

M0016/94B

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE MINIER

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة —
Ecole Nationale Polytechnique

MEMOIRE DE MAGISTER

PRESENTE PAR SAADA Valentina

INGENIEUR D'ETAT DIPLOME DE L'UNIVERSITE DE LENINGRAD

**PROJET D'IMPLANTATION PHYSIQUE
D'OUVRAGES METROPOLITAINS
CAS DU METROPOLITAIN D'ALGER (LOT 5)**

SOUTENU LE 2 JUILLET 1994 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

A. BALI
B. MOHAMED AGUID
S. GUERRAK
S. CHABOU
A. AIT-YABIATENE

PROFESSEUR (E.N.P)
MAITRE DE CONFERENCE (E.N.P)
Dr ES-SCIENCES (M.M)
Dr ES-Sc, Maitre-Assistant (E.N.P)
Dr Es-Sc Tech, Chargé de Cours (E.N.P)

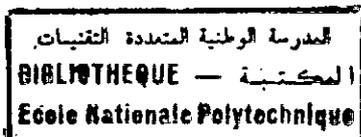
Président
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Examinateur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE MINIER



MEMOIRE DE MAGISTER

PRESENTE PAR SAADA Valentina

INGENIEUR D'ETAT DIPLOME DE L'UNIVERSITE DE LENINGRAD

**PROJET D'IMPLANTATION PHYSIQUE
D'OUVRAGES METROPOLITAINS
CAS DU METROPOLITAIN D'ALGER (LOT 5)**

SOUTENU LE 2 JUILLET 1994 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

A.BALI
B. MOHAMED AGUID
S.GUERRAK
S.CHABOU
A.AIT-YAHATENE

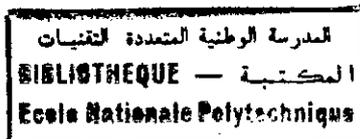
PROFESSEUR (E.N.P)
MAITRE DE CONFERENCE (E.N.P)
Dr ES-SCIENCES (M.M)
Dr ES-Sc, Maitre-Assistant (E.N.P)
Dr Es-Sc Tech, Chargé de Cours (E.N.P)

Président
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Examinateur

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

" JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A LA MEMOIRE DE MON PERE
DISPARU, A MA MERE ET A MA FAMILLE "

PREAMBULE



Au terme de ce mémoire, je voudrais remercier tous ceux qui, directement ou indirectement, ont contribué à l'élaboration de cette étude.

MR. MOHAMED AGUID BACHAR, Maître de conférence à l'E.N.P., a accepté de suivre et d'orienter ce travail. Par ses recommandations et ses encouragements, j'ai pu réaliser à terme ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de ma gratitude.

Je remercie les membres du conseil scientifique du département génie minier, qui, par leur compréhension, ont accepté que je puisse m'inscrire en post-graduation.

Je remercie MR. A. BALI, Professeur à l'E.N.P., pour sa participation en tant que Président de jury.

MR. S. GUERRAK, Directeur du département mines au ministère de l'énergie, a accepté d'être membre du jury en tant qu'examineur, qu'il en soit remercié.

Mes remerciements s'adresseront également à Mme. S. CHABOU, Maître-assistante, et MR. A. AIT-YAHIA TENE, chef de département, pour les conseils qu'ils m'ont prodigué, et pour leur participation en tant qu'examineurs.

MR. ZIAD, Directeur des réalisations de l'entreprise, COSIDER, a été invité officiellement à participer à la soutenance.

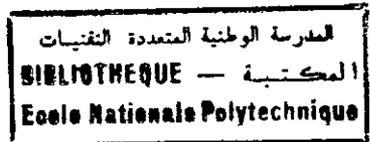
Je remercie particulièrement MR. L. BEKROUH, Directeur de la station, ainsi que toute l'équipe de topographes, et, particulièrement MR. S. KARBOWSKI, MR. S. BOUGOUBA et MR. M. TOUMI, qui m'ont initié au travail de chantier. Leurs recommandations et leur aide m'ont permis de mener à bien mon travail.

Je tenais également à remercier MR. K. ZAIDI, MR. A. HATBI et MR. M. LALEG, de l'Entreprise du Métropolitain d'Alger (E.M.A), pour l'aide qu'ils m'ont prodigué tout au long de cette étude.

Je voudrais remercier MR. H. BERKANI du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (L.N.H.C) pour sa collaboration.

SOMMAIRE	PAGE
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: CONDITIONS GEOLOGIQUES ET MINIERES	5
I.1. Généralités	6
I.2. La géologie de la région d'Alger	6
I.3. La géologie des formations lelong du lot 5	11
I.4. Les données hydrogéologiques du site	11
I.5. Les conditions géotechniques.	13
CHAPITRE II: CONDITIONS TECHNIQUES ET MINIERES	23
II.1. Caractéristiques techniques du métropolitain (dimensionnement et type de rails)	24
II.2. La galerie de reconnaissance	29
II.3. Méthodes du creusement des galeries	29
II.4. Influence des travaux souterrains sur l'environnement urbain	44
CHAPITRE III: ANALYSE DE LA BASE GEOMETRIQUE ET TECHNIQUE D'IMPLANTATION	46
III.1. Généralités	47
III.2. Méthodes d'établissement de la base d'appui	47
III.3. Instruments utilisés.	93

CHAPITRE IV : IMPLANTATION DES OUVRAGES SOUTERRAINS		98
IV.1. Analyse du réseau d'appui en surface et en souterrain		99
IV.2. Méthodes de raccordement		105
IV.3. Méthodes d'implantation		114
IV.4. Instruments utilisés en souterrain		118
IV.5. Contrôle de la base d'appui souterrain		120
IV.6. Implantation de l'axe du tunnel		122
IV.7. Implantation de la station		143

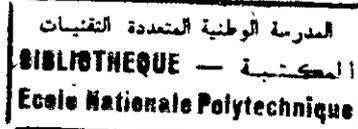


CONCLUSION GENERALE		146
----------------------------	--	-----

BIBLIOGRAPHIE		148
----------------------	--	-----

ANNEXE		AI-XIX
		A'I-IV
		A" I

/ NOTATIONS ET SYMBOLES /



A/ Poids volumiques :

γ_h - poids volumique (correspond à la masse volumique apparente)

γ_d - poids volumique sec (correspond à la masse volumique sèche)

γ_w - poids volumique de l'eau

γ_s - poids volumique de la matière constituée de grains solides

δ_d - densité apparente sèche:

$$\delta_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} ;$$

δ_h - densité apparente humide:

$$\delta_h = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} ;$$

S_r - degré de saturation (rapport du volume occupé par l'eau au volume total des vides)

e - indice des vides (rapport du volume des vides au volume des grains solides)

n - porosité (rapport du volume des vides au volume total du sol)

W - teneur en eau:

$$W = \frac{e \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_s} ;$$

B/ Consistance:

W_L - limite de liquidité (teneur en eau, exprimée en %, correspondant à une fermeture en 25 chocs);

W_p - limite de plasticité (teneur en eau, exprimée en %, du fuseau se brisant en petits tronçons de 1 à 2 cm. de long, au moment où son diamètre atteint 3 mm.);

I_p - indice de plasticité:

$$I_p = W_L - W_p.$$

a - demi grand axe;

b - demi petit axe;

α - aplatissement;

e^2 - excentricité;

r_0 - rayon du parallèle origine;

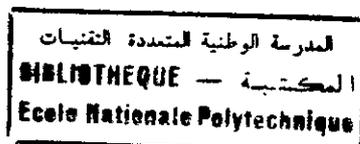
r_i - rayon du parallèle d'un point "i";

R_0 - rayon du cercle de base du cône;

R_i - rayon du cercle d'un point "i";

K - coefficient échelle réduite;

Σ_β - erreur moyenne quadratique de l'angle mesuré, " β ".



INTRODUCTION GENERALE:

Un des problèmes principaux du développement des villes contemporaines concerne la création d'un réseau efficace de transport, assurant le déplacement de masses importantes de passagers entre les zones industrielles, les régions d'habitation et les centres culturels.

La fin du XX^e siècle a été marquée par un développement très important des ouvrages souterrains du transport malgré le coût élevé de leur réalisation et la complexité de leur exploitation.

Le métropolitain est caractérisé comme étant un type de transport à voie ferrée hors circulation urbaine, formé d'ensembles de tronçons munis de dispositifs d'arrêt automatique des trains, destinés au mouvement des passagers. Il doit répondre à certaines exigences et objectifs spécifiques:

- de confortabilité, afin de satisfaire pleinement les besoins des passagers, en mettant à leur disposition un moyen de transport rapide, régulier, sécurisant, qui présente des conditions d'hygiène exigées par la santé publique.
- d'exploitation commode, sécurisante, aisée et efficace du métropolitain qui, tout en minimisant les dépenses liées à la main-d'oeuvre, chargée de la réalisation d'ouvrages durables et fiables, ainsi que de la maintenance des différents ateliers y afférents, y compris dans la conduite des trains, est assurée par des dispositifs technologiques automatisés, dans la conduite automatisée des trains et au niveau de la maintenance des différents ateliers.
- de réalisation, en assurant un niveau de qualité élevée, lié à la mécanisation des travaux et à l'impératif économique.
- en assurant des conditions normales de vie à la ville, durant la réalisation et l'exploitation du métropolitain; on recherchera donc un schéma rationnel de percement des lignes et des méthodes de réalisation des travaux, compte-tenu des exigences relatives à la protection de l'environnement.

- de conditions technico-économiques, par une utilisation rationnelle de solutions progressives en technologie et en construction, afin d'assurer un niveau supérieur de réalisation et d'exploitation, tout en cherchant à minimiser les dépenses matérielles et financières.

L'intérêt de ce choix concerne aussi bien les pays industrialisés que ceux en voie de développement. L'Algérie s'est lancée dans la réalisation de ce type de réseau de transport. A cet effet quelques tunnels routiers et ferroviaires ont vu le jour. Cependant le plus important concerne le projet du métropolitain d'Alger. Les raisons qui ont prévalu pour ce projet sont les suivantes:

- l'accroissement démographique de la population d'Alger est très important;
- le développement industriel dans la périphérie algéroise est manifeste et croissant;
- l'activité économique y est intense et localisée;
- la fluidité du transport urbain routier est saturée.

Ces raisons ont eu pour effet d'augmenter considérablement les besoins en matière de transport. Les moyens classiques de transport sont insuffisants. Le meilleur moyen d'alléger la circulation en surface, tout en préservant l'environnement est la création d'un métropolitain.

L'historique du métropolitain d'Alger met en relief différentes étapes sur le plan conceptuel, à savoir:

- En 1932, un projet de réalisation d'une ligne de métropolitain longue de 14 Km entre Bologhine et El-Harrach vit le jour.
- En 1955, on a évalué qu'il fallait transporter 17000 voyageurs par heure entre Bab-El-Oued et Hussein-Dey dans les deux sens. Une étude fut menée par la R.A.T.P, prévoyant la réalisation d'une ligne reliant la Gare Centrale aux "Fusillés" et le haut de la rue Didouche Mourad, répondait mieux aux besoins.
- En 1972, un bureau d'étude britannique "BUCHANAN" proposait un métropolitain de type classique.
- En 1977, la S.N.T.F. avait reconsidéré le prolongement en tunnel de la voie ferrée entre "Tafourah" et "Bab-El-

Oued"; cependant la R.A.T.P. recommandait une ligne de métropolitain au centre d'Alger après les études entreprises pour la R.S.T.A. et la S.N.T.F.

- En 1981, la société "SOFRETU" entreprit une étude pour le compte de la R.S.T.A., prévoyant un système de transport de type métropolitain à l'intérieur de la zone dense de la ville.

On assurerait ainsi le transport de 40000 voyageurs par heure dans un sens; la première ligne relierait "Oued Koriche" aux "Anassers", comprenant 13 stations.

- En 1982, une étude commune "R.A.T.P. / SOFRETU" recommandait l'aménagement d'un réseau comportant trois lignes de métropolitain, à savoir: (fig.1).

Ligne N°1_ Aïn-Allah vers Gué de Constantine;

Ligne N°2_ Tafourah-Grande Poste vers Bab-Ezzouar;

Ligne N°3_ Hussein-Dey vers Zone nouvelle du Sud-Ouest;

La réalisation du métropolitain d'Alger est délicate, compte tenu de la topographie et des formations géologiques. De la justesse de l'implantation de ces ouvrages dépend leur réalisation dans le temps et dans l'espace. Elle nécessite une base d'appui précise permettant une technologie de creusement appropriée.

Le présent mémoire est consacré donc aux problèmes d'implantation physique des ouvrages métropolitains. A cet effet, il est indispensable d'en apprécier les conditions géologiques, hydrogéologiques, géotechniques, minières et techniques.

La résolution des problèmes évoqués nécessite la répartition du travail en quatre chapitres:

- Etude des conditions géologiques et minières.
- Etude des conditions techniques et minières.
- Analyse de la base géométrique et technique d'implantation.
- Implantation des ouvrages souterrains.

Cette démarche nous permettra d'avoir la possibilité technique d'implanter ces ouvrages métropolitains, concernant le tronçon du "lot 5", tout en respectant les normes de précision, de sécurité et de réalisation optimales.

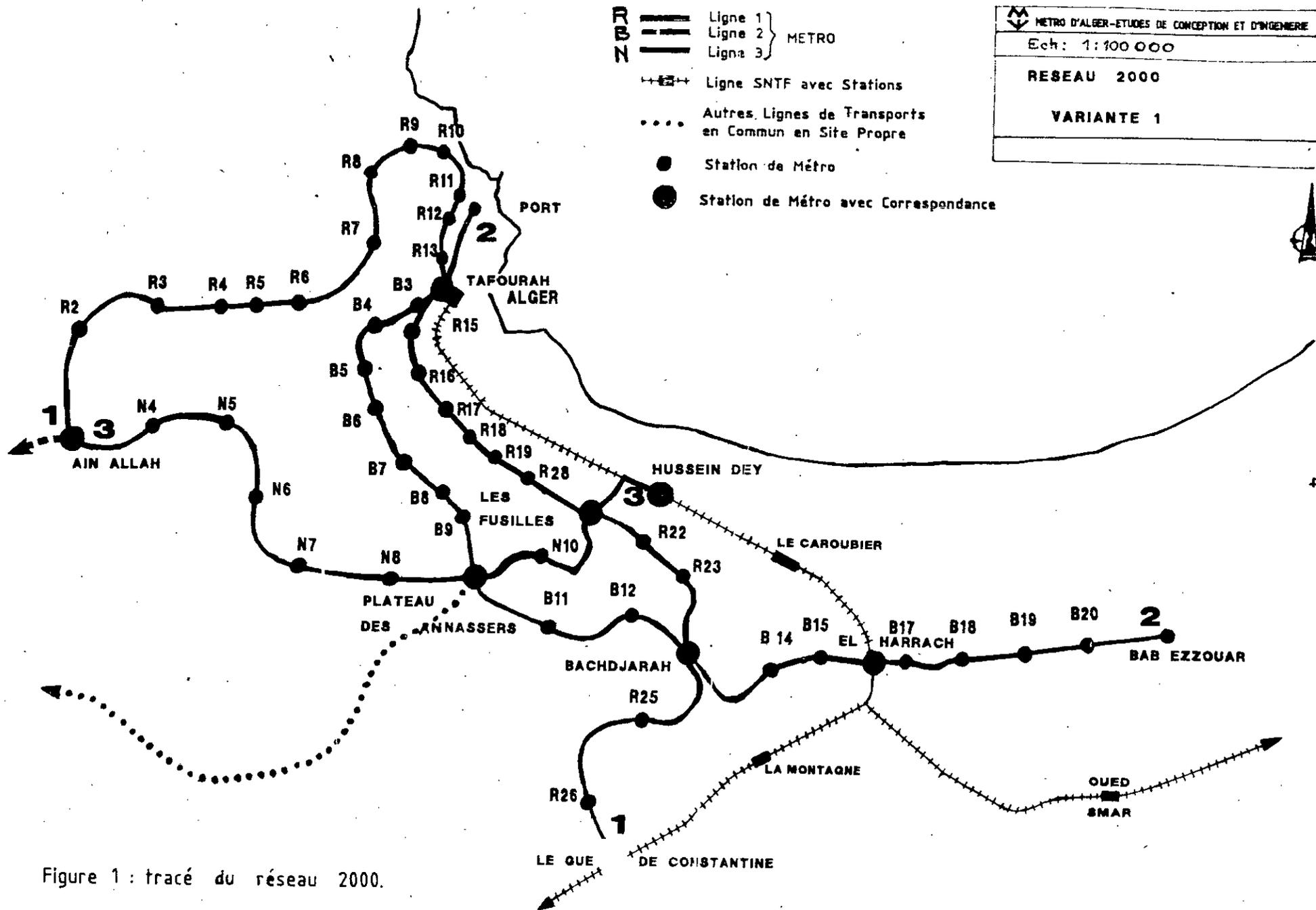


Figure 1 : tracé du réseau 2000.

CHAPITRE I

CONDITIONS

GEOLOGIQUES ET MINIERES

I.1 / Généralités-

I.1.1 / Nature du projet:

le projet consiste en la réalisation d'un ouvrage souterrain voûté (en parois moulées), qui devra faire la jonction avec le lot "2", au niveau de la rue Vincent, et, passera sous l'hôpital "Mustapha" pour rejoindre la station du premier Mai. (Fig.2).

I.1.2 / Situation du terrain:

le terrain étudié, est situé en grande partie à l'intérieur du "CHU Mustapha", et, à l'emplacement de l'ancien marché du premier Mai. (fig.2).

I.2 / La géologie de la région d'Alger-[3].

L'examen des cartes géologiques et des sondages révèle que la région d'Alger est constituée de deux zones différentes par leur nature et leur âge:

- au Nord, le massif cristallophyllien de "Bouzareah, d'âge primaire, forme un relief allongé d'Est en Ouest sur 20 Km de long, avec une largeur d'environ 6 Km.
- au Sud, la série sédimentaire d'âge tertiaire, qui forme un anticlinal de direction Nord-Est_ Sud-Ouest, oblique par rapport au domaine cristallophyllien et se prolongeant dans les bassins de la "Mitidja": localement, ces deux ensembles sont recouverts par les formations plus récentes d'âge quaternaire. (Fig. 3 et 4).

I.2.1 / Le massif cristallophyllien primaire.

Les principaux faciès reconnus dans le Primaire, du Nord vers le Sud, sont:

- les schistes et micaschistes;
- les schistes ardoisiers fortement injectés de quartzites dans lesquels s'intercalent des bancs de calcaires métamorphiques;
- les gneiss plus ou moins ocellés très durs, dans lesquels on rencontre localement des bancs de quartzites, des passages de micaschistes et de filons de pegmatites riches en micas et en quartz et des filons de pyrite.



Figure 2: Plan de situation .(Echelle au 1/7500).

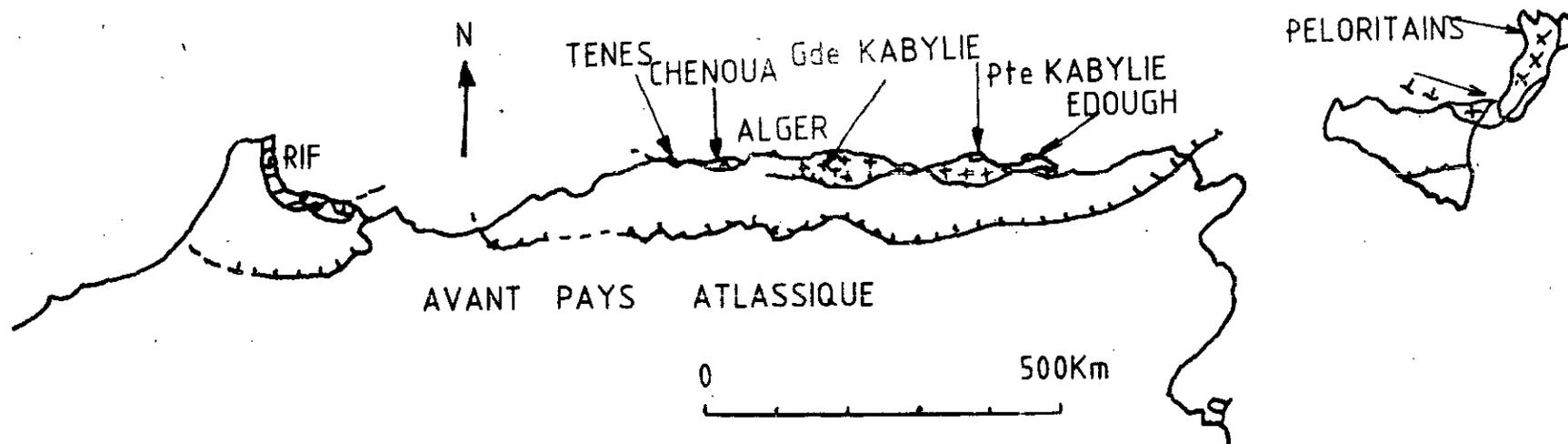


Figure 3 : Les différents massifs du domaine kabyle (zone interne) de la chaîne des maghébides. Schéma structural simplifié à partir de l'amas géologique du monde(feuille 9). (in A.SAADALLAH.1981.).

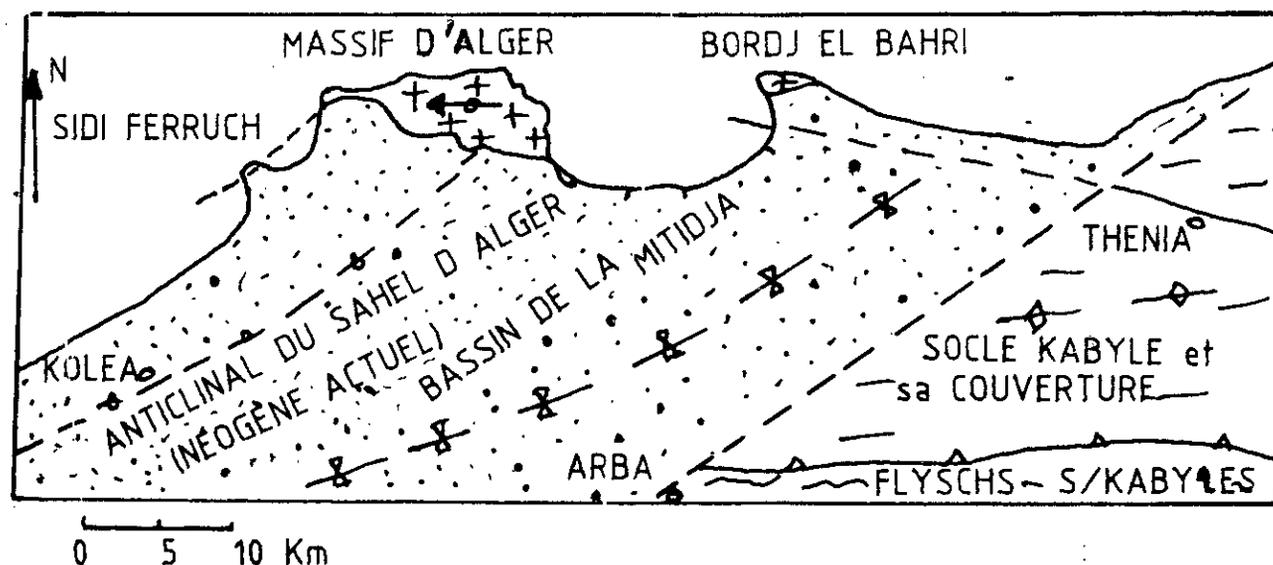


Figure 4 : Cadre structural du massif d'ALGER. Schéma simplifié et complété, (carte géologique d'ALGERIE au 1/500.000 .1952.).

Ces divers faciès pétrographiques sont imbriqués de manière anarchique, suite à une tectonique très importante et complexe.

I.2.2 / Les terrains sédimentaires du Tertiaire.

On rencontre de bas en haut:

- Le "Pontien":

C'est une formation de grès, conglomérats et poudingues, surmontant le massif primaire, dont l'épaisseur est d'environ 10 m. Deux sondages, aux environs de "Khelifa Boukhalfa", ont atteint l'assise d'âge "burdigalien à pontien", identifié entre "Oued Koriche" et "Bab-El-Oued".

- Le "Plaisancien":

C'est une formation marneuse de plus en plus gréseuse en nous dirigeant vers l'Est, avec souvent d'importants passages de calcaire gréseux. L'épaisseur varie de 50 à 100 mètres au niveau de la mitidja. Deux autres sondages entre "Khelifa Boukhalfa" et la "place du premier Mai" confirment la présence de marnes argileuses.

- L'"Astien":

C'est un ensemble de formations jaunâtres appelé mollasse, qui comprend des grès calcaires, des sables, des calcaires et des marnes sableuses. L'épaisseur peut aller jusqu'à 40 mètres.

I.2.3 -/ Le "Quaternaire".

Les différentes assises géologiques décrites ci-dessus sont recouvertes indifféremment par les couches quaternaires suivantes

- les alluvions et colluvions: elles regroupent les formations d'âge "calabrien" à "quaternaire" récent, dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 17 mètres, et, qui comprennent le plus souvent des argiles ou limons argileux rougeâtres, sableux ou graveleux, ainsi que des sables et graviers.

- les éboulis: on les rencontre seulement que sur 3 à 6 mètres d'épaisseur, au voisinage de la "Place du premier Mai", sous forme de marnes argileuses.

- les remblais: ce sont généralement les éléments sablo-graveleux et limoneux à débris divers; ils forment une couche continue; leur épaisseur maximale est d'environ 12 mètres, mais la limite avec les formations sous-jacentes est souvent difficile à déterminer. (Fig.5).

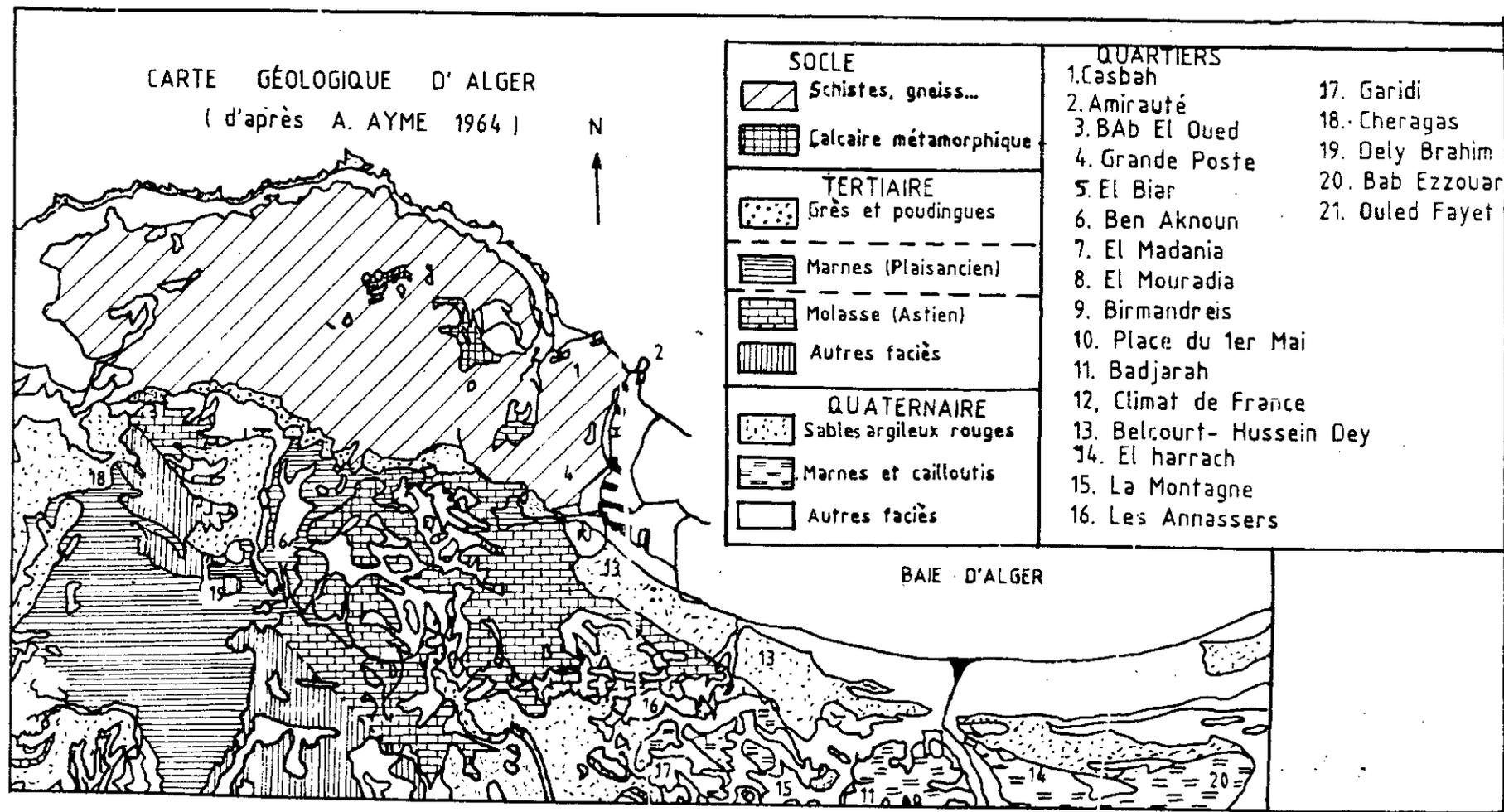


Figure 5: carte géologique d'ALGER.

I.3 / La géologie des formations le long du lot 5-

Les sondages implantés le long du tracé montrent une structure assez semblable du sous-sol. Pour une meilleure appréciation de cette structure, nous joignons en annexe (A.I) un profil géologique suivant l'axe du tunnel, du marché du premier Mai et de la station. [4].

L'analyse du profil montre que la morphologie du sous-sol se présente par endroits sous forme de paléochenaux, apparaissant notamment dans les environs de la rue "Vincent" et dans sa partie est; nous y remarquons la répétition de ces formes séquentielles à partir du toit des marnes, expliquant probablement les changements des lits d'oued à différentes périodes (fin du "Plaisancien, de l'Astien, du Plio-quadernaire et du Quaternaire ancien").

D'une manière générale, on relèvera que la structure du sous-sol est représentée par quatre grands ensembles lithologiques distincts dont la puissance varie d'un sondage à un autre:

- Remblais et limons rougeâtres;
- Argile jaunâtre à concrétions carbonatées et premier horizon sablo-gréseux aquifère;
- Argile jaunâtre souvent marneuse et second horizon sablo-gréseux aquifère;
- Marne grise et gris-verdâtre du "Plaisancien".

Finalement, l'ouvrage à étudier est situé dans un terrain contenant essentiellement des marnes, cependant la reconnaissance de l'ensemble des couches est nécessaire pour les travaux d'implantation du tunnel et de la station.

I.4 / Les données hydrogéologiques-

L'étude hydrogéologique a pour but de déterminer:

- les formations aquifères et les formations imperméables;
- la présence d'eau;
- le régime des eaux souterraines;
- la perméabilité du terrain, en vue de définir:
 - . la nature des venues d'eau;
 - . leur charge et leur débit;
 - . les possibilités de rabattement ou de drainage;
 - . les précautions à prendre pour l'étanchéité.

I.4.1 / Relevés piézométriques: [2]

- En Novembre 1982, on a constaté une tendance presque générale à la remontée du plan d'eau (niveau hydrostatique).
- La disparition des niveaux d'eau dans les piézomètres du massif d'Alger tend à indiquer qu'il n'y a pas une nappe unique dans les formations primaires, mais plutôt une série de petites nappes probablement peu actives.
- Les fluctuations des niveaux d'une année à l'autre sur certains piézomètres peuvent-être relativement importantes.

Les ouvrages du métropolitain sont le plus souvent situés sous le niveau piézométrique. (Fig.6).

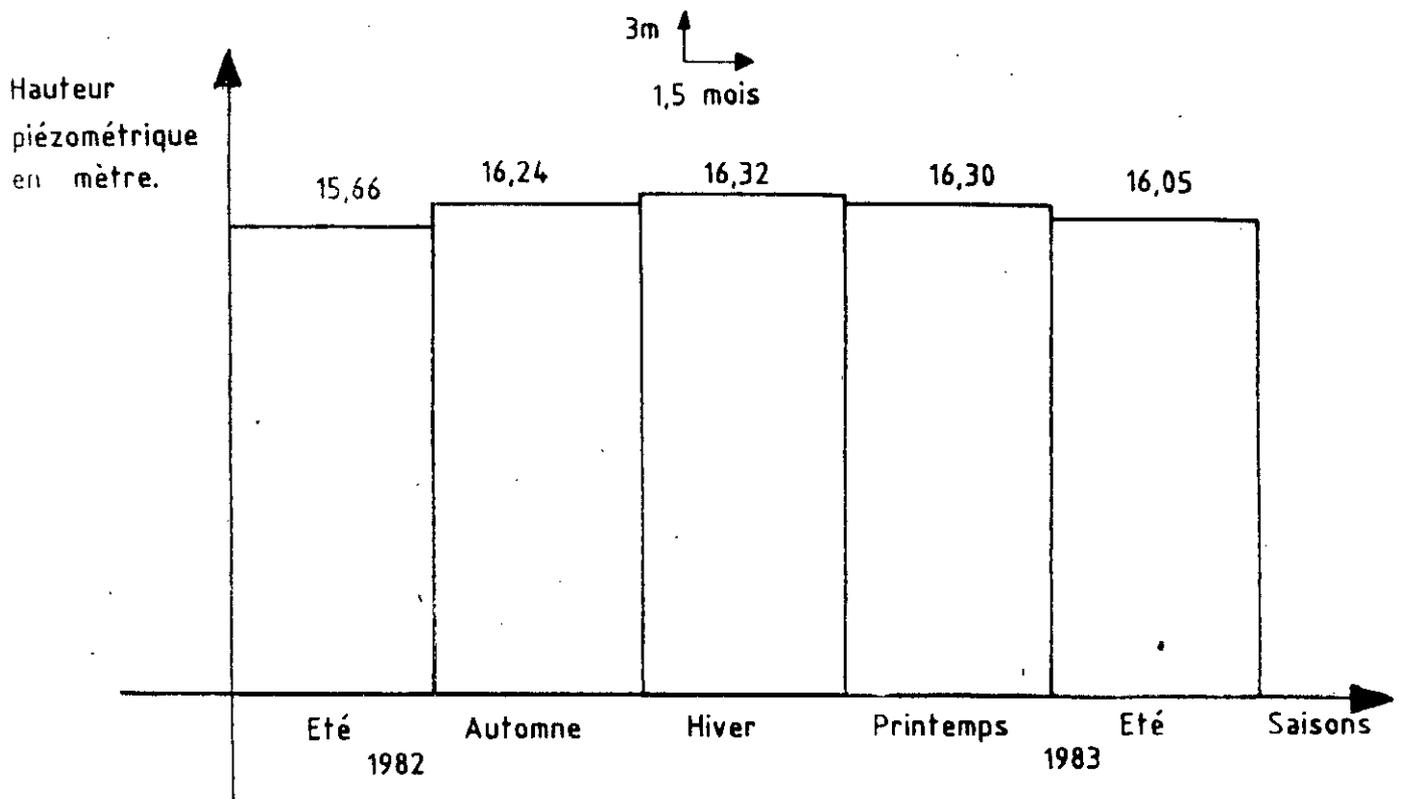


Figure 6: Variation moyenne du niveau piézométrique durant les saisons (point de sondage S 5). [2].

I.4.2 / Les paramètres hydrodynamiques:

On rappelle qu'une "unité LUGEON" ou "uL" correspond à une perméabilité comprise entre 1.10^{-7} m/s et 2.10^{-7} m/s.

Les essais "LUGEON" et de pompage de longue durée dans les différentes formations ont permis de révéler ce qui suit:

- Dans les schistes: Les essais "LUGEON" ont été réalisés sur des tranches de 3 à 5 mètres de schistes ardoisiers dans la formation du massif primaire. La valeur moyenne des mesures est de 5,1 uL.

- Dans les gneiss: La valeur moyenne est de 11,5 uL.

Il ressort à travers ces essais que les gneiss sont plus perméables que les schistes (cause probable: une fissuration plus importante).

- Dans les marnes bleues: Ces marnes sont considérées comme un mur imperméable à la nappe aquifère "astienne". Mais la présence de niveau fortement gréseux ne permet pas d'exclure l'existence de zones aquifères dans cette formation.

- Dans la molasse: L'essai de pompage de longue durée a donné une valeur de la perméabilité "K":

$$K = 1,5.10^{-4} \text{ m/s.}$$

- Dans les alluvions: La perméabilité est de l'ordre de:

$$K = 0,5.10^{-4} \text{ m/s.}$$

- L'assise "astienne" (tertiaire) qui représente la couche située au-dessus des marnes du "Plaisancien" et présente des conditions favorables à l'existence d'une nappe (couche perméable située sur une couche de marnes imperméables); ceci a été confirmé par des relevés piézométriques. Le niveau de cette nappe est pratiquement constant: 5,2 mètres en moyenne.

I.5 / Les conditions géotechniques

Le projet d'étude d'un tunnel est un processus complexe au cours duquel il faut déterminer ses dimensions, son tracé, son type de revêtement et la méthode de percement adéquate. Si les dimensions de la section du tunnel dépendent peu des conditions naturelles, elles sont essentiellement conditionnées par l'usage réservé à cet ouvrage; il est par contre certain que le type de revêtement et la méthode de creusement dépendent étroitement des

conditions naturelles rencontrées.

Parmi ces dernières, les conditions géotechniques sont souvent décisives sur le choix de la variante définitive du tracé.

La reconnaissance géotechnique du "lot 5" a été réalisée en deux phases, réparties durant les années 1982 et 1993.

A la demande de l'entreprise "COSIDER", le laboratoire national de l'habitat et de la construction, ("LNHC"), a réalisé une étude géotechnique complémentaire, qui peut se résumer ainsi, en considérant les étapes suivantes: [4]

I.5.1 / Essais in-situ:

La campagne de reconnaissance "in-situ" a porté sur l'exécution de sondages carottants afin d'observer et de déterminer deux niveaux hydrostatiques des différents horizons aquifères.

Les essais de perméabilité "in-situ" type "LEFRANC", à charge variable, et de filtration, concernent uniquement les sables du second horizon aquifère; ils sont au contact des marnes du "Plaisancien". Ce choix, s'explique par la position de ces sables proches du tunnel, et peut nécessiter un traitement spécial.

Les débits enregistrés ont été insignifiants lors des essais, ce qui met en évidence la faible perméabilité des sables, évaluée à :

$$K = 1,16.10^{-6} \text{ m/s.}$$

Il en ressort que le drainage s'avère aisé.

I.5.2 / Essais de laboratoire: [Tableaux A'I à A'IV]

Suivant le programme de l'entreprise "COSIDER", le laboratoire a réalisé sur les échantillons prélevés dans les sondages carottés les analyses et essais suivants:

2.1 / Les essais d'identification: Ils concernent les caractéristiques définies ci-après:

- . la mesure de la densité, de la teneur en eau (ou taux d'humidité) et du degré de saturation;
- . le calcul des limites d'"Atterberg";
- . les analyses granulométriques.

- 2.2 / Les essais mécaniques: [figure A"1]
- . des essais de cisaillement en boîte (Cu);
 - . des essais de compression simple;
 - . des essais triaxiaux;
 - . des essais de cisaillement à long terme;
 - . de la compressibilité à l'oedomètre.

2.3 / Les analyses: il s'agit des analyses chimiques de l'eau.

En reprenant ces différents points, nous pouvons donner les résultats suivants:

2.1 / Les essais d'identification- (synthèse)-(tableau 1).

2.1.1 - Formation argileuse sablo-limoneuse:

Ces formations sont de compacité assez élevée (densité apparente sèche est de: $1,77 \text{ T/m}^3$). Elles sont proches de la saturation, soit:

$$S_r \text{ moyen} = 85 \text{ \%}.$$

La limite moyenne de liquidité est de l'ordre de:

$$W_L \text{ moyenne} = 55 \text{ \%}.$$

2.1.2 - Formation argilo-carbonatée:

. Cette argile a une compacité également assez élevée, soit de:

$$\delta d_{\text{moyen}} = 1,74 \text{ T/m}^3.$$

. Elle est proche de la saturation, soit:

$S_r = 90 \text{ \%}$, avec une teneur en eau "W" de: $W = 18,5 \text{ \%}$.

. La limite moyenne de liquidité est de l'ordre de :

48,5 %, pour l'indice moyen de plasticité ,

$I_p \text{ moyen} = 23,5 \text{ \%}$, ce qui les classe dans la catégorie des argiles peu plastiques.

2.1.3 - Formation sableuse:

D'après la classification de l'"A.S.T.M." ("American Society for testing and Materials"), ces matériaux sont classés dans la catégorie des sols fins à moyens.

2.1.4 - Formation marneuse:

Les formations marneuses sont de compacité moyenne à élevée; la densité apparente sèche est de: $\delta d = 1,46 \text{ à } 1,94 \text{ T/m}^3$.

L I M I T E R E S	D' A T A T E B E R G	Grandeur mesurée	Valeurs extrêmes de la grandeur mesurée	Moyenne arith - métique	Ecart type " σ "
		Limite de liquidité, " W_L ", %	56 à 75,5	65,44	2,69
		Limite de plasticité " W_p ", %	27,10 à 35,50	32,35	1,05
		Indice de plasticité " I_p ", %	28,40 à 40,20	33,10	1,68
		Densité sèche, " δ_d ", T / m ³	1,46 à 1,96	33,10	0,02
		Densité humide, " δ_h ", T / m ³	1,93 à 2,21	1,70	0,01
		Teneur en eau, " W ", %	11 à 30,8	2,07	0,34
		Degré de saturation, " S_r ", %	73 à 100	97,48	

Tableau 1 : synthèse des caractéristiques d'identification, effectuées sur les échantillons prélevés dans les sondages carottés.

Elles sont saturées, avec des teneurs en eau naturelle, (W), comprises entre: $11 \% < W < 30,8 \%$.

On notera que les marnes rencontrées sur le site sont des sols très fins, très plastiques ($W_L > 50 \%$ et $28,4 \% < I_p < 40,2 \%$).

2.2 / Essais mécaniques:

2.2.1 - Formation argilo - marneuse (d'âge astien):

l'analyse indique des résultats peu dispersés, avec des valeurs de cohésion et d'angle de frottement comprises respectivement dans les intervalles:

$$1,30 < C_{uu} < 1,80 \text{ bar} ; \quad 2^\circ < \phi_{uu} < 15^\circ ;$$

avec des moyennes arithmétiques et des écarts types respectifs de: $C_{uu} \text{ moyen} = 1,54 \text{ bar} ; \quad \sigma \text{ (écart type)} = 0,23.$

$$\phi_{uu} \text{ moyen} = 10,20^\circ ; \quad \sigma \text{ (écart type)} = 4,92.$$

En prenant un seuil de confiance de 95%, on aboutit aux valeurs suivantes des bornes, inférieures à l'intervalle de confiance: $C_{uu} \text{ min} = 1,32 \text{ bar}$ et $\phi_{uu} \text{ min} = 5,5^\circ$

2.2.2 - Formation sableuse (d'âge astien):

l'analyse montre que ces résultats sont assez dispersés, avec des valeurs de cohésion et d'angle de frottement comprises respectivement dans les intervalles:

$$0,07 < C_{uu} < 0,28 \text{ bar} ; \quad 29^\circ < \phi_{uu} < 35^\circ ;$$

avec des moyennes arithmétiques et des écarts types respectifs de: $C_{uu} \text{ moyen} = 0,18 \text{ bar} ; \quad \sigma \text{ (écart type)} = 0,09.$

$$\phi_{uu} \text{ moyen} = 31,60^\circ ; \quad \sigma \text{ (écart type)} = 2,41.$$

En considérant un seuil de confiance de 95%, on aboutit aux valeurs suivantes des bornes, inférieures à l'intervalle de confiance: $C_{uu} \text{ min} = 0,10 \text{ bar}$ et $\phi_{uu} \text{ min} = 29,30^\circ$.

Cette valeur quelque peu élevée de la cohésion est attribuée à la proportion de fines révélées par les analyses granulométriques.

2.2.3 - Formation marneuse ("Plaisancien") -

a -/ Résistance au cisaillement à court terme (u.u) -

l'analyse montre que les résultats sont dispersés, avec des valeurs de cohésion, d'angle de frottement et de teneur en eau, comprises respectivement dans les intervalles suivants:

$$C_{uu} \text{ moyen} = 2,09 \text{ bar} ; \quad \sigma = 0,43 ;$$

$$\phi_{\text{uu}} \text{ moyen} = 17,47^\circ \quad ; \quad \sigma = 4,18.$$

En considérant un seuil de confiance de 95%, on aboutit aux valeurs suivantes des bornes, inférieures à l'intervalle de confiance: $C_{\text{uu}} \text{ min} = 1,92 \text{ bar}$ et $\phi_{\text{uu}} \text{ min} = 15,81^\circ$.

b -/ Résistance à la compression simple-

Ce type d'essai a été effectué sur la couche de marnes. Les valeurs de "RC" sont comprises dans les intervalles suivants:

$$0,39 \text{ bar} < \text{RC} < 2,87 \text{ bars},$$

avec une moyenne arithmétique et un écart type respectivement de:

$$\text{RC}_{\text{moyen}} = 1,0 \text{ bar} \quad ; \quad \text{RC}_{\text{min}} = 0,67 \text{ bar} \quad ; \quad \sigma = 0,74.$$

c -/ Essais de cisaillement triaxial (Cu + u) -

Dans l'essai triaxial (Cu + u), les échantillons sont soumis aux phases suivantes: saturation, consolidation et cisaillement à drainage de frottement. Les valeurs obtenues de la cohésion (C_{cu}) et de l'angle de frottement (ϕ) sont inférieures à celles fournies précédemment; ce qui s'explique par le fait que ces marnes, appartenant à un autre faciès, ne sont pas homogènes et sont affectées par des discontinuités lithologiques millimétriques, dues à une phase de dépôt très perturbée.

D'autre part, ces marnes ont été probablement affectées par des efforts engendrés lors du soulèvement du massif primaire de "Bouzareah" (la limite de ces marnes se retrouve à l'Ouest de la rue "Vincent").

$$0,10 < C_{\text{cu}} < 0,850 \text{ bar} \quad ; \quad 9,5^\circ < \phi_{\text{cu}} < 19,5^\circ \quad ;$$

$$c_{\text{uu}}_{\text{moyen}} = 0,32 \text{ bar} \quad ; \quad \sigma = 0,52 \quad ;$$

$$\phi_{\text{uu}}_{\text{moyen}} = 14,58^\circ \quad ; \quad \sigma = 3,31 \quad ;$$

$$C_{\text{cu}}_{\text{min}} = 0,06 \text{ bar} \quad \text{et} \quad \phi_{\text{cu}}_{\text{min}} = 11,86^\circ.$$

d -/ Résistance au cisaillement à long terme-

les résultats sont également très dispersés, et varient dans les intervalles suivants:

$$0,05 \text{ bar} < C_{\text{cu}} < 0,5 \text{ bar} \quad ; \quad 13^\circ < \phi_{\text{cu}} < 26^\circ \quad ;$$

$$\text{avec: } C_{\text{cu}}_{\text{moyen}} = 0,22 \text{ bar} \quad ; \quad \sigma = 0,19 \quad ;$$

$$\phi_{\text{Cu}}_{\text{moyen}} = 21^\circ \quad ; \quad \sigma = 3,91 \quad ;$$

$$C_{\text{cu}}_{\text{min}} = 0,06 \text{ bar} \quad ; \quad \phi_{\text{cu}}_{\text{min}} = 17,70^\circ.$$

e -/ Essais de compressibilité à l'oedomètre-

Tous les échantillons traités ont fait l'objet d'une remise à l'état initial "in-situ", c'est-à-dire soumis à une contrainte

de compression (sans saturation sous l'eau), équivalente au poids de la terre située sur l'échantillon au moment de son prélèvement.

Les essais de compressibilité poussée jusqu'au palier de pression de 2 bars ont permis de relever des sols surconsolidés, peu compressibles et faiblement gonflants. L'étude du gonflement consiste en l'application sur l'échantillon d'une charge initiale de 0,015 bar (sans eau) jusqu'à stabilisation de la formation. L'échantillon est alors immergé sous l'eau; et on procède ainsi à un chargement par palier jusqu'à la stabilité du gonflement. L'amplitude du gonflement, ainsi déduite, est estimée à 2% environ. Les échantillons, étant initialement saturés, $S_r = 100 \%$, une légère tendance au gonflement se manifeste, $\sigma_g = 0,3$ bar.

2.3 -/ Analyse chimique de l'eau:

L'eau, prélevée de la nappe phréatique, présente des agressivités variables: faible, modérée et forte; le tout est illustré par les tableaux suivants (2 et 3):

La légende du tableau 2 précise que nous avons analysé chimiquement un:

- prélèvement d'eau, "SH 13", faiblement agressive, que nous avons symbolisé par la lettre "A";
- prélèvement d'eau, "SH 5", modérément agressive, symbolisé par la lettre "B";
- prélèvement d'eau, "SH 10", fortement agressive, symbolisé par la lettre "C".

La légende du tableau 3 analyse similairement un:

- prélèvement d'eau, "SH 3", fortement agressive, symbolisé par la lettre "D";
- prélèvement d'eau, "SH 7", très fortement agressive, symbolisé par la lettre "E";
- prélèvement d'eau, "SH 14 Bis", très fortement agressive, symbolisé par la lettre "F".

PRELEVEMENTS	A		B		C	
COMPOSITION	mg / l	Méquiv./l	mg / l	Méquiv./l	mg / l	Méquiv./l
Calcium (Ca ⁺⁺)	60,92	3,03	164,32	8,20	76,15	3,80
Magnésium (Mg ⁺⁺)	12,63	1,03	17,01	1,40	8,26	0,67
Sodium (Na ⁺)	87,00	3,78	100,00	4,34	100,00	4,34
Potassium (K ⁺)	traces	traces	traces	traces	traces	traces
Chlorures (Cl ⁻)	142,00	4,00	174,40	4,80	149,10	4,20
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	224,64	4,67	232,96	4,85	183,04	3,81
Carbonates (CO ₃ ²⁻)	traces	traces	traces	traces	traces	traces
Bicarbonates (HCO ₃ ⁺)	61,00	0,99	378,20	6,20	156,60	2,60
Ammonium (NH ₄ ⁺)	traces	traces	traces	traces	traces	traces
CO ₂ agressif	traces	-----	42,80	-----	45,00	-----
Matières organiques	3,20	-----	1,70	-----	traces	-----
pH	6,5	-----	8,0	-----	8,0	-----
Résidu sec , MG / L.	730,00	-----	966,00	-----	660,00	-----
Matière en suspension MG / L.	traces	-----	traces	-----	traces	-----

Tableau 2 : analyses chimiques d'eau prélevée-

PRELEVEMENTS	D		E		F	
COMPOSITION	mg/l	Méquiv./l	mg/l	Méquiv./l	mg/l	Méquiv./l
Calcium (Ca ⁺⁺)	46,49	2,32	85,77	4,27	141,08	7,03
Magnésium (Mg ⁺⁺)	traces	traces	19,44	1,59	22,35	1,83
Sodium (Na ⁺)	100,00	4,78	110,00	4,78	75,00	3,26
Potassium (K ⁺)	traces	traces	traces	traces	traces	traces
Chlorures (Cl ⁻)	120,00	3,40	156,20	4,40	134,90	3,80
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	124,80	2,59	195,20	4,07	209,66	4,36
Carbonates (CO ₃ ²⁻)	90,30	3,00	traces	traces	traces	traces
Bicarbonates (HCO ₃ ⁺)	195,20	3,20	231,80	3,79	341,60	5,59
Ammonium (NH ₄ ⁺)	traces	traces	traces	traces	traces	traces
CO ₂ agressif	56,00	-----	74,80	-----	100,00	-----
Matières organiques	3,00	-----	1,40	-----	1,10	-----
pH	8,00	-----	6 environ	-----	6,0	-----
Résidu sec , mg/l.	602,00	-----	840,00	-----	766,00	-----
Matière en suspension mg/l.	traces	-----	traces	-----	traces	-----

Tableau 3 : analyses chimiques d'eau

La campagne de reconnaissance a donc porté sur la réalisation de quinze (15) sondages carottés, de profondeurs variables (entre 15 et 30 mètres).

Les sondages carottés ont relevé un substratum marneux ondulé le long du profil de la rue "Vincent" vers la "Place du premier Mai".

Ces marnes "plaisanciennes" sont caractérisées par leur changement de faciès lithologique, de marne homogène grise à gris-bleu en venant de la station du "Premier Mai"; puis celles-ci deviennent plus foncées, bariolées (gris verdâtres), avec des discontinuités lithologiques bien souvent tapissées de matériaux très fins. Ces marnes sont surmontées de deux horizons sablo-gréseux pincés entre des formations argileuses imperméables.

Les niveaux statiques mesurés sont situés à des profondeurs différentes. D'une manière générale, on retiendra que le niveau statique du premier horizon est situé vers 4 mètres de profondeur alors que le second serait à 8 mètres (Annexe : A.I).

Au vu des conditions géotechniques rencontrées, il serait donc intéressant de réaliser le tunnel dans la formation marneuse imperméable, en prenant soin de vérifier qu'aucun paléochenal ne puisse atteindre le toit (voûte) du tunnel, auquel il aurait fallu prévoir des mesures de protection (injection, parois d'étanchéité, etc...).

L'autre problème concerne la réalisation de la station à ciel ouvert et pour laquelle il faut connaître les débits d'infiltration de l'eau vers l'excavation. Pour cela, des observations piézométriques et des essais de filtration d'eau ont été effectués afin de préciser la perméabilité du terrain et le sens des écoulements.

CHAPITRE II

CONDITIONS

TECHNIQUES ET MINIERES

II- 1 / Caractéristiques techniques du métropolitain (dimensionnement et type de rail)

II.1.1 - Etude de la ligne 1:(fig.7).

L'origine de la ligne 1 est située sur les hauteurs d'"Oued Koriche" au Nord-Ouest de l'agglomération. Son tracé orienté au départ vers le Nord-Est décrit sensiblement une demi-corde à travers "Bab-El-Oued". La ligne part ensuite parallèlement à la côte et traverse successivement la "Casbah", "Alger centre" et le "Hamma". Son profil en long présente dans cette partie des variations modérées d'altitude. Cependant aux environs de la commune d'"Hussein-Dey" (orientation Sud-Est), la côte s'élève de 45m.

Finalement, le tracé s'infléchit vers le Sud pour atteindre son terminus à la jonction des communes d'"Hussein-Dey", de "Kouba et de Badjarrah".

La longueur totale de la première ligne est de 12,5 Km, comportant 16 stations, dont trois d'entre elles assureront ultérieurement la correspondance avec les lignes "2" et "3"; il s'agit des stations "Tafourah-Grande Poste", "Hai El Badr" pour la ligne "2" et celle des "Fusillés" pour la ligne "3". (Fig.1).

La ligne "1" traversera la zone la plus dense de la ville d'Alger; l'exécution se fera en trois phases: [2]

- première phase : "Hai El Badr" vers la "Grande Poste", prévue pour l'an 1998;
- deuxième phase : "Hai El Badr" vers la "Place des Martyrs", prévue pour l'an 2000;
- troisième phase : "Hai El Badr" vers "Oued Koriche", prévue pour l'an 2002.

Prévisions du parc:

1998-----	9 rames
2000-----	13 rames
2002-----	18 rames
2010-----	22 rames.

Intervalle de passage des trains aux heures de pointe:

En 1998-----	332 secondes
En 2000-----	260 secondes
En 2002-----	217 secondes
En 2010-----	171 secondes.

METRO D'ALGER = TRACE DE LA NOUVELLE LIGNE

-  STATION MOITIE SOUTERRAINE
MOITIE A CIEL OUVERT
-  STATION SOUTERRAINE
-  STATION A CIEL OUVERT

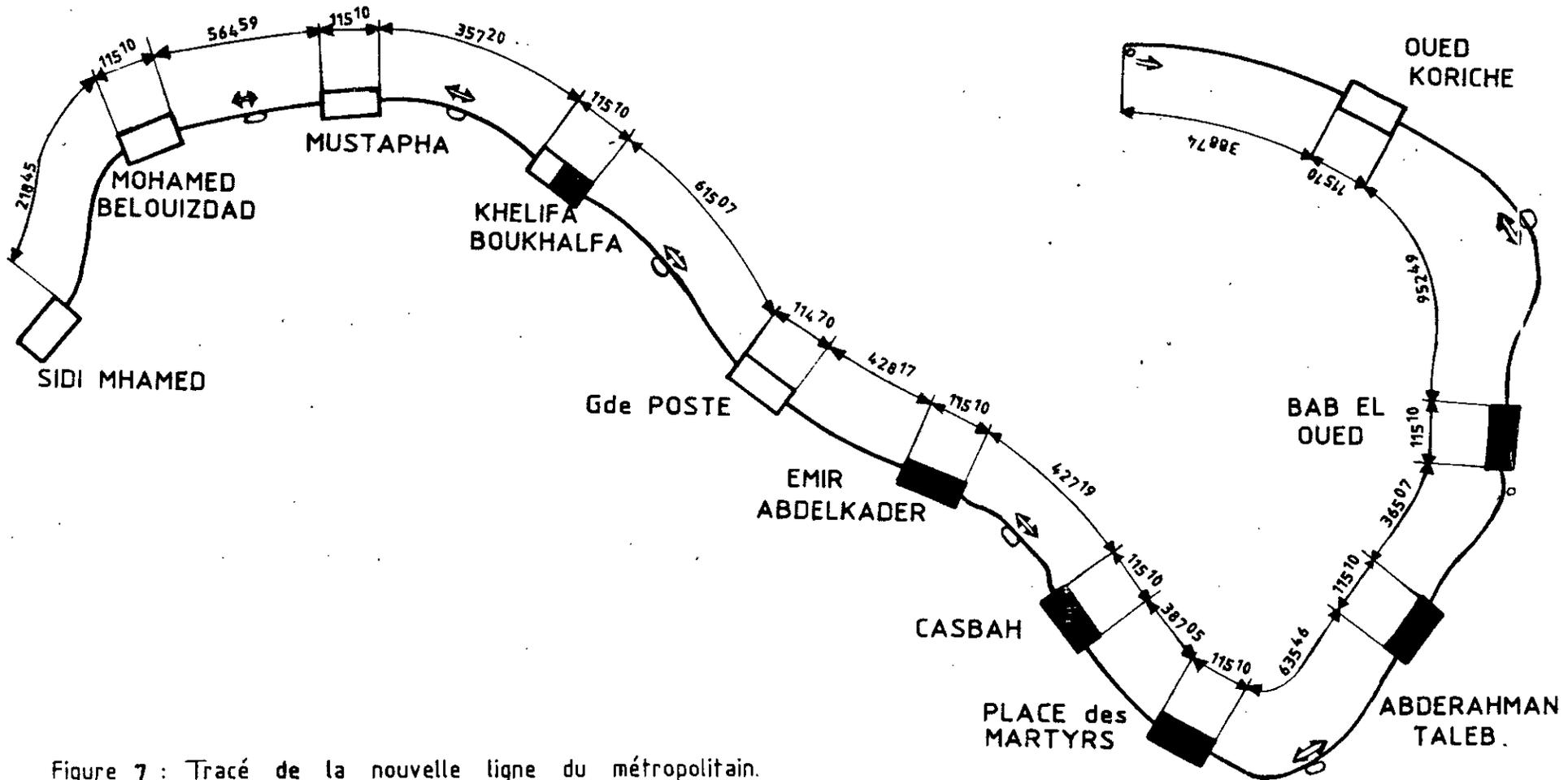


Figure 7 : Tracé de la nouvelle ligne du métropolitain.

Estimation du trafic annuel sur la première ligne:

En 1998-----	88,4 millions de passagers
En 2000-----	141 millions de passagers
En 2002-----	186 millions de passagers
En 2010-----	254 millions de passagers.

II.1.2 - Tunnels:

Ce sont des tunnels voûtés à double voies, ayant une ouverture moyenne (section) de l'ordre de 70 m²; certains tronçons sont réalisés à ciel ouvert.

La réalisation du métropolitain, en raison de leurs particularités d'exécution en souterrain et des exigences de l'exploitation, présente un domaine compliqué et difficile. Le processus de réalisation se subdivise en deux étapes:

- la première est la plus coûteuse et la plus difficile: elle comprend le percement d'ouvrages miniers et la construction d'un revêtement portant; c'est durant cette étape que l'on doit résoudre le problème de sécurité et de durabilité de l'ouvrage; (Annexe: A-II-III.).

- la seconde est appelée à assurer les conditions de l'exploitation confortable et stable de l'ouvrage, prévoyant la construction des voies, des travaux d'architecture, de finition et d'équipement des ouvrages par des installations technologiques permanentes (électrotechniques, sanitaires, de communications et d'automatisation).

L'ensemble des ouvrages souterrains comprend durant la réalisation du tunnel: un tunnel principal, des ouvrages secondaires (de prospection, de drainage...) et des puits verticaux.

II.1.3 - Station:

D'une façon générale, une station comprend:

- des trémies et des couloirs d'accès;
- une salle de billetterie;
- le niveau des quais (latéraux);
- des locaux abritant les équipements de maintenance et d'exploitation;
- des locaux commerciaux;
- des installations de ventilation, comportant:
 - . une baie d'extraction et une d'insufflation, implantées

toutes les deux au niveau de la sortie extérieure, constituée d'une grille de 0,80 m de hauteur;

. l'extraction et l'insuflation d'air seront assurées simultanément par deux centrales (centrale de ventilation extraction et centrale de ventilation insuflation);

. l'extraction d'air chaud sera assurée par une centrale située au niveau de la salle de billetterie; les caractéristiques

sont les suivantes:

débit-----	70 m ³ /s
longueur-----	23 m
largeur-----	04 m
hauteur-----	4,10 m.

Parmi les éléments composant la voie ferrée, le rail est considéré comme étant le principal; il constitue la voie de roulement du matériel, dont il supporte la charge et guide la roue. Ces deux fonctions soulignent son importance, tant au point de vue sécurité, que celui du confort de la circulation. [12]

Les voies ferrées dans les tunnels du métropolitain sont composées de trois parties principales:

- la structure inférieure (base rigide);
- la structure supérieure de la voie;
- le rail de contact.

La partie inférieure est une composante de la partie propre de la construction du revêtement du tunnel: la voûte inférieure de la voie est réalisée à l'aide de blocs en béton armé.

La construction supérieure de la voie peut être formée de rails, de type UIC 54. Ils sont composés par un assemblage d'éléments (barres) de longueur 18,24 m et de 36 m, formant le chemin de roulement et assurant le guidage des trains. [2]

A la base du rail, sur le joint en acier, on fixe un joint en caoutchouc ou autre matériau, d'épaisseur 8 mm.

Selon l'axe de la voie, on prévoit un caniveau de vidange d'eau, de largeur 900 mm.

Le rail de contact dans le tunnel est destiné à l'alimentation en énergie électrique du wagon mobile. On le situe sur le côté gauche de la marche du train.

D'après le type de matériel roulant retenu, la voie peut comporter un roulement sur pneumatique ou sur fer.

En ce qui concerne le roulement sur fer, (voie à double file

de rails), ce dernier car fixé par des attaches sur les traverses qui reposent sur une couche de ballast ou de béton.

Quant au roulement sur pneumatique, des pistes métalliques ou en béton, voisines des rails et des barres latérales, permettront le roulement et le guidage de trains équipés de roues pneumatiques porteuses et de roues de guidage (pneumatiques).

II.1.4 - Gabarits des tunnels:

afin de garantir la sécurité des déplacements des trains par voie ferrée, les gabarits suivants ont été établis ainsi: [8]

1.4.1. Gabarit de rame mobile . De configuration transversale, perpendiculaire à l'axe de la voie qui fixe les limites de la rame mobile la chargée ou à vide qui y sera implantée.

1.4.2. Gabarit d'approximation de construction

La configuration transversale marque limite, à l'intérieur laquelle on ne peut trouver aucune partie de construction et d'ouvrage.

1.4.3. Gabarit d'approximation d'équipement

Le gabarit de la rame mobile limite la disposition de l'installation.

1.4.4. Gabarit de la construction supérieure [voie et rail de contact]

La configuration transversale fixe les limites externes de la construction des voies et de leurs différentes pièces de fixation. Une attention particulière est à porter sur le fait que la ligne gabarit de la rame mobile puisse se trouver au-dessus du niveau du champignon du rail, de 50mm; tandis que la ligne de construction supérieure de la voie le soit de 25 mm.

Au-dessous de la première ligne, on ne peut pas disposer les moteurs de wagon et leurs pièces d'accrochage avec les axes conducteurs, mais également des pièces de dispositifs de freinage, des éléments de suspension à ressort et autres.

Au-dessus de la seconde ligne rails, on ne peut pas disposer de rails protecteurs de passage forcé, y compris leurs fixations et autres éléments de la construction supérieure de la voie.

Sur les intervalles curvilignes de la voie, on détermine les gabarits pour chaque rayon de la courbe. La forme de la section transversale des tunnels dépend principalement de ses dimensions et de la profondeur de l'écartement des tunnels. (Annexe: A.IV).

II.2/ La galerie de reconnaissance. (Annexe: A.V).

II.2.1 - Objectifs:

- reconnaissance hydrogéologique: pour l'exécution de la galerie de reconnaissance, on a associé un large programme d'essais. Il a été procédé à un échantillonnage qui a fait l'objet d'une étude de laboratoire.

Une étude géologique détaillée a permis d'établir une corrélation avec la campagne de sondages carottants.

- création d'une surface de dégagement supplémentaire pour les tirs d'abattage.

II.2.2 - Exécution de la galerie de reconnaissance:

Cette galerie présente les caractéristiques suivantes: [2]

. d'une longueur évaluée à 2 Km;

. de section rectangulaire (hauteur: 3m, largeur: 3,20m).

L'ordre d'exécution de cette galerie suit les étapes suivantes:

- Le puits: la galerie a été réalisée à partir de quatre puits. Pour chaque puits, on a prévu une attaque à gauche et une à droite simultanément. L'exécution du puits est effectuée à l'aide de pelle mécanique jusqu'à un niveau de 6m. Au-delà de 6m, on a opté pour l'utilisation de pelle araignée pour poursuivre les travaux, en utilisant des explosifs au niveau des points durs.

- Le rameau: il est attaqué à partir du puits à l'aide d'un outil pneumatique.

- La galerie: elle est percée de part et d'autre du rameau. Le creusement de la galerie de reconnaissance est réalisé à l'aide de la gélanite 1/30 par plan de tir bouchon canadien; cette méthode est très commode pour le creusement de galeries en sites urbains à faible profondeur. Selon la tenue des terrains, le soutènement de cette galerie s'est réalisé par:

. cadrage par profilés métalliques;

. cadrage par HEB plus blindage à l'avancement par planches en bois.

II.3 / Méthodes du creusement des galeries:

Le choix de la méthode du creusement sera basé sur l'examen des conditions suivantes: [5]

- la nature du terrain;
- la profondeur de l'ouvrage et ses dimensions;
- l'environnement (zone urbaine et autre...);
- la qualité du personnel (effectif d'ouvriers, de spécialistes);
- le matériel disponible;
- le délai d'exécution.

Finalement, pour la réalisation du métropolitain, deux méthodes d'exécution sont utilisées:

- la méthode d'extraction à ciel ouvert;
- le creusement en souterrain.

II.3.1 - La méthode d'extraction à ciel ouvert:

Cette méthode porte sur des dimensions supérieures à celles de l'ouvrage. Elle exige une occupation importante du terrain pour le chantier, pour le parc d'engins lourds, pour le transport de matériaux et de déblais, ce qui explique que son utilisation en zone urbaine soit limitée.

Dans le cas du lot 5, la surface étant dégagée, un mode de creusement à ciel ouvert a donc été fixé. Le problème majeur qui se pose alors concerne la stabilité du terrain et des parois.

Différents types de soutènement sont envisageables; les plus courants sont les suivants:

- les palplanches;
- les parois moulées;
- les soutènements de type berlinois ou parisien.
- Les palplanches:

On utilise les palplanches en sites maritime et fluvial, car elles présentent des effets nuisibles sur le plan acoustique, et semblent favorables à la transmission de vibrations aux terrains durant la mise en fiche.

Elles assument la fonction de pouvoir transmettre des efforts de traction. Les hauteurs varient de 80 à 450 mm, les largeurs oscillent entre 365 à 500 mm et les épaisseurs entre 5 et 20 mm; la longueur maximale laminée est de 27 m. Il existe des palplanches spéciales soudées ou rivées, adaptées aux angles et aux raccords.

Concernant les palplanches plates, les profilés les plus usités sont: (fig.8)

- .. le profil "Rombas";
- . le profil "Lackawanna".

Ils sont conçus spécialement pour une application en traction, résistant facilement à des efforts pouvant atteindre : 400 T/ml.

Les types de profil "Larsen" sont représentés dans le tableau suivant (4):

	HAUTEUR, cm.	POIDS de 1 M ² de PAROI (Kg)	MODULE de RESISTANCE par METRE de PAROI.cm ³
LARSEN I	15,0	100	500
LARSEN III	24,7	155	1360
LARSEN IV	31,0	187	2040
LARSEN V	34,4	238	2960

Tableau 4 : Caractéristiques des palplanches de type "LARSEN".

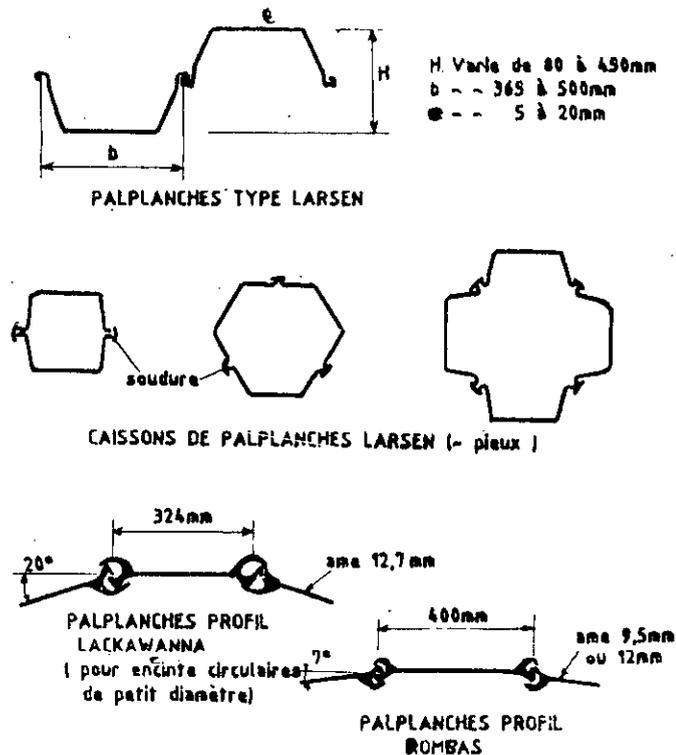


Figure 8: Palplanches de profils classiques.

3.1.1. La mise en oeuvre se réalise selon différentes manières:

- par battage classique dans les sols mous;
- par modification des caractéristiques du sol;
- par forage et battage en présence d'un sol dur.

Dans la première méthode, on évite de donner des coups trop puissants risquant de tordre les palplanches.

La seconde méthode consiste à rendre le sol plus mou par voie chimique pour des sols cohérents, ou sous l'effet de vibrations dans le cas de terrains pulvérulents (procédé par vibrofonçage).

Le choix de l'engin ou de la technique de battage doit être minutieux, afin que les longueurs de fiches calculées puissent être atteintes dans les meilleures conditions.

On opère pratiquement de manière empirique, l'expérience aidant.

3.1.2. La paroi moulée (fig.9):

C'est un écran vertical en béton, armé ou non, construit sans blindage ni coffrage, à partir de la surface, par excavation d'une tranchée au moyen d'un engin approprié.

L'intérêt de ce procédé apparaît lorsqu'on est en présence d'une nappe aquifère; celle-ci permet de former l'écran au sein même du terrain, avant de pouvoir réaliser le terrassement correspondant à la fouille de pleine masse.

L'épaisseur peut varier de 0,5 à 1,5m, tandis que sa profondeur peut atteindre 20m, tout en étant limitée par les moyens utilisés.

3.1.3. Exécution de la paroi moulée:

les bennes preneuses spéciales servent de moyen d'excavation pour les terrains tendres; quant aux terrains compacts ou rocheux, on utilise des outils percutants (trépans) ou roto-percutants (trépan animé d'un mouvement lent de rotation). (fig.10 et 11).

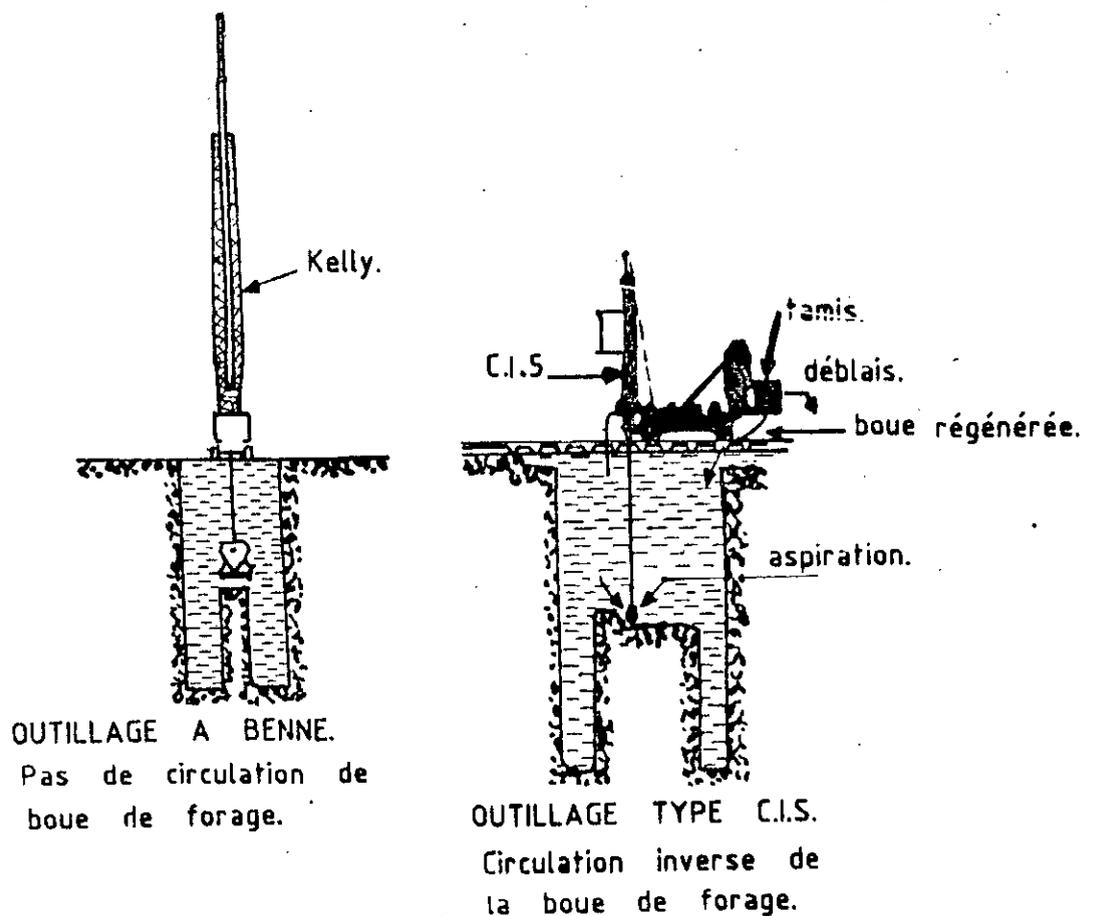


Figure 9: Utilisation de la boue.

3.1.4. Stabilité de la tranchée:

On ne peut expliquer de manière satisfaisante la tenue des tranchées profondes, remplies de boue à la bentonite, ainsi que le rôle exact des phénomènes physico-chimiques liés à la présence de cette boue et à la formation du cake (boue concentrée recouvrant la paroi).

De par sa densité la boue agit, permettant d'équilibrer les forces de poussée, qui sont elles-mêmes soulagées par la formation dans le plan horizontal, d'un arc dans la tranche verticale du terrain (théorie de "Schneebeli"); (fig.12).

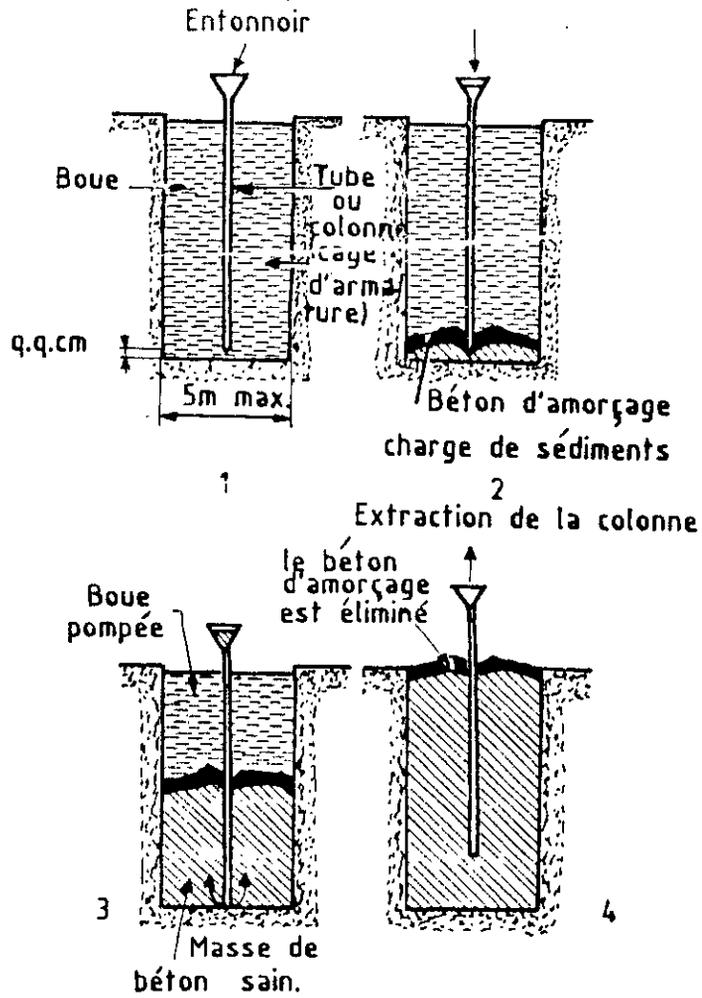


Figure 10 : Bétonnage à la colonne.

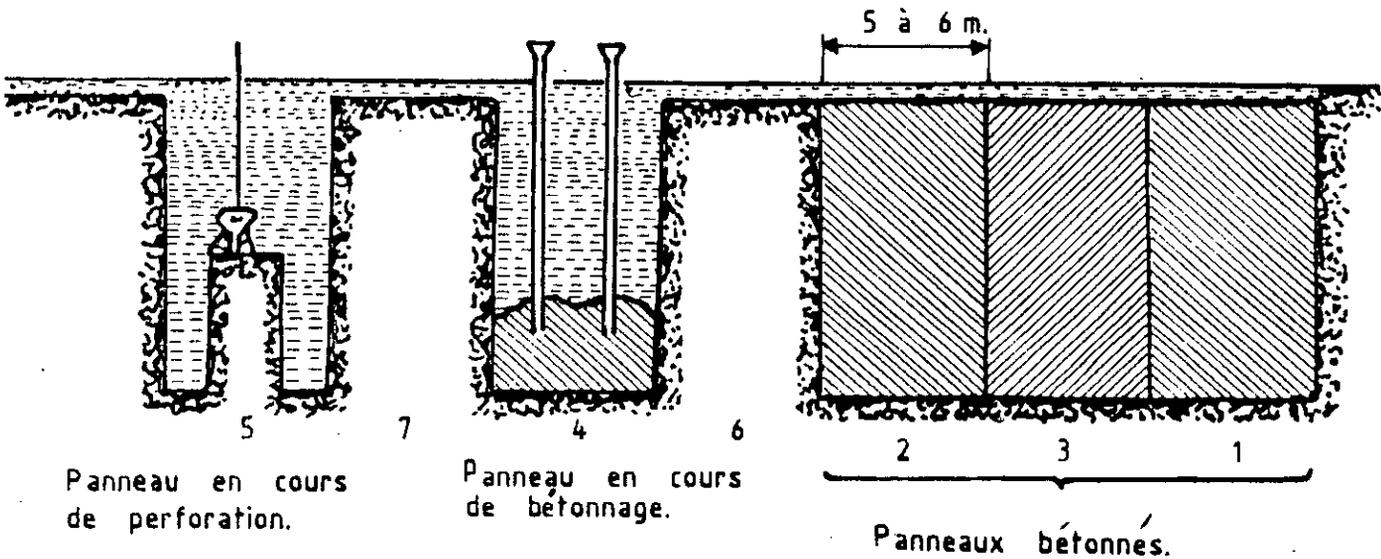


Figure 11: Schéma d'exécution d'une paroi.

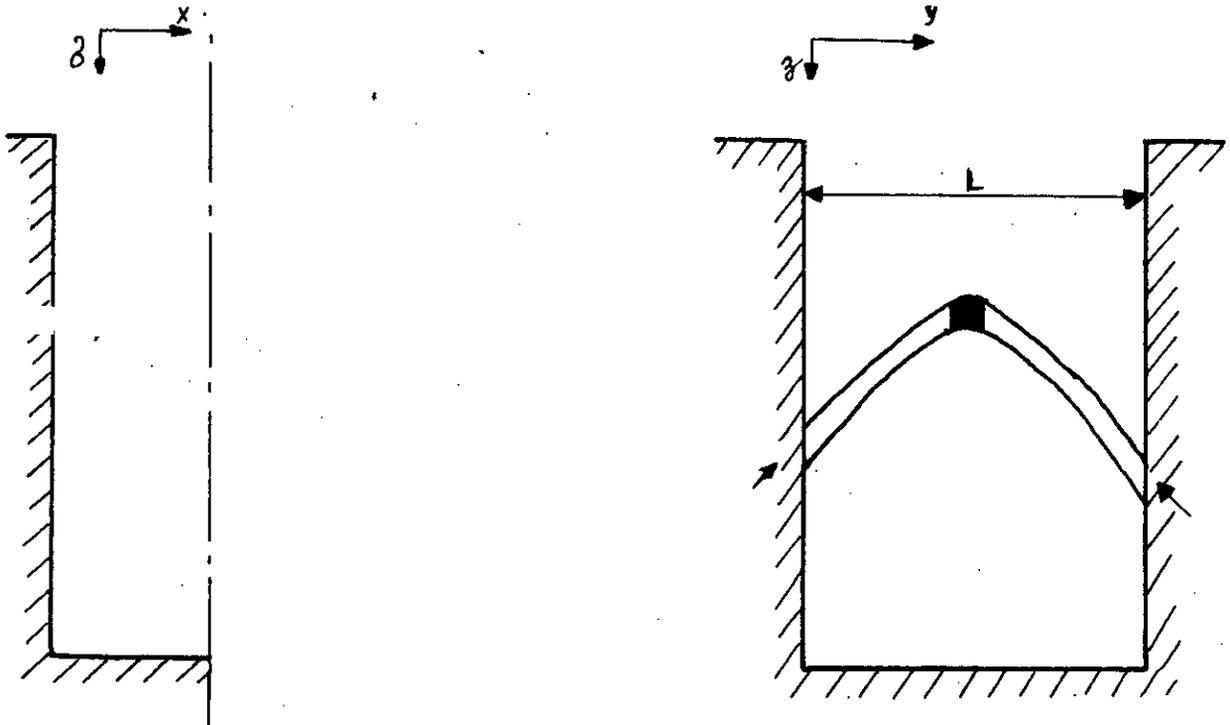


Figure 12 : Effet de voûte.

Remarquons par ailleurs que :

- la bentonite est une argile du type Montmorillonite, finement broyée, rendue basique par addition de soude; elle a une limite de liquidité égale à 500%.

- l'addition de retardateurs de prise, durant le coulage des parois, est nécessaire en raison de l'importante quantité de béton utilisée (les panneaux ont couramment une longueur de 8 à 10m).

3.1.5. La paroi berlinoise:

C'est un soutènement provisoire, que l'on utilise généralement dans les terrains contenant peu d'eau.

De conception rapidement réalisable, c'est un soutènement relativement économique, consommant peu de matériaux. (fig.13).

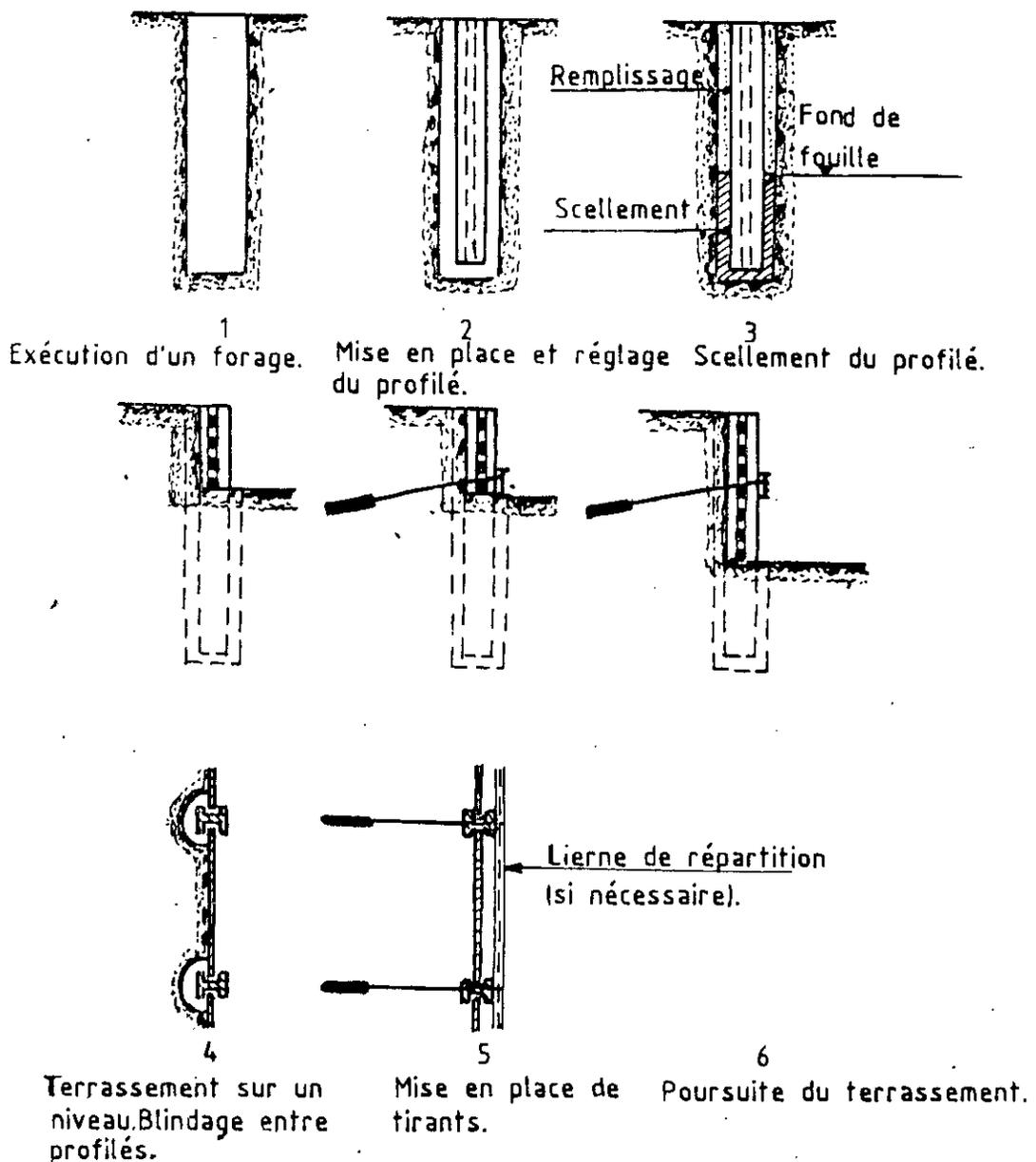


Figure 13 : Schéma d'exécution d'une paroi "berlinoise".

II.3.2 / Le creusement en souterrain:

Il est appliqué dans le cas de rejet d'exécution d'une tranchée. Ce rejet s'explique par l'impossibilité d'exécuter une tranchée, ou par le fait qu'elle soit trop onéreuse.

Cette méthode peut se réaliser en exécutant un cheminement horizontal. Les avantages de cette méthode portent sur son application en site urbain, nécessitant une aire d'implantation réduite en surface, et s'adaptant à toute nature de terrain.

Les différentes méthodes d'excavation sont les suivantes:

3.2.1. Creusement à pleine section:

Il consiste à attaquer et à dégager en une seule fois toute

la section du front de taille; il permet de mettre en action de grands moyens matériels, aboutissant à un travail peu économique. Comme exemple, nous citerons: le "Jumbo", porteur de nombreuses perforatrices (jusqu'à 20 chargeuses).

3.2.2. Creusement par demi-section:

On construit en premier la voûte, tout en prévoyant un soutènement convenable en place (provisoire ou immédiat), des boulons ou des treillis soudés associés au béton projeté ou cintré; on exécute ensuite la partie inférieure. Comme matériel de creusement on utilise un tunnelier et une pelle hydraulique.

3.2.3. Creusement en section divisée:

Cette méthode peut-être recommandée pour des terrains présentant une stabilité insuffisante du front de taille; le creusement se réalise par parties en partant d'une ou de deux galeries.

Suivant la géologie du terrain, on peut donc distinguer:

- des tunnels exécutés en terrain rocheux;
- des tunnels exécutés en terrain meuble.

L'emplacement de l'ouvrage qui nous intéresse se situe dans la marne, terrain meuble et peu consistant; ce qui annihile les techniques de creusement à l'explosif, du bouclier ou du tunnelier

Les raisons qui prévalent pour les dernières techniques écartées sont: grandes dimensions, frais considérables, main d'oeuvre spécialisée, etc.. Ce qui explique que l'on ait opté pour un creusement mécanique en demi-section à l'aide de pelle hydraulique (pelle mécanique ou engin mécanique de creusement).

Le Choix d'une machine de foration s'effectue en fonction:

- . de la dureté de la roche;
- . de la section de l'ouvrage;
- . du mode de creusement;
- . du rendement.

On utilise le "Boomer H175", équipé de deux bras hydrauliques, de type "BUT 35".

Quant au choix du type d'explosifs, comme moyen de mise à feu, on l'utilise comme procédé de découpage de la roche. [11].

Le creusement à l'explosif est utilisé comme un moyen de découpage de la roche. [11]

Le choix de l'explosif dépend:

- . de la densité des roches;
- . du type de travail à exécuter;
- . des conditions intervenant pendant le creusement;
- . des effets induits sur la surface.

Dans le cas du métropolitain, le choix s'est porté sur la gélanite 1/30, qui correspond à une fissuration minimale du rocher en parements, permettant un découpage de la roche proche du profil théorique, avec une fracturation suffisante des produits de mariage. A cet effet, un plan de tir doit-être établi.

La première étape d'un plan de tir consiste à créer une cavité initiale, en direction de laquelle se produit l'abattage. La section est ensuite élargie par étapes successives avec les forages de dégressage. Enfin, le découpage du parement en voûte, pied-droit et radier se fait par forages de réglage et de relevage.

L'extraction; dans le cas du métropolitain, se réalise par la nouvelle méthode autrichienne (NMAT) de construction de tunnels caractérisée par:

- la possibilité de limiter la décompression du terrain au voisinage de l'excavation, en travaillant en sections partielles avec un plan de tir finalement calculé, ou même par excavation mécanique en milieu rocheux par utilisation de diverses machines.

- le partage en sections partielles de la section supérieure, s'effectue de deux manières, selon la géologie locale (front de taille), et la mise en place rapidement du soutènement.

- le but de ce soutènement consiste à garantir la stabilité de l'excavation, en créant un anneau porteur constitué par le terrain armé.

- une conique mince du béton projeté (5 à 25 cm) de treillis soudés protège le terrain contre toute altération.

- / éventuellement, des cintres légers coulissants renforcent la conique du béton projeté.

- l'ensemble permet donc au terrain de participer au soutènement de la zone de la formation d'une voûte monolithique (revêtement et terrain). Le terrain devient ainsi autoporteur.

Les avantages de la méthode "NMAT" sont les suivants:

- mise en oeuvre rapide du soutènement;
- revêtement souple et continu;
- contrôle d'un comportement du terrain en cours d'exécution;
- apport d'un confinement stabilisateur.

Les limites techniques de la méthode "NMAT" dans les quatre cas principaux se résument ainsi:

- les venues d'eau excessives empêchent la mise en oeuvre du béton projeté;
- la terre est trop peu cohérente;
- l'efficacité du boulonnage est insuffisante;
- la terre est trop hétérogène.

Dans le "lot 5" du métropolitain qui nous intéresse, à savoir une zone dite broyée à prédominance marneuse, il est nécessaire de procéder aux opérations et choix de soutènement suivants:

a /- projection de béton:

Le béton projeté légèrement armé de treillis soudés constitue un soutènement continu parfaitement solidaire du terrain.

De plus, le béton projeté est d'une mise en oeuvre très rapide quelle que soit la section abattue, constituant une protection du massif contre toute forme d'altération.

La machine utilisée pour la projection et le transport du béton est à rotor, de type "MJXJET PVS 6".

b /- Boulonnage:

Le boulonnage est utilisé pour augmenter la résistance du terrain. Il sert généralement à maintenir les treillis soudés sur le massif.

Durant l'implantation, le boulon se dilate sous l'effet de la pression élevée d'eau, épousant les irrégularités du trou. L'injection de l'eau se fait à l'aide d'une pompe à haute pression.

Faisant suite à une étude détaillée des différents types de boulon existant, le choix a désigné le "boulon SWELLEX".

c /- Marinage:

Au niveau du métropolitain d'Alger, on stocke les déblais sur les bords du tunnels après les travaux de tir.

Pour la section supérieure, on utilise un excavateur à godets, de type "TORO 150 D".

Pour la demi-section inférieure, ce sera l'excavateur à godets, de type "TORO 400 D", qui est choisi.

d /- Définition et choix du soutènement:

Tout dispositif ou procédé, permettant d'assurer la stabilité des parois d'une cavité souterraine durant la période qui s'écoule entre le début de son excavation et la mise en place du revêtement définitif, porte le nom de soutènement. Les critères qui régissent ce choix sont les suivants:

- critères relatifs au terrain encaissant;
- critères relatifs à l'ouvrage et à son mode d'exécution;
- considérations économiques.

II.3.2.1 - Classification des modes de soutènement:

Selon leur mode d'action par rapport au terrain, on peut distinguer quatre classes principales de soutènement:

a/ soutènement agissant à l'aide de supports, assurés par:

- des cintres lourds;
- des cintres légers;
- des plaques métalliques assemblées;
- des voussoirs;
- des boucliers.

b/ soutènement agissant par confinement du terrain encaissant; il s'agit essentiellement:

- de béton projeté seul;
- de béton projeté associé à des cintres légers;

c/ soutènement agissant à la fois par confinement et comme armature du terrain encaissant; il s'agit:

- de boulons à ancrage ponctuel (à coquille ou à la résine);
- de boulons à ancrage réparti (scellés à la résine ou au mortier);
- de barres foncées.

d/ soutènement agissant par consolidation; caractérisé par la modification des caractéristiques géotechniques ou

hydrauliques du terrain, il s'agira :

- d'injection de consolidation;
- d'air comprimé;
- de congélation.

II.3.2.2 - Choix du soutènement :

a/ Les cintres: ce sont des profilés métalliques en I, H, U...etc. Ils constituent une ossature en forme d'arc ou de portique, disposée selon la section transversale du tunnel.

Les cintres les plus usités en travaux souterrains sont les cintres à profilés métalliques HEB, IPN, IPE.

La qualité du blocage du cintre avec le terrain est un facteur prédominant, justifiant son rôle de soutènement; le blocage est assuré actuellement avec du béton projeté armé de treillis soudé. Cette méthode de soutènement a pour effet de limiter la décompression du terrain après excavation, tout en augmentant l'efficacité du soutènement.

On distingue généralement deux types de cintres:

- 1 / le cintre léger;
- 2 / le cintre lourd.

1 / Les Cintres légers: ils présentent une capacité de portance limitée et une grande déformabilité. Ils sont composés de plusieurs pièces (3 à 5 pièces) pour des sections en fer à cheval de 4 à 6 pièces pour des sections circulaires.

2 / Les cintres lourds: ils sont utilisés comme cintres de soutènement ou de renforcement; si on considère leur inertie importante, ils peuvent ralentir ou limiter les déformations du terrain encaissant; ils ne se déforment pas, pouvant être sujets à une rupture brutale si la pression exercée par le terrain sur eux dépasse sa résistance limite.

Nous présentons dans le tableau (5) le mode d'utilisation des cintres, de type "HEB", en se référant à la classification de l'"AFTES N° 14":

PROFILES	DIAMETRE DU TUNNEL
H E B 120	2,5 à 5 mètres
H E B 140	4 à 8 m.
H E B 180	7 à 10 m.
H E B 220	9 à 12 m.

Tableau 5 : Utilisation des profilés "HEB" en fonction du diamètre du tunnel, d'après la classification "AFTES N° 14".

b / Les voussoirs préfabriqués:

Ce sont des éléments préfabriqués en béton armé ou en fonte. On les utilise pour le creusement de tunnels à l'aide de machine à attaque globale, ou encore pour le creusement de tunnels au moyen d'engin à attaque ponctuelle avec bouclier. Un anneau de voussoirs comporte le plus souvent 6 à 10 voussoirs, dont un en clé.

Ainsi, les caractéristiques mécaniques du terrain sont insuffisantes pour prendre en considération le soutènement par boulonnage. Il en est de même pour le soutènement par voussoirs, s'avérant difficile, car adopté dans les ouvrages de forme circulaire, ce qui implique que le choix de cintres légers soit avantageux.

Comme soutènement, les cintres, seuls ou avec du béton projeté, sont essentiellement réservés aux terrains, ne présentant pas des caractéristiques mécaniques suffisantes (de faible cohésion).

Les avantages d'un tel choix, portant sur le type "HEB 180", sont: une grande déformabilité et une assez bonne capacité de portance. (Tableau 5).

Si on considère l'aspect évolutif des travaux préliminaires, qui peut-être envisagé dans des zones marneuses, on pourrait considérer que l'attaque du tunnel se fera à partir d'un ouvrage de ventilation ("Vincent"); le creusement d'une galerie transversale dans le futur tunnel au niveau de la gaine de ventilation

a donc été envisagé. A cet effet, on serait appelé éventuellement à suivre les phases suivantes:

- Phase I :

Cette 1^{ère} phase comporte différentes opérations, à savoir:

- le creusement d'une galerie latérale (futur appui rigide); le creusement de la galerie, d'un diamètre équivalent à 2m, se fera au moyen d'un marteau piqueur; quant à l'excavation des déblais, elle se réalisera à l'aide du TORO 150 .

- le Soutènement successif de la galerie.
- le bétonnage de cette galerie en marche arrière.
- puis les mêmes opérations pour la seconde galerie.

(Annexe: A.VI-VII-VIII-IX).

- Phase II :

On réalise le creusement à l'aide d'une pelle hydraulique, puis on pose le soutènement pour la demi-section supérieure.

La pose de chaque cintre est suivie d'une projection de béton sur la surface de la paroi entre deux cintres.

Les cintres devront être posés directement sur les appuis rigides déjà réalisés; (Annexe: A.X-XI).

- Phase III :

Arrivés au niveau du radier et en fin d'appui rigide, le soutènement de la demi-section supérieure se fera en devancement de deux cintres appuyés sur une poutre d'appui en console. (Annexe: A.XII-XIII).

- Phase IV :

Réalisation du soutènement de la demi-section inférieure, formant un anneau fermé. (Annexe: A.XII-XIII).

- Phase V :

On procède au ferrailage, coffrage et bétonnage du radier, après avancement des travaux du soutènement d'un plot (de longueur: 12,50m); (Annexe: A.XIV-XV).

Notons que le ferrailage est composé de cages d'armatures préfabriquées dans des ateliers en surface.

A la reprise de bétonnage entre radier et voûte, on place un joint water-stop. Le tunnel est composé de pilots de 12,50m de longueur, séparés par des joints water-stop parasismiques.

- Phase VI :

On réalise le ferrailage, le coffrage et le bétonnage de la voûte; (Annexe: A.XIV-XV).

- **Phase VII :**

On réalise les opérations suivantes:

- Creusement de la rampe;
- Soutènement de la demi-section inférieure;
- Ferrailage, coffrage et bétonnage du tronçon de la rampe; (Annexe: A.XVI).

II.4. Influence des travaux souterrains sur l'environnement urbain:

La mise en place d'ouvrage souterrain a pour effet de provoquer des mouvements de surface influant sur l'environnement. [7]

Il est important d'une part de prévoir ces mouvements de la façon la plus précise possible en fonction de l'évaluation prévisible des travaux, et, d'autre part, d'en contrôler en permanence l'évolution par des mesures d'arpentage des mines.

II.4.1 - Organisation des observations pendant les déformations des édifices de surface:

Avant le début des travaux, sur le plan à l'échelle au 1:500, on délimite le territoire englobant la zone de déformation possible; on forme ensuite le schéma de disposition des repères, destinés à l'enregistrement de l'affaissement. Ces repères portent le nom de "repères de déformation". On forme en même temps un programme d'observations. En fonction de ce programme, on observe systématiquement ces repères par le nivellement, ce qui nous permet d'obtenir des données de déformation de la surface et des édifices.

Les repères de déformation sont indiqués près des angles principaux des bâtiments, numérotés à la peinture à l'huile.

Pour les nivellements primaires et répétitifs des repères de déformation, on a établi des écarts admissibles:

- les différences dans la dénivelée, mesurée à deux reprises, ne doivent pas dépasser plus ou moins 3 mm.
- l'écart de fermeture dans le cheminement fermé est:

$$f_n \leq 3 \sqrt{n} \quad (n: \text{nombre de stations}).$$
- les écarts dans les marques de repère des déformations, provenant du premier et du second nivellements, ne doivent pas dépasser 5 mm. [8]

Les mesures d'arpentage des mines permettent de constater l'existence:

- . de l'affaissement;
- . du déplacement;
- . de la déformation.

Les tassements de surface ne sont pas identiques aux déformations des bâtiments. Pour cela, on dispose de repères de déformation sur l'axe du tunnel et, en surface, sur les édifices.

II.4.2 - Méthodes de mesure:

- Le nivellement direct consiste à déterminer la différence d'altitudes (dénivelées) à l'aide d'un appareil (niveau), permettant de matérialiser un plan de visée horizontal, et d'une mire verticalement placée sur les deux points.

Les observations des points se réalisent soit par le cheminement encadré, soit par un cheminement fermé, appuyées sur les points connus de la base d'appui du métropolitain.

L'écart de fermeture tolérable est:

$$f_{h.tol.} = \pm 20 \sqrt{D}$$

D: distance totale du cheminement.

- matériels utilisés:

- . le niveau, de type "WILD 2", dont la précision est de 0,01mm, en nivellement de précision.
- . une mire à double graduation;
- . une mire ordinaire.

Remarquons que ces mesures d'arpentage des mines, destinées à l'appréciation de la répercussion des travaux d'emplacement des ouvrages métropolitains sur l'environnement, doivent être accompagnées par l'établissement de stations d'observation sur la convergence dans les galeries.

CHAPITRE III

ANALYSE DE LA BASE

"GEOMETRIQUE ET TECHNIQUE"

D'IMPLANTATION

III.1- Généralités-

Une campagne topographique, qui a débuté en 1982, avait pour objectif l'établissement de plans d'étude à l'échelle du 1/500, couvrant l'ensemble des rues, parcelles et terrains.

En respectant le principe fondamental d'exécution des travaux topographiques, tout en considérant les plans général et détaillé, les géomètres ont construit une base géométrique composée de points de : "1"; "2".

1.1 / Canevas géodésique d'appui général:

En Algérie, l'institut national de cartographie (I.N.C) est responsable de l'établissement et de la conservation des points de repère, sur lesquels doivent s'appuyer tous les levés géodésiques, cartographiques et topographiques. L'ensemble de ces points, répartis sur tout le territoire du pays, constitue le canevas géodésique.

1.2 / Canevas géodésique local:

Le canevas géodésique local est un ensemble de points bien répartis sur la surface à lever, dont les positions relatives sont déterminées avec une précision au moins égale à celle que l'on attend du levé. Ces points servent d'appui au levé des détails.

III.2- Méthodes d'établissement de la base d'appui-

2.1 / Canevas géodésique général:

En Algérie, le canevas géodésique général est l'ensemble des points, déterminés soit en coordonnées "Lambert", soit en coordonnées "U.T.M" (Universal, Transverse, Mercator) par le procédé de triangulation. [14]

On choisit donc sur le terrain des points caractéristiques visibles entre eux; on les relie par des visées formant des triangles, dont on mesure les angles au théodolite.

Afin de conserver une précision constante sur toute l'étendue du levé, on commence d'abord par un réseau de triangles dits de premier ordre, dont la longueur des côtés est d'environ 40 Km, avec une précision maximale de mesure angulaire de 1 à 2 dmgr.

A l'intérieur du réseau du premier ordre, on en observe un de second ordre, dont les longueurs de côtés varient de 10 à 15 Km; puis survient un réseau de troisième ordre, dont les longueurs de côtés varient de 8 à 10 Km.

La densité des points de premier, second et troisième ordres a été d'un point tous les 20 Km². [16].

Pour satisfaire les besoins publics en Algérie depuis 1960, on a été amené à appuyer sur les trois ordres précédents un réseau géodésique de quatrième ordre, dont les longueurs de côté varient entre 3 et 5 Km.

Au fur et à mesure que les longueurs des côtés diminuent, on peut abaisser la précision des mesures d'angles.

La densité moyenne de l'ensemble des quatre réseaux de premier, second, troisième et quatrième ordre s'élève à un point géodésique tous les 8 à 9 Km².

Cependant, la mesure des angles ne suffit pas pour avoir la grandeur des figures, leur orientation et leur position sur la surface terrestre. Des opérations supplémentaires sont donc nécessaires.

2.1.1 /- Mesure et orientation d'une base:

Le côté de la figure, choisi pour base, est mesuré directement à l'aide d'un instrument de mesure électronique des longueurs; cet appareil prendra deux mesures indépendantes au minimum, avec un intervalle de temps de six heures et une erreur moyenne relative de 1/10⁶, soit 1 cm pour 10 Km. [20].

Des mesures d'angle permettent de rattacher la base "AB" un côté "CD" de la triangulation; de la longueur "CD", on déduit les longueurs des côtés du triangle "CDE".

Si on assimile celui-ci à un triangle sphérique, on a :

$$\frac{\sin \widehat{CD}}{\sin \widehat{E}} = \frac{\sin \widehat{CE}}{\sin \widehat{D}} = \frac{\sin \widehat{DE}}{\sin \widehat{C}}$$

puis de proche en proche, les longueurs de tous les autres côtés de la triangulation. (fig.14).

Connaissant la forme, la grandeur du réseau, il faut en outre pouvoir le situer sur la surface terrestre et l'y orienter.

2.1.3 /- Rayons de courbure principaux de l'ellipsoïde:

a)- rayon de courbure de la section méridienne:

$\rho = AC$ (petite normale);

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^3}}$$

b)- rayon de courbure de la section normale:

$A_j = N$ (grande normale);

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}$$

2.1.4 /- Passage de la surface topographique à l'ellipsoïde:

En réalité, les géodésistes effectuent leurs mesures sur la surface topographique; tous les points qu'ils déterminent sont projetés sur l'ellipsoïde de référence de "Clark". Les longueurs

mesurées doivent être corrigées: (fig.16)

1. réduction à l'horizon du lieu, de "AB" en "AB'";
2. projection sur l'ellipsoïde de référence, de "AB'" en "ab".

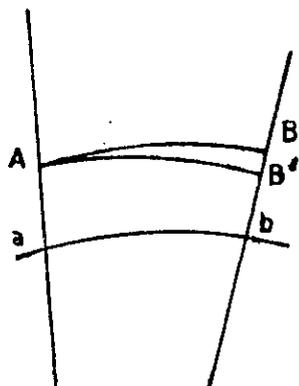


Figure 16 : réduction des distances et projection sur l'ellipsoïde de référence.

2.1.5 /- Passage de l'ellipsoïde sur le plan:

Un système de projection, ou mieux, "un système de représentation" permet de transférer des coordonnées géographiques, " λ, φ ", sur l'ellipsoïde à des coordonnées planes " x, y ", en appliquant les deux relations suivantes:

$$x = f(\lambda, \varphi);$$

$$y = f(\lambda, \varphi).$$

Le choix des fonctions détermine le système de projection et ses propriétés.

En Algérie, on n'emploie que le système de représentation conforme, qui conserve les angles et la similitude des figures infiniment petites. [15].

Lors de la campagne de reconnaissance, le service de géodésie de l'Institut National de Cartographie ("I.N.C") a fourni au métropolitain d'Alger trois types de point de calage: [14]

- points géodésiques anciens;
- points de stéréopréparation;
- points géodésiques dits "nouveaux", déterminés récemment par l'"I.N.C" en "U.T.M" (Universal Transverse Mercator). C'est une représentation conforme de l'ellipsoïde sur un cylindre circonscrit le long d'un méridien dit "central"; puis, il y a développement de ce cylindre sur le plan. Le méridien "central" est transformé en une droite, que l'on considère comme axe des "y". L'Equateur est représenté par une droite, que nous choisirons pour axe des "x".

Les géodésistes, à qui on a confié la préparation du plan général du métropolitain, ont choisi le système de projection "LAMBERT" pour établir la base d'appui de tous les travaux d'implantation.

A cet effet, les coordonnées initiales, déterminées en "U.T.M", ont été recalculées dans le système de projection "LAMBERT". Toutes les coordonnées du métropolitain sont donc dans le système de projection "LAMBERT".

a / La projection "LAMBERT":

C'est la représentation conforme de l'ellipsoïde terrestre sur un cône circonscrit le long d'un parallèle origine de latitude " φ_0 ", suivi du développement de ce cône sur le plan. [15]. (fig.17). Soient:

- "O" - le point origine de la projection;
- "PDOE₁P₁" - le méridien origine;
- "OB" - le parallèle origine de latitude " φ_0 ", (ligne de contact de la surface du cône avec l'ellipsoïde)

$$r_0 = N_0 \cdot \cos \varphi_0;$$
- "Bj" - Grand normal, correspondant à cette latitude, égal à:

$$N_0 = a / \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_0} ;$$

- "A"- Point quelconque de latitude " φ_A " et de longitude " λ_A ", se situant sur l'ellipsoïde;
 - "A' et A'' " - Points infiniment voisins du point "A", respectivement situés sur le méridien et le parallèle du point "A". $r_A = N_A \cdot \cos \varphi_A$;
- Sur le plan de projection (Fig.17) :

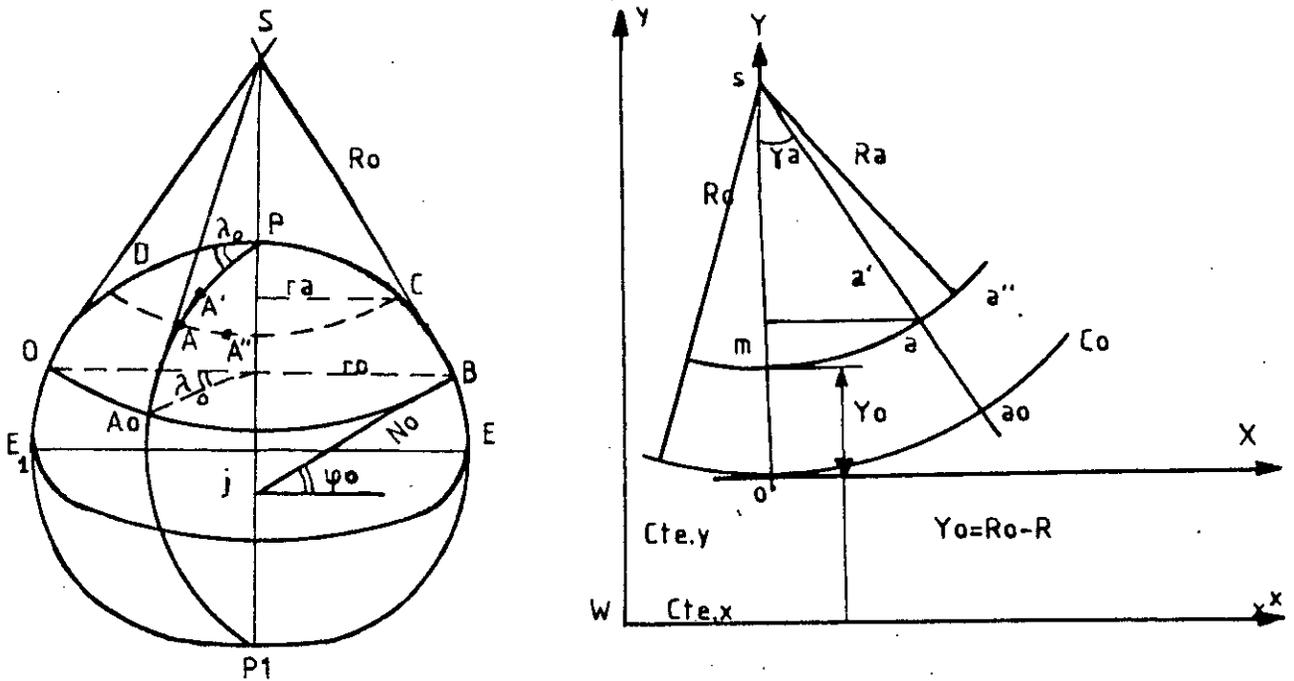


Figure 17: Représentation graphique de la projection "LAMBERT".

- "o" - Image du point origine "O" du système de coordonnées "X,Y". Le cercle de base du cône se développe suivant un cercle (C_0), de rayon R_0 égal à l'apothème de ce cône:

$$R_0 = N_0 \cdot \cotg \varphi_0$$

L'arc du méridien origine "PO" est représenté par "SO", qui est pris pour axe des "Y". Le méridien de "A" est représenté par un rayon "sa₀" du cercle "C₀":

$$\widehat{a_0 O_{\text{plan}}} = \widehat{A_0 O} \text{ sur ellips.}$$

Le parallèle de "A" est représenté par un cercle de rayon $R = sa$. Il résulte que:

- 1)- les méridiens sont représentés par des droites concourantes au point "s".

2)- les parallèles sont représentés par des cercles concentriques, ayant "s" pour centre.

3)- les longueurs mesurées sur terrain sont conservées sur le parallèle origine (ligne de contact).

a.1/- La projection "Lambert" en coordonnées polaires:

La position d'un point sur le plan de projection peut être déterminée en coordonnées polaires à l'aide de deux paramètres: "γ" et "R".

- Calcul de "γ" en fonction de "φ" et de "λ":

"γ": \widehat{oa}_0 est appelé "convergence des méridiens".

D'après le principe de la projection "Lambert", les distances (ou longueurs) mesurées sur le terrain sont conservées sur le parallèle origine.

$$\widehat{oa}_0 = \widehat{OA}_0, \quad (\text{fig.17})$$

$$\gamma = \widehat{oa}_0 = \frac{\widehat{oa}_0}{R_0}; \quad \widehat{OA}_0 = r_0(\lambda - \lambda_0) = R_0 \cdot \sin \varphi_0 (\lambda - \lambda_0)$$

$$\gamma = \frac{R_0 \cdot \sin \varphi_0 (\lambda - \lambda_0)}{R_0} = (\lambda - \lambda_0) \cdot \sin \varphi_0.$$

Où: r_0 : rayon du parallèle origine de latitude " φ_0 ";
 λ : longitude du point considéré "A" ("P" par rapport à "o") origine.

- Calcul de R en fonction de φ et λ:

Pour assurer la conformité de la projection, l'échelle ne doit pas varier quelque soit la position du point considéré; c'est-à-dire que pour chaque point, le rapport des longueurs est constant et indépendant de la direction considérée.

L'échelle est donc la même dans deux directions rectangulaires: celle des méridiens et celle des parallèles.

$$e = \frac{aa'}{AA'} = \frac{aa''}{AA''}; \quad \begin{array}{ll} aa' = dR & aa'' = R \, d\gamma \\ AA' = \rho \, d\varphi & AA'' = r \, d\lambda \end{array}$$

- " ρ " est le rayon de courbure de l'ellipse méridien, passant par le point "A";
- " r " est le rayon du parallèle du point "A".

$$(r = N_i \cdot \cos \varphi_i)$$

$d\gamma = d\lambda \cdot \sin \varphi_0$, on a:

$$\frac{aa''}{AA''} = \frac{R \, d\gamma}{r \, d\lambda} = \frac{R \cdot \sin \varphi_0}{N_i \cdot \cos \varphi_i};$$

$$\frac{aa'}{AA'} = \frac{dR}{\rho \, d\varphi};$$

d'où, la relation différentielle.

$$\frac{dR}{\rho \, d\varphi} = \frac{R \cdot \sin \varphi_0}{N_i \cdot \cos \varphi_i}, \text{ soit : } \frac{dR}{R} = - \sin \varphi_0 \cdot \frac{\rho \cdot d\varphi}{N \cdot \cos \varphi};$$

L'intégration entre " R_0 " et " R " et " φ_0 " et " φ " donne:

$$\ln R - \ln R_0 = - \sin \varphi_0 \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{\rho \, d\varphi}{N \cdot \cos \varphi};$$

$$\int_0^{\varphi} \frac{\rho \, d\varphi}{N \cdot \cos \varphi} = L, \quad (\text{intitulée Latitude isométrique}).$$

La Latitude isométrique est calculée par la relation suivante:

$$L_i = \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_i}{2} \right) + \frac{e}{2} \cdot \ln \left\{ \frac{1 - e \cdot \sin \varphi_i}{1 + e \cdot \sin \varphi_i} \right\};$$

Où: " e " est la première excentricité de l'ellipsoïde.

On obtient finalement:

$$\ln \frac{R_i}{R_0} = - (L_i - L_0) \cdot \sin \varphi_0;$$

$$R_i = R_0 \cdot e^{-(L_i - L_0) \cdot \sin \varphi_0};$$

a.2-/ La projection en coordonnées rectangulaires: (fig.17)

$$Y_0 = R_0 - R$$

$$X = R \cdot \sin \gamma = (R_0 - Y_0) \cdot \sin \gamma$$

$$Y = Y_0 + m = R_0 - R_a \cdot \cos \gamma$$

$$\text{ou, } Y = Y_0 + X \cdot \text{tg } \frac{\gamma}{2}$$

Pour éviter d'avoir des coordonnées négatives, on ajoute aux coordonnées "X" et "Y" des constantes:

$$x = X + 500.000 \text{ m.}$$

$$y = Y + 300.000 \text{ m.}$$

Il faut remarquer que l'implantation du projet du métropolitain se réalise dans la zone du système "LAMBERT" Nord algérien.

Le point origine a pour coordonnées:

- Latitude: " ϕ_0 " = 40 grades Nord;
- Longitude: " γ " = 3 grades à l'Est de "Greenwich".

Les valeurs de la Grande Normale, " N_0 ", de la petite Normale " ρ_0 ", de " R_0 ", correspondant au parallèle origine " ϕ_0 " du système "LNA" suivant l'ellipsoïde de "Clark", sont les suivantes:

$$a \qquad 6378249,145$$

$$1) N_0 = \frac{a}{1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi_0} = \frac{6378249,145}{1 - 0,006803511 \cdot \sin^2 \phi_0} = 6385758,6 \text{ m;}$$

$$2) \rho_0 = \frac{a (1 - e^2)}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi_0)^3} = N_0 (1 - e^2) (1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi_0)^{-1} =$$

$$\rho_0 = 6357256,103 \text{ m;}$$

$$3) R_0 = N_0 \cdot \cotg \phi_0 = 8789242,686 \text{ m.}$$

La latitude isométrique, correspondant au parallèle origine, est désignée par " L_0 ", soit:

$$L_0 = \ln \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{e}{2} \ln \frac{1 - e \sin \varphi_0}{1 + e \sin \varphi_0} = 0,670273336.63,6620 =$$

$$L_0 = 42,6709 \text{ gr.}$$

Sachant que "e" est l'excentricité.

b / Echelle et altération en projection "LAMBERT":

L'ellipsoïde n'est pas applicable sur le plan sans qu'il y ait déformation au niveau des longueurs (ou distances).

Soit "AA'", un élément de longueur sur l'ellipsoïde, auquel correspond, sur le plan, l'élément "aa'".

$$\begin{aligned} \text{L'échelle s'exprime ainsi:} & \quad aa' \\ & \quad e = \frac{aa'}{AA'} ; \end{aligned}$$

Pour les projections conformes, ce rapport ne dépend que de la position du point "A", tout en étant indépendant de l'orientation de l'élément "AA'".

L'altération de la longueur dans la représentation est représentée par le quotient:

$$\Sigma = \frac{aa' - AA'}{AA'} = e - 1$$

Dans la projection "Lambert", il existe une ligne pour laquelle les distances sont conservées; c'est le centre de projection où l'échelle est : $e = 1$; quant à l'altération: $\Sigma = 0$.

Au niveau de la bordure du champ de projection, nous avons donc une altération maximale, " Σ_m ", à laquelle correspond l'échelle

$$e_m = 1 + \Sigma_m.$$

En multipliant toutes les coordonnées planes par un coefficient de réduction approprié, on obtient un nouveau rapport de similitude en chaque point.

L'échelle réduite est le produit : $e_{\text{réduite}} = K \cdot e_{\text{réelle}}$.

Σ

Si on prend : $K = \frac{1}{2}$, au niveau de la bordure, l'échelle

2

réduite devient:

$$e_{réduite} = (1 - \frac{\Sigma}{2}) (1 + \frac{\Sigma}{2}) = 1 - \frac{\Sigma^2}{2}$$

Or, $\frac{\Sigma^2}{2}$, est de l'ordre de grandeur de $(\frac{\Sigma}{2})^2$; ce qui donne une altération linéaire de : 10^{-5} cm/Km, ce qui est pratiquement négligeable.

$$\text{Sur le centre de projection, } e_{réduite} = 1 - \frac{\Sigma^2}{2}$$

Pour avoir un champ d'application de la projection le plus grand possible avec une altération maximale acceptable, on doit fractionner le territoire en zone "Lambert", dont les parallèles origines sont différents.

En Algérie, deux systèmes "Lambert" sont utilisés.

Pour le Nord-Algérie ($\phi_0 = 40$ gr., $\lambda_0 = 3$ gr. Est G).

L'échelle est donnée par la formule:

$$e = \frac{R \cdot \sin \phi_0}{N \cdot \cos \phi}$$

Après réduction, on obtient les échelles et l'altération suivantes pour le système "LAMBERT" Nord algérien.

	ECHELLE	ALTERATION
Bordure	$1 + \frac{\Sigma_m}{2} = 1,003745$	$\Sigma = + 37,45$ cm/Km
Pseudo-centre	1	$\Sigma = 0$
Centre	$1 - \frac{\Sigma_m}{2} = 0,999625544$	$\Sigma = - 37,45$ cm/Km
Pseudo-centre	1	$\Sigma = 0$
Bordure	$1 + \frac{\Sigma_m}{2} = 1,003745$	$\Sigma = + 37,45$ cm/Km.

On démontre que dans le système "Lambert", pour une latitude " ϕ ", l'altération réelle vaut:

$$\epsilon_{réelle} = \frac{(R - R_0)^2}{2 N_0 \rho_0}$$

" Σ " est une fonction de la distance du point au centre de la projection.

" Σ " s'écrit aussi:

$$\Sigma = \frac{(Y_0 - cte Y)^2}{2 N_0 \rho_0}$$

" ρ_0 " et " N_0 " sont la petite Normale et la grande Normale du point considéré.

Soient:

- "R" - le rayon de courbure moyenne de l'ellipsoïde au point considéré;
- "R₀" - la valeur réelle (non réduite) et constante pour une zone de projection "Lambert".

Nord: R_{0,réd.} = K.R_{0,réelle}, puisque "R₀" à l'échelle 1, après réduction, devient:

$$1.K = e_{réd.}$$

$$R_0 = 8785951,541 \text{ m.} \quad K_0 = 0,999625544.$$

si: $e_{réd.} = 1;$ $e_{réelle} = 1/K.$

Pour éviter les calculs des valeurs de "L" et "R" avec des relations encombrantes, on les remplace par la valeur:

$$Y_0 = cte Y + R_0 - R ;$$

qui est donc aussi fonction de la latitude " ϕ ", fixant la valeur réduite; par conséquent: (fig.18)

$$(R_0 - R)_{réelle} = \frac{(R_0 - R)_{réduite}}{K_0} = \frac{(Y_0 - cte Y)}{K_0} ;$$

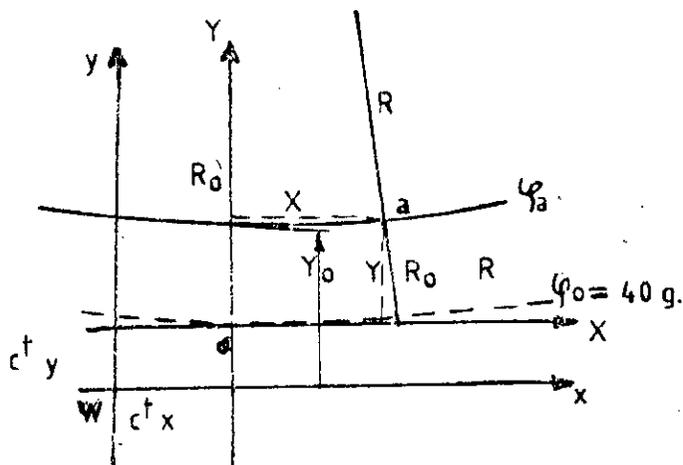


Figure 18 : Projection "LAMBERT" sur plan.

L'altération réelle peut être calculée approximativement par la relation suivante:

$$\Sigma = \frac{Y^2}{2 R_0^2} ;$$

Cette formule donne une valeur approchée suffisante, si le point "a" n'est pas trop éloigné du méridien central " λ_0 " (de l'axe des Y), où la valeur des "X" est faible, comme dans le cas du métropolitain.

$$40,7 < \varphi < 40,9$$

$$R_0 = \sqrt{N_0 \cdot \rho_0} = 6371,491 \text{ Km. (avec } \varphi_0 = 40 \text{ gr.)}$$

$$2 N_0 \rho_0 = 811918 \cdot 10^5 \text{ Km.}$$

$$\text{En fait, } 2 N_0 \rho_0 K_0^2 = 811,3101149 \dots = 811,310 \cdot 10^5$$

L'échelle réduite est donnée au métropolitain par la formule simplifiée et acceptable. [14].

$$e_{\text{réd.}} = K[1 + (Y - Y_0 \text{ Km.})^2 / 811,918 \cdot 10^5]; \text{ avec } K = 0,999625.$$

La projection "LAMBERT" convient bien pour représenter à grande échelle (au 1/10.000) la zone étendue en longitude de la triangulation du métropolitain. De plus, sa position à proximité du parallèle origine, centre de la zone Nord algérien, diminue les déformations des distances .

On remarque qu'en projection "U.T.M", l'altération maximale est de 1/1000, tandis que dans les systèmes de projection "LAMBERT" algérienne, elle atteint tout au plus 0,374/1000, [16]; ce qui signifie qu'une distance de 1000m. sur terrain peut donc être représentée, en projection "LAMBERT", par une longueur de: 1000,374m

Contrairement à la projection "LAMBERT", celle de l'"U.T.M" semble favorable à la représentation de régions étendues en latitude. Ce système international, conforme, représente la surface terrestre entre les latitudes 80° N et 80° S, divisées en 60 fuseaux identiques, de 6° de longitude, numérotés de 1 à 60 d'Ouest en Est, dont quatre concernent l'Algérie: 29,30,31,32.

Chaque fuseau est découpé en 20 zones, de 8° de latitude, identifiées par une lettre, qui suit l'ordre alphabétique du Sud vers le Nord.

C'est une représentation qui a l'avantage de procurer une solution globale au problème de la cartographie en général, à l'aide d'une seule table de projection, valable pour tout le globe. C'est l'avantage principal de la projection "U.T.M".

L'institut de cartographie utilise ce système pour l'élaboration de la triangulation de l'Algérie. Celle-ci est composée de trois réseaux de premier, de second et de troisième ordres indépendants; le problème de la compensation n'a pu être résolu à ce jour.

Comme données initiales pour le calcul de la base d'appui du métropolitain, on a pris en considération les points géodésiques en coordonnées "U.T.M". Celles-ci ont été recalculées dans le système de projection "Lambert", pouvant éventuellement engendrer certaines déformations. Quel que soit le système utilisé, les distances des côtés de la triangulation algérienne sont sensiblement déformées par des corrections sur la surface de l'ellipsoïde de référence, ainsi que sur le plan de projection. Leurs valeurs se distinguent visiblement de celles mesurées directement à la surface de la Terre, ce qui introduit des déformations dans les plans à grandes échelles, compliquant leur utilisation pour l'imp-

POINTS	FEUILLE	FICHE	COORDONNEES INSTITUT NATIONAL de CARTOGRAPHIE (I.N.C) - (mètre)		COORDONNEES METROPOLITAIN (mètre)	
			X	Y	X	Y
11 NE	20	51	526675. 06	381097. 10	526667. 838	381085 .996
11 SO	20	50	526667. 49	381086. 68	526675. 620	381096 .571
14	20	52	529679. 88	385335. 33	529680. 301	385335 .360
16	20	53	530625. 38	385879. 23	530625. 521	385679 .128
135	20	54	528377. 70	384548. 70	528377. 831	384548 .814
142	20	55	530133. 50	386799. 20	530133. 695	386798 .792
1	21	56	531877. 37	383062. 40	531877. 509	383062 .495
4	21	57	533085. 18	387451. 06	533085. 015	387451 .023
11	21	58	534924. 47	381681. 56	534924. 586	381681 .506
12	21	59	537886. 00	381524. 99	537886. 507	381525 .135
14	21	41	539825. 63	380312. 36	539826. 306	380313 .348
103	21	60	532283. 40	385889. 10	532283. 407	385889 .112
107	21	61	535348. 00	381405. 80	535348. 222	381405 .712
108	21	62	536578. 30	381159. 30	536578. 612	381159 .380
109	21	43	537335. 20	380347. 50	537335. 591	380347 .361
101	42	63	531818. 60	379775. 20	531818. 818	379775 .060
108	42	----	534455. 10	377255. 80	534455. 666	377255 .586
124	42	64	540548. 70	379051. 30	540549. 420	379051 .482
134	42	65	545447. 30	379767. 90	545448. 501	37976

Tableau 6 : Coordonnées de la base d'appui pour l'implantation du métropolitain.

lantation du métropolitain. (Tableau 6).

De plus, l'insuffisance de points géodésiques a nécessité l'élaboration d'un réseau de grande précision, destiné à l'exécution de ces travaux.

L'entreprise a choisi sa propre base d'appui locale, qui se compose:

- d'une microtriangulation;
- d'une polygonation:
 - a/ principale
 - b/. secondaire.

2.2. Canevas géodésique local:

Le canevas géodésique local, appuyé sur le réseau des points géodésiques de base, est destiné à élever la densité des points de rattachement requis par les travaux d'implantation du métropolitain. Ce canevas a été déterminé par le procédé de microtriangulation.

Afin de demeurer le plus près des points de base, fournis par l'"I.N.C", la triangulation du métropolitain a été adaptée sur la plus grande zone possible. Cette zone, qui va du "Palais du Gouvernement" à la cité "Mer et Soleil" en passant par le "Jardin d'essais", n'a pu être étendue au-delà en raison des imprécisions importantes, que cette extension aurait pu entraîner.

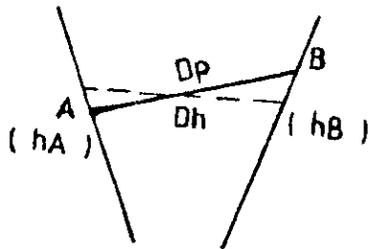
La chronologie des travaux est la suivante:

- Etablissement d'un avant-projet;
- Reconnaissance et choix de chaque point, se traduisant par l'élaboration du projet;
- Matérialisation durable des points;
- Observation- Angles mesurés au théodolite de précision, avec deux paires de séquence et centrage forcé;
- Calculs et élaboration de la documentation technique.

L'ensemble de la triangulation du métropolitain d'Alger a été déterminé par un calcul en bloc avec compensation par les moindres carrés.

Les mesures, pouvant être introduites dans le calcul, ont subi les corrections suivantes: [14]

-/ Les corrections des distances:



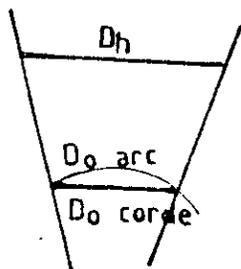
- réduction à l'horizontale:

$$\Delta h = h_b - h_a$$

$$D_h = D_p - \frac{\Delta h^2}{2 D_p}$$

Figure 19 : Réduction des distances.

- réduction à l'ellipsoïde:



$$D_{0 \text{ corde}} = D_h - \frac{h \cdot D_h}{R};$$

$$D_{0 \text{ arc}} = D_{0 \text{ corde}} + \frac{D_0^3}{24 \times R^2};$$

Figure 20 : Réduction des distances.

-/ Les corrections angulaires:

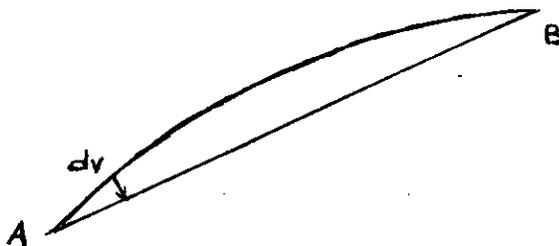


Figure 21 : Corrections angulaires en système "LAMBERT".

Une formule approchée donne: $dv = U \Delta X$,

avec :

$$U = \frac{Y}{2R_0^2}, \text{ ou } U = \frac{R - R_0}{2N_0 \rho_0 K_0^2};$$

Des tables nous donnent en "LAMBERT Nord Algérie" les valeurs de "U":

$$40,7 < \varphi < 40,9.$$

U dmg/ Km.	Nord Algérie φ , Gr.	dv < 3 dmgr. sur l'en- semble du chantier.
0,55	40,70	
0,59	40,75	
0,62	40,80	dv = U Δ x _{pm}
0,66	40,85	
0,70	40,90	

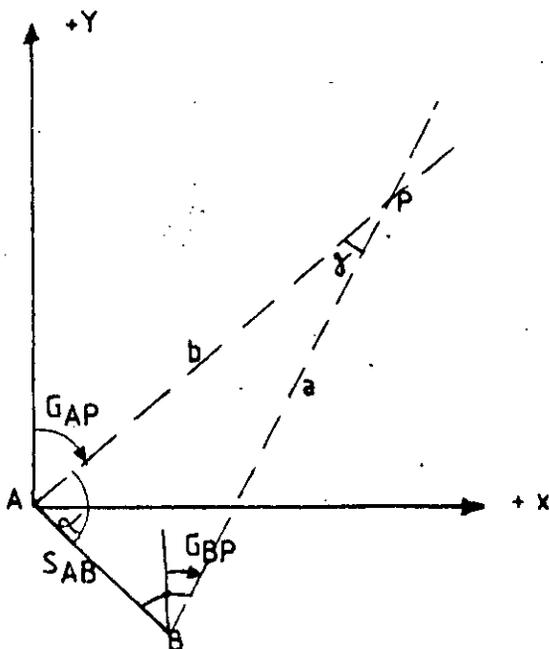
La triangulation du métropolitain d'Alger est celle de "cinquième ordre", s'avérant être une technique de multiangulation qui regroupe trois procédés:

- une intersection;
- un relèvement;
- un recouplement.

2.2.1/ Intersection:

a / Intersection: (fig.22):

la définition géométrique du point d'intersection "P" (MAI 2) est assurée par deux visées, issues des points d'appui général: "A(103/20)" et "B(16/20)", dont le gisement "G_{AB}" est:



$$\operatorname{tg} G_{AB} = \frac{X_B - X_A}{Y_B - Y} \rightarrow G_{AB}.$$

$$G_{AP} = G_{AB} - \alpha;$$

$$G_{BP} = G_{AB} + 200 \text{ gr.} + \beta;$$

Figure 22 : levé par intersection.

On peut aussi procéder de deux manières différentes:

a.1 - Résolution du triangle APB-

$$\frac{b}{S_{AB}} = \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha+\beta)};$$

La méthode comporte ensuite deux variantes selon l'imprimé utilisé:

- Calcul par étapes successives:

$$AB = S_{AB} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\sin \beta} \quad x_P = x_A + b \cdot \sin G_{AP}$$

$$AP = b = \frac{S_{AB} \cdot \sin(\alpha+\beta)}{\sin(\alpha+\beta)} ; \quad y_P = y_A + b \cdot \cos G_{AP}$$

- Calcul global:

La valeur " Δy " peut-être exprimée sous la forme:

$$\Delta y_{AP} = (y_B - y_A) \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos G_{AP}}{\sin(\alpha+\beta) \cdot \cos G_{AB}}; \quad \text{et:}$$

$$\Delta x_{PA} = \Delta y_{PA} \cdot \text{tg } G_{AP}.$$

a.2 - Calcul par les visées orientées d'intersection inversée-

$$\Delta y_{PA} = \frac{(x_B - x_A) - (y_B - y_A) \cdot \text{tg } G_{BP}}{\text{tg } G_{AP} - \text{tg } G_{BP}};$$

$$\Delta x_{PA} = \Delta y_{PA} \cdot \text{tg } G_{AP}$$

L'erreur de la position du point "P" est donnée par :

$$\Sigma_P = \pm \frac{\Sigma_p}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{AP^2 + BP^2}}{\sin \gamma}; \quad \text{ou en remplaçant}$$

"AP" et "BP" par leur expression dans le triangle "APB", on a:

$$\epsilon_P = \frac{\epsilon_B \sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}}{\rho \sin^2 \gamma} \cdot S_{AB}$$

* Intersection de plusieurs points. (Calcul de l'intersection par la méthode des moindres carrés) -

Certains nombres de points de la triangulation du métropolitain d'Alger sont déterminés par cette méthode.

Le point "310 EX (P)" est déterminé à partir des points géodésiques d'appui général: "A(11/20)", "B(107/21)", "C(110/21)", "D(117/42)".

L'intersection consiste en un :

- Calcul des coordonnées approchées du point "P" de manière quelconque. Puis, il s'agit de déterminer les corrections dx et dy des coordonnées approchées, et on calcule les valeurs les plus probables des coordonnées du point "P": (fig.23)

$$x_P = x_0 + dx; \quad - \quad Y_P = Y_0 + dy;$$

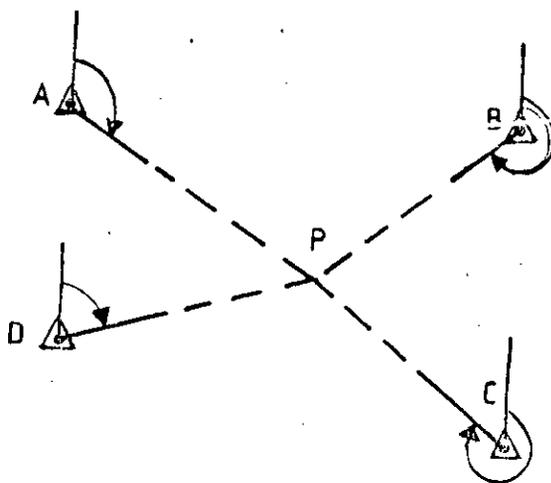


Figure 23 : Levé par intersection des moindres carrés.

- Calcul des coefficients des relations d'observation:

$$a_i = + \frac{(Y_0 - Y_i)}{S_{oi}^2} \cdot \rho; \quad b_i = - \frac{(x_0 - x_i)}{S^2} \cdot \rho;$$

$$S_{oi} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

Les valeurs de "G_i" calculées sont: $\text{tg } G_{i0} = \frac{x_0 - x_i}{y_0 - y_i}$.

Les valeurs de "l_i" sont: $l_i = G_{\text{cal.}} - G_{\text{obs.}}$

- Les déterminants à calculer les corrections dy et dx:

$$dy = \frac{Dy}{D}; \quad dx = \frac{Dx}{D}$$

$$D = [aa][bb] - [ab]^2 = \Sigma a_i^2 + \Sigma b_i^2 - (\Sigma a_i b_i)^2;$$

$$Dy = [ab][al] - [aa][bl] = (\Sigma a_i b_i \cdot \Sigma a_i l_i) - (\Sigma a_i^2 \cdot \Sigma b_i l_i);$$

$$Dx = [ab][bl] - [bb][al] = (\Sigma a_i b_i \cdot \Sigma b_i l_i) - (\Sigma b_i^2 \cdot \Sigma a_i l_i);$$

La vérification se fait de la manière suivante:

$$(\Sigma a_i^2) dx + (\Sigma a_i b_i) dy + (\Sigma a_i l_i) = 0;$$

$$(\Sigma a_i b_i) dx + (\Sigma b_i^2) dy + (\Sigma b_i l_i) = 0.$$

- Calcul des gisements, avec "x_p y_p" et les coordonnées des points d'appui.
- Calcul des corrections "v_i" des gisements observés: $v_i = a_i dx + b_i dy + l_i$.
- Calcul des gisements exacts: "G_{i,cal.} + v_i".

2.2.2/ Le relèvement-

Un point relevé en est un, stationné, à partir duquel l'opérateur effectue un tour d'horizon sur des points connus.

a / "Méthode de Delambre"- (fig.24).

Soient trois points connus:

"A" (x_A, y_A); "B" (x_B, y_B); "C" (x_C, y_C).

Les valeurs mesurées sont les angles: "α" et "β".

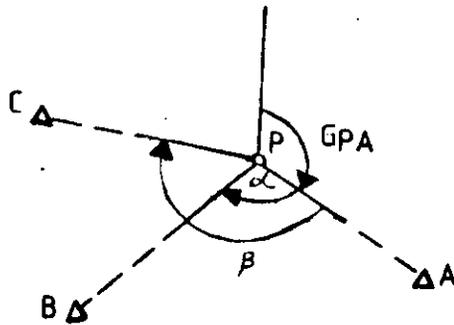


Figure 24 : Levé par relèvement.

Désignons le gisement de la direction [P ---> A] par " G_A ", celui de la direction [P -----> B] par " $G_B = G_A + \beta$ ".
Considérons le point "P" comme intersection, à partir des points "A" et "B".

La formule de l'intersection donne:

$$Y_P - Y_A = \frac{(x_B - x_A) - (y_B - y_A) \cdot \text{tg } G_B}{\text{tg } G_A - \text{tg } G_B};$$

$$\frac{1}{\text{tg } G_A - \text{tg } G_B} = \frac{\cos G_A \cdot \cos G_B}{\sin (G_A - G_B)} = \frac{\cos G_A \cdot \cos G_B}{(- \sin \alpha)};$$

Nous obtenons:

$$Y_P - Y_A = [(x_B - x_A) - (y_B - y_A) \cdot \text{tg } G_B] \cdot \frac{\cos G_A \cdot \cos G_B}{(- \sin \alpha)};$$

Ou alors:

$$Y_P - Y_A = [(x_C - x_A) - (y_C - y_A) \cdot \text{tg } G_C] \cdot \frac{\cos G_A \cdot \cos G_B}{(- \sin \beta)}$$

En égalant ces deux relations, nous aurons:

$$\frac{(x_B - x_A) \cdot \cos G_B - (y_B - y_A) \cdot \sin G_B}{\sin \alpha} = \frac{(x_C - x_A) \cdot \cos G_C - (y_C - y_A) \cdot \sin G_C}{\sin \beta}$$

En remplaçant " $G_B = G_A + \alpha$ " et " $G_C = G_A + \beta$ ", et, en divisant les deux membres par " $\sin G_A$ ", nous aurons:

$$[x_B - x_A][\cotg G_A \cdot \cotg(\alpha - 1)] + [y_A - y_B][\cotg \alpha + \cotg G_A] = \\ = [x_C - x_A][\cotg G_A \cdot \cotg(\beta - 1)] + [y_A - y_C][\cotg \beta + \cotg G_A];$$

Tirons $\cotg G_A$, puis $\tg G_A$:

$$\tg G_A = \frac{(x_B - x_A) \cdot \cotg \alpha - (x_C - x_A) \cdot \cotg \beta - (y_B - y_C)}{(y_B - y_A) \cdot \cotg \alpha - (y_C - y_A) \cdot \cotg \beta + (x_B - x_C)};$$

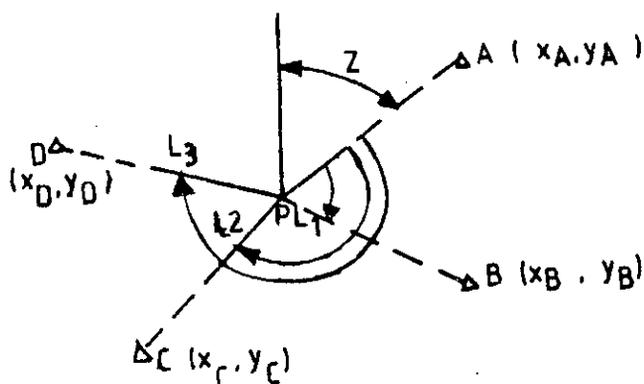
$$Y_P = Y_A + \frac{(x_B - x_A) - (y_B - y_A) \cdot \tg G_{BP}}{\tg G_{AP} - \tg G_{BP}};$$

$$x_P = x_A + (y_P - y_A) \cdot \tg G_{AP};$$

$$G_{AP} = G_{PA} \pm 200 \text{ gr.};$$

$$G_{BP} = (G_{PA} + \alpha) \pm 200 \text{ gr.}$$

b / "Méthode des moindres carrés"-(fig.25).



Pour augmenter la précision du point "P", on vise sur un des points d'appui certain, qui est plus grand que 3.

Les lectures au point "P" sont: " L_1 ", " L_2 ", " L_3 " = " L_i ", en grades.

Figure 25 : Levé par relèvement des moindres carrés.

- Calcul du point approché, " P_0 " (x_0, y_0), par la méthode de "Delambre".
- Calcul des gisements et des distances du point approché par rapport à chacun des points connus; ces gisements sont désignés par " G_{oi} ", et les distances par " S_{oi} ".

$$\operatorname{tg} G_{oi} = \frac{x_i - x_o}{y_i - y_o}; \quad S_{oi} = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2}.$$

- Calcul des coefficients "a_i", "b_i".

Les valeurs et les signes des coefficients, "a_i", "b_i", du relèvement sont identiques avec ceux de l'intersection; ce qui explique qu'on emploie la même méthode de calcul que dans l'intersection.

- Calcul de la valeur provisoire de "Z", désignée par "Z_o".

$$Z_o = \frac{\sum (G_{oi} - L_i)}{n};$$

où, "n" est le nombre d'observations "L_i".

- Calcul des corrections "dx", "dy", comme pour le cas de l'intersection.

- Report de ces corrections aux coordonnées "x_o", "y_o".

2.2.3/ Résultats expérimentaux adaptés à ces méthodes: [14]

Par cette méthode, sont calculés les points suivants:

" Birtraria ", " Relok ", " golf ", etc...

Les observations de triangulation sont réalisées en deux phases: la première phase a porté sur la période de Mai à Juin 1982. Les mauvaises conditions météorologiques (chaleur, brume, effluves) ont eu pour conséquence d'interrompre les observations de triangulation.

Les observations ont pu reprendre dès le mois de Septembre (phase II). Ces séries de mesures ont permis de déterminer les coordonnées définitives des points de la triangulation. Parmi ces points, on citera le point "310 Ex".

Calculs: en Juin 1982 - Calcul sur 11/21, 107/21, 117/21, 110/21:

-/ par la méthode d'intersection:

x = 534130,02 m ; y = 380969,97 m ; G = 53,4974 gr.

-/ par la méthode des moindres carrés:

x = 534130,015 m ; y = 380969,91 m ; G = 53,4958 gr.

EG = 29 dmgr.

Rin = 8,5 cm.

a / Détermination du point 310eX

Observations: nouvelle série.(fig.26)

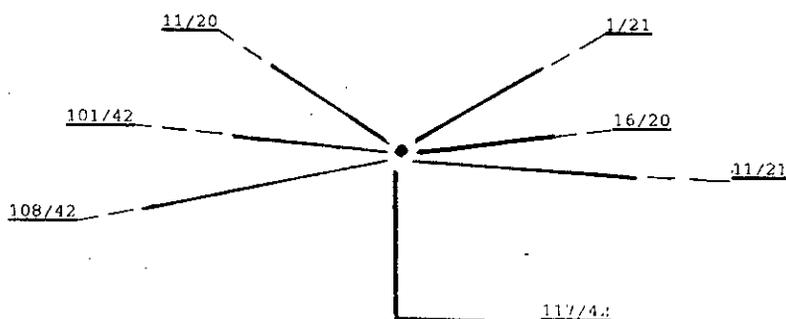


Figure 26 : Exemple de levé par intersection.

Novembre 1982: calcul sur 1/21, 16/20, 11/21 , 108/42 , 101/42
par les moindres carrés.

$x = 534\ 129,65$; $y = 380\ 969,56$; $Go = 328.7393$; $\Sigma Go = 16\text{ dm}$; $Rin = 6\text{ cm}$.

Remarque: entre les deux interventions, l'"I.N.C" nous a fourni
pour le point "310" les coordonnées suivantes:

$x = 534\ 130,15$ $y = 380\ 970,56$

Notre station est excentrée (310 Ex) : $D = 0,99$; $G = 253.5202$;
on devrait donc avoir: 310 Ex.

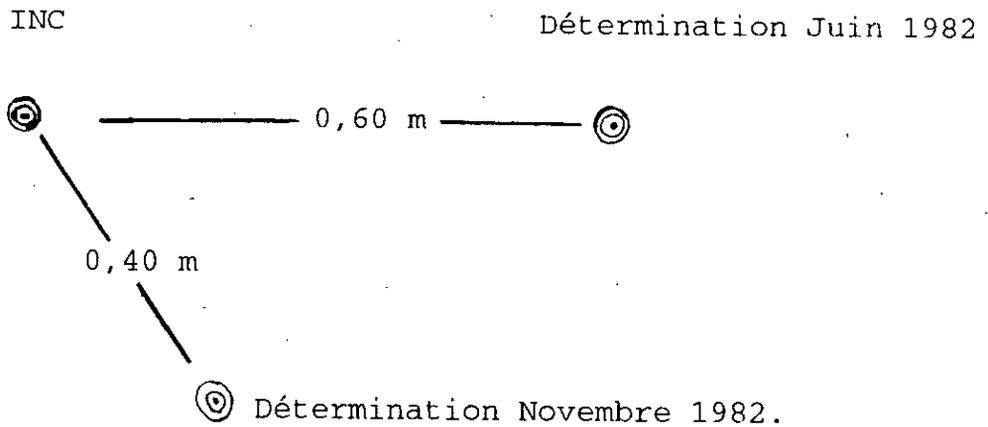
$x = 534\ 129.41$ $y = 380\ 969,90$

On notera des écarts importants entre les trois résultats pré-
cédents dans le tableau 7.

Pts 310	x (m)	Ex (m)	y (m)	Ex (m)
INC	534 129,41		380 969.90	
Déter Juin 82	534 130,02	+ 0,61	380 969,97	+ 0,07
Déter Nov. 82	534 129,65	+ 0,24	380 969,56	- 0,35

Tableau 7 : Coordonnées provisoires pour le point "310".

310 Ex : (fig.27)



Echelle: 1/10

Figure 27 : Représentation graphique des coordonnées provisoires.

Les coordonnées retenues définitives après compensation sont:

 $x = 534\,130,082 \text{ m} ;$
 $y = 380\,969,718 \text{ m}.$

b /Détermination des points "Sidi Zouak-Saint Raphael-Birtraria".

(fig.28)

Observations:

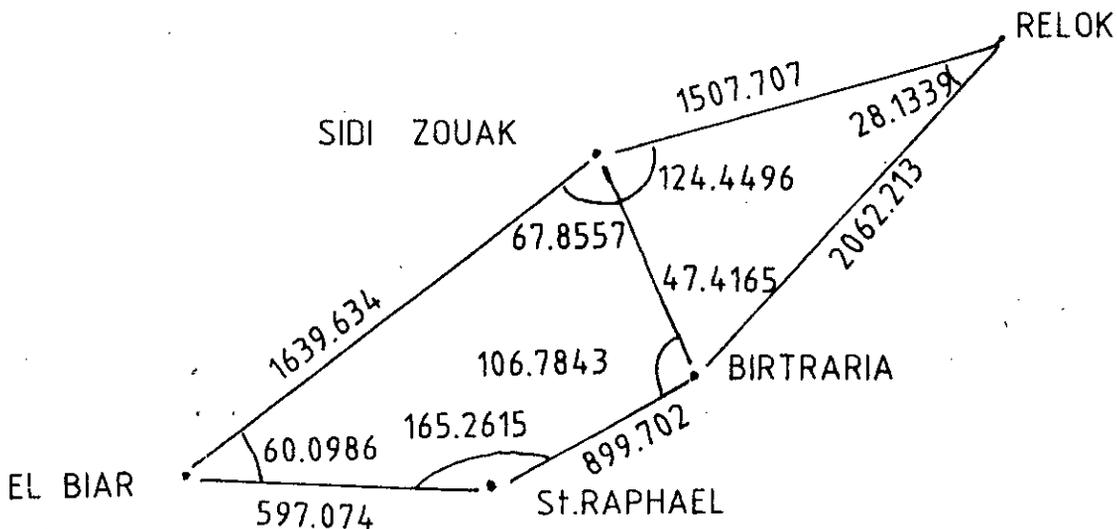


Figure 28 : Détermination de points: "Sidi Zouak-S^t.Raphaël-Birtraria".

Les éléments calculés à l'aide des observations se retrouvent dans la figure 29:

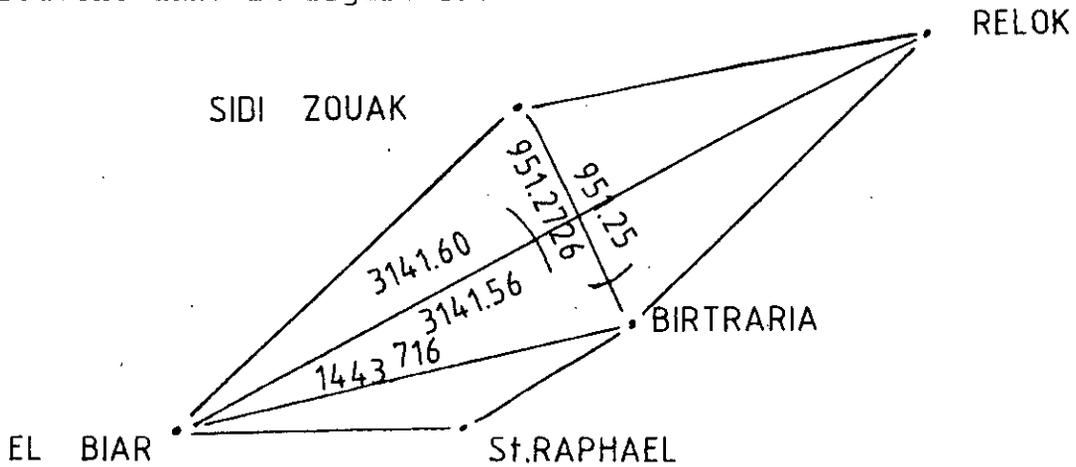


Figure 29 : Détermination des points cités fig.28.

Les coordonnées approchées déterminées à partir d'"El-Biar-Relok", et, en n'utilisant que les observations angulaires, se retrouvent dans la figure 30:

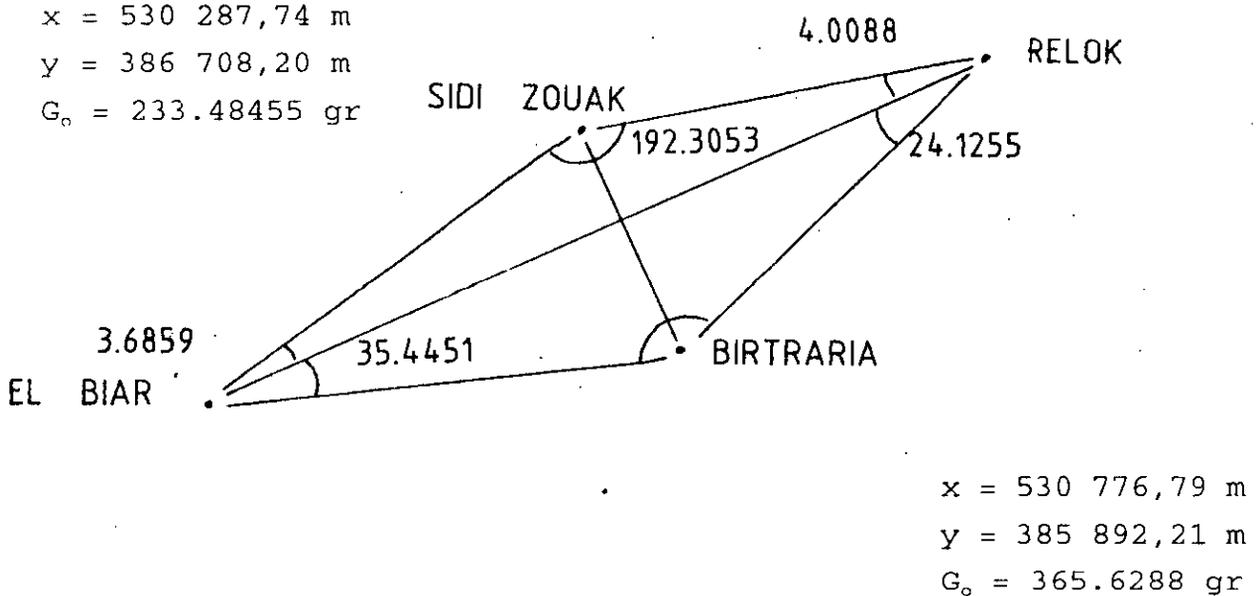


Figure 30 : Détermination de points.

a.1 -/ Première variante de calcul:

- BIRTRARIA -

Calculs: $x_{app} = 530\ 776,79\ m$; $y_{app} = 385\ 892,21\ m$; $G_{oapp} = 365.6288\ gr$.
 Contrôle G_o : sur 4/21; 11/21; CE 16/20; 142/20, met en évidence

de gros résidus: $\Sigma G_o = 64$ dmgr.; $R_{in} = 14,9$ cm.

$x = 530\ 776,79$ m; $y = 385\ 892,21$ m; $G_o = 365.6292$ gr.

- SIDI ZOUAK -

Calculs: par relèvement, intersection, distance sur "El-Biar;Relok;
16/20.Birtraria".

Importants résidus en distance:

$\Sigma G_o = 46$ dmgr.; $R_{in} = 7$ cm.

$x = 530\ 287,80$ m; $y = 386\ 708,225$ m; $G_o = 233.4840$ gr.

- SAINT RAPHAEL - (fig.31)

Calculs: par relèvement, intersection, distance sur "El-Biar, Birt-
raria, CE 16/20.

$\Sigma G_o = 31$ dmgr.; $R_{in} = 5$ cm.

$x = 530\ 058,69$ m; $y = 385\ 350,21$ m; $G_o = 293.5854$ gr.

Eléments bruts

Eléments compensés

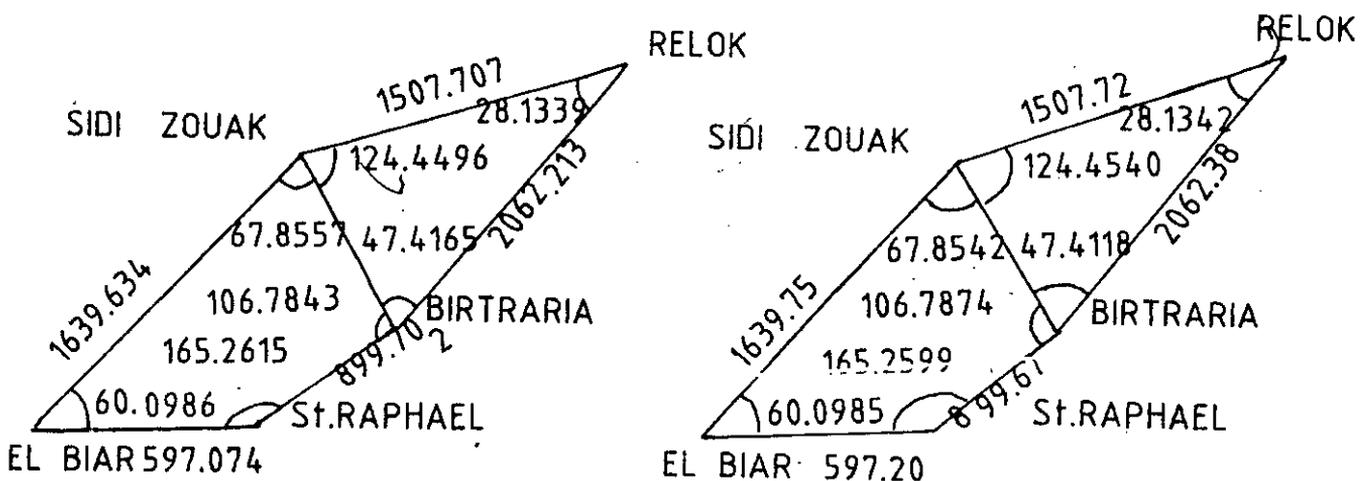


Figure 31 : Mesures observées et compensées.

a.2-/ Deuxième variante de calculs:

- BIRTRARIA -

Calculs: $x_{app}=530\ 776,79$ m; $y_{app}=385\ 892,21$ m; $G_o=365\ 6288$ gr.

Contrôle de G_o : sur 4/21, 11/21, CE 16/20, 142/20; il met en évidence de gros résidus sur les points géodésiques: 4/21, 16/20, 142/20. Le calcul de moindre carré, effectué durant la première variante, n'améliore pas les résultats.

Les coordonnées retenues seront:

$$x = 530\ 776,79 \text{ m;}$$

$$y = 385\ 892,21 \text{ m;}$$

$$G_o = 365.6278 \text{ gr.}$$

- SIDI ZOUAK -

Calculs: un contrôle " G_o " sur "El Biar, Relok, CE16/20, Birtraria", montre de gros résidus sur le "CE 16/20" relativement proche. Les résidus sur "El-Biar, Relok, Birtraria" sont corrects

$$\Sigma G_o = 12 \text{ dmgr.} \quad R_{in} = 5,6 \text{ cm.}$$

Les coordonnées retenues seront:

$$x = 530\ 287,74 \text{ m;}$$

$$y = 386\ 708,20 \text{ m;}$$

$$G_o = 233.4839 \text{ gr.}$$

- SAINT RAPHAEL -

Calculs: par résolution du triangle: "El-Biar", "Saint-Raphael", "Birtraria".

$$x = 530\ 058,595 \text{ m;}$$

$$y = 385\ 350,22 \text{ m;}$$

$$G_o = 293.5826 \text{ gr.}$$

Un contrôle du " G_o " montre un résidu important sur le "CE 16/20" trop proche.

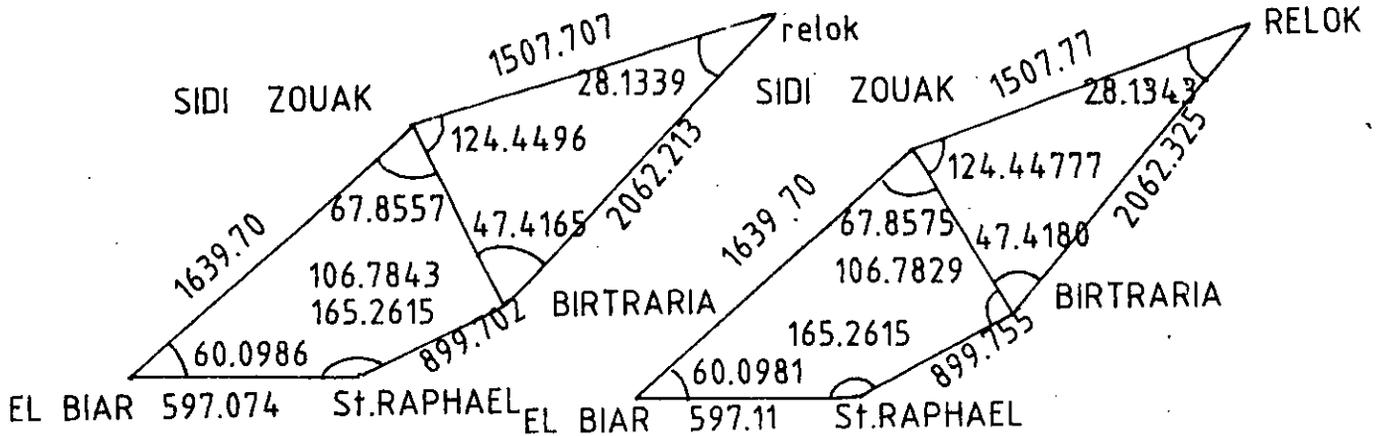
Eléments brutsEléments compensés

Figure 32 : Mesures observées et compensées.

Dans la seconde variante, on constate que les compensations sont meilleures; ce seront donc les coordonnées issues de ce calcul qui seront retenues. (Tableau 8).

POINTS	x (m)	y (m)	G ₀ (gr.)
BIRTRARIA	530 776,79	385 892,21	365.6278 /
SIDI ZOUAK	530 287,74	386 708,20	233.4839
SAINT RAPHAEL	530 058,595	385 350,22	293.5826
RELOK	531 196,43	387 911,39	241.1790

Tableau récapitulatif 8: Coordonnées définitives des points cités.

Dans la première variante, on essayait de tenir compte des observations sur les points "I.N.C", ce qui avait pour effet de déformer notre figure.

Dans la seconde variante, nous n'avons pas tenu cas des observations sur les points "I.N.C". "MALKI" - "EL BIAR" - "SIDI ZOUAK" - "BIRTRARIA" - "SAINT-RAPHAEL". Ils ont donc été déterminés à l'aide

des deux seuls points de triangulation exploitables "RELOK"-
"CLAIRVAL".

Plusieurs séries d'observations ont permis de choisir pour les calculs les mesures répondant aux conditions suivantes: [2]

- aucune visée de longueur, inférieure à 800 m., ne peut-être utilisée pour le calcul du "G₀";
- les écarts moyens sur les directions ont été inférieurs à 0,0020 gr.;
- les rayons moyens d'indécision ont été inférieurs à 0,030 m.;

En conclusion:

- . les points calculés bougent de quelques millimètres;
- . les résidus angulaires sont toujours très corrects;
- . les résidus de distance se retrouvent dans les tolérances fixées par la précision du constructeur, à savoir l'Entreprise du Métropolitain d'ALGER (E.M.A);
- . la densité des repères de la triangulation du métropolitain est de l'ordre de 2 points environ par kilomètre carré, ce qui semble être insuffisant en matière de triangulation urbaine. [4 points au minimum si on se reporte à la référence [21].

Après plusieurs tentatives de la compensation, on aura un nouveau réseau de triangulation, dont les points sont déterminés avec les précisions suivantes (si on se réfère au tableau suivant 9).

Les points sont matérialisés par des piquets en Aluminium, de longueur 2 cm, ou "clou HILTI". On constate que l'implantation de ce type de piquets ne peut-être que momentanée et peu stable.

- . Chaque sommet sert de repère, délimité par trois côtés au minimum. Ces repérages sont corrects. [21]

Finalement, le réseau de la triangulation locale compensée, dans un système indépendant, voisin du système géodésique, peut-être considéré comme étant une base technique d'appui satisfaisante.

Le dossier topographique, remis à "l'Entreprise du Métropolitain d'ALGER", comporte:

- * un schéma définitif de la triangulation, à l'échelle au

1/10000, faisant apparaître les points et visées effectivement utilisés. (Annexe: A.XVII).

- * la notification d'une fiche signalétique pour chaque sommet. (fig.33).
- * la liste des coordonnées des sommets. (Tableau 9).

2.2.4/ La polygonation :

il est évident que la densité des points de la triangulation est insuffisante pour satisfaire aux exigences des levés à grande échelle (au 1/500) du métropolitain.

La polygonation est la méthode la plus rationnelle pour l'élaboration de la base topographique planifiée dans les conditions urbaines, où le travail en surface est sujet à de nombreuses contraintes, relatives à la circulation automobile et piétonne.

La densité de cette base devient plus compacte, atteignant 8 points par kilomètre carré. [21].

La polygonation est constituée par un ensemble de cheminements topographiques principaux et secondaires, s'appuyant sur les deux points de la triangulation locale et générale.

a / Polygonation principale:

Elle est formée de cheminements encadrés, appuyés sur les points suivants de la triangulation locale réalisés en 1982, à savoir: "LNTPB", "IMP", "ELAN", "TELE", "MAI 2", "PG", "RELOK", "BIRTRARIA". (Annexe : A.XVII).

Cette ligne polygonale est brisée, orientée, et se compose d'une succession de droites reliées entre elles par des angles. (fig.34).

Les côtés du cheminement sont mesurés avec un instrument de mesure électronique de distance; quant aux angles, on les déterminera à l'aide d'un théodolite de précision (T 2).

Pour calculer les coordonnées des sommets: "1", "2", "3"... des n côtés, reliant l'origine "A" à l'extrémité "B", il faut connaître:

- les coordonnées de l'origine "A" et de l'extrémité "B";

POINTS	X, m.	Y, m.	Rayon d'indéci sion (cm)	Ecart maxi, G _o (dmgr)	Ecart type, σ V _o (dmg)
P.G.	531 989, 457	385 929, 379	2,3	8	5,6
SAULIERE	531 048, 761	385 081, 444	1,2	7	3,5
GOLF	531 271, 246	383 338, 949	2,5	11	6,1
IMP	535 755, 417	381 625, 840	1,2	4	2,0
AURASSI	531 530, 986	386 245, 427	2,2	12	6,7
D 13	534 580, 948	379 054, 640	1,0	4	2,6
SAINT- CHARLES	532 612, 932	380 504, 559	0,7	3	1,7
SOURCE 2	532 732, 345	381 647, 304	2,6	9	5,6
R 5	533 129, 379	383 640, 215	1,6	7	3,7
MAI 2	532 116, 423	384 498, 541	1,0	6	3,0
RELOK	531 196, 701	387 911, 227	1,4	8	4,3
310 Ex	534 130, 082	380 969, 718	2,3	7	3,7
COTE 127	534 422, 741	382 059, 616	2,0	5	2,9
L.N.T- P.B	535 488, 764	379 548, 462	1,6	5	3,2
BIRTRA- RIA	530 777, 078	385 892, 059	1,9	10	4,8
ARBA 108	534 455, 666	377 255, 586	1,7	5	3,1
CLAIRVAL	527 439, 837	385 255, 211	0,9	3	2,2
MALKI	529 066, 043	383 754, 650	3,1	8	3,7
BIRMAN- DREIS SAINT	531 141, 073	381 459, 944	1,9	8	4,0
RAPHAEL EST	530 058, 897	385 350, 071	0,4	3	2,1
EL BIAR	529 464, 839	385 289, 982	1,8	7	3,3
HYDRA Bis	529 877, 405	382 514, 002	1,7	10	4,6
SIDI ZOUAK	530 288, 040	386 708, 048	0,5	4	2,6
TELE	532 834, 506	383 088, 159	1,3	4	2,9
ELAN	534 539, 479	382 381, 257	3,2	6	4,3
JE	533 315, 894	383 052, 987	0,5	5	4,1

Tableau 9: Précision des coordonnées définitives

Métropolitain d'Alger - Triangulation -

FICHE SIGNALETIQUE

REFERENCES		COORDONNEES	
Nom du point	Gisement		
PG	138 4228	X :	5 3 1 5 3 0 9 8 6
MAI 2	170 4138		
BIRMANDREIS	205 2080	Y :	3 8 6 2 4 5 4 2 7
GOLF	205 6741		
SAULIERE	225 0974		
RELOK	387 3921		
NATURE DU REPERE cible collée		DATE 15 / 05 / 83	
CROQUIS DE REPERAGE		SITUATION TOPOGRAPHIQUE	
<p>TERRASSE HOTEL AURASSI</p>		<p>LES TAGARINS bibliothèque nationale Fort Gendreau</p>	
		CROQUIS VISUEL	
		Hôtel EL AURASSI Bd. Docteur FRANTZ FANON LES TAGARINS	

BUREAU D'ETUDES ET D'AMENAGEMENTS TOPOGRAPHIQUES
"BERNARD GAREAU", Géomètre - Expert DPL

Figure 33 : Repérage des points en surface.

- les gisements " G_{o2} " et " G_{ex} " de deux directions de référence;
- les projections horizontales " S_A ", " S_1 ", "...", " S_n ", des côtés;
- les angles de gauche à tous les sommets, y compris l'origine et l'extrémité.

Si les gisements " G_{o2} " et " G_{ex} " sont inconnus, on les calcule à partir des relations suivantes:

$$\operatorname{tg} g_{A'A} = \frac{x_A - x_{A'}}{Y_A - Y_{A'}} \quad \text{----->} \quad G_{A'A}$$

$$\operatorname{tg} g_{BB'} = \frac{x_{B'} - x_B}{Y_{B'} - Y_B} \quad \text{----->} \quad G_{BB'}$$

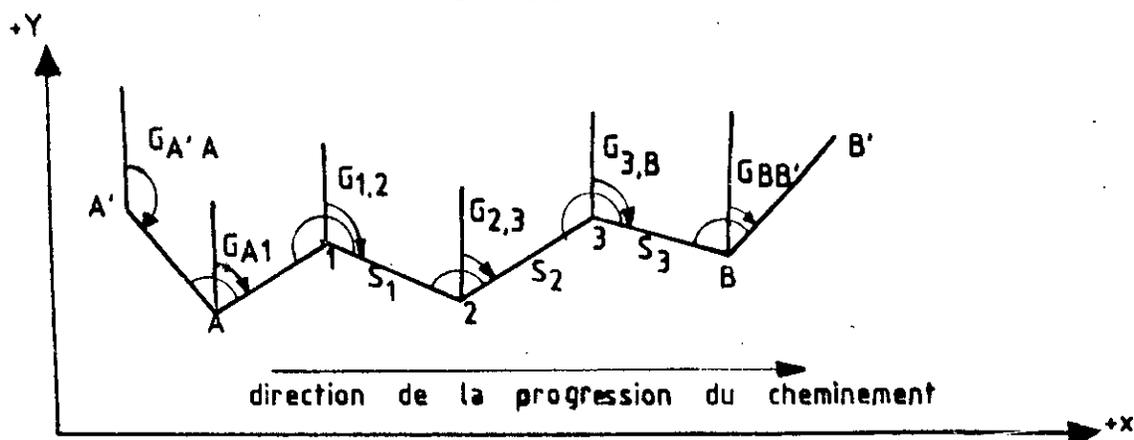


Figure 34 : Levé par cheminement.

Le calcul de la polygonation suit les étapes suivantes:
 a.1 / Si les coordonnées des points "A'ABB'" et les angles horizontaux " β_1 " sont sans erreur, le gisement de l'extrémité prendra la valeur:

$$G_{BB' \text{ calc.}} = G_{A'A} + /- n.200 + \Sigma \beta_1.$$

où, n, est le nombre d'angles horizontaux.

Car des erreurs accidentelles, dans la mesure des angles, sont inévitables; le gisement calculé " $G_{BB'}$ " diffère du gisement connu " G_{BB} " d'une petite quantité, appelée écart de fermeture angulaire ($f\beta$).

$$\begin{aligned}
 f_{\beta} &= G_{BB'}(\text{calculé}) - G_{BB'}(\text{exact}) = \\
 &= (G_{A'A} +/\!-\ n.200 + \Sigma \beta_i) - G_{BB'}(\text{exact}) ; \\
 f_{\beta} &\leq f_{\beta\text{tol}}
 \end{aligned}$$

La fermeture angulaire tolérable d'un cheminement de "n" angles sera:

$$f_{\beta\text{tol}} = +/\!-\ 2,7 \Sigma_{\beta} \sqrt{n} ;$$

où , Σ_{β} : erreur moyenne quadratique sur chaque angle observé.

Lorsque la fermeture est tolérable, on la répartit entre les divers angles en parts égales sur chacun d'eux: c'est-à-dire que chaque angle possède une correction.

$$v_{\beta_i} = \frac{f_{\beta}}{n} ; \quad \beta_i^{\text{aj}} = (\beta_i \text{ mes} + v_{\beta_i}).$$

La transmission des gisements donnés est:

$$G_{A-1} = G_{A'A} +/\!-\ 200 + (\beta_A + v_{\beta}) ;$$

$$G_{1-2} = G_{A-1} +/\!-\ 200 + (\beta_1 + v_{\beta}) ;$$

$$G_{2-3} = G_{1-2} +/\!-\ 200 + (\beta_2 + v_{\beta}) ;$$

$$G_{3-\beta} = G_{2-3} +/\!-\ 200 + (\beta_3 + v_{\beta}).$$

Le gisement d'un côté quelconque est égal à celui du côté précédent compensé de 200gr., et augmenté de l'angle de gauche ajusté:

$$G_i^{\text{aj}} = G_{i-1} +/\!-\ 200 + (\beta_i + v_{\beta}) ;$$

a.2 / Les différences des coordonnées provisoires ($\Delta x'$ et $\Delta y'$):

$$\Delta x'_{A-1} = S_A \cdot \sin G_{A-1} ;$$

$$\Delta y'_{A-1} = S_A \cdot \cos G_{A-1} ;$$

$$\Delta x'_{1-2} = S_1 \cdot \sin G_{1-2} ;$$

$$\Delta y'_{1-2} = S_1 \cdot \cos G_{1-2} ;$$

$$\Delta x'_n = S_n \cdot \sin G_n.$$

$$\Delta y'_n = S_n \cdot \cos G_n.$$

a.3 / Calcul de la fermeture des coordonnées "f_x", "f_y":

Si les côtés mesurés sur le terrain n'ont aucune erreur, on aura:

$$x_B = x_A + \sum_{1}^n \Delta x ; \quad Y_e = Y_A + \sum_{1}^n \Delta y ;$$

A cause des erreurs inévitables dans la mesure des côtés "S_i", on a toujours un écart entre "ΣΔx', mesuré" et "ΣΔx, connu". Cet écart est appelé fermeture des coordonnées ou "fermeture planimétrique".

$$f_x = \Sigma \Delta x_{\text{mes.}} - \Sigma \Delta x_{\text{exact}} = \Sigma \Delta x' - (x_{B, \text{d'arrivée}} - x_{A, \text{départ}}) ;$$

$$f_y = \Sigma \Delta y_{\text{mes.}} - \Sigma \Delta y_{\text{exact}} = \Sigma \Delta y' - (y_{B, \text{d'arrivée}} - y_{A, \text{départ}}) ;$$

La fermeture linéaire, "f_s", du cheminement est:

$$f_s = +/- \sqrt{f_x^2 + f_y^2} ;$$

Cette fermeture linéaire doit être inférieure à une tolérance: si la fermeture, "f_s", est tolérable, on calcule les corrections de "Δx'" et "Δy'" des côtés; l'ajustement planimétrique consiste à répartir les fermetures "f_x" et "f_y" proportionnellement à la longueur des côtés.

$$v \Delta x_{A-1} = - \frac{f_x}{\Sigma S} \cdot S_A ; \quad v \Delta y_{A-1} = - \frac{f_y}{\Sigma S} \cdot S_A ;$$

$$v \Delta x_{1-2} = - \frac{f_x}{\Sigma S} \cdot S_1 ; \quad v \Delta y_{1-2} = - \frac{f_y}{\Sigma S} \cdot S_1 ;$$

$$v \Delta x_n = - \frac{f_x}{\Sigma S} \cdot S_n ; \quad v \Delta y_n = - \frac{f_y}{\Sigma S} \cdot S_n ;$$

a.4 / Les coordonnées des sommets du cheminement sont:

$$x_1 = x_A + \Delta x'_{A1} + v \Delta x_{A-1} ; \quad Y_1 = Y_A + \Delta y'_{A-1} + v \Delta y_{A-1} ;$$

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x'_n + v \Delta x_n ; \quad Y_n = Y_{n-1} + \Delta y'_n + v \Delta y_n ;$$

$$x_B = x_A + \sum_{1}^n (\Delta x' + v) ; \quad Y_B = Y_A + \sum_{1}^n (\Delta y' + v) ;$$

L'établissement du projet de la polygonation nécessite un calcul de l'espérance de l'erreur moyenne quadratique de la position des points du cheminement.

Dans le cas de la projection des cheminements de la polygonation urbaine, il faut calculer les erreurs moyennes quadratiques de la désignation des points de la polygonométrie par les méthodes suivantes:

- Erreur du positionnement d'un point du cheminement: (fig.35)

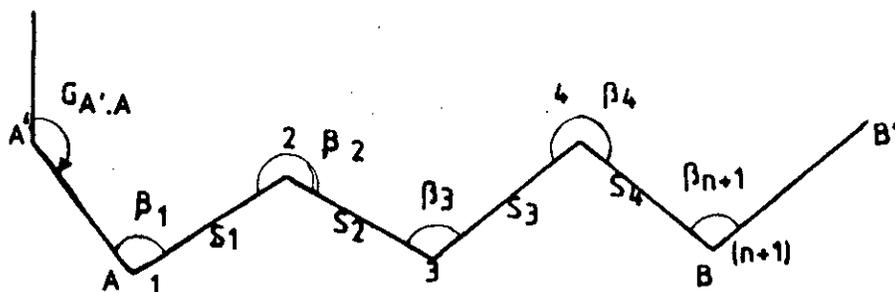


Figure 35 : Levé par cheminement.

Soient:- le point de départ "A", numéroté par $N = 1$;

- le point d'arrivée "B", numéroté par $N = n+1$;

- n : le nombre de côtés du cheminement de "A" à "B";

- "A'ABB'" sont des points de rattachement; leurs coordonnées sont déjà connues et sans erreurs.

A cause des erreurs de mesures de distances et d'angles, la position des points sur le cheminement n'est pas exacte.

Le problème consiste à déterminer le déplacement des points (par rapport au point de départ), provenant des erreurs de mesures des distances et des angles.

x_1 : point de départ sans erreur;

$$x_2 = x_1 + \Delta x_1 ;$$

$$x_3 = x_2 + \Delta x_2 = x_1 + \Delta x_1 + \Delta x_2 = x_1 + \sum_{1}^{2} \Delta x ;$$

$$x_4 = x_3 + \Delta x_3 = x_1 + \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 = x_1 + \sum_{1}^{3} \Delta x ;$$

$$x_B = x_{n+1} = x_1 + \sum_{1}^{n} \Delta x ; \quad Y_B = Y_{n+1} = Y_1 + \sum_{1}^{n} \Delta y ;$$

"x₁" et "y₁" sont des valeurs sans erreur, c'est pourquoi l'erreur de la position du point "(n+1)" est fonction des erreurs de Δx et Δy.

$$\text{Fonctions} \left\{ \begin{array}{l} F_x = \sum_{1}^n \Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n ; \\ F_y = \sum_{1}^n \Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \dots + \Delta y_n ; \end{array} \right.$$

$$\text{Erreurs} \left\{ \begin{array}{l} d.F_x = d.\Delta x_1 + d.\Delta x_2 + \dots + d.\Delta x_n ; \\ d.F_y = d.\Delta y_1 + d.\Delta y_2 + \dots + d.\Delta y_n ; \end{array} \right.$$

$$\Delta x_i = S_i \cdot \sin G_i ; \quad d.\Delta x_i = \sin G_i \cdot d S_i + S_i \cdot \cos G_i \cdot d G_i ;$$

$$\Delta y_i = S_i \cdot \cos G_i ; \quad d.\Delta y_i = \cos G_i \cdot d S_i - S_i \cdot \sin G_i \cdot d G_i .$$

Mais le gisement "G_i" est fonction des angles mesurés "β_i".

$$d G_i = \sum d \beta .$$

$$d \Delta x_i = \sin G_i \cdot d S_i + S_i \cdot \cos G_i \cdot \sum d \beta ;$$

$$d \Delta y_i = \cos G_i \cdot d S_i - S_i \cdot \sin G_i \cdot \sum d \beta ;$$

$$d F_x = \sum_{1}^n (\sin G_i \cdot d S_i) + \sum_{1}^n (S_i \cdot \cos G_i \cdot \sum d \beta) ;$$

$$d F_y = \sum_{1}^n (\cos G_i \cdot d S_i) - \sum_{1}^n (S_i \cdot \sin G_i \cdot \sum d \beta) ;$$

$$\sum_{1}^n (S_i \cdot \cos G_i \cdot \sum d \beta) = \sum_{1}^n (\Delta y_i \cdot \sum d \beta) = \sum_{1}^n (y_{n+1} - y_i) \cdot d \beta_i ;$$

$$\sum_{1}^n (S_i \cdot \sin G_i \cdot \Sigma d \beta) = \sum_{1}^n (\Delta x_i \cdot \Sigma d \beta) = \sum_{1}^n (x_{n+1} - x_i) \cdot d \beta_i ;$$

$$d F_x = \sum_{1}^n (\sin G_i d S_i) + \sum_{1}^n (y_{n+1} - y_i) \cdot d \beta_i ; \quad (\text{fig.36}).$$

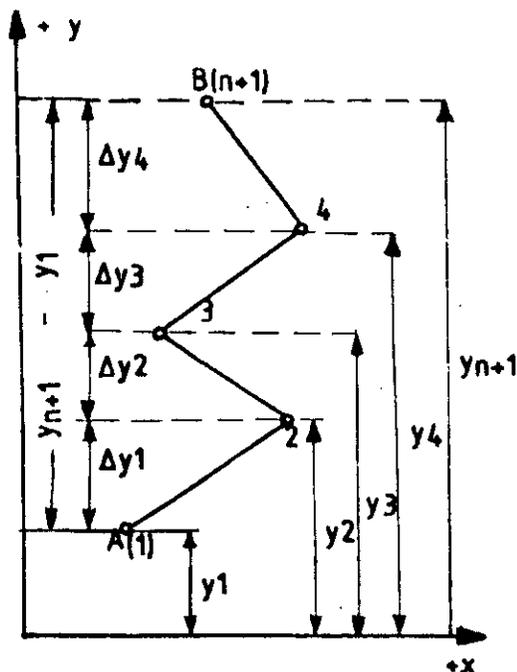


Figure 36 : Levé par cheminement.

$$d F_y = \sum_{1}^n (\cos G_i \cdot d S_i) + \sum_{1}^n (x_{n+1} - x_i) \cdot d \beta_i ;$$

$$\Sigma_{F_x}^2 = \Sigma^2 x = \sum_{1}^n (\sin^2 G_i \cdot \Sigma_{S_i}^2) + \frac{1}{\rho^2} \cdot \sum_{1}^n (y_{n+1} - y_i) \cdot \Sigma^2 \beta ;$$

$$\Sigma_{F_y}^2 = \Sigma^2 y = \sum_{1}^n (\cos^2 G_i \cdot \Sigma_{S_i}^2) + \frac{1}{\rho^2} \cdot \sum_{1}^n (x_{n+1} - x_i) \cdot \Sigma^2 \beta ;$$

Où : - Σ_s : erreur moyenne quadratique du côté $N = i$;

- $\Sigma \beta$: erreur moyenne quadratique de la mesure des angles.

Les gisements " G_i " dans les formules, étant calculés par les angles horizontaux, n'ont pas encore subi de rectifications (il s'agit de valeurs brutes).

Lorsque dans les mesures de distances, exemptes d'erreurs systématiques " e_s ", l'erreur moyenne quadratique " Σ_s " des côtés est:

$$\Sigma_s = \sigma \sqrt{S} \text{ (mètre)} \longrightarrow \Sigma_s^2 = \sigma^2 \cdot S ;$$

Où σ : erreur accidentelle par mètre.

Les relations prennent la forme suivante:

$$\Sigma^2 x = \sigma^2 \cdot \sum_1^n S_i \cdot \sin^2 G_i + \frac{\Sigma^2 \beta}{\rho^2} \cdot \sum_1^n (Y_{n+1} - Y_i)^2 ;$$

$$\Sigma^2 y = \sigma^2 \cdot \sum_1^n S_i \cdot \cos^2 G_i + \frac{\Sigma^2 \beta}{\rho^2} \cdot \sum_1^n (X_{n+1} - X_i)^2 ;$$

L'erreur moyenne quadratique de la position du point "(n+1)" est:

$$M_{n+1}^2 = \Sigma^2 x + \Sigma^2 y = \sigma^2 \cdot \sum_1^n S_i + \frac{\Sigma^2 \beta}{\rho^2} \cdot \sum_1^n D_{n+1-i}^2 ;$$

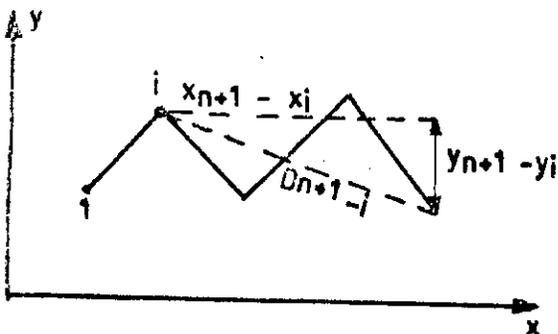


Figure 37 : Détermination de distances.

Où, " D_{n+1-i} ", est la distance du point "i" au point "(n+1)"_ point d'extrémité du cheminement: (fig.37)

$$D_{n+1-i} = \sqrt{(Y_{n+1} - Y_i)^2 + (X_{n+1} - X_i)^2} ;$$

Lorsque la mesure de la distance est sujette à des erreurs systématiques, l'erreur moyenne quadratique, " Σ_s ", de cette longueur s'exprimera par la relation:

$$\Sigma_s^2 = \sigma^2 S + e_s S^2 ;$$

" σ " et " e_s ", ce sont respectivement les erreurs accidentelle et systématique sur l'unité de longueur (sur 1 mètre).

Les valeurs des erreurs moyennes quadratiques linéaires, " Σ_s ", et angulaire, " Σ_β ", sont données [2], à savoir:

$$\Sigma_s = 4.10^{-5} ;$$

$$\Sigma_\beta = 4.10^{-6} .$$

Cette méthode peut-être utilisée après les mesures de terrain. Dans ce cas, on calcule " Σ_s " et " Σ_β " à partir d'un grand nombre de cheminements, en utilisant les écarts transversal, longitudinal et angulaire.

Une représentation graphique permet d'illustrer cette méthode par une ellipse d'erreurs. Elle consiste à considérer une droite orientée, passant par une origine de coordonnées, dont le gisement est égal à celui moyen du cheminement; c'est-à-dire qu'il est égal à la moyenne arithmétique des gisements des côtés de ce même cheminement. (fig.38).

Sur la droite ainsi définie on reporte, de part et d'autre de l'origine, une longueur égale à la tolérance, $2,7 f_L$, et, sur la perpendiculaire en "B" à "AB", de part et d'autre de "B", la quantité $2,7 f_T$; " f_T " et " f_L ", ce sont respectivement les écarts moyens transversal et longitudinal.

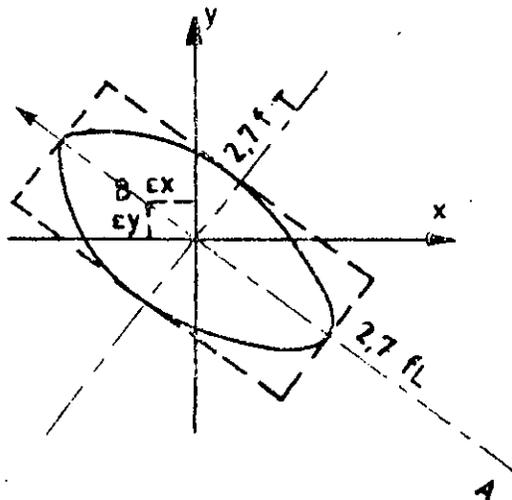


Figure 38 : Ellipse de tolérance.

Dans le rectangle obtenu, on inscrit à l'oeil une ellipse, que l'on appellera : "ellipse de tolérance".

On reporte toujours à la même échelle, " Σ_x " et " Σ_y ", avec leur signe respectif. On obtient ainsi le point "B".

Cette représentation graphique a pu être appliquée dans le cas de la triangulation locale du métropolitain, en respectant les conditions données [2], soient :

* chaque cheminement a été considéré comme étant acceptable, si les coordonnées calculées du point d'arrivée définissent un point, situé à l'intérieur de "l'ellipse de tolérance" relative au cheminement considéré.

* cette ellipse, centrée sur le point théorique d'arrivée, a été définie par les éléments suivants, exprimés en mètres :

$$f_T = +/- \sqrt{\frac{n}{3} \cdot \Sigma_p^2 \cdot L^2 + 2 r^2} \quad ;$$

$$f_L = +/- \sqrt{\frac{L^2}{n} \cdot \Sigma_s^2 + 2 r^2} \quad .$$

Avec :

- L = longueur du cheminement en mètres ;
- n = nombre de côtés du cheminement ;
- r = rayon d'indécision des points d'appui, en mètres, correspondant à : $r = 3 \cdot 10^{-2}$.

Après cet examen, la répartition des écarts de fermeture s'est faite, comme indiqué ci-dessus, dans la limite de tolérance déjà indiquée.

L'analyse de la triangulation du métropolitain montre que le cheminement est souvent utilisé pour le contrôle d'orientation.

Comme exemple, on citera le relèvement des trois points : "Clairval", "El Biar", "Malki", à partir des points géodésiques ; on constatera une discordance entre les éléments calculés et mesurés. (fig.39 et Tableau 10).

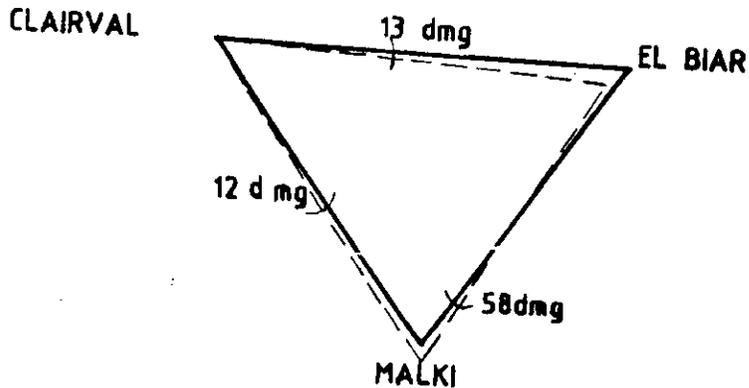


Figure 39 : Exemple de levé par relèvement.

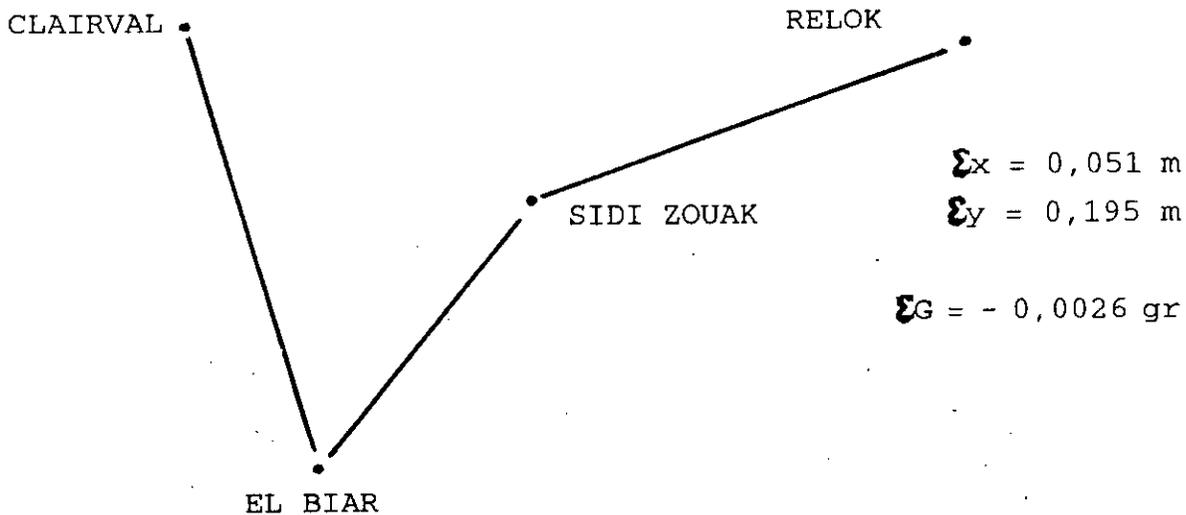
Points	Gisements observés, (grades)	Gisements calculés (grades)	Distances mesurées (mètres)	Distances calculées (mètres)
CLAIRVAL- EL BIAR.	98,9097	98,9083	2025,245	2025,29
EL BIAR- CLAIRVAL.	298,9095	E = 13 dmg		- 0,045
CLAIRVAL- MALKI.	147,4466	16,1862		
MALKI- CLAIRVAL.	347,4448	E = 12 dmg		
MALKI- EL BIAR.	16,1802	16,1862	1586,230	1586,18
EL BIAR- MALKI.	216,1806	E = -58 dmg		+ 0,05

Tableau 10: estimations de gisements.

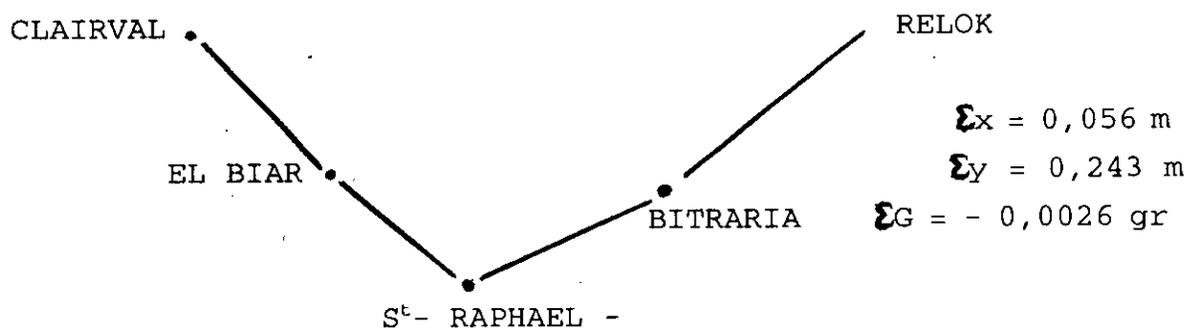
Le contrôle de fermeture entre "Clairval" et "Relok", a été effectué.

Calcul d'une polygonale, partant de "Clairval" et se fermant sur "Relok". (fig.40).

* Cheminement "1" :



-/ Cheminement "2" :



-/ Cheminement "3" :

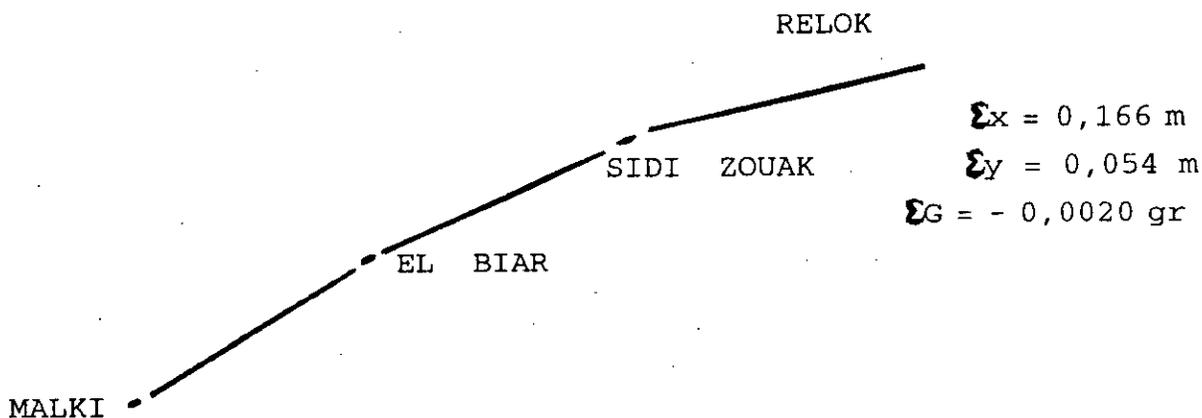


Figure 40: Exemple de levé par cheminement.

On met en évidence des écarts entre les orientations. Le calcul de ces lignes polygonales donne des fermetures hors tolérances, mais si l'on effectue une compensation par moindres carrés, on obtient pour "El Biar" des coordonnées voisines de celles du relèvement.

- "EL BIAR" -

Relèvement	x = 529 464,52 m	y = 385 290,13 m.
Cheminement 1	x = 529 464,51 ₅ m	y = 385 290,11 ₅ m.
Cheminement 2	x = 529 464,50 m	y = 385 290,12 m.
Cheminement 3	x = 529 464,40 m	y = 385 290,13 ₅ m.

Il en est de même pour les orientations suivantes:

"CLAIRVAL"----->"EL BIAR"

Observations relèvements	G = 98,9096 gr.
Coordonnées relèvements	G = 98,9083 gr.
Cheminement 1	G = 98,9089 gr.
Cheminement 2	G = 98,9087 gr.

"MALKI"-----> "EL BIAR"

Observations relèvements	G = 16,1804 gr.
Coordonnées relèvements	G = 16,1862 gr.
Cheminement 3	G = 16,1815 gr.

Coordonnées retenues -

"CLAIRVAL"- X = 527 439,53 m; Y = 385 255,40₅ m; G₀ = 250,1580 gr.
D = 2025,29 m ; G = 98,9083 gr.

"EL BIAR"- $X = 529\,464,52$ m; $Y = 385\,290,13$ m; $G_0 = 216,1794$ gr.

"MALKI"- Nouvelle détermination à partir de "CLAIRVAL-EL BIAR"

par relèvement-intersection distances-combinés.

Coordonnées retenues -

"MALKI"- $X = 529\,065,70_5$ m; $Y = 383\,754,83$ m; $G_0 = 163,1012$ gr.

De plus, une polygonation principale a été réalisée, partant de "CLAIRVAL" et se fermant sur "LNTPB", représentée sur le plan au 1/10000.

On remarque que cette polygonale possède les caractéristiques suivantes:

- . L'implantation des sommets successifs doit permettre de les rendre visibles les uns des autres.
- . Les distances des côtés étant sensiblement les mêmes, on limitera en outre le nombre de côtés à une dizaine environ. Le rapport entre la longueur du côté le plus court et celle du côté le plus long est toujours inférieur à 0,7.
- . Les erreurs moyennes quadratiques angulaires et de distances respectent généralement les tolérances.

La comparaison des résultats obtenus, avec les normes données [2], [21], nous permet de considérer l'ensemble de la polygonation du métropolitain, comme étant une partie adaptée au réseau de triangulation locale.

III.3/ Instruments utilisés:

Les travaux, à effectuer par les géomètres du métropolitain d'Alger, consistent à implanter les éléments suivants:

- les angles horizontaux;
- les distances;
- les points de coordonnées connues fixées par le projet;
- les axes horizontaux et circulaires.

La précision, avec laquelle il faut mesurer ces éléments, est fixée par l'avant-projet.

Les données de base sont les suivantes:

-/ Caractéristiques du matériel à utiliser:

Le théodolite utilisé devra permettre la lecture directe des directions à 0,0002 gr. près, et à 0,0001 gr. près lors de l'estimation.

Il devra être muni d'un système de centrage optique, à 0,003 mètre près, ainsi que des voyants servant à signaler les stations.

Pour les distances, l'appareil utilisé devra permettre la mesure avec une précision en mètre, de $0,02 + 0,003 K$, avec "K" exprimé en kilomètre.

3.1. Précision -

L'écart de fermeture d'un tour devra toujours avoir une valeur absolue inférieure à 0,003 gr.

Les valeurs de dispersion des visées devront présenter au maximum une erreur moyenne quadratique de 0,0008 grade; aucune de ces valeurs ne devra être supérieure à 0,0020 grade.

L'écart entre les deux mesures de longueur d'un même côté devra être inférieur à 0,01 mètre.

La connaissance de ces marges supérieures de chacune des erreurs a permis de faire un choix sur l'instrumentation et les méthodes à utiliser.

Les topographes du métropolitain d'Alger utilisent, pour les travaux d'implantation, les appareils suivants:

1. "WILD T 2" ($\Sigma_1 = +/- 0,8 \text{ dmgr.}$)
2. "WILD INL" ($\Sigma_1 = +/- 1 \text{ dmgr.}$)
3. "DISTOMAT WILD DI 1600" ($\Sigma_1 = +/- 1 \text{ dmgr.}$)
4. "WILD DISTOMAT DI 4/ DIAL" ($\Sigma_1 = +/- 1 \text{ dmgr.}$)
5. "WILD N A 2" (niveau insensible aux influences des champs magnétiques);

6. "WILD N A 20, N A 24, N A 28" $[\Sigma_q = +/- 2,5 \text{ mm};$
 $\Sigma_q = +/- 2,0 \text{ mm};$
 $\Sigma_q = +/- 1,5 \text{ mm}].$

3.2. Mesure des angles -

La mesure simple d'un angle, c'est-à-dire sa mesure entre deux directions, est la méthode la plus précise de détermination angulaire. Grâce à la rapidité de la mesure, les erreurs systématiques, provenant du changement d'inclinaison de l'axe de pivotement et des torsions du trépied, sont largement évitées.

Tous les angles sont mesurés par quatre paires de séquences. La paire de séquences est une association de deux d'entre elles successives, avec un décalage de l'origine du limbe, un retournement de la lunette et une inversion du sens de l'observation.

Le décalage de l'origine du limbe entre deux séquences d'une même paire, appelé "réitération", est égal à 100 gr., valeur éliminant l'erreur d'inégalité des échelons et le défaut de perpendicularité du pivot et du limbe.

Avec les appareils de mesure des angles cités ci-après, l'opérateur peut utiliser les combinaisons séquentielles suivantes, à savoir quatre paires, d'après le tableau (11):

	I		II		III		IV	
N° des séries	1	2	3	4	5	6	7	8
Sens								
Origine du limbe	0	100	50	150	25	125	75	175
Position du cercle vertical	C G	C D	C G	C D	C G	C D	C G	C D

Tableau 11 : Mesure des angles par 4 paires de séquence.

3.3. Erreur de mesure des angles- (fig.41).

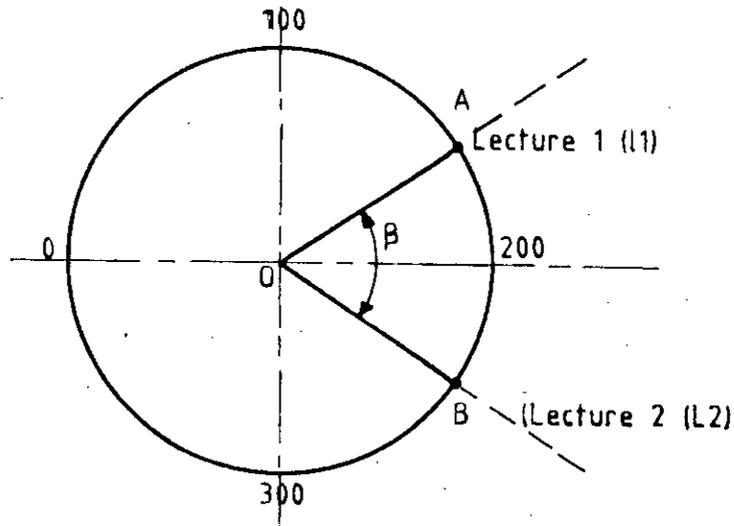


Figure 41 : Limbe horizontal du théodolite.

L'angle horizontal est calculé par le biais de deux lectures:

("l₁" et "l₂"). Le centre (O) du limbe gradué est le sommet de l'angle à mesurer.

$$\beta = l_2 - l_1;$$

L'erreur sur "l₁" est " ϵ_{l_1} ", et celle sur "l₂" est " ϵ_{l_2} ".

$$\epsilon_{\beta}^2 = \epsilon_{l_2}^2 + \epsilon_{l_1}^2; \text{ (une seule mesure);}$$

Si :

$$\epsilon_{l_1} = \epsilon_{l_2} = \epsilon_1, \text{ on a:}$$

$$\epsilon_{\beta}^2 = 2 \epsilon_1^2 \text{ -----> } \epsilon_{\beta} = \epsilon_1 \sqrt{2}; \text{ (une seule mesure);}$$

Si on mesure l'angle " β " n fois, la valeur de l'angle mesuré

est la moyenne arithmétique des n valeurs mesurées.

$$\beta = \frac{1}{n} [(l_2 - l_1)_1 + (l_2 - l_1)_2 + \dots + (l_2 - l_1)_n];$$

$$\beta = \frac{1}{n} (\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n) \quad : \text{c'est une fonction.}$$

$$\sigma_{\beta \text{ moyenne}}^2 = \frac{1}{n^2} (\sigma_{\beta_1}^2 + \sigma_{\beta_2}^2 + \dots + \sigma_{\beta_n}^2) = \frac{n}{n^2} \sigma_{\beta}^2 = \frac{\sigma_{\beta}^2}{n} ;$$

d'où:

$$\sigma_{\beta \text{ moyen}} = \frac{\sigma_{\beta}}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma_1 \sqrt{2}}{\sqrt{n}} .$$

CHAPITRE IV

IMPLANTATION

DES OUVRAGES SOUTERRAINS

IV.1. Analyse du réseau d'appui en surface et en souterrain-

Les bases d'appui en surface et en souterrain doivent former un ensemble unique de points déterminés dans le système des coordonnées géodésiques.

La mission principale des travaux topographiques consiste à assurer l'exécution sur le terrain du projet de construction du métropolitain.

La précision d'implantation, issue de ce projet, fixe les méthodes de mesure, les instruments nécessaires, les points de départ ainsi que le plan général d'exécution.

La question essentielle, dans ce cas, porte sur le choix des points de la base d'appui.

Durant le démarrage des travaux, les géomètres ont effectué un contrôle sur l'existence et sur la précision des données du réseau planimétrique fourni par l'Entreprise du Métropolitain d'Alger (E.M.A.).

La reconnaissance des points de triangulation générale et locale, ainsi que des points du cheminement principal, ont montré:

- d'une part, la disparition de certains repères dans le temps;
- d'autre part, l'insuffisance des points d'appui au niveau des travaux d'implantation.

Finalement, pour constituer une base rationnelle et précise d'implantation, la polygonale a donc été de nouveau observée.

L'orientation de départ a porté sur l'hôtel "Aurassi"; l'orientation de fermeture se base sur les points "R5" et "Tele". Ce sont les points de triangulation locale du métropolitain d'Alger, raccordés aux points de triangulation générale du pays.

L'écart de fermeture linéaire est de 44mm, réparti sur toute la longueur du cheminement avec une réorientation sur l'"INC" (Dôme de Kouba).

Ce contrôle a permis de découvrir certaines erreurs, et plus particulièrement au niveau du point de la polygonale "HI₁", dûes au déplacement accidentel de la bouche "SONELGAZ", servant de support à ce point. De nouvelles coordonnées pour ce repère sont donc adoptées.

Afin de poursuivre les travaux d'implantation du tunnel et de la station du premier Mai, un réseau d'aménagement complémen-

taire a été établi. Notamment, il s'agit de la polygonale du premier Mai, réalisée par la méthode du cheminement fermé, comportant cinq stations.

Deux points de départ sont connus:

- le point HI₁ (cheminement principal);
- le point MAI (cheminement principal);

L'analyse a montré que les résultats obtenus lors des mesures géométriques sont très satisfaisants.

. L'écart de fermeture angulaire mesuré est le suivant:

$$f_{\beta} = +0,0004 \text{ gr.}$$

$$f_{\beta \text{ tol.}} = \pm 2,7 \cdot \epsilon_{\beta} \sqrt{n} = \pm 2,7 \cdot 1 \cdot \sqrt{5} = \pm 6 \text{ dmgr.}$$

$$f_{\beta \text{ mes.}} < f_{\beta \text{ tol.}}$$

L'erreur a été répartie proportionnellement au niveau de chaque angle mesuré.

L'erreur linéaire semble être inexistante. Cette polygonale a permis de déterminer la position planimétrique des points "1" et "2", ainsi que la position du point "3" sous forme d'antenne. Le point "3" a servi de support pour la réalisation de la paroi moulée (armatures, repéchages, etc...) et plus tard devra servir à l'implantation du tunnel (fig.42 et tableau 12).

Finalement la base d'appui au niveau de la place du 1^{er}. Mai est un cheminement secondaire, pouvant-être considéré comme une antenne.

Nous avons, à cet effet, procédé à un contrôle complémentaire à ceux réalisés par l'entreprise.

L'objectif de notre travail a consisté à contrôler la position planimétrique du point "3", situé près de l'entrée du tunnel. Ce point est très important, car il va servir de base d'orientation nécessaire à la réalisation du tunnel.

Ce contrôle s'est basé sur la recherche des points planimétriques, situés près du point "3". Il s'agit des points "MAI" et "AD", points de raccordement avec la base planimétrique existante du métropolitain.

Suite aux difficultés (piétons, transport, etc...), nous avons dû procéder à l'établissement d'un point supplémentaire, situé au niveau de la partie supérieure de la station d'essence: "NAPHTAL".

Le cheminement, passant par les points "1" et "2", nous a permis de positionner le point "3".

Les coordonnées des points "1", "2", "3", que nous avons déterminées sont identiques et de même précision, que celles obtenues par l'entreprise. (fig. 43 et tableau 13).

Pour obtenir une précision rigoureuse dans les opérations d'arpentage des mines d'implantation du puits "4", un contrôle des points les plus proches de la polygonale principale a été réalisé

L'entreprise a obtenu une polygonale secondaire, entre les points "MAI" et "GH₁₁₈".

Ce contrôle a permis d'établir une base d'appui sûre autour du puits "4"; cependant, le cheminement obtenu n'a pu être fermé dans cette impasse, provoquant la formation à la surface d'une antenne, à partir des trois points, servant de base d'appui pour les ouvrages souterrains du métropolitain, à savoir: (GH₁₁₇, Hop, P4).

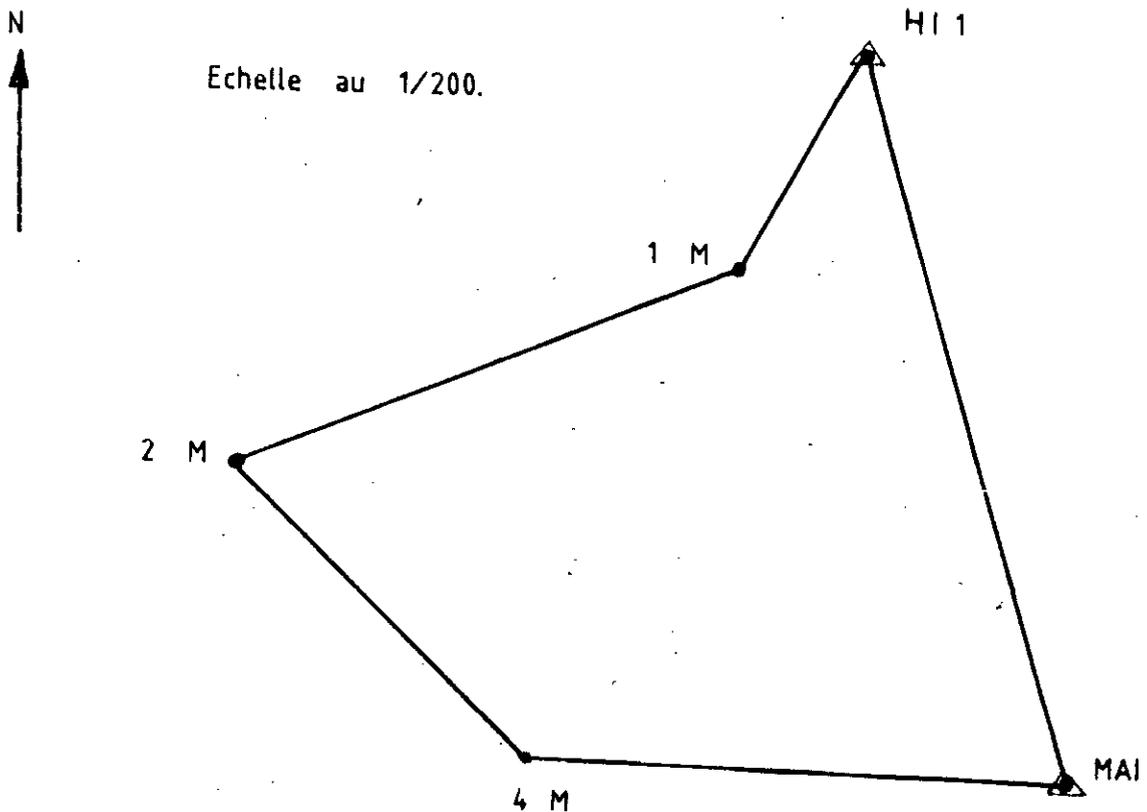


Figure 42 : La polygonale du premier Mai ;
Entreprise du Métropolitain d'ALGER. (E.M.A.).

SOMMETS	ANGLES, [gr.]	GISEMENT, [gr.]	LONGUEUR DES COTES, [m]	DIFFERENCE DES COORDONNEES		COORDONNEES	
				Δx	Δy	x [m]	y [m]
M A I		382.9562				532 110.860	384 457.450
H I 1	50.9856	233.9418	67.978	- 34.550	- 58.544	532 057.442	384 652.187
1	243.3373	277.2791	140.882	- 132.003	- 49.220	532 022.892	384 593.643
2	74.9597	152.2388	112.183	+ 76.488	- 82.065	531 890.889	384 544.423
4	149.9377	102.1765	143.567	+ 143.483	- 4.908	531 967.377	384 462.358
M A I	80.7797	382.9562				532 110.860	384 457.450
H I 1							

Tableau 12 : La polygone du premier Mai.

Le problème qui s'est posé au topographe, concernant l'implantation des ouvrages souterrains, est un problème d'orientation des levés planimétriques souterrains par rapport au système de coordonnées de la surface. A cet effet, les travaux déjà réalisés sont les suivants :

- centrage des levés souterrains, c'est-à-dire détermination des coordonnées, (x, y) , du point origine du levé;
- orientation des levés souterrains, se déterminant par le calcul du gisement origine " G_{02} ".

L'obtention de ces éléments désignés a permis de calculer la base souterraine dans le même système de coordonnées, qu'en surface. [9]

En fonction du procédé de rattachement des travaux souterrains à ceux de surface, on distingue deux groupes principaux de méthodes géométriques et physiques de raccordement.

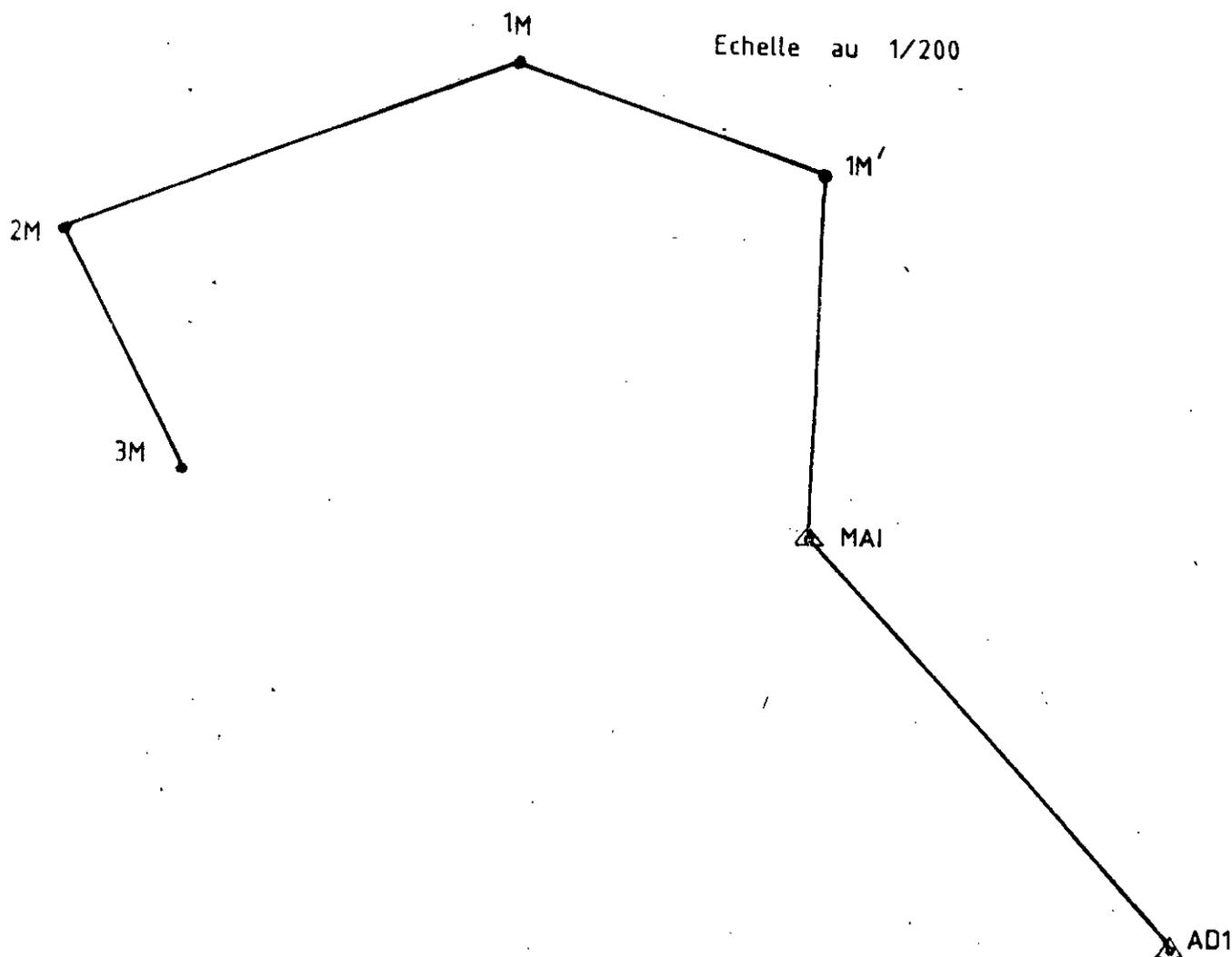


Figure 43 : Contrôle de la base d'appui en surface.

POINT (S)	ANGLE "β _i ", [gr.]	GISEMENT, "G _i ", [gr.]	LONGUEUR DES COTES, [m]	DIFFERENCE DES COORDONNEES		COORDONNEES	
				Δ x	Δ y	x [m]	y [m]
A D 1		352.6693				532.221.122	384.337531
M A I	248.2629	0.9322	106.749	+ 1.563	+ 106.737	532.110.860	384.457450
1 M'	119.3028	320.2350	94.252	- 89.531	+ 29.456	532.112.423	564.187
1 M	157.0441	277.2791	140.881	- 132.003	- 49,220	532.022.892	593.643
2 M	93.6799	170.9590	79,466	+ 35.006	- 71.340		
3 M						531.925.896	473.083

Tableau 13 : Contrôle de la base d'appui en surface

IV.2. Méthodes de raccordement:

Les méthodes géométriques se répartissent selon trois procédés:

2.1. **Le procédé par galeries ou puits inclinés :**

Il suffit donc de rattacher au réseau du fond un alignement d'azimut repéré en surface, par le biais d'un cheminement ordinaire au théodolite. On est amené à prolonger de la sorte dans la galerie la polygonale de la surface.

2.2. **Le procédé par plusieurs puits verticaux reliés en surface.**

2.3. **Le procédé par un seul puits vertical.**

Quant aux deux derniers procédés énumérés, la méthode est en défaut. Dans le cas où l'on dispose de plusieurs puits, on détermine au fond de chacun d'eux l'aplomb d'un point repéré en surface.

On rattache ensuite les points de la surface et ceux du fond respectivement au levé de surface et au levé souterrain.

Dans le cas présent, les points sont éloignés de plusieurs centaines de mètres. Une incertitude de quelques centimètres sur la position d'un point est compatible avec la précision requise par les travaux du fond.

En pratique, l'entreprise a effectué ses travaux de levés, en utilisant la première méthode, c'est-à-dire par des moyens de raccordement direct avec des points de base d'appui en surface, par le prolongement du cheminement de surface en souterrain.

Le cheminement souterrain a été contrôlé plusieurs fois. Nous avons procédé de même à un contrôle supplémentaire, en se basant sur un seul puits vertical (" Puits 4").

Les méthodes physiques d'orientation peuvent se classer en quatre catégories selon leur principe:

1. Magnétique;
2. Optique;
3. Mécanique;
4. Gyroscopique.

2.4. Le procédé magnétique :

Cette méthode exige l'utilisation simultanée de deux appareils magnétiques de précision: le premier sert à déterminer les azimuts magnétiques en souterrain; le second permet de suivre en souterrain les variations d'urnes de la déclinaison, l'angle "d" que fait le méridien géographique avec le méridien magnétique. (Fig.44).

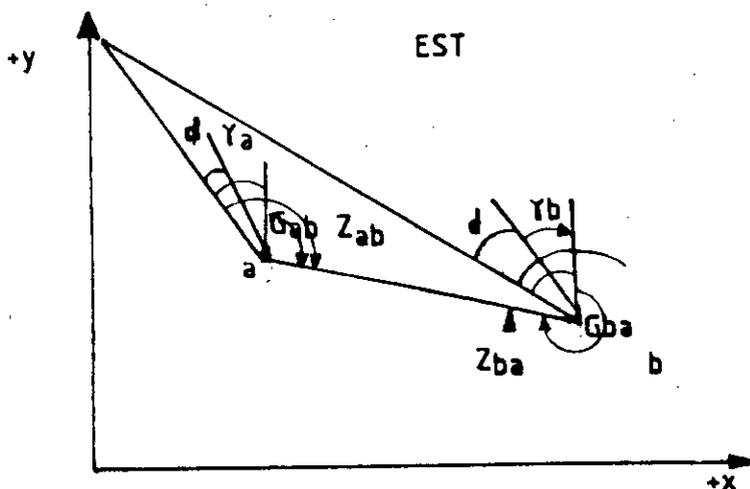


Figure 44 : Orientation d'une droite.

L'azimut et le gisement de "ab" diffèrent de la convergence de méridien du point "a": γ_a

$$G_{ab} = G_{ba} \pm 200 \text{ gr.} \quad \begin{array}{l} + \text{ à l'Est du méridien origine} \\ - \text{ à l'Ouest du méridien origine.} \end{array}$$

$$Z_{ab} = G_{ab} \pm \gamma_a ;$$

$$Z_{ab} = Z_{abm} \pm d_a ;$$

$$G_{ab} = Z_{abm} \pm \gamma_a \pm d .$$

Suivant la précision cherchée, on peut employer:

1. la boussole (précision: ± 5 à ± 10 dmgr.);
2. le déclinatoire (précision: ± 2 à ± 5 dmgr.);
3. le magnétomètre (précision: ± 20 à ± 30 dmgr.);
4. le théodolite magnétique (précision: ± 20 dmgr.).

2.5. Les procédés optiques de raccordement :

-/ Usage du théodolite:

le principe consiste à utiliser le plan vertical de visée d'une lunette astronomique, permettant les observations au nadir ou au zénith. L'axe optique doit décrire un plan rigoureusement vertical, cette condition étant vérifiée par les retournements convenables.

L'influence d'une erreur résiduelle de collimation peut-être éliminée par des observations multiples, faites avant et après le double retournement classique de la lunette et de ses tourillons. [26].

On peut employer la méthode en plaçant le théodolite soit à la surface, soit en souterrain.

a / Théodolite en surface : (fig.45)

Le théodolite doit permettre les visées au nadir. On vise une direction "TA" jalonnée sur le carreau de la mine, et, dont l'azimut est repéré. On fait effectuer à la lunette une rotation partielle pour viser au nadir. Sur les indications de l'opérateur, des aides tendent au fond un fil "m,n", passant par l'aplomb "t" de "T", et le déplacent jusqu'à le faire recouvrir, sur la plus grande longueur possible, par le fil réticulaire vertical. La position moyenne de "ta" est dans le plan vertical de "TA".

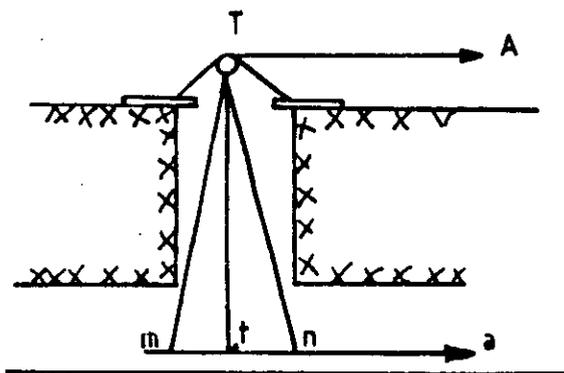
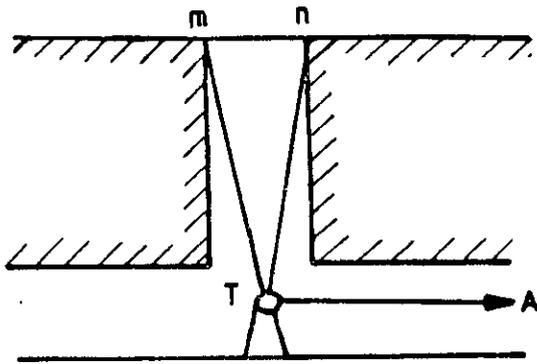


Figure 45 : Principe d'observation en surface.

b / Théodolite en souterrain : (fig.46)

Le théodolite doit permettre les visées au zénith. On vise une direction "TA" au fond. On marque ensuite la trace du plan vertical de visée, en observant l'orifice du puits.



On choisit, pour matérialiser cette direction, deux points aussi éloignés que possible, soient "m,n". On obtient ainsi deux lignes d'opération dans un même plan vertical: l'une au jour "mn", et l'autre au fond "TA".

Figure 46 : Principe d'observation en souterrain.

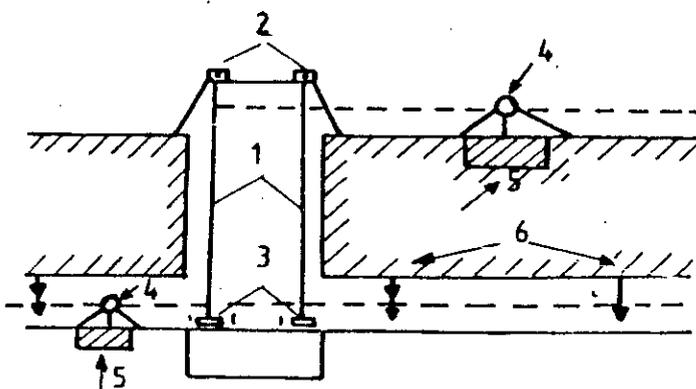
2.6. Les procédés mécaniques :

Il s'agit de procédés par plombs de puits.

Dans la pratique de la construction de tunnel, la transmission de la direction des côtes du cheminement au jour au moyen de deux plombs de puits, grâce à laquelle cette surface se projette au fond; la transmission de la direction de l'orientation sur les côtes du cheminement souterrain s'y produit à l'aide de l'alignement de deux fils à plomb, ou bien par le procédé de triangles raccordés.

Le dispositif employé pour le report d'un axe au fond d'un puits se compose essentiellement de deux plombs de puits aussi distants que possible l'un de l'autre.

2.6.1 / Orientation par l'alignement de deux plombs de puits : (fig.47)



1. plombs de puits
2. treuil
3. bac à huile
4. théodolite
5. repères polygonométriques
6. plombs de puits.

Figure 47 : Orientation par alignement de deux fils à plomb.

Les plombs de puits sont placés au jour dans l'alignement à l'aide du théodolite, d'après la direction du gisement connu

avec la précision égale ou inférieure à +/- 30 dmgr.

La matérialisation de l'alignement des fils à plomb s'effectue à l'aide du second théodolite. Le théodolite se trouve au fond dans l'alignement des fils à plomb, d'après la méthode du rapprochement successif.

a / Une seule station en souterrain à l'aide d'un théodolite :

Au jour (ou en surface), le gisement entre les plombs de puits est déterminé après la direction connue.

Le théodolite est placé au point "S" en souterrain. Au cours d'un tour d'horizon, on réitère après un double retournement; on vise ensuite "O₂" et "O₁" et un signal "X" au fond, éloigné si possible d'une dizaine de mètres. Les distances "O₁O₂", "O₂S", "O₁S", sont mesurées avec la précision de: +/- 2mm.

L'angle β est donné par la relation:

$$\sin \beta = \frac{P_1 S \cdot \sin \gamma}{P_2 P_1}$$

L'angle "x", formé par les directions des plombs de puits, "P₁P₂" et par la direction, "Sx", est égale à: $x = \delta - \beta$.

Dans ce procédé, les mesures linéaires sont peu commodes et imprécises. (Figure:48).

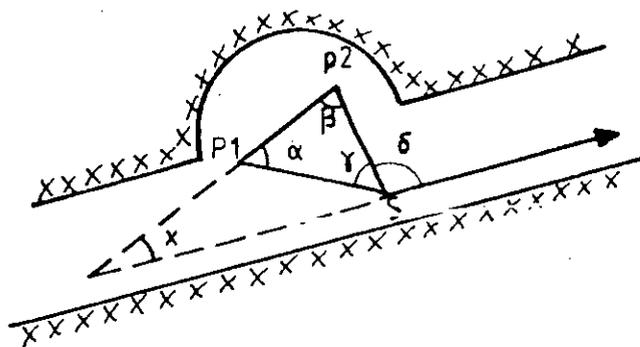


Figure 48 : Schéma d'orientation avec une station en souterrain.

b / Deux stations en souterrain : (fig.49):

"S₁" et "S₂" sont de part et d'autre de "O₁" et "O₂".

Aux stations "S₁" et "S₂", les angles " $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ " sont mesurés

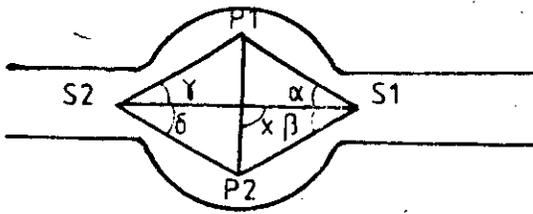


Figure 49: Schéma d'orientation avec deux stations en souterrain.

La relation des sinus donne:

$$\frac{OS_1}{\sin(X-\alpha)} = \frac{OP_1}{\sin\alpha};$$

Du triangle OO_2S_1

$$OP_1 = \frac{OS_1 \cdot \sin\alpha}{\sin(X-\alpha)};$$

Du triangle OO_1S_1 , on a:

$$\frac{OS_1}{\sin(X+\beta)} = \frac{OP_2}{\sin\beta} \rightarrow OP_2 = \frac{OS_1 \cdot \sin\beta}{\sin(X+\beta)}$$

$$\frac{OP_1}{OP_2} = \frac{\sin\alpha \cdot \sin(X+\beta)}{\sin\beta \cdot \sin(X-\alpha)} \quad (1)$$

D'après les triangles OO_2S_2 et OO_1S_2 , on obtient:

$$\frac{OP_1}{OP_2} = \frac{\sin\gamma \cdot \sin(X-\delta)}{\sin\delta \cdot \sin(X+\gamma)} \quad (2)$$

En égalant les deux rapports:

$$\frac{\sin\alpha \cdot \sin(X+\beta)}{\sin\beta \cdot \sin(X-\alpha)} = \frac{\sin\gamma \cdot \sin(X-\delta)}{\sin\delta \cdot \sin(X+\gamma)} \quad (3)$$

C'est la relation entre l'angle inconnu et les angles mesu-

par le tour d'horizon. On réalise la figure classique d'amplification d'une base. On évite ainsi toutes les mesures de longueur.

rés à partir de "S₁" et "S₂". Durant l'orientation, on élimine donc les longueurs par ce procédé.

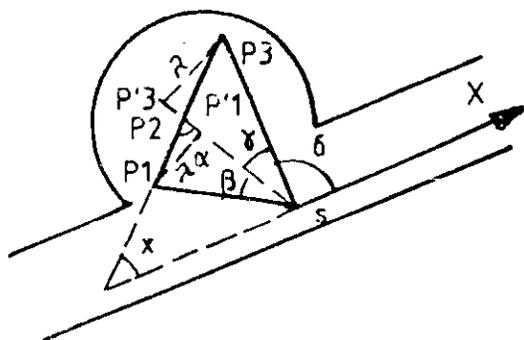
Le développement et la simplification de l'égalité précédente donnent:

$$\operatorname{tg} X = \frac{\operatorname{cotg} \alpha + \operatorname{cotg} \beta + \operatorname{cotg} \gamma + \operatorname{cotg} \delta}{\operatorname{cotg} \alpha \cdot \operatorname{cotg} \delta - \operatorname{cotg} \beta \cdot \operatorname{cotg} \gamma}$$

Connaissant l'angle X, on peut facilement déterminer les gisements: "S₁" et "S₂".

2.6.2 / Emploi de trois plombs de puits : (fig 50)

Le théodolite est au fond au point "S". Les angles " β, γ, δ ", sont mesurés par le tour d'horizon. Les fils à plomb "O₁, O₂, O₃" sont alignés et équidistants. Pour déterminer le gisement de la ligne "Sx", il faut calculer l'angle "x", formé par les directions "O₁, O₂, O₃ et Sx". Géométriquement, l'angle x sera: $x = \gamma + \delta - \alpha$; " α " est inconnu.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \sin \beta \cdot \sin \gamma}{\sin (\beta - \gamma)}$$

Figure 50 : Schéma d'orientation avec plombs de puits en souterrain.

En projetant "P₁" et "P₃" sur la ligne "SP₂", on obtient deux triangles rectangles.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda}{P_2 P_1} = \frac{\lambda}{P'_3 P_2} = \frac{2 \lambda}{P'_1 P'_3} = \frac{2 \lambda}{SP'_3 - SP'_1} = \frac{2 \lambda}{\lambda \operatorname{cotg} \gamma - \lambda \operatorname{cotg} \beta}$$

$$= \frac{2}{\operatorname{cotg} \gamma - \operatorname{cotg} \beta} ;$$

L'expression s'écrit :
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \sin \beta \cdot \sin \gamma}{\sin (\beta - \gamma)} ;$$

Connaissant l'angle " α ", on détermine l'angle " x " et le gisement " Sx ".

a / Procédé des points d'impact : (fig.51)

- principe : à partir de deux points " O_1 et O_2 ", repérés au niveau de l'orifice du puits, on lâche sans vitesse initiale des billes d'acier, dont on recueille au fond les points d'impact " O_1 et O_2 ".

La difficulté consiste à pouvoir réaliser le lâcher sans imprimer la moindre impulsion latérale aux billes. On peut tenter d'y parvenir à l'aide d'électro-aimants, qui permettent le lâcher sans contrainte initiale par coupure du courant d'alimentation, des billes d'acier de diamètre variant entre 5 à 20mm.

Le tracé des points de chute est recueilli sur des écrans inclinés. On place ensuite un théodolite dans le plan vertical des centres des points d'impact.

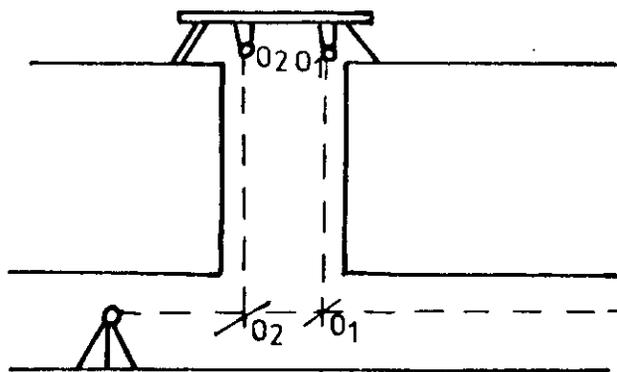


Figure 51 : Schéma de principe du procédé des points d'impact.

- Appareils utilisés :

Le lanceur de billes, de type "Gebi", constitué par un électro-aimant monté sur un bâti à glissière, permettant de régler la longueur de surplomb au-dessus d'un puits.

L'appareil est porté par un triangle à trois vis calantes, muni d'une nivelle sphérique.

L'électro-aimant est alimenté par une pile sèche de 4,5 volts. La partie inférieure est coiffée d'un cône en alliage anti-magnétique, supprimant l'effet de rémanence et pouvant recevoir des billes d'acier de diamètres différents.

- Précision: [9]:

Dans un puits de 46 m de profondeur, les lâcheurs multiples ont permis de fixer à 1mm environ l'erreur moyenne d'une direction, le rayon moyen d'indécision variant de 3 à 5mm. On voit que le procédé est suffisamment précis pour répondre, dans des puits de quelques dizaines de mètres, aux besoins courants de la détermination d'une direction.

2.6.3/ Orientation par le procédé des triangles raccordés: (fig.52)

Par ce procédé, on utilise aussi deux plombs de puits, projetés au fond du puits, cependant ils forment avec les points du cheminement au jour et au fond des triangles. Les plombs de puits et les instruments sont placés de telle manière, que la forme des triangles raccordés puisse répondre aux exigences suivantes: [8]

a/ les angles mesurés entre les plombs de puits "O₂ et O₁" doivent être minimaux (pas plus de 3°);

b/ les distances de l'instrument au plomb de puits le plus proche "b et b'" doivent être choisies de telle manière, que les valeurs des rapports b/a et b'/a' soient inférieures à 1,5.

Où: "a" et "a'", sont les distances entre les plombs de puits.

1. plombs de puits;
2. treuil et disque centrés;
3. bacs à huile;
4. repères polygonométriques;
5. théodolite.

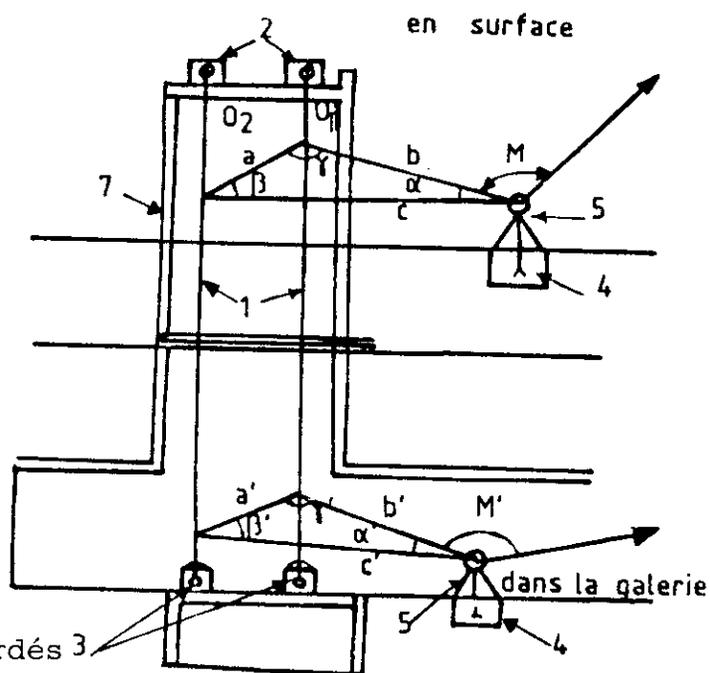


Figure 52 : Schéma d'orientation par la méthode des triangles raccordés

Avec ce procédé, on doit mesurer:

- les longueurs de tous les côtés des triangles raccordés au jour et au fond (a; b, c et a', b', c');
- les angles horizontaux (α, M et α', M').

2.7. Le procédé gyroscopique :

L'orientation gyroscopique est la méthode de détermination des azimuts géographiques des directions à orienter en surface et en souterrain, à l'aide d'un ou de deux gyrothéodolites.

L'axe du gyrothéodolite oscille autour d'une position moyenne, parallèle à la direction Nord-Sud. Cet axe peut-être maintenu, par divers procédés, dans un plan horizontal.

La procédure opératoire comporte deux problèmes, à savoir:

- a. la fixation de la direction Nord (Lecture A);
- b. la mesure de l'angle horizontal, à partir de la position Nord jusqu'à la ligne à orienter (Lecture B).

$$Z = L_B - L_A$$

Le calcul de la précision, basé sur de multiples séries de mesures, fait ressortir une erreur maximale de +/- 10 dmgr.

IV.3. Méthodes d'implantation-

L'implantation des ouvrages du métropolitain consiste à matérialiser sur le terrain les éléments suivants: angles, distances horizontales, points de coordonnées connues.

3.1./ Implantation d'un angle horizontal :

Elle peut s'effectuer par l'un des deux procédés suivants:

3.3.1. Premier procédé: [fig.53]:

Elle est utilisée ainsi, lorsque la précision de l'angle reporté est inférieure à celle du théodolite "T₂" ,
($\Sigma.m.q = 0,00025g$).

L'opération se réalise de la manière suivante: le théodolite est centré en "3", point de la direction "3-2" connu sur le terrain. La lecture zéro est fixée sur le cercle horizontal, tout en visant le point "2", on débloque le limbe, afin de reporter l'angle " β ", fixé par le projet.

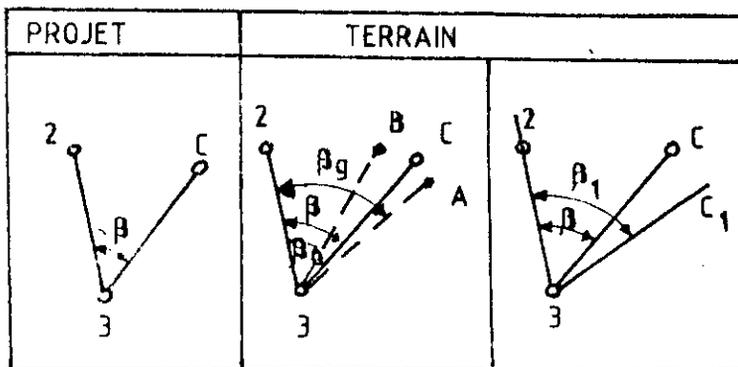


Figure 53: Schéma d'implantation d'un angle horizontal.

On repère le point "A" sur le terrain dans la direction de l'axe de visée. Puis, en faisant basculer la lunette autour de l'axe secondaire, afin de reporter de nouveau l'angle " β ", on repère donc le point "B".

La direction définitive, exempte d'une série d'erreurs systématiques, passera par le milieu de la distance comprise entre les points "A" et "B", (point C).

3.1.2. Second procédé :

Elle est utilisée lorsque la précision de l'angle reporté est supérieure à celle du théodolite "T.1600" ($\Sigma.m.q = 0,0020$ gr.)

Dans ce cas, l'angle " β ", est mesuré plusieurs fois avec la précision demandée. Si la différence, $\Delta\beta = \beta_{mes.} - \beta_{théorique}$, est tolérable, on peut calculer la correction linéaire de la position du point "C₁".

$$\Delta S = \frac{s \cdot \Sigma \cdot \beta}{\rho''}; \quad \rho \text{ dmgr.} = 636620 \text{ dmgr.}$$

"s" : distance horizontale du théodolite au point "C", en mètre.

3.2./ **Implantation d'une distance horizontale :**

On la réalise au moyen du "DISTOMAT", avec une précision supérieure de l'ordre de 5mm/Km. On peut également utiliser un ruban d'acier, lorsque la distance à reporter est courte. On mesure la distance dans la direction donnée, en considérant les corrections nécessaires, soit:

$$Dh = d + \Delta d_e + \Delta d_t + \Delta d_h$$

où :

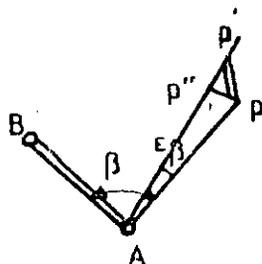
- d : distance horizontale fixée par l'étude, m;
- Δd_e : correction d'étalonnage, m;
- Δd_t : correction de dilatation due aux variations de température, m;
- Δd_h : correction due à l'inclinaison des lignes par rapport à la ligne d'horizon, m.

3.3./ Implantation des points de coordonnées connues :

3.3.1. Procédé polaire : (fig.54)

On utilise ce procédé sur site, car il permet de mesurer les distances à partir du point de base d'appui jusqu'au point à situer.

Si la direction "AB" a déjà été fixée sur le terrain, le gisement (G_{AB}) étant connu, ainsi que les coordonnées du point "A", il ressort donc que le gisement devrait être égal à :



$$\operatorname{tg} g_{AP} = \frac{x_P - x_A}{y_P - y_A} ;$$

tandis que l'angle " β " est égal à :

$$\beta = l_{AP} - l_{AB}$$

Figure 54 : Schéma d'implantation des points (méthode polaire).

On transpose la valeur calculée de l'angle " β " par le théodolite, en utilisant l'un des procédés étudiés précédemment. On reporte la distance horizontale "Dh" suivant la direction "AP", déterminée par la relation :

$$Dh = \frac{x_P - x_A}{\sin G_{AP}} = \frac{y_P - y_A}{\cos G_{AP}}$$

et on marque le point "P".

L'erreur de la position du point "P", sans tenir compte des erreurs des données initiales, d'après la relation suivante, sera :

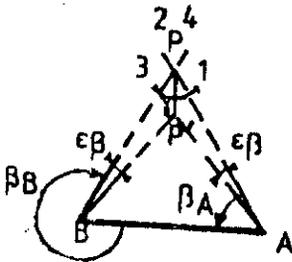
$$[9] \quad \epsilon_P = \pm \sqrt{\frac{Dh^2}{\rho^2} \epsilon_\beta^2 + \epsilon_{Dh}^2} ; \quad \text{où :}$$

- Σ_p : e.m.q de l'angle implanté, gr.;
- Dh : distance horizontale "AP", m;
- Σ_{Dh} : erreur de distance implantée, m.

3.3.2. Procédé d'intersection : (fig.55)

Si sur le terrain, on a deux points fixés "A" et "B", on peut calculer les gisements " G_{AB} ", " G_{AP} ", " G_{BP} ", et, d'après leur différence déterminer les angles " β_A " et " β_B ". Ces angles déterminés par calcul sont ensuite implantés sur le terrain par le théodolite, en grades.

Les points d'intersection des directions sont repérés par des jalons. L'erreur de la position du point "P" (mm) peut-être calculée d'après la relation:



$$\Sigma_p = \pm \frac{\Sigma_p \cdot \sqrt{\sin^2 \beta_A + \sin^2 \beta_B}}{\rho \cdot \sin^2 \gamma} \cdot Dh_{AB}$$

Figure 55 : Schéma d'implantation des points
(méthode par intersection).

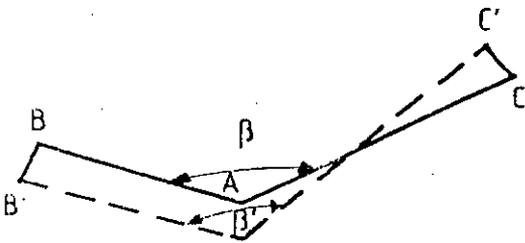
3.3.3. Procédé des coordonnées rectangulaires : (fig.56)

Il est utilisé dans le cas du tracé des infrastructures et constructions, situées près des côtés de la base d'appui. La position du point "P" se détermine par la longueur du segment " d_1 " (abscisse), reportée suivant le côté "AB" de la base d'appui, et de la longueur " d_2 " (ordonnée), reportée du point "C".

$$\Sigma_p = \pm \sqrt{\Sigma_x^2 + \Sigma_y^2 + \frac{d_2^2}{\rho^2} \cdot \Sigma_p^2}$$

- Σ_x : Σ .m.q de report de l'abscisse " d_1 ", mètres;
- Σ_y : Σ .m.q de report de l'ordonnée " d_2 ", mètres
- Σ_p : Σ .m.q de tracé de l'angle droit sur le terrain, en grades.

surface, un instrument de mesure d'angles. Il faut remarquer que le centrage doit être effectué avec une précision beaucoup plus grande qu'en surface, étant donné que la mesure des angles horizontaux se réalise dans des conditions défavorables; la plupart des angles mesurés avoisinent les 200 Gr., les côtés de la polygonale étant courts.



L'erreur m.q de l'angle horizontal "β" est due à l'imprécision de centrage du théodolite et des signaux; elle se calcule d'après la relation:

Figure 58 : Erreur de mesure des angles horizontaux.

$$\Sigma_{\beta} = \pm \sqrt{\frac{\rho^2}{2 a^2 b^2} [\Sigma_c^2 (a^2 + b^2) + \Sigma^2 (a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \beta)]}$$

Où: - a, b : distances horizontales (mètres).

- Σ, Σ_c : Erreurs linéaires de centrage du théodolite et des signaux (mètres).

Parmi les trois méthodes de centrage connues, nous citerons:

- la méthode par utilisation du plomb de puits;
- la méthode optique;
- la méthode automatique.

Le géomètre utilise cette dernière méthode, qui consiste à transposer réciproquement le théodolite et le signal. (fig.59).

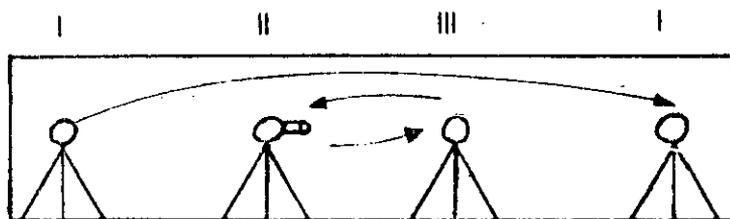


Figure 59 : Schéma de cheminement en souterrain.

On extrait le signal de l'embase, et si on remplace cette dernière par le théodolite, dont l'axe principal se trouve centré au point vertical du signal, le centrage automatique de l'instru-

ment se fera.

Le centrage du théodolite se fait à l'aide du plomb de puits. On fait descendre plomb de puits, de telle manière que sa pointe touche presque le centre supérieur du théodolite.

Cette méthode est la plus précise et la plus productive.

4.2. / Mesures de distance :

Elles se réalisent au moyen d'un: "DISTOMAT", de type, "DI4/DI44", ayant une précision de l'ordre de : 5mm + 5mm/Km.

IV.5. Contrôle de la base d'appui en souterrain-

Le contrôle commence à se faire par:

- la reconnaissance sur terrain, en identifiant les points de la polygonale (GH₁₁₇, HOP, P4), repérés par des clous "Halti".

Ces points s'appuient sur les points de la triangulation d'ordre supérieur "MAI", "GH₂₁", sous des conditions géométriques convenables.

- L'interprétation des résultats des mesures réalisées, en partant de la station (point "Hôpital"), on a pu trouver les coordonnées de deux points ("GH₁₁₇", "puits 4"). Les résultats obtenus par ces deux points correspondent à ceux établis par l'entreprise. L'appareillage utilisé est un théodolite de type "T.2000", de marque "WILD".

D'autres mesures ont pu être effectuées à partir du point "puits 4", afin de déterminer les coordonnées du point "Hôpital"; du point souterrain "V₂" (rameau).

Le raccordement surface-souterrain de deux points a été réalisé par alignement de deux plombs de puits, dans un plan du gisement repéré en surface.

L'alignement des plombs de puits a été effectué à l'aide du théodolite "T.2000".

Un ruban d'acier nous a permis d'évaluer la distance entre les plombs de puits et les points de la polygonale.

La difficulté rencontrée durant la mise en place de deux plombs de puits réside en leur stabilité: afin d'amortir leurs oscillations, nous les avons plongé dans des bacs d'eau.

Les mesures, effectuées à partir des trois stations en sou-

POINT (S)	ANGLE, " β_i ", [gr.]	GISEMENT, " G_i ", [gr.]	LONGUEUR DES COTES, [m]	DIFFERENCE DES COORDONNEES		COORDONNEES	
				Δx	Δy	x [m]	y [m]
1 1 7		300.6806				531 883.600	384 837.520
H o p	331.1614					531 770.697	384 838.727
		31.8420	27.040	12.970	23.728		
P 4	56.66500					531 783.667	384 862.455
		288.5070	08.817	- 8.673	- 1.583		
V 2	200.0000					531 774.994	384 860.872
		288.5070	19.540	- 19.222	- 3.508		
V 1	201.8370					531 755.772	384 857.364
		290.3440	31.629	- 31.266	- 4.779		
1 0'						531 724.506	384 852.585

Tableau 14 : Contrôle de la base d'appui en souterrain.

terrain, ont permis de vérifier les coordonnées des points de la polygonale. (Tableau 14).

En conclusion, les résultats obtenus permettent de considérer la base souterraine suffisamment précise pour les travaux d'implantation de pilotage des galeries souterraines.

IV.6. Implantation de l'axe du tunnel:

Les tracés des tunnels du métropolitain sont projetés sur les plans topographiques à l'échelle au 1/500.

Le tracé comporte deux voies parallèles, qui se répartissent dans un tunnel.

Préalablement, sur le plan général de la région, on représente l'axe du tracé projeté et les infrastructures du métropolitain directement liés avec la surface, comme par exemple, les portails des tunnels, les vestibules des stations, les allées piétonnes, etc...

Ensuite, on détermine graphiquement sur le plan les coordonnées des angles du virage du tracé et la valeur de ces angles en grades, avec la précision du dixième de dmgr. Quant aux distances entre les points des virages, la précision sera de l'ordre du millimètre.

Les angles des courbures du tracé et les distances les séparant se calculent par résolution des problèmes géodésiques inversés, en utilisant à cet effet les formules générales connues:

$$\text{tg } G_{1-2} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad \text{-----} \rightarrow G_{1-2}$$

$$S_{1-2} = \frac{\Delta x}{\sin G_{1-2}} = \frac{\Delta y}{\cos G_{1-2}} ;$$

ou:

$$S_{1-2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} .$$

Connaissant les angles de courbure, et, posant la grandeur des rayons des courbes circulaires, on calcule les longueurs des courbures et des lignes des tangentes, avec une précision de : +/-1mm.

Les valeurs calculées ainsi sont prises comme base de projection détaillée ultérieure et d'implantation de l'axe du tunnel.

Sur le schéma géométrique, on cite les données suivantes:

1. le numéro des piquets et le sommet des angles de la courbure du tracé.
2. les coordonnées des piquets et des sommets des angles de courbure.
3. les gisements des lignes entre les angles des courbures.
4. les éléments de la courbure circulaire, inscrite dans l'angle de courbure du tracé, sont:
 - a) l'angle central;
 - b) le rayon de la courbure, R;
 - c) la tangente et la courbe déterminées selon les formules suivantes:

$$T = R \cdot \text{tg} \frac{\beta \text{ gr}}{2} ; \quad C = \frac{\beta \text{ dmgr.}}{\rho \text{ dmgr.}} \cdot R$$

Le contrôle du schéma géométrique s'effectue par calculs répétitifs des éléments précités.

L'implantation de l'axe du tunnel précède le:

1. tracé du centre du puits;
2. tracé de l'axe du puits;
3. implantation des galeries.

6.1./ Tracé du centre du puits :

Durant la construction du métropolitain, on dispose les puits, qui sont éloignés des excavations principales d'une distance de 30 mètres environ.

Le tracé du centre du puits s'effectue par des intersections linéaires à partir des points du canevas. On introduit ensuite le centre obtenu dans le cheminement, en déterminant ses coordonnées rectangulaires.

Avec le creusement du puits, son axe peut-être dévié de la position verticale. Ces déviations en pratique atteignent 2-3 cm.

Ce qui explique qu'en fin de creusement, on réalise un levé topographique de l'édification du puits et que l'on détermine la position réelle du centre. Ensuite, selon la grandeur de l'écart

du centre réel par rapport à celui fixé sur le plan, on obtient graphiquement une déviation des coordonnées, tout en calculant les coordonnées réelles du puits.

6.2. / Tracé des axes du puits : (fig.60)

On distingue deux axes du puits:

- axe principal; c'est une ligne parallèle à l'axe de la montée, qui passe par le centre du puits.
- axe transversal; c'est une ligne perpendiculaire à l'axe principal, passant par le centre du puits.

Les données de base pour le tracé sont:

- 6.2.1. le gisement des côtés et coordonnées des points de la polygonale;
- 6.2.2. les coordonnées du centre du puits;
- 6.2.3. le gisement de l'axe de la bouvette.

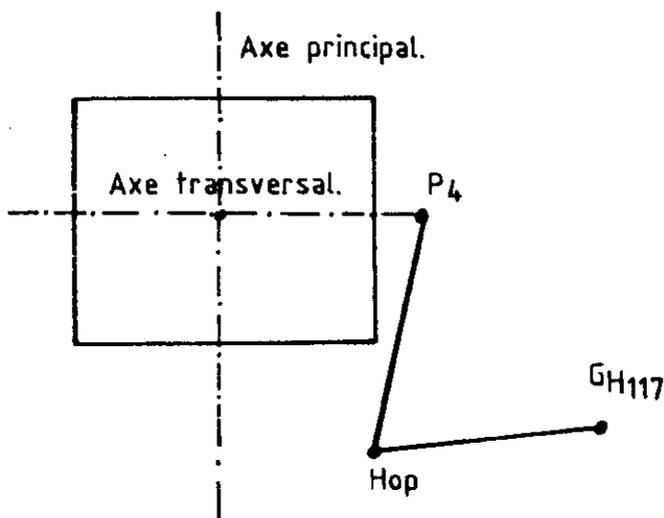


Figure 60 : Schéma de tracé des axes du puits.

Lorsque le tracé du centre du puits a été vérifié, on procède au tracé des points déterminant la direction des axes de celui-ci. Le tracé est toujours soumis au contrôle. Ensuite, on procède au rattachement de ces points à la polygonale, et on détermine à nouveau ces coordonnées. La valeur du gisement de l'axe principal du puits avec les coordonnées de son centre ont été transmises au bureau d'étude. (Tableaux 15-16-17-18) (Fig.61 et 62).

NUMEROTATION	α [gr.]	d [m]
5	307.193	25.435
6	324.237	28.860
7	333.743	23.657
8	313.617	19.331

Tableau 15 : St. H O P

Réf. G H 117

 $G_{HOP \rightarrow 117} = 100.6808$

NUMEROTATION	α [gr.]	d [m]
1	332.248	27.426
2	316.307	26.861
3	307.250	22.034
4	325.625	20.770

Tableau 16 : St. H O P - Réf. G H 117

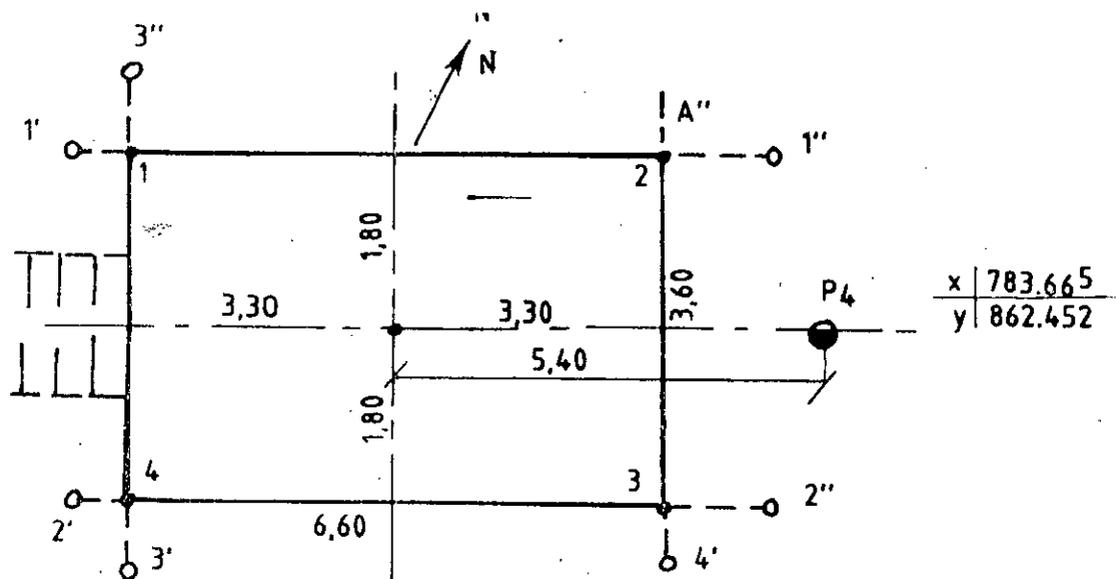


Figure 61 : Schéma de tracé des axes du puits.

NUMEROTATION	x [m]	y [m]	α [gr.]	d [m]
1	774.784	862.660	310.087	24.286
2	781.276	863.845	324.696	27.263
3	781.922	860.304	329.858	24.329
4	775.430	859.119	313.838	20.940

Tableau 17 : St. H O P

Réf. G H 117

 $G_{HOP \rightarrow 117} = 100.6806$

NUMEROTATION	x [m]	y [m]	α [gr.]	d [m]
1'	773.111	862.355	67.570	10.557
1''	783.440	864.240	160.185	1.803
2'	773.758	858.813	45.744	10.557
2''	784.087	860.699	353.115	1.804
3'	775.799	857.102	30.135	9.516
3''	774.433	864.578	82.564	9.476
4'	782.291	858.287	388.440	4.387
4''	786.926	865.764	124.165	4.299

Tableau 18 : Réf. H O P - St. P 4.

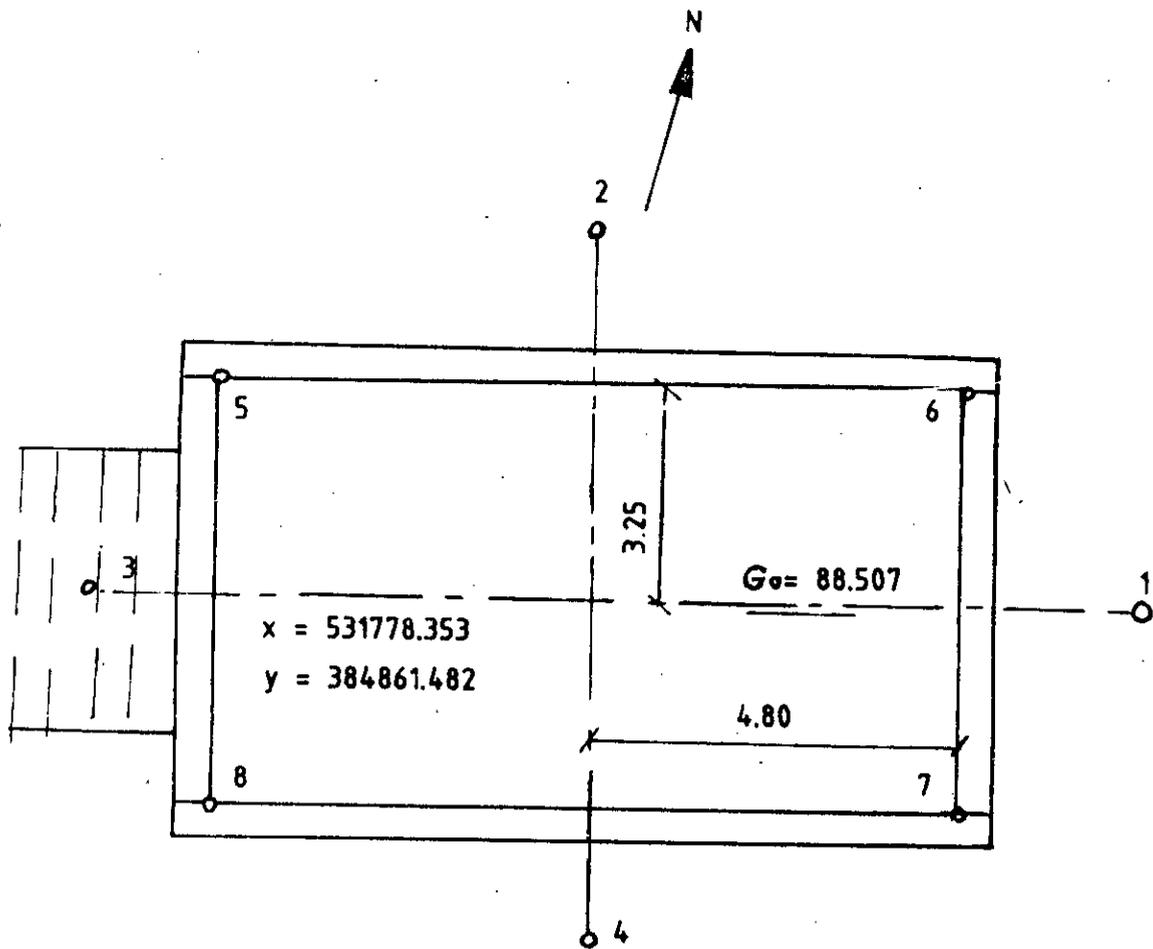


Figure 62 : Schéma de tracé des axes du puits.

		x	y
CENTRE P 4		531 778.353 m	384 861.482m
	m. m.		
1	6.00 0.00	784.255	862.559
2	0.00 -3.20	777.778	864.630
3	- 5.00 0.00	773.434	860.584
4	0.00 +3.80	779.035	857.744

	0.983748 0.179553		
H O P		770.697	838.727
29.6487 gr.			
R		531 782.609 m	384 862.428 m

NUMEROTATION	α [gr.]	d [m]	A z [gr.]
1	265.295	1.652	94.944
2	97.724	5.311	327.226
3	57.724	9.361	287.373
4	11.845	5.893	241.494

Tableau 19 : St R Ref.Hop.

a / Tracé de l'axe de la montée et du complexe minier:

Le tracé et la matérialisation de l'axe de la montée s'effectuent après la détermination des coordonnées du centre du puits réel. Les axes de la montée sont parallèles à ceux du puits, et déplacés relativement au centre en deux plans:

- a.1/ à la distance "m" dans le plan de l'axe principal du puits;
- a.2/ à la distance "e" dans le plan de l'axe de symétrie.

En se référant au tracé de cet axe sur la figure 63, on désignera les principales parties du puits par:

1. Axe principal du puits;
2. Axe transversal de la montée;
3. cage;
4. Axe longitudinal de la montée;
5. Section d'escaliers;
6. Salle des machines;
7. Axe du câble du treuil;
8. Axe transversal du puits;
9. Basculeur;
10. Axe de la poulie.

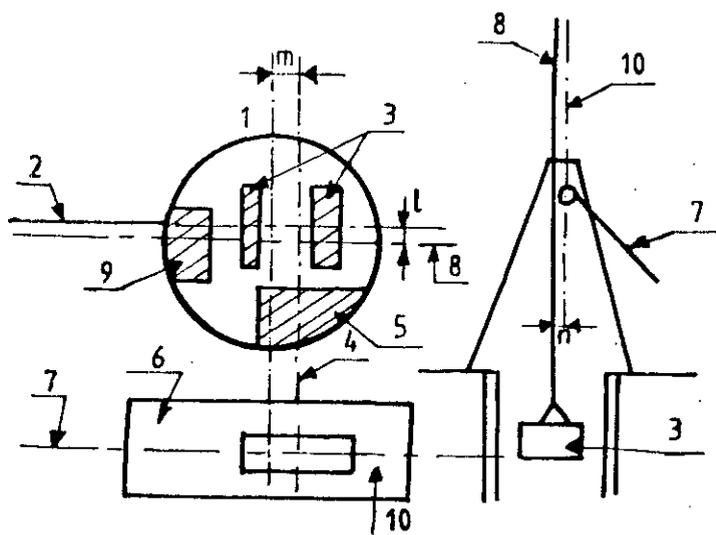


Figure 63 : Implantation des axes du puits.

Ces décalages permettent de placer dans la partie supérieure du puits une section d'escaliers et le basculeur. Les axes de la montée sont tracés au moyen de report des segments, égaux à "m" et "e", à partir des points fixes des axes du puits. On fixe des axes de la montée sur le niveau de référence (Zéro), aussi bien que sur les paliers supérieure et inférieure du derrick du tracé de fondation.

Avec le fonçage du puits, peut apparaître de l'échappement de sables et d'argiles saturées d'eau, résultat du soutènement au fond du puits. Suite à ces évacuations, la surface s'affaisse, et avec elle, les repères en béton, fixant le tracé des axes du puits et d'extraction.

C'est pourquoi, il est indispensable d'établir une observation systématique de la stabilité de ces repères.

On réalise le tracé de la montée avec une tolérance de :
+/- 2 cm.

Avec le montage de la machine d'extraction, les tolérances sont les suivantes: [8]

- le désalignement de l'axe du cylindre dans le plan ne doit pas dépasser +/- 4 mm;
- la différence des repères des extrémités de son axe ne doit pas dépasser +/- 3 mm.

Finalement, on obtient l'axe transversal d'extraction, par

rapport à la dimension:

$$n = \frac{D + d}{2}$$

où: D : diamètre de la poulie
d : épaisseur du câble .

6.3./ Implantation du rameau :

Le creusement des galeries prévoit les travaux suivants:

- chaque cadre doit-être correctement installé selon la hauteur, la normale, le piquetage;
- levé des cadres montés et du profil du sol exploité;
- détermination du volume global des travaux de terrassement déjà réalisés;
- contrôle de la déformation du canevas de base souterrain et des soutènements.

La direction initiale est donnée par les fils à plomb du puits. Au fur et à mesure de l'avancement des abattages, on place les nouveaux plombs de puits suivant l'axe du tracé. Le dernier plomb de puits est éloigné du front de taille de 2 à 3 m. Chaque point du repère est placé à l'aide de trois plombs de puits minimum. La position des signaux axiaux est vérifiée et corrigée par le théodolite par rapport aux points de la polygonale tous les 25 mètres.

Durant l'avancement du creusement, on matérialise les points de la polygonale avec leurs coordonnées.

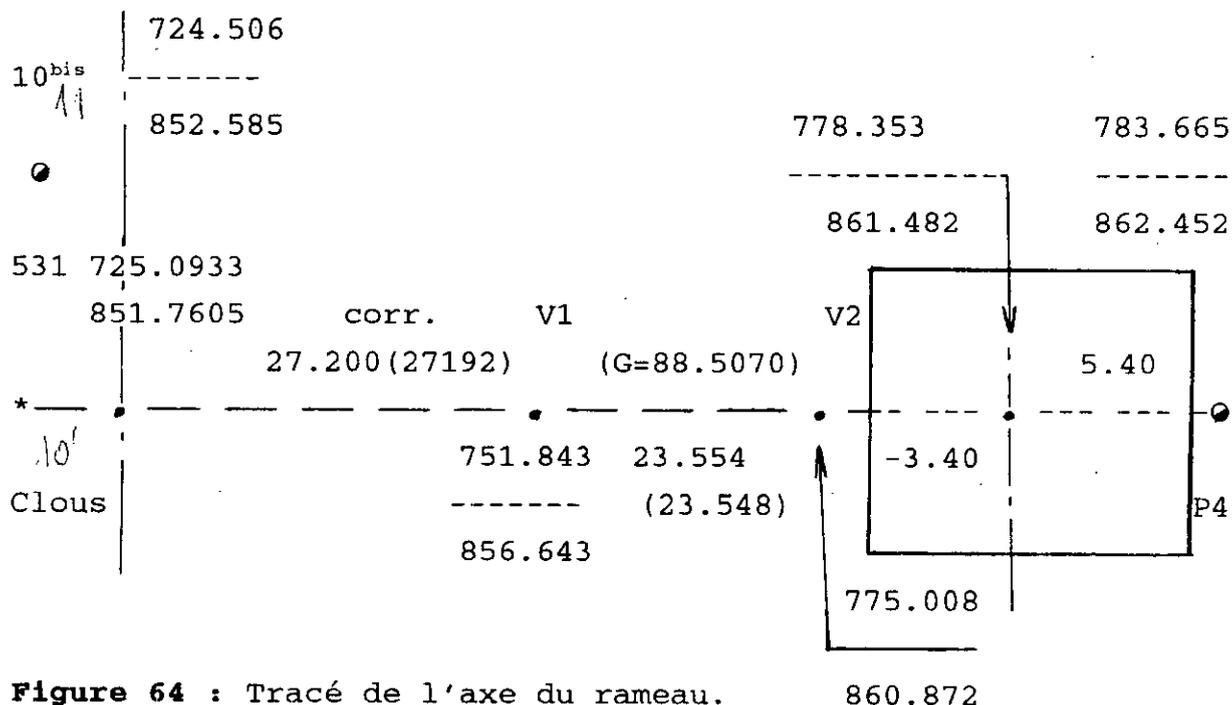
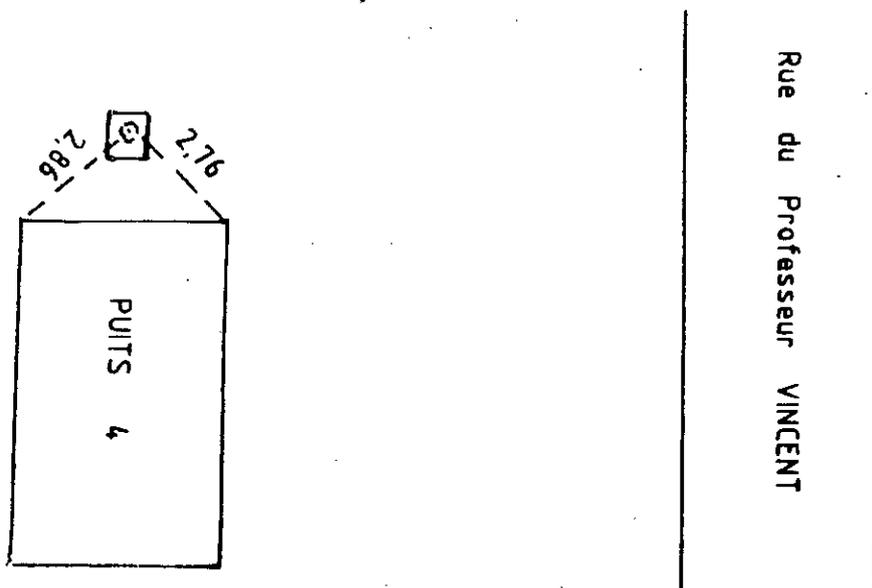


Figure 64 : Tracé de l'axe du rameau.



Coup de pointeau sur la plaque près du puits "P4"

Figure 65 : Exemple de repérage des points du puits " 4 " .

6.4 / Tracé de l'axe longitudinal d'un tunnel dans des ouvrages du métropolitain :

6.4.1 - Tronçons linéaires:

l'implantation de l'axe longitudinal au moyen d'un théodolite et d'un ruban d'acier sur des tronçons linéaires du tracé, peut se réaliser par les procédés suivants:

a / par l'implantation des distances $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$, entre des sommets de la polygonale et l'axe du tunnel selon la normale. (fig.66).

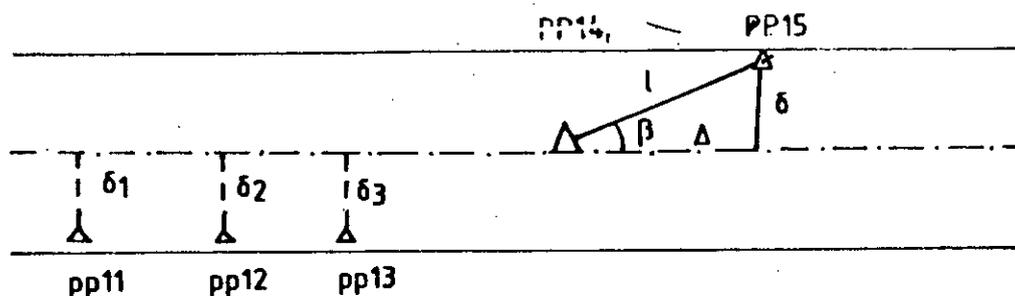


Figure 66 : Piquetage des points sur l'intervalle linéaire.

Les trois points implantés ainsi doivent se situer dans l'alignement, ce qu'il faut contrôler.

L'alignement obtenu, à l'aide du théodolite, sera continu jusqu'au fond du tunnel.

b / par la résolution du triangle rectangle, selon les formules suivantes:

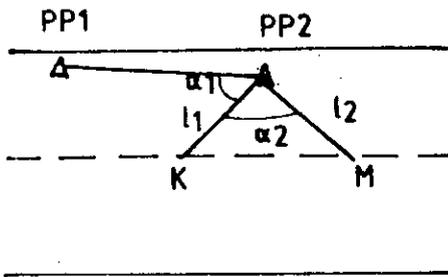
$$\delta = l \cdot \sin \beta ; \quad \Delta = l \cdot \cos \beta \quad , \quad \text{ou} \quad l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}.$$

β : angle obtenu par la différence des gisements: de l'axe du tracé et du côté de la polygonale.

En stationnant le théodolite sur le point "PP14", on reporte l'angle β .

On vérifie: $\delta_{\text{mes.}} = \delta_{\text{calculée.}}$

c / les points "1" et "2" sont ceux de la polygonale implantée. On veut déterminer sur l'axe du tunnel les points "K" et "M", dont les coordonnées sont connues (sur le plan). (fig.67).



On détermine les longueurs " l_1 " et " l_2 ", ainsi que leur gisement. D'après la différence des gisements, on obtient " α_1 " et " α_2 ". Pour déterminer la position des points "M" et "K", on stationne le théodolite au point "PP2".

Figure 67 : Schéma d'implantation de points sur un tronçon linéaire.

On vise "PP1", et, en reportant l'angle " α " et la distance déjà calculée " l_1 ", on obtient le point "K".

Les angles " α_1 " et " α_2 " sont mesurés par le tour d'horizon. Les longueurs " l_1 " et " l_2 " mesurées et calculées ne doivent pas différer de +/- 5 mm.

6.4.2 - Implantation de l'axe sur des courbes de raccordement:

On utilise les courbes de raccordement dans la construction du métropolitain, pour obtenir le passage facile d'un tronçon linéaire à une courbe circulaire, et inversement.

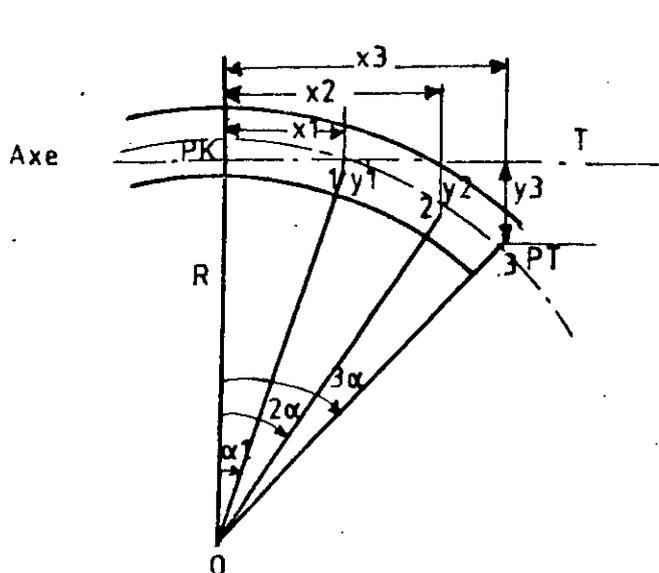
Les longueurs de l'arc "L" et les paramètres "C" sont donnés sur le plan de projection.

Le tracé détaillé de la courbe peut être exécuté par différents procédés:

a/. Ordonnées sur la tangente: (fig.68)

cette méthode est la plus simple et la plus pratique, qui puisse être employée.

Les points "1", "2", "3", ..., à implanter à partir du point "PK", de tangence "T" d'un cercle, de rayon "R", sont définis par les longueurs d'arc: $PK-1 = 1-2 = 2-3 = \dots = l$;



$$\alpha_{gr} = \frac{200 \cdot l}{\pi R} ;$$

En considérant le point "PK" comme origine du système d'axes orthonormé dont la tangente est le demi axe des abscisses positives, on a dans l'immédiat:

$$X_1 = R \cdot \sin \alpha ;$$

$$Y_1 = R - R \cdot \cos \alpha \rightarrow Y_1 = R (1 - \cos \alpha)$$

$$\text{De même: } X_2 = R \cdot \sin 2\alpha ;$$

$$Y_2 = R (1 - \cos 2\alpha) , \text{ etc...}$$

Figure 68 : Implantation d'une courbe par ordonnées sur les tangentes.

Différentes tables sont utilisées à cet effet. Elles donnent les coordonnées sur la tangente des points pris mètre par mètre sur la courbe.

On porte les abscisses sur la tangente de "PC", puis à partir des points ainsi obtenus, on élève à l'aide d'une équerre optique les perpendiculaires, sur lesquelles on reportera les ordonnées correspondantes. Cependant, pour l'implantation de l'axe du tunnel, la tangente n'est utilisable que sur une très faible distance. On doit alors décaler la tangente et poursuivre l'implantation de la courbe sur cette dernière, en reportant la grandeur, Y_{k-a} , ou employer un procédé semblable, celui des ordonnées sur la corde. Pour cela, on stationne le théodolite au point "PK₁", en reportant à partir de la tangente l'angle " β " (comme différence des gisements de la ligne de la tangente et de la corde).

On fixe la direction obtenue de la corde. Du point "PK", on reporte les distances " S_i ", et, à leurs extrémités, on élève les perpendiculaires " h_i ".

Les tables, pour le tracé des courbes, donnent les abscisses et les ordonnées, que l'on doit porter sur la corde, pour obtenir les points de celle-ci. (Figure 69).

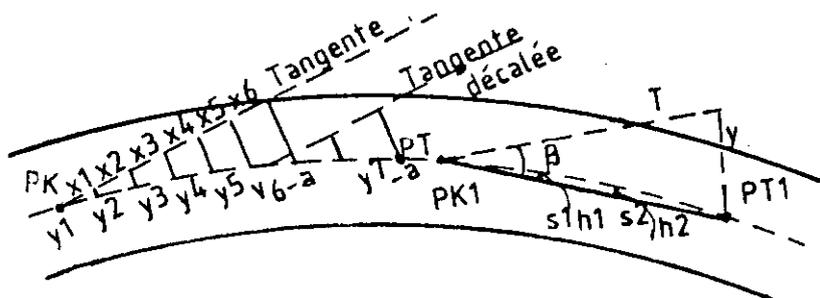


Figure 69 : Schéma du tracé de l'axe du tunnel sur la courbe de raccordement.

Finalement, le tracé de l'axe du tunnel sur la courbe curviligne peut-être réalisé par différents procédés. Ainsi, par exemple on citera le procédé des angles: on stationne au point "PK" avec un théodolite; on ouvre l'angle " $\alpha/2$ " de la direction de la tangente "T" servant de référence; on reporte la distance: (fig.70)

$$l_1 = 2 R \sin \alpha/2,$$

CE qui situe le point "1". Il en est de même pour le point "2": on ouvre l'angle $2 \alpha/2$; on reporte la distance :

$$l_2 = 2 R \cdot \sin 2 \alpha/2, \text{ etc...}$$

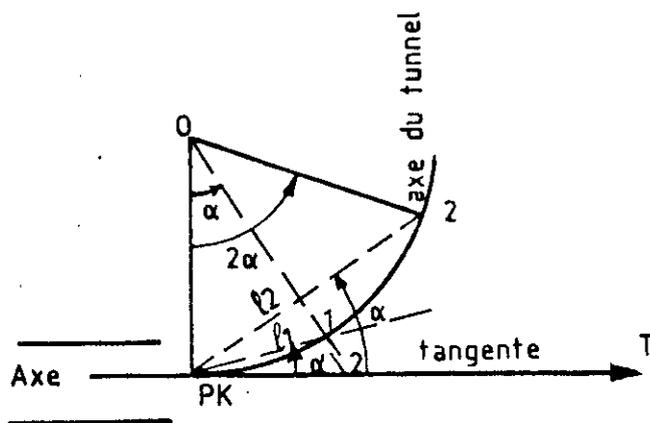


Figure 70 : Implantation de l'axe du tunnel.

Ou encore, la direction de la corde calculée d'avance peut-être implantée de la façon suivante: (fig.71): connaissant les

coordonnées des points "PP₂" et "PK", on détermine "S₁" et "α₁". D'après ces données, on peut implanter le point "PK" au tunnel. C'est la station "1" du théodolite, qui nous permet de reporter l'angle "α₂" et de fixer la direction de la première corde "PK-1", connaissant la longueur.

Puis, on stationne le théodolite au point "1", et, en reportant l'angle 200-β₁, on obtient la direction de la corde "1-2", sur laquelle on détermine la position du point "2", etc...

Pour le contrôle, le tracé peut-être refait par une autre personne et par une autre méthode.

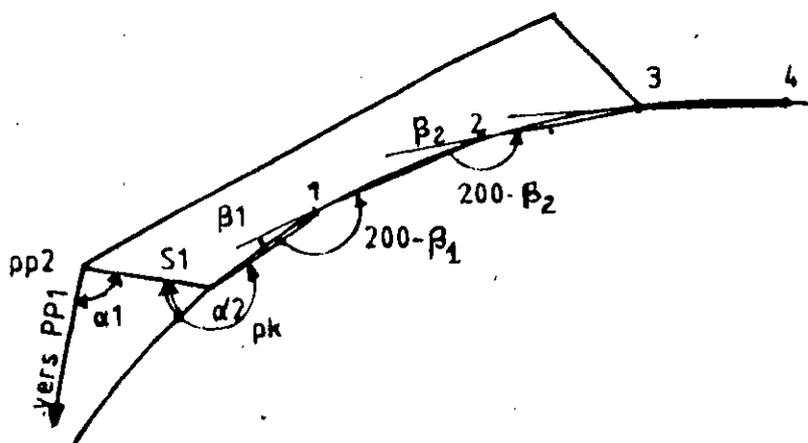


Figure 71. : Exercice d'orientation de la direction d'une corde sur une courbe circulaire dans la détermination des points de l'axe du tunnel.

b / Calcul du piquetage et éloignement des signes polygométriques par rapport à l'axe du tracé: (Fig.72):

pour la détermination de la position des points polygométriques par rapport à l'axe de projection du tracé, il faut calculer son piquetage "Δ" et l'éloignement de l'axe de projection du tunnel "δ".

Le calcul des grandeurs "δ" et "Δ" sur les tronçons droits du tracé a lieu, en utilisant les procédés suivants:

b.1. selon les formules de la géométrie analytique:

$$\delta = \Delta y \cdot \cos G - \Delta x \cdot \sin G$$

$$\Delta = \Delta y \cdot \sin G + \Delta x \cdot \cos G$$

où G : gisement du tracé, en gr.

b.2. par la résolution du triangle rectangle, selon les formules: $\delta = l \cdot \sin \gamma$

$$\Delta = l \cdot \cos \gamma$$

- l: distance en mètres entre le point de projection et le signe, obtenu à partir de la résolution du problème géodésique inversé.
- γ : angle, obtenu par différence des gisements: axes du tracé et de ligne "PK.47-PK.148".

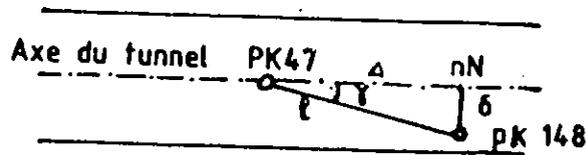


Figure 72 : Implantation de l'axe sur un tronçon linéaire.

Si le signe polygonométrique est situé sur le tronçon de la courbe de raccordement, on calculera d'abord son éloignement " δ' " par rapport à la ligne de la tangente et la distance de piquetage " Δ ".

L'éloignement du signe " δ ", en mètre, par rapport à l'axe du tunnel se détermine selon la formule:

$$\delta = \delta' - y_i - q_i; \quad y_i = \frac{l^3}{6C}; \quad q_i = \frac{l_i}{L}$$

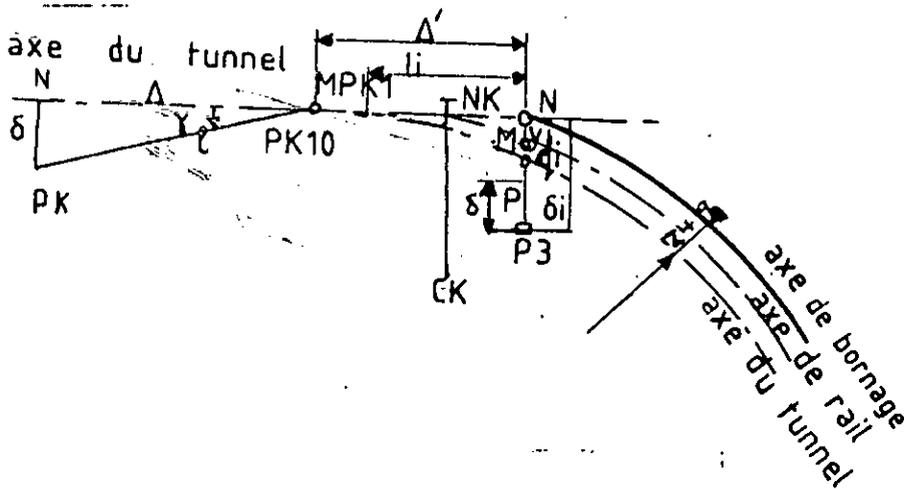


Figure 73 : Implantation de l'axe sur le tronçon curviligne.

- Où y_i : ordonnée de la courbe de raccordement sur le piquet de signe polygonométrique. (mètre)
- q_i : déplacement de l'axe du tunnel de l'axe de la voie sur

ce même piquet. (mètre)

l_i : différence de piquetage de signe polygonométrique et de départ de la courbe de raccordement. (mètre)

C : paramètre de la courbe de raccordement.

L : longueur de la courbe de raccordement. (mètre)

L'éloignement du signe polygonométrique de l'axe du tunnel sur le tronçon de la courbe de raccordement (figure 73) est déterminé par la formule:

$$\delta = [R - (z + q)] - E$$

E: distance en mètre du centre de la courbe jusqu'au signe polygonométrique, déterminée à partir de la résolution du problème inverse.

Pour obtenir le piquetage du signe sur le tronçon de la courbe circulaire, on détermine la longueur de l'arc "S" selon l'axe décalé du "NK" jusqu'au point "M", en utilisant la formule:

$$S = R Q / \rho , \text{ dmgr. } ;$$

où Q: angle en grade au centre, calculé par la différence du gisement "CK" et "NK".

Ensuite, on détermine les piquetages de signe, selon la formule:

$$PK_{P3} = PK_{NK} + S$$

Pour le contrôle de la valeur de piquetage du signe, on peut calculer par ce même procédé de l'arrivée de la courbe circulaire c / Procédés de tracé de l'axe de projection du tunnel de signe (points) polygonométré:

Le tracé de l'axe de projection des infrastructures des signes polygonométriques sur des tronçons droits du tracé se réalise par les procédés suivants:

- c.1. par la mise de côté des éloignements " δ " des points polygonométriques jusqu'à l'axe de projection.
- c.2. par le décalage des points polygonométriques des lignes, parallèles à l'axe de projection.
- c.3. par le décalage des signes polygonométriques des plombs de puits par la méthode polaire.

Le tracé détaillé de l'axe de projection, dans les limites de la courbe de raccordement, se réalise soit à partir de la ligne de la tangente, soit à partir de la corde serrée par cette courbe. (fig.74).

L'implantation, à partir de la ligne de la tangente sur la courbe de raccordement, se produit par mise de côté des abscisses "X" et des ordonnées "Y".

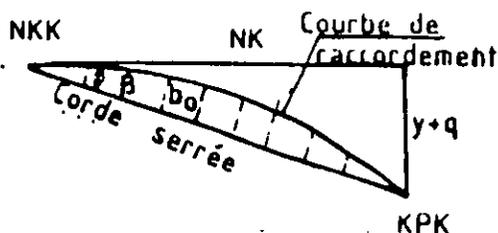


Figure 74 : Schéma d'implantation de la courbe de raccordement.

Pour le tracé de l'axe de la voie, on utilise les formules suivantes:

$$x_i = l_i ; \quad y_i = \frac{l_i^3}{6C} ;$$

Où: l_i : longueur de la courbe de "NKK" jusqu'au point "i", en m.
 C : paramètre de la courbe de raccordement.

Pour le tracé de l'axe du tunnel, on met de côté l'ordonnée:

$$Y = y_i + q_i$$

" q_i " se détermine par la formule: $q_i = q \cdot \frac{l_i}{L}$;

L : longueur de toute la courbe de raccordement, en m.

Une grande précision est donnée par la méthode du tracé de la courbe de raccordement à partir de la corde serrée (fig.74) puisque les mesures de la corde jusqu'à la courbe de raccordement sont plus courtes que celles provenant de la tangente.

L'angle " β ", entre les lignes de la tangente et la corde serrée est obtenu à partir de la différence de leur gisement, ou bien suivant la formule:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y + q}{x} ; \quad \text{ou} \quad y = \frac{L^3}{6C} ; \quad x = L$$

La grandeur de la flèche " b_i " de la courbe de raccordement selon l'axe du tunnel est déterminé par la formule approchée:

$$b_i = l_i \cdot \operatorname{tg} \beta - (y_i + q_i)$$

Les tracés dans les limites de la courbe de raccordement permettent de changer la ligne circulaire par une ligne polygonale, comprenant des cordes ou bien des sécantes.

Les longueurs des cordes sont choisies par calcul, afin que les écarts de ces lignes de la courbe soient minimaux, et que l'on puisse les négliger ou les supprimer.

Dans certains cas, on préfère utiliser des cordes longues, ce qui procure une diminution conséquente du volume des travaux de tracé.

Pour la réalisation de l'ouvrage souterrain du lot 5 (marché), la méthode à ciel ouvert a été choisie.

A cet effet, avant le terrassement, il a fallu implanter l'axe longitudinal.

On a procédé à l'implantation à partir du point "3". C'est le point de la base d'appui en surface, comme nous l'avons indiqué auparavant. (fig.75 et tableau 21).

On colore en blanc les endroits de fixation de l'axe, et à côté, on indique la numérotation de leurs piquets.

Sur les intervalles curvilignes du tracé, tel que nous le savons, l'axe suivant la courbe remplace le système de cordes, formant une ligne brisée, qui oscille (dans les limites de +/- 0,020 m) de la courbe réelle. Les longueurs des côtés du contour brisé dépendent du rayon de la courbe, et sont représentées par:

$$x_{lim} = 2,8 \sqrt{R \cdot b_{max}} ;$$

et pour les sécantes:

$$C_{lim} = 4,0 \sqrt{R \cdot b_{max}} ;$$

où:

b - flèche de la courbure, en m;

R - rayon de la courbe, en m .

L'axe ainsi tracé, servant pour les implantations ultérieures, comme par exemple, l'implantation de la paroi à mouler (déjà réalisée).

L'implantation est effectuée par le géomètre, en plaçant des piquets matérialisant les axes déportés de l'ouvrage. Ces piquets sont positionnés de part et d'autre de l'axe de la paroi à mouler

de telle sorte que celui-ci soit constamment équidistant de deux piquets sur un même profil.

La murette est implantée de la façon suivante:

- par traçage au sol de la préfouille à partir des piquets déportés;
- après terrassement de la tranchée, implantation des bords internes de la murette-guide;
- après la mise en place, vérification des points anguleux à partir des axes déportés.

Selon l'avancement de l'édification des tunnels, on fixera dans le béton des repères pour la polygonation souterraine.

En réalisant certaines parties du tunnel, les repères de l'axe sont contrôlés. Après ce contrôle, on utilise ces repères pour la pose des rails et des travaux de montage. (Annexe: A. XIX).

Numérotation	α [gr.]	d [m]	Gi [gr.]
1	124.273	27.910	95.236
2	116.438	21.806	87.401
3	102.828	16.303	73.791
4	77.964	12.258	48.927
5	41.002	11.371	11.965
6	9.832	14.261	380.795
7	392.202	19.308	363.165
8	382.613	25.259	353.576
9	377.042	31.609	348.005
10 (S2)	373.624	38.164	344.587
11	370.733	47.976	341.696
12	369.262	57.903	340.225
13	368.596	67.884	339.559
14	368.429	77.884	339.392
E 2 (15)	129.218	34.290	100.181

Tableau 20 : station "3" ; Réf. 2 ; $G_{(3-2)} = 370.963$ gr.

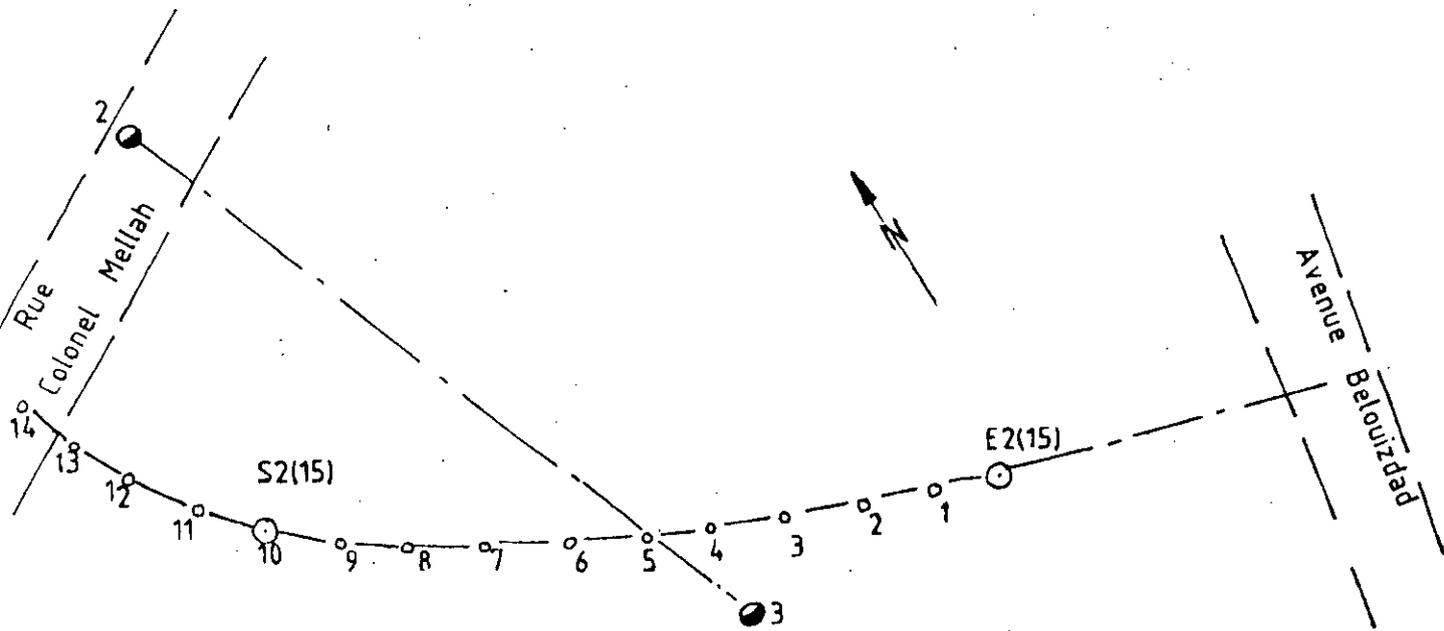


Figure 75 : Exemple d'implantation de l'axe du tunnel projeté en surface.

PK 3100.000; L = 16.623; $\alpha = 4.295\ 51962$ 1882.078 4505.558
 PK 3184.070 irac = 0.695 Lci = 0.695
 r = 0.0009
 Xrac = 0.6950
 Yrac = 0.0008

E 2(15)		960.1628	472.9898
PK 3184.070	0.6950 + 0.0008	959.504	473.212

S 2(15)		x	y
E 2 (15)		531 960.1628	384 472.9898
1	6.8148 + 0.0109	953.707	475.173
2	13.6296 + 0.0404	947.257	477.373
3	20.4440 + 0.1070	940.820	479.609

IV.7. Implantation de la station-

Les constructions les plus complexes concernent la mise en place de la station, dont les dimensions de la section transversale s'avèrent être de l'ordre de: 26.76 m X 10.90 m.

La réalisation de la station du 1^{er}.Mai se fera à ciel ouvert.

Dans le cas de ce type de procédé, on exclut les difficultés spécifiques aux travaux souterrains, tout en utilisant les méthodes classiques d'édification des tunnels. Les inconvénients qui incombent à ce procédé ont pour conséquence de gêner considérablement la vie normale de la ville (destruction d'habitations, démontage de canalisations).

La solution optimale, dans le cas qui nous intéresse, est la combinaison des procédés souterrain (tunnels) et à ciel ouvert (station). Ce qui entraîne une réduction manifeste des déterminations nécessaires pour la mise en place du métropolitain. On construit le tunnel à deux voies, à une profondeur de 15 à 20 m. La profondeur de la station, quant à elle, atteint 15,3 m.

Le choix du site (Place du premier Mai) de la station s'adapte plus ou moins bien au fait que:

- la méthode utilisée nécessite une superficie d'implantation importante et bien dégagée;
- la nature du terrain, formée de marne saturée en eau, s'accommode de la méthode dégagée.

La nappe phréatique, a un débit important et peut poser certains problèmes.

- la configuration du terrain pose peu de problème, car il est plat et peu accidenté.

7.1. Description de la station du premier Mai -

Elle est composée de deux niveaux:

- le premier est celui de la salle de billetterie, des locaux commerciaux et de la salle des machines;
- le second concerne le quai pour les voyageurs.

De part et d'autre de la station, sont aménagées des voies d'accès, permettant d'assurer la communication avec l'extérieur.

La longueur de la station est de : 115,1 m; la largeur maximale au niveau des accès est de : 28 m.

7.2. Choix du type de soutènement -

le soutènement de la station sera exécuté suivant les étapes suivantes:

- forage d'une série de trous, de diamètre 50 cm, espacés de 1,50 m; le forage est réalisé à l'aide d'une foreuse à tarière;
- mise en place de profilés, et s'assurer de leur ajustement;
- scellement du pied du profilé sur une hauteur de 2 m;
- remplissage des trous de forage, à l'aide de remblais appropriés ou d'un coulis de ciment-bentonite;
- rabattement éventuel de la nappe phréatique.

7.3. Excavation de la faille -

L'excavation se fera en trois phases:

- première phase: excavation de la partie centrale, longue de 115,1 m et large de 16,56 m, par terrassement et emprise de l'enceinte par étage et blindage de la paroi entre profilés. On pose ensuite des boutons métalliques, prenant appui sur les parois par l'intermédiaire de liernes (HEB 400) (trois lits de boutons au total).

Le premier niveau de boutons se situe à 1,1 mètre, le second à 7,1 mètres, quant au troisième à 11,7 mètres de profondeur.

- seconde phase: excavation de la deuxième partie des accès à la station, de la même manière que la précédente. Les boutons sont composés de profilés "HEB 300".
- troisième phase: excavation de la seconde partie des accès de la station.

Tous les travaux, entrepris au niveau de la station, se réalisent à partir des points de la polygonale secondaire "GH₁₉", "GH₂₁". Les travaux topographiques commencent à partir du tracé de l'axe longitudinal du tunnel de la station.

Le problème particulier de l'implantation de la station consiste en la fixation des anneaux du tunnel de la station. On fixe les premiers anneaux des tunnels de la station avec une attention particulière, tout en respectant les tolérances suivantes:

- du décalage en avant, de côté et verticalement, de l'anneau ne devant pas dépasser ± 5 mm;
- du centre réel de l'anneau dans le plan et le profil, ne devant pas varier de la position projetée de plus de ± 15 mm;
- de la torsion des anneaux coupés, ne devant pas dépasser ± 15 mm;
- de l'ellipticité des anneaux selon quatre diamètres (horizontal, vertical et deux sous un angle de 45° par rapport à l'horizontale), ne devant pas être supérieur à: ± 25 mm;
- du piquetage réel des anneaux, ne devant pas varier de la valeur projetée de plus de ± 10 mm

Le premier segment de couloir de l'anneau du tunnel est fixé rigoureusement et symétriquement, par rapport à l'axe transversal du tunnel sur le piquetage projeté, avec une erreur ne dépassant pas: ± 5 mm.

On contrôle l'inclinaison par le nivellement. La position des segments consécutifs est vérifiée du centre fixé du tunnel, selon les rayons ou bien les cordes. On vérifie en même temps la surface d'entrée de l'anneau.

Pour assurer la précision nécessaire avant le début des travaux de revêtement, on vérifie les points de la polygonation existant au niveau de la station.

L'implantation des axes du tunnel de la station se réalise d'après la méthode indiquée précédemment. On matérialise les points planimétriques sur la voûte au moyen de repères (clous). Ces repères sont fixés préférentiellement entre 40 et 50 mètres.

CONCLUSION GENERALE

L'examen des principaux points, composant ce mémoire de Magister, nous permet de conclure ainsi:

- 1-/ La réalisation du métropolitain d'Alger trouve sa justification dans la nécessité de désengorger le transport urbain, de conforter sur tous les plans (économique, sécuritaire, rapidité) le déplacement de la population sans cesse croissante.
- 2-/ Cependant, cette réalisation ne peut se concevoir sans la prise en considération des conditions naturelles (géologiques, hydrogéologiques) et techniques de la ville d'Alger. Les études entreprises, dans ce sens, ont permis de situer, de dimensionner les divers ouvrages du métropolitain, et de choisir la technologie et la mécanisation modernes adéquates pour l'exécution des différents processus de creusement.
- 3-/ Aussi, l'emplacement de ces ouvrages dans des formations géologiques indiquées, l'exécution correcte à moindre coût en sécurité et dans les normes du temps, demande une base géométrique d'appui suffisante et précise. L'analyse de cette base géométrique d'appui, couvrant la ville d'Alger ainsi que celle des réseaux de densification et des levés, nous a permis de la considérer comme correcte, suffisante et précise, permettant de mener à bien les travaux de réalisation du métropolitain d'Alger.
- 4-/ Pour réaliser l'implantation des ouvrages métropolitains en général, et en particulier ceux du tronçon du lot "5", comportant à la fois une partie souterraine et à ciel ouvert, le raccordement des systèmes de coordonnées de surface et souterrain est indispensable. L'exposé, l'analyse et le contrôle des méthodes d'orientation confirment la justesse du rattachement de la base d'appui souterrain au système des coordonnées géodésiques de surface. Cette base d'appui souterrain permettra effectivement d'établir le réseau souterrain à partir duquel le pilotage des galeries, le guidage des puits, la construction des stations et annexes, peuvent s'effectuer avec une précision suffisante pour la résolution de ce genre de problème.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- MAKAROV O. ET MERKIN V. / 1991-
" Tunnels de transport et métropolitain. Technique et technologie de réalisation. Situation actuelle et perspectives ".
Edition TRANSPORT, Moscou.
- [2]- " Rapport APD du métropolitain d'Alger ". Inédit. "E.M.A".
1983. Alger.
- [3]- BENALLAL K. et OURABIA K. / 1983.
" Monographie, géologie et géotechnique de la région d'Alger".
(Recueil de notes).
- [4]- Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction.
" Etude géotechnique du métropolitain d'Alger ". 1993.
- [5]- SZECHY K. / 1970.
" Traité de construction de tunnels ".
Edition DUNOD, Paris.
- [6]- TORGALOV V. et VINOGRADOV B. / 1987.
" Construction de métropolitains ".
Edition TRANSPORT, Moscou.
- [7]- MALEK F. / 1991.
" Influence des travaux souterrains à l'explosif en site urbain sur les ouvrages en surface ".
P.F.E. Ecole Nationale Polytechnique; dépt. Génie Minier.
- [8]- AFANASSIEV V.G., MOURAVIEV A.V. / 1987.
" Géodésie et arpentage des mines appliqués en génie civil".
Edition NEDRA. Moscou.
- [9]- OGLOBIN D. et GERASIMENKO G. / 1981.
" Arpentage des mines ".
Edition NEDRA. Moscou.
- [10]- COSTET J. et SANGLERAT G. / 1981.
" Cours pratique de mécanique des sols ".
Edition BORDAS.

- [11]- BARDOT G. et BERNY P. / 1954.
" Construction des tunnels,galeries et souterrains ".
Edition EYROLLES.
- [12]- VANDENBERGHEN I.J. / 1982.
" Les rails ".
(B) Direction des achats.A 82-4.
- [13]- " Le cheminot ". / Janvier-fevrier 1989-1990.
Revue d'information interne de la S.N.T.F:
N = 47.
N = 51.
- [14]- Rapport géodésique.Inédit./1983.
" Triangulation ".
Entreprise du métropolitain d'Alger (E.M.A).
- [15]- LEVALLOIS J.J. / 1970.
" Géodésie générale ". Tome II.
" Géodésie classique bidimensionnelle ".
Edition EYROLLES,Paris.
- [16]- D'HOLLANDER R. / 1978.
" Topographie,topométrie ".
Imprimerie de l'institut géographique national.Paris.
- [17]- MASLOV A., GORDEEV A. / 1972.
" Géodésie ".
Edition NEDRA,Moscou.
- [18]- MASMICHVILI A. / 1978.
" Théorie des erreurs et méthode des moindres carrés ".
Edition NEDRA,Moscou.
- [19]- MACHIMOV M. / 1979.
" Equation des réseaux géodésiques ".
Edition NEDRA,Moscou.

- [20]- CHECHOVTSOV S. / 1992.
" Estimation d'erreur de la position des points géodésiques".
Edition NEDRA, Moscou.
- [21]- TREVOGO I., SCHEVTCHUK P. / 1986.
" Polygonométrie urbaine ".
Edition NEDRA, Moscou.
- [22]- CAILLEMER A., PLANQUES P. / 1983.
" Topographie, photogrammétrie ".
Edition TECHNIP, Paris.
- [23]- DUBUISSON B. / 1954.
" Procédés et méthodes des levés topographiques aux grandes échelles ".
Edition EYROLLES, Paris.
- [24]- BRABANT M. / 1980.
" Topométrie opérationnelle "
Edition EYROLLES.
- [25]- ZIMITCH V.S. / 1987.
"Instructions sur la réalisation des travaux d'arpentage ".
Edition NEDRA.
- [26]- JALON R. / 1972.
" Topographie souterraine ".
Edition EYROLLES.
- [27]- DURBEC G. / 1982.
" Cours de topométrie générale ". Tome I.
" Généralités - Instruments de mesures ".
Edition EYROLLES.
- [28]- DURBEC G. / 1984.
" Méthode de levé. Altimétrie". Tome II.
Edition EYROLLES.

- [29]- OMELCHENKO A.N. / 1979.
" Aide-mémoire en arpentage minier ".
Edition NEDRA, Moscou.
- [30]- BOLCHAKOV V.D., LEVTCHOUK G.P. / 1985.
" Aide-mémoire du géodésiste". Tomes I, II.
Edition NEDRA.
- [31]- BOUAFFAD A., CHERABA M. / 1992.
" Etude et conception d'un tunnel dans les marnes ".
P.F.E. Université "U.S.T.H.B.". Institut de Génie Civil.
- [32]- Etude E.M.A / S.O.F.R.E.T.U. Inédit. / 19
" Etudes de conception et d'ingénierie. Ligne I. Phase I.
Roulement Fer ". Planches industrielles.

TABLE DES MATIERES

PAGE

INTRODUCTION GENERALE -----	1
CHAPITRE I: CONDITIONS GEOLOGIQUES ET MINIERES -----	5
I.1. Généralités-----	6
I.2. La géologie de la région d'Alger-----	6
I.2.1. Le massif cristallophyllien primaire-----	6
I.2.2. Les terrains sédimentaires du Tertiaire-----	9
I.2.3. Le Quaternaire-----	11
I.3. La géologie des formations le long du lot 5-----	11
I.4. Les données hydrogéologiques-----	11
I.4.1. Relevés piézométriques-----	12
I.4.2. Les paramètres hydrodynamiques-----	13
I.5. Les conditions géotechniques-----	13
I.5.1. Essais in-situ-----	14
I.5.2. Essais de laboratoire-----	14
2.1. Les essais d'identification-----	15
2.1.1. Formation argileuse sablo-limoneuse-----	15
2.1.2. Formation argilo-carbonatée-----	15
2.1.3. Formation sableuse-----	15
2.1.4. Formation marneuse-----	15
2.2. Les essais mécaniques-----	17
2.2.1. Formation argilo-marneuse-----	17
2.2.2. Formation sableuse-----	17
2.2.3. Formation marneuse-----	17
2.3. Analyse chimique de l'eau.-----	19
CHAPITRE II : CONDITIONS TECHNIQUES ET MINIERES -----	23
II.1. Caractéristiques techniques du métropolitain-----	24
II.1.1. Etude de la ligne 1-----	24
II.1.2. Tunnels-----	26
II.1.3. Station-----	26
II.1.4. Gabarits des tunnels-----	28
II.2. La galerie de reconnaissance-----	29
II.2.1. Objectifs-----	29
II.2.2. Exécution de la galerie de reconnaissance-----	29

II.3.Méthodes du creusement des galeries-----	29
II.3.1.La méthode d'extraction à ciel ouvert-----	30
3.1.1.Mise en oeuvre-----	32
3.1.2.La paroi moulée-----	32
3.1.3.Exécution de la paroi moulée-----	32
3.1.4.Stabilité de la tranchée-----	33
3.1.5.La paroi berlinoise-----	35
II.3.2.Le creusement en souterrain-----	36
3.2.1.Creusement à pleine section-----	36
3.2.2.Creusement par demi-section-----	37
3.2.3.Creusement en section divisée-----	37
II.3.2.1.Classification des modes de soutènement-----	40
II.3.2.2.Choix du soutènement-----	41
II.4.Influence des travaux souterrains sur l'environne- ment urbain-----	44
II.4.1.Organisation des observations pendant les déformations des édifices de surface-----	44
II.4.2.Méthodes de mesure-----	45

**CHAPITRE III : ANALYSE DE LA BASE "GEOMETRIQUE ET TECHNIQUE"
D'IMPLANTATION-----** 46

III.1.Généralités-----	47
III.2.Méthodes d'établissement de la base d'appui-----	47
2.1.Canevas géodésique général-----	47
2.1.1.Mesure et orientation d'une base-----	48
2.1.2.Ellipsoïde de référence-----	49
2.1.3.Rayons de courbure principaux de l'ellipsoïde-----	50
2.1.4.Passage de la surface topographique à l'ellipsoïde-----	50
2.1.5.Passage de l'ellipsoïde sur le plan-----	50
2.2.Canevas géodésique local-----	62
2.2.1.Intersection-----	64
2.2.2.Le relèvement-----	67
2.2.3.Résultats expérimentaux adaptés à ces méthodes-----	70
2.2.4.La polygonation-----	78
III.3.Instruments utilisés-----	93
3.1.Précision-----	94

3.2. Mesure des angles-----	95
3.3. Erreur de mesure des angles-----	96

CHAPITRE IV : IMPLANTATION DES OUVRAGES SOUTERRAINS-----98

IV.1. Analyse du réseau d'appui en surface et en souterrain--	99
IV.2. Méthodes de raccordement-----	105
2.1. Le procédé par galeries ou puits inclinés-----	105
2.2. Le procédé par plusieurs puits verticaux reliés en surface-----	105
2.3. Le procédé par un seul puits vertical-----	105
2.4. Procédé magnétique-----	106
2.5. Procédés optiques de raccordement-----	107
2.6. Procédés mécaniques-----	108
2.6.1. Orientation par l'alignement de deux plombs de puits-----	108
2.6.2. Emploi de trois plombs de puits-----	111
2.6.3. Orientation par le procédé des triangles raccordés-----	113
2.7. Procédé gyroscopique-----	114
IV.3. Méthodes d'implantation-----	114
3.1. Implantation d'un angle horizontal-----	114
3.1.1. Premier procédé-----	114
3.1.2. Second procédé-----	115
3.2. Implantation d'une distance horizontale-----	115
3.3. Implantation des points de coordonnées connues-----	116
3.3.1. Procédé polaire-----	116
3.3.2. Procédé d'intersection-----	117
3.3.3. Procédé des coordonnées rectangulaires-----	117
3.3.4. Procédé d'intersection linéaire-----	118
IV.4. Instruments utilisés en souterrain-----	118
4.1. Mesure des angles-----	118
4.2. Mesure des distances-----	120
IV.5. Contrôle de la base d'appui en souterrain-----	120
IV.6. Implantation de l'axe du tunnel-----	122
6.1. Tracé du centre du puits-----	123
6.2. Tracé des axes du puits-----	124
6.3. Implantation du rameau-----	130

6.4.Tracé de l'axe longitudinal d'un tunnel	
dans des ouvrages métropolitains-----	131
6.4.1.Tronçons linéaires-----	131
6.4.2.Implantation de l'axe sur des	
courbes de raccordement-----	132
IV.7.Implantation de la station-----	143
7.1.Description de la station du 1 ^{er} Mai-----	143
7.2.Choix du type de soutènement-----	144
7.3.Excavation de la faille.-----	144
CONCLUSION GENERALE-----	146
BIBLIOGRAPHIE-----	148
ANNEXE-----	A I-XIX

A N N E X E

Echelle au 1/50

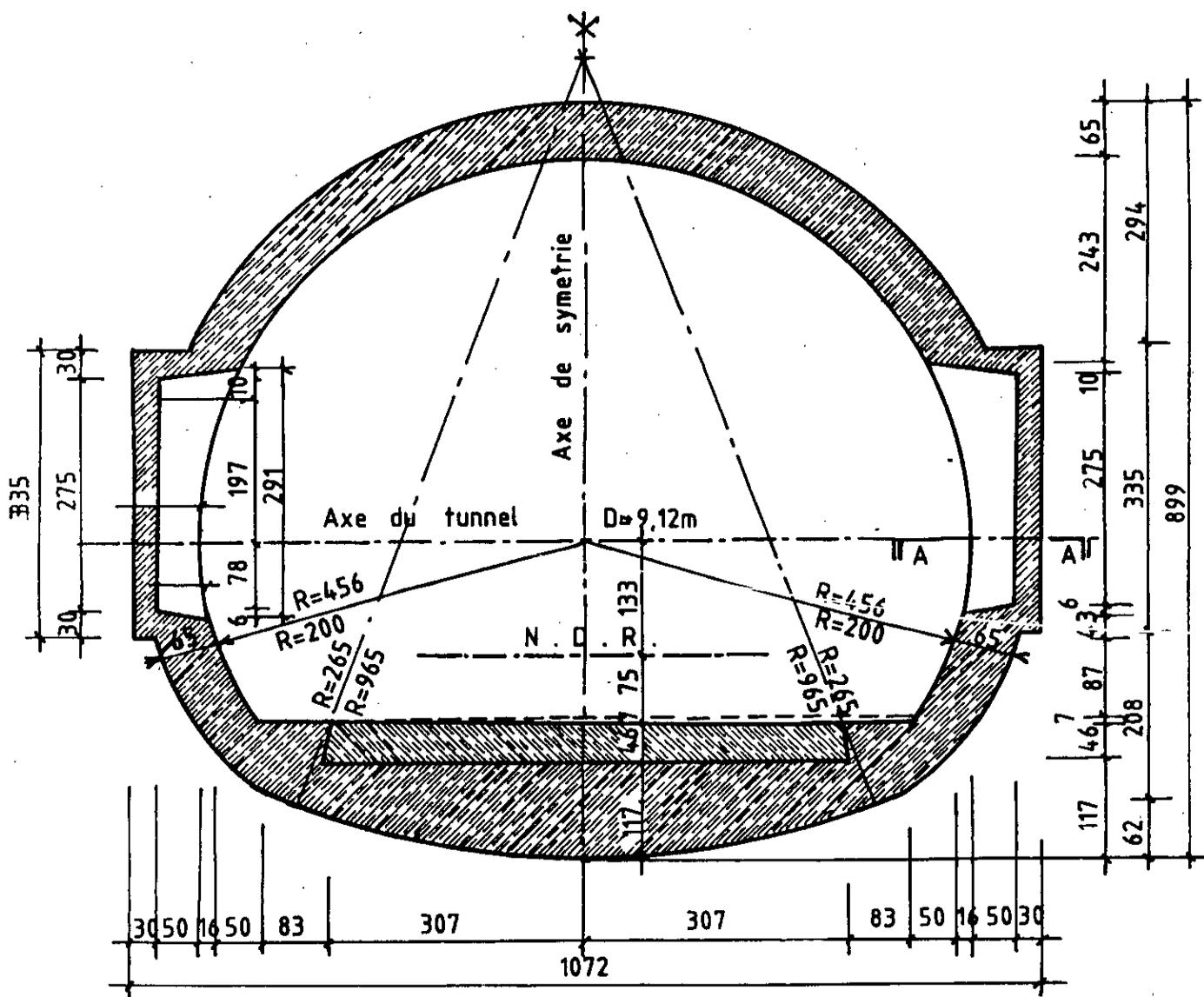


Figure AII: COUPE TYPE SUR LES NICHES DE SECURITE
DANS LES ROCHES TENDRES.

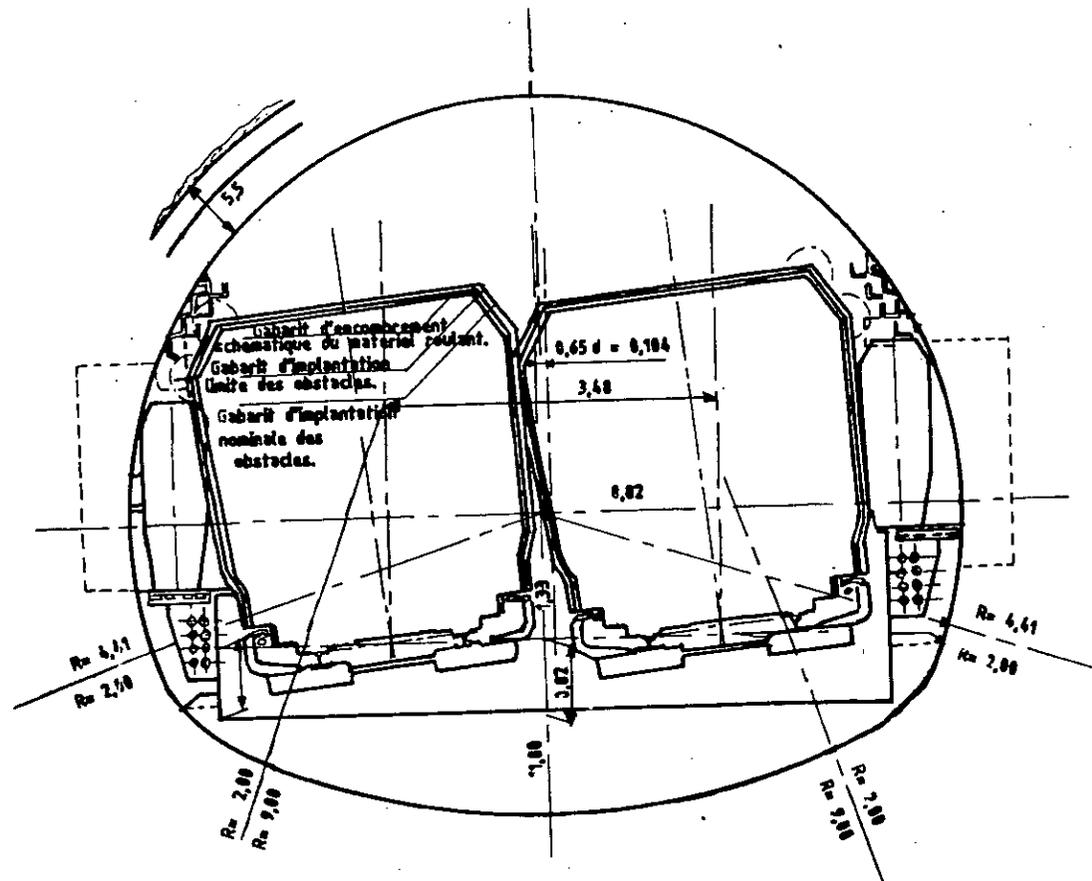


Figure AIV: implantation des voies par rapport a la structure.

Tunnel voûté à 2 voies en terrain homogène.

Rayon de 300m devers 160mm.

Ligne1. Phase1.Roulement fer.

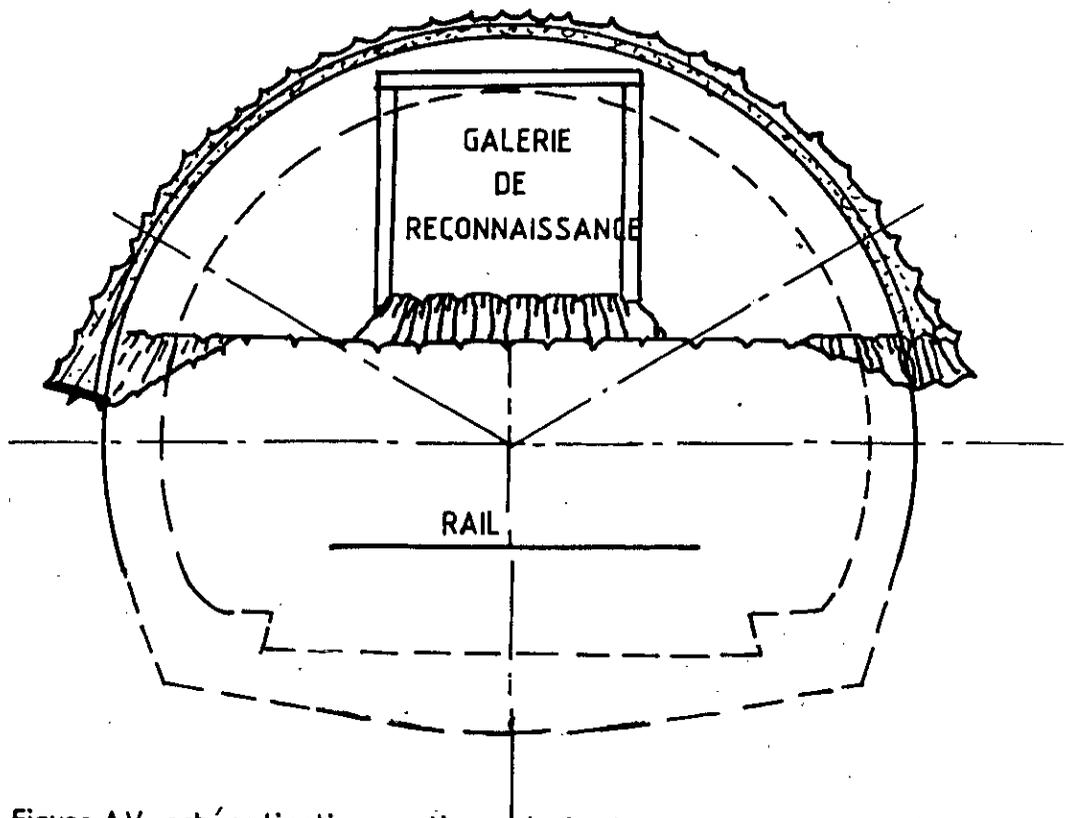


Figure AV: schématisation section galerie de reconnaissance.

PHASE PRELIMINAIRE

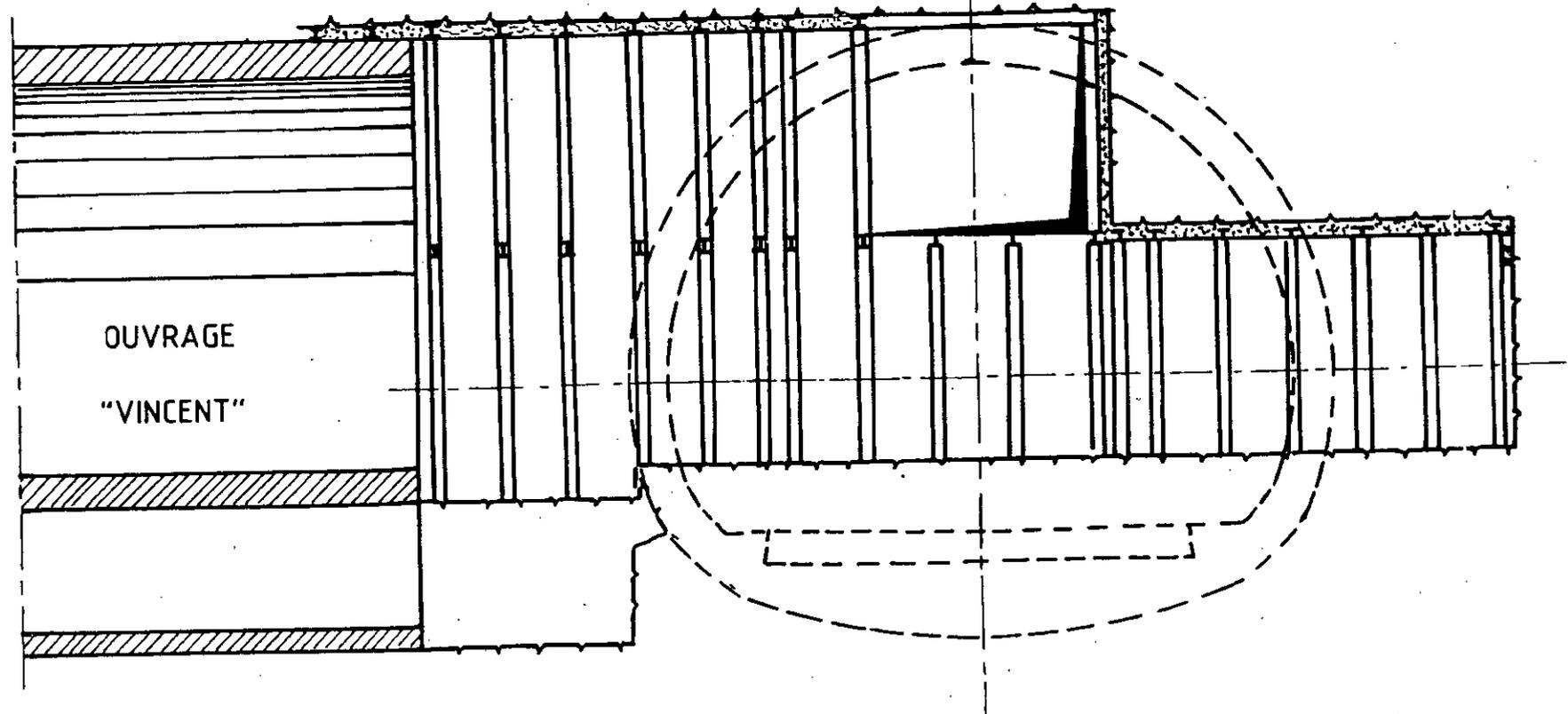


Figure A VI : Mise en application de la phase préliminaire.

PHASE I

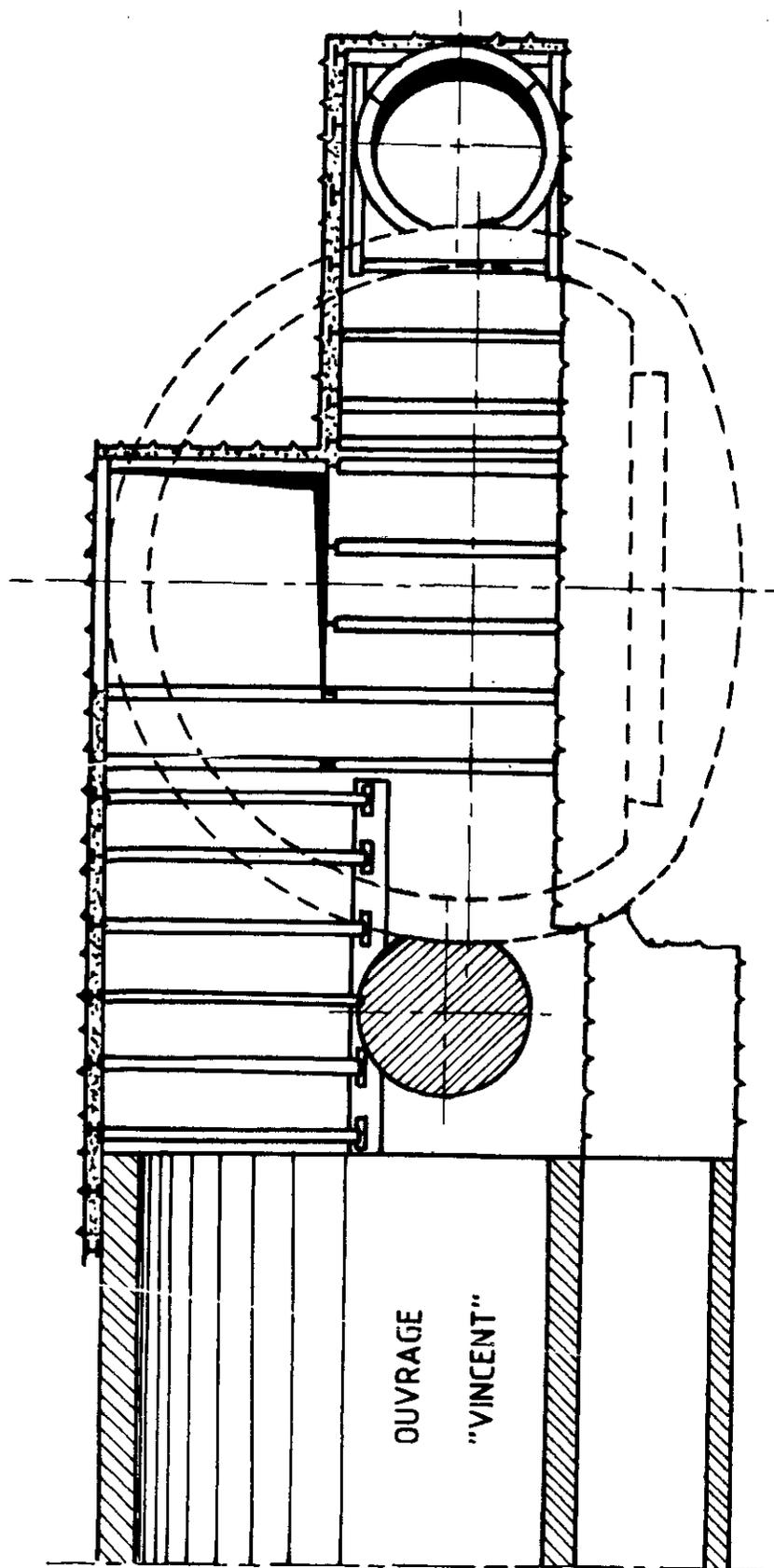


Figure A VII : Mise en application de la phase I.

VUE EN PLAN

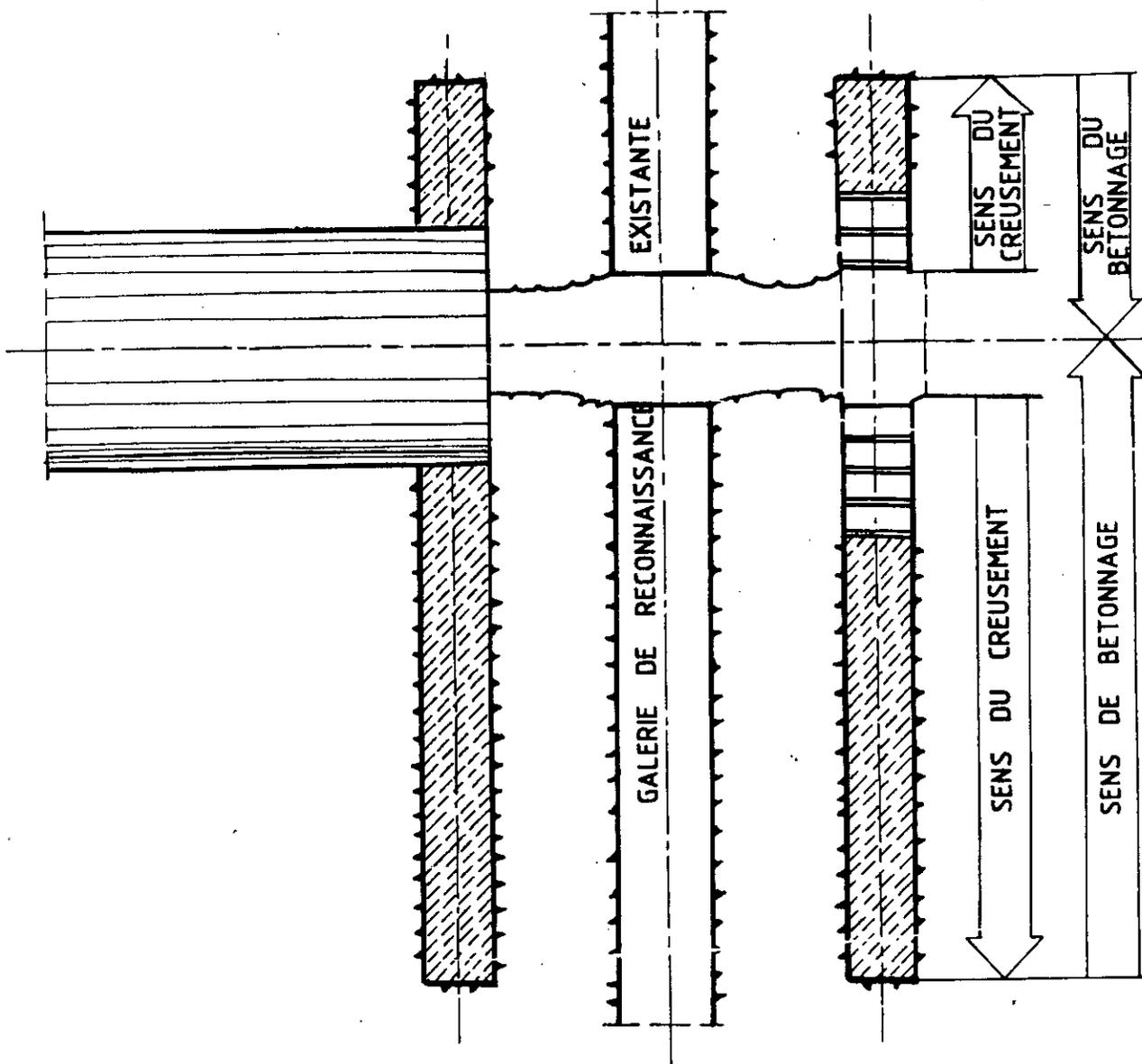


Figure A VIII:vue en plan de la galerie de reconnaissance.

Orientation des opérations de creusement et de bétonnage.

COUPE TRANSVERSALE

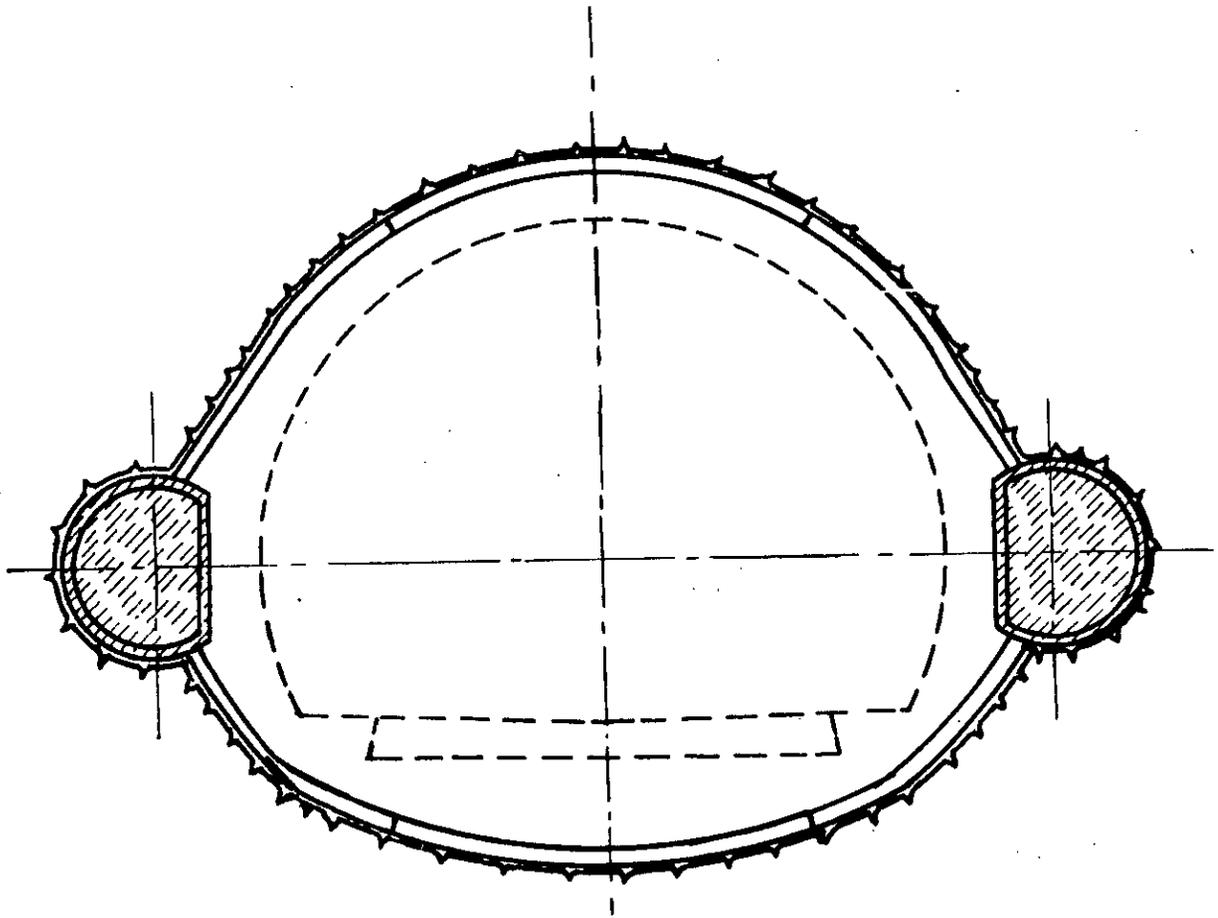


Figure AIX: coupe transversale d'une section.

PHASE II

STATION
KHELIFA B.

LOT 5

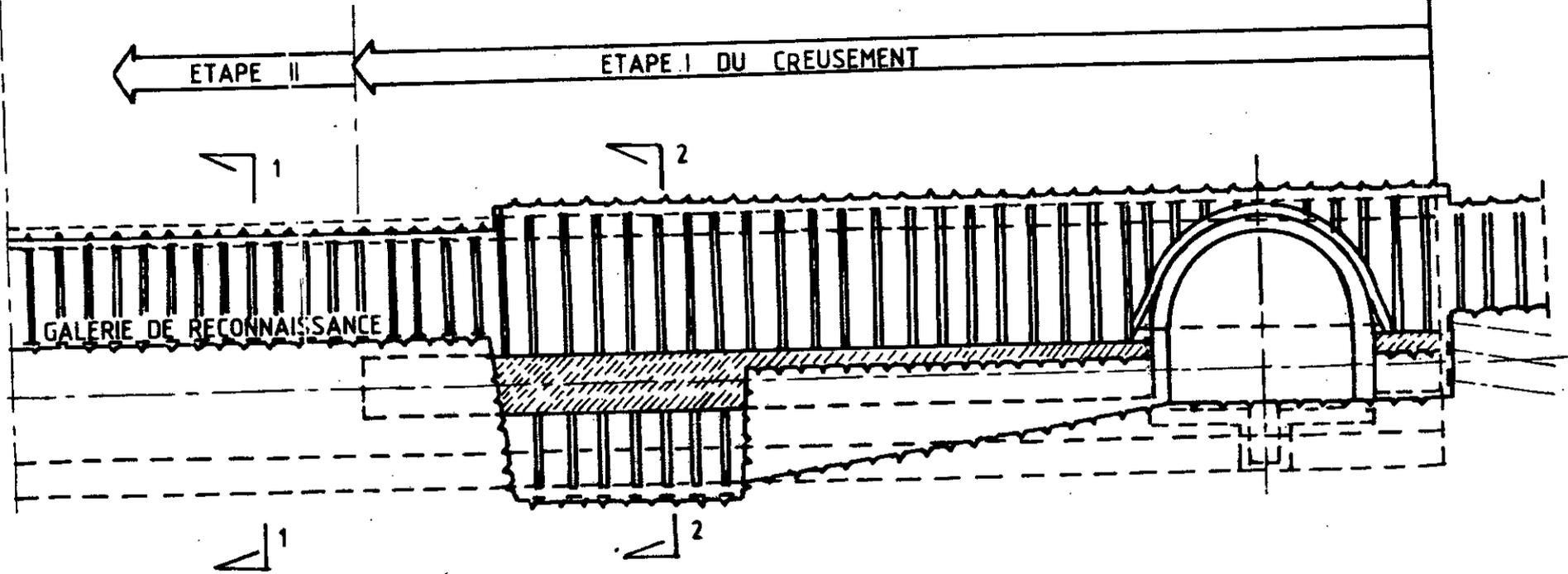
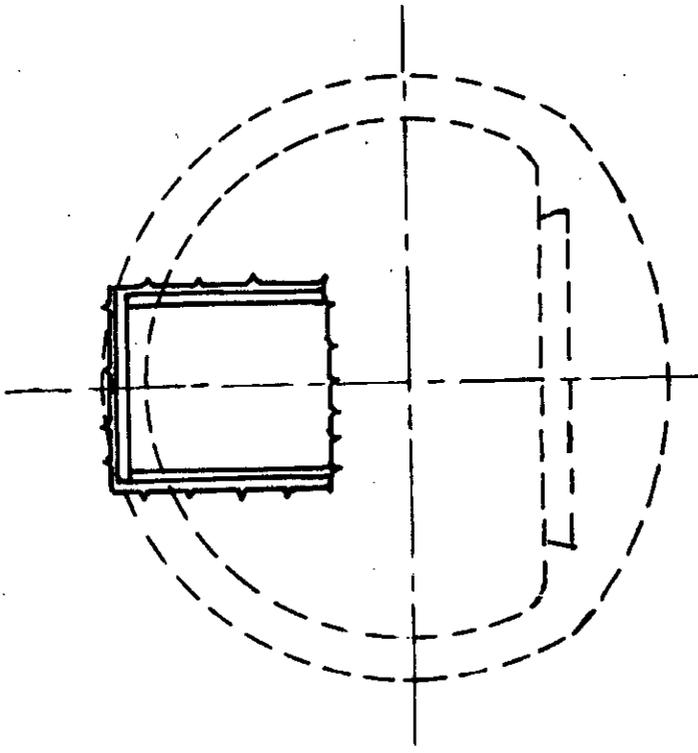
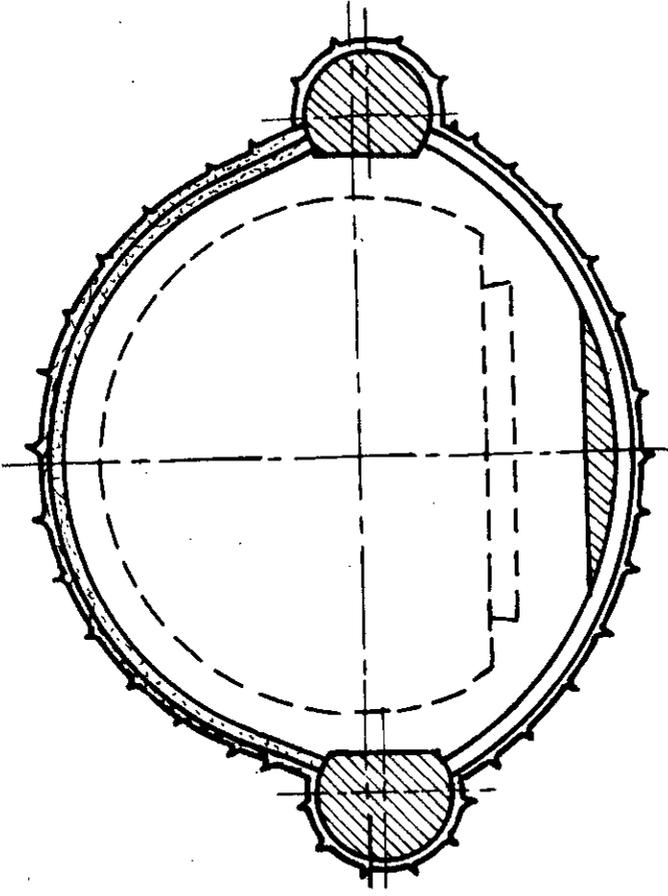


Figure AX : Mise en application de la phase II.



COUPE 1 - 1



COUPE 2 - 2

Figure AXI: schématisation de sections

PHASE III.IV

CREUSEMENT DE LA DEMI -SECTION
SUPERIEURE AVEC MONTAGE DES CINTRES.

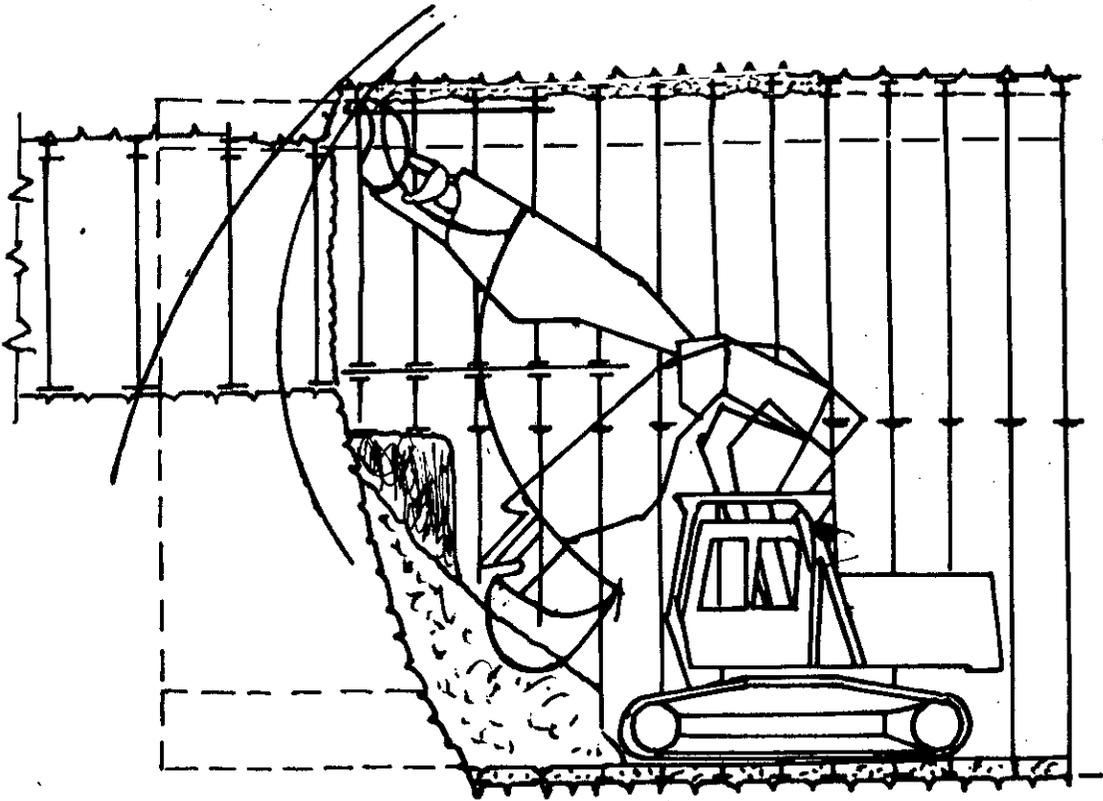


Figure AXII : Mise en application de la phase III.IV.

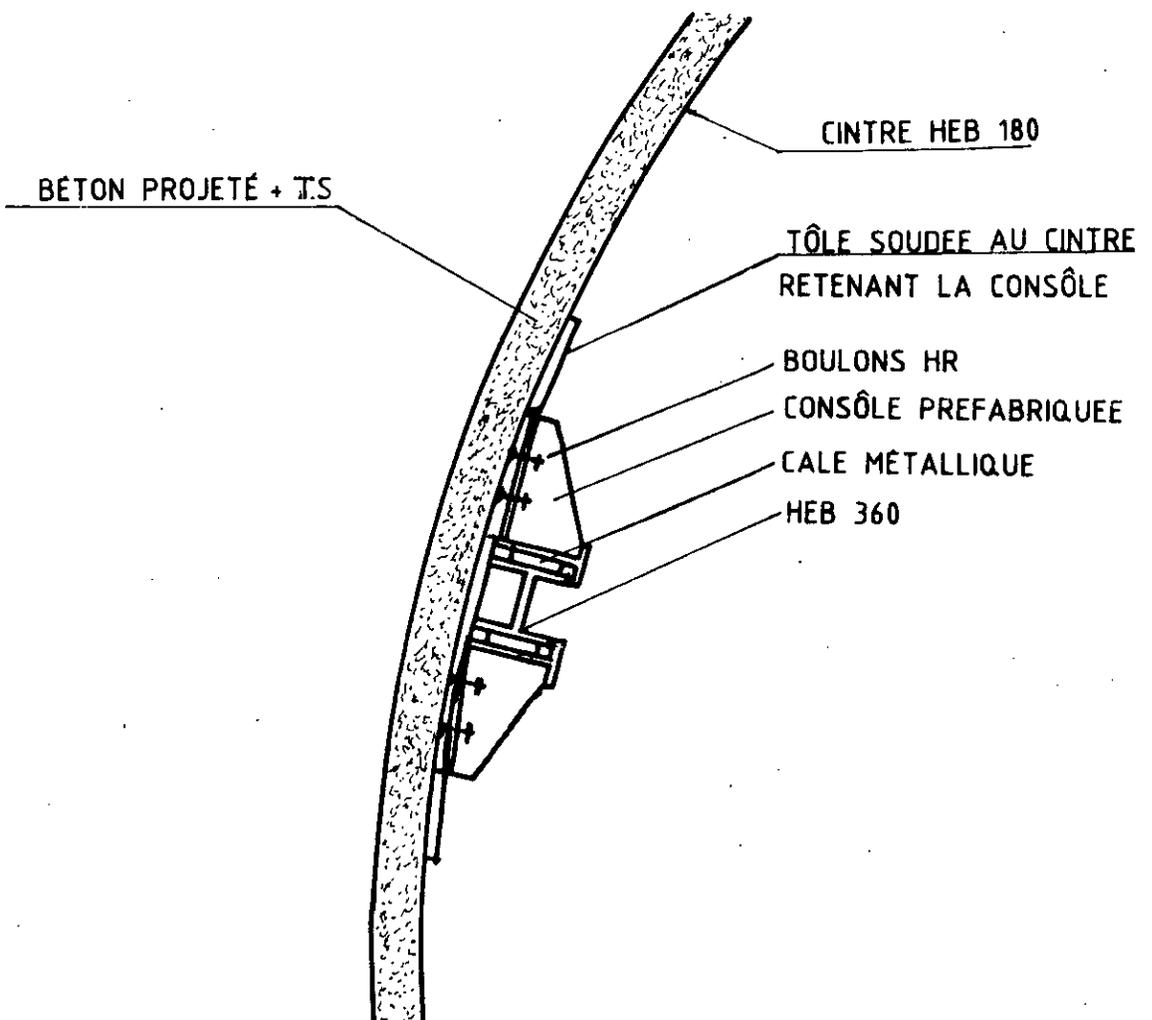
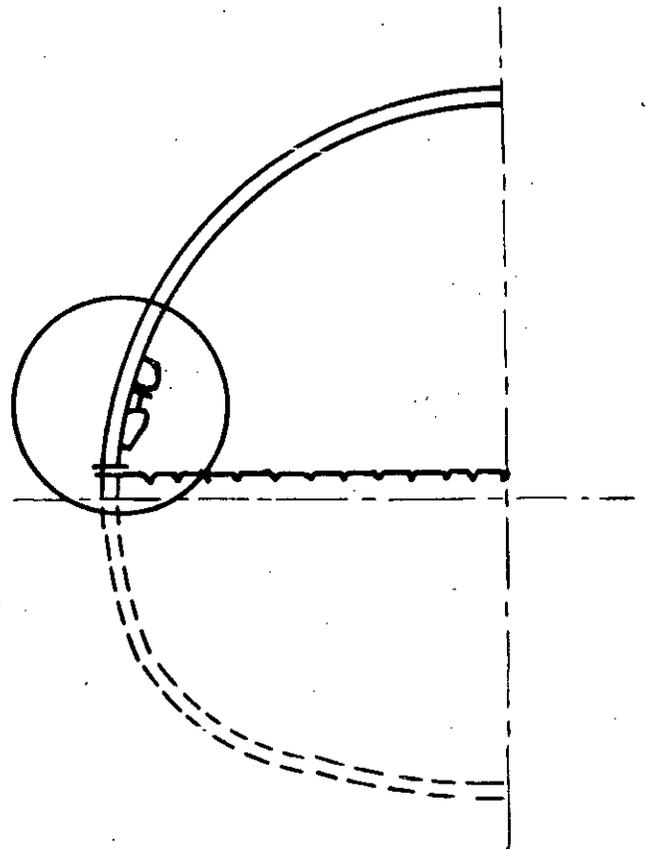
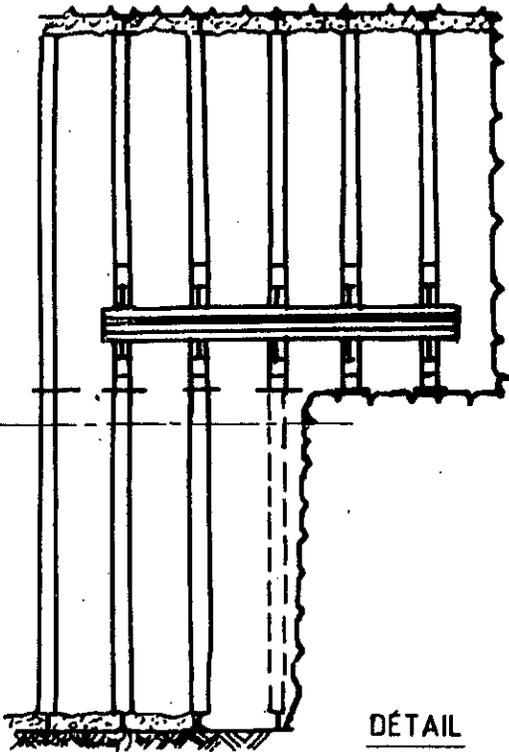


Figure AXIII Cintre

PHASE V. VI

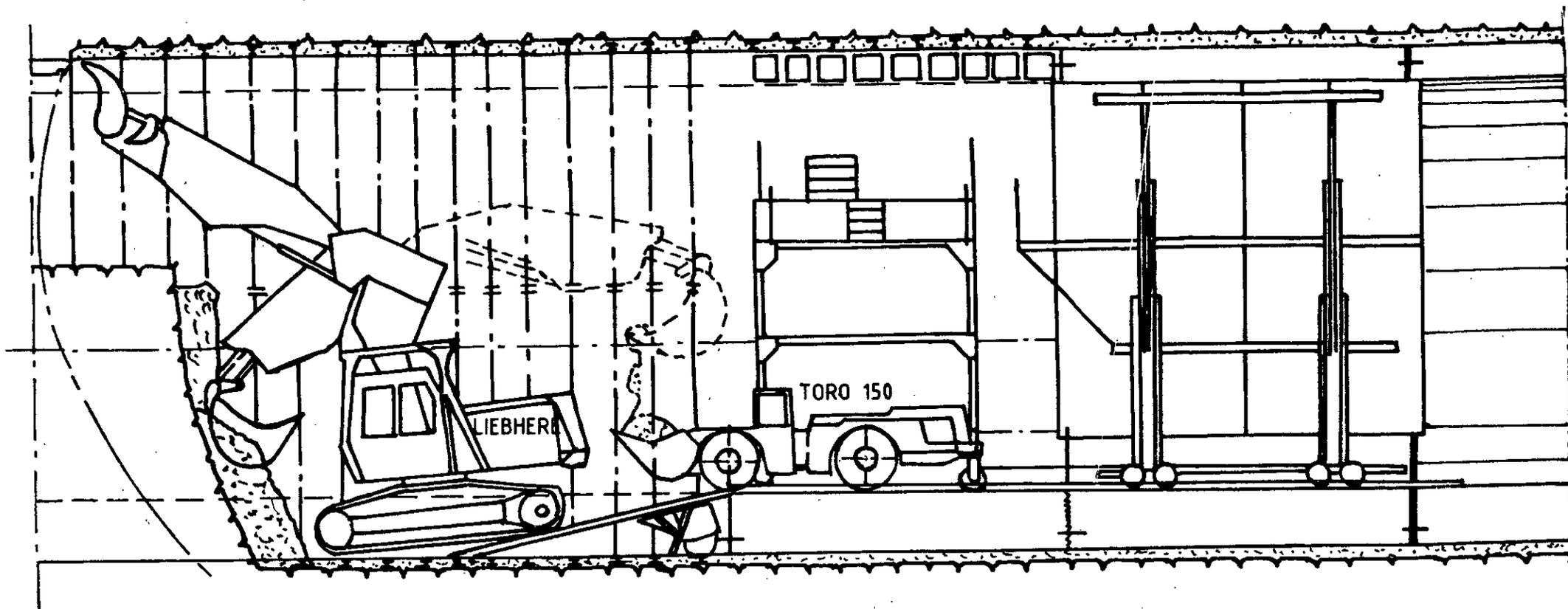


Figure AXIV : Mise en application de la phase V.VI.

BÉTONNAGE VOÛTÉ

BÉTONNAGE RADIER

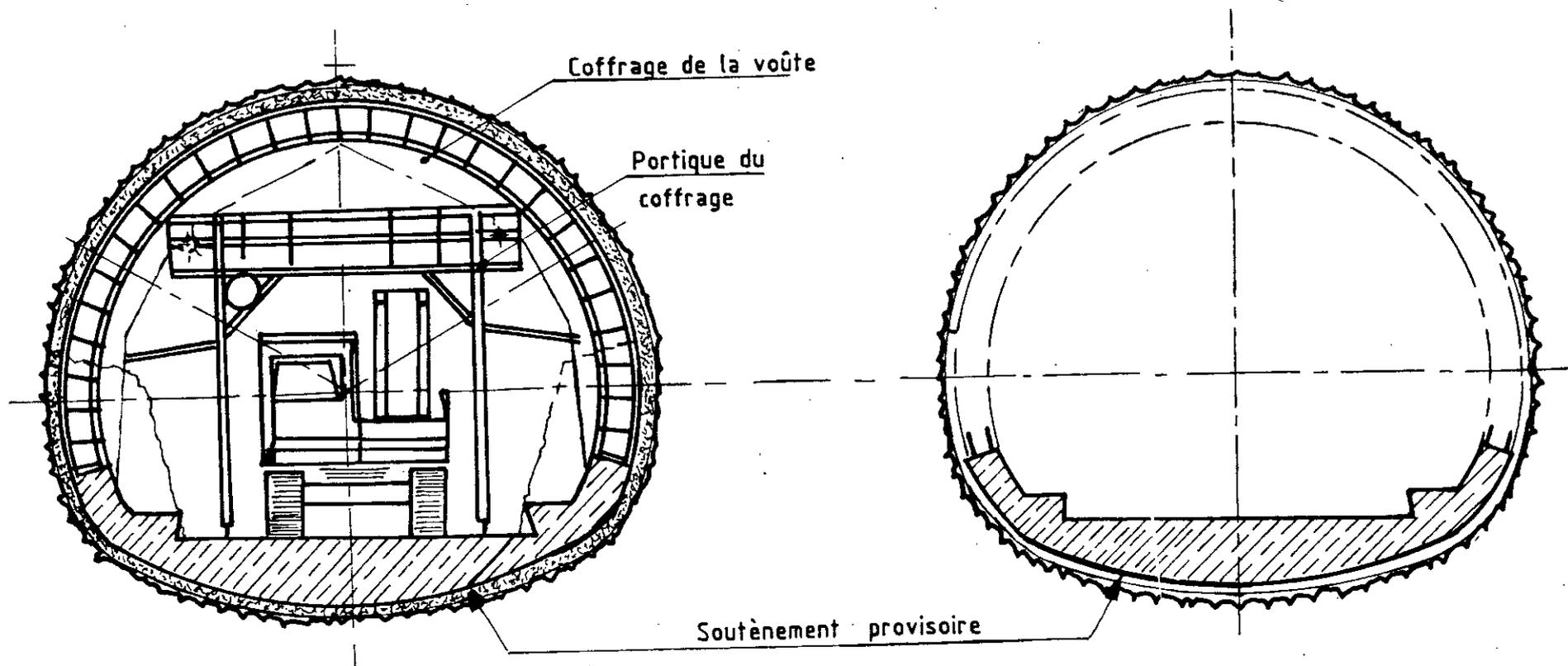


Figure A XV : Type de bétonnage.

PHASE VII

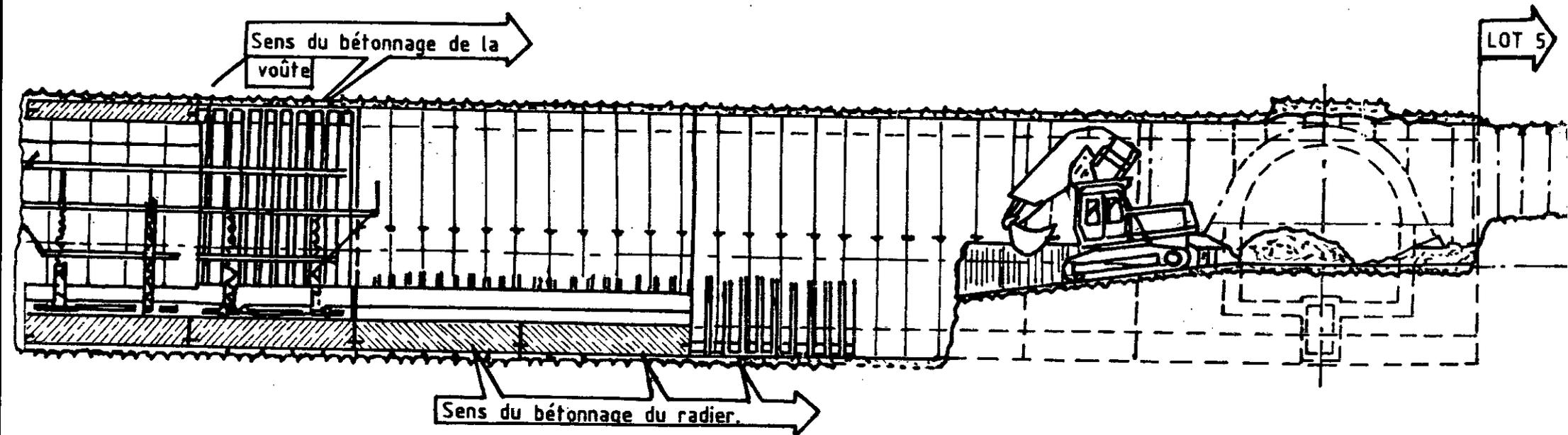


Figure AXVI: Mise en application de la phase VII.

DONNEES GEOTECHNIQUES

SONDAGE	PROFONDEUR DE L'ECHANTILLON	NATURE DE L'ECHANTILLON	C _u , Bars	Φ _u , DEG.	W, %
S H 1	16,50 à 16,80m	MARNE	1,6	23	27,7
	18,00 à 16,40m	MARNE	2,2		27,1
S H 3	16,80 à 17,60m	MARNE	1,5	25	16,6
	18,00 à 18,40m	MARNE	1,1		15,5
	19,10 à 19,90m	MARNE	1,2		23,8
	21,30 à 22,00m	MARNE	2,5		21,5
	22,35 à 22,70m	MARNE	2,8		22,1
	23,00 à 23,80m	MARNE	2,7		22,1
	24,00 à 24,75m	MARNE	2,5		21,6
	25,00 à 25,60m	MARNE	3,5		21,9
27,00 à 27,80m	MARNE	2,1	22,8		
S H 4	18,00 à 18,50m	MARNE	2,0	21	24,4
	19,20 à 20,00m	MARNE	1,6	23	23,4
S H 6	20,00 à 20,70m	MARNE	2,5		22,4
S H 8	21,40 à 22,00m	MARNE	2,6	12 17	21,2
	22,00 à 22,30m	MARNE	3,4		19,7
	27,00 à 27,30m	MARNE	2,1		18,4
S H 14 bis	13,50 à 14,00m	MARNE	1,4	12	29,7
	14,50 à 14,90m	MARNE	0,6	15	30,8

Tableau A'I : Résultats des essais triaxiaux Cu-u.

SONDAGE		3	3	3	3
PROFONDEUR		15,60 - 16,10	16,80 - 17,60	17,90 - 18,60	19,10 - 19,90
Nature apparente des sols échantillonnés					
Poids volumétrique humide, \bar{u}_h					
Poids volumétrique sec, \bar{u}_d		1,79	1,87	1,90	1,66
Teneur en eau naturelle, W %		19,3	16,6	15,5	23,8
Degré de saturation, Sr %		100	100	100	100
Poids spécifique, \bar{u}_s					
Granulo- métrie % (mm)	< 0,002				
	0,080 - 0,002				
	0,500 - 0,080				
	> 0,5mm				
Limites d'Atter- berg	Wl %	58	57	60	66
	IP %	29	28	29	33
Indice de consistance, Ic					
Caracté- ristique oedomé- trique	Pc				
	Ct				
	Cg				
Perméabilité, K cm/s.		3.663 $\times 10^{-10}$			
Compression simple Rc					
Résis- tance au cisaille ment	W %		15,4	14,3	23,5
	ϕ / ϕ				
	C/C Kg/cm ²				
	type d'essai		"UU"	"UU"	"UU"

Tableau A' II : Résultats d'essais de laboratoire.

SONDAGE		3	3	3	3
PROFONDEUR		20,40 - 21,00	21,30 - 22,00	22,35 - 22,70	23,00 - 23,80
Nature apparente des sols échantillonnés		Marne	Marne	Marne	Marne
Poids volumétrique humide, \bar{u}_h		1,72	1,72	1,70	1,70
Poids volumétrique sec, \bar{u}_d		21,4	21,5	22,1	22,1
Teneur en eau naturelle, W %		100	100	100	100
Degré de saturation, Sr %					
Poids spécifique, \bar{u}_s					
Granulo- métrie % (mm)	< 0,002				
	0,080 - 0,002				
	0,500 - 0,080				
	> 0,5mm				
Limites d'Atter- berg	Wl %	72	70	66	66
	IP %	37	36	34	34
Indice de consistance, Ic					
Caracté- ristique oedomé- trique	Pc				
	Ct				
	Cg				
Perméabilité, K cm/s.					
Compression simple Rc					
Résis - tance au cisaille ment	W %		21,5	22,2	21,6
	ϕ / ϕ				
	C/C Kg/cm ²				
	type d'essai		"UU"	"UU"	"UU"

Tableau A' III : Résultats d'essais de laboratoire.

SONDAGE		3	3	3	3
PROFONDEUR		24,00 - 24,75	25,00 - 26,60	26,00 - 26,70	27,00 - 27,80
Nature apparente des sols échantillonnés		Marne	Marne	Marne	Marne
Poids volumétrique humide, \bar{u}_h					
Poids volumétrique sec, \bar{u}_d		1,71	1,72	1,71	1,78 1,69
Teneur en eau naturelle, W %		19,3	16,6	15,5	18,7 22,8
Degré de saturation, Sr %		100	100	100	97 100
Poids spécifique, \bar{u}_s					
Granulo- métrie % (mm)	< 0,002				
	0,080 - 0,002				
	0,500 - 0,080				
	> 0,5mm				
Limites d'Atter- berg	Wl %	71	66	67	72
	IP %	37	33	36	38
Indice de consistance, Ic					
Caracté- ristique oedomé- trique	Pc				
	Ct				
	Cg				
Perméabilité, K cm/s.				1.765 $\times 10^{-9}$	
Compression simple Rc					
Résis- tance au cisaille ment	W %		21,6	20,0	22,0
	ϕ / ϕ				
	C/C Kg/cm ²				
	type d'essai		"UU"	"UU"	"UU"

Tableau A' IV : Résultats d'essais de laboratoire.

LNHC ESSAI DE CISAILLEMENT Dossier:DT/01/93

Sondage:S3
 Prof.:13.00-14.00
 Sol:Sable

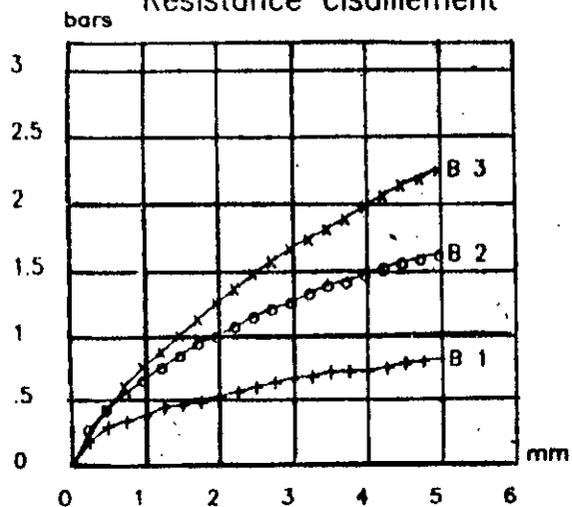
W%

B1	B2	B3	B4
.652	.655		
.665	.630		

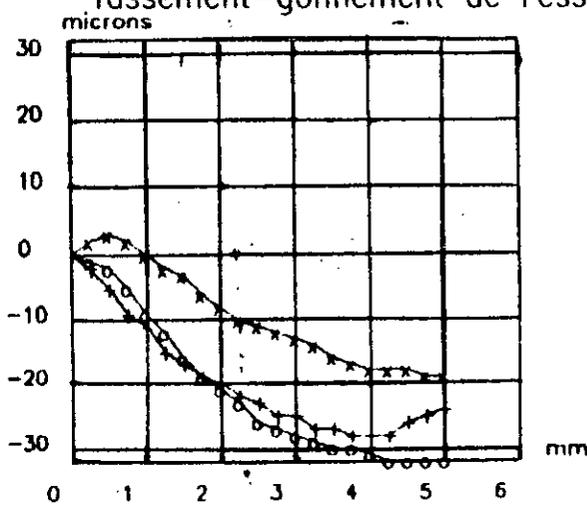
Essai:UU
 Boite Circ.: 6 cm
 Anneau: .2720
 Vitesse: 1 mm/mn

$$\gamma_h = Wl \approx Wp = lp =$$

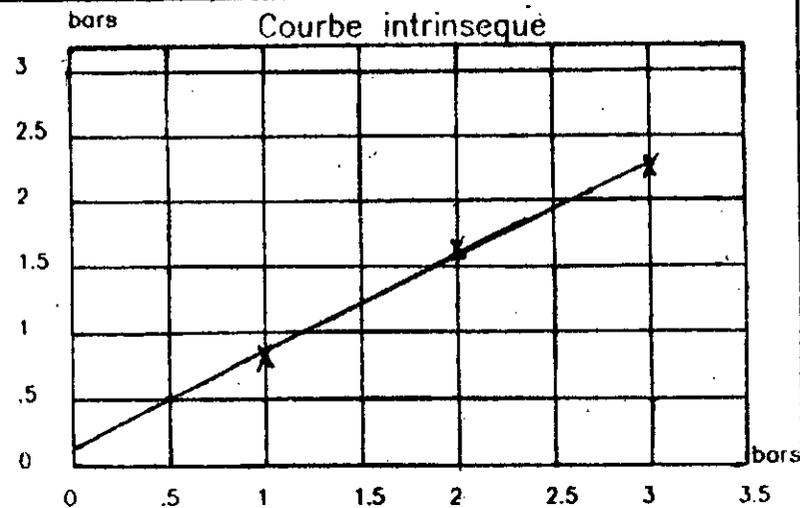
Resistance cisaillement



Tassement-gonflement de l'essai



Courbe intrinseque



$\sigma_1 = 1$ $\tau_1 = .828$

$\sigma_2 = 2$ $\tau_2 = 1.63$

$\sigma_3 = 3$ $\tau_3 = 2.25$

$\phi = 35$ dgr $c = 14$ bars

Figure A'' I: Essai de cisaillement.