variante TRAMWAY. Cette dernière remplace la variante VAL qui devient inactive mais est toujours gardée en mémoire.

### Définition de la variante VAL



### Définition de la variante TRAMWAY

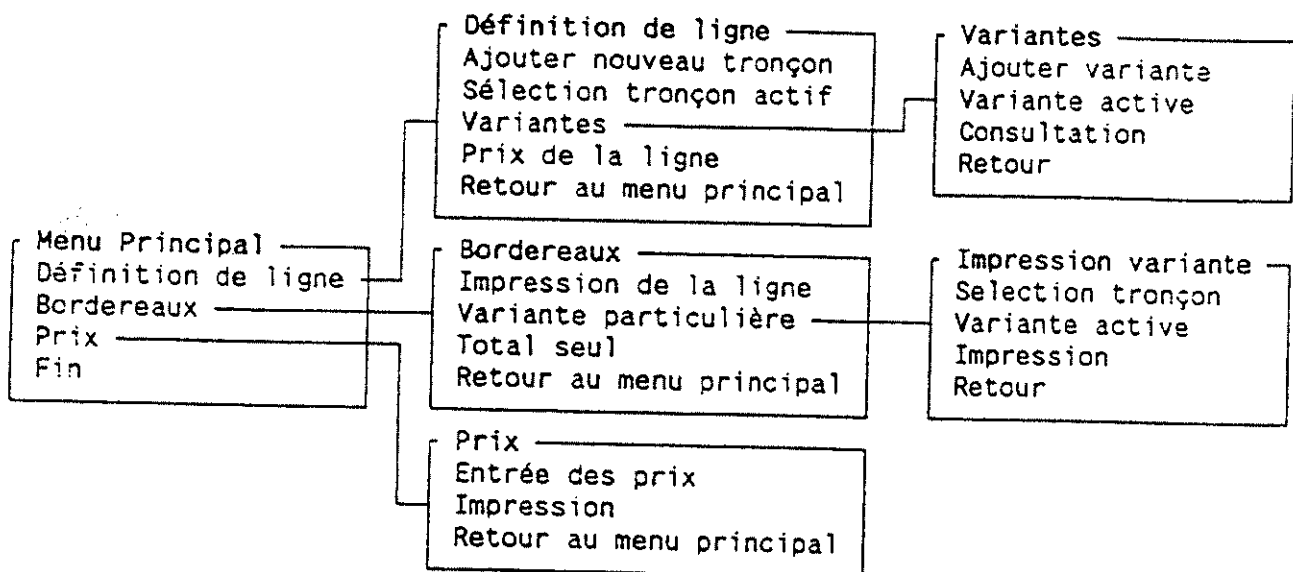


Pour rappeler la variante VAL, il suffit de l'activer. Cette activation provoque automatiquement la désactivation de la variante active (ici TRAMWAY).

### Activation de VAL



## Structure principale des menus de METROS



La sélection des commandes se fait en entrant la première lettre qui est en surbrillance et en validant par <entrée>.

METROS s'organise autour de trois grandes options:

- \* **Définition de ligne** vous permet de définir et de gérer votre projet dans la base de données.
- \* **Bordereaux** permet l'impression des solutions et des coûts des variantes retenues ainsi que la gestion des variantes dans la base de données.
- \* **Prix** vous permet de définir ou modifier les prix unitaires de base.

### Votre premier tronçon

Dans cette partie, nous allons traiter un exemple simple afin de vous familiariser mieux avec METROS. Ce cas est inspiré du métro lyonnais, les données du problème sont :



### \* La géométrie

- le tronçon étudié a une longueur de 500 mètres
- le radier se trouve à 7,30 m de profondeur
- le cadre est réalisé en tranchée couverte à une alvéole
- ses dimensions intérieures sont:
  - hauteur : 4,50 m
  - largeur : 7,60 m
- cette section se trouve sous une rue, les surcharges routières sont de 25 kPa (2,5 t/m<sup>2</sup>)

### \* Le sol

- type granulaire
  - pas de cohésion
  - angle de frottement interne : 30°
  - poids volumique humide : 21,5 kN/m<sup>3</sup>
  - poids volumique déjaugé : 13,5 kN/m<sup>3</sup>
- la nappe est à 5,00 m de profondeur 300 j/an. Les Très Hautes Eaux Connues sont à 3 m de profondeur.
- le substratum (la molasse) se trouve à 25 m de profondeur.

Avant de commencer à définir le projet, vous devez vous assurer que vous avez bien un fichier \*.PRX dans votre répertoire. Dans le cas contraire, vous devez en définir un par la commande Prix du menu principal de METROS. En principe, le fichier METROS.PRX vous est fourni à titre d'exemple.

Cette vérification effectuée, vous pouvez commencer la définition du projet. Pour cela, lorsque vous êtes dans le menu principal de METROS, tapez D puis <entrée>.

M.E.T.R.O.S. Version 1.00

Copyright (C) 1989, SEMALY

```
Menu principal
-----
Définition de ligne
Bordereaux
Prix
Fin

Choix :
```

METROS demande alors d'entrer le nom du fichier de la ligne à définir. Tapez EXEMPLE1 <entrée>. Si vous vous êtes trompé, vous pouvez à tout moment utiliser les touches d'édition pour corriger. Vous remarquerez que METROS prend par défaut l'extension .LGN pour votre fichier.

Puisque vous créez un nouveau fichier, METROS vous l'indique et vous attend pour continuer.

Entrez ensuite le nom du fichier de prix à traiter. Pour cet exemple entrer METROS ou un autre nom si vous avez défini un autre fichier de prix.

Vous vous trouvez alors dans le menu de définition de ligne.

Fichier ligne	: D:D.LGN
Fichier prix	: D:P.PRX
Nombre de tronçons	: 0
Tronçon actif	: aucun
Nombre de variantes	: 0
Variante active	: aucune

**Définition de ligne**

Ajouter nouveau tronçon  
Selection tronçon actif  
Variantes  
Prix de la ligne  
Retour au menu principal

Choix :

La fenêtre du haut vous rappelle brièvement les caractéristiques de la ligne sur laquelle vous travaillez. Dans la fenêtre du bas, vous avez la liste des commandes disponibles.

Dans notre exemple tapez **A** pour Ajouter nouveau tronçon, puis <entrée>. Entrez alors le nom du tronçon.

Nom de la variante à définir

LYON tronçon 1 tranchée couverte

Vous devrez répondre ensuite à une série de questions concernant les données du problème.

Après cette première phase d'acquisition, **METROS** explore toutes les possibilités et affiche les résultats qu'il a trouvé et vous demande le soutènement à mettre en oeuvre.

Les autres types de soutènements n'ont pas été dimensionnés par **METROS** car ils ne convenaient pas (trop lourds, présence d'eau...).

Bien que **METROS** déconseille certains soutènements, vous pouvez quand même les choisir mais c'est à vous que revient la charge de dimensionner le soutènement. Dans cet exemple de Lyon, nous allons choisir les parois moulées comme le préconise **METROS**.

Pour cela, il suffit d'entrer le numéro de ce soutènement (3 ici) et de le valider. La fenêtre en haut à gauche de l'écran contient alors le dimensionnement proposé par **METROS**. Vous remarquerez que l'épaisseur des piédroits a changé (ils reprennent 50% de la poussée des terres et 100% de la poussée de l'eau dans le cas de parois moulées ou préfabriquées).

<b>Parois moulées</b> Epaisseur : 100 cm Fiche : 6.0 m 1 lit de tirants Esp. entre tirants : 2.5 m Longueur tirant : 10.0 m		<b>Rappel</b> LYON tronçon 1 tranchée couverte Profondeur : 7.30 m Hauteur int : 4.50 m Largeur int : 7.60 m Sol : Granulaire avec eau Réalisation : Tranchée couverte Cadre à 1 alvéole	
<b>Cadre — Epaisseurs — Ferrailage</b> Dalle : 65 cm : 78 kg/m <sup>3</sup> Piédroit : 44 cm : 59 kg/m <sup>3</sup> Radier : 68 cm : 78 kg/m <sup>3</sup>		<b>Choix</b> Epaisseur : 60 cm Fiche : 5.0 m Butons ou Tirants (B/T) ? t Nombre de lit(s) : 2 Esp. entre tirants : 2.5 m Longueur tirant : 7.0 m	
<b>Etanchement de la fouille</b> Béton immergé : Possible Radier injecté : Possible Ancrage substratum : Possible			

A la question posée, nous allons répondre N pour NON et remplacer les valeurs des paramètres de soutènement proposés par les valeurs suivantes:

- une paroi de 60 cm d'épaisseur
- une fiche de 5 m
- 2 lits de tirants
- l'espacement entre tirants sera de 2,5 m
- la longueur moyenne d'un tirant sera de 7,0 m.

Après l'acquisition de ces nouveaux paramètres, METROS vous demande confirmation avant de passer à la partie cadre.

Dans la partie cadre, nous allons modifier légèrement les épaisseurs du cadre afin de les ramener à des valeurs multiples de 5. On prendra par exemple:

Dalle : 65 cm  
 Piédroit : 45 cm  
 Radier : 70 cm

Pour effectuer cette modification, il suffit de suivre la même démarche que lors du changement des paramètres du soutènement. Il faut donc répondre Non à la question puis donner les bonnes épaisseurs.

<b>Choix des épaisseurs</b>	
Dalle :	65 cm
Piédroit :	45 cm
Radier :	70 cm

Vous pouvez passer ensuite à l'étanchement du fond de fouille. La démarche est analogue à celle du soutènement; vous devrez choisir le type d'étanchement puis, s'il y a lieu, changer les paramètres proposés.

Pour cet exemple, nous choisirons un radier injecté de 2 m d'épaisseur avec 50 cm de terre au dessus. Choisissez pour ce faire l'option 1 puis répondez O ou <entrée> à la question posée. Vous avez alors l'écran suivant:

M.E.T.R.O.S. Version 1.00

Copyright (C) 1989, SEMALY

<b>Parois moulées</b> Epaisseur : 60 cm Fiche : 5.0 m 2 lits de tirants Esp. entre tirants : 2.5 m Longueur tirant : 7.0 m		<b>Rappel</b> LYON tronçon 1 tranchée couverte Profondeur : 7.30 m Hauteur int : 4.50 m Largeur int : 7.60 m Sol : Granulaire avec eau Réalisation : Tranchée couverte Cadre à 1 alvéole	
<b>Cadre</b> Dalle : 65 cm : 78 kg/m3 Piedroit : 45 cm : 58 kg/m3 Radier : 70 cm : 74 kg/m3		<b>Choix</b> Voulez-vous garder les paramètres d'étanchement proposés (O/N) ?	
<b>Etanchement de la fouille</b> Radier injecté Poids volumique : 24.14 kN/m3 Radier : 2.00 m Terre : 0.50 m			

Cette première phase de définition achevée, METROS affiche la liste des métrés et des forfaits. Pour l'instant, nous n'allons rien modifier et il vous suffit d'appuyer sur la touche <entrée> pour passer les différents écrans (il est inutile de répondre à la question des forfaits par des O). Vous vous retrouvez alors à l'écran de départ (Définition de ligne) de la page 9 avec cette fois un tronçon défini. Le tronçon actif est celui que vous venez de définir, il ne contient qu'une seule variante qui est la variante active.

La sauvegarde est automatique lorsque vous revenez au menu principal.

# GESTION DE LA BASE DE DONNEES

Dans ce chapitre, vous allez apprendre à gérer la base de données dont la nature vous été présenté au chapitre précédent. Si vous n'avez pas lu l'introduction sur la base de données, lisez-la avant de passer à la suite de ce chapitre.

## Tronçons et tronçons actifs

**METROS** permet grâce à la base de données de travailler sur tous les tronçons mais, pour des raisons évidentes, vous ne pouvez travailler sur tous les tronçons simultanément. **METROS** non plus d'ailleurs.

Pour cela, **METROS** range sur disque tous les tronçons. Lorsque vous décidez d'étudier plus particulièrement un tronçon, **METROS** charge une variante de ce tronçon en mémoire afin que vous puissiez la consulter ou la modifier. Ce tronçon est appelé **tronçon actif**.

Lorsque vous avez une liste de tronçons, vous pouvez, grâce à **METROS**, effectuer les opérations suivantes:

- sélectionner un tronçon pour l'activer
- créer un nouveau tronçon et l'insérer dans la liste

(dans l'exemple du chapitre précédent, vous avez créé un tronçon et vous l'avez inséré dans la liste qui était vide).

Vous pouvez ainsi définir jusqu'à 999 tronçons enchaînés les uns aux autres. Si vous essayez de dépasser ce nombre, **METROS** plantera !

## Variantes et variantes actives

Grâce à la base de données, **METROS** permet le stockage et le rappel des variantes de réalisation que vous avez préalablement définies. Comme vous ne pouvez étudier qu'une seule variante à la fois, **METROS** range sur disque les variantes non utilisées et charge en mémoire la variante à étudier: cette variante est appelée variante active.

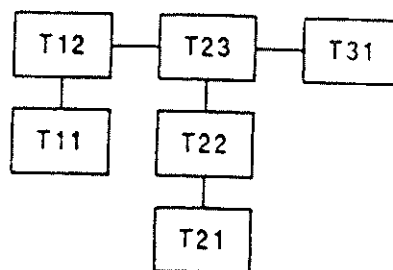
L'activation d'une variante engendre une légère différence par rapport à celle d'un tronçon. Un tronçon est actif du moment où on y travaille jusqu'au moment où on passe à un autre tronçon. Une variante est active lorsqu'on y travaille. La différence provient du calcul des coûts lors de l'intégration en long. En effet, seules les variantes actives seront prises en compte dans l'estimation globale et lors de l'édition de bordereaux. Contrairement aux tronçons, vous ne pouvez pas intervenir directement sur la numérotation des variantes, c'est-à-dire que vous ne pouvez pas insérer de variante comme avec les tronçons, le numéro d'une variante étant en fait le rang de sa création.

## Exemple de gestion de base de données

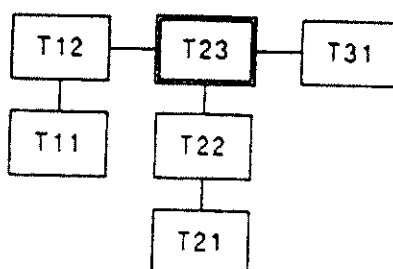
Dans ce qui suit vous allez, grâce à un exemple, mieux saisir ce qu'est une base de données pour **METROS**.

A partir du menu principal, entrez dans le menu Définition de ligne, puis chargez les fichiers EXEMPLE2.LGN et METROS.PRX.

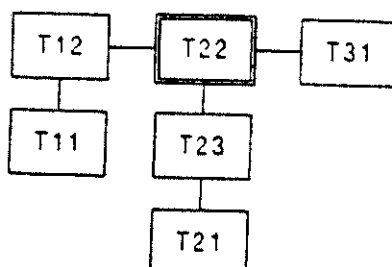
La structure du fichier EXEMPLE2.LGN est schématisée sur la figure suivante :



Nous allons sélectionner la variante T22 dans la base de données. Pour cela entrez la commande **Sélection tronçon actif**; **METROS** propose le dernier des tronçons (3), entrez le n°2 et validez. Après cette validation, la structure est la suivante (vous êtes sur la variante dont les contours sont en doubles traits):



Pour sélectionner la variante T22, entrez la commande **Variantes** puis sélectionnez grâce à la commande **Variante active** la variante n°2. La fenêtre de rappel vous indique que la variante 2 du tronçon 2 est chargée. Le schéma est alors le suivant:



Vous pouvez consulter et modifier cette variante avec la commande **Consultation** du même menu (**Variantes**).

Vous pouvez aussi ajouter une quatrième variante à ce tronçon, par exemple une variante au tunnelier avec deux tubes. Pour cela utilisez la commande **Ajouter variante** du menu **Variantes**. La démarche est la même que celle vue dans l'exemple 1 du chapitre précédent. Si vous ajoutez une quatrième variante au tronçon 2, le tronçon actif T22 est rangé et le nouveau tronçon T24 devient le tronçon actif.

Si vous voulez maintenant consulter la variante T11, revenez au menu **Définition de ligne**, sélectionnez le tronçon 1 puis dans le menu **Variantes**, activez la variante T11 (commande **Variante active**) avant de la consulter (commande **Consultation**).

## DETAIL DES FONCTIONS DE METROS

Dans la suite, pour valider une commande, il suffira de taper la première lettre de la commande (celle qui apparaît en brillant dans le menu) et d'appuyer sur <entrée>.

Menu principal
Définition de ligne
Bordereaux
Prix
Fin

### Définition de ligne

Lorsque vous lancez cette fonction, METROS vous demandera d'abord le fichier de la base de données puis le fichier des prix unitaires. Si vous ne spécifiez pas d'extension aux noms de ces fichiers, METROS prendra .LGN pour le fichier de ligne et .PRX pour le fichier de prix.

Si vous créez une nouvelle ligne, il suffit d'entrer son nom pour créer un nouveau fichier. Si vous voulez reprendre une ligne déjà définie, entrez simplement son nom.

Lorsque vous reprenez un fichier existant, METROS sauve l'ancien fichier avec l'extension .L\$. Ainsi, en cas de problème, vous pourrez toujours récupérer l'ancienne version en renommant le fichier avec l'extension .LGN.

Nom du fichier de la ligne à créer ou à modifier [.LGN]
D:\TP5\ESTIME\EXEMPLE3.LGN

Nom du fichier de prix à charger [.PRX]
D:\TP5\ESTIME\PRIXLYON.PRX

Les fonctions disponibles dans le menu **Définition de ligne** sont décrites dans la suite de cette partie.

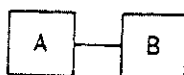
Définition de ligne
Ajouter nouveau tronçon
Sélection tronçon actif
Variante
Prix de la ligne
Retour au menu principal

### Ajouter nouveau tronçon

Cette fonction permet d'ajouter un nouveau tronçon à la base de données, soit à la fin de la liste de tronçons, soit en insertion avant le tronçon actif.

Lorsque METROS demande Ajout ou Insertion, si vous validez par <entrée> seulement, METROS

prendra par défaut Ajout en fin.



Ajout du tronçon C



Insertion du tronçon C  
au niveau 2

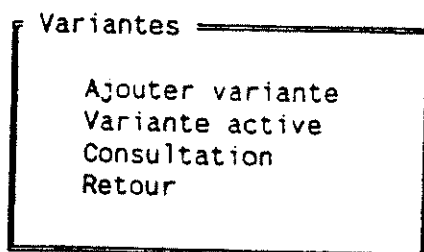
Pour la définition, voir le chapitre suivant.

### Sélection tronçon actif

Cette fonction permet de sélectionner le tronçon actif. Lorsque votre choix est établi, **METROS** charge automatiquement la variante active du tronçon choisi.

### Variantes

Cette fonction n'est accessible que si un tronçon est sélectionné. Dans ce cas, **METROS** vous donne accès aux fonctions supplémentaires suivantes:



### Ajouter variante

Cette fonction est similaire à la fonction Ajouter nouveau tronçon, elle vous permet de définir de nouvelles variantes pour le tronçon en cours. Il est à noter que contrairement aux tronçons, vous ne pouvez pas insérer de variantes; celles-ci sont numérotées dans l'ordre croissant de leur création.

Pour la définition, voir le chapitre suivant.

### Variante active

Cette fonction permet d'activer la variante que vous voulez consulter ou modifier.

### Consultation

Grâce à cette fonction, vous pouvez consulter et modifier les valeurs des forfaits de la variante sélectionnée. Pour faire ces modifications, voir le chapitre suivant.



## Retour

Vous permet de revenir au menu précédent, c'est-à-dire au menu **Définition de ligne**.

## Prix de la ligne

Affiche les coûts totaux de chaque tronçon, le calcul des prix se faisant sur les variantes actives de chaque tronçon.

## Retour au menu principal

Effectue un retour au menu principal ainsi qu'une sauvegarde automatique de votre session de travail.

## Bordereaux

Lorsque vous lancez cette commande, **METROS** vous demande, comme pour la définition de ligne, les noms des fichiers de base de données et de prix.

<b>Bordereaux</b>
Impression de la ligne
Variante particulière
Total seul
Retour au menu principal

## Impression de la ligne

Cette fonction permet d'imprimer les bordereaux détaillés de tous les tronçons (en tenant compte des variantes actives seulement) ainsi que le total de la ligne.

Avant d'imprimer, **METROS** demande si l'imprimante est connectée. Si elle ne l'est pas, répondez **NON**, vous reviendrez au menu **Bordereaux**. Lors de l'impression, **METROS** affiche les tronçons qu'il est en train d'imprimer, c'est-à-dire le n° de tronçon, le n° de variante et le nom.

## Variante particulière

Grâce à ce menu, vous pouvez imprimer les bordereaux d'un seul tronçon et effectuer de petites manipulations sur la base de données.

## Sélection tronçon

Vous pouvez avec cette fonction sélectionner le tronçon dont vous voulez imprimer une variante.

## Variante active

Cette commande permet la modification de la base de données par activation de la variante que vous voulez imprimer ou que vous voulez voir prise en compte dans l'intégration de tous les tronçons.

## Impression

Cette fonction conduit à l'impression du bordereau détaillé de la variante active en cours. Avant d'imprimer, **METROS** demande si l'imprimante est connectée. Si elle ne l'est pas, répondez NON, vous reviendrez au menu **Bordereaux**.

## Retour

Revient au menu précédent (**Bordereaux**).

## Total seul

Cette commande lancera l'impression des prix des tronçons et du total de la ligne. Cette fonction est analogue à la fonction Prix de la ligne, mais la différence est que Total seul n'imprime pas le détails des tronçons.

## Retour au menu principal

Le retour au menu principal effectue une sauvegarde automatique des modifications éventuelles faisant suite à l'édition de bordereau.

## Prix

Cette option du menu principal peut mettre à jour vos fichiers de prix ou en créer de nouveaux. Vous pouvez par exemple définir un fichier de prix pour chaque ville ou encore des fichiers de prix TTC ou HT. Le nombre de fichiers est quasi illimité.

Lorsque cette fonction est sélectionnée, **METROS** vous demande d'abord un fichier de prix. Si aucune extension n'est spécifiée, **METROS** prendra .PRX. Si vous ne précisez aucun nom, **METROS** reviendra au menu principal. Si vous créez un nouveau fichier, vous entrez directement dans la phase d'entrée des prix; dans le cas contraire, vous avez le cadre suivant:

Prix
Entrée de prix
Impression
Retour menu principal

## Entrée des prix

Avec cette fonction, vous définissez tous les prix entrant en ligne de compte pour l'estimation des lignes.

Lorsque vous reprenez un fichier et définissez de nouveaux prix, **METROS** crée automatiquement une copie de sauvegarde avec l'extension .P\$\$\$. Ainsi en cas d'incident, vous pouvez toujours le récupérer en renommant le fichier avec l'extension .PRX

## Impression

Cette option imprime la liste des prix du fichier que vous avez chargé. Comme avant chaque impression, **METROS** demande si l'imprimante est connectée. Si elle ne l'est pas ou si vous avez changé d'avis, répondez N et vous reviendrez au menu **Prix**.

### **Retour au menu principal**

Retourne au menu principal et effectue une sauvegarde de vos modifications.

### **Fin**

Cette commande termine **METROS** et rend le contrôle au système.



# DEFINITION ET PREDIMENSIONNEMENT

Il existe deux façons d'entrer dans la phase de définition. La première est d'ajouter un nouveau tronçon, la seconde est d'ajouter une variante. Pour les deux cas, la procédure est exactement la même.

**METROS** ne traite actuellement que des souterrains réalisés au tunnelier et des tranchées couvertes à une ou deux alvéoles.

Lorsque vous êtes dans la phase de définition, vous devez tout d'abord entrer la liste des renseignements qui serviront de base au prédimensionnement automatique. Notez que **METROS** propose par défaut les paramètres de la dernière variante que vous avez traitée si elle est du même type que celle que vous êtes en train de définir (souterrain ou tranchée couverte).

## Souterrain réalisé au tunnelier

Pour définir un tronçon, **METROS** vous demande tout d'abord toute une série de paramètres divisés en trois groupes, ce sont:

### \* la géométrie de l'ouvrage

- la longueur totale du tronçon
- la profondeur du niveau supérieur du radier
- le nombre de tubes
- le diamètre intérieur du ou des tubes
- l'épaisseur du revêtement

### \* le sol

- son type
- sa cohésion
- son angle de frottement interne
- ses poids volumiques humide et déjàugé
- le niveau de nappe non dépassé 300 jours par an et le niveau des THEC
- la profondeur du substratum

### \* les installations et autres

- le nombre de puits
- la surface et le périmètre de chaque puits
- la vitesse d'avancement
- le nombre de postes et le nombre d'hommes par poste.

Après avoir l'entrée de ces premiers renseignements, **METROS** affiche un prédimensionnement des puits (s'il y en a) et propose les soutènements de la liste suivante:

Palplanches  
Parois préfabriquées  
Parois moulées  
Berlinoises  
Jet Grout  
Cloutage

En général, lorsque vous avez des puits profonds, vu que **METROS** n'effectue le calcul qu'avec une seule rangée de tirants, les résultats que vous obtiendrez seront très supérieurs à la réalité. Il vous revient alors de rétablir les bonnes dimensions et quantités.

Pour plus de détails sur la définition des soutènements, vous pouvez vous reporter à la section tranchée couverte car mis à part un talus et des butons qui sont interdits pour les puits du tunnelier, la définition est identique.

Lorsque vous avez terminé cette phase de dimensionnement, **METROS** calcule tous les mètres et les affiche avec les forfaits qui peuvent s'y rattacher. Vous avez la possibilité de modifier ces derniers en entrant un coefficient pondérateur.

Ce coefficient permet d'assurer une indépendance de la définition vis à vis de l'évolution de vos prix. Par défaut, la majorité des coefficients sont initialisés à 1. Vous pouvez, suivant les circonstances les modifier pour mieux affiner votre projet.

## Tranchée couverte

Les paramètres d'initialisation de la tranchée couverte se divisent, comme pour le souterrain, en trois groupes, ce sont:

### \* la géométrie

- la longueur totale du tronçon
- la profondeur du niveau supérieur du radier
- le nombre d'alvéoles
- la hauteur intérieure du cadre
- sa largeur intérieure

### \* le sol

- son type
- sa cohésion
- son angle de frottement interne
- ses poids volumiques humide et déjàugé
- le niveau de nappe non dépassé 300 jours par an et le niveau des THEC
- la profondeur du substratum

### \* les divers

- les surcharges au-dessus de la section
- l'espace libre à droite à partir du milieu de la section
- l'espace libre à gauche à partir du milieu de la section

Lorsque vous avez entré ces paramètres, **METROS** effectue un prédimensionnement complet des soutènements, du cadre, et éventuellement de l'étanchement de fond de fouille. Il vous propose alors ses résultats et il ne vous reste plus qu'à choisir.

## Le soutènement

C'est le premier poste que vous devrez choisir; vous avez le choix entre talus, palplanches, parois préfabriquées ou moulées, berlinoises, jet grout et cloutage. Les soutènements marqués <non calculé> sont en principe déconseillés, toutefois **METROS** ne vous interdit pas leur choix. Ce sera alors à vous d'entrer les bons paramètres, de vérifier leur dimensionnement et leur faisabilité.

### Remarque à propos du prédimensionnement

Le prédimensionnement des écrans verticaux se fait avec l'hypothèse d'une rangée de tirants ou butons. Lorsque la profondeur croît, **METROS** n'ajoute pas de rangée d'appuis supplémentaires et effectue toujours son calcul avec une seule rangée de tirants ou de butons. Dans ce cas, vous devrez dimensionner vous-même les soutènements. Pour mémoire, les calculs pour les écrans verticaux sont conduits dans l'hypothèse d'une plasticité parfaite.

## Paramètres du soutènement

### Talus

**Angle:**

Angle de la pente du talus par rapport à l'horizontale

**Espace service:**

Espace entre l'extérieur du cadre et le début du talus, au niveau du fond de fouille

### Palplanches

**Provisoires ou Définitives:**

Les palplanches sont provisoires si elles sont arrachées à la fin des travaux et définitives sinon

**Réf:**

Référence des palplanches, choix entre IIs, IIIs, IVs ou Vs

**Fiche:**

Fiche des palplanches, pour la butée

**Butons ou Tirants:**

Choix de l'appui, par défaut, METROS prend Tirants

**Nombre de lit(s):**

Nombre de lit de butons ou de tirants, par défaut METROS prend un lit

**Espace entre butons ou tirants:**

Espacement horizontal des appuis

**Masse lin. bouton:**

Masse linéaire d'un bouton

**Masse lin. lierne:**

Masse linéaire d'une lierne

**Longueur tirant:**

Longueur moyenne d'un tirant

### Parois moulées ou parois préfabriquées

**Epaisseur:**

Epaisseur de la paroi prise chez Solétanche

**Fiche:**

Fiche de butée de la paroi qui est ferrillée jusqu'à cette limite

**Butons ou Tirants:**

Voir palplanches

### Berlinoises

**Espacement:**

Espacement entre les profilés verticaux

**Fiche:**

Fiche des profilés

**Profil:**

Référence du profilé dans la série des HE A

**Béton Coulé/Projeté:**

Type de blindage entre profilés (béton projeté ou coulé en place)

**Butons ou Tirants:**

De préférence, choisissez les butons. Pour le reste, voir palplanches

### Cloutage

Identique au talus

## Le cadre

Dans les hypothèses de calcul, on suppose que lorsque le soutènement est de type parois moulées ou préfabriquées, le cadre reprend 50% de la poussée des terres et 100% de celle de l'eau. C'est ainsi que vous pouvez remarquer lors du choix du soutènement que les épaisseurs de piédroits et du radier varient instantanément. L'épaisseur de dalle peut aussi changer un peu car METROS affine le dimensionnement.

Le calcul des épaisseurs de béton se fait selon les règles B.A.E.L. 1983 en faisant travailler les sections au pivot A.

Avant de passer à l'étanchement de fond de fouille, METROS vérifie si le cadre ne dépasse pas le terrain naturel et s'il y a risque de flottation de l'ouvrage. Si l'une des deux conditions est mise en cause, METROS envoie un message sans toutefois proposer de solution à ce problème. Pour le cas d'un cadre à deux alvéoles, METROS dimensionne le voile central, et affiche l'épaisseur de poinçonnement.

## Etanchement de fond de fouille

Lorsque ce poste existe, c'est le dernier que vous avez à choisir. Vous pouvez prendre le béton immergé, le radier injecté ou l'ancrage au substratum. Dans les trois cas, lorsque c'est possible, METROS vous propose un dimensionnement que vous pourrez modifier à loisir.

**Note :** METROS limite l'épaisseur de béton immergé à 5 mètres et l'ancrage au substratum à 15 mètres entre ce substratum et le bas du soutènement.

## Paramètres de l'étanchement

### Béton immergé

**Epaisseur de béton:**

Epaisseur de béton immergé, dimensionnée aux-sous pressions

### Radier injecté

**Epaisseur du radier:**

Epaisseur du radier injecté

**Epaisseur de terre:**

Epaisseur de terre sur le radier injecté

### Ancrage au substratum

**Longueur d'ancrage:**

Longueur d'ancrage dans le substratum étanche

## Etanchéité du cadre

Lorsque vous avez choisi ces trois postes, METROS fait automatiquement le calcul des mètres ainsi que le dimensionnement de l'étanchéité du cadre. Ensuite il affiche ses résultats ainsi que les forfaits s'y rattachant. Vous avez la possibilité de modifier ces derniers en entrant un coefficient pondérateur.

Ce coefficient permet d'assurer une indépendance de la définition vis à vis de l'évolution de vos prix. Par défaut, la majorité des coefficients sont initialisés à 1. Vous pouvez, suivant les circonstances les modifier pour mieux affiner votre projet.

Après avoir défini le tronçon, METROS range toutes les données et tous les résultats concernant ce tronçon dans la base de données. Il est possible d'effectuer les opérations décrites au chapitre précédent sur la base de données.



## **6.2 Présentation du logiciel ESTIM**





## CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS

199, AVENUE SALVADOR ALLENDE - CASE N° 1 - 92074 BRON CEDEX  
TEL : 78 41 81 26 TELEX CETELYO 370008 F TELECOPIE 78 26 40 39

ESTIM

-----

### I) INTRODUCTION

-----

Le programme ESTIM est un logiciel d'aide au maître d'œuvre dans l'établissement des estimations préliminaires à un projet de tunnel. L'utilisation de ce logiciel se situe au niveau des Etudes préalables voire au niveau des études d'avant-projet pour faire le choix entre différentes variantes.

Il s'applique aux seuls ouvrages creusés (à l'exclusion des tunnels immergés et des tranchées couvertes) dont le revêtement, lorsqu'il existe, est réalisé en béton coffré (ou projeté) avec un profil d'intrados circulaire.

On considère, dans ce logiciel, toutes les parties d'ouvrages en section courante. Il en découle que les ouvrages de tête et tranchées d'accès, qui nécessitent une étude spécifique sont à estimer à part.

### II - METHODES EMPLOYEES :

-----

Elle est basée sur les prix de référence 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 trois profils, injection de remplissage...).

Les ratios de coût des tunnels utilisés au début des projets sont affectés d'une double imprécision :

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

Ce deuxième facteur est atténué ici puisque les prix qui constituent le fichier résultant de l'analyse de travaux de tunnels étalés dans le temps et dans l'espace. Le premier facteur d'imprécision lui est toujours présent et l'apparente simplicité d'utilisation de ce logiciel ne doit pas masquer l'incertitude liée aux longueurs d'application des différents profils de soutènement. A un niveau plus élaboré des études les géologues géotechniciens devront donc être étroitement associés aux estimations.



DIRECTION DES ROUTES

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT DU LOGEMENT  
DES TRANSPORTS ET DE LA MER



## III - LE LOGICIEL

### 3.1 Généralités

Ecrit de manière à être utilisé en mode conversationnel, donc d'utilisation aisée, il est articulé en deux parties principales :

- \* Etude des Profils de Soutènement qui par une série de questions logiques permet de décrire tous les profils à prendre en compte.
- \* Etude de prix à partir d'un avant métré effectué par le programme et de la base de données "prix", les profils définis sont chiffrés. Il reste à définir les longueurs d'application des profils ainsi qu'une éventuelle somme à valoir couvrant les incertitudes liées aux variations de ces longueurs.

### 3.2 Entrée des données

Elle consiste à introduire les paramètres généraux nécessaires au calcul que sont les contraintes géométriques à savoir :

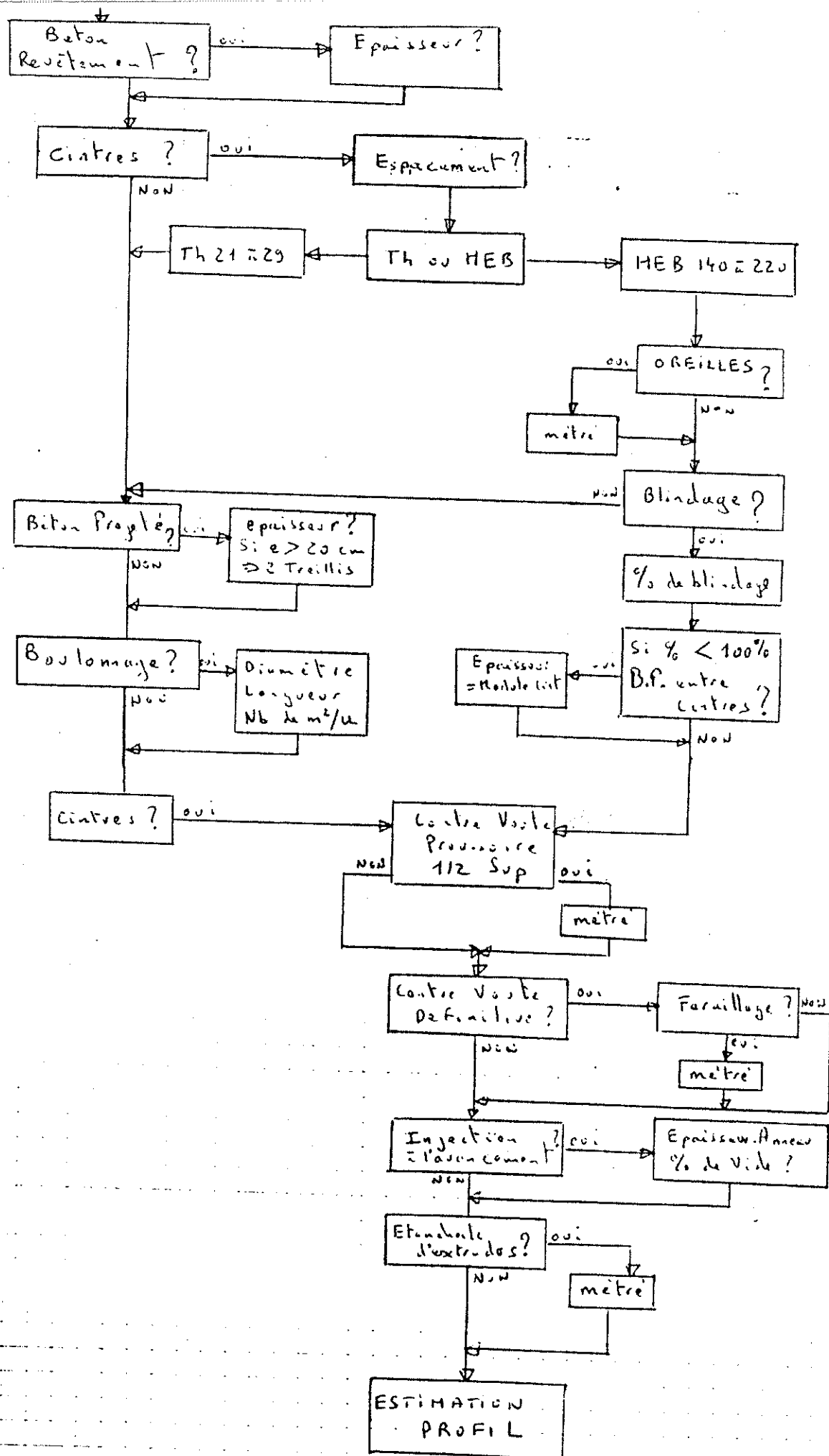
- rayon intérieur
- hauteur au centre
- éventuellement nombre de gaines de ventilation et surface totale de celles-ci.

Nota : toutes ces données peuvent être issues du Logiciel "CALSEC" (calcul de section) qui est un programme destiné à optimiser les sections intérieures compte-tenu des contraintes du projet (Nb de voies, gabarit, trottoirs, signalisation...).

En second lieu profil par profil, il est possible de déterminer la structure en suivant un schéma logique (voir annexe).

Le programme estime alors les coûts d'un mètre linéaire de tunnel profil par profil avec un ratio de contrôle (prix ramené au m<sup>2</sup> utile intrados), puis le total général en tenant compte des longueurs d'applications. Il est possible enfin de prendre en compte une S.A.V. qui englobe les incertitudes liées aux longueurs d'applications des profils.





# Estimation du tunnel de ESSAIS

\*\*\*\*\*

Rayon intérieur 5.00 m  
 Hauteur au centre 2.00 m  
 Plafond de ventilation 2 Gaines Surface totale 15 m2

## PROFIL N° 1

Epaisseur de béton coffré = .30 m  
 Cintres TH 21 Espacement 1.00m  
 Blindage tôles 3 mm 40 %  
 Béton poleté sur le reste de la section  
 Boulons diamètre 25 mm longueur 4.0 m 3.0 m2 par boulon  
 Contre voute provisoire en 1/2 SS épaisseur .20 m  
 Contre voute définitive  
 + Ferrailage de contre voute définitive  
 Etanchéité d'intrados membrane P.V.C.

## PROFIL N° 2

Epaisseur de béton coffré = .30 m  
 Cintres HEB 100 Oreilles Espacement 1.00m  
 Blindage tôles 3 mm 100 %  
 Contre voute définitive  
 + Ferrailage de contre voute définitive  
 Etanchéité d'intrados membrane P.V.C.

## PROFIL Numéro 1

Libellé du prix	...	Q	..	Prix unit.	Q x Pu	. % du Prix/ml
EXCAVATION	...	82.11..	250 F/M3 =	20527.50 F/ml	24.4 %	
BLINDAGE	...	176.68..	13 F/KG =	2336.84 F/ml	3.1 %	
CINTRES	...	485.39..	12 F/KG =	5824.68 F/ml	6.9 %	
BETON PROJETÉ	...	5.26..	1300 F/M3 =	6838.00 F/ml	8.2 %	
BETON DE BLOCCAGE	...	.84..	1300 F/M3 =	1092.00 F/ml	1.3 %	
TRÉILLIS	...	42.03..	13 F/KG =	546.39 F/ml	.6 %	
BOULONS	...	108.78..	40 F/KG =	4351.20 F/ml	5.1 %	
BETON COFFRÉ	...	15.76..	800 F/M3 =	12608.00 F/ml	15.1 %	
COFFRAGE INTRADOS	...	17.82..	250 F/M2 =	4455.00 F/ml	5.3 %	
FERRAILLAGES	...	285.62..	10 F/KG =	2856.20 F/ml	3.4 %	
REMPLI C.V. BETON	...	8.07..	750 F/M3 =	6052.50 F/ml	7.2 %	
FENDRE FOUILLE	...	21.91..	160 F/M2 =	3505.60 F/ml	4.2 %	
PLAFOND VENTILATION	.....			7067.07 F/ml	8.4 %	
INSTALLATIONS DIVERS	...	(10 % du cont./ml)		7567.10 F/ml	9.0 %	
					100.0 %	

Prix du profil 1 en ml H.T. = 83260.08 soit 1418 F/m2 de volume intrados

Quantité d'application du profil 1 = 1 ml

## PROFIL Numéro 2

Libellé du prix	Q	Prix unit.	Q x Pu	% du Prix/ml
EXCAVATION	86.79..	250 F/M3 =	21697.50 F/ml	22.1 %
BLINDAGE	471.67..	13 F/KG =	6391.97 F/ml	6.5 %
CINTRES	1425.71..	12 F/KG =	17108.52 F/ml	17.4 %
BETON DE BLOCAGE	3.73..	1300 F/M3 =	4914.00 F/ml	5.0 %
BETON COFFRE	13.76..	800 F/M3 =	11008.00 F/ml	11.2 %
COFFRAGE INTRADOS	19.82..	250 F/M2 =	4955.00 F/ml	5.0 %
BETON OREILLES	3.00..	1000 F/M3 =	3000.00 F/ml	3.1 %
COFFRAGE OREILLES	7.00..	250 F/M2 =	750.00 F/ml	0.7 %
FERRAILLAGES	317.62..	10 F/KG =	3176.20 F/ml	3.2 %
BEHRIT C.V BETON	6.87..	750 F/M3 =	5152.50 F/ml	5.2 %
ETANCHE FEUILLE	21.01..	160 F/M2 =	3361.60 F/ml	3.4 %
PLAFOND VENTILATION			7069.07 F/ml	7.2 %
INSTALLATIONS DIVERS	(10 % du cout/ml).		8850.44 F/ml	10.0 %
				100.0 %

Prix du profil 2 au ml H.T. = 97442.80 soit 1657 F/m3 de volume intrados

Longueur d'application du profil 2 = 1 ml

RECAPITULATION

Profil 1	1 ml à 83260.00 Fr =	83260.08 Francs H.T.
Profil 2	1 ml à 97442.80 Fr =	97442.80 Francs H.T.
TOTAL =		180702.88 Francs H.T.

Prix total du tunnel = 180702.88 Francs H.T.

G.A.V. ....15 % = 27105.43 Francs H.T.

Total Bénéfice ..... 207808.31 Francs H.T.

Prix du tunnel au ml H.T. = 107904.15 soit 1769 F/m3 de volume intrados

I.V.O. ....18.6 % = 38652.35 Francs

Total Bénéfice T.I.C. = 246460.65 Francs

Prix du tunnel au ml H.T. = 125270.35 soit 2027 F/m3 de volume intrados





### 6.3 Bordereau des prix utilisés



Prix VALEUR JANVIER 1992

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Béton de structure	700 F/m3
Béton de propreté	1 010 F/m3
Aciers	10 000 F/t
Caniveau de câbles	424 F/m

TIRANTS ET BUTONS

Amené/repli matériel tirants	154 760 F
Déplacements machine tirants	694 F
Tirants provisoires	1 929 F/u
Longueur de tirants	524 F/m
Butons et liernes	4 385 F/t

PALPLANCHES

Exécution de pré fouille	244 F/m
Fourniture de palplanches	5 093 F/t
Battage	270 F/m²
Location	2 143 F/t
Arrachage	250 F/m²
Recépage	210 F/m
Contre-bajoyer	382 F/m²
Amené/repli matériel de battage	35 213 F

PAROIS MOULEES ET PREFABRIQUEES

Murettes guides	500 F/m
Démolition des murettes	120 F/m
Excavation pour les parois	848 F/m²
Plus value excavation substratum	297 F/m3
Reprofilage parois moulées	217 F/m²
Recépage	1 240 F/m3
Bétonnage parois moulées	700 F/m3
Ferraillage parois moulées	7 038 F/t
Bétonnage parois préfabriquées	1 075 F/m3
Ferraillage parois préfabriquées	5 512 F/t
Amené/repli matériel forage	224 890 F
Amené/repli station de boue	210 834 F

BERLINOISES

Profilés	5 655 F/t
Battage	304 F/m
Béton hors profil	678 F/m3
Béton projeté	462 F/m²
Béton coulé en place	566 F/m²
Amené/repli matériel de battage	84 800 F
Amené/repli atelier de béton projeté	42 400 F

**JET GROUT**

Reprofilage	28 F/m <sup>2</sup>
Exécution pré fouille	286 F/m
Surface soutenue	943 F/m <sup>2</sup>
Béton hors profil	678 F/m <sup>3</sup>
Amené/repli du matériel	22 620 F
Première installation	81 684 F

**CLOUTAGE**

Béton projeté	462 F/m <sup>2</sup>
Cloutage	172 F/m
Amené/repli matériel perforation	21 200 F
Amené/repli matériel d'injection	42 400 F

**ETANCHEMENT DE FOUILLE**

Volume pompé	70 F/m <sup>3</sup>
Béton immergé	900 F/m <sup>3</sup>
Forage pour radier injecté	40 F/m <sup>3</sup>
Injection du radier	1 000 F/m <sup>2</sup>
Amené/rapli matériel perforation	26 500 F
Amené/repli matériel d'injection	21 200 F

**ETANCHEITE DE LA STRUCTURE**

Bitume polymère	103 F/m <sup>2</sup>
Joints Waterstop	88 F/m
Compartimentage longitudinal AF24	120 F/m
Membrane PVC	160 F/m <sup>2</sup>
Soudure Waterstop sur feuille PVC	57 F/m
Compartimentage transversal DF24	160 F/m
Compartimentage transversal AF 14.3	120 F/m
Pipettes	100 F/u

**TERRASSEMENTS**

Terrassement	127 F/m <sup>3</sup>
Plus value terrassement sous l'eau	30 F/m <sup>3</sup>
Remblais	106 F/m <sup>3</sup>
Evacuation des déblais	27 F/m <sup>3</sup>

**COFFRAGES**

Coffrage vertical	424 F/m <sup>2</sup>
Coffrage dalle	318 F/m <sup>2</sup>
Plus value pour coffrage en courbe	90 F/m <sup>2</sup>

**TUNNELIER**

Fabrication du tunnelier	79 500 000 F
Installation du tunnelier	21 200 000 F
Aléas de démarrage	21 200 000 F
Injections de confortation au démarrage	1 590 000 F
Revêtement du tube	2 120 F/m3
Coût d'un homme par jour par poste	2 120 F/j

**DIVERS DE TRANCHEE COUVERTE**

Démolitions	53 F/m²
Remise en état	424 F/m²
Déviations de réseaux EDF/PTT	21 200 F/m
Déviations d'égouts	21 200 F/m
Clôtures	530 F/m
Ponts et passerelles	530 F/m²
Installation et repli de chantier	932 800 F

**MATERIAUX PROPRES AU VIADUC**

Béton de dalle supérieure	795 F/m3
Béton de poteaux et poutres	848 F/m3
Béton de voussoirs	954 F/m3
Béton de semelles	742 F/m3
Béton de pieux	742 F/m3
Aciers de précontrainte	27 F/kg
Aciers A52 des poutres de pont mixte	21 F/kg
1 couche de produit anti-corrosion	58 F/m²
3 couches de peinture	85 F/m²
Installation/repli matériel tablier	0 F
Installation/repli matériel piles	0 F
Installation/repli matériel semelles	0 F

**FONDACTIONS PROFONDES**

Forage	1 272 F/ml
Plus value forage dans rocher	636 F/ml
Mise en place du forage d'un pieu	848 F
Installation/repli matériel pieux	0 F

**DIVERS VIADUC**

Corniches (2)	265 F/m
Garde-corps (2)	2 120 F/m
Appuis néoprène fretté	307 F/dm3
Essais de l'ouvrage	742 000 F

