

Des recherches récentes d'engineering ont comparé les différents ponts en acier et en béton construits aux environs du bord de la mer et elles ont révélé que le pont en acier a une durée de vie plus longue que celui en béton à condition que la peinture soit régulièrement entretenue.

Donc alors que le pont en acier est suffisamment protégé par la peinture, le pont en béton n'est pas protégé par un revêtement quelconque en raison du coût de maintenance important, se laissant donc exposer à l'atmosphère saline, de telle sorte que le béton de surface de ce pont sera de plus en plus détérioré.

Une fois que cette détérioration aura pénétré en profondeur dans le béton armé, dont les armatures commenceront à être rouillées, il n'existera pratiquement plus de moyens de récupérer la structure du pont.

Que le pont en acier ou celui en béton soit choisi pour ce projet, la résistance à la salinité sera un facteur primordial pour la conception du pont.

Le tableau 6.3.1.1 définit le choix des différents types de ponts et de leur longueur de travée compatibles avec la technologie courante de construction des ponts.

6.3.2 Elaboration du positionnement des piles du pont

Comme l'indique le Chapitre 4, il convient d'éviter, dans la mesure du possible, la mise en place des piles du pont dans la zone navigable (dans la zone disponible pour les petits et moyens navires) pour les Couloirs Est et Central.

Il est cependant nécessaire de raccourcir autant que possible la distance entre les piles du pont (travée) afin de réduire le coût de construction du pont qui enjambera le passage.

Nous envisagerons donc l'installation des piles même dans la zone théoriquement non-navigable (par exemple, la zone où le passage des navires sera limité par la présence proche d'un phare, de pylônes, de câbles à haute tension, etc ...).

Tableau-6.3.1.1 TYPES DE SUPERSTRUCTURE ET LONGUEURS DE TRAVÉE
APPLICABLES POUR LES PONTS

Types de superstructure	Longueur de travée (m)									
	50	100	200	300	400	500				
Pont suspendu										
Pont suspendu à haubans (acier ou béton précontraint)										
Pont à poutre en treillis continue										
Pont en arc (acier)										
Pont en arc (béton armé)										
Pont Lohse/Nielsen										
Pont en poutre caisson continue (acier)										
Pont en poutre caisson (béton précontraint)										

Nous éviterons cependant que les piles soient amenées dans l'eau de la zone prémentionnée, pour laquelle les travaux de construction seraient réalisés totalement dans l'eau. En d'autres termes, nous suggérons que le chantier de construction des piles soit placé de telle manière que le transport des matériaux et des ouvriers soit réalisé à partir de la rive, en utilisant un appontement ou un remblaiement provisoire.

En considération des points ci-dessus, nous envisageons la localisation des piles du pont enjambant le chenal pour chaque couloir de la façon suivante:

- Couloir Est

Etant donné qu'il existe des installations d'accostage sur la rive Sud du chenal, nous installerons une pile à côté (sur le sol). Par ailleurs, le

chenal passe à proximité de la rive Nord, de telle sorte que nous installerons une autre pile approximativement au niveau de la rive Nord. La distance entre ces piles (travée centrale) sera donc de 320 m.

- Couloir Central

Il existe deux câbles à haute tension parallèles à ce couloir, l'un à l'Est et l'autre à l'Ouest de ce couloir et leurs pylônes sont installés entre le passage des navires et la rive. Il conviendra donc de poser les piles dans l'eau au même niveau que les pylônes, de telle sorte que la distance entre ces piles (travée centrale) sera de 200 m.

- Couloir Ouest

Il existe deux possibilités dans le cas de ce couloir, à savoir:

- 1) Projet d'un port nouveau du côté Ouest du port de Radès ou maintien des fonctions actuelles du port de Tunis.
- 2) Non seulement absence du projet d'un port nouveau, mais aussi réduction du port de Tunis.

En cas de 1):

La largeur du passage d'accès aux ports de La Goulette et de Radès est actuellement comprise entre 100 m et 115 m, largeur dont on aura besoin à l'avenir dans ce cas. La distance entre les piles (travée centrale) sera donc de 150 m en vue du maintien de cette largeur, de telle sorte que la largeur actuelle de l'ordre de 200 m sera réduite à environ 130 m. Par ailleurs, dans ce passage, les navires suivent une route rectiligne et ne font pas de virage, ni de manoeuvre d'évitement comme dans les zones portuaires. De plus, le croisement des navires y est moins probable que pour les Couloirs Est et Central. En conséquence, malgré une réduction de la largeur du passage due à la mise en place des piles, de bonnes conditions du passage seront maintenues et il n'y aura pas de restriction du passage des navires en présence du pont, grâce à un équipement de balisage placé sur son corps: des balises lumineuses, l'une placée au centre, les deux autres placées aux limites gauche et droite du chenal.

En cas de 2):

Etant donné le tirant d'air de 15 m sous l'ouvrage prévu dans ce cas, il ne pourra passer que les petits navires dont le tirant d'air est inférieur à 15 m. Il sera donc suffisant de maintenir la largeur du passage actuel de l'ordre de 70 m, et la distance entre les piles (travée centrale) sera de 80 m.

6.3.3 Types de pont de franchissement pour chaque couloir

Le tableau 6.3.3.1 comparatif suivant donne les caractéristiques de plusieurs variantes de pont de franchissement pour tous les couloirs proposés.

(1) Couloir Est (tableau 6.3.3.2)

La travée centrale est plus longue dans ce couloir que dans les autres couloirs et une longueur de l'ordre de 320 m au minimum est requise pour la traversée du chenal. On ne pourra pas installer une pile dans l'eau, puisqu'il y a des quais sur la rive Sud et que le passage des navires s'approche de la rive Nord.

On recommande comme variantes, le pont suspendu à haubans soit en acier soit en béton précontraint ainsi que le pont métallique à treillis Cantilever pour une travée centrale de 320m de long. Cette longueur de travée est trop longue et non-économique pour le pont Nielsen ou à poutre-caisson.

(2) Couloir Central (tableau 6.3.3.3)

Ce point de franchissement exige une travée centrale de 200 m de long. Les piles principales seront à placer dans l'eau peu profonde à proximité des deux rives nord et Sud.

Il existe près d'une pile Sud un canal d'amenée d'eau à la centrale électrique de Radès. Il est donc nécessaire de procéder à une enquête sur l'environnement à l'occasion de la construction de cette pile pour éviter une éventuelle pollution de l'eau.

Les ponts suspendu à haubans ou métallique à treillis Cantilever seront encore économiques pour une travée centrale de cette longueur.

De plus, le pont en poutre-caisson tant en acier qu'en béton précontraint deviendra, lui-aussi, compétitif à partir d'une telle longueur de travée.

(3) Couloir Ouest (tableau 6.3.3.4)

Ce couloir présente la longueur de franchissement la plus courte parmi les trois couloirs, soit environ 150 m de long.

Il existe donc différents types de pont envisageables pour ce couloir, parmi lesquels sont sélectionnés par expérience et présentés au tableau 6.3.1.1 un certain nombre de types de pont représentatifs, convenables pour une telle longueur de travée, tels que pont suspendu à haubans, pont en arc, pont Nielsen et pont à poutre-caisson.

Il reste à considérer bien sûr plusieurs autres ponts de type arc, tels que le pont langer, Lohse, ou arc en treillis, etc ...

Mais vu la faible portance des sols et les coûts de construction, les variantes de pont ont été réduites aux quatre types indiqués ci-dessus. Le pont suspendu à haubans et le pont à poutre-caisson sont classés selon deux types de matériaux, à savoir l'acier et le béton précontraint.

Tableau 6.3.3.1 VARIANTES DU PONT DE FRANCHISSEMENT

Coulloir		Est		Central		Ouest		Notes
		Longueur travée centrale	Réalisation	Longueur travée centrale	Réalisation	Longueur travée centrale	Réalisation	
Type	Conditions							
Pont suspendu à haubans	Acier	O	O	O	O	O	O	Montage cantilever
	Béton précontraint	O	O	O	O	O	O	Dite
Pont à poutres en treillis		O	O	O	O	O	O	Dite
Pont en arc		Δ	X	Δ	Δ	O	Δ	
Pont Nielsen		X	X	Δ	Δ	O	Δ	Montage en gros bloc préfabriqué
Pont en poutres caisson	Acier	X	X	O	O	O	O	
	Béton précontraint	X	X	O	O	O	O	Montage cantilever
Pont mobile		X	X	X	X	Δ	Δ	
Notes		-Tirant d'air 45m ou 55m	-Tirant d'air 55m ou 45m	-Tirant d'air 45m ou 55m	-Tirant d'air 45m ou 55m	-Tirant d'air 45m, 30m ou 15m	-Tirant d'air 45m, 30m ou 15m	
		-Longueur de travée 320m	-Longueur de travée 320m	-Longueur de travée centrale 200m	-Longueur de travée centrale 200m	-Longueur de travée centrale 150m	-Longueur de travée centrale 150m	

Légende: O Favorable, Δ Applicable, X Inapplicable

Tableau 6.3.3.2 COMPARAISON DES VARIANTES DU PONT POUR LE COULOIR EST


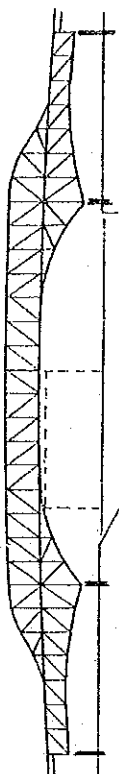
Type du pont		Pont suspendu à haubans		Pont à poutre en treillis	
con- fi- gura- tion	Vue longi- tudinale				
	Aspect	Léger et linéaire		Massif et complexe	
Matière		Acier	Béton précontraint	Acier	
longueur de la travée centrale		150 + 320 + 150 (m)		150 + 320 + 150 (m)	
Structure		Note 1	Note 2	Note 3	
Durée de Construction					
Côté de construction		Relativement cher	Relativement moins cher	Cher en raison de grande quantité d'acier	
Côté de maintenance		Relativement cher	Relativement moins cher	Cher dû à la peinture	
Évaluation préliminaire		Favorable		Défavorable	

Tableau 6.3.3.3 COMPARAISON DES VARIANTES DU PONT POUR LE COULOIR CENTRAL

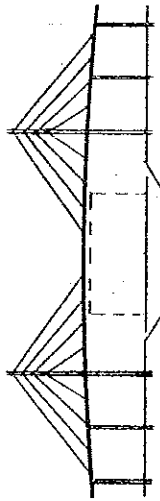
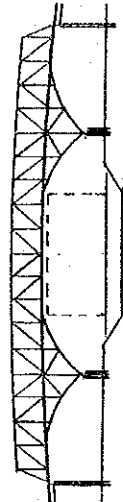
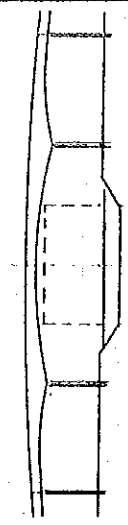
Type du pont	Pont suspendu à haubans	Pont à poutre en treillis	Pont en poutre-caisson
Confir- gura- tion			
Aspect	Léger et linéaire	Massif et complexe	Doux et élancé
Matière	Acier	Acier	Acier
	Béton précon- traint		Béton précontraint
Longueur de la travée centrale	100 + 200 + 100 (m)	100 + 200 + 100 (m)	100 + 200 + 100 (m)
Structure	Note 1	Note 3	Note 4
Durée de construction	Note 2		Note 5
Côût de cons- truction	Relativement cher	Cher en raison de grande quantité d'acier	Relativement cher
Côût de mainte- nance	Relativement cher	Cher dû à la peinture	Relativement moins cher
Evaluation préliminaire	favorable	Défavorable	Favorable

Tableau 6.3.3.4-1 COMPARAISON DES VARIANTES DU PONT POUR LE COULOIR OUEST

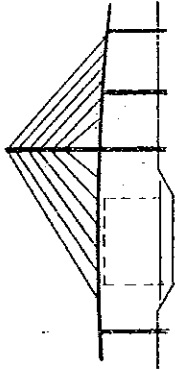
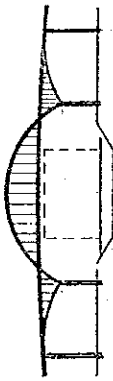
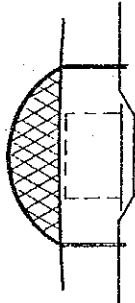

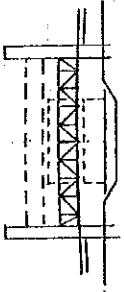
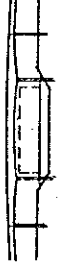
Type du pont	Pont suspendu à haubers	Pont en arc	Pont Nielsen	Pont en poutre caisson
Vue longitudinale				
Aspect	Léger et linéaire	Parabolique	Léger	Doux et élancé
Matière	Acier	acier	Acier	Acier
	Béton précontraint			Béton précontraint
Longueur de la travée centrale	150 + 100 (m)	60 + 150 + 60 (m)	150 (m)	60+150+60 (m)
Structure	Note 1	Note 6	Note 7	Note 4
Durée de construction	Note 2			Note 5
Côût de construction	Relativement cher	Cher	Relativement cher	Relativement moins cher
Côût de maintenance	Relativement cher	Cher dû à la peinture	Relativement cher	Relativement moins cher
Evaluation préliminaire				

Tableau 6.3.3.4-2 COMPARAISON DES VARIANTES DU PONT POUR LE COULOIR OUEST

Type du pont	Pont levant	Pont en poutre caisson
Vue longitudinale		
Configuration		
Aspect	Difforme	Doux et élancé
Matière	Acier	Béton
Longueur de la travée centrale	150 (m)	40 + 80 + 40 (m)
Structure	Note 8	Note 5
Durée de construction		
Coût de construction	Relativement moins cher	Moins cher
Coût de maintenance	Cher	Moins cher
Évaluation préliminaire		

Notes) relatives aux tableaux-6.3.3.2 à 6.3.3.3

1. Il faut effectuer soigneusement la conception en considérant la flèche relativement grande et la résistance au vent. Il faut également considérer le savoir-faire requis pour la construction et la haute précision des travaux.
2. Il est à noter que les fondations des piles (tours) principales deviennent plus importantes (voir note 1).
3. Le montage Cantilever est employé usuellement, mais le montage en grosses parties préfabriquées à l'aide d'un chaland est préférable pour la travée centrale.
4. Le tablier en acier orthotrope est normalement employé pour une longue travée de ce type.
5. Les types à poutre-caisson simple ou à poutre-caisson multicellulaire sont favorables pour la construction en porte-à-faux (Cantilever).
6. Dans le cas où il serait impossible de monter en gros bloc à l'aide du chaland, il y aurait lieu d'employer le montage sur échafaudage qui serait alors coûteux.
7. L'ensemble du pont est préfabriqué sur les berges et monté en place à l'aide d'un chaland.

Cette méthode est essentielle pour le montage de ce type.

8. L'organe mécanique est complexe, de telle sorte qu'il faut affecter un certain nombre d'agents à son opération et son entretien.

6.3.4 Avant-projet et coûts pour les variantes de pont

(1) Ponts objet de l'avant-projet

Parmi les variantes de pont retenues au paragraphe précédent, certains ponts sont à choisir pour faire l'objet de l'avant-projet, qui a pour but d'étudier les tracés optimaux, les types de pont optimaux et les tirants d'air appropriés. Pour les ponts objet, notre choix s'est arrêté sur: le pont à haubans (en béton précontraint et en acier) pour les tirants d'air de 55,0m et 45,7m sur le tracé Est, le pont à haubans et le pont à poutres (en béton précontraint et en acier) pour les tirants d'air de 55,0m et 45,7m sur le tracé Central, et le pont à haubans (en béton précontraint et en acier), le pont Lohse en acier, le pont Nielsen ainsi que le pont à poutres (en béton précontraint et en acier) sur le tracé Ouest. Notre choix a également porté sur le pont mobile avec un tirant d'air de 30m sur le tracé Ouest ainsi que sur le pont à poutres en béton précontraint avec un tirant d'air de 15m sur le même tracé. Ces ponts objet sont classés par tirant d'air, type de pont et nature de matériaux dans le Tableau-6.3.4.1.

(2) Avant-projet et quantités mises en oeuvre

Les variantes de pont choisies ci-dessus font l'objet de l'avant-projet, dans le cadre duquel sont estimées les quantités mises en oeuvre. L'avant-projet est considéré comme étape de choix des tracés optimaux, types de pont optimaux et tirants d'air appropriés et il met en comparaison de nombreuses variantes (au nombre de 26), de telle sorte qu'il donne de l'importance à l'estimation de ces quantités. Pour la méthode simplifiée de cette estimation, des résultats anciens de la réalisation de ponts identiques ont été mis en graphique, d'où ont été estimées les quantités approximatives mises en oeuvre. Mais, ces anciens ponts diffèrent de ceux de ce projet pour les conditions de franchissement. Pour minimiser l'erreur d'estimation, ces quantités ont été actualisées au moyen d'un calcul portant notamment sur la fondation des ponts retenus. Ces quantités mises en oeuvre sont figurées par variante dans le tableau-6.3.4.2. Les graphiques des résultats anciens utilisés pour l'estimation de ces quantités se trouvent à l'Annexe 6.3.4.1 comme documents.

Tableau 6.3.4.1. SYMBOLISATION DES VARIANTES OUVRAGE

			Tirant d'air	Variantes ouvrage	
				Désignation	Matériau
Pont	Couloir Est	E.1.a (55)	55,0	Pont suspendu à haubans	Acier
		E.1.b (55)			Béton
		E.1.a (45)	45,7		Acier
		E.1.b (45)			Béton
	Couloir Central	C.1.a (55)	55,0	Pont suspendu à haubans	Acier
		C.1.b (55)			Béton
		C.2.a (55)	Pont à poutre-caisson	Acier	
		C.2.b (55)		Béton	
		C.1.a (45)	45,7	Pont suspendu à haubans	Acier
		C.1.b (45)			Béton
		C.2.a (45)		Pont à poutre-caisson	Acier
		C.2.b (45)			Béton
	Couloir Ouest	0.1.a (45)	45,7	Pont suspendu à haubans	Acier
		0.1.b (45)			Béton
		0.2.a (45)		Pont Lohse	Acier
		0.3.a (45)		Pont Nielsen	Acier
		0.4.a (45)	Pont à poutre-caisson	Acier	
		0.4.b (45)		Béton	
		0.1.a (30)	30,0	Pont suspendu à haubans	Acier
		0.1.b (30)			Béton
0.2.a (30)		Pont Lohse		Acier	
0.3.a (30)		Pont Nielsen		Acier	
0.4.a (30)		Pont à poutre-caisson		Acier	
0.4.b (30)				Béton	
0.5.a (30)		Pont mobile		Acier	
0.6.b (15)		15,0		Pont à poutre-caisson	Béton
Tunnel	Ouest-Central	C.T	-13,0	Tunnel à caissons immergés	Béton
		0.T	-7,5	Tunnel à caissons immergés	Béton

(3) Prix unitaires appliqués pour l'estimation du coût approximatif du projet

Ils sont obtenus sur la base de différents prix unitaires pour les ponts et routes construits en ville de Tunis, réajustés sur l'augmentation des prix. En particulier, on se réfère aux prix unitaires du cahier des charges du Viaduc sur l'Avenue de la République, ouvrage d'art similaire qui a été construit en ville de Tunis en 1988.

En ce qui concerne le pont en acier, type de pont qui n'a guère été construit en Tunisie, les prix unitaires de fabrication et de montage sont calculés sur la base de différents résultats recueillis au Japon. Quant à la localisation du lieu de sa fabrication, dont dépendent largement les frais de transport, on suppose que ce lieu est situé dans un pays voisin méditerranéen (en Italie ou en Espagne). Les prix unitaires appliqués pour l'estimation du coût approximatif de ce projet sont montrés à l'Annexe 6.3.4.2.

(4) Coût approximatif du projet

Il totalise 1) coût de construction, 2) coût de la conception détaillée et de l'ingénierie, 3) coût administratif du Ministère de l'Equipeement et de l'Habitat, 4) coût de l'acquisition des terrains et de la compensation et 5) coût d'imprévu. Le coût de construction est estimé sur la base des quantités mises en oeuvre et des prix unitaires qui ont été obtenus respectivement aux paragraphes (2) et (3). Par ailleurs, les coûts suivants sont calculés en se référant à certains projets identiques, à l'aide de leur propre rapport sur le coût de construction.

- Coût de la conception détaillée et de l'ingénierie:

coût de construction x 10%

- Coût administratif du Ministère de l'Equipeement et de l'Habitat:

coût de construction x 2%

- Coût d'imprévu:

coût de construction x 15%

En ce qui concerne le coût de l'acquisition des terrains et de la compensation, tous les tracés se trouvent en majeure partie sur les terrains publics et il n'existe guère de terrains privés, de telle sorte que le coût indiqué ci-dessus est à estimer sur la base, aussi bien des résultats

Tableau-6.3.4.2 SYNTHÈSE DES QUANTITÉS POUR LE PONT DE TRAVERSEE

a) Pont d'acier

	Coulloir Est		Coulloir Central		Coulloir Ouest			Pont mobile
	Pont suspen- du à haubans	Pont suspen- du à haubans	Pont à poutre continue	Pont à poutre à haubans	Pont Lohse	Pont Nielsen	Pont à poutre continue	
Travée (m)	150+320+150	100+200+100	100+200+100	150+100	60+150+60	150	60+150+60	150
* Superficie de pont (m ²)	10 726	6 920	6 920	4 325	4 671	2 595	4 671	2 595
Super structure	0,540	0,495	0,600	0,520	0,560	0,560	0,500	0,670
** Poids d'acier (t)	5 800	3 430	4 150	2 240	2 620	1 450	2 340	charpente contrepois machine
Pile	Béton de pile (m ³)	3 700	2 782	2 782	1 442	1 442	1 442	1 100
Sub structure	Béton de semelle (m ³)	9 000	5 000	5 000	2 400	2 400	2 400	7 500
Foundation ø2.0m (m)	3 200	1 950	2 000	1 300	740	740	740	1 500 (ø3.0m)
Remarque	Le tirant d'air est de 45.7m.							
	Le tirant d'air est de 30m.							

Note) * : longueur de pont x largeur de chaussée (= 17.3m)

** : y compris le poids de cables.

() : poids de cables

b) Pont de béton précontraint

	Coulloir Est		Coulloir Central		Coulloir Ouest			Pont à poutre continue
	Pont suspen- du à haubans	Pont suspen- du à haubans	Pont à poutre continue	Pont à poutre à haubans	Pont suspensu à haubans	Pont à poutre continue	Pont à poutre continue	
Travée (m)	150+320+150	100+200+100	100+200+100	150+100	60+150+60	150	60+150+60	40+80+40
* Superficie de pont (m ²)	10 726	6 920	6 920	4 325	4 671	2 595	4 671	2 768
Béton	Poutre prin. (m ³ /m ²)	0.780	0.720	1.460	0.780	1.280	0.950	
	Tour (m ³ /m ²)	0.320	0.265	-	0.300	-	-	
Quantité	Cofrage (m ³ /m ²)	3.35	3.30	4.95	3.50	4.250	2.200	
Unitaire	Matériau en béton précontraint (t/m ³)	0.030	0.038	0.136	0.025	0.144	0.075	
	Matériau diagonal (t/m ³)	0.070	0.05	-	0.040	-	-	
Super structure	Armature (t/m ²)	0.135	0.135	0.087	0.135	0.100	0.115	
	Béton Poutre prin.	8 370	4 650	10 050	3 374	6 000	2 630	
	Tour	3 400	1 834	-	1 570	-	-	
	Cofrage	39 500	2 250	50 700	17 310	25 400	5 800	
Quantité	Matériau en béton précontraint	360	220	1 392	120	680	200	
	Matériau diagonal	836	340	-	200	-	-	
	Armature	1 630	900	891	565	600	302	
Sub structure	Pile (m ³)	13 800	12 100	3 690	1 330	1 810	910	
	Semelle (m ³)	17 900	22 000	11 900	7 670	6 270	3 130	
Foundation ø3.0m (m)	** 4 000 M	2 400	3 000	1 300	1 300	1 300	1 400 (ø2m)	
Remarque	Le tirant d'air est de 45.7m.							
	Le tirant d'air est de 30m.							
	tir. d'air 15m							

* : Longueur de pont x largeur
de chaussée (= 17.3m)

** : Fondation à paroi continue

d'une reconnaissance de terrains que d'une carte topographique à titre provisoire. Le coût approximatif du projet est présenté par variante dans le Tableau-6.3.4.3.

A. VARIANTES PONT

Tableau-6.3.4.3. COUT TOTAL DU PROJET

Couloir Est:

Symbole	Variante		Coût de construction				Coût de conception détaillée + supervision	Coût de l'emprise foncière + compensation	Coût administratif de MEH	Coût d'imprévu	Total	
	Tirant d'air	Type de pont	a/b	Pont principal	Viaduc d'accès	Route d'accès et échangeur						Total
E.1.a (55)	55,0	Pont suspendu à haubans	a	49.400	43.800	6.950	100.150 (2.117)	10.020	2.000	2.000	17.130	131.360
E.1.b (55)			b	49.570	43.800	6.950	100.320 (2.121)	10.030	2.000	2.000	17.150	131.500
E.1.a (45)	45,7	Pont suspendu à haubans	a	39.760	37.920	7.020	84.700 (1.791)	8.470	2.000	1.690	14.530	111.390
E.1.b (45)			b	39.080	37.910	7.020	84.010 (1.776)	8.400	2.000	1.650	14.410	110.500

Couloir Central:

Symbole	Variante		Coût de construction				Coût de conception détaillée + supervision	Coût de l'emprise foncière + compensation	Coût administratif de MEH	Coût d'imprévu	Total	
	Tirant d'air	Type de pont	a/b	Pont principal	Viaduc d'accès	Route d'accès et échangeur						Total
C.1.a (55)	55,0	Pont suspendu à haubans	a	32.950	46.250	9.170	88.370 (1.869)	8.840	300	1.770	14.890	114.170
C.1.b (55)			b	33.220	46.250	9.170	88.640 (1.874)	8.860	300	1.770	14.940	114.510
C.2.a (55)	55,0	Pont à poutre-caisson	a	31.220	46.640	9.170	87.030 (1.840)	8.700	300	1.740	14.670	112.440
C.2.b (55)			b	31.190	46.650	9.170	87.010 (1.840)	8.700	300	1.740	14.660	112.410
C.1.a (45)	45,7	Pont suspendu à haubans	a	23.530	36.530	9.350	69.410 (1.467)	6.940	300	1.390	11.710	89.750
C.1.b (45)			b	22.980	36.530	9.350	68.860 (1.456)	6.890	300	1.380	11.610	89.040
C.2.a (45)	45,7	Pont à poutre-caisson	a	21.360	38.470	9.350	69.180 (1.463)	6.920	300	1.380	11.670	89.450
C.2.b (45)			b	19.540	38.470	9.350	67.360 (1.424)	6.740	300	1.350	11.360	87.110

Couloir Ouest:

Unité : x 1000 DT

Symbole	Variante		Coût de construction				Coût de conception détaillée + supervision	Coût de l'emprise foncière + compensation	Coût administratif de MEH	Coût d'imprévu	Total	
	Tirant d'air	Type de pont	a/b	Pont principal	Viaduc d'accès	Route d'accès et échangeur						Total
10.1.a (45)	55,0	Pont suspendu à haubans	a	22.200	40.140	7.250	69.590 (1.473)	6.960	500	1.390	11.760	90.200
10.1.b (45)			b	21.660	41.130	7.250	70.040 (1.483)	7.000	500	1.410	11.840	90.790
10.2 (45)	45,7	Pont Lohse		21.770	43.400	7.250	72.420 (1.420)	7.240	500	1.450	12.240	93.850
10.3 (45)			Pont Nielsen		13.770	49.920	7.250	70.940 (1.501)	7.090	500	1.420	12.000
10.4.a (45)	30,0	Pont à poutre-caisson	a	20.450	40.950	7.250	68.650 (1.453)	6.870	500	1.370	11.600	88.990
10.4.b (45)			b	19.220	40.950	7.250	67.420 (1.427)	6.740	500	1.350	11.400	87.410
10.1.a (30)	30,0	Pont suspendu à haubans	a	15.830	25.500	7.080	48.410 (1.025)	4.840	500	970	8.210	62.930
10.1.b (30)			b	15.760	25.470	7.080	48.310 (1.023)	4.830	500	970	8.190	62.800
10.2 (30)	30,0	Pont Lohse		16.340	27.570	7.080	50.990	5.100	500	1.020	8.640	66.250
10.3 (30)			Pont Nielsen		13.040	28.470	7.080	48.590 (1.128)	4.860	500	970	8.240
10.4.a (30)	30,0	Pont à poutre-caisson	a	14.590	26.100	7.080	47.770 (1.011)	4.780	500	950	8.100	62.100
10.4.b (30)			b	13.490	26.670	7.080	47.240 (1.000)	4.720	500	950	8.010	61.420
10.5 (15)	15,0	Pont mobile		54.700	7.080	9.450	71.230 (1.508)	7.120	500	1.430	12.040	92.320
10.6 (15)			Pont à poutre-caisson		6.160	10.950	9.450	26.560 (0.562)	2.660	500	530	4.540

[Note 1] a: acier, b: béton précontraint.

[Note 2] La taze non comprise aux ponts principaux d'acier.]

Note : Le coût de construction est calculé à condition de la longueur des pieux correspondant à une profondeur des substratum portants estimée à 50m.

6.4 VARIANTE TUNNEL

6.4.1 Différentes méthodes de construction d'un tunnel

Il y a 5 méthodes de construction d'un tunnel sous-marin comme suit:

- (1) Méthode par abattage
- (2) méthode par excavation ouverte
- (3) Méthode par bouclier
- (4) Méthode par immersion
- (5) Méthode par caissons

(1) Méthode par abattage

Cette méthode s'emploie en principe dans des terrains rocheux, dont l'excavation se fera, soit à l'aide d'explosifs, soit à l'aide d'une foreuse de tunnel dans le cas d'un terrain homogène.

Etant donné que pour ce projet, les roches sont rencontrées à partir de 100m et compte tenu de la couverture nécessaire, le tunnel sera obligé de se situer en grande profondeur, de telle sorte que la longueur du tunnel deviendra très importante et le coût de construction sera augmenté, mais également le raccordement aux routes existantes sera plus difficile. Par conséquent cette méthode ne fera pas l'objet de l'étude comparative.

(2) Méthode par excavation ouverte

Il s'agit en pratique d'excaver la surface de terrain jusqu'à une profondeur prédéterminée et de construire un dalot, dont la partie supérieure sera ensuite remblayée pour enfin remettre en état la surface du terrain.

Dans le cas de ce projet, l'exécution de cette méthode empêchera les navires de passer le chenal et les travaux de batardeau seront

importants à cause de l'excavation très profonde, de telle sorte que cette méthode ne fera pas non plus l'objet de l'étude comparative.

Pourtant, celle-ci pourra être utilisée pour la construction d'une rampe d'accès au tunnel en dehors de la zone du chenal.

(3) Méthode par bouclier

Pour utiliser cette méthode, on fait avancer une structure cylindrique en acier, dite bouclier qui est légèrement plus grande que la section du tunnel, à l'abri de laquelle on fait successivement les travaux tels que l'excavation, l'avancement du bouclier, le revêtement et l'injection. C'est ainsi que l'on peut construire le tunnel. Cette méthode est applicable pour des sols autres que des roches et des galets, et elle est efficace notamment dans les terrains meubles ainsi que dans les terrains aquifères.

Cette méthode fera donc l'objet de l'étude comparative.

(4) Méthode par immersion

On préfabrique ailleurs tous les éléments du tunnel munis à leurs deux extrémités d'une cloison de fermeture, ensuite on les remorque dans le chenal jusqu'au chantier de construction en profitant de leur flottaison, et on les immerge dans des tranchées déjà draguées pour ensuite les raccorder et à la fin effectuer le remblai. C'est ainsi que l'on peut construire le tunnel sous-marin.

En ce qui concerne la traversée d'un bras de mer, cette méthode a été employée couramment ces dernières années. Elle a l'avantage de diminuer la longueur du tunnel en raison de la faible couverture. Elle fera donc l'objet de l'étude comparative.

(5) Méthode par caissons

Dans cette méthode, on installe d'abord une île, ensuite on construit des caissons rapprochés successivement l'un de l'autre; on effectue le remblai désigné au fond de la mer et à la fin on enlève les cloisons en béton entre les caissons. C'est la manière dont on peut construire un tunnel.

A cause des problèmes tels que l'empêchement du passage des navires et l'important coût d'installation d'une île en eau profonde, cette méthode ne fera pas l'objet de l'étude comparative pour ce projet.

6.4.2 Comparaison des méthodes

Etant donné le niveau profond des roches et les conditions de la disponibilité du chenal, les méthodes par abattage avec excavation des roches, par excavation ouverte avec batardeau et celle par caissons avec l'installation d'une île sont impossibles ou inadéquates. Les méthodes réalisables seront donc limitées à celles par bouclier ou par immersion.

La première a le grand avantage de ne jamais empêcher le passage des navires. Mais l'épaisseur du remblai de couverture requise est nécessairement de plus d'un diamètre du bouclier eu égard à nos expériences, de telle sorte que la longueur du tunnel sera sans doute plus longue dans ce cas qu'avec la méthode par immersion.

Par ailleurs, la méthode par bouclier formera une section circulaire et contiendra au plus 2 voies de circulation (diamètre extérieur: plus de 11 m) à la fois pour une raison économique et au vu des constructions précédentes de telle sorte qu'il faudra percer 2 tunnels pour ce projet et les espacer de plus d'un diamètre pour éviter leurs interactions au cours des travaux d'exécution. Ceci nécessitera, au niveau de l'accès au tunnel, un site assez large pour se raccorder aux routes existantes en surface. D'autre part, cette méthode sera applicable quelle que soit la courbure routière.

La méthode par immersion ne nécessite qu'environ 2 m de remblai de couverture destiné à l'ancrage des éléments du tunnel, de telle sorte que la longueur du tunnel sera réduite par rapport à la méthode par bouclier. De plus, un caisson contiendra 4 voies de circulation. Ce sont les avantages de la méthode par immersion. Néanmoins, il y aura lieu de disposer d'un bassin existant ou de construire une cale sèche réservée à la confection des caissons.

6.4.3 Etude de tous les couloirs

Trois variantes de couloir de traversée sont envisagées: les Couloirs Ouest, Central et Est. (Voir Annexe 6.2.2.1, 6.2.3.2)

(1) Couloir Ouest

Bien que la largeur du chenal soit étroite, la longueur du tunnel ne sera pas si courte puisque ce couloir traverse en oblique le chenal.

Dans le cas de la méthode par immersion, il y a lieu de prévoir un puits du côté chenal de la rive nord, à l'écart des voies ferrées. La traversée des voies ferrées existantes et de la voie express s'effectue par la méthode de l'excavation ouverte avec soutènement et en pareil cas il faut prévoir un pont provisoire réservé à ces voies. Après l'achèvement des travaux, il faut prévoir le remblai et la remise en état.

Par ailleurs, il y a lieu d'effectuer le soutènement provisoire des rives pour les tranches soumises au draguage qui sera effectué pour l'installation d'un caisson à immerger. Comme le couloir Ouest traverse en oblique le chenal, le côté Ouest de la rive Nord sera considérablement influencé par ce draguage.

Par contre, la méthode par bouclier n'exerce jamais d'influence sur les infrastructures à terre, puisqu'on effectue les travaux de construction du tunnel au-dessous des voies ferrées existantes, de la voie express et des rives, à l'aide d'un tunnelier à bouclier avec pressurisation par l'eau boueuse.

	à immersion	par bouclier
Longueur au niveau sol		
- Profondeur - 11 m	1.270 m	1.790 m
- Profondeur - 7.5 m	1.090 m	1.630 m
Longueur tunnel		
- Profondeur - 11 m	695 m (caissons immergés 255 m) (caissons coulés en place 440 m)	1.120 m (au bouclier 1.040 m) (coulé en place 80 m)
- Profondeur - 7.5 m	595 m (caissons immergés 255 m) (caissons coulés en place 340 m)	940 m (au bouclier 860 m) (coulé en place 80 m)

(2) Couloir central

Dans le cas de la méthode par immersion, de même que pour le Couloir Ouest, il convient de prévoir un puits du côté chenal de la rive Nord, situé à l'écart des voies ferrées. La traversée des voies ferrées existantes et de la voie express s'effectue par la méthode de l'excavation ouverte et il faut donc prévoir un pont provisoire réservé à ces voies.

Dans le Couloir Central qui traverse relativement à angle droit le chenal, le renfort du revêtement des rives par le draguage pour l'installation d'un caisson à immerger n'est pas aussi difficile que dans le Couloir Ouest. Mais, il y a lieu de faire attention à une pollution de l'eau de mer lors du draguage et du remblai, puisque ce couloir s'approche d'un canal d'amenée d'eau de refroidissement pour la centrale électrique.

Par contre, la méthode par bouclier ne produit jamais de pollution de l'eau de mer et n'est pas non plus confrontée aux contraintes telles que les voies ferrées ou la voie express.

	par immersion	par bouclier
Longueur au niveau sol - Profondeur - 13 m	1.352 m	1.890 m
Longueur tunnel	965 m (caissons immergés 255 m) (caissons coulés en place 710 m)	1.260 m (au bouclier 1.180 m) (coulé en place 80 m)

(3) Couloir est

Situé à l'entrée du golfe, ce couloir comporte, au Sud, des installations portuaires, des bâtiments, des réservoirs, etc ... qui sont tout à fait concentrés, et au Nord, diverses installations de la centrale électrique.

Par ailleurs, il y aurait des oléoducs sous-marins, dont la position, la profondeur, le diamètre, etc ... sont inconnus.

A l'heure actuelle, nous considérons comme inapplicable pour ce projet ce couloir qu'il faudra reconnaître quand même de manière précise.

6.4.4 Coût des travaux de construction

(1) Méthode par bouclier

On calcule le coût des travaux atteignant le niveau actuel du fond du chenal (+2.0m).

Couloir Ouest (-11.0):

Caissons préfabriqués et immergés:

	335m	125.000TD/m	= 41.875.000 DT
Caissons moulés sur place:	360m	51.000	= 18.396.000
Mur de soutènement en U:	350m	12.900	= 4.515.000
Mur de soutènement en T inverse et parties générales:			
	225m	2.400	= 540.000
Installations du Tunnel	1 jeu		<u>6.287.000</u>
			71.613.000 DT (100)

Couloir Ouest (-7.5):

Caissons préfabriqués et immergés:

	335m	125.000	= 41.875.000
Caissons moulés sur place:	260m	51.100	= 13.286.000
Mur de soutènement en U:	350m	12.900	= 4.515.000
Mur de soutènement en T inverse et parties générales:			
	145m	2.400	= 348.000
Installations du Tunnel	1 jeu		<u>6.287.000</u>
			66.311.000 DT (93)

Couloir Central (-13.0):

Caissons préfabriqués et immergés:

335m 125.000 = 41.875.000

Caissons moulés sur place: 630m 51.100 = 32.193.000

Mur de soutènement en U: 350m 12.900 = 4.515.000

Mur de soutènement en T inverse et parties générales:

37m 2.700 = 88.800

Installations du Tunnel 1 jeu 6.287.000

84.958.800 DT
(118)

(2) Méthode par immersion

On calcule le coût des travaux atteignant le niveau actuel du fond du chenal (+2.0m)

Couloir Ouest (-11.0):

Tunnel foré par bouclier:

Equipement mécanique 1 jeu 25.000.000 DT

Puits (80m) 1 jeu 3.838.000 DT 32.588.000

Installation (ventilation, etc ...)

1 jeu 3.750.000 DT

Excavation (forage), etc ... 1.040m x 2 56.250 = 117.000.000

Mur de soutènement en U 400m 12.900 = 5.160.000

Mur de soutènement en T inverse et parties générales:

270m 2.400 = 648.000
155.396.000 DT

Couloir Ouest (-7.5):

Tunnel foré par bouclier:

Equipement mécanique, puits, installations (ventilation, etc ...)

1 jeu 32.588.000

Excavation (forage), etc ...	860m x 2	56.250	=	96.750.000
Mur de soutènement en U	400m	12.900	=	5.160.000
Mur de soutènement en T inverse et parties générales:				
	<u>290m</u>	2.400	=	<u>648.000</u>
	1.630m			135.146.000 DT

Couloir Central (-13.0):

Tunnel foré par bouclier:

Equipement mécanique, puits, installations (ventilation, etc ...)

	1 jeu			32.588.000
Total de l'excavation	1.180m x2	56.250	=	132.750.000
Mur de soutènement en U	400m	12.900	=	5.160.000
Mur de soutènement en T inverse et parties générales:				
	<u>230m</u>	2.400	=	<u>552.000</u>
	1.890m			171.050.000 DT

Fig.-6.4.4.1 IMMERSION DU TUNNEL

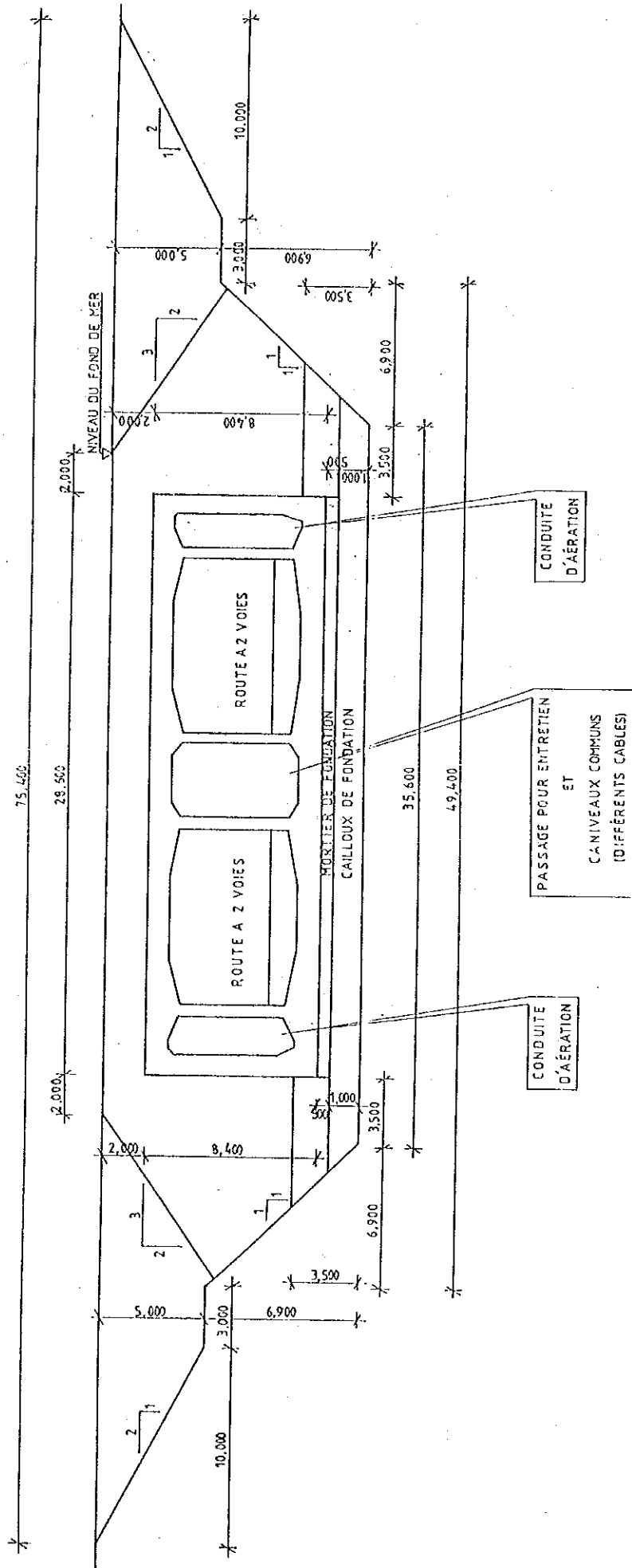


Fig.-6.4.4.2 COULOIR OUEST METHODE A IMMERSION H = -11m

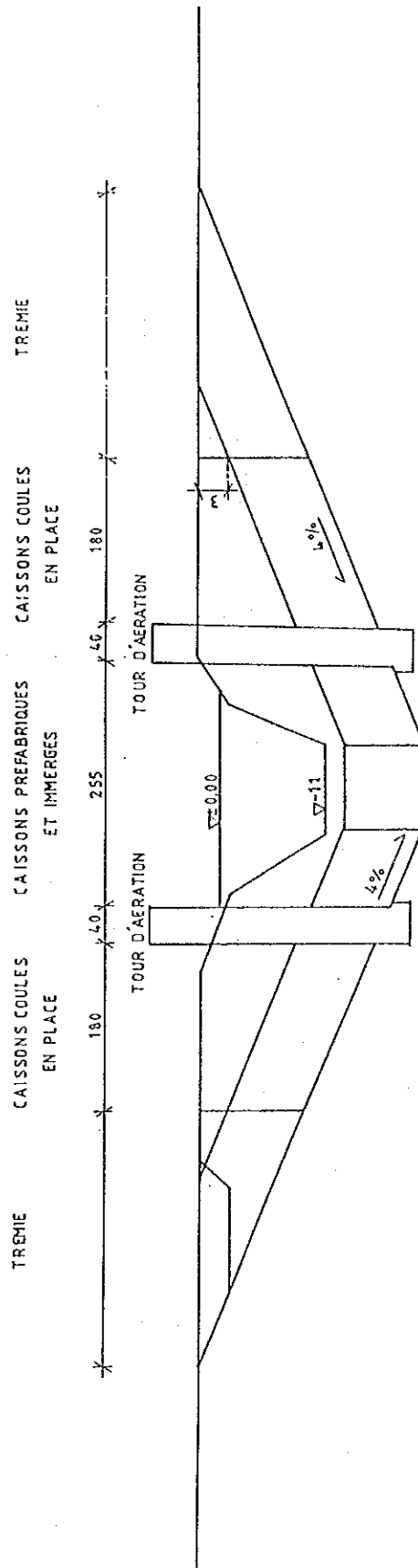


Fig.-6.4.4.3 COULOIR OUEST METHODE PAR BOUCLIER H = -11m

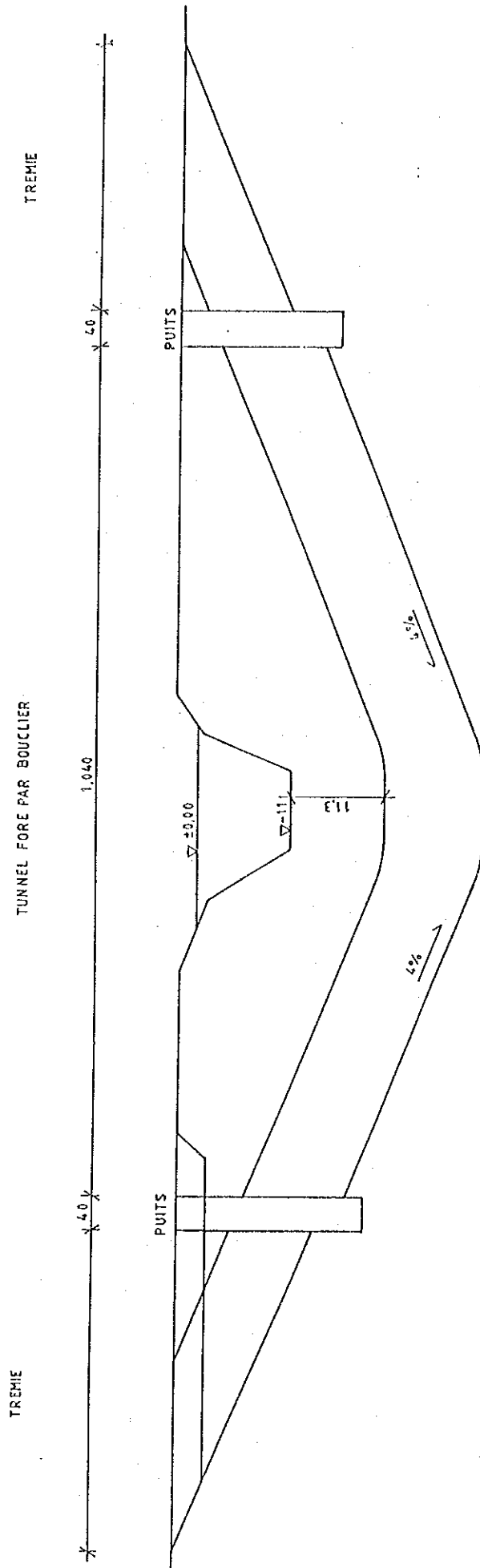


Fig.-6.4.4.4 COULOIR OUEST TUNNEL IMMERSION H = -7.5m

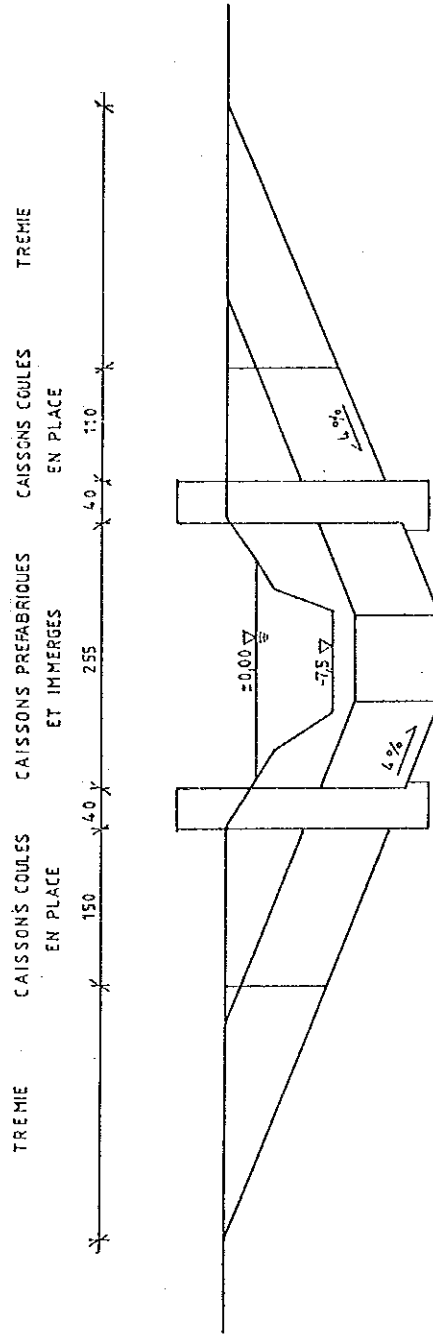
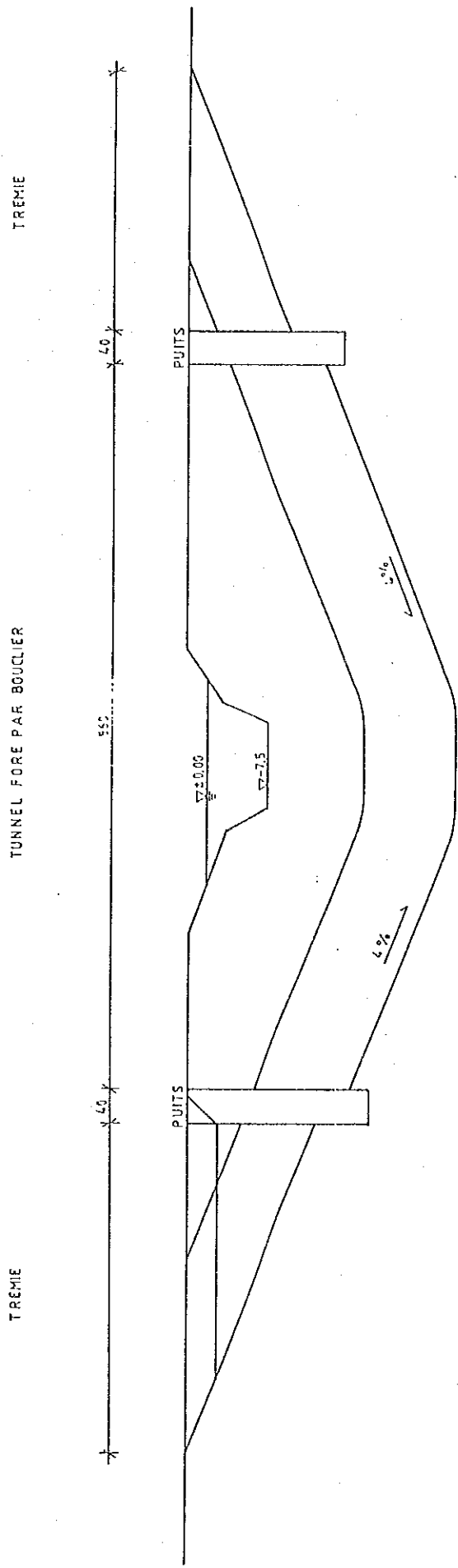


Fig.-6.4.4.5 COULOIR OUEST METHODE PAR BOUCLIER H = -7.5m



6.4.5 Choix du type

En ce qui concerne les variantes de tunnel, nous avons effectué leur étude comparative, précédée de l'examen de leur plannings d'exécution, quantités mises en oeuvre, durées des travaux de construction, problèmes à l'exécution des travaux, etc... (voir le Tableau-6.4.5.1).

Il en résulte que le tunnel foré par bouclier a l'avantage sur celui à caissons immergés pour la mise en oeuvre au niveau de la traversée des voies ferrées et de la Voie Express ainsi que pour l'influence sur l'environnement comme l'empêchement du passage des bateaux, la pollution des eaux, etc... Par contre, il sera au total plus long et beaucoup plus cher que le tunnel à caissons immergés puisqu'il nécessitera un remblai de grande épaisseur au-dessous du fond du chenal, ce qui entraînera une longueur totale très grande, et de plus, il exigera deux forages en parallèle pour l'aménagement de quatre voies de circulation.

C'est ainsi que pour la variante tunnel du projet, le tunnel à caissons immergés sera jugé meilleur que celui foré par bouclier.

En conclusion, parmi les variantes de tunnel, est jugé le meilleur et le moins cher le tunnel à caissons immergés, sur le couloir Ouest, à -7,5m de profondeur.

Tableau-6.4.5.1 ETUDE COMPARATIVE

Évaluation	Méthode à immersion	Méthode par bouclier
Tracé	La longueur du Tunnel est courte puisque le remblai est petit (environ 2m) sur fond de mer. R = 600m ne pose pas problème.	La longueur du Tunnel est longue puisque le remblai est grand (environ 11.3m) sur fond de mer. R = 600m ne pose pas problème.
Résultats passés	Traversée des golfes et rivières fréquemment enregistrée.	Il existe des résultats pour 2 voies, mais pas pour 4 voies. Donc il faut deux rangs.
Structure	Il existe résultats de grande section. Imperméabilité sans problème. Conception antisismique nécessaire.	Il existe peu de résultats de grande section. Imperméabilité à vérifier après achèvement. Conception antisismique pas spécialement nécessaire puisque le remblai est grand.
Exécution	Bonne exécution sous contrôle suffisant en raison de préfabrication. Il faut cale sèche pour confection caisson et les installations provisoires deviennent importantes. Immersion influe sur la navigation. Travaux difficiles à la traversée de ferrée et de voie express.	Contrôle d'exécution facile à cause de répétition des travaux. Exécution facile, à l'aide du système pressurisation par eau boueuse applicable pour terrain avec boues, sables et graviers tendres. Traitement des eaux boueuses nécessaires. Exécution n'empêche jamais la navigation.
Environnements	Dragage et remblai peuvent polluer l'eau. Ceci provoquera éventuellement problème de dédommagement pour pêcheurs. Immersion de caisson, et remblai s'effectue dans le chenal, ceci qui empêchera la navigation. Il faut donc consultation préliminaire.	Sans problème. Tous les travaux s'effectuent sous le fond de la mer.
Durée des travaux	40 mois (3ans et 4 mois).	42 mois (3 ans et 6 mois).
Economie	Moins cher. Couloir Ouest (-11) : 71.613.000DT	2 fois plus cher qu'Immersion. Couloir Ouest (-11m) : 155.396.000DT.
Évaluation synthétique	O (bien)	X (pas bien)

6.5 EVALUATION ECONOMIQUE

6.5.1 Prémisses de l'évaluation

(1) Période de l'évaluation

La construction commencera en 1992, pour une durée de 4 ans, et la mise en service est prévue pour l'année 1996. La période de l'évaluation s'étalera sur 30 ans, depuis 1992 jusqu'en 2021.

(2) Avec/sans l'ouvrage

Dans l'hypothèse avec l'ouvrage, on suppose que les bacs actuellement en service seront désaffectés. Le plan d'aménagement des quais pour les bacs en service serait réalisé même si l'on décide de construire l'ouvrage, pour répondre à l'incommodité des bacs avant la mise en service de l'ouvrage en 1996.

(3) Durée de vie et valeur résiduelle

La durée de vie est estimée à 50 ans uniformément pour toutes les variantes ouvrage. La période de l'évaluation sera de 30 ans, et la dernière année on prendra en compte comme un avantage une valeur résiduelle de 20 ans.

(4) Prix

Les prix sont tous donnés en Décembre 1989, et n'incluent aucune hausse des prix. De plus tous les prix excluront la part de transport.

(5) Facteur de conversion

On adoptera 0,80 comme facteur de conversion entre le prix financier et celui économique, sur la base des différentes données disponibles.

6.5.2 Coût du Projet

(1) Coût de construction

On suppose que la part en monnaie locale est de 40% de l'ensemble du coût de construction. La part en devise ne comprend pas l'impôt sur l'importation, mais la part en monnaie locale le comprend, de l'ordre de 20%. Pour éliminer cet impôt on multiplie l'ensemble de "la part en monnaie locale + celle en devise" par 0,92.

La répartition par année du coût de construction est de 20% en 1992, de 30% en 1993 et 1994 et de 20% en 1995. Le coût de construction ainsi obtenu est montré sur les tableaux 6.5.4.2 à 6.5.4.3 "bilan économique".

(2) Coût de l'entretien et de la gestion

Il sera estimé à 0,2% de l'ensemble du coût de construction. Mais il sera de 1% pour le pont levant.

6.5.3 Avantages procurés par l'ouvrage

(1) Avantages des utilisateurs

Les avantages des utilisateurs signifient la différence du coût des utilisateurs entre "sans l'ouvrage" et "avec l'ouvrage".

Le tableau 6.5.3.1 montre le coût d'exploitation des véhicules, sur lequel est basé le calcul du coût des utilisateurs.

Les avantages des utilisateurs sont montrés sur les tableaux 6.5.4.2 à 6.5.4.3 "bilan économique".

- Coût total par U.V.P:

Coût financier = 0,0947 dinars/Km + 3,57 dinars/h

Coût économique = 0,0648 dinars/Km + 2,38 dinars/h

- Taux annuel de croissance de la valeur du temps

1988 à 1994 : 1,2%, 1994 à 2004 : 1,7%, 2004 à 2014 : 1,9%.

Tableau 6.5.3.1 COUT D'EXPLOITATION DES VEHICULES (C.E.V.)

		Voiture Particulière	Taxi	Camionnette	Camion léger	Camion lourd	Camion articulé	Autocar
C.E.V/Km (millimes)	Valeur financière	79,0	69,9	65,5	82,9	241,5	302,7	267,9
	Valeur économique	41,5	41,9	40,1	134,4	177,6	217,7	194,9
C.E.V/h (dinars)	Valeur financière	-	10,7	1,4	3,1	6,0	8,6	12,6
	Valeur économique	-	3,6	1,0	2,5	4,9	7,2	10,5
Valeur du temps par passager (dinars/h)		0,69	0,69	-	-	-	-	0,455
Valeur du temps par véhicule (dinars/h)		1,36	1,36	-	-	-	-	10,4

(2) Effet multiplicateur de l'investissement

L'effet multiplicateur de l'investissement est calculé par la formule suivante

$$(i) \text{ DP}_{ij} = A_{ij} \times \text{DF}_{ij}$$

Où :

DP_{ij} : Surplus de production dans le secteur i dû à une commande passée à ce secteur.

A_{ij} : Coefficient de la matrice inverse.

DF_{ij} : Montant de la commande passée au secteur j.

$$(ii) S_i = \sum_j \text{DP}_{ij}$$

Où S_i : Production additionnelle dans le secteur i.

$$(iii) \text{AVI}_i = S_i \times \text{RVI}_i$$

Où :

AVI_i : Plus-value de valeur ajoutée dans le secteur i.

RVI_i : Taux de valeur ajoutée.

$$(iv) \text{TAV} = \sum_i \text{AVI}_i$$

Où :

TAV : Plus-value de valeur ajoutée totale.

Les résultats de ce calcul sont montrés en exemple dans le tableau 6.5.3.2.

En résumé, cet investissement induira une production 1,42 fois plus grande que celui-là et engendrera une plus-value de valeur ajoutée qui s'élève à 38,7% de l'investissement.

(3) Coût d'exploitation des bacs en service.

Les bacs actuellement en service seront évidemment désaffectés après la réalisation du pont. Le coût d'exploitation des bacs sera donc économisé et il devra être pris en compte comme un avantage de ce projet.

Le service d'exploitation des bacs compte les frais suivants dans le budget pour l'année 1990.

- Fais de personnel	:	127.000 Dinars
- Fais de l'entretien	:	435.000 Dinars
- Fais de l'amortissement	:	100.000 Dinars

Total		662.000 Dinars
-------	--	----------------

Dans l'hypothèse sans l'ouvrage, les bacs seraient obligés de continuer leur service. De plus étant donné que le trafic augmentera d'un an à l'autre, on en arrivera à se procurer un certain nombre de bacs supplémentaires. En conséquence le coût d'exploitation de 662.000 Dinars indiqué ci-dessus ne restera par inchangé, mais augmentera graduellement. On suppose que le taux d'augmentation de ce coût est égal au taux de croissance du trafic.

Les résultats du calcul en la matière sont montrés dans les tableaux 6.5.4.2 à 6.5.4.3 "bilan économique".

Tableau-6.5.3.2 EFFET MULTIPLICATEUR DU A L'INVESTISSEMENT DANS LE SECTEUR DES BAT. & TRAV. PUBLICS POUR LE PROJET

(Unité: milliers de dinars)

SECTEURS	PRO- DUCTION	VALEURS AJOUTEES	TAUX DE VALEURS AJOUTEES	COEFFI- CIENTS INVERSES	PRO- DUCTION INDUITE	TAUX DE PRO- DUCTION INDUITE	VALEURS AJOUTEES INDUITES
1 AGRICULTURE	567676	385073	0.678332	0.00037	0.01	1.000000	0.01
2 PECHE	38727	22069	0.569861	0.00000	0.00	1.000000	0.00
3 IND. AGRIC. & ALIM.	559412	60102	0.107438	0.00047	0.01	1.000000	0.00
4 MAT. CONS. CERAM. & VER	118973	27690	0.232742	0.13593	3.34	1.000030	0.78
5 IND. MECAN. & ELECTR.	202379	15063	0.074430	0.07089	1.74	1.000010	0.13
6 CHIMIE	233334	22717	0.097358	0.00963	0.24	1.000000	0.02
7 TEXT. HABILL. & CUIR	377169	30104	0.079816	0.00032	0.01	1.000000	0.00
8 INDUST. DIVERSES	119110	24954	0.209504	0.02667	0.66	1.000010	0.14
9 INDUST. EXTRACTIVES	84336	16641	0.197318	0.00511	0.13	1.000000	0.02
10 HYDROCARBURE	429977	360556	0.838547	0.00986	0.24	1.000000	0.20
11 ELECTRICITE & GAZ	57987	21311	0.367513	0.00978	0.24	1.000000	0.09
12 EAU	26618	10986	0.412728	0.00127	0.03	1.000000	0.01
13 BAT. & TRAV. PUBLICS	585618	145795	0.248959	1.00000	24.60	1.000040	6.12
14 TRANSPORT	269186	42257	0.156981	0.00676	0.17	1.000000	0.03
15 P. T. T	39405	18118	0.459789	0.00325	0.08	1.000000	0.04
16 TOURISME	266814	126393	0.473712	0.00004	0.00	1.000000	0.00
17 COMMERCE	373922	223484	0.597675	0.03645	0.90	1.000000	0.54
18 SERVICE LOGEMENT	232955	167768	0.720173	0.01536	0.38	1.000000	0.27
19 AUTRE SERVICES	526530	291877	0.554341	0.08246	2.03	1.000000	1.12
TOTAL	5110130	2012960			34.80		9.53

SOURCE:

1. Tableau des échanges industriels de 1980
2. Tableau des coefficients techniques inverses de 1980

6.5.4 Taux de rentabilité interne

Les taux de rentabilité interne sont montrés dans le tableau 6.5.4.1.

Le bilan économique figurant le procédé de calcul des taux de rentabilité est montré en exemple dans les tableaux 6.5.4.2 et 6.5.4.3. Par ailleurs, le bilan économique pour chaque variante est quant à lui montré à l'Annexe du Rapport D'Avancement II.

Quand on compare plusieurs variantes, le coût d'opportunité du capital est un facteur d'évaluation important. En Tunisie, le coût d'opportunité du capital est de l'ordre de 12%. le calcul de sensibilité effectué en augmentant de 15% le coût de construction et en diminuant de 15% les avantages pour chaque variante ouvrage, montre que seules les variantes ouvrage avec tirant d'air de 30m et 15m du tracé Ouest présentent un taux de rentabilité interne supérieur à 12%.

Tableau-6.5.4.1 (1/2)

TAUX DE RENTABILITE INTERNE

Couloir Est:

Symbole	Variante			Inves- tissement (1000 D)	Normal	T.R.I (%)	
	Tirant d'air	Type de pont	* a/b			Coût x 1,15	Avantage x 0,85
E.1.a (55)	55,0	Pont suspendu à haubans	a	119.180	10,5	8,0	
E.1.b (55)			b	119.370	10,5	8,0	
E.1.a (45)	45,7	Pont suspendu à haubans	a	101.100	11,2	8,6	
E.1.b (45)			b	100.290	11,3	8,6	

Couloir Central:

Symbole	Variante			Inves- tissement (1000 D)	Normal	T.R.I (%)	
	Tirant d'air	Type de pont	* a/b			Coût x 1,15	Avantage x 0,85
C.1.a (55)	55,0	Pont suspendu à haubans	a	103.700	12,4	9,6	
C.1.b (55)			b	104.000	12,4	9,6	
C.2.a (55)	45,7	Pont à poutre- caisson	a	102.120	12,6	9,7	
C.2.b (55)			b	102.100	12,6	9,7	
C.1.a (45)	45,7	Pont suspendu à haubans	a	81.510	14,8	11,6	
C.1.b (45)			b	80.870	14,9	11,7	
C.2.a (45)	45,7	Pont à poutre- caisson	a	81.240	14,9	11,7	
C.2.b (45)			b	79.110	15,1	11,9	

Note *) a: acier, b: béton précontraint

Tableau-6.5.4.1 (2/2) TAUX DE RENTABILITE INTERNE (SUITE)

Couloir Ouest;

Symbole	Variante			Inves- tissement (1000 D)	T.R.I (%)		
	Tirant d'air	Type de pont	* a/b		Normal	Coût x 1,15 Avantage x 0,85	
0.1.a (45)	45,7	Pont suspendu	a	81.910	14,3	11,2	
0.1.b (45)		à haubans	b	82.450	14,2	11,1	
0.2 (45)		Pont Lohse		85.230	13,9	10,8	
0.3 (45)		Pont Nielsen		83.500	14,1	11,0	
0.4.a (45)		Pont à poutre- caisson	a	80.820	14,4	11,3	
0.4.b (45)			b	79.380	14,6	11,5	
0.1.a (30)		30,0	Pont suspendu	a	57.140	18,4	14,6
0.1.b (30)			à haubans	b	57.030	18,4	14,7
0.2 (30)	Pont Lohse			60.160	17,7	14,1	
0.3 (30)	Pont Nielsen			57.350	18,3	14,6	
0.4.a (30)	Pont à poutre- caisson		a	56.390	18,5	14,8	
0.4.b (30)			b	55.770	18,7	14,9	
0.5 (15)	15,0		Pont mobile		83.840	13,6	10,5
0.6 (15)			Pont à poutre-caisson		36.120	24,9	20,1

Note *) a: acier, b: béton précontraint.

B. VARIANTE TUNNEL:

Couloir	sym- bole	Variante		Inves- tissement (1000 D)	T.R.I (%)	
		P	Type du tunnel		Normal	Coût x 1,15 Avantage x 0,85
Central	C.T	-13,0	Tunnel à cais- sons immergés	117.730	10,9	8,3
Ouest	O.T	-7,5	Tunnel à cais- sons immergés	102.820	12,6	9,7

LEGENDE P: Profondeur du passage.

Tableau-6.5.4.2 BILAN ECONOMIQUE VARIANTE 0.4.b (30) NORMAL

(Unité : millier de dinars)

ANNEE	INVESTISSEMENT	COUT D'ENTRETIEN	COUT TOTAL	AVANTAGE POUR L'USAGER	ECONOMIE SUR COUT DU BAC	EFFET MULTIPLICATEUR	VALEUR RESIDUELLE	AVANTAGE TOTAL	COUT TOTAL ACTUALISE	AVANTAGE TOTAL ACTUALISE
1992	10262	0	10262	0	0	1381	10262	1381	10262	1381
1993	15393	0	15393	0	0	2072	25449	2072	12969	1746
1994	15393	0	15393	0	0	2072	40328	2072	10928	1471
1995	10262	0	10262	0	0	1381	49769	1381	6138	826
1996	0	89	89	7452	768	0	48743	8221	45	4143
1997	0	89	89	7843	818	0	47717	8660	38	3678
1998	0	89	89	8253	870	0	46691	9124	32	3264
1999	0	89	89	8686	927	0	45665	9612	27	2898
2000	0	89	89	9140	986	0	44638	10127	23	2572
2001	0	89	89	9619	1050	0	43612	10669	19	2283
2002	0	89	89	10123	1117	0	42586	11240	16	2027
2003	0	89	89	10653	1189	0	41560	11842	14	1799
2004	0	89	89	11211	1266	0	40534	12477	11	1597
2005	0	89	89	11799	1300	0	39508	13099	10	1413
2006	0	89	89	12417	1335	0	38481	13752	8	1250
2007	0	89	89	13068	1371	0	37455	14439	7	1106
2008	0	89	89	13753	1408	0	36429	15162	6	978
2009	0	89	89	14474	1447	0	35403	15921	5	865
2010	0	89	89	15233	1486	0	34377	16719	4	766
2011	0	89	89	16031	1526	0	33351	17557	3	678
2012	0	89	89	16872	1567	0	32324	18439	3	600
2013	0	89	89	17756	1610	0	31298	19366	2	531
2014	0	89	89	18687	1653	0	30272	20341	2	470
2015	0	89	89	19667	1698	0	29246	21365	2	416
2016	0	89	89	20698	1744	0	28220	22442	1	368
2017	0	89	89	21783	1792	0	27194	23574	1	326
2018	0	89	89	22924	1840	0	26167	24765	1	288
2019	0	89	89	24126	1890	0	25141	26016	1	255
2020	0	89	89	25391	1941	0	24115	27332	1	226
2021	0	89	89	26722	1994	0	23089	51804	1	361
TOTAL									40579	40580

AVANTAGE ACTUALISE/COUT ACTUALISE = 1.00002

T.R.I. = .186845

Tableau-6.5.4.3

BILAN ECONOMIQUE VARIANTE 0.4.b (30) COUT x 1.15

AVANTAGES x 0.85

(Unité : millier de dinars)

ANNEE	INVESTISSEMENT	COUT D'ENTRETIEN	COUT TOTAL	AVANTAGE POUR USAGER	ECONOMIE SUR COUT DU BAC	EFFET MULTIFICATEUR	VALEUR RESIDUELLE	AVANTAGE TOTAL	COUT TOTAL ACTUALISE	AVANTAGE TOTAL ACTUALISE
1992	11801	0	11801	0	0	1350	11801	1350	11801	1350
1993	17701	0	17701	0	0	2025	29266	2025	15407	1763
1994	17701	0	17701	0	0	2025	46378	2025	13409	1534
1995	11801	0	11801	0	0	1350	57235	1350	7781	890
1996	0	103	103	6334	653	0	56054	6988	59	4010
1997	0	103	103	6666	695	0	54874	7361	51	3677
1998	0	103	103	7015	740	0	53694	7755	45	3371
1999	0	103	103	7383	788	0	52514	8170	39	3091
2000	0	103	103	7769	838	0	51334	8608	34	2835
2001	0	103	103	8176	892	0	50154	9068	29	2599
2002	0	103	103	8604	950	0	48974	9554	26	2383
2003	0	103	103	9055	1011	0	47794	10066	22	2186
2004	0	103	103	9529	1076	0	46614	10605	19	2004
2005	0	103	103	10029	1105	0	45434	11134	17	1831
2006	0	103	103	10555	1135	0	44254	11689	15	1673
2007	0	103	103	11108	1166	0	43073	12273	13	1529
2008	0	103	103	11690	1197	0	41893	12887	11	1398
2009	0	103	103	12303	1230	0	40713	13533	10	1277
2010	0	103	103	12948	1263	0	39533	14211	8	1167
2011	0	103	103	13627	1297	0	38353	14924	7	1067
2012	0	103	103	14341	1332	0	37173	15673	6	975
2013	0	103	103	15093	1368	0	35993	16461	6	892
2014	0	103	103	15884	1405	0	34813	17289	5	815
2015	0	103	103	16717	1444	0	33633	18160	4	745
2016	0	103	103	17593	1483	0	32453	19076	4	681
2017	0	103	103	18515	1523	0	31273	20038	3	623
2018	0	103	103	19486	1564	0	30092	21050	3	569
2019	0	103	103	20507	1607	0	28912	22114	2	521
2020	0	103	103	21582	1650	0	27732	23232	2	476
2021	0	103	103	22714	1695	0	26552	50960	2	909
TOTAL									48840	48844

AVANTAGE ACTUALISE/COUT ACTUALISE = 1.00008

T.R.I. = .148945

6.6 CHOIX DE LA SOLUTION OPTIMALE

6.6.1 Comparaison entre les variantes de l'ouvrage de franchissement

(1) On a passé en revue de nombreuses variantes pour proposer la solution optimale pour l'ouvrage de franchissement du goulet de Radés-La Goulette:

- Dans le chapitre 4 ont été passés en revue les couloirs de tracé possibles.
- Dans le chapitre 6.3, pour chaque couloir, un tracé a été proposé correspondant à chacune des solutions, pont ou tunnel.
- Dans le chapitre 6.4 ont été proposés pour chacun des tracés un certain nombre de variantes de tirant d'air et de structure, pour les ponts, et de tirant d'eau et de mode de construction pour les tunnels.

L'association d'un tracé et d'une variante constitue une solution possible. On en est donc arrivé à une trentaine de solutions à comparer, parmi lesquelles la solution optimale est à retenir.

(2) D'autre part

- Dans le chapitre 5, ont été présentées les prévisions de trafic pour les trois tracés envisagés : Est Central et Ouest.
- Aux chapitres 6.3 et 6.4 a été estimé le coût de construction pour chacune des solutions, au nombre d'une trentaine.
- Au chapitre 6.5 pour chacune des solutions, le taux de rentabilité interne a été ensuite estimé comme indicateur de l'évaluation économique, sur la base des prévisions de trafic et du coût de construction. Les résultats ont été donnés dans les tableaux 6.5.4.1.1, 6.5.4.1.2.
- Le tableau 6.6.1.1. présente une comparaison multicritère des différentes variantes.

Tableau-6.6.1.1 COMPARAISON MULTICRITERE DES COULOIRS ET VARIANTES
RADES-LA GOULETTE

VARIANTE D'AMENAGEMENT	COULOIR EST		COULOIR CENTRAL		COULOIR OUEST		
	Pont		Pont		Pont		Tunnel
1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'AMENAGEMENT							
- Tirant d'air (pont) (M)	55,0	45,7	55,0	45,7	45,7	30,0	15,0 (MOBILE)
- Tirant d'eau (tunnel) (M)	-	-	-	-	-	-	-7,5
- Portées d'ouvrage de franchissement du goulet (M)	320	320	200	200	150	150	150
- Longueurs des viaducs et O.A d'échangeurs (M)	2 330	2 180	2 270	1 970	1 890	1 370	540
- Longueur totale du tracé, pour les liaisons La Goulette-Radés (M)	4 565	4 565	4 610	4 610	4 665	6 745	6 745
- Niveau de prix approximatif	2,11	1,79	1,87	1,43	1,43	1	0,56
- Prévision du trafic (1994) (vvp/jour)	21 853		24 160			19 887	
(2004)	37 747		37 610			37 104	
(2014)	45 579		48 137			48 478	
- Taux de rentabilité (%)	10,5	11,3	12,6	15,1	14,6	18,7	24,9
	8,0	8,6	9,7	11,9	8,3	14,9	20,1

(Note) * La comparaison des coûts de construction est basée sur le couloir Ouest avec tirant d'air de 30m (correspondant à 1,0). Les coûts de construction sont calculés sur l'ouvrage optimal (le moins coûteux) par variante.

* La prévision de la demande de trafics n'est qu'aux horizons 1994, 2004 et 2014 pour cette comparaison.

- (3) Comparaison des couloirs de tracé et des variantes d'aménagement d'après les conditions d'inscription de l'ouvrage dans l'environnement du projet (tableau 6.6.1.2).

La comparaison entre les tracés et les variantes d'aménagement s'effectue essentiellement par analyse des coûts de construction et taux de rentabilité interne de chaque variante.

D'autres critères peuvent entrer en ligne de compte qui caractérisent les conditions de l'inscription de l'ouvrage dans l'environnement du projet.

Les critères et les éléments d'appréciation de chaque variante à l'égard de ces critères sont résumés dans le tableau 6.6.1.2. Le détail de l'analyse est présenté en Annexe 6.6.1.1.

- (4) Des divers éléments et analyses rassemblés dans les paragraphes précédents:

On peut tirer les conclusions suivantes:

- 1) Le coût de construction augmente avec le tirant d'air car hauteur des piles et longueurs d'ouvrages sont d'autant plus grandes que le tirant d'air est plus élevé.
- 2) A condition que le tirant d'air soit identique pour les variantes couloir proposées, le coût de construction est plus élevé pour les variantes Est que pour les variantes Centrales, tandis qu'il est à peine différent pour les variantes Centrale et Ouest.
- 3) Le coût de construction d'un tunnel dans le Couloir Central et Ouest est identique ou supérieur à celui d'un pont avec tirant d'air de 55m pour les tracés Est et Central. Par ailleurs, le coût de construction d'un pont mobile dégageant un tirant d'air de 30m, sur le tracé ouest est égal à celui d'autres variantes pont avec tirant d'air de 45,7m sur les tracés Central et Ouest.
- 4) A condition que le tracé et le tirant d'air soient identiques pour les variantes pont, les coûts de construction diffèrent à peine, sauf pour le pont Lohse du tracé Ouest.

Tableau-6.6.1.2 COMPARAISON DES COULOIRS DE TRACE ET DES VARIANTES D'AMENAGEMENT D'APRES LES CONDITIONS D'INSCRIPTION DE L'OUVRAGE DANS L'ENVIRONNEMENT DU PROJET

VARIANTE D'AMENAGEMENT	COULOIR EST			COULOIR CENTRAL			COULOIR OUEST					
	55,0m	45,7m	Tunnel	55,0m	45,7m	Tunnel	45,7m	30m	15m	Mobile	Tunnel	
1. COTE NORD :												
- Report de la prolongation de la voie express.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Epietement sur le lac de Tunis.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. COTE SUD :												
- Incidence des lignes électriques H.T	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0
- Incidence des raccordements ferroviaires portuaires.	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Condition de développement possible du terre-plein portuaire de La Goulette Sud.	0	0	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
- Condition de développement possible de la zone d'extension (1) du port de Radès.	++	++	0	0	0	-	++	++	++	++	++	++
- Condition de développement possible de la zone d'extension (2) du port de Radès.	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-
- Intégration dans les projets de développement du lac de Tunis.	0	0	0	0	0	0	0	++	++	++	++	++
- Orientation nouvelle du port de Tunis.	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
- Deuxième extension du port de Radès, dans le golfe de Tunis.	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non

Notation : ++ Très favorable
+ Favorable
0 Normal ou équivalent
- Défavorable
- - très défavorable

- 5) Les trafics prévisibles par couloir diffèrent légèrement, mais ne témoignent pas généralement de différence significative.
- 6) C'est la raison pour laquelle les valeurs du taux de rentabilité interne, dégagées en tant qu'indicateur de l'évaluation économique évoluent en sens contraire du coût de construction. Le taux de rentabilité interne est d'autant plus élevé que le coût de construction est plus bas.
- 7) Chaque tracé est caractérisé par les dispositifs de raccordement aux routes existantes (échangeurs et carrefours) ainsi que par son influence éventuelle sur certains aspects de son environnement (zones portuaires et projet d'aménagement du lac de Tunis). Aucun de ces facteurs, cependant, ne joue de rôle décisif dans le choix du tracé.
- 8) Par conséquent, le premier facteur pour le choix d'une variante ouvrage d'art est le tirant d'air, qui conditionnera de manière très significative, à la fois le coût de construction et les fonctions portuaires.
- 9) En prenant en compte les remarques 1) à 8) ci-dessus, pour définir une solution optimale de l'ouvrage de franchissement, la chronologie des choix est la suivante:
 - Choix entre le mode de franchissement : par pont ou par tunnel.
 - Si la solution par pont est retenue : choix du tracé et du tirant d'air associé.
 - Choix du type d'ouvrage.

6.6.2 Choix de la Variante

- (1) En ce qui concerne le choix du tracé ainsi que du tirant d'air, du point de vue routier, les variantes Ouest avec tirant d'air de 15m sont

les solutions optimales puisque le taux de rentabilité interne est élevé alors que le coût de construction est minimum.

Par contre, du point de vue de l'ONPT, la variante optimale est celle qui porte le moins de gêne au passage des navires.

Ces deux points de vue sont donc contradictoires.

Le choix d'une solution optimale de tracé et de tirant d'air nous amènera obligatoirement à chercher un compromis entre ces deux points de vue contradictoires;

(2) Par ailleurs, les études qui ont suivi (estimation du coût de construction par variante ouvrage, celle du trafic prévisible par tracé, puis celle du taux de rentabilité interne, etc...) permettent d'effectuer les analyses qui suivent

1) Le coût de construction des tunnels dans les Couloirs Central et Ouest est aussi cher, voire plus cher que celui des variantes pont avec tirant d'air de 55m dans les Couloirs Est ou Central.

En revanche, le tirant d'air de 55m satisfait aux exigences de l'ONPT.

On peut donc dire que les variantes pont avec tirant d'air de 55m sont préférables aux variantes tunnel, qui peuvent par ailleurs rencontrer de nombreux problèmes, tels que leur entretien après la mise en service. On peut donc éliminer les variantes tunnel.

2) En ce qui concerne les impératifs de l'ONPT, pour des tirants d'air identiques, un tracé situé en arrière, (soit à l'ouest du port) est préférable à un tracé situé à l'entrée, (soit à l'Est du port).

En effet, les fonctions portuaires situées à l'Ouest de l'ouvrage de franchissement sont contraintes par l'existence de cet ouvrage. Dans ces conditions:

- Entre le tracé Est et le tracé Central, avec tirant d'air de 55m, ce dernier est préférable.

- Entre les tracés Est, Central et Ouest avec tirant d'air de 45,7m, ce dernier est préférable.

En conclusion, les variantes avec tirant d'air de 55m et 45,7m pour le tracé Est ainsi qu'avec tirant d'air de 45,7m pour le tracé Central sont écartées.

- 3) Pour le tracé Ouest, le pont mobile, qui présente un tirant d'air de 30m, non seulement offre un coût de construction aussi élevé que celui des ponts fixes avec tirant d'air de 45,7m, mais encore imposera ultérieurement des coûts d'entretien plus élevés que ceux des autres variantes.

De plus, le trafic sur l'ouvrage à l'horizon 2 014, qui sera de l'ordre de 50.000 voitures/jour, est supérieur à la capacité du pont mobile. La variante pont mobile est alors écartée.

- 4) On compare maintenant le tirant d'air de 55m pour le tracé Central et celui de 45,7m pour le tracé Ouest.

Le tirant d'air de 55m permet de laisser passer la plupart des navires, sauf les grands navires de guerre et navires spéciaux (par exemple, grues flottantes), mais par rapport au tirant d'air de 45,7m, il augmente:

- De 20% la hauteur de piles et la longueur de l'ouvrage (respectivement 10m et 350m de plus) et.
- De 30% le coût de construction.

De plus, il faudra déplacer 2 lignes électriques à haute tension et augmenter la largeur et la profondeur du chenal pour laisser passer de tels navires. Si l'on incorpore aux coûts de construction respectifs les dépenses correspondantes ceux-ci différeront bien d'avantage.

D'autre part, les grands navires n'accostent que rarement.

Le port de Radès existant pouvant accueillir les grands navires (qui n'accostent que rarement) il n'est donc pas nécessaire de

prévoir l'entrée de tels navires dans l'extension du port de Radès.

Le tracé Ouest avec tirant d'air de 45,7m peut assurer, pour les grands navires, le même service que le tracé Central avec tirant d'air de 55m. Son coût de construction étant beaucoup moins élevé, il doit donc être préféré. Le tracé Central est donc écarté.

- 5) En conclusion, la variante optimale sera l'une des variantes Ouest avec tirant d'air de 45,7m, 30m ou 15m.
- 6) Choix du tirant d'air pour les tracés Ouest

Ce qu'il faut prendre en considération pour le choix du tirant d'air ce sont les situations actuelle et future du port de Tunis et l'extension vers l'Ouest du port de Radès (nouveau port de Radès).

On peut formuler les remarques suivantes au sujet des relations entre tirant d'air et développement portuaire.

(a) Tirant d'air de 45,7m

Le tonnage maximal des navires ayant accosté dans les ports de La Goulette et de Radès varie entre 25.000 et 30.000 tonnes.

Le tirant d'air de 45,7m permet de laisser passer tous ces navires. (cf tableaux 6.6.2.1 et 6.6.2.2 des pages suivantes)

Ce tirant d'air de 45,7m serait nécessaire dans l'hypothèse où les navires de tonnage maximal ayant accosté dans le port existant de Radès, entreraient dans le nouveau port de Radès prévu à l'Ouest ou dans celui de Tunis.

Le port de Radès existant compte parmi les 5 grands ports de Tunisie, mais il n'est pas le port le plus grand, de telle sorte qu'on peut faire partager ses fonctions en partie avec les autres ports.

Tableau-6.6.2.1 REPARTITION DES NAVIRES "TRANSPORTS DE VRAC" PAR TRANCHE DE PORT EN LOURD EN FONCTION DE LEUR TIRANT D'EAU ET DE LEUR TIRANT D'AIR

(Exprimée en pourcentage, pour chaque tranche de port en lourd de navires dont le tirant d'eau ou le tirant d'air est inférieur à certaines valeurs).

Port en lourd	Tirant d'air du navire léger										Tirant d'eau du navire à pleine charge					Nombre de navires recensés (1)	
	< 90' (27,4m)		< 100' (30,5m)		< 110' (33,5m)		< 120' (36,6m)		< 130' (39,6m)		< 140' (42,7m)		< 150' (45,7m)		< 160' (48,8m)		
< 30,000 T	13,2	30,6	52,6	78	93,5	98,3	99,7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1,856
30,000 à 40,000 T	5	12	33	66	83	96	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	305
40,000 à 50,000 T	1	10	29	48	69	86	98	100	100	69	99	100	100	100	100	100	173
50,000 à 60,000 T	4	6	16	30	52	75	90	95	32	99	99	99	100	100	100	100	169
60,000 à 70,000 T	0	0	3	15	35	53	73	97	—	66	98	100	100	100	100	100	69
70,000 à 80,000 T	8	8	17	17	33	63	96	96	—	13	79	99	99	99	99	99	84
80,000 à 90,000 T	0	0	11	22	50	67	89	94	—	—	48	93	93	93	93	93	32
90,000 à 100,000 T	0	0	7	20	27	33	47	80	—	—	—	84	84	84	84	84	26
> 100,000 T	0	2	8	17	24	32	53	64	—	—	—	11	11	11	11	11	102

(1) Nombre total de navires en service : 2.816

Source : THE BULK CARRIER REGISTER (H. CLARKSON, LONDON, édition 1972).

Ligne définissant le tirant d'air nécessaire pour que 80% des navires d'une tranche donnée de port en lourd puissent utiliser le goulet.

Tableau 6.6.2.2 TIRANT D'AIR DES NAVIRES TYPES

Pont en lourd (tonne)	Catégorie	Tirant d'eau (M)			Tirant d'air (M)	
		Navire à pleine charge	Navire lége	Profondeur (M)	Navire à pleine charge	Navire lége
300	Cargo	3,2	1,0	3,3	15,0	17,2
1.100	"	3,9	1,8	4,2	20,9	23,0
1.700	"	4,2	1,8	5,2	21,2	23,6
1.800	"	4,6	2,0	5,5	21,6	24,2
2.600	"	5,1	2,2	6,5	21,6	24,4
5.400	"	6,3	2,8	7,5	25,7	29,2
8.500	"	7,6	3,3	9,7	29,4	33,7
12.200	Transporteur de charges lourd	9,0	4,0	12,1	42,3	47,5
14.600	Cargo	9,1	4,0	12,4	32,7	37,8
21.800	"	10,1	5,0	14,0	33,9	39,0
57.800	"	12,0	5,8	17,8	33,8	40,0
108.700	Pétrolier	14,4	5,6	20,4	33,6	42,4
238.200	"	17,3	7,9	25,7	40,7	50,1
252.000	"	19,6	9,7	26,0	42,5	52,3
372.700	"	27,0	10,4	35,0	47,0	63,6
477.000	"	28,0	12,3	36,0	48,0	63,7

Note : Etant donné que même si des navires sont de même gabarit leurs tirants d'air peuvent différer suivant leur application, on a collecté des documents concernés aussi nombreux que possible de la Société Nationale d'Aménagement des Navires, des chantiers navals, etc, et entre lesquels on a choisi et présenté au tableau 6.6.2.2 un certain nombre de navires types par tranche du port en lourd.

On a pris comme critères ces valeurs moyennes du tirant d'air indiqués dans ce tableau:

Du fait que le tirant d'eau varie suivant le chargement d'un navire, on a exprimé en valeur le tirant d'air sur la base du tirant d'eau moyen du navire légé en cours de navigation.

Par ailleurs, les possibilités d'aménagement de la partie du bassin Est du port existant de Radès, demeurent.

Il est donc nécessaire d'examiner avec prudence si de tels navires d'un tonnage maximal auront besoin d'accoster dans le nouveau port de Radès ou dans celui de Tunis, et en particulier après les travaux d'extension vers l'Est du bassin existant du port de Radès.

(b) Tirant d'air de 30m:

Le tonnage maximal des navires ayant accostés dans le port de Tunis est de 6.000 tonnes. De plus, ce port n'accueillerait pas à l'avenir de navires d'un tonnage plus élevé.

Le tirant d'air de 30m permet de laisser passer tous ces navires.

Ce tirant d'air ne permettra pas le passage de navires de 20.000 à 30.000 tonnes dans l'extension du port de Radès prévue à l'Ouest.

Néanmoins, il ne nous semble pas que des problèmes puissent se poser si l'on affecte les navires de 20.000 à 30.000 tonnes au port existant de Radès et les navires de tonnage moyen (jusqu'à 6.000 tonnes) à son extension.

C'est la raison pour laquelle le tirant d'air de 30m est convenable pour le tracé tracé Ouest, non seulement si le port de Tunis est maintenu, mais aussi si le nouveau port de Radès est construit à l'Ouest du port existant.

(c) Tirant d'air de 15m:

Ce tirant d'air ne peut être retenu que:

- Si l'extension du port de Radès n'est pas réalisée à l'Ouest du port existant.
- Si le rôle du port de Tunis est réduit : par exemple transformé en port de plaisance.

Or, les autorités portuaires ne retiennent pas ces hypothèses.

Elles sont cependant envisageables dans le cadre des projets de développement de l'agglomération de Tunis notamment d'un projet d'aménagement du lac Sud de Tunis: les berges du lac seraient réservées aux zones industrielles ou aux zones de loisirs et de tourisme.

Le tirant d'air de 15m est pratiquement identique à celui du pont mobile de Bizerte.

- 7) Le taux de rentabilité interne par variante ouvrage est calculé en tant qu'indicateur de l'évaluation économique. En Tunisie le coût d'opportunité du capital est de l'ordre de 12%.

Lorsqu'on a effectué le calcul de sensibilité en augmentant de 15% le coût de construction et en diminuant de 15% les avantages pour chaque variante ouvrage, on a constaté que seules les variantes ouvrage avec tirant d'air de 30m et 15m du tracé Ouest présentaient un taux de rentabilité interne supérieur à 12%.

- 8) Tirant d'air et solution optimale proposés:

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, la Mission d'Etude formule donc les propositions suivantes en ce qui concerne la solution optimale du franchissement. (voir figure 6.6.2.1)

- (a) Tracé : Ouest.
(b) Ouvrage : Pont (fixe).
(c) Tirant d'air sous le pont:

* Dans l'hypothèse où les fonctions actuelles du port de Tunis seraient maintenues ou que l'extension du port de Radès serait construite à l'Ouest du port existant : 30m.

* Dans l'hypothèse où le port de Tunis verrait son importance réduite (transformé en port de plaisance) et où l'extension du port de Radès ne serait pas construite à l'Ouest du port existant : 15m.

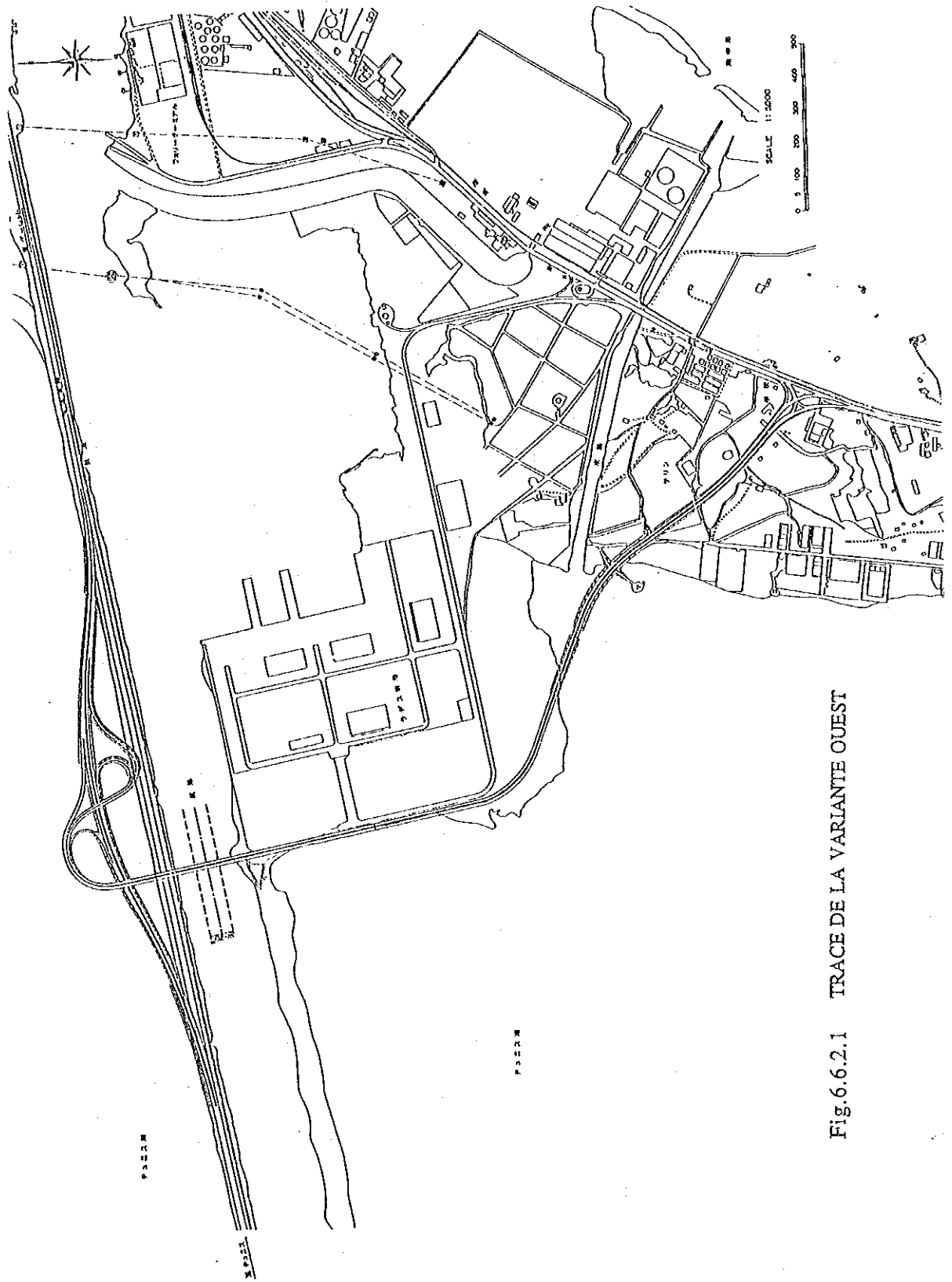


Fig.6.6.2.1 TRACE DE LA VARIANTE OUEST

6.6.3 Choix du type de pont

(1) Comparaison des caractéristiques entre les variantes de pont:

Etant donné que les variantes pont avec tirant d'air de 30m pour le Couloir Ouest sont extrêmement faisables, leurs caractéristiques sont présentés dans la Figure 6.6.3.1.

Leurs caractéristiques générales sont soumises à la comparaison de la façon suivante:

- Durant l'exécution:

1) Il se produira, dans une certaine mesure, l'empêchement du passage des navires quel que soit le type de pont, en particulier les variantes 0.3 et 0.5 qui prévoient l'installation des supports dans le passage pour quelques mois.

2) La durée de construction du pont d'acier pourra être de 5 à 12 mois plus courte que celle du pont béton précontraint.

- Après l'exécution:

1) Il va sans dire que le pont en béton précontraint excelle en entretien sur celui en acier puisque le premier ne nécessite pas d'entretien d'antirouille en général. Par contre le dernier bénéficie relativement de la facilité des travaux de réparation et d'élargissement, et il a également l'avantage de disposer d'une coloration volontaire en peinture bien qu'il exige un entretien de cette peinture tous les 10 à 15 ans.

2) L'aspect esthétique est un des facteurs extrêmement importants. Car, toutes les variantes pont seront placées juste à l'entrée de ce pays touristique. A cet égard, tous les types de pont ont plus ou moins une belle forme sauf la variante 0.5.

- Quantité et coût de construction:

FIG-6.6.3.1 COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES ENTRE LES VARIANTES DU PONT POUR LE COULOIR OUEST

Type du pont:	0.1.a	0.1.b	0.2	0.3	0.4.a	0.4.b	0.5	0.6
Vue longi- tudinale								
Configuration	Pont suspendu à haubars	Pont en arc	Pont Nelson	Pont en poutre-caisson	Pont levant	Pont en poutre-caisson		
Vue tirant d'air	30 m	30 m	30 m	30 m	15 m	15 m		
Longueur	150 + 100 (m)	60 + 150 + 60 (m)	150 m	80 + 150 + 60 (m)	150 m	40 + 80 + 40 (m)		
Matière	Acier	Acier	Acier	Béton précontraint	Acier	Acier ou Béton précontraint		
Exécution	Montage sur échafaudage applicable pour travée latérale et montage en gros bloc applicable pour travée centrale.	Montage sur échafaudage applicable pour travée latérale et montage en gros bloc applicable pour travée centrale.	Montage sur échafaudage sera en partie envisageable.	Montage sur échafaudage envisageable pour travée latérale et montage en gros bloc envisageable pour travée centrale (0.4.a). -Montage Cantilever (0.4.b)	Montage sur appuis multiples envisageable	Montage Cantilever sera généralisé		
Empêchement passage	Passage ne sera empêché qu'au transport en charlard des matériaux extrémité de montage.	Passage sera complètement bloqué au montage du bloc en arc (3 jours).	Poss d'échafaudage montage dans passage réduira la largeur passage de moitié.	Passage sera complètement bloqué au montage sur travée centrale (3 jours) (0.4.a). -Passage ne sera guère empêché (0.4.b).	Passage sera complètement bloqué au montage treillis pour quelques mois.	Passage ne sera guère empêché.		
Durée travaux	42 mois	39 mois	39 mois	36 mois	36 mois	36 mois		
Entretien	Coût d'entretien: Presque sans entretien (tous les 10 à 15 ans)	Coût d'entretien: Presque sans entretien (tous les 10 à 15 ans)	Identique à gauche	Identique à gauche	Presque sans entretien	Presque sans entretien		
Roulement	Visibilité légèrement gênée	Visibilité gênée	Visibilité légèrement gênée	Visibilité non gênée	Visibilité extrêmement gênée Traffic interrompu	Visibilité non gênée		
Aspect esthétique	Beauté géométrique sera exprimable par disposition des haubars	Belle forme équilibrée	Belle forme équilibrée, de plus beauté géométrique avec membres diagonaux	Belle forme simple	Beauté hors de question, car fonctionnellement avant tout.	Beauté simple		
Super-structure	1.950 t	2.520 t	1.450 t	2.340 t	5.600 t + 1.500 t (y compris machines)	2.630 m ³		
Sub-structure	4.800 m ³	4.800 m ³	4.800 m ³	4.800 m ³	8.500 m ³	4.000 m ³		
Fondation	Pieux battus sur place (63m) ou parois continues	Identique à gauche	Identique à gauche	Identique à gauche	Identique à gauche	Identique à gauche		
Coût de construction	1.240	1.224	1.257	1.090	1.000	4.104	0.473	
Evaluation Globale	Excellente beauté (O)	Esthétique mais non-économique (Δ)	Esthétique mais non-économique (Δ)	Bien pour presque tout (O)	Bien pour presque tout (O)	Désavantage esthétique et touristique (X)	Economique, mais tirant d'air trop bas (-)	

Note : Le coût de construction n'est calculé que sur la longueur de référence de l'ouvrage de traversée (270m) pour faciliter la comparaison.
Note) La taxe non comprise aux ponts principaux d'acier.

	0.1.a	0.1.b	0.2	0.3	0.4.a	0.4.b	0.5	0.6
Indice	1.025	1.023	1.070	1.028	1.011	1.000	1.508	0.562

(après 47.240.000 DT)

- 1) En ce qui concerne la quantité et le coût de construction, les valeurs approximatives sont données sur la base de toutes les données actuellement en possession.

Malgré la différence de longueur entre les types de pont, on fixe à 270m (longueur de la variante 0.4.b) la longueur de référence du pont, cette longueur comprenant une partie du viaduc d'accès. La comparaison de quantité et de coût entre les variantes sera basée sur cette longueur de référence.

(2) Evaluation globale

Il convient de tenir compte des points suivants pour choisir le type de pont.

1. Coût de construction (utilisation efficace des matériaux locaux)
2. Durée de construction
3. Coût de l'entretien
4. Aspect esthétique
 - 4-1 Harmonisation avec l'environnement
 - 4-2 Création de nouveau paysage

Les 6 variantes pont ont été comparées pour le type de pont fixe d'un tirant d'air de 30m sur le tracé Ouest. Des points de vue 1. à 4. prémentionnés, les variantes pont les plus réalistes sont le pont à poutre-caisson en béton et le pont suspendu à haubans en béton. Ces deux variantes ne présentent pas de différence significative aux points de vue de 1., 2. et 3. prémentionnés. Car, en ce qui concerne le pont suspendu à haubans en béton, ses haubans, malgré leurs matériaux métalliques, peuvent effectivement ne pas avoir besoin d'entretien grâce aux techniques avancées de l'anti-rouille, à savoir: l'injection de ciment dans l'enveloppe à haubans. C'est ainsi que le 4 ème point "Aspect esthétique" deviendra important pour le choix du pont optimal. Etant donné que le site de construction du pont se place à proximité du milieu du lac de Tunis pittoresque, et à l'entrée de ce pays touristique, ce 4 ème point devra être accentué.

Il y a lieu de prendre en compte les 3 points suivants pour élaborer l'aspect esthétique d'un pont.

1. Harmonisation du pont avec l'environnement
2. Création d'un nouveau paysage associé à ce pont
3. Angles préférés pour l'aspect de ce pont

Le site de construction du pont se trouve à peu près au milieu du lac de Tunis et les sols sont tout à fait plats. Au voisinage de ce pont il n'y a pas d'autres ouvrages à prendre en compte pour l'élaboration de l'aspect esthétique du pont. Donc, ces 2 variantes pont ne posent pas de problème du point de vue de leur harmonisation avec le paysage environnant.

D'autre part, du point de vue de la création d'un nouveau paysage associé au pont, on peut comparer ces 2 variantes pont.

Il en résulte;

- Dans le cas du pont à poutre-caisson:

Le tablier est installé en parallèle avec le sol, et sa hauteur maximale est de l'ordre de 35m.

- Dans le cas du pont suspendu à haubarsi

Outre le tablier identique au pont susdit, la tour est installée verticalement, et sa hauteur est de l'ordre de 90m.

Exemples d'ouvrages hauts aux environs du lac de Tunis:

Les pylônes des lignes électriques à haute tension	: environ 60m
La cheminée de la centrale électrique de La Goulette	: environ 60m
La cheminée de la centrale électrique de Radès	: environ 60m
L'immeuble de l'Hôtel Méridien	: environ 60m

La première variante constitue une silhouette plate sur le sol plat, alors que la dernière variante comporte la tour verticale de

l'ordre de 90m de haut qui présente une silhouette très marquante et impressionnante, permettant ainsi de créer un nouveau paysage.

Ensuite, du point de vue des angles préférés pour l'aspect de ce pont, on compare ces 2 variantes pont.

Il en résulte;

	Pont à poutre	Pont à haubas
1) Usagers du pont (environ 100 mille/jour)	très visible	très visible (tour marquant)
2) Usagers de Voie Express (environ 100 mille/jour)	très visible	très visible (tour marquant)
3) Usagers des ports La Goulette (milliers/jour) Radès (centaines/jour) Tunis (centaines/jour)	pas très visible très visible très visible	très visible (tour) très visible (tour) très visible (tour)
3) Population aux alentours du lac de Tunis (après aménagement) (200 mille)	pas très visible	très visible (tour)
4) Population en ville de Tunis (environ 1 million)	pas très visible	très visible (tour)

On peut espérer faire d'un pont suspendu à haubans un grand symbole représentatif de Tunis, presque au milieu du lac de Tunis qui présente une ligne toute à fait monotone. Par ailleurs, l'éclairage nocturne de la tour et des haubans permettra de créer un nouveau paysage.

En conséquence, le pont suspendu à haubans est préférable du point de vue, à la fois de la création positive d'un nouveau paysage et de la démonstration de son existence, et le pont à poutre préférable du point de vue contraire.

6.6.4 Détermination de la variante optimale

La solution optimale a été déterminée comme indiquée ci-dessous, après des discussions à plusieurs reprises entre la Mission d'Etude et les autorités concernées du Ministère de l'Equipement et de l'habitat de la République Tunisienne, sur les variantes proposées dans le présent rapport.

- 1) Tracé de franchissement: Ouest
- 2) Tirant d'air: 30m
- 3) Type de l'ouvrage de franchissement: Pont à haubans en béton à travée centrale de 150m
- 4) Vitesse de référence sur route: 60 km/h
- 5) Nombre de voies de circulation sur route: 4

En ce qui concerne la configuration du pont à haubans, bien que la Mission d'Etude ait proposé une configuration asymétrique ne comportant qu'une seule tour, la configuration symétrique qui comporte deux tours a été choisie du point de vue esthétique à la suite de la discussion bilatérale sus-citée, ce qui nous a amené à réduire la hauteur de ces tours à 60m au lieu de 90m (hauteur de la tour nécessaire à l'ouvrage asymétrique).

CHAPITRE 7 ETUDE GENERALE DE LA VARIANTE OPTIMALE

CHAPITRE 7 ETUDE GENERALE DE LA VARIANTE OPTIMALE

7.1 GENERALITES

Le présent chapitre porte sur la description de l'analyse technologique et de la conception générale du tracé optimal ainsi que de l'ouvrage optimal qui ont été choisis au chapitre précédent.

Les études topographiques et géologiques ont été effectuées dans le cadre de l'Etude de faisabilité, par les sociétés compétentes locales, sous la direction de la Mission d'Etude. Sur la base des résultats de ces études ainsi que de la prévision de la demande de trafic futur, ont été définis le type et les dimensions de l'ouvrage de franchissement (y compris le viaduc d'accès et l'échangeur), permettant ainsi d'estimer les quantités à mettre en oeuvre, le coût total et le planning d'exécution pour ce projet.

7.2 ETUDE GEOTECHNIQUE ET ETUDE DES MATERIAUX

7.2.1 Généralités sur les études

Ces études ont été effectuées par la société locale HYDROSOL (sondages et études de sols), sous la direction de la Mission d'Etude de faisabilité, depuis la fin du mois de janvier 1990 jusqu'à la fin du mois de mars 1990. Elles ont consisté en forages mécaniques, essais de pénétration standardisés, études de sondage (essais pressiométriques) et essais des sols.

Les forages mécaniques ont consisté à forer un trou sur le couloir Ouest et un autre sur le couloir Central, soit deux trous, sur une profondeur totale de 230 m, permettant ainsi le carottage. Les essais de pénétration standardisés ont été effectués neuf fois sur sols sableux.

Dix échantillons intacts (non-remaniés) ont été prélevés et soumis aux essais de sols en laboratoire, avec ceux remaniés qui avaient été obtenus aux essais de pénétration.

Les sondages (essais pressiométriques) ont été effectués à deux postes du couloir Ouest, sur une profondeur de 105 m.

En ce qui concerne les études sur matériaux de remblai, leurs échantillons ont été prélevés à deux endroits à proximité de Tunis, soit à Di Ressay et Korbous et soumis aux essais de sols en laboratoire (voir annexe 7.2.1.1).

7.2.2 Généralités sur les sols

1) Sols sur le site du projet

Les sols sur le site de ce projet se caractérisent par une large distribution de roches sédimentaires (grès, glaise, calcaire, etc...) appartenant au tertiaire de l'ère néozoïque qui forment un substratum au-dessous de la zone du projet, sur lequel reposent sur une grande épaisseur une sédimentation pléistocène et récente appartenant à l'ère quaternaire.

La partie centrale du lac de Tunis faisant l'objet de l'Etude comporte une sédimentation d'alluvions pléistocènes ainsi que de diluviums récents, sur une épaisseur de plus de 120 m.

Ces situations figurent sur le plan d'emplacement des postes d'étude et la coupe de sol, dont la synthèse est montrée ci-dessous.

<u>Ere</u>	<u>Couches de sol</u>	<u>Constitution du sol</u>	<u>Remarque</u>	
	récent	alluvion	{ argile, vase sable, sol sableux	humus, mélange de Coquilles
Quaternaire			{ argile, vase sable, sol sableux	humus, mélange de Coquilles
	Pléistocène	diluvium	{ glaise douce (semi-consolidée) grès doux (semi-consolidé)	mélange de débris de gypse mélange de Coquilles
Tertiaire		tertiaire	grès, glaise calcaire	non-confirmé

2) Description des sols

Cette description se base sur les forages mécaniques ainsi que les sondages présentés ci-après et la relation entre les sols et les résultats de ces sondages est montrée ci-après. Les couches tertiaires, qui constituent le substratum au-dessous de la zone du projet, ne sont pas confirmées.

(1) Alluvion

L'alluvion a une épaisseur de l'ordre de 35 m à partir de la surface du sol et est constitué d'une alternance d'argiles douces à humus, sables fins vasards et sables fins.

(a) Sols argileux (Ac1, Ac2)

Il s'agit de sols argileux à humus présentant une teinte grise sombre et grise noirâtre et formant une couche meuble, incluant de nombreuses coquilles. La couche Ac1 est spécialement meuble à cause de mélange remarquable d'humus. D'autre part, celle de Ac2 consiste en un sol argileux meuble ou assez meuble présentant une teinte grise-brune et grise sombre et incluant des coquilles.

(b) Sols sableux (As1, As2)

Ces sols consistent en sables fins vasards et sables fins, présentant une teinte brune foncée et grise sombre, intercalés entre les couches argileuses douces. La couche sableuse du haut (As1) est constituée principalement de sables fins vasards, incluant des coquilles, et la couche sableuse du bas (As2) est constituée principalement de sables fins incluant également des coquilles.

La valeur N se trouve normalement entre 6 et 15 pour ces deux couches indiquées ci-dessus, mais des valeurs extraordinairement hautes ponctuellement (N = 30 à 35) indiquent un mélange de substances en chaux et silice.

(2) Diluvium

(a) Dépôt de diluvium moderne (Dc1, Dc2)

Il s'agit de sols généralement très argileux présentant une teinte grise-verte sombre, grise noirâtre et grise sombre, incluant des humus et des coquilles, et dans lesquels sont intercalées une couche de sol sableux et une de sol à humus d'une faible épaisseur (épaisseur de 0.4 m à 0.8 m).

Le dépôt de diluvium moderne se place entre -36.2 m et -102.5 m et son épaisseur est de 66.3 m. Il se classe en deux couches par la valeur Ep.

Couche	Profondeur	Epaisseur	Ep (kg/cm ²)
Dc1	-34.7 à -81.0 m	46.3 m	79.0
Dc2	-81.0 à -98.0 m	17.0 m	170.5

(b) Dépôt de diluvium ancien

Il est constitué par une alternance de glaises douces (semi-consolidées) et grès doux (semi-consolidés), présentant une teinte verte-jaune, grise noirâtre et grise sombre. L'épaisseur est entre 3 m et 6 m pour les glaises douces et entre 2.5 m et 3.5 m pour les grès doux.

Le dépôt de diluvium ancien se place entre -98.6 m et -120.1 m et son épaisseur confirmée est de 22.1 m.

Un mélange de cristaux de gypse est constaté dans les glaises douces au-delà d'une profondeur de -118.5 m.

7.2.3 Sondages

1) Généralités

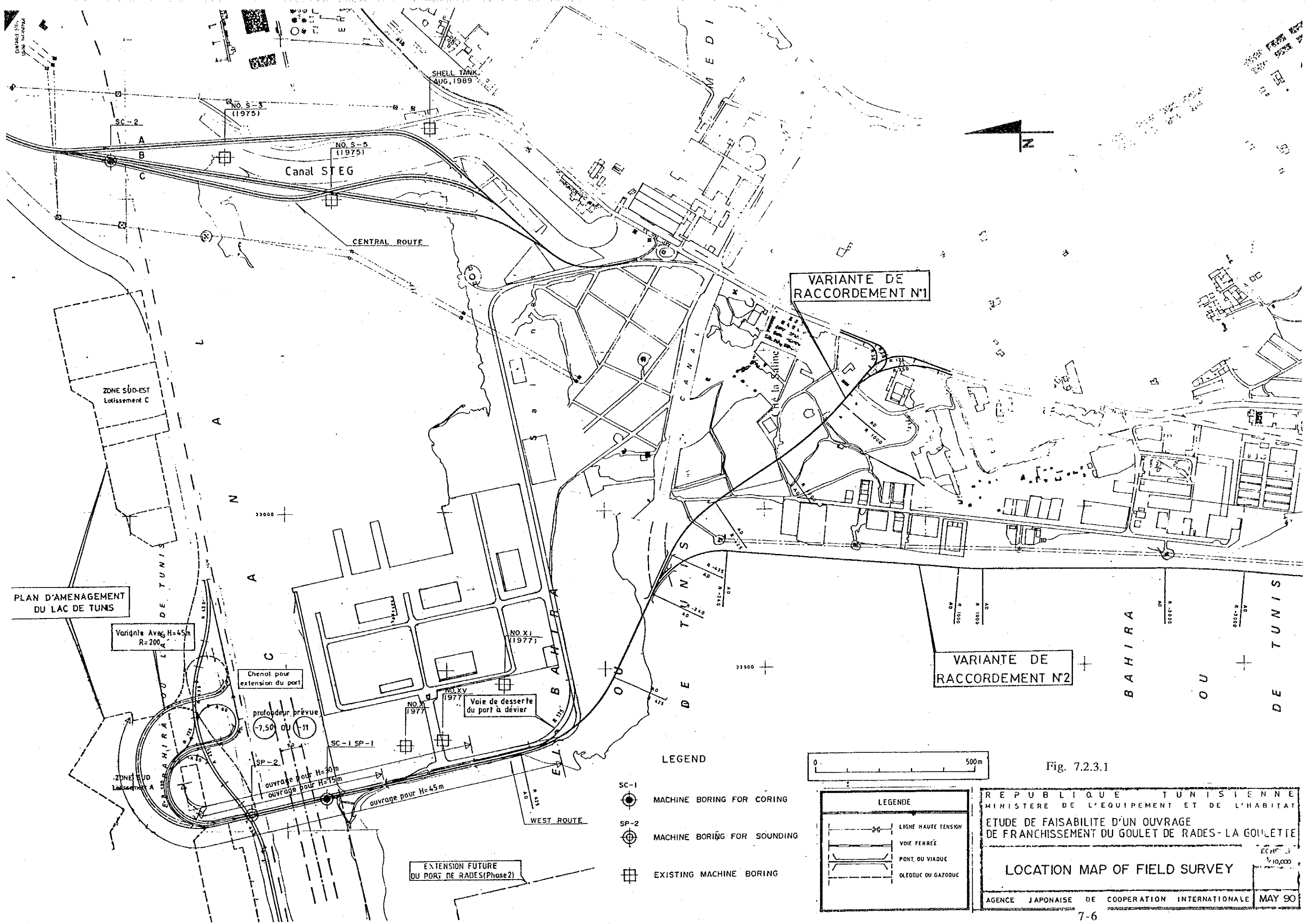
Les sondages, ayant pour objet de saisir les caractéristiques de déformation des sols de ce projet, ont été effectués à deux postes Sp1 et Sp2 dans le couloir Ouest, chacun sur une profondeur de 105 m.

Ils ont été mis en oeuvre tous les mètres jusqu'à une profondeur de 50 m et tous les 1.5 mètres entre 50 m et 105 m de profondeur. On a utilisé pour ce motif deux appareils à essai pressiométrique, fabriqué par Louis Menard.

2) Essais pressiométriques et résultats

L'essai de charge transversale dans les trous forés au moyen de l'essai pressiométrique consiste à insérer un appareil pressiométrique à l'intérieur d'un trou foré, ensuite à alimenter en eau un tubage en caoutchouc sous une pression de gaz, permettant ainsi de mesurer une quantité croissante d'eau et d'obtenir les coefficients de déformation E_p (kgf/cm^2) pour chacun des sols à partir d'une corrélation entre la pression et la déformation de ces sols.

Ces résultats sont montrés dans le tableau synoptique ainsi que le plan de répartition en profondeurs, et le tableau récapitulatif est en même temps présenté ci-dessous conformément aux sols mentionnés au paragraphe précédent.



PLAN D'AMENAGEMENT
DU LAC DE TUNS

Variante Avag H=45m
R=200

Chenal pour
extension du port

profondeur prévue
-7,50 ou -11

SP-2

ouvrage pour H=30m

ouvrage pour H=15m

SC-1 SP-1

ouvrage pour H=45m

EXTENSION FUTURE
DU PORT DE RADES (Phase 2)

VARIANTE DE
RACCORDEMENT N°1

VARIANTE DE
RACCORDEMENT N°2

LEGEND

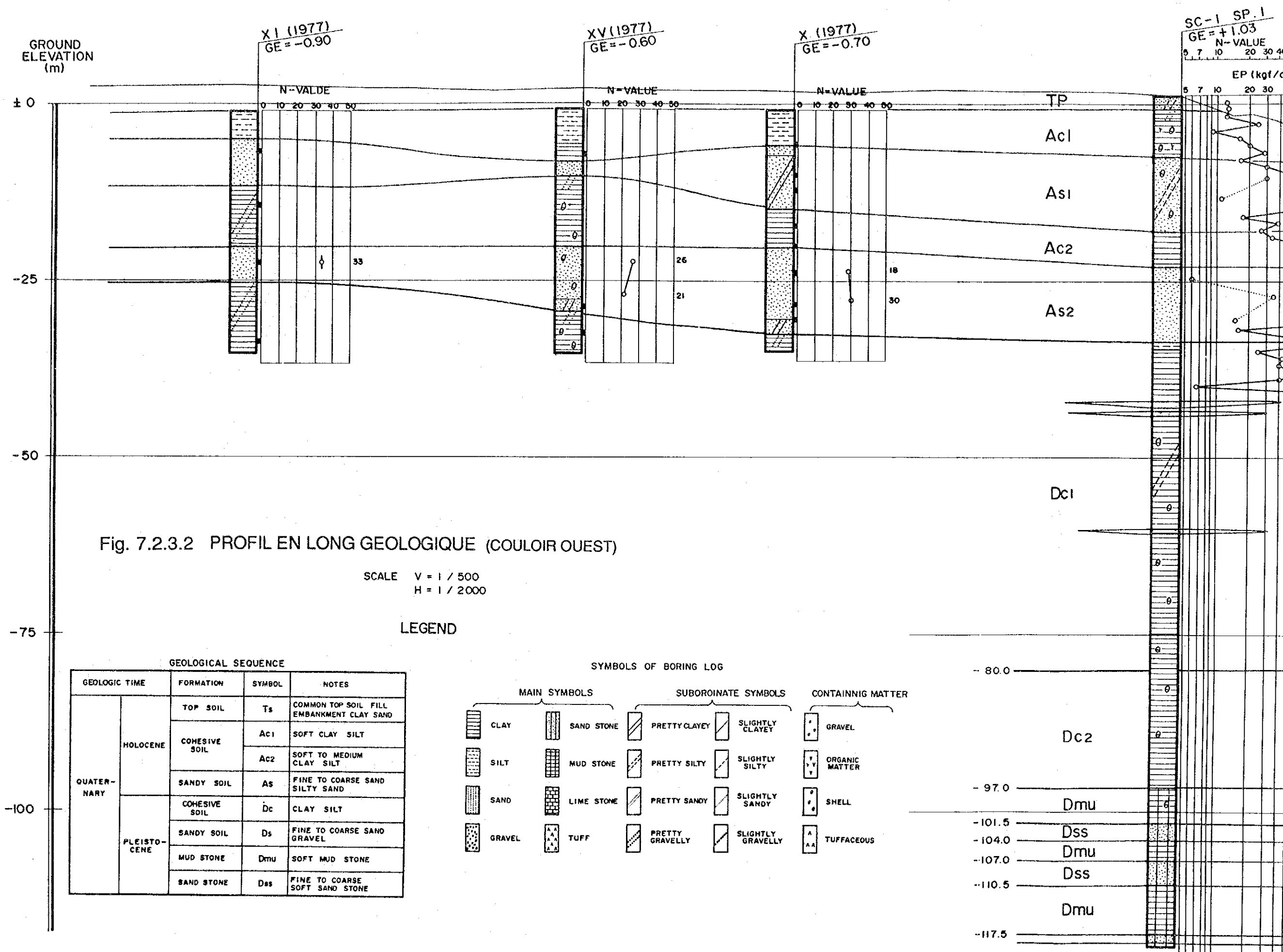
- SC-1 MACHINE BORING FOR CORING
- SP-2 MACHINE BORING FOR SOUNDING
- EXISTING MACHINE BORING

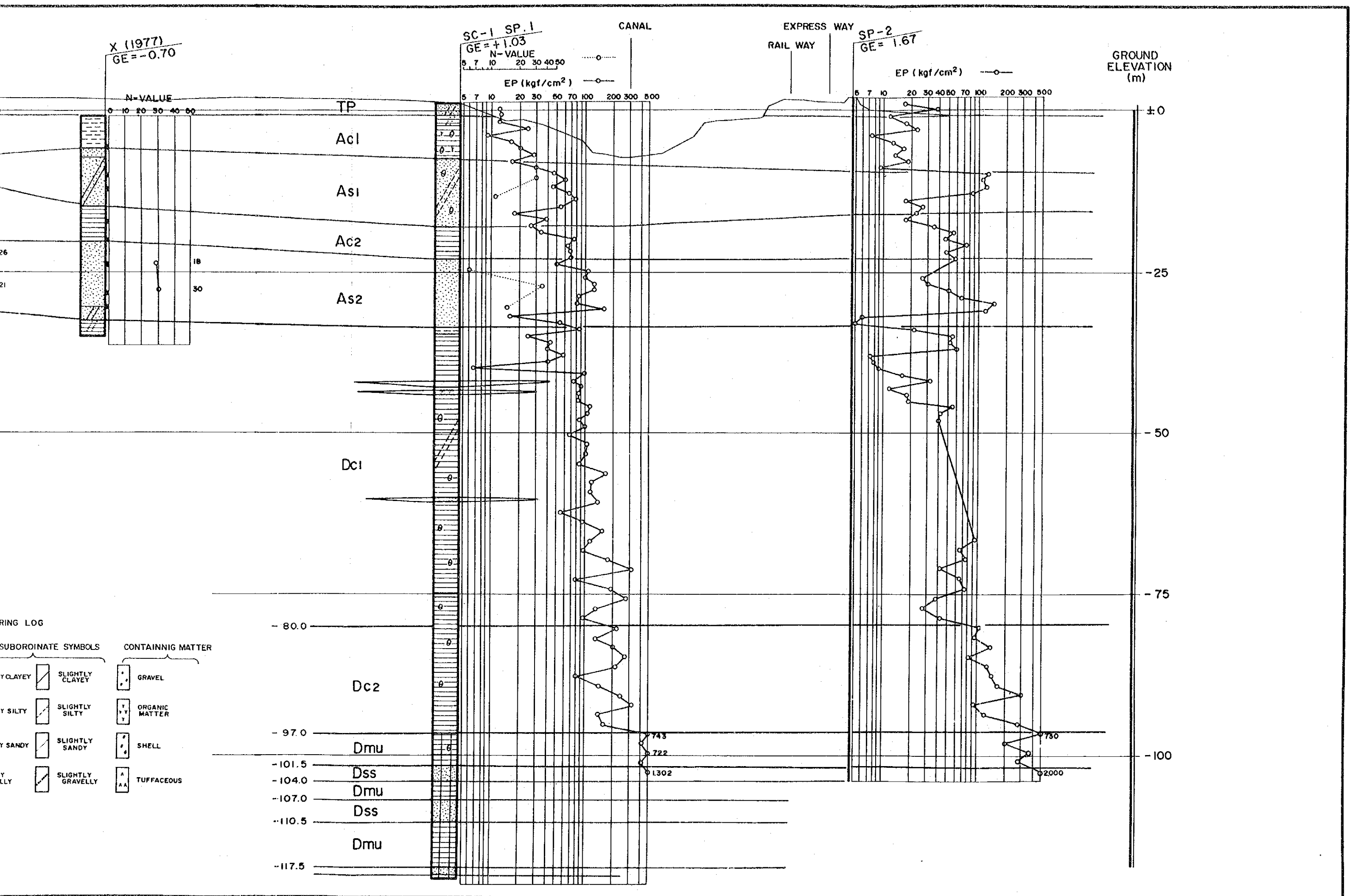


LEGENDE	
	LIGNE HAUTE TENSION
	VOIE FERRÉE
	PONT, OU VIADUC
	OLEODUC OU GAZODUC

Fig. 7.2.3.1

REPUBLIQUE TUNISIENNE	
MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT ET DE L'HABITAT	
ETUDE DE FAISABILITE D'UN OUVRAGE	
DE FRANCHISSEMENT DU GOULET DE RADES-LA GOULETTE	
ECH. 1/10,000	
LOCATION MAP OF FIELD SURVEY	
AGENCE JAPONAISE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE	MAY 80





SOIL LOG

SUBORDINATE SYMBOLS		CONTAINING MATTER	
CLAYEY	SLIGHTLY CLAYEY	GRAVEL	
SILTY	SLIGHTLY SILTY	ORGANIC MATTER	
SANDY	SLIGHTLY SANDY	SHELL	
GRAVELLY	SLIGHTLY GRAVELLY	TUFFACEOUS	

Tableau - 7.2.3.1 COUCHES DE SOL ET COEFFICIENT DE DEFORMATION EP

Couche	Profondeur GL- (m)	Etendue Ep (kgf/cm ²)	Ep type (kgf/cm ²)	Cu estim, if (kgf/cm ²)	Valeur N estimative
Ac1	0 à 8,5	10,4 à 22,0	16,2	0,094	0 à 2
As1	8,5 à 19,0	27,1 à 97,9	62,5	—	10
Ac2	19,0 à 24,1	28,0 à 67,6	47,8	0,214	3 à 4
As2	24,1 à 34,7	42,6 à 127,0	84,8	—	6 à 15
Dc1	34,7 à 81,0	17,5 à 140,7	79,0	0,540	8 à 11
Dc2	81,0 à 98,0	97,4 à 243,5	170,5	1,53	14 à 30
Dmu	98,0 à 102,5	278,3 à 687,9	483,1	—	30 à 50
Dss	102,5 à 105,0	1300 à 2000	—	—	—

7.2.4 Essais des sols

1) Généralités

Les essais des sols ont porté sur l'alluvion (Ac, As) et le diluvium (Dc) et ont été effectués de la façon suivante.

Echantillons non remaniés	Ac, Dc	au nombre de 10
Echantillons remaniés	As	au nombre de 9
Echantillons remaniés	Remblai	au nombre de 2
	Total	21

2) Résultats

L'analyse des résultats de ces essais se base sur les valeurs obtenues avec les échantillons mentionnés au paragraphe précédent ainsi que sur des documents existants (concernant certains résultats de l'essai géotechnique utilisables pour ce projet et provenant de l'étude sur le port de Radès).

A. Caractéristiques fondamentales des sols

(1) Dépôt d'alluvions (Ac)

- En ce qui concerne la composition granulométrique, la portion de grains fins (argiles vasardes) représente plus de 80% et celle de grains grossiers moins de 20%.

- La catégorie CH représente le dépôt d'alluvions d'après le classement géologique par l'abaque de plasticité.
- La catégorie de l'argile ordinaire à celle active représente le dépôt d'alluvions d'après le classement par l'activité colloïdale. L'argile active est un dépôt contenant de nombreux humus.
- La teneur en eau naturelle et la limite de liquidité ont une corrélation de $Wl = Wn$ ou $Wl < Wn$.

D'ailleurs, l'indice de consistance indique $Tc = 0.045$ et dans de tel cas les argiles remaniées seraient en phase liquide instable.

- Le poids spécifique et la densité humide sont tous les deux jugés convenables.
- L'indice de vide et la teneur en eau naturelle établissent une corrélation de même que pour le dépôt de diluviums (Dc) indiqué ci-après.

Cette corrélation est jugée très favorable.

$$e = 0.026 Wn + 0.146$$

(2) Sols sableux d'alluvions (As)

- En ce qui concerne la composition granulométrique, la portion de grains fins occupe plus de 60% et celle de grains grossiers est de 34%, et ces sols consistent en majeure partie en SM (sable vasard) et en partie en ML (vase sableuse).
- Le poids spécifique est relativement stable et convenable ($G_s = 2,692$).

(3) Dépôt de diluviums (Dc)

- En ce qui concerne la composition granulométrique, ce dépôt présente une granulométrie stable et sa portion de grains fins (argile vasarde) occupe plus de 90%.

- Selon un classement par l'abaque de plasticité, le CH occupe 80% et le CL est de 20%, donc le CH représente ce dépôt.
- Selon un classement par l'activité colloïdale, l'argile est si stable qu'elle appartient à la catégorie non-active.
- La teneur en eau naturelle et la limite de liquidité ont une corrélation de $Wl \geq 1.5 Wn$ et l'indice de consistance est de $Ic = 0.8$, donc ce dépôt peut être considéré comme très stable.
- Le poids spécifique varie relativement peu et présente une valeur convenable ($G_s = 2,720$).
- La densité humide représente une valeur correspondant à la courbe théorique obtenue à partir du G_s indiqué ci-avant.
- L'indice de vide et la teneur en eau naturelle ont la même corrélation qu'à (1) Dépôt d'alluvions.

B. Caractéristiques mécaniques des sols

- La résistance à la compression triaxiale donnera les valeurs suivantes:

Ac1 - dépôt	$C_{uu} = 0.08 \text{ kg/cm}^2$	$\phi_{uu} = 0$
-------------	---------------------------------	-----------------

Ac2 - dépôt	$C_{uu} = 0.19 \text{ kg/cm}^2$	$\phi_{uu} = 8.5^\circ$
-------------	---------------------------------	-------------------------

Dc2 - dépôt	$C_{uu} = 0.55 \text{ kg/cm}^2$	$\phi_{uu} = 5.5^\circ$
-------------	---------------------------------	-------------------------

- Les caractéristiques de consolidation donneront les valeurs suivantes:

Ac1 - dépôt	$P_c = 0.30 \text{ kg/cm}^2$
-------------	------------------------------

$$C_c = 1.09$$

$$C_v = 5.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

Ac2 - dépôt	$P_c = 0.91 \text{ kg/cm}^2$
-------------	------------------------------

$$C_c = 0.42$$

$$C_v = 2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

7.2.5 Etude des matériaux de remblaiement

L'étude des matériaux de remblaiement s'est déroulée à deux endroits, soit Di Ressay et Korbous, à l'Est de Tunis.

L'étude effectuée à Di Ressay a porté sur les débris (matériaux passés au tamis de 4 mm) dégagés d'une centrale de concassage située à environ 20 km à l'Est de Tunis et, dans ses environs il existe encore un certain nombre de centrales identiques.

D'autre part, l'étude effectuée à Korbous a porté sur les sols sableux composés principalement de sables fins, extraits d'une carrière actuellement hors de service à environ 36 km à l'Est de Tunis. Les résultats de ces études seront documentés et récapitulés comme suit.

Ces matériaux sont tous les deux jugés satisfaisants pour le remblaiement.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX DE REMBLAIEMENT

Prélèvement	Poids spécifique Gc	Teneur en eau Wn(%)	Coefficient d'uniformité Uc	Classement	Evaluation et signification géotechnique
Di Ressay	2,704	3,0	15,6	SM Sable vasard	Bonne granulométrie. Perméabilité; un peu mauvaise Sable mouvant; non liquéfiable
Korbous	2,658	4,0	25,9 (estimatif)	SM Sable vasard	Talus; stable Effet consolidation; bien

CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX DE REMBLAIEMENT

Prélèvement	Essai de compactage		Essai CBR		Remarque
	γd max (t/m ³)	Wopt (%)	CBR (%)	γd (t/m ³)	
Di Ressay	2,06	8,0	10,0	1,457	SM Sable vasard
Korbous	1,87	10,0	14,0	1,777	SM Sable vasard

7.2.6 Constantes de sols et conditions définies pour la conception du remblai.

La zone de ce projet consiste en sédimentation maritime quasi uniforme et le dépôt d'alluvions, qui exerce une grande influence sur les substratums porteurs et remblais pour l'ouvrage, présente à tous les postes de l'étude géologique un comportement similaire en ce qui concerne son état de sédimentation, sa constitution, ses caractéristiques géologiques, etc., de telle sorte que les constantes des sols utilisés pour la conception du remblai sont déterminées de la manière suivante.

Etablissement d'une coupe de sol

⇓

La valeur représentative sera déterminée à partir de celles de l'essai du sol et de celles du sondage pour chaque couche de sol

⇓

A partir de la coupe du sol, un sol apte au remblai est déterminé et mis à profit pour la conception du remblai.

- 1) Conditions de sols pour la conception du remblai et constantes des sols (pour sols meubles)
 - (1) Les couches de sol réparties et la nappe phréatique sont à définir à partir de la coupe de sol.
 - (2) La couche de drainage dû à la consolidation qui est confirmée d'après une coupe de forage sera à adopter.
 - (3) Les constantes de sols sont les suivantes.

Tableau-7.2.6.1 VALEURS DE REFERENCE DES SOLS

Sols	Densité humide γ_t (t/m ³)	Cohésion sous condi- tion ini- tiale C_0 (t/m ²)	Angle fricti- on i- nterne (degré)	Courbe e-log	log-Cv log p cm ² / jour	Taux de croiss- ance de résista- nce m	Contrainte d'- écoulement due à la consolida- tion P_c (t/m ²)
Ac1	1,46	0,75	—	Fig6.1	86,4	0,3	3,0
As1	1,80	—	30	Fig6.4	—	—	—
Ac2	1,79	2,00	—	Fig6.2	48,3	0,3	8,0
As2	1,80	—	30	Fig6.4	—	—	—

Note) Voir figures 7.2.6.2 et 7.2.6.3

2) Conditions du chargement pour la conception

(1) Catégorie de charge

Elle ne porte que sur les matériaux de remblai utilisés pour cette étude et leur équivalents.

(2) Matériaux de remblaiement

On utilise le sol sableux trouvé aux deux endroits faisant l'objet de l'étude, soit à Di Ressay et Korbous. Mais ces matériaux ne seront pas répartis par affectation au corps de remblai, à la couverture en sable, etc.

(a) Poids par volume unitaire γ_t

Il ressort de l'étude:

$$\gamma_t = 2,000 \text{ t/m}^3$$

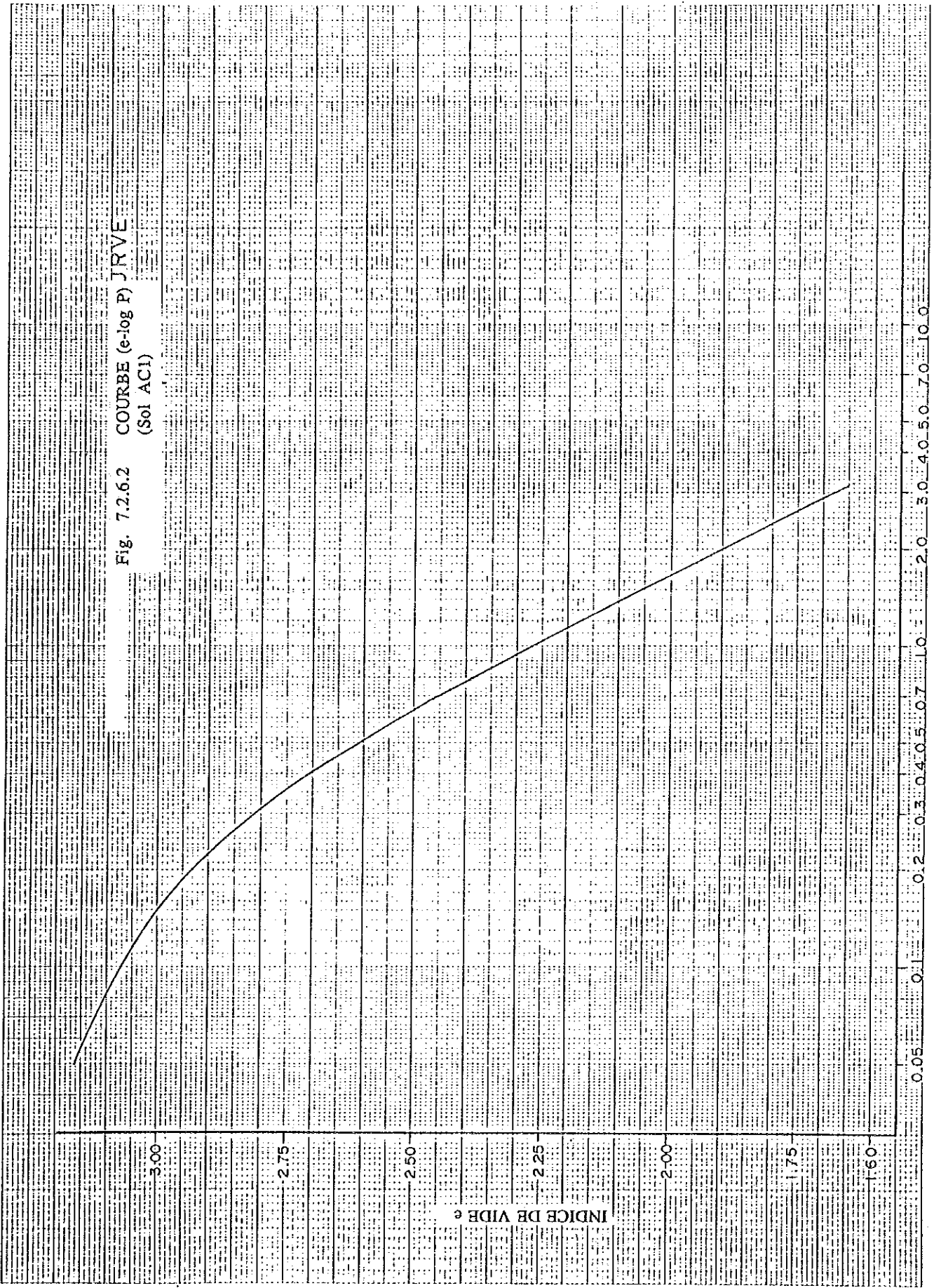
(b) Résistance au cisaillement

Elle est donnée ci-dessous:

$$C = 1,00 \text{ t/m}^3$$

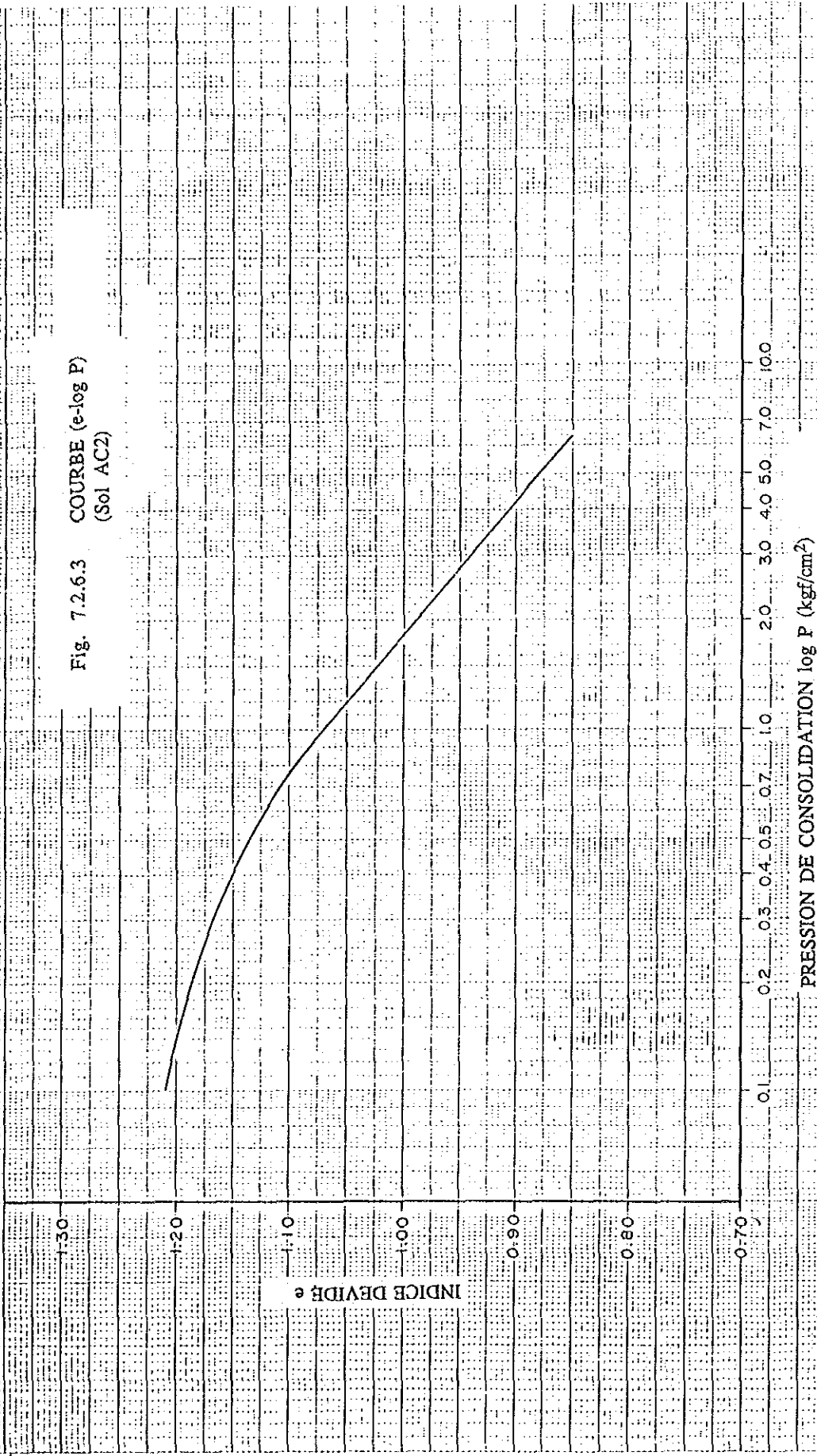
$$\phi = 25 \text{ (deg)}$$

Fig. 7.2.6.2 COURBE (e-log P) JRVE
(Sol AC1)



PRESSION DE CONSOLIDATION LOG. P (kgf/cm²)

Fig. 7.2.6.3 COURBE (e-log P)
(Sol AC2)



(3) Vitesse de remblaiement

La vitesse de remblaiement sur les sols meubles est normalement déterminée par la sécurité et la mise en oeuvre. Du fait qu'il n'existe pas beaucoup d'empêchements pour un accès des matériaux de remblaiement à la zone de ce projet, cette vitesse est mise à 5 cm/jour en fonction des caractéristiques de sol.

3) Conditions de l'analyse

(1) Coupe à étudier

En ce qui concerne la position et la coupe à étudier, on définit un endroit du côté de La Goulette et un autre du côté de Radès, soit deux endroits. La coupe à étudier et la constante de sol pour la conception se trouvent sur les tableaux 7.2.6.2 et 7.2.6.3.

(2) Mesures contre les sols meubles (stabilisation des sols)

Il y a de nombreuses mesures normalement utilisées pour une stabilisation des sols meubles. Pour la zone de ce projet, la méthode de drains verticaux en sable est à adopter et à passer en revue à cet effet, surtout en considération de son adaptabilité au sol argileux et de son effet d'exécution.

(3) Méthode de l'analyse

Une étude s'effectue sur les endroits définis en (1) qui ne seraient pas encore traités par les mesures contre les sols meubles. Ayant pour but d'estimer correctement une hauteur totale de remblai par rapport à celle de remblai en projet, cette étude a consisté à choisir 3 points repérant la hauteur totale de remblai à chaque coupe et dessiner une courbe de relation entre l'épaisseur totale de remblai et la hauteur définitive de remblai, selon laquelle a été obtenue l'épaisseur totale de remblai requis.

Tableau-7.2.6.2 COUPE DE SOL ET VALEUR DES CONSTANTES

EXAMINED LOCATION STA. NO. XV Rades side

DEPTH DEPTH (m)	DIVISION OF SOIL	THICKNESS OF SOIL H (m)	DEPTH OF CENTRAL STRATUM (m)	N-VALUE	WET UNIT WEIGHT γ_t (t/m ³)	COHESION OF THE INITIAL CONDITION C_0 (t/m ²)	MODULUS OF DEFOR - MATION E_{50} (t/m ²)	THE RATE OF STRENGTH INCREASE m	YIELD STRESS P_y (t/m ²)	REMARK
0.90	As1	0.90	0.45	—	1.80	—	—	—	—	0.90 ▽
1.50	As2	0.60	1.20	—	0.80	—	—	—	—	
6.50	Ac1	5.00	4.00	—	0.46	0.75	—	0.3	3.00	ø = 30
6.90	As2	0.40	6.70	—	0.80	—	—	—	—	
9.20	Ac2	2.30	8.05	—	0.46	0.75	—	0.3	3.00	ø = 30
11.10	As4	1.90	10.15	—	0.80	—	—	—	—	
20.90	Ac3	9.80	16.00	—	0.79	2.00	—	0.3	8.00	ø = 34
30.30	As5	9.40	25.60	23	0.80	—	—	—	—	

Tableau 7.2.6.3 COUPE DE SOL ET VALEUR DES CONSTANTES

EXAMINED LOCATION STA. SC.1 Goulette side

DEPTH (m)	DIVISION OF SOIL	THICKNESS OF SOIL H (m)	DEPTH OF CENTRAL STRATUM (m)	N-VALUE	WET UNIT WEIGHT γ_t (t/m ³)	COHESION OF THE INITIAL CONDITION C_0 (t/m ²)	MODULUS OF DEFOR - MATION E_{50} (t/m ²)	THE RATE OF STRENGTH INCREASE m	YIELD STRESS P_y (t/m ²)	REMARK
1.10	As 1	1.10	0.55	—	1.80	—	—	—	—	<u>1.10</u> V
1.90	As 2	0.80	1.50	—	0.80	—	—	—	—	
8.50	Ac 1	6.60	5.20	—	0.46	0.75	—	0.3	3.00	Ø = 30
19.00	As 3	10.50	13.75	11	0.79	—	—	—	—	
24.10	Ac 2	5.10	21.55	—	0.86	2.00	—	0.3	8.00	
34.70	As 4	10.60	29.40	10	0.80	—	—	—	—	Ø = 30

La méthode des drains verticaux en sable est étudiée en changeant le pas des drains pour obtenir la valeur de tassement rémanent souhaitée à terme.

L'analyse de stabilité a consisté à faire varier en trois étapes la hauteur de remblai d'une coupe représentative par rapport au sol à traiter pour obtenir la hauteur limite de remblai sur le sol indiqué ci-avant.

(4) Valeurs à examiner

- (a) Quantité admissible de tassement rémanent après l'achèvement du remblai (juste avant le pavé) au niveau du terre-plein sous voirie.

$$S_r \leq 10 \text{ cm}$$

- (b) Analyse de stabilité

Coefficient de sécurité minimal contre une rupture par glissement de segments circulaires juste après l'achèvement du remblai.

$$F_s \text{ min} = 1.20$$

7.2.7 Résultats des analyses

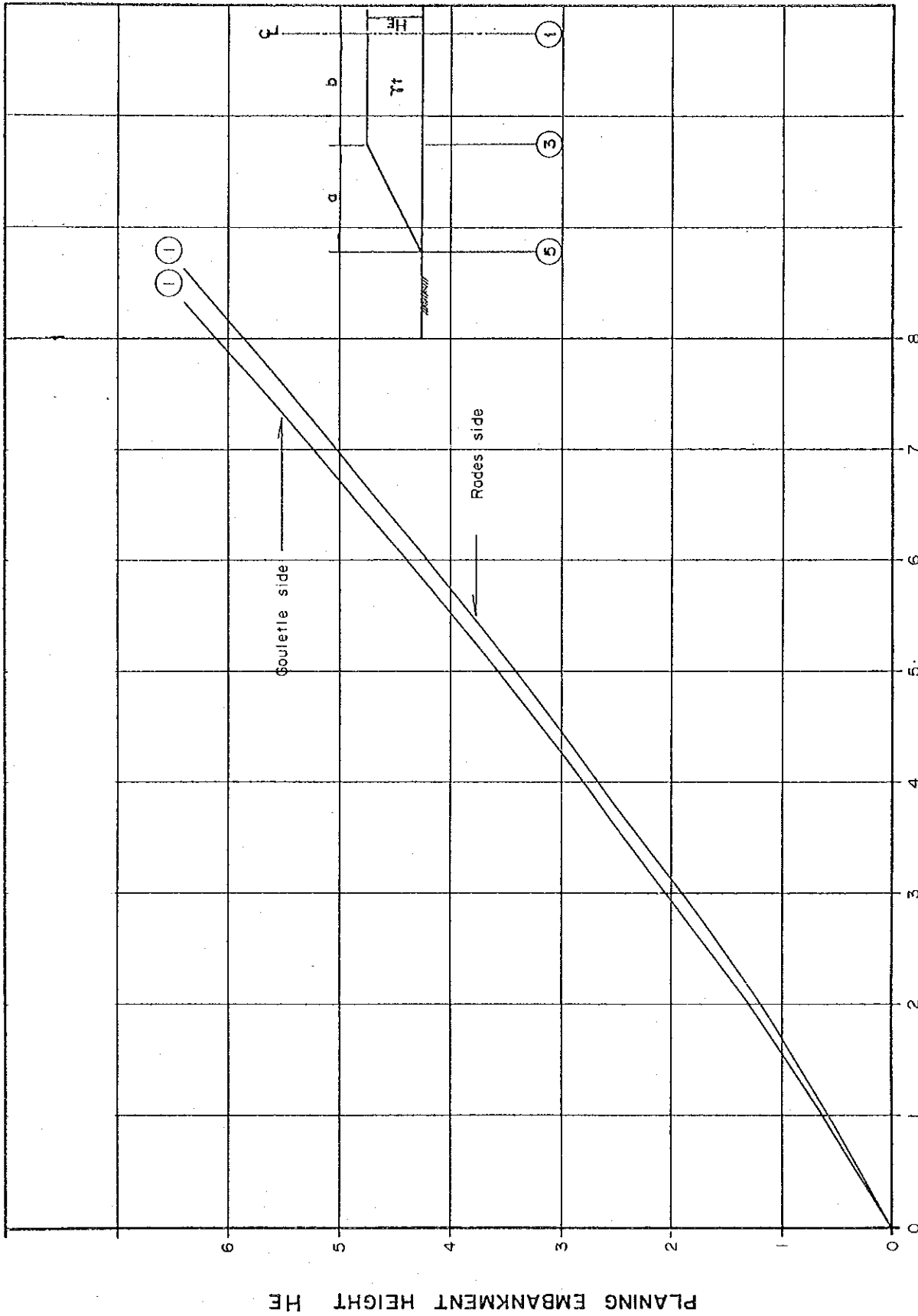
1) Remblai sur les sols meubles

- a. Le schéma du rapport de la hauteur totale de remblai (celle de remblai en projet + celle de surhaussement) sur celle de remblai en projet est présenté sur la figure 7.2.7.1.
- b. Les résultats de l'étude sur la stabilisation des sols meubles au niveau du terre-plein sont les suivants.

Du côté de Radès

Drains verticaux en sable

Hauteur de remblai en projet : 2.0 m à 4.0 m



NECESSARY EMBANKMENT HEIGHT FOR HE (HNE)
 RELATION ENTRE LA HAUTEUR DE REMBLAI PREVUE (HE)
 ET LA HAUTEUR DE REMBLAI NECESSAIRE (HNE)

Fig.-7.2.7.1

Hauteur de remblai requise	: 3.10 m à 5.75 m
Quantité de tassement	: 1.10 m à 1.75 m
Intervalle des drains	: 1.50 m à 2.0 m
Diamètre des drains	: 0.40 m
Profondeur des drains	: 20 m
Couverture en sable	: 1.0 m
Quantité de tassement rémanent	: moins de 10 cm

(au bout de 30 jours après l'achèvement du remblai)

Du côté de La Goulette

Drains verticaux en sable

Hauteur de remblai en projet	: 2.0 m à 4.0 m
Hauteur de remblai requise	: 2.95 m à 5.50 m
Quantité de tassement	: 0.95 m à 1.50 m
Intervalle des drains	: 1.50 m à 2.0 m
Diamètre des drains	: 0.40 m
Profondeur des drains	: 24 m
Couverture en sable	: 1.0 m
Quantité de tassement rémanent	: moins de 10 cm

(au bout de 30 jours après l'achèvement du remblai)

c. Hauteur limite du remblai

La hauteur limite du remblai sur les sols où a été effectuée la méthode de drains verticaux en sable est la suivante, avec un coefficient de sécurité juste après l'achèvement de remblai (F_s) de 1.20

Du côté de Radès HE = 4.20 m

Du côté de La Goulette HE = 4.70 m

Les documents géologiques utilisés pour cette étude sont ceux qui ont été recueillis antérieurement, de telle sorte que la hauteur limite de remblai est évaluée à 4.00 m des deux côtés.

2) Substratum porteur pour l'ouvrage

Représentées par le Sc-1, les caractéristiques du substratum porteur dans la zone de ce projet sont présentées au Tableau-7.2.7.1, et elles proviennent des études de forage mécanique et de sondage et des essais des sols.

Tableau-7.2.7.1 CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE DES SOLS

Sols	Profondeur G.E (m)	Épaisseur (m)	Coefficient de déformation F p (kgf/cm ²)	Cohésion (tf/m ²)	Valeur N *; estimatif
Ac1	+1,03 à -7,47	8,5	16,2	0,75	0 à 2 *
As1	-7,47 à -17,97	10,5	62,5	—	10
Ac2	-17,97 à -23,07	5,1	47,8	2,0	4 à 8 *
As2	-23,07 à -33,7	10,8	84,8	—	6 à 15
Dc1	-33,7 à -80,0	46,3	79,0	5,5	8 à 11 *
Dc2	-80,0 à -97,0	17,0	170,5	15,3	11 à 30 *
Dmu	-97,0 à -101,5	4,5	483		30 à 50 *
Dss	-101,5 à -104,0	2,5	plus de 1300	—	

Comme substratum porteur sous cet ouvrage important, sont favorables les glaises douces et les grès doux en alternance qui sont rencontrés à -97.0 m de profondeur.

La reconnaissance du sol effectuée sur le couloir Ouest n'a comporté qu'un trou foré pour le carottage et deux trous forés pour le sondage à cause d'une modification importante du planning de reconnaissance et du retard du choix de couloir.

L'étude du remblai sur les sols meubles effectuée au paragraphe (1), au cours de laquelle ont été utilisés les documents existants portant sur une zone située à la fois à environ 130 m à l'Est du couloir Ouest retenu du côté de Radès et à environ 400 m au Sud Ouest du même couloir du côté de La Goulette, comporte donc certaines différences géologiques entre la zone indiquée ci-dessus et le couloir Ouest.

Il manque le carottage du côté de La Goulette pour le substratum porteur de l'ouvrage mentionné au paragraphe (1). Il y a donc lieu de prêter une attention particulière aux études détaillées qui s'effectueront sur les ouvrages d'art, les terres-pleins, etc.

7.3 ARPENTAGE DETAILLE

L'arpentage détaillé, qui a été effectué pour établir les documents de base pour la conception générale, le planning d'exécution et l'estimation du coût de construction de l'ouvrage sur le couloir Ouest retenu, consiste en pratique en planimétrie, levé du profil en long et en travers et sondage du lac nord de Tunis.

Ces travaux d'arpentage ont été effectués par un entrepreneur tunisien de topographie "TOPOGENE", sous la direction de la Mission d'Etude, depuis fin-février 1990 jusqu'à fin-mars 1990.

L'étendue de cet arpentage a été définie sur le couloir Ouest, sur la base d'une carte topographique au 1/5,000 et des photos aériennes au 1/10,000.

1) Levé du profil en long

Il a été effectué sur une longueur totale de 4 km (3.2 km au sol et 0.8 km sur l'eau), à un intervalle de 100 m entre les pieux centraux.

à l'échelle verticale : 1/100
horizontale : 1/500

2) Levé du profil en travers

Il a été effectué sur le plan transversal de 100 m à gauche et à droite du couloir retenu, en principe à un intervalle de 100 m dans le sens longitudinal de ce couloir, en rajoutant toutefois certains points médians au niveau des configurations fortement irrégulières, du passage des bateaux et de l'intersection routière.

à l'échelle : 1/100

3) Planimétrie détaillée

Elle a été effectuée en principe dans une étendue transversale de 100 m à gauche et à droite de l'axe central du couloir retenu. On a mesuré, à l'égard des voies ferrées TGM et de la Voie Express en parallèle avec le chenal (passage de bateaux), les positions de leurs différentes installations telles que poteaux électriques, barrières, terre-plein central, etc.

à l'échelle : 1/500

4) Sondage du lac nord de Tunis

Il a été effectué du côté nord de la Voie Express (lac nord de Tunis), dans une zone de 900 m de long, 250 m de large, le long de la Voie Express, à un intervalle de 100 m (mailles de 100 m).

à l'échelle : 1/500

5) Repère de nivellement

On a utilisé trois repères, deux du côté de La Goulette et un du côté de Radès. Voir leur plan d'emplacement au 1/5,000.

6) Niveau de la mer

Selon les documents des autorités portuaires, la marée haute est de +0.075 m et la marée basse est de -0.200 m

7.4 CONCEPTION GENERALE DE VOIES ROUTIERES

Ce paragraphe récapitule la conception générale des voies routières sur le tracé optimal choisi au chapitre précédent.

7.4.1 Conditions de leur conception

(1) Les conditions fondamentales de leur conception ont été déterminées en référence des normes françaises de voiries et en concertation avec les autorités tunisiennes, compte tenu de: a) le fait qu'elles contribuent au développement de l'agglomération tunisoise, b) la demande de trafic aux horizons futurs, c) les voies existantes ainsi que les projets futurs (Voie Express et MC33) qui desserviront le présent projet, d) leur coût de construction, etc... Les conditions principales de leur conception sont les suivantes.

1) Vitesse de référence

Tronc commun (à 4 voies) : $V = 60$ km/hr

Bretelles : $V = 40$ km/hr

2) Structures géométriques

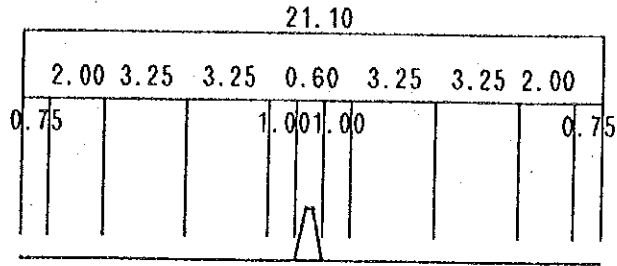
Les structures géométriques principales sont les suivantes:

		Tronc commun	Bretelle
Rayon minimum en plan (m)		250	50
Rayon minimum en profil en long (m)	saillants	3000	1200
	rentrants	1700	1100
Pente maxi en profil en long (%)		6	

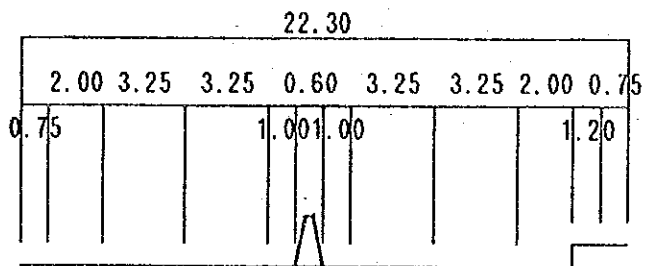
3) Répartition en profil en travers de chaussées

Celle-ci concerne le tronc (à 4 voies) sur terre-plein, celui (à 4 voies) sur l'ouvrage et les bretelles, qui sont montrés respectivement dans la Figure 7.4.1.1 (1), (2), (3) et (4).

Tronc commun sur terre-plein (sans trottoir)



Tronc commun sur terre-plein (avec trottoir)



Déviaton (Voie Express)

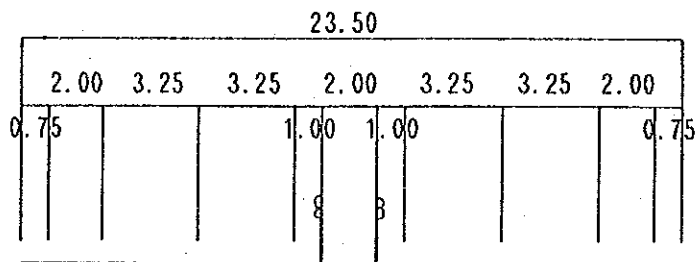
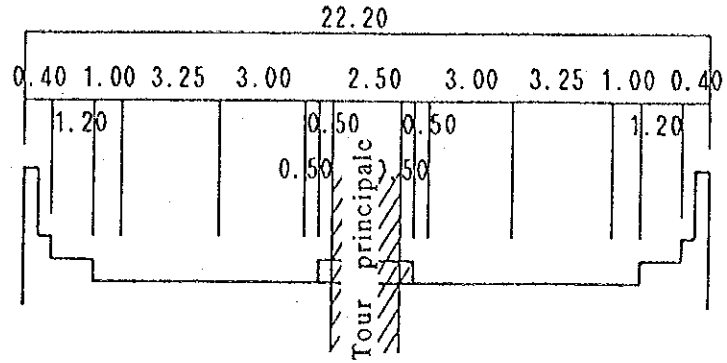


Figure-7.4.1.1 PROFIL EN TRAVERS TYPE (1)

Tronc commun sur ouvrage principal (avec trottoir)



Tronc commun sur viaduc d'accès (avec trottoir)

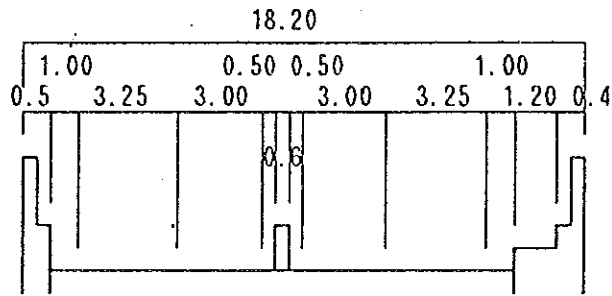
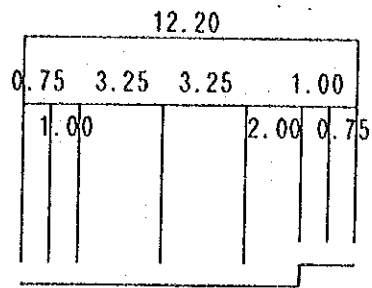
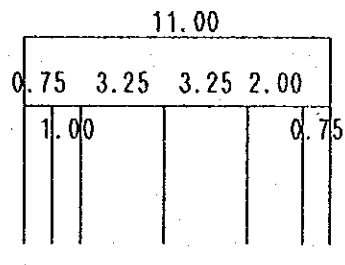


Figure-7.4.1.1 PROFIL EN TRAVERS TYPE (2)

Bretelle à deux voies sur terre-plein (avec trottoir)



Bretelle à deux voies sur terre-plein (sans trottoir)



Bretelle à une voie sur terre-plein (sans trottoir)

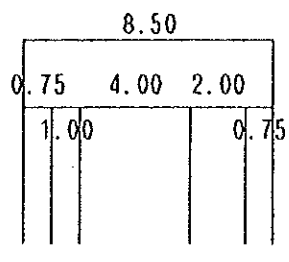
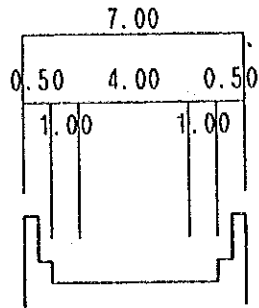
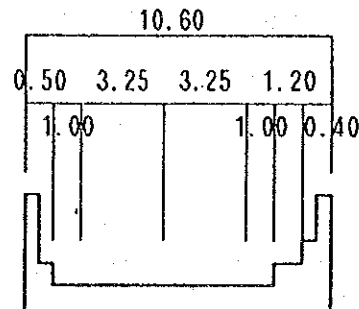


Figure-7.4.1.1 PROFIL EN TRAVERS TYPE (3)

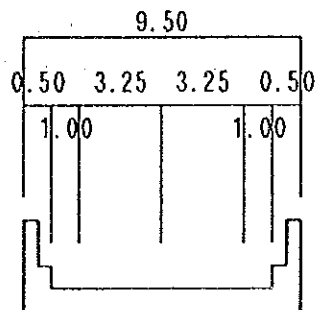
Bretelle à une voie sur ouvrage



Bretelle à deux voies sur ouvrage (avec trottoir)



Bretelle à deux voies sur ouvrage



Bretelle à trois voies sur ouvrage

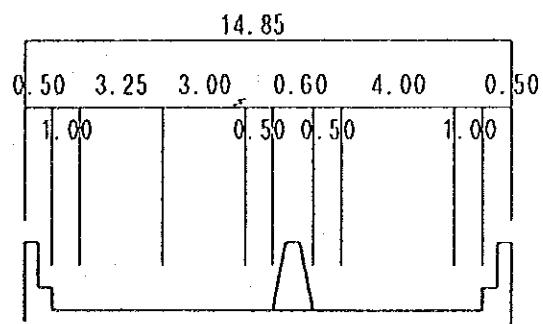
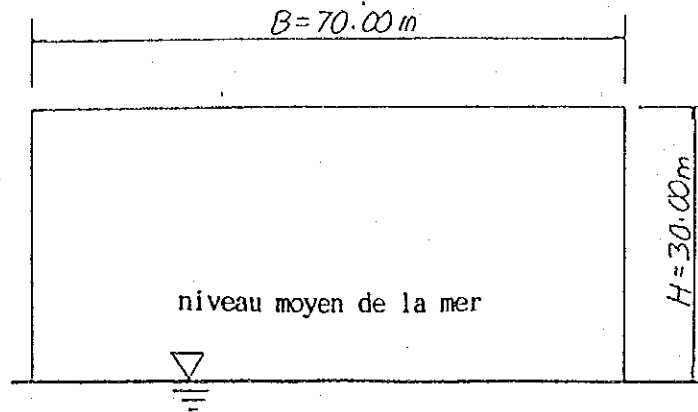


Figure-7.4.1.1 PROFIL EN TRAVERS TYPE (4)

4) au niveau du passage de bateaux d'un nouveau port de Radès.

- Le gabarit sur le passage de bateaux est de $H = 30\text{m}$ (largeur de 70m) au-dessus de niveau moyen de la mer.



(2) Choix du nombre de voies de circulation

Le nombre de voies est obtenu normalement à partir d'un trafic de référence prévoyant une structure routière type et des différentes conditions de trafic.

$$\text{Nombre de voies (par sens)} = \frac{\text{Trafic prévisionnel (véhicules/jour)} \times \text{Rapport de trafic entre les deux sens (60\%)}}{\text{Trafic de référence (véhicules/jour)}}$$

- Trafic prévisionnel (en 2016)

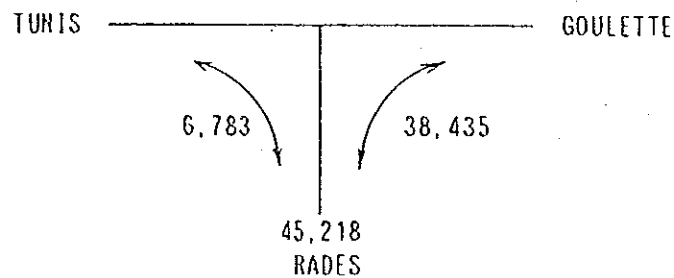


Tableau-7.4.1.1. CHOIX DU NOMBRE DE VOIES

	Tronc Commun à 4 voies	GOULETTE ↓↑ RADES	TUNIS ↓↑ RADES
Trafic prévisionnel (en 2016)	45,218	38,435	6,783
Rapport de trafic entre les deux sens	60%		
Trafic de référence (2ème classe de la 2ème catégorie)	17,000		
Nombre de voies calculé	1.60	1.36	0.24
Nombre de voies adopté	2	2	1

7.4.2 Elaboration du tracé en plan

La voie de ce projet franchit la Voie Express, les voies ferrées T.G.M et le chenal du côté nord du nouveau port de Radès. Elle se raccorde, du côté de La Goulette, à la Voie Express par l'intermédiaire d'un échangeur. Du côté de Radès elle commence parallèlement à une voie à la périphérie ouest du nouveau port de Radès et en évitant les pylônes des lignes électriques, immeubles d'habitation, écoles, etc ..., elle se raccorde enfin à MC33. Les points de contrôle pris en compte pour élaborer son tracé en plan sont les suivants:

(1) Points de contrôle (voir la Figure-7.4.2.1)

- ① Voie de traversée du lac de Tunis (Voie Express)
- ② Voie à la périphérie ouest du nouveau port de Radès
- ③ Deux pylônes de lignes électriques
- ④ Ecole et immeubles d'habitation
- ⑤ MC33

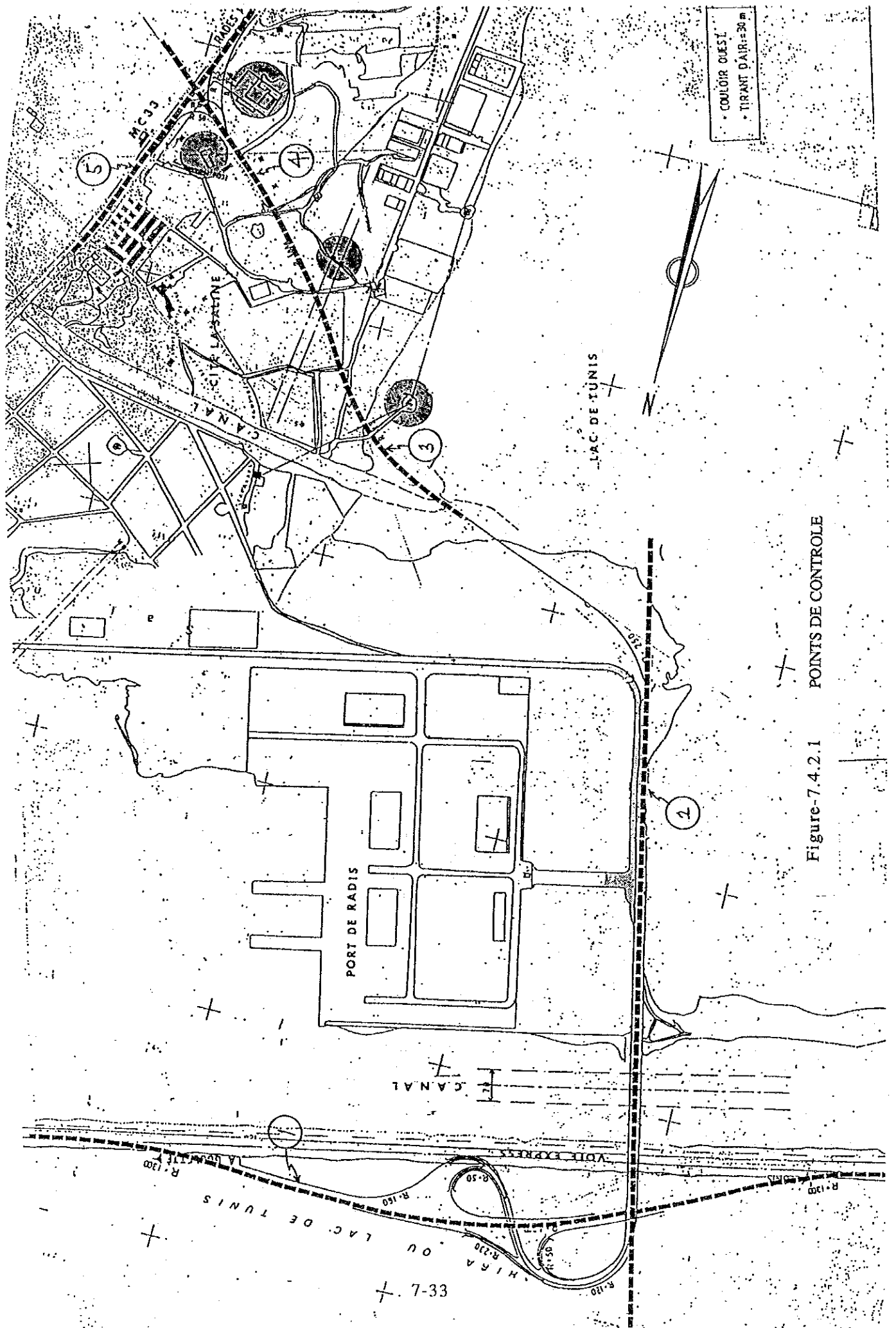


Figure-7.4.2.1 POINTS DE CONTROLE

7-33

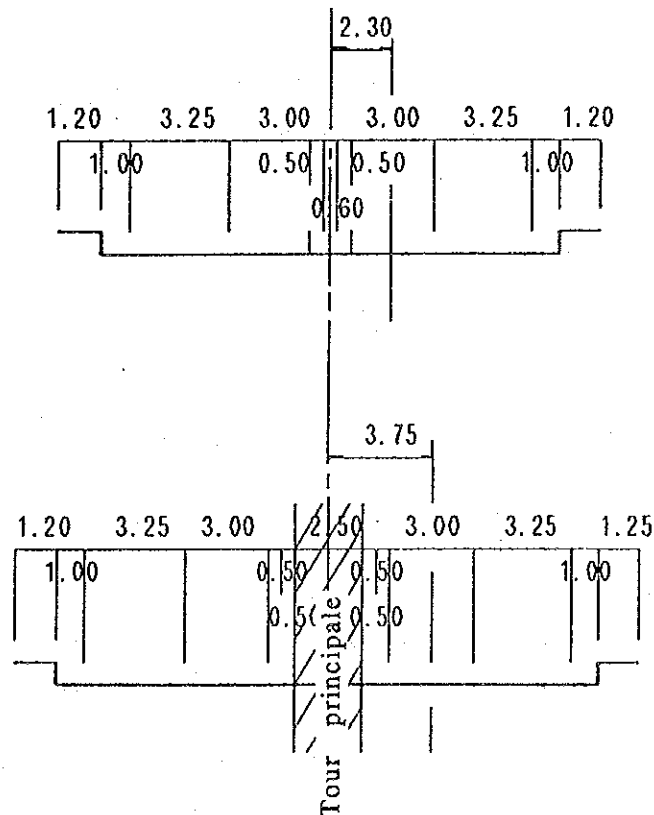
(2) Divers

1) Mise en place d'un tronçon en courbe clothoïde

- Un tronçon clothoïde est mis en place pour passer d'une ligne droite à une courbe ou d'une courbe de grand rayon à une de petit rayon afin d'assurer l'écoulement de trafic sans difficulté.

2) Décalage axial de voies

- Etant donné que pour ce projet, la tour sur l'ouvrage principal de traversée du chenal se trouve sur le terre-plein central de l'ouvrage, ses voies sont décalées de leur axe à l'entrée et à la sortie de cet ouvrage principal. En général, le décalage axial est réalisé de façon appropriée en fonction de la vitesse de référence et du tracé en plan de la voie routière, de telle sorte que le taux de décalage axial se place, dans ce cas, entre 1/40 et 1/30 à une vitesse de référence $V = 60$ km/hr.



7.4.3 Elaboration du profil en long

(1) Profil en long

La voie de ce projet franchit à des niveaux différents la Voie Express, les voies ferrées et le passage de bateaux du côté nord du nouveau port de Radès et elle a par ailleurs des intersections à niveau avec d'autres contraintes.

(2) Concept du profil en long

1) au niveau des terrains naturels

Les terrains de ce projet sont meubles, de telle sorte que les mesures contre ces terrains meubles imposeront beaucoup de frais lorsque le profil en long sera élevé. On prévoit donc un profil en long aussi bas que possible.

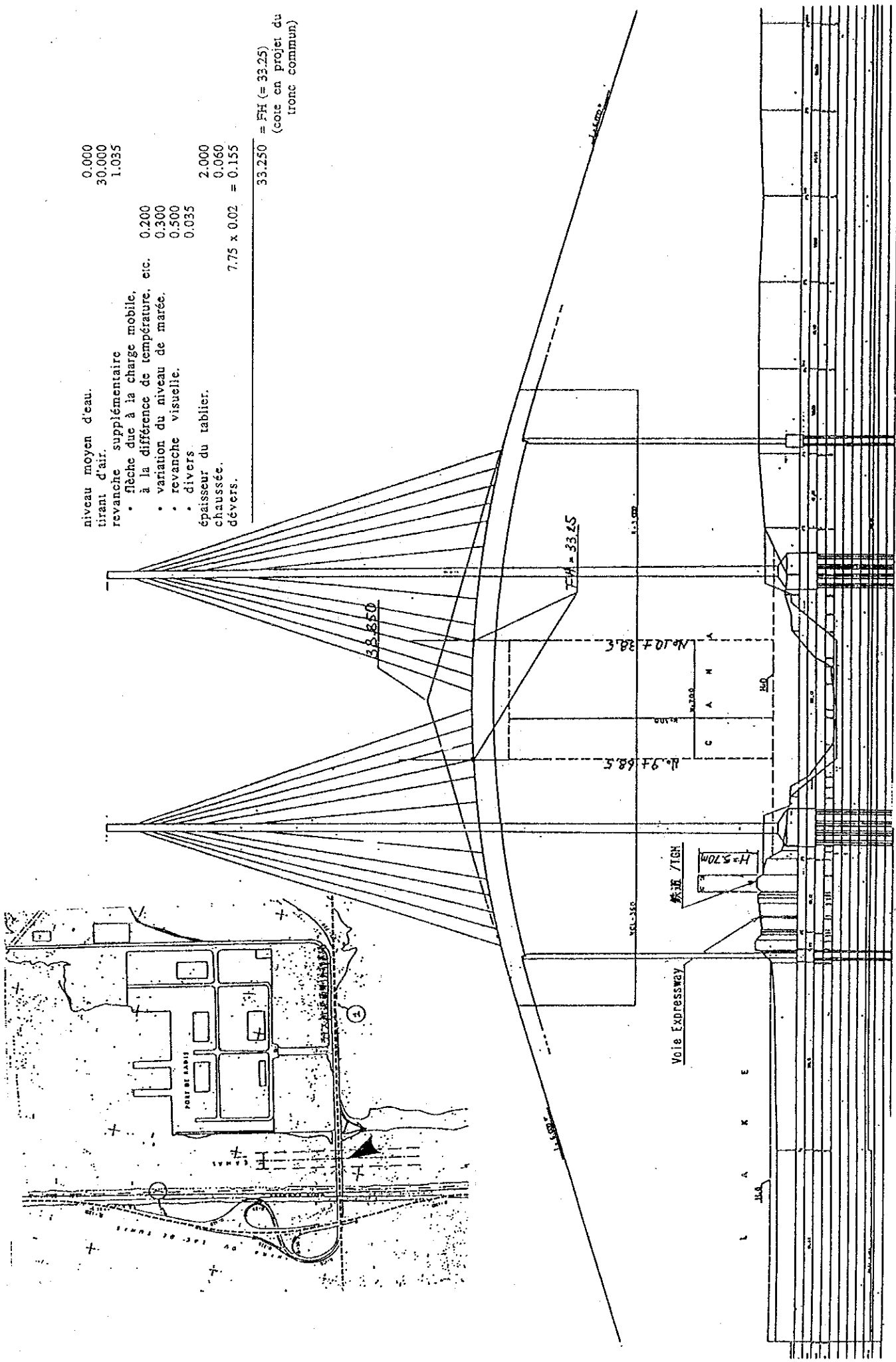
2) au niveau des franchissements (intersections à niveaux différents)

Il convient d'assurer les différents gabarits requis et de faire un profil en long aussi économique que possible.

(3) Points de contrôle

Pour l'élaboration du profil en long, les contraintes à contrôler sont les suivantes:

- ① Cote d'une déviation de la Voie Express.
- ② Intersection à niveaux différents de la voie Express et des bretelles.
- ③ Franchissement du passage des bateaux au nord du nouveau port de Radès, des voies ferrées et de la Voie Express.
- ④ Franchissement du canal d'eau pour l'épuration du lac sud.



- niveau moyen d'eau. 0.000
 - tirant d'air. 30.000
 - révanche supplémentaire 1.035
 - flèche due à la charge mobile, à la différence de température, etc. 0.200
 - variation du niveau de marée. 0.300
 - révanche visuelle. 0.500
 - divers 0.035
 - épaisseur du tablier. 2.000
 - chaussée. 0.060
 - dévers. 7.75 x 0.02 = 0.155
- 33.250 = FH (= 33.25)
(cote en projet du tronç commun)

Figure-7.4.3.1 PROFIL EN LONG DE L'OUVRAGE D'ART PRINCIPAL

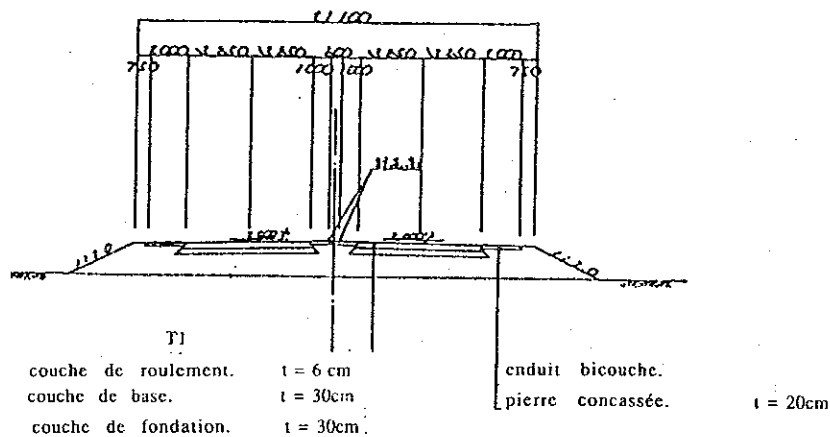
- ⑤ Détermination de la cote en projet d'une (des) voie(s) routière(s) sur terrain naturel,
- ⑥ Franchissement d'un (des) canal(aux) existant(s).

7.4.4 Elaboration du profil en travers

Le profil en travers du terre-plein est décrit ci-dessous.

(1) Profil en travers type

Le terre-plein sera fait en matériaux de remblaiement amenés de Jebel Ressas et Korbous, et la couche de fondation aura une épaisseur de 30 cm pour la chaussée (GRH) et de 20 cm pour la bande d'arrêt (0/40). D'autre part la couche de roulement consiste en pavement en asphalte d'épaisseur de 6 cm pour la chaussée et en bicouche bitumineuse pour la bande d'arrêt. La défense à la mer sera réalisée en terre végétale.



(2) Structure spéciale

1) Défense à la mer sur les berges du lac

- La défense à la mer sur les berges du lac sera mise en oeuvre par enrochement pour éviter aux matériaux de remblaiement d'être érodés par le mouvement de la marée du lac de Tunis.

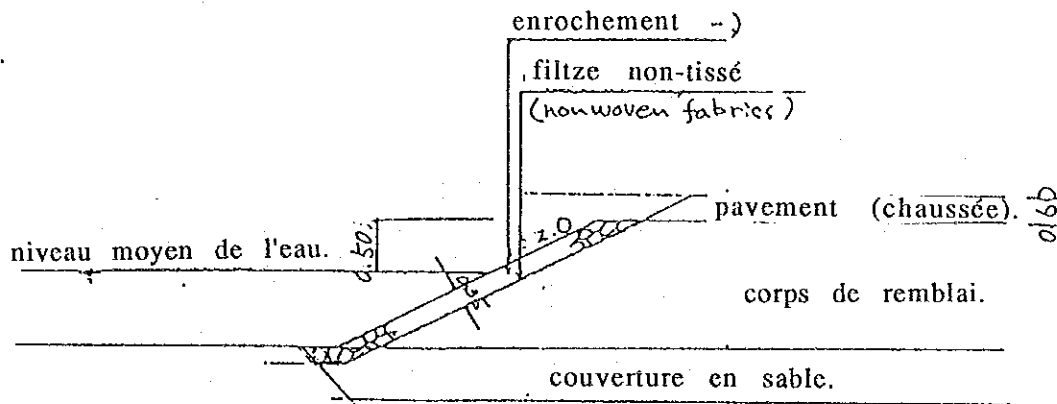


Figure-7.4.4.1 DEFENSE A LA MER SUR LES BERGES DU LAC

2) Défense à la mer sur les rives du chenal

- La défense à la mer sur les rives du chenal sera mise en oeuvre par enrochement pour éviter aux matériaux de remblaiement d'être érodés par le mouvement de la marée.

3) Mesures contre les terrains meubles

- Les mesures contre les terrains meubles ont été étudiées en détail dans le paragraphe 7.2. C'est ainsi qu'on ne présente ici que les résultats.

a) La hauteur de remblai sera limitée à 4.0 m.

Radès: HE = 4.20 m. La Goulette: HE = 4.70 m.

b) La hauteur de remblai nécessaire pour prendre les mesures contre terrains meubles sera de 2.0 m

c) Les mesures à prendre sont montrées ci-dessous.

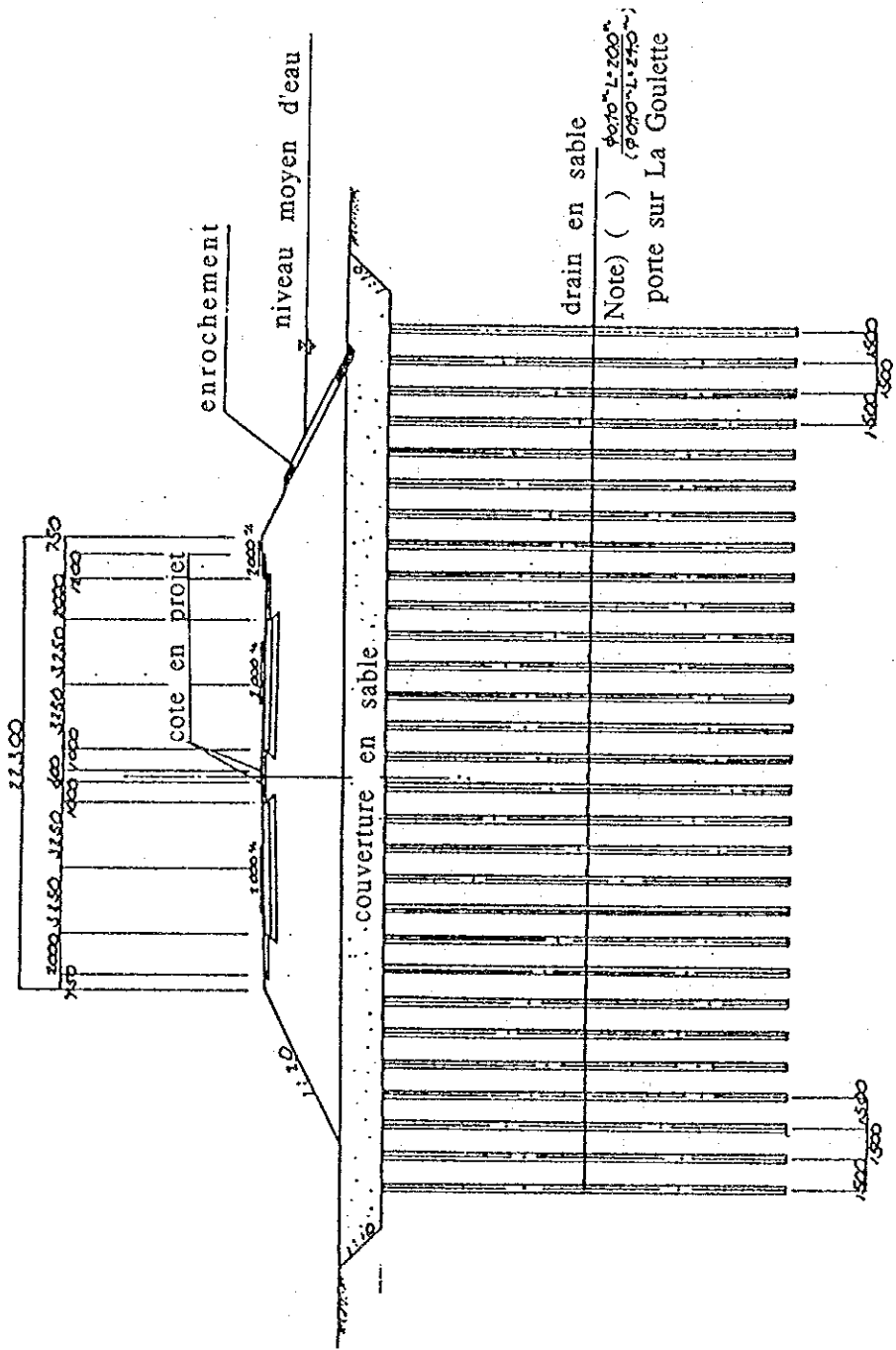


Figure-7.4.4.2 MESURES CONTRE TERRAINS MEUBLES

Zone	Radès	Goulette
mesures		
intervalle des drains	1.50 m	1.50 m
diamètre des drains.	0.40 m	0.40 m
profondeur des drains.	20.0 m	24.0 m
couverture en sable.	1.0 m	1.0 m

7.4.5 Elaboration du trottoir

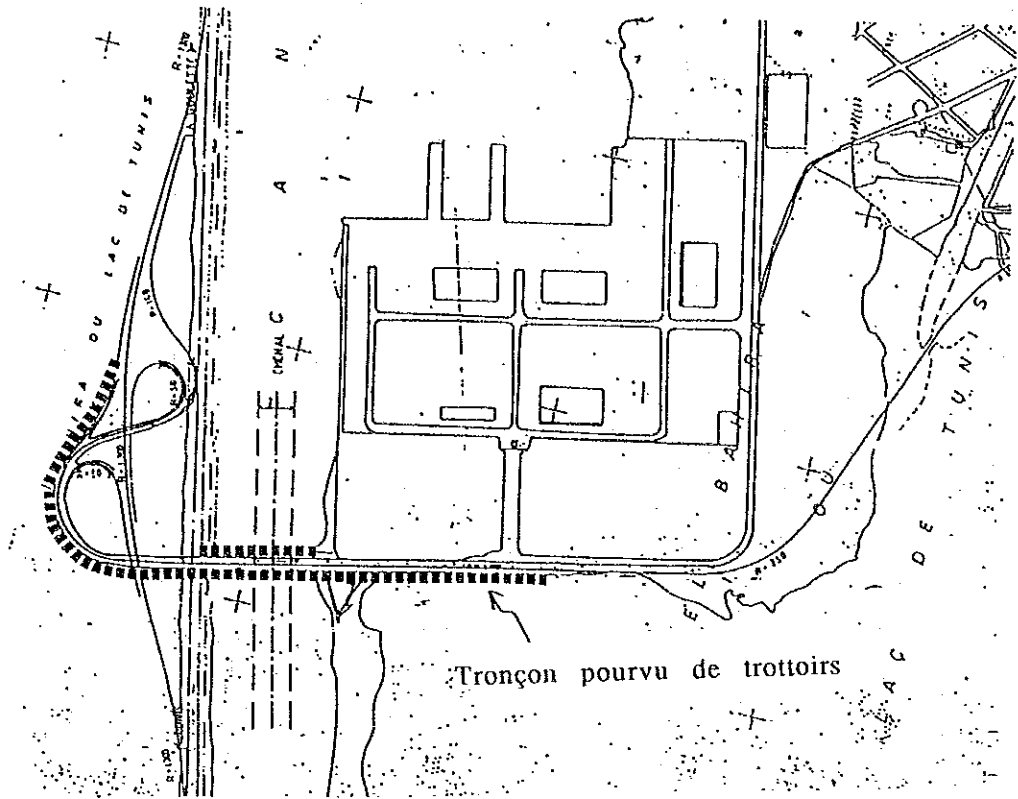
Les berges du lac de Tunis sont actuellement en cours d'aménagement par une société semi-étatique, ce qui provoquera une augmentation du nombre de piétons à l'avenir. Nous avons donc envisagé de mettre un trottoir sur le tronç commun de ce projet, après concertation avec les autorités du Ministère de l'Équipement et de l'Habitat. Bien que le trottoir ait été prévu d'un seul côté (du côté de Tunis) de l'ouvrage d'art, nous avons décidé de l'installer des deux côtés: en effet, il est difficile, vu la structure de l'ouvrage, d'installer un trottoir postérieurement à son achèvement, et l'installation d'un trottoir d'un seul côté entraînerait un déséquilibre structurel.

(1) Largeur du trottoir

La largeur du trottoir est généralement définie par la largeur occupée par un piéton soit 0.75 m, et permettant aux piétons de se croiser, alors que dans le cas de ce projet, la largeur du trottoir est mise à $B = 1.20$ m, compte tenu d'un aspect économique de cet ouvrage d'art.

(2) Tronçon pourvu de trottoirs

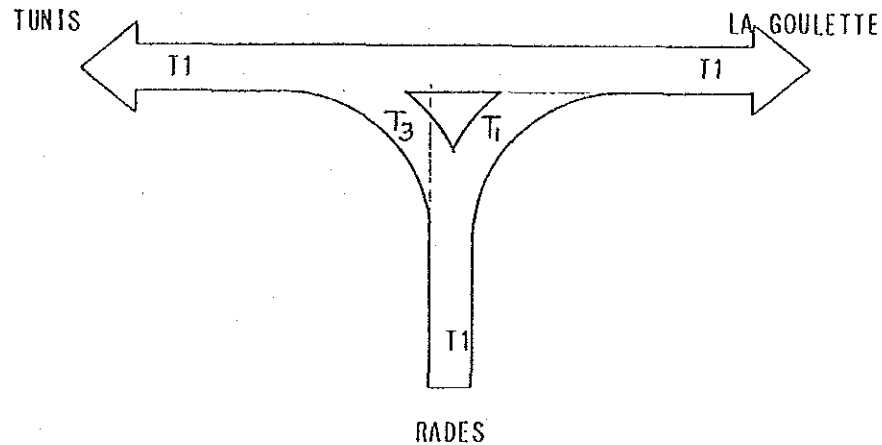
Les trottoirs sont aménagés depuis l'extrémité d'une bretelle B jusqu'à proximité de No.16 (station), soit un point dont la cote s'approche de celle des terrains naturels, compte tenu du profil en long.



7.4.6 Pavement

L'élaboration du pavement a été effectuée suivant les normes AASHTO.

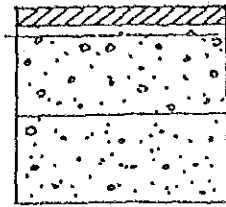
La constitution du pavement (chaussée) par tronçon est figurée ci-dessous.



7.4.7 Elaboration des échangeurs

- Une étude comparative a été effectuée sur les deux variantes d'échangeur, présentées dans la Figure-7.4.7.1, qui assureront une liaison entre la Voie Express et la voie d'accès à l'ouvrage d'art.
- Il résulte de cette étude que la variante A, soit le système d'insertion/déboitement à droite sur bretelle est adopté, puisque la variante B, soit le système d'insertion/déboitement à gauche sur bretelle peut comporter de gros risques dus à l'insertion et au déboitement sur chaque sens de circulation à grande vitesse.

1) Type T₁

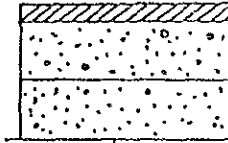


couche de roulement 6cm

couche de base 30cm

couche de fondation 30cm

2) Type T₃



couche de roulement 6cm

couche de base 20cm

couche de fondation 20cm

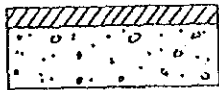
3) Bande d'arrêt d'urgence



couche de roulement
(enduit bicouche)

couche de base 20cm
(Pierre concassée)

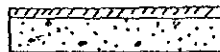
4) Ouvrage d'art



couche de roulement 6cm

dalle du tablier

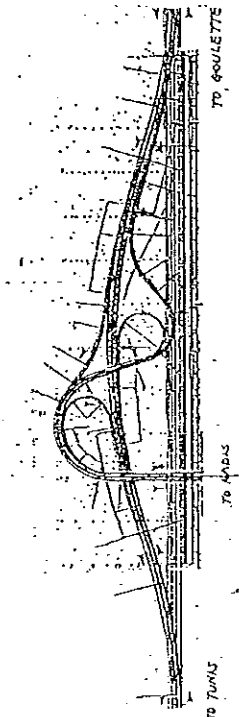
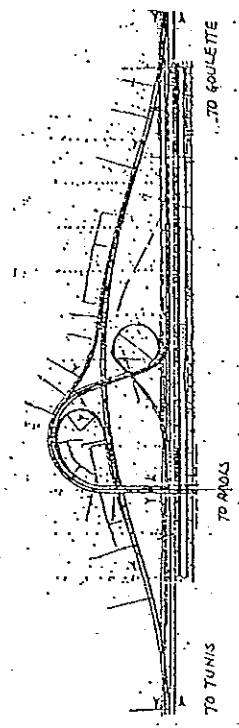
5) Trottoir



couche de roulement 3 cm

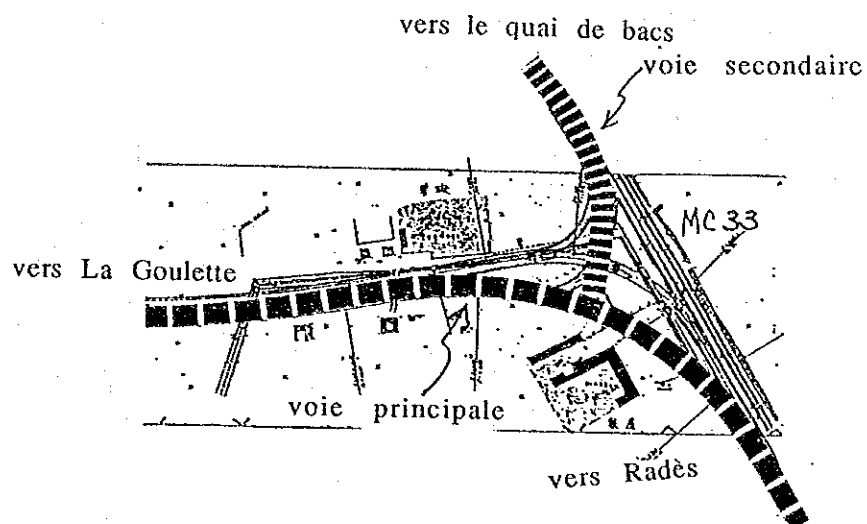
couche de fondation 10cm
(Pierre concassée)

Tableau-7.4.7.1 ETUDE COMPARATIVE DES TYPES D'ECHANGEUR

	Variante A	Variante B
	Variante consistant à faire une déviation sur les deux sens de la Voie Express.	Variante consistant à ne faire une déviation que sur le sens La Goulette vers Tunis de la Voie Express
Esquisse de l'échangeur		
Description	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les voies (2 x 2 voies) de la Voie Express existante sont déplacées vers le lac de Tunis • Le système d'insertion/déboîtement sur bretelle consiste en une liaison extérieure assurée par la voie droite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seules les voies de La Goulette vers Tunis sont déplacées vers le lac de Tunis, alors que celles en sens contraire restent inchangées en ce qui concerne la Voie Express existante. • Le système d'insertion/déboîtement sur bretelles consiste en une liaison avec la bretelle médiane assurée par la voie gauche.
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> • La Voie Express existante est inutilisable sur une longueur de 1,300 m environ. • La voie existante étant déplacée totalement, ces terrains délaissés seront facilement mis à profit. • Ce système de liaison avec bretelles est couramment adopté. 	<ul style="list-style-type: none"> • La Voie Express existante est mise en valeur mieux que dans la variante A. • Les terrains délaissés entre la voie existante et sa déviation sont difficilement mis à profit • Des risques se produisent au niveau des bretelles d'insertion/déboîtement sur une voie de circulation à grande vitesse.
Evaluation	La variante A est adoptée en raison de la sécurité de circulation, aux dépens de l'inconvénient économique de ne pas pouvoir utiliser en partie la voie existante.	

7.4.8 Elaboration de l'intersection à niveau

La voie de ce projet aura une intersection à niveau avec la MC33. Du fait que le trafic sur la voie de ce projet vers Radès est important alors que le trafic vers le quai des bacs est secondaire, on considère la voie à destination de Radès comme la voie principale.



7.5 CONCEPTION GENERALE DES PONTS

7.5.1 Bases de la conception

(1) Caractéristiques principales des ponts objet

Tracé objet : Ouest

Type de pont : L'ouvrage principal est un pont à haubans et le viaduc d'accès est un pont à poutres.

Tirant d'air : Pour l'ouvrage principal, on assure un tirant d'air de 30m avec une largeur de passage navigable de 70m. Pour le viaduc d'accès, on respecte les gabarits sur la voie ferrée et sur la Voie Express.

Travées : La travée centrale de l'ouvrage principal a une portée de 150m et ses travées latérales ainsi que ceux du viaduc d'accès ont des portées économiques dont le choix tient compte des gabarits des différents ouvrages franchis par ce projet.

Matériaux : On fait une comparaison économique entre le pont en béton et celui en acier pour adopter le meilleur de ces deux ponts.

(2) Critères de conception

Les critères de conception sont en principe basés sur les normes françaises. Les normes françaises réservées aux ponts ne sont que celles des charges, soit Titre II-Programmes de charges et épreuves des ponts-routes et celles des ponts en acier, soit Fascicule No.61. titre V Conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier. Les autres critères se conforment aux différentes normes d'ouvrages.

Pour ce qui concerne la méthode de conception aséismique, il existe une norme de constructions, soit "Règles parasismiques 1969 révisées 1982 et annexes." Mais il existe une différence remarquable entre la construction d'un ouvrage d'art et celle d'un

bâtiment ordinaire en matière de structure et de rigidité. En outre, du fait que les terrains sont meubles et que les substratums porteurs se trouvent à 100m de profondeur dans le cas de ce projet, il s'avère donc difficile d'appliquer la norme indiquée ci-dessus à l'ouvrage d'art de ce projet. C'est la raison pour laquelle on adopte pour la méthode de conception aséismique plutôt les normes japonaises en la matière qui définissent explicitement plusieurs conditions concernées (voir annexe 7.5.1.1).

7.5.2 Conditions de conception

(1) Charges

1) Charges au repos et charge mobile

Celles-ci se conforment aux critères de charges pour ponts (Fascicule 61, Titre II).

2) Charges du vent

Celle-ci est mise à 2000 N/m² d'après les mêmes critères susdits. Cette charge correspond à une vitesse du vent pour le calcul de 45 m/s. D'autre part, d'après l'observation météorologique locale entre 1951 et 1987, la valeur maximale des vitesses moyennes du vent pendant une durée de 10 minutes est de 17 m/s et même si celle-ci est réajustée par la hauteur et la longueur de l'ouvrage d'art retenu, la vitesse du vent pour le calcul est inférieure à 30m. Donc la valeur indiquée ci-dessus pourra être considérée comme un peu trop grande. On décide pourtant de la conserver par mesure de sécurité puisque les valeurs observées pour la vitesse du vent semblent quelquefois peu dignes de confiance.

3) Température ambiante

Selon les documents recueillis (entre 1901 et 1987) par l'office nationale de la météorologie en Tunisie, dans la région tunisoise les températures minimale et maximale annuelle sont respectivement de -2°C et 47°C et la variation journalière est de l'ordre de 35°C. C'est ainsi que la variation de température est

estimée entre $\pm 20^{\circ}\text{C}$ pour la conception et entre $\pm 25^{\circ}\text{C}$ pour la définition de la quantité de déplacement de l'appareil d'appui.

4) Charge sismique

a) Prémisse pour le calcul d'une sismicité horizontale

i) Intensité du séisme

Selon l'observation des séismes entre 1922 et 1989 à la station météorologique de Tunis, l'intensité des séismes ressentis dans toute la région tunisoise est entre 5 et 6 en magnitude. Etant donné qu'il n'existe pas beaucoup de données sur les séismes produits dans le passé, on retient, pour ce projet, une valeur en magnitude plus grande, soit 6,5 en considérant la sécurité structurelle.

ii) Distance entre l'emplacement de l'ouvrage d'art et l'épicentre

Les séismes se sont produits jusqu'à présent dans une étendue de 50 km à partir de Tunis, donc loin du site de ce projet. Néanmoins par mesure de sécurité, on suppose, dans ce cas, un séisme se produisant juste en bas du site, sa distance à l'épicentre étant nulle.

iii) Catégorie de terrains empruntées par l'ouvrage

Il ressort des essais de sondage que les sols souterrains pour ce projet consistent, jusqu'à une profondeur de 35 m environ, en alluvions constitués par une alternance d'argiles douces végétales, sables silteux et sables, et au-delà de cette profondeur ils consistent en terrains très argileux renfermant des débris végétaux et des coquilles, dont l'épaisseur est de 66,3 m, formant ainsi le diluvium. D'après les critères de la conception aséismique du Japon, avec une épaisseur d'alluvium de plus de 25 m, ces sols correspondent à ceux de la 3^{ème} catégorie, soit la catégorie des sols les plus mauvais.

iv) Constante d'amortissement

La constante d'amortissement dépend des types de l'ouvrage d'art et de leurs membres constituants. Pour la structure en béton, cette constante varie entre 0,02 et 0,10 d'après les mesures effectuées dans le passé. Dans le cas de ce projet, on présente donc 0.05 comme valeur normale, et 0.02 et 0.10 comme valeur minimale et maximale respectivement.

b) Courbe de la séismicité horizontale de calcul

Sur la base des prémisses susdites, on a calculé la séismicité indiquée ci-dessus par période spécifique, conformément à la philosophie de la conception aséismique du Japon. Ces résultats sont montrés dans la Figure 7.5.2.1. Pour ce projet, une courbe à constante minimale de 0.02 est appliquée au pont à haubans et celle à constante normale de 0.05 appliquée au pont à poutres du point de vue de la sécurité structurelle. Néanmoins en vue d'assurer une conception aséismique effective, la valeur minimale est mise dans ce cas à 0,1.

5) Combinaison de charges et contrainte admissible

On adopte les critères français en temps normal et ceux de la conception aséismique du Japon et leurs attachés en temps anormal (en temps du séisme).

Les critères adoptés en temps normal sont les deux suivants;

- Règles techniques de conception et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites.
- Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états-limites.

Fig. 7.5.2.1 PERIODE SPECIFIQUE ET SEISMICITE HORIZONTALE

