

CEA 1310 - DUBOIS F.

Study and installation of concrete shielding in the civil engineering of nuclear constructions (1960)

Summary. - The object of this report is to give technical informations about high density concretes which have become very important for radiation biological shielding.

The most generally used heavy aggregates (barytes, ilmenite, ferrophosphore, limonite, magnetite and iron punchings) to make these concretes are investigated from the point of view prospecting and physical and chemical characteristics.

At first, a general survey of shielding concretes is made involving the study of components, mixing and placing methods, then, a detailed investigation of some high density concretes: barytes concrete, with incorporation of iron punchings or iron shot, ferrophosphore concrete, ilmenite concrete and magnetite concrete, more particularly with regard to grading and mix proportions and testing process.

.../...

CEA 1310 - DUBOIS F.

ETUDE ET MISE EN PLACE DES BETONS DE PROTECTION DANS LE GENIE CIVIL DES OUVRAGES NUCLEAIRES (1960).

Sommaire. - Ce rapport a pour objet de donner des précisions techniques au sujet des bétons à haute densité qui ont pris une grande importance pour la protection biologique contre les rayonnements.

Les agrégats lourds les plus couramment utilisés (barytine, ilménite, ferrophosphore, limonite, magnétite et riblons) pour la fabrication de ces bétons, sont examinés du point de vue prospection et caractéristiques physiques et chimiques.

On procède d'abord à une étude générale des bétons de protection comprenant l'étude des constituants, de la confection et de la mise en place, ensuite, à un examen détaillé de quelques bétons à haute densité: bétons à base de barytine, avec incorporation de riblons ou de grenaille de fonte, bétons au ferrophosphore, à base d'ilménite ou de magnétite, notamment en ce qui concerne la granulométrie, la composition, le dosage et les procédés d'essai.

PREMIER MINISTRE  
COMMISSARIAT A  
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

## **SERVICE DES TRAVAUX ET INSTALLATIONS**

---

### **ÉTUDE ET MISE EN PLACE DES BÉTONS DE PROTECTION DANS LE GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES NUCLÉAIRES**

PAR

F. DUBOIS

**RAPPORT CEA N° 1310**

**CENTRE D'ÉTUDES  
NUCLÉAIRES DE SACLAY  
SERVICE DE DOCUMENTATION  
Boite Postale N° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-&-O.)**

**SERVICE DES TRAVAUX ET INSTALLATIONS**

---

**ÉTUDE ET MISE EN PLACE DES BÉTONS DE PROTECTION**

**DANS LE GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES NUCLÉAIRES**

**PAR**

**F. DUBOIS**

**RAPPORT CEA N° 1310**

**ETUDE ET MISE EN PLACE DES BETONS DE PROTECTION**

**DANS LE GENIE CIVIL DES OUVRAGES NUCLEAIRES**

- I - INTRODUCTION**
- II - PROSPECTION DES MATERIAUX.**
- III - ETUDE GENERALE DES BETONS DE PROTECTION**
- IV - CARACTERISTIQUES DES BETONS DE PROTECTION**
- V - APPLICATIONS PRATIQUES.**
- VI - BIBLIOGRAPHIE.**

## INTRODUCTION

Dès les débuts du développement de l'énergie nucléaire, le problème de la protection contre les rayonnements a soulevé des difficultés. La production de radiations pénétrantes résultant de l'usage des piles atomiques, des accélérateurs de particules et des radioéléments en médecine (3) et dans l'industrie nécessitait l'emploi de matériaux pour se protéger contre les effets biologiques de ces rayonnements. De tous les matériaux, seul le béton normal apportait une solution immédiate, efficace et économique. Facile d'emploi, et d'une densité déjà intéressante, il s'adaptait, par ailleurs, parfaitement aux formes à donner aux constructions.

La puissance des piles et des accélérateurs ayant augmenté, les épaisseurs de protection nécessaire auraient obligé les chercheurs à se tenir trop loin de la source de rayonnement si les constructeurs n'avaient eu à leur disposition les bétons de plus haute densité obtenue en incorporant au ciment des agrégats denses (1-2-7).

Un tel béton avait déjà été utilisé dans la fabrication de contre-poids dans le but d'obtenir un corps lourd sous un faible volume.

Avec le développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire, le béton à haute densité a pris une grande importance et a permis de trouver une solution pour le moment satisfaisante au problème de la protection biologique contre les rayonnements (9).

Les protections biologiques en béton peuvent être grossièrement divisées en deux catégories :

- 1 - les protections de cellule à très haute activité.
- 2 - les protections de piles atomiques et d'accélérateurs de particules.

### Protections biologiques pour cellules à très haute activité:

Une cellule de très haute activité est une enceinte de travail destinée à la manipulation de matériaux émettant des rayonnements pénétrants et nécessitant, par conséquent, des parois de très forte épaisseur.

La composition et la densité du béton de protection sont fonction de nombreux facteurs et qualités :

- intensité et énergie du rayonnement
- épaisseur de la protection envisagée
- disponibilité des agrégats et compatibilité de ceux-ci avec les ciments
- prix de revient des matériaux
- conditions de mise en place et complexité de la protection
- homogénéité du béton

- gradient de température
- résistances mécaniques exigées
- stabilité sous les rayonnements en milieu humide ou sec.

#### Protections biologiques pour les piles atomique et les accélérateurs de particules :

La fonction principale des protections biologiques des piles atomiques et des accélérateurs est de permettre aux techniciens d'opérer en toute sécurité près de la source active en atténuant au maximum les divers rayonnements provenant de cette source.

La composition et la densité du béton de protection des piles et accélérateurs sont fonction des mêmes paramètres que ceux des cellules avec , en plus , la présence d'éléments légers nécessaires pour le ralentissement et la capture des neutrons ( 19 ).

#### Réduction de l'intensité de rayonnement :

La réduction de l'intensité de rayonnement est relativement simple. Presque tous les matériaux peuvent être utilisés comme protection si l'épaisseur utilisée est suffisante pour réduire l'intensité à la dose désirée. Cependant, l'usage de certains matériaux très économiques est écarté à cause de la trop grande épaisseur nécessaire , tandis que d'autres ne nécessitant que des épaisseurs modérées ne sont pas utilisables pour des raisons d'économie ou de résistance mécanique insuffisante. Ceci est vrai, par exemple, pour l'eau, excellent écran contre les neutrons , ou pour le plomb, matériau excellent pour l'absorption des  $\gamma$  ( 18 ) .

Très vite , le béton s'est avéré comme un excellent matériau de protection pour l'atténuation aussi bien des neutrons que des gammas ( 8 - 21 ).

#### Diminution de l'épaisseur de la protection :

L'emploi du béton lourd est parfois préféré au béton ordinaire pour la protection, du fait qu'il peut être utilisé en plus faible épaisseur.

Souvent , en effet , la diminution de l'espace réservé à la protection a une grande importance. Ceci est vrai pour un accélérateur comme pour le mur côté zone de travail des cellules dans lequel sont encastrées les fenêtres d'observation. Si la protection est trop épaisse, l'espace perdu peut être considérable. L'emploi de béton lourd peut réduire jusqu'à 2 fois et même plus l'épaisseur. Il peut en résulter des économies d'ensemble dans les dépenses de construction.

#### Homogénéité de la masse du béton :

Une attention toute particulière doit être apportée à la mise en oeuvre du béton afin d'obtenir une parfaite efficacité de la protection.

Si les reprises de bétonnage et les joints ne sont pas correctement effectués , des fissures se développent et l'intensité de rayonnements diffusant à travers ces fissures est plus grande que la dose permise.

De même, la présence de vides formés par une mauvaise pervibration ou par la ségrégation des agrégats modifie l'épaisseur effective du béton et l'intensité de rayonnement passant dans ces sections est plus grande.

#### Caractéristiques mécaniques :

La réalisation de protections de plus en plus importantes a tout de suite soulevé de nombreux problèmes mécaniques . En effet, ces masses de protection sont compliquées par des multitudes d'ouvertures nécessitées par les expériences telles que les canalisations , les canaux , les portes , les fenêtres , les trappes , etc... Souvent , ces couvertures de taille assez importante obligent l'Ingénieur à incorporer dans le béton des profilés métalliques destinés à supporter les importantes pressions des bétons lourds . Certaines protections sont réalisées à l'aide de béton à très haute densité dont les caractéristiques sont inférieures à celles du béton ordinaire; d'où le soin très particulier apporté à la granulométrie des agrégats ; à la mise en place par pervibration pour améliorer les résistances mécaniques des bétons lourds. En général, les efforts exercés sur les bétons de protection ne sont pas très élevés et les résistances obtenues sont de ce fait souvent acceptables. Il n'en est pas de même de leur maniabilité qui souvent est très mauvaise : l'usage de plastifiants et l'étude de la géométrie de la protection permettent de l'améliorer.

#### Prix de revient :

Toutes les caractéristiques exposées ci-dessus doivent être considérées sans perdre de vue le problème économique . Etant donné les différences des qualités protectrices entre les divers bétons lourds et le béton ordinaire, il est très important d'évaluer soigneusement le prix de revient des matériaux ( 17 ).

Quelquefois , le prix élevé du béton lourd dû à la nécessité de se procurer et de transporter des matériaux denses , tels que la barytine ou la magnétite , et à la non familiarité des entrepreneurs avec la confection du béton à haute densité peut être compensé par la réduction de l'épaisseur et le gain de surface utile.

En général, en tenant compte du transport des matériaux , de leur enrichissement, du prix des coffrages devant résister aux fortes pressions, de la confection et de la mise en place du béton lourd, ce dernier peut être considéré comme plus onéreux que le béton ordinaire . Par contre, il est moins onéreux qu'une protection en plomb ou en acier ( 20 ) .

#### Stabilité sous rayonnements :

A cette date , les renseignements fournis sur les effets des radiations sur les bétons de protection sont très rares . De même, aucune dégradation de protection par irradiation n'a été jusqu'ici signalée. Cependant , la détérioration des bétons de protection peut avoir lieu par irradiation de certains des éléments le constituant. Ceux-ci peuvent être transformés , avoir une action corrosive ou produire des réactions chimiques avec le liant . La température , la composition de l'atmosphère et les impuretés ou autres facteurs peuvent avoir des conséquences importantes . Enfin , les températures auxquelles sont soumises les protections allant croissant avec la puissance des réacteurs , les bétons peuvent se déshydrater et perdre ainsi leur efficacité contre les neutrons . L'élévation de température peut aussi causer des contraintes thermiques suffisantes pour modifier la position des canaux et conduire à des fuites de rayonnements ( 22 ) .

## II - PROSPECTION DES MATERIAUX

- Généralités
- Définition et mesure des densités.
- Les barytines.
- Les Ilménites .
- Le ferrophosphore.
- La limonite.
- Les magnétites.
- Les riblons.

## PROSPECTION DES AGREGATS LOURDS.

### I - Introduction. -

Afin de réduire l'importance et le prix des protections , il a été nécessaire d'effectuer des recherches géologiques dans le but de déterminer les matériaux susceptibles d'être utilisés pour la confection des bétons à haute densité.

La protection contre les rayonnements étant surtout obtenue à l'aide de matériaux lourds, ces recherches se sont principalement orientées sur les minerais , les minéraux denses et les métaux de récupération. ( 23 ) .

Si une soixantaine de corps lourds peuvent être inventoriés , une vingtaine seulement de ceux-ci répondent aux caractéristiques générales demandées aux agrégats rentrant dans l'élaboration des bétons, soit :

- Avoir une densité élevée
- Avoir un nombre atomique élevé.
- Contenir de l'hydrogène pour l'absorption des neutrons
- Pouvoir être mis sous une forme granulométrique convenable pour la confection du béton.

Ces matériaux doivent en outre :

- être facilement approvisionnables.
- supporter les manutentions et le transport.
- être faciles à mettre en oeuvre.
- être le meilleur marché possible.
- avoir une bonne résistance.
- être compatibles avec les ciments normalisés.
- enfin avoir des propriétés nucléaires demandées.

### II - Nomenclature des matériaux sélectionnés. -

Les matériaux sont classés par ordre décroissant du point de vue utilisation.:

DESIGNATION	NATURE	DENSITE THEORIQUE
Barytine	$SO^4Ba$	4,7
Magnétite	$Fe^3O^4$	5,1
Ilménite	$FeO TiO^2$	5
Riblons	Fe	7,8
Goethite	$Fe^2O^3H^2O$	4,4
Hématite rouge	$Fe^2O^3$	4,28
Limonite	$2 Fe^2O^3H^2O$	4,
Ferrophosphore	$Fe^2SiO^2P$	6,5
Pyrite	$FeS^2$	5,1
Grenaille d'acier	Fe	7,8
Galène	PbS	7,6
Corindon	Alumine	4
Chromite	$(FeMg)(CrAl)^2O^4$	4,5
Plomb de chasse	Pb	11,3
Serpentine	$3 MgO SiO^2 2H^2O$	2,6
Colemanite	$6 CaO 8B^2O^3 15 H^2O$	2,4
Pandermite	$4 CaO 5B^2O^3 9 H^2O$	2,49
Wolfran	$(FeMn)WO^3$	7,5
Pyrrothine	$Fe^7S^8$	4,7

A noter que si les premiers matériaux indiqués sur cette liste ne posent plus de problème pour la confection des bétons, il n'en est pas de même des corps tels que les pyrites et les borates qui s'incorporent assez mal au ciment et peuvent provoquer des désordres chimiques et des chutes de résistances.

### III - Caractéristiques générales .-

L'emploi de matériaux lourds étant conditionné par leurs propriétés physiques, l'approvisionnement et le prix, une évaluation pour chaque type d'agrégat doit être faite en tenant compte de la position de la source des agrégats par rapport au chantier. Il est souvent préférable d'utiliser les agrégats les plus lourds disponibles dans la localité où le béton doit être confectionné, sinon, le prix du transport peut fortement augmenter le prix de l'agrégat.

L'usage de corps boratés additionnés au béton peut accroître l'efficacité de la protection contre les neutrons. La colémanite et la pandermite sont utilisées à cet usage mais leur prix de revient est très élevé. Il est parfois suffisant d'utiliser des ciments contenant beaucoup d'eau d'hydratation ou des agrégats conte-

nant de l'eau de cristallisation ( tableau n° 1 ) . ( 24 ) .

IV - Définition et mesure des densités.

Le choix à effectuer parmi divers granulats susceptibles d'être employés pour la confection de bétons lourds dépendant essentiellement de leurs densités , il est nécessaire de définir avec précision ces dernières et les méthodes ayant servi à leur détermination , à partir des échantillons étudiés.

Réduction des échantillons.

Les échantillons sont normalement réduits par la méthode classique des Secteurs opposés ou quartages successifs.

TABLEAU 1.

PROPRIETE PHYSIQUES DES PRINCIPAUX AGREGATS LOURDS.

Désignation	Source	Principal constituant	Poids spéc gros agrégats	Poids spéc. fines	Fer	Eau fixée
Barytine	Garrot- Var	93% $SO_4 Ba$	4	4,25	0	0
Barytine	Hérault	96% $SO_4 Ba$	4,20	4,29	0,9	0
Ilménite	Canada	$FeO TiO_2$	4,55	4,70	55	0
Ferrophosphore	Pyr. orient.	$Fe P SiO_2$	6,40	6,50	57,18	0
Goethite	Canada	$Fe_2 O_3 H_2O$	3,70	4,20	55	10
Limonite	Loire Atl.	$2 Fe_2 O_3 H_2O$	3,75	3,80	53	7
Magnétite	Segré	$Fe_3 O_4$	4,05	4,55	55,7	1,30
Riblons	Récupération	Fe	7,60	7,60	99	0
Grenaille fonte	Stains	Fe		7,40	95	0
Itabira	Brésil	$Fe_2 O_3$	4,97	4,97	68,7	0
Diellette	Manche	$Fe_2 O_3$	3,87	4,04	51,2	0,7

( 1 ) Non concassé , ni criblé.

Toutefois , pour les échantillons naturellement fins ou broyés, on utilise le " diviseur à rifles " qui permet des réductions à la fois sûres et très rapides.

Densités élémentaires :

Par " densité élémentaire " , nous entendons la densité d'un morceau solide pris isolé-

ment, à l'air et à la température ambiante.

Il y a lieu de distinguer :

- la densité absolue ( ps ) qui n'est autre que le poids spécifique exprimé en  $\text{gr/cm}^3$  pores fermés et ouverts exclus.
- la densité apparente ( d ) qui est la densité réelle, c'est à dire rapportée au volume apparent, pores fermés inclus.

Sauf indication contraire, la densité apparente ( d ) s'entend pores ouverts exclus.

Dans le cas de corps particulièrement poreux, il peut, en outre, être intéressant de mesurer la densité apparente, pores fermés et ouverts inclus ( da ).

La densité absolue ou poids spécifique ( ps ) peut être mesurée après broyage à l'aide de picnomètre sous vide ou à l'aide du densimètre Le Chatelier ( norme B 49-104 ).

Le broyage doit être assez poussé pour supprimer les inclusions d'air contenues dans les pores fermés. Il ne doit pas l'être trop cependant car il serait alors plus difficile de chasser l'air retenu par les grains.

La densité apparente ( d ) est mesurée à l'aide de picnomètre ou d'éprouvettes graduées, ou le cas échéant de récipients plus grands, au volume d'eau, sans pression.

La densité apparente ( da ), pores fermés et ouverts compris, peut être déterminée soit au vide et à l'eau ( norme B 49-104 ), soit à l'aide de mercure qui ne pénètre pas dans les pores.

#### Densités en vrac :

Par " densité en vrac ", nous entendons la densité apparente de l'ensemble d'un échantillon en vrac quelconque : fines, gravier ou roches, pores fermés et ouverts et intervalles ( vides entre grains ) compris.

Il y a lieu de distinguer :

- la densité en vrac normale ; sans tassement ( D ) ou " loose weight "
- la densité en vrac avec tassement (  $D_c$  ) ou " compact weight "

On peut naturellement considérer plusieurs degrés de tassement jusqu'au tassement limite ou maximum ( Dm ).

Les méthodes de détermination de ces densités sont décrites dans la norme ASTM C.29:

#### 1 - Mesure de la densité en vrac normale .

On emploie la méthode dite " shoveling procedure " ( pelletage ) qui est applicable à tous les agrégats dont la plus grande dimension ne dépasse pas 4 pouces, c'est à dire en pratique à tous ceux utilisés pour la confection de bétons lourds.

Les agrégats à étudier sont prélevés avec une pelle ou une cuillère et sont déversés dans un récipient de dimension appropriée ( v. ci-après ), d'une hauteur de 2 pouces au maximum au-dessus de la partie supérieure dudit récipient .

Ce faisant , on doit éviter toute ségrégation des éléments .

Une fois le récipient rempli en excès , on arase ce dernier en nivelant la surface libre des agrégats avec une règle , de sorte que les plus grosses particules compensent approximativement les plus grands vides restant à la surface en dessous du niveau supérieur du récipient de mesure . On détermine alors le poids des agrégats correspondant ainsi au volume du récipient .

Pour les poudres de granulométrie inférieure à 1 mm , on peut se contenter de les transvaser dans une mesure d'un litre , à travers un entonnoir dont la sortie soit à moins de 2 pouces du haut de la mesure ; on laisse un cône se former librement et on l'arase .

## 2 - Mesure de la densité en vrac avec tassement .

Deux méthodes peuvent être utilisées :

a ) "Rodding procedure" , applicable aux agrégats ne dépassant pas 2 pouces . Le tassement est obtenu par frappes successives de la surface du granulat à l'aide d'un barreau à bout hémisphérique de 5/8" , le récipient de mesure étant rempli et tassé en trois fois .

b ) "Jigging procedure" ou méthode des secousses , applicable à tous les agrégats avant une dimension maximum de 2" à 4 " .

C'est cette méthode qui a été utilisée pour nos études .

Le récipient de mesure est rempli au tiers seulement , comme ci-dessus ( § 1 ) puis est placé sur une aire cimentée ou sur tout autre sol dur . On le soulève alors à une hauteur de 5 cm et on le laisse retomber sur le sol, d'un coup sec tantôt sur le fond , tantôt sur le côté alternativement et ceci 25 fois de chaque côté.

On opère de la même façon après remplissage du deuxième tiers , puis après remplissage complet et en excès du récipient . Ce dernier est ensuite arasé et nivelé comme indiqué ci-dessus ( § 1 ) .

Il ne reste plus qu'à déterminer le poids des agrégats tassés remplissant ainsi le récipient et correspondant à son volume d'eau .

Pour les gros granulats , un tassement plus poussé pourrait peut-être être obtenu en répétant 2 ou 3 fois cette opération , mais la plupart du temps le tassement limite est tout de suite obtenu.

## 3 - Balances

Les balances doivent avoir une sensibilité de 0,5 % au moins.

## V - Autres caractéristiques .

a ) La porosité est le rapport du volume des pores d'un corps à son volume apparent.

Il y a bien lieu de distinguer la porosité totale , la porosité fermée et la porosité ouverte suivant que l'on considère tous les pores ou bien les pores fermés ou ouverts seulement.

Pour un granulat , la notation intéressante est celle de porosité totale , pores fermés et ouverts et intervalles compris.

C'est en somme le pourcentage des vides et elle peut s'exprimer de la façon suivante en fonction de la densité en vrac D et de la densité absolue ps :

$$P = 100 \left( 1 - \frac{D}{ps} \right) \text{ en } \%$$

La porosité élémentaire des matériaux habituellement utilisés pour la confection des bétons ne doit pas dépasser 10 % .

La porosité d'un granulat lourd en vrac peut être de l'ordre de 50 %.

b ) La compacité ( ou cubicité ) est le rapport du volume des parties pleines au volume apparent .

En pourcentage , la compacité est égale à 100 - P .

c ) Coefficient volumétrique d'un élément de plus grande dimension diamètre N est le rapport du volume élémentaire v de cet élément au volume d'une sphère dont le diamètre serait N :

$$C = \frac{v}{\frac{\pi N^3}{6}}$$

Le coefficient volumétrique d'un granulat est donc de la forme :

$$C = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{\frac{\pi}{6} ( N_1^3 + N_2^3 + \dots + N_n^3 )}$$

## VI - Granulométrie des agrégats -

Les granulats habituellement utilisés pour la confection des bétons peuvent être classés de la façon approximative suivante , en se référant aux spécifications de la norme AFNOR P. 18-304 ( les numéros de tamis et de passoires corres pondants sont définis dans la norme X. 11-501 ).

1 - Poudres , farines ou fillers	grains inférieurs à 0,08 mm *
2 - Sables	0,08 à 5 mm
3 - Gravillons	6,3 à 25 mm
4 - Pierres cassées ou cailloux	25 à 100 mm
5 - Moellons ou galets	plus de 100 mm

---

\* Diamètres des passoires.

Dans chaque catégorie intermédiaire ( 2, 3 et 4 ), on distingue respectivement les fins ou petits , les moyens et les gros.

Ces définitions ne sont malheureusement guère suivies . En pratique , il est donc nécessaire de préciser dans chaque cas les dimensions de chaque catégorie de granulat.

La classification américaine ( norme ASTM C. 125 ) est trop sommaire , car elle distingue simplement les catégories suivantes :

- " Coarse aggregate " ou " gravel "

Particules supérieures à 4,76 mm ( retenue au tamis Tyler n° 4 )

- " Fine aggregate " ou " sand " .

Particules comprises entre 4,76 mm et 74 microns ( tamis Tyler n° 4 à 200 )

Remarques :

L'expérience acquise dans le domaine des bétons ordinaires a montré que l'on doit éviter dans toute la mesure du possible :

- les fillers inférieurs à 0,08 mm
- les sables contenant une forte proportion de grains plats
- les gravillons contenant des plaquettes ou aiguilles de coefficient volumétrique moyen inférieur à 0,12 - 0,15
- les pierres ou cailloux de coefficient volumétrique moyen inférieur à 0,15 - 0,20.

REFERENCES

- |                      |  |
|----------------------|--|
| Norme AFNOR B 49-104 | - Densités absolue et apparente                              |
| "                    | Porosités  |
| "                    | Densimètre Le Chatelier                                      |
| Norme AFNOR P 18-301 | - Caractéristiques des bétons                                |
| "                    | Définition et mesure des coefficients volumétriques          |
|                      | Détermination de la porosité                                 |
| Norme ASTM E. 12     | - Définitions des densités élémentaires en général           |
| C. 20                | - Porosité , absorption et densité apparente ( réfractaires) |
| C. 29                | - Mesures des densités des granulats .                       |
| C. 127               | - Densités ( " coarses aggregates " )                        |
| C. 128               | - Densités ( " fines aggregates " )                          |

ETUDE DES PRINCIPAUX MATERIAUX UTILISES DANS LA CONFECTION DES BETONS A HAUTE DENSITE.

I - LA BARYTINE .

1°) Généralités .

Le sulfate de baryum  $SO_4^{4-} Ba$ , plus habituellement dénommé barytine est assez commun en France . On trouve la barytine généralement sous forme de filons subverticaux , d'épaisseur variable. Leur remplissage est composé presque exclusivement de barytine quelquefois pure , le plus souvent accompagnée d'impuretés quartz et fluorine . La barytine sert aussi de gangue aux minerais métallifères sulfurés , blende , pyrite , galène , etc...

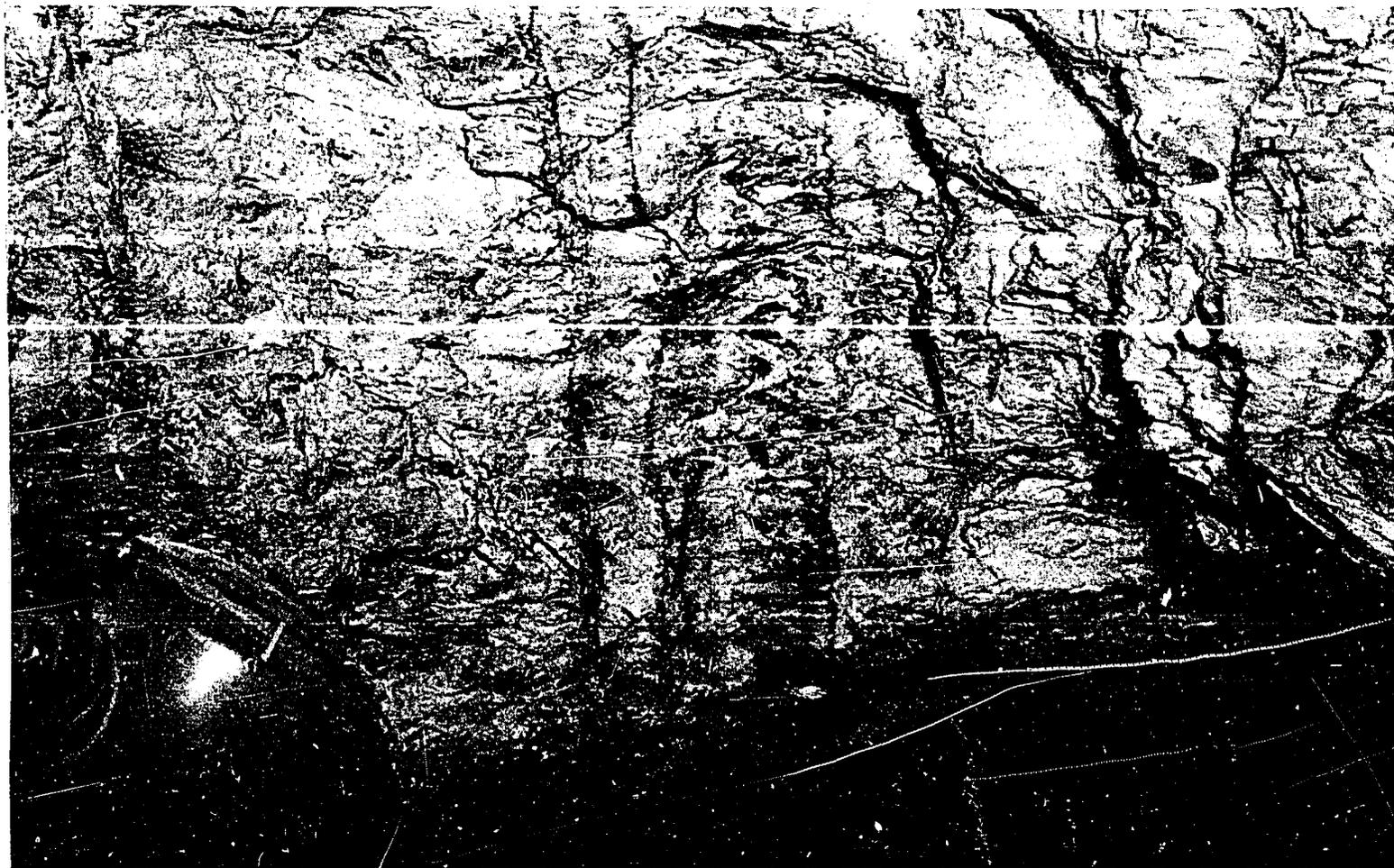


Fig. 2. - Mine de barytine des Arcs ( Var ) - Filon Sub-vertical.

On la rencontre aussi , mais plus rarement en formation horizontale ou la barytine minéralise par substitution de véritables horizons sédimentaires. La barytine peut alors être assez pure et la couche avoir une épaisseur de un à plusieurs mètres et cela sur des superficies considérables.

2°) Répartition géographique et ressources -

En France , les gisements principaux se trouvent répartis dans les Pyrénées, le Massif Central , les Vosges et les Maures . Sur une extraction totale brute de 100.000 tonnes en 1958 , deux exploitants ont

produit à eux seuls près de 80.000 tonnes . ( voir le tableau n° 1 ). La plupart des autres gisements ne sont pas équipés ou n'ont pratiquement pas de réserves de minerais reconnues . L'importance des capitaux à mettre en oeuvre , l'irrégularité des marchés et la faible valeur intrinsèque de ce minerai et aussi la mauvaise qualité de la plupart des gisements français sont autant de facteurs qui découragent les plus persévérants. On peut également affirmer que pour tous les gisements français , quelle que soit l'utilisation de la barytine , le mineur est obligé de laver gravimétriquement son minerai. En effet , tel qu'il sort de la mine il est pratiquement inutilisable de par les impuretés que le minerai brut contient , que les impuretés viennent de la barytine elle-même ou qu'elles proviennent des stériles qui s'ajoutent à la barytine lors de l'abattage dans les chantiers d'extraction.

### 3° ) Exploitation -

Le prix de vente peu élevé de la barytine oblige l'exploitant à s'en tenir à des méthodes d'extraction économiques et rend difficile le renouvellement du matériel.

Pour qu'une exploitation soit rentable , elle doit satisfaire à un certain nombre de conditions :

- reconnaissance de la richesse du gisement
- qualité de la barytine réduisant au minimum le triage
- avoir à proximité des voies de communication et de l'eau pour la laverie.
- à considérer également les conditions météorologiques du lieu d'exploitation ( pluies enneigement , etc... )

En ce qui concerne l'exploitation elle-même , une fois avoir reconnu le filon en profondeur , en longueur et en épaisseur , elle n'offre en soi pas de difficultés . Selon l'épaisseur , la tenue du minerai en place , la tenue du toit et du mur du filon , on adopte soit la méthode des gradins droits , soit celle de la chambre pleine , soit encore celle des sous étages et des piliers abandonnés.

TABLEAU n° 1

Capacité de Production de quelques Gisements susceptibles de livrer suivant une granulométrie déterminée:

Producteur	Département	Gisement	Production (T/mois )
Mines de Garrot	Var	Vidauban Les Arcs	2.000 max.
" "	Vosges	Val d'ajol	800 "
" "	Lozère	Vialas	( ou beaucoup 500 ( plus si mo- ( yens suffisants
" "	Indre	Chaillac	1.000 "
Produits barytiques de l'	Hérault	Clermont l'H.	500
Carrières de Montalimbert	Allier	St - Hilaire	300
France - Barytes	Tarn	Alban	Travaux en cours
" "	Aude	Palairac	

### 4° ) Traitement du minerai brut d'exploitation .

Le minerai sortant de la mine n'est pas en général commercial quelle que soit l'utilisation . Il faut soit le trier à la main , après simple débordage à l'eau ( méthode employée habituellement par quantité de petits exploitants ) soit de laver gravimétriquement pour le débarrasser de ses impuretés propres ou d'exploitation. Ce traitement nécessite des installations très importantes car le minerai doit être concassé, débordé



*Régions à production régulière :*

-  Plus de 7.000 tonnes/an
-  1000 à 7.000
-  Moins de 1.000

- Gisements connus
- " " susceptibles de livrer par granulométrie

et granulé en calibrages préalablement déterminés pour permettre son passage dans les jiggs ( fig. III ). Les jiggs sont des appareils d'ailleurs très anciens , qui permettent de traiter gravimétriquement le minerai brut. Chaque calibrage arrive dans un appareil à plusieurs compartiments remplis d'eau . Des pistons par mouvements alternatifs verticaux impriment à l'eau des pulsions rapides et continues qui traversent le minerai. Ces pulsions font monter à la surface du lit de minerai tous les stériles plus légers qui sont alors entraînés par le courant tandis que le minerai lourd , pur , descend vers le fond , où il est recueilli par des moyens appropriés . Tout le traitement se fait donc à la fois dans des courants d'eaux verticaux et horizontaux.

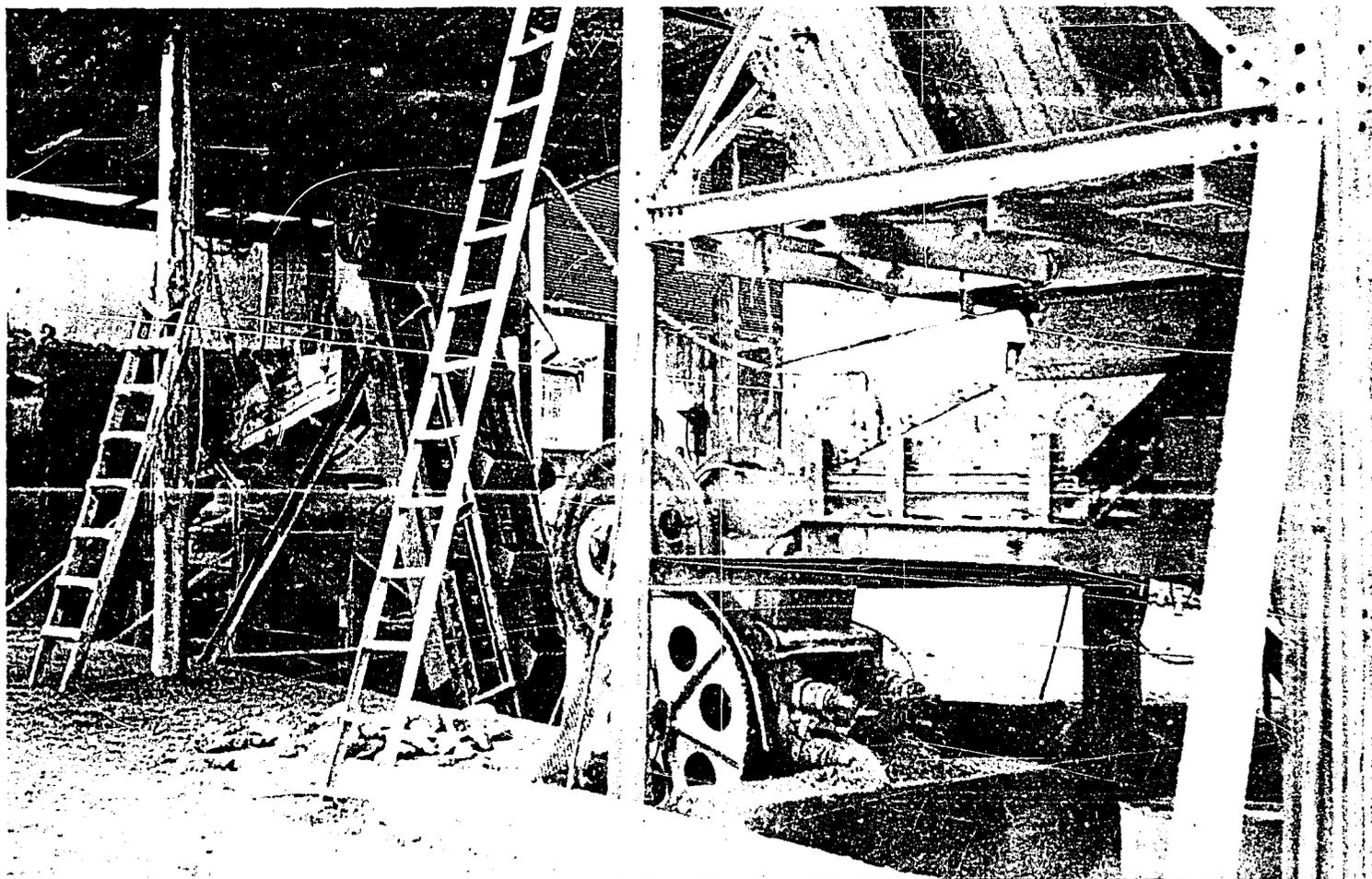


Fig. 3. - Vidauban ( Var ) . Installation de concassage et de criblage de la barytine .

#### 5°) - Caractéristiques des barytines .-

La barytine ordinaire est un minerai opaque, le plus souvent blanc , à structure lamellaire . On en trouve des variétés radiées et colonnaires.

D'après l'échelle de Mohrs , la dureté de la barytine est de 3 , égale à celle de la calcite.

Associés à la barytine , on trouve parfois des sulfates de strontium et de calcium. Plus communément , la barytine contient de la fluorine ou des pyrites.

Les mesures et les analyses faites sur les barytines des mines de Garrot des Arcs ( Var ) ont donné les résultats suivants :

- Densité spécifique	: 4,28 à 4	
- Analyse chimique	: $SO^4 Ba$	92,58 à 94 %
	$SiO^2$	1,50 à 3 %
	CaO	0,62 %
	$CaF^2$	3,20 %
	$Al^2 O_3 + Fe^2 O^3$	0,50 %
	Eléments non dosés	0,10 %

La silice est couramment associée au sulfate de baryum , en général en quantités relativement faibles , mais importantes pour les qualités qu'elle confère au minerai principal.

On peut dire que la résistance mécanique à l'écrasement de la barytine est directement fonction de sa teneur en silice . Il en est de même pour son pouvoir de décrépitation à la chaleur , mais il est bien évident que ces pourcentages croissants en silice s'obtiennent au détriment de la densité du minéral. Les laboratoires américains ont signalé la présence d'opale et de calcédoine dans certaines barytines à cause des incidents qui sont à craindre au contact de ciments très alcalins , tels qu'il en existe en Amérique.

Enfin , les barytines peuvent contenir des oxydes de fer ou des pyrites ; les oxydes de fer s'y trouvent en faible proportion ; ils donnent au minéral sa teinte mais leur action n'influe pas sur son comportement . Par contre , les pyrites s'y trouvent associées en proportions parfois importantes ; elles caractérisent les barytines sulfureuses et peuvent altérer leurs qualités mécaniques et chimiques.

## II - L'ILMENITE .-

### 1°) - Généralités -

L'ilménite est un minerai de titane dans lequel ce métal est associé au fer , d'où le nom de " fer titané " sous lequel on le désigne parfois .

A l'état pur , l'ilménite -  $TiO^2$  ,  $FeO$  - contiendrait 52,7 % de  $TiO^2$  et 47,3 % de  $FeO$  ( soit 36,8 % Fe ).

En pratique , les minerais naturels courants titrent seulement 32 à 40 %  $TiO^2$  , tandis que le fer s'y trouve à la fois sous forme d'oxyde ferreux et d'oxyde ferrique. Par concentration , on obtient des minerais marchands titrant 48 à 50 %  $TiO^2$  minimum et souvent plus , jusqu'à 55 - 60 % mais il s'agit alors d'ilménorutile , le rutile étant le minerai de titane ( plus rare ) exempt de fer.

Dans le cadre de la présente étude , c'est au contraire le fer qui rend l'ilménite intéressante pour la confection de béton lourd.

### 2°) - Répartition géographique et ressources -

L'ilménite est extrêmement répandue sur le globe terrestre , les principaux pays producteurs étant les suivants, par ordre d'importance décroissant rapidement : U.S.A. , Indes , Canada, Norvège, Malaisie , Finlande , Sénégal , etc...

La production mondiale d'ilménite marchande est de l'ordre de 1.800.000 tonnes , tandis que la production de rutil (Australie surtout ) n'atteint que 110.000 tonnes environ.

Malheureusement en ce qui concerne son utilisation comme granulat lourd , l'ilménite naturelle se présente le plus souvent sous forme de sable provenant de vastes gisements constituant des plages dites de " Sable noir " en bordure du littoral.

Les exploitations disposant à la fois d'ilménite en roches et des installations suffisantes pour broyer et classer différentes qualités de minerais, sont rares . On les trouve guère en pratique qu'au Canada et en Norvège.

La composition mécanique du minerai a en effet peu d'importance pour les principales fabrications servant de débouché normal à la production d'ilménite à savoir : bioxyde de titane en premier lieu ( pigment pour peinture ) et ferrotitane .

### 3°) - Ilménite Q.I.T. - Lac Allard - Canada - Exploitation .

Le minerai d'ilménite qui semble être le plus intéressant pour notre étude est sans conteste celui du Lac Allard , situé au Canada , au voisinage de l'embouchure du fleuve St Laurent ( voir carte).

Les gisements du lac Allard se trouvent à 22 milles au nord de Havre-St-Pierre, port lui-même situé sur la rive Nord du St Laurent . Ils constituent l'une des plus vastes réserves d'ilménite connues dans le monde .

On estime ces dernières environ 150 millions de tonnes , contenant en moyenne 35 % d'oxyde de titane et 40 % de fer .

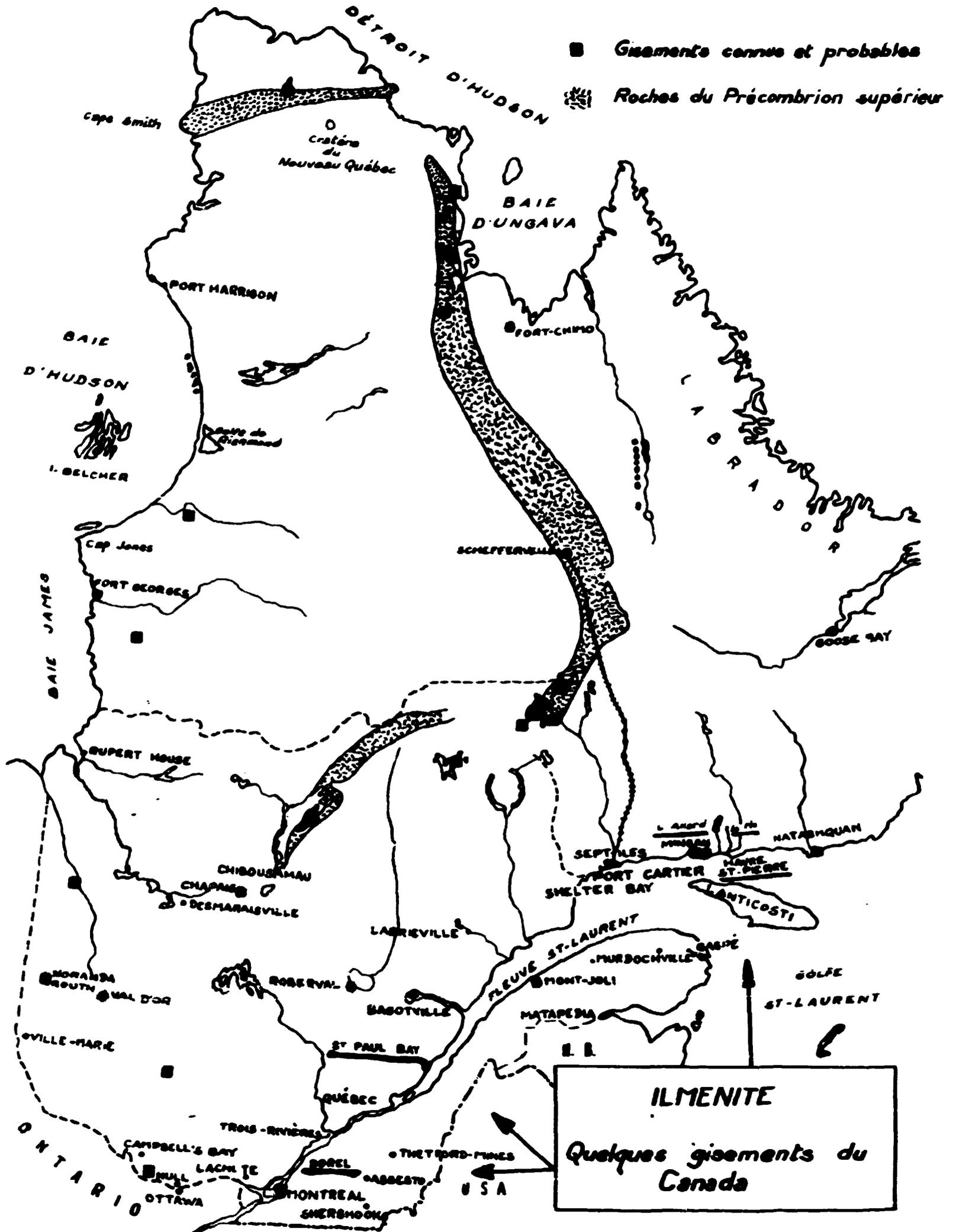
Ces gisements appartiennent à la " Québec Iron and Titanium Corporation " , société constituée en 1948 et filiale de la " Kennecott Copper Corporation " et de la " New - Jersey Zinc Co " .

L'activité de la société est essentiellement orientée vers la production de concentrés titrant 70 %  $TiO_2$  , convenant particulièrement bien à la fabrication d'acier et donnant comme important sous-produit plusieurs qualités de fonte.

Dès 1957 cependant , la Q.I.T. a vendu du minerai classé suivant diverses granulométries , soit comme granulat lourd pour béton nucléaire , soit comme charge de remplissage pour le revêtement de pipe-lines.

La Q.I.T. dispose de très importantes installations implantées à Sorel , à 540 milles en amont de Havre - St- Pierre , entre Québec et Montréal. Ces installations comportent :

- des ateliers de broyage et de séparation de minerais ,
- des ateliers de fusion dans lesquels six fours électriques à arc peuvent traiter 2000 tonnes d'ilménite par jour ,
- des installations modernes de déchargement , de stockage et de chargement, munies des derniers perfectionnements .



Le port de Havre- St - Pierre , relié par 27 milles de voie ferrée au lac Allard , assure tout le trafic des expéditions de minerai brut tout venant à destination des usines de Sorel (et des clients qui utilisent le minerai tel quel ).

Au port de Sorel s'effectuent les expéditions des produits finis et de toutes les qualités classées de minerai.

La cadence de chargement est de 1500 tonnes minimum à 2000 tonnes par jour: elle peut même atteindre 2500 tonnes / jour sur certains appontements .

En raison de sa situation géographique ( 46è au parallèle ). Le fleuve S. Laurent est envahi par les glaces et impraticable en hiver. Il est donc très important d'en tenir compte dans tout projet comportant un approvisionnement d'ilménite canadienne.

La navigation est ouverte en général vers le 15 Avril et peut se poursuivre suivant les années jusqu'en Octobre/Novembre . Les expéditions ne sont donc possible que durant 6 à 7 mois par an au maximum.

#### 4°) - Aspect physique et qualités. -

L'ilménite de la Q.I.T. se présente sous la forme de graine assez dure , de couleur grise.

En 1957 , lorsque la mine a commencé à fournir de l'ilménite calibrée , pour béton lourd deux qualités ont été préparées ( celles référencées " I " et " 3 " ci-après ) et livrées à la Canadian Atomic Energy Commission.

Après divers tâtonnements et compte tenu des résultats obtenus au Canada et aux U.S.A. la Q.I.T. a mis au point , dès 1958, cinq qualités d'ilménites calibrées qu'elle peut maintenant fournir indifféremment suivant les demandes .

Ces qualités sont définies ci-après , les poids spécifiques mentionnés en regard étant ceux indiqués par le producteur :

#### Qualité n° 1 - Minerai tout venant .

dont les plus gros morceaux sont 0 - 76 mm

toutefois limités à 3 " :

a ) ordinaire ps = 4,3

b ) améliorée ps = 4,5

#### Qualité n° 2 - Minerai tout venant de stock

granulométrie 2" à 3/8 " , 10 - 51 mm

donc exempt de toutes les fines ps = 4,5

#### Qualité n° 3 - Minerai broyé

dont la granulométrie ne dépasse 0 - 10 mm

pas 3/8 " ps = 4,3

Qualité n° 4 - Minerai broyé

également à moins de 3/8 " 0,6 - 10 mm  
 mais exempt de particules très fines  
 inférieures à 28 mesh, dit " beneficiation  
 concentrates " ps = 4,6

Qualité n° 5 - Minerai concentré .

dit " spirale concentrates " =  fines 0,15 - 5 mm  
de tamisage 4 mesh à 100 mesh ps = 4,6

5°) Composition chimique .-

L'analyse indicative du minerai brut tout venant , tel qu'il est extrait du gisement , est la suivante :

Ti O <sup>2</sup> .....	35,3 %		
Fe O .....	28,7	)	
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup> .....	26,3	)	Fe ... 40,7
Si O <sup>2</sup> .....	3,3	)	
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> .....	2,7	)	
Ca O .....	0,70	)	
Mg O .....	3,0	)	
Cr <sup>2</sup> O <sup>3</sup> .....	0,10	)	
V <sup>2</sup> O <sup>5</sup> .....	0,28	)	
Mn O.....	0,14	)	
S .....	2,22	)	

6°) - Prix de revient .-

Une étude de prix faite en mai 1958 a permis de déterminer, pour chaque qualité , les prix de l'ilménite de la Q.I.T. franco chantier SACLAY.

Compte tenu du nouveau taux de change en vigueur depuis le 29/12/58 ces prix de revient sont actuellement et approximativement les suivants :

Qualité I .....	Frs. 10.900.-)	
Qualité 2 .....	" 13.760.-)	
Qualité 3 .....	" 12.900.-)	la tonne métrique
Qualité 4 .....	" 13.470.-)	hors taxe
Qualité 5 .....	" 12.900.-)	

Il est essentiel de souligner qu'étant donné les modalités propres au transport maritime ces prix ont été calculés pour une cargaison d'au moins 4.000 tonnes , en un seul ou en plusieurs lots séparés , en vrac. La fourniture d'une quantité plus réduite conduirait à des prix de revient beaucoup plus élevés.

7 °) - CONCLUSIONS . -

Les qualités 2 - 4 - 5 sont celles qui semblent devoir convenir le mieux comme granulats lourds. Les essais entrepris sur les différents échantillons incitent à penser que l'ilménite de la Q.I.T. doit permettre d'obtenir d'une manière générale des densités de béton de protection de l'ordre d'au moins 3,80. En comparant cette densité à celles obtenues à l'aide de la barytine, on a constaté que l'emploi de l'ilménite à la place de la barytine se solderait par un gain de densité de béton de l'ordre de 0,25 mais avec un prix de revient légèrement plus élevé.

III - FERROPHOSPHORE .

Le ferrophosphore ou phosphure de fer, est un alliage utilisé par la sidérurgie dont la teneur en phosphore doit être de l'ordre de 25 % environ .

Il n'y a plus de fabrication de ferro-phosphore proprement dite, mais c'est un sous-produit de la fabrication du phosphore. Celle-ci se fait à partir des phosphates de chaux au four électrique permettant la production d'anhydride phosphorique, l'oxyde de fer contenu dans le minerai se trouve réduit et passe à l'état de métal. Le Fer, ainsi libéré, se combine immédiatement au phosphore naissant, produisant du ferro-phosphore .

Cet alliage se présente sous la forme d'une masse métallique de haute densité, à cassure brillante, d'une teneur d'environ 25 % de phosphore. Il est concassé en morceaux de la grosseur du poing mais il y a automatiquement des morceaux plus petits allant jusqu'à la grosseur d'une noisette.

Le ferro-phosphore est couramment utilisé comme ferro-alliage d'addition dans les aciéries et fonderies de fonte dont les matières premières ne sont pas assez riches en phosphore, pour les fabrications spéciales.

Seul le ferro-phosphore à basse teneur, c'est-à-dire, à teneur inférieure à 20 %, impropre à la sidérurgie pourrait être utilisé comme granulats lourds dans les bétons.

Pour un ferro-phosphore titrant 20% de P, il y a, en général, 5 à 6 % de Si, le solde étant essentiellement constitué par du fer. La teneur en aluminium varie de 0,10 à 0,80 %, celle du chrome entre 0,30 et 1,3 % et celle du manganèse de 0,80 à 1 % .

Il existe deux fabricants français de phosphure .

- La Société des Produits Chimiques COIGNET à Lyon.

- La Société PIERREFITTE à Pierrefitte-Westalès (Hautes-Pyrénées).

Cette dernière, notamment, dispose de lots à basse teneur de temps à autre, titrant seulement 15 à 20 % de phosphore, qui pourraient être obtenus à des prix variant entre 13.000 et 18.000 Fr la tonne, hors T.V.A.

#### IV - LIMONITE DE ROUGÉ .

Le gisement de Rougé est le seul gisement de limonite en France faisant l'objet d'une exploitation normale.

Il est la propriété de la " Société Industrielle et Minière de Rougé " ( Anciens Etablissements Jos de Poorter ).

L'exploitation est située sur le territoire de la commune de Rougé , tout à fait au nord du département de la Loire Atlantique .

La mine est un ensemble géologique très complexe comportant une partie siliceuse ( gangue de grès ) et une partie à gangue argileuse , la plus riche après lavage.

##### 1°) - Qualités .-

Le minerai siliceux est livré simplement concassé.

Le minerai argileux doit faire l'objet d'un lavage soigné.

En pratique , la mine peut fournir trois qualités :

- minerai pour haut-fourneau : 38 - 48 % , concassé ou lavé.
- minerai rocheux pour four Martin : 48 - 50 % , trié à la main.
- minerai de décarburation : 44 - 45 % , lavé.

La limonite de Rougé présente un double intérêt :

- a ) par sa teneur élevée en eau combinée ( 10 à 11 % ) .
- b ) par les possibilités de concassage et de criblage de la mine.

Celles-ci permettent d'obtenir sans la moindre difficulté , n'importe quelles granulométries , telles que :

0 - 2 mm , 2 - 5 mm , 5 - 9 mm , 9 - 50 mm , 50 - 120 mm ou 50 - 150 mm , par exemple , ou toutes les granulométries intermédiaires . Les plus couramment livrées à la sidérurgie sont les suivantes :

0 - 9 mm , 9 - 50 mm , et 50 - 150 mm.

##### 2°) - Caractéristiques physiques .

Nous avons reçu et étudié dix échantillons sur lesquels ont été déterminées les granulométries et les densités .

Le classement par densités apparentes de ces échantillons se présente comme suit ( d'après essais effectués sur minerai tel quel ) .

N° Echantillon	Concassé	Lavé	Densité apparente
37	2 - 5 mm		3,74
36	0 - 2 mm		3,72
38	5 - 9 mm		3,69
33		5 - 9 mm	3,56
39 et 35	9 - 50 mm	50 - 150 mm	3,55
40	50 - 150 mm		3,53
31		0 - 2 mm	3,47
32		2 - 5 mm	3,46
34		9 - 50 mm	3,35

Or théoriquement , ce sont les qualités de minerai lavé qui devraient être les plus riches et les plus denses.

Cette anomalie peut s'expliquer par un mauvais lavage à la mine de certains échantillons .

### 3° ) - Composition chimique.

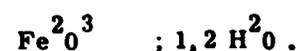
Analyse moyenne indicative donnée par la mine :

Fe.....	46,30 %	( Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup> .....	58,16 %
		( FeO .....	7,22 %
SiO <sup>2</sup> .....	14,40 %	Fe + SiO <sup>2</sup> .....	60,70 %
Mn .....	0,22		
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> .....	6 à 7 %		
CaO .....	0,40 %	)	
MgO .....	0,30	) CaO + MgO < 1	
P .....	0,40 à 0,50	)	
S .....	0,02		
Perte au feu.....	10,10		

En pratique , quelle que soit la qualité , la somme des teneurs , Fe + SiO<sup>2</sup>, est toujours voisine de 60 % .

Elle varie , en fait , de 58 à 61 ; elle est légèrement inférieure à 60 dans le cas des teneurs en fer les plus élevées ( 49 à 50 % ) .

Il s'agit , en réalité , d'un mélange de goethite et le limonite à 42 % de goethite dont la formule correspondrait à :



V . - LES MAGNETITES . -

A ) La magnétite de Segré.

Le principal gisement de magnétite est la propriété de la Société des " Mines de fer de Segré " , filiale des aciéries du Nord et de l'Est , c'est à dire au groupe " Usinor " .

L'exploitation est situé à l'extrémité nord-ouest du département de Maine-et-Loire , à proximité de Noyant-la-Gravoyère , soit à quelques Kms à l'ouest de Segré .

La magnétite se présente sous une forme compacte , en gisements altérés par beaucoup de grès , ce qui nécessite un triage à l'aide de tambours magnétiques.

Le minerai est rocheux et dur.

1 ) Qualités .

La mine livre normalement les qualités suivantes :

1 ) Minerai de décarburation - Teneur garantie 52 , 5 % de Fe.

Minerai enrichi , exempt de menus et de fines.

Ce minerai est utilisé pour les fours Martin et également par les Aciéries Thomas à soufflage d'oxygène.

2) Minerai pour hauts-fourneaux. - Teneur : 50 % de Fe environ.

Deux granulométries : 30/80 et 8/30.

Minerai concassé , exempt de fines.

3 ) Fines pauvres -Teneur 45 % de Fe.

Triées à part : 5/8.

4) Magnétite pour agglomération - Teneur : 54 % Fe environ.

Granulométrie ..... 500 microns - 5 mm.

5 ) Concentrés ( magnétite pure ) - Teneur :64 % Fe environ .

Granulométrie ..... 0 à 500 microns.

Cette qualité est livrée aux charbonnages , pour lavoirs en milieu dense. Ces derniers tendent d'ailleurs à exiger une granulométrie plus serrée , 20 à 150 microns , ce qui peut être obtenu par un triage supplémentaire .

La magnétite de Segré présente un double intérêt :

a ) bonne compacité ,

b ) possibilités de livraison suivant des granulométries bien déterminées.

La production totale de la mine est de l'ordre de 40.000 tonnes/mois.

2 ) Composition chimique .

Plusieurs analyses , effectuées sur les divers échantillons reçus , ont conduit aux résultats suivants :

<u>A ) Minerai de décarburation 53 %</u>	<u>Minerai de haut - fourneau 50 %</u>
Echantillon préliminaire 10 K Morceaux tout venant	Echantillon 50 K. n° 3 8 à 30 mm
Fe.....55,70 ( FeO.....55,25 ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....21,90	Fe.....50,57
Mn..... 0,37	Mn..... 0,15
SiO <sub>2</sub> ..... 8,24	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... 4,80	
CaO..... 1,71	
MgO..... 0,36	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ..... 2,18	
S libre.....traces	S libre .....0,02
As.....traces	As..... 0,15
Pb..... 0,02	Pb..... absence
Cu..... 0,03	
Zn..... 0,04	
Ni..... 0,03	
Co ..... Absence	
TiO <sub>2</sub> ..... 0,24	
K <sub>2</sub> O .....0,39	K <sub>2</sub> O ..... 0,63
Na <sub>2</sub> O ..... 0,84	Na <sub>2</sub> O..... 0,54
Co <sub>2</sub> ..... 2,05	
H <sub>2</sub> O ..... 1,35	H <sub>2</sub> O combinée 0,50

Autres déterminations .

<u>Qualité Minerai</u>	<u>Echantillon</u>	<u>Granulométrie</u>	<u>Fe</u>	<u>Mn</u>
Décarburation	N° 1	40 - 80 mm	56,69	0,10
"	N° 2	0,5 - 5 mm	52,89	0,14
Haut-fourneau	N° 5	30 - 80 mm	50,31	0,18
"	3	8 - 30 mm	51,37	0,16
"	4	5 - 8 mm	46,43	0,16
Magnétite concentrée	6 + 7	0 - 150 microns	63,85	0,10

B ) Magnétite de Diellette.

Le gisement de magnétite de Diellette appartient à la " S.A. des Mines de Diellette " , après avoir été auparavant propriété britannique et propriété allemande .

Depuis 1945 , la gérance de l'exploitation est assurée par la " Société de Mines et de Produits Chimiques ".

La mine est située dans le département de la Manche , à proximité de Diellette sur le territoire de la commune de Flamanville , sur la côte ouest de la Manche , à 25 km au sud-ouest de Cherbourg.

La particularité du gisement est d'être situé sous la mer.

Le minerai est constitué par des roches denses et homogènes , dures et très abrasives comparables à celles de Segré ; il contient très peu d'hématite.

La mine exploite simultanément trois filons dont les teneurs en fer sont différentes :

- Couche 2 .....	Teneur Fe.....	52 %
- 2ème synclinal.....	" .....	57 %
- Couche 6 .....	" .....	60 %

L'exploitation n'est pas équipée pour livrer suivant des granulométries déterminées . Elle dispose seulement d'un concasseur Humboldt permettant de limiter les plus grosses roches à 120 mm.

La mine livre donc uniquement du minerai tout venant et garantit simplement une teneur en fer.

Suivant la teneur exigée , le minerai est prélevé dans l'un ou l'autre des filons ci-dessus mentionnés.

En 1958 , la production a atteint 126.500 tonnes , dont 118.850 tonnes ont été livrées aux sidérurgies française et britannique.

#### Composition chimique .

Analyse moyenne résultant de 31 échantillonnages effectués à la mine sur les livraisons de Septembre et Octobre 1957 :

Fe.....	59,19 %	( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... 42,66
Mn.....	0,25	( FeO..... 9,53
SiO <sub>2</sub> .....	10,85	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	5,21	
CaO.....	3,80	
MgO .....	1,40	
P .....	0,41	
S .....	0,07	
As.....	0,007	
Pb , Cu , Zn , Ni , Co.....	néant	
TiO <sub>2</sub> .....	0,03	

SO <sub>4</sub> Ba .....	néant
O ( des sulfates ) .....	0,06
CO <sub>2</sub> .....	0,83
Perte au feu.....	0,85
Mat. organiques { .....	0,97
H <sub>2</sub> O combinée { .....	

Caractéristiques physiques .

Minéral tout venant rocheux , en morceaux de 120 mm maximum , pratiquement exempt de fines .

Densités apparentes déterminées sur les échantillons reçus :

Filon	Teneur annoncée	d ( apparente )
couche 2	52 %	3,87
Synclinal	57 %	4,04
Couche 6	60 %	4,17

C) Magnétite de Chazé- Henry -

Le gisement de magnétite de Chazé-Henry , appartient à la " Sté des Mines de Chazé-Henry " , filiale du groupe "Pont - à - Mousson " .

La mine est située dans la commune de Chazé-Henry , dans la pointe nord-ouest du département de Maine- et - Loire , à 7 km au Nord-Est de Pouancé ; elle se trouve donc peu éloigné de la mine de Segré.

Cette magnétite est en réalité un mélange de magnétite et d'hématite , contenant même un peu de carbonate de fer ; elle est en outre très siliceuse . Elle est donc moins riche et moins compacte que la magnétite de Segré ou de Diellette.

Le minéral brut titre environ 35 % Fe et doit être concassé , puis trié à l'aide de séparateurs magnétiques.

Le concassage est effectué , à l'aide de concasseurs giratoires à mailles de 70 mm. Nombre de morceaux allongés pouvant se présenter sur les mailles par leur petit côté , il peut passer dans le minéral tout venant des morceaux de plus de 70 mm ( jusqu'à 30 % parfois ) .

Comme le minéral est assez hétérogène , la séparation magnétique ne peut être bien faite que par tranches assez homogènes en grosseur , d'où la nécessité de trier au préalable le minéral brut suivant les granulométries ci-après :

0 - 5 mm ; 5 - 15 mm ; 15 - 40 mm ; 40 - 70 mm ; Plus de 70 mm.

Chaque tranche est donc traitée séparément au séparateur magnétique , mais lorsque ce triage est effectué , les lots traités sont mélangés et l'on obtient ainsi un minéral marchand tout venant , tirant environ 46 % Fe et ne contenant que 10 % environ de fines .

Théoriquement , il serait possible , le cas échéant , de retenir l'une des granulométries ci-dessus avant de procéder au mélange des minerais triés.

La capacité de l'installation de concassage et de triage est de 150 T/heure de minéral marchand.

La production actuelle de la mine est de 500.000 T/an de minéral brut , ce qui correspond à 250.000 T/an de minéral marchand ; mais ce tonnage pourrait être augmenté , s'il y avait lieu.

#### DECHETS FERREUX .

La nécessité de réaliser un approvisionnement rapide de matériaux propres à augmenter fortement la densité des bétons à base de barytine a conduit , tout naturellement , à la recherche de déchets ferreux et , plus spécialement , de riblons d'acier.

#### Spécifications exigibles .

Ce sont souvent les ferrailles courtes pelletables ou riblons qui sont utilisables en tant que granulats lourds , mais toutes les catégories de riblons ne peuvent convenir indifféremment à cet usage. Il faut , en effet , que les ferrailles incorporées au béton soient , si possible , calibrées et exemptes de vides.

Les dimensions maxima ne doivent pas dépasser 50 mm, ni avoir des formes trop allongées ou trop aplaties .

Les agrégats ne doivent pas être creux tels que bouts de tubes ou écrous. En outre, les lots de déchets répondant aux spécifications ci-dessus doivent être :

- aussi peu gras que possible.
- ne pas être trop fortement rouillés ou calaminés.
- ne pas contenir une trop forte proportion de poussières.

#### Types de déchets utilisables .

Les différentes variétés de déchets susceptibles de satisfaire les conditions ci-dessus sont les suivantes :

##### A - Débouchures d'acier -

- 1 - Pépins et cornues d'écrous
- 2 - Débouchures et ferrures , goussets et ferronneries ( isolateurs notamment )

- 3 - Débouchures de crapauds et matériel de chemin de fer
- 4 - Pastilles et débouchures diverses provenant de fabrication de profils perforés , tôles perforées et rondelles épaisses.

**B - Autres chutes de fabrication.**

- 5 - Chutes courtes ( bouts de tirefonds , par exemple
- 6 - Ebarbures de chaines ( oxyde de soudage )
- 7 - Mitrains ( déchets de clouterie )
- 8 - Tournures courtes d'acier et tournures de fonte .
- 9 - Battitures de fer , poudre ou meulures d'acier.

**C - Autres déchets.**

- 10 - Cylpebs et boulets de broyeurs usagés .

**Prospection.**

Les sources de production les plus intéressantes sont donc les boulonneries et toutes les usines susceptibles de produire des débouchures types 2, 3 , 4, ainsi que les chutes courtes type 5 .

Les boulonneries sont , pour la plupart , concentrées dans les régions suivantes :

- Département du Nord ( région de Maubeuge en particulier )
- Département des Ardennes ( région de Mézières-Charleville )
- Région du Centre- Loire
- Région de l'est.

Les productions du Centre et de l'Est présentent peu de possibilités d'une part, en raison du genre de fabrication ( boulonneries de précision - peu de déchets ) , d'autre part en raison de la proximité d'aciéries consommant régulièrement des riblons.

Ce sont donc les départements du Nord et des Ardennes qui doivent être considérés comme les meilleures sources d'approvisionnement possibles.

De nombreuses firmes , souvent de faible importance, fabriquent des quantités importantes de boulonnerie courante comportant une forte proportion de déchets de nature assez régulière dans chaque usine.

Toutefois , la production de chaque usine , prise isolément , est souvent assez faible et surtout , très irrégulière , variant constamment suivant la demande en boulonnerie.

Les autres usines produisant des débouchures d'acier sont , en général , réparties dans le Nord et la région parisienne , l'Est et la Sarre , parfois le Centre.

**Difficultés d'approvisionnement .**

Les principales difficultés rencontrées dans la plupart des usines sont , parfois une

production insuffisante de la qualité recherchée mais surtout une absence délibérée de triage.

Les aciéries qui achètent des ferrailles pour l'alimentation des fours électriques exigent bien des riblons , c'est-à-dire des ferrailles pelletables , relativement courtes et massives . Elles peuvent être difficiles sur la qualité de l'acier , mais elles ne le sont pas sur la forme et les dimensions , des plaquettes ou des barres jusqu'à 30 ou 40 cm. de longueur ne les gênant pas.

Aussi les fournisseurs ne sont-ils pas habitués à séparer leurs différents lots de déchets , d'où l'impossibilité de les acheter tels quels en tant que granulats lourds.

Cependant , en dehors des aciéries , nous nous heurtons à une autre concurrence , celle des achats pour lestage d'appareils de levage et équilibrage de navires , utilisations dans lesquelles la densité et , par conséquent , les dimensions de riblons sont également primordiales.

Or , rares sont les usines qui comprennent l'intérêt d'une séparation qui , au surplus ne devrait pas poser de problème difficile , hormis toutefois un manque de place ; en général, chaque machine assure , au moins pendant une période donnée , une fabrication bien déterminée et le principal obstacle à vaincre serait uniquement celui de la routine du manoeuvre chargé du ramassage et du stockage des déchets .

Quoi qu'il en soit , la nécessité du triage est trop souvent invoquée de la part des usines productrices : soit pour justifier une majoration de l'ordre de 2 à 3 frs par kg de ferraille , soit pour donner la préférence aux acheteurs de riblons tout venant pour les aciéries.

Un dernier élément , enfin, joue à l'encontre de l'approvisionnement qui nous intéresse . La plupart du temps , les usines sont visitées à intervalles réguliers par des ramasseurs locaux qui enlèvent , au fur et à mesure de la production , toutes les catégories de ferrailles sans trop de discrimination ; ces derniers paient comptant et se chargent en général eux-mêmes de la manutention et de la mise sur camions ou wagons , ce qui simplifie à l'extrême la tâche du vendeur. En définitive alors , seule une amélioration du prix de vente peut inciter l'usine à se plier aux exigences des acheteurs de granulats lourds.

Les négociants en ferrailles , surtout s'ils disposent de parcs de stockage , peuvent constituer une source d'approvisionnement non négligeable.

Mais , à moins que ces négociants soient assurés d'un débouché parfaitement régulier et suffisamment rémunérateur, pour les mêmes raisons que les usines et pour maintenir une rotation suffisamment rapide de leurs stocks , leur activité est , en premier lieu , essentiellement orientée vers l'approvisionnement des aciéries.

### III - ETUDE GENERALE DES BETONS DE PROTECTION.

- Les ciments
- Les mortiers
- Etude des bétons
- Préparation , malaxage , mise en place et contrôle.

- ETUDE GENERALE DES BETONS DE PROTECTION -

I - Introduction. -

Les bétons spéciaux rentrant dans l'élaboration des protections biologiques des ouvrages nucléaires ne sont , en général , différents des bétons classiques que par leur densité plus élevée ou par leur composition spéciale lorsqu'ils sont destinés à ralentir les neutrons.

De ce fait , la très grande expérience acquise avec les bétons ordinaires peut être mise à profit dans l'étude des bétons lourds , en remarquant néanmoins que le prix du ciment est devenu insignifiant devant le prix des agrégats.

Il est donc fait appel aux toutes dernières techniques relatives aux bétons hydrauliques pour réaliser les études sur la composition , le malaxage et la mise en place des bétons de hautes densités.

Nous examinerons suivant l'ordre chronologique des opérations nécessaires à l'étude du béton classique , les divers procédés permettant d'obtenir des bétons de protection répondant aux exigences des physiciens.

Précisons , avant de commencer toute étude qu'il est indispensable de connaître la destination du béton de protection et les moyens dont dispose l'entreprise afin que les résultats obtenus en laboratoire soient applicables au chantier.

2 - Les ciments - ( 27 ).

Le choix du liant est principalement conditionné par les trois facteurs suivants :

- 1 )- Compatibilité avec les agrégats lourds ou spéciaux.
- 2 ) -Quantité d'eau nécessaire à l'hydratation.
- 3 )- Minimum de retrait.

Les essais ont porté sur 5 sortes de liants hydrauliques, soit :

- Les ciments portland artificiel 250/315 NF P 15 302.
- Les ciments pouzzolaniques métallurgiques CPMF N° 2 250/375 ( non normalisés).
- Les ciments sursulfatés CSS 250/315 NF P 15 313.
- Les chaux hydrauliques XEH 30/60 NF P 15 310.
- Les ciments alumineux fondus ( non normalisés ).

La figure n° 1 permet de voir que les ciments alumineux s'hydrate mieux que les autres liants . De même la figure II montre que le retrait de ces mêmes ciments sont moins importants.

Les éprouvettes ont été conservées 7 jours à l'air à 100 % d'humidité relative et à 18°C, puis soumises à un atmosphère à 50 ° d'humidité relative et à une température de l'ordre de 40° C.

L'utilisation du ciment alumineux dans la construction des protections pourrait être envisagée si son emploi ne nécessitait pas un certain nombre de précautions . Ces considérations ajoutées à la routine des entreprises , nous ont conduit à adopter le ciment Portland artificiel 250/315, convenant très bien pour l'exécution des grosses masses de protection grâce à son retrait et à sa chaleur d'hydratation faible.(28).

### 3 - Les mortiers .-

La qualité du mortier est fonction de la compacité , du retrait et des résistances mécaniques , eux-mêmes dépendants de facteurs sur lesquels il faut agir pour modifier les propriétés du mortier.

- pour la compacité : la granulométrie du sable  
le dosage en ciment  
le dosage en eau
- pour le retrait : le dosage et la finesse du ciment  
le % de fines du sable  
le dosage en eau
- pour les résistances : le dosage en ciment  
la compacité  
l'homogénéité  
l'adhérence liant-agrégat.

Nous n'examinerons pas ici tous ces facteurs que les lecteurs trouveront développés dans tous les bons ouvrages modernes se rapportant aux bétons hydrauliques ( 26 - 30 )

Néanmoins , nous insistons sur le soin très particulier qui doit être apporté à l'analyse du sable. Sa granulométrie , et plus particulièrement celle des fines conditionne les caractéristiques du mortier. Si les fines du sable sont en excès , les grains de ciment ne peuvent les enrober en totalité.

Les sables entrant dans la confection des bétons à haute densité étant pour la plupart des agrégats qui proviennent du concassage ou broyage de roches ou de minerais contiennent souvent un pourcentage important de fines . Ces sables doivent être lavés ou dépoussiérés.

Leur granulométrie doit se rapprocher autant que possible des spécifications suivantes:

- 1 ) Moins de 5 % de fillers
- 2 ) 10 à 30 % de grains inférieurs à 1 mm
- 3 ) Moins de 75 % de grains inférieurs à 1 mm
- 4 ) Plus de 60 % de grains supérieurs à 2 mm
- 5 ) Plus de 95 % de grains inférieurs à 5 mm

Enfin , en ce qui concerne l'eau de gachage , elle doit être pure et en quantité juste suffisante pour assurer le mouillage de sable et l'hydratation du ciment.

Cependant pour accroître l'efficacité de certains bétons de protection de Piles , on s'efforcera d'augmenter la quantité d'eau retenue par le mortier. Différents procédés peuvent être utilisés:

- 1 ) Augmentation du dosage en ciment;.

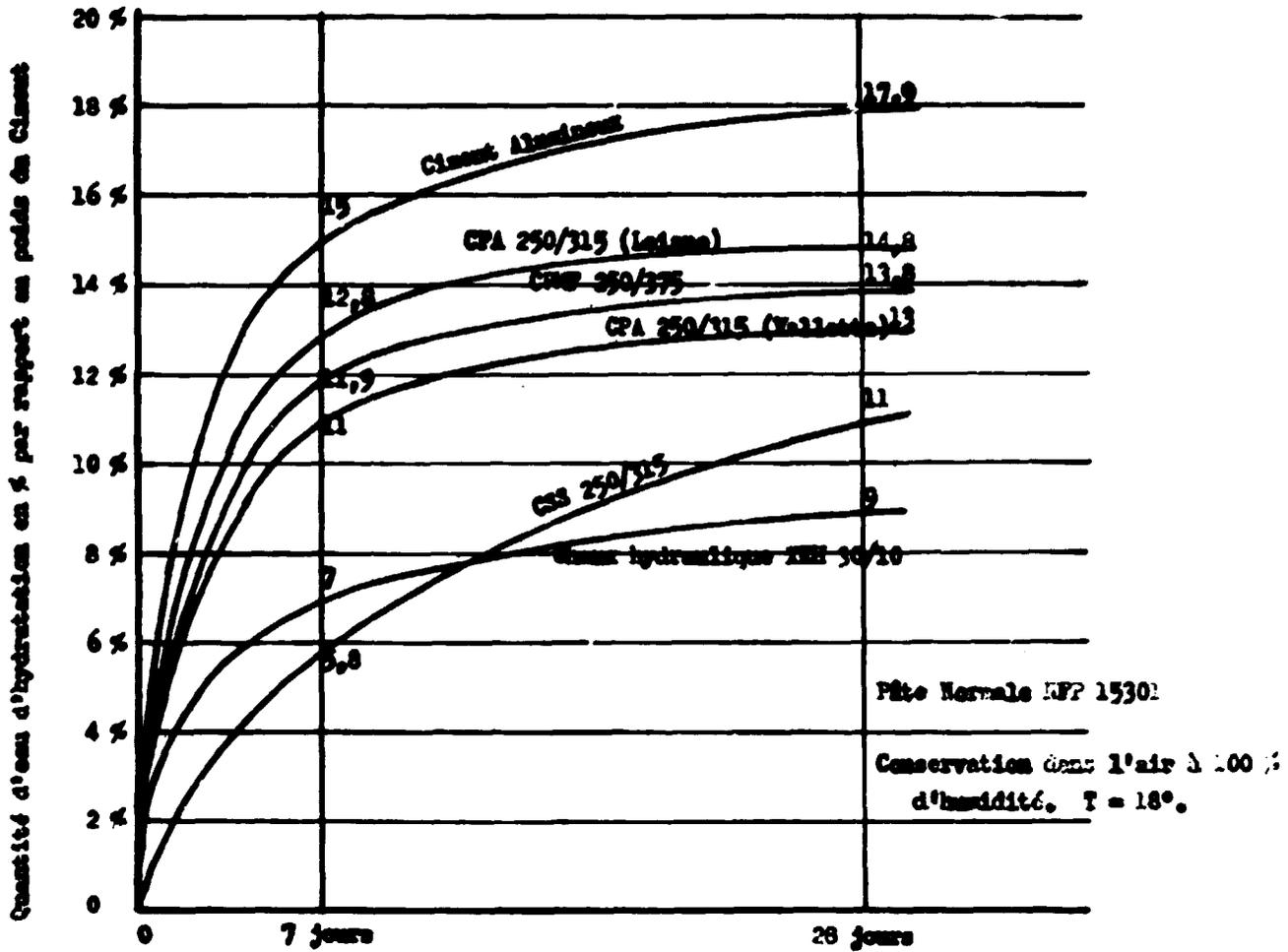


Fig. 1 - L'EAU NECESSAIRE A L'HYDRATATION DES CIMENTS.

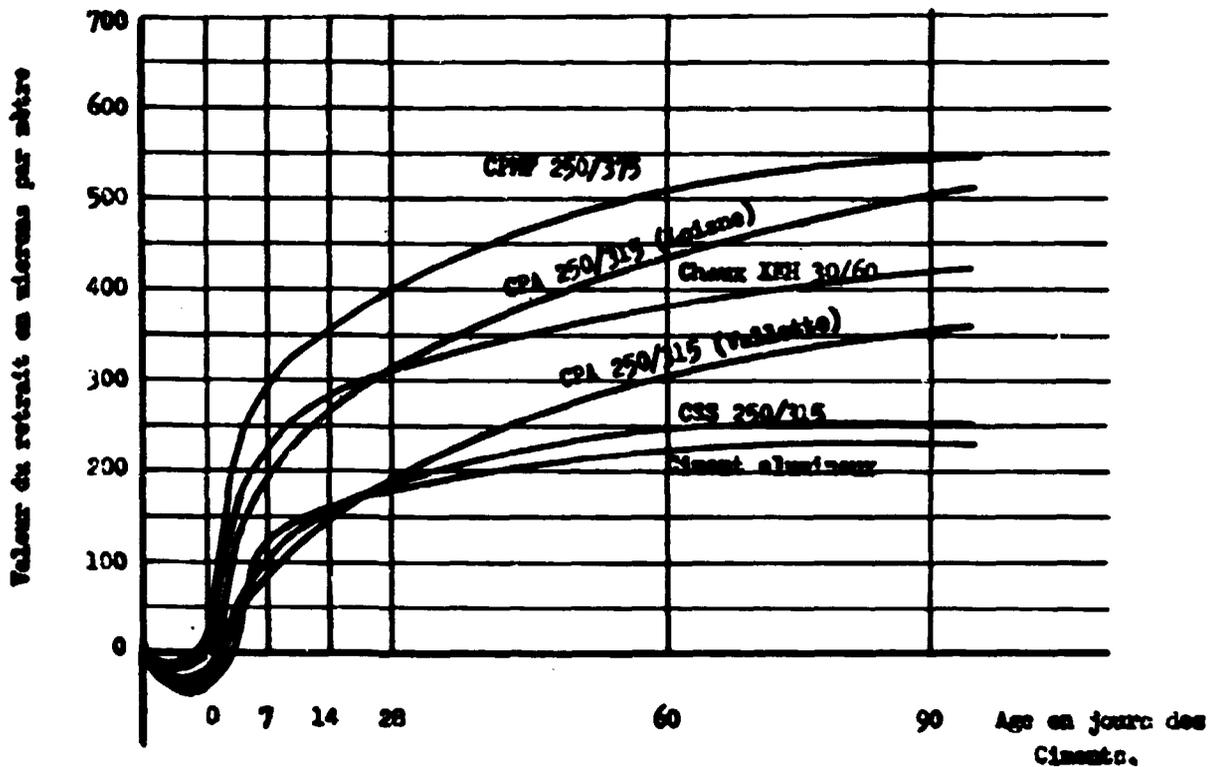


Fig. 2 - COURBES DE RETRAITS DES CIMENTS.

- 2 ) En incorporant des sables tels que la limonite contenant de l'eau cristallisée .
- 3 ) En utilisant des " curing compounds " .
- 4 ) Par l'emploi de ciments spéciaux tel que le ciment d'oxychlorure de magnésium . ( 54 )

Pour des températures supérieures à 150 ° C , l'eau d'hydratation des ciments et l'eau cristallisée des agrégats s'évaporent .

Une amélioration de ces mortiers a été obtenus en Amérique soit en incorporant des matériaux poreux , tels que la " haydite " soit par injection d'eau dans le béton. ( 31 )

#### Essais physiques des mortiers.

Les essais ont porté sur les résistances à la compression et à la traction d'éprouvettes de mortier dont les compositions sont indiquées sur le tableau n° 1 . Parallèlement , des mesures de retrait ont été relevées. Une première série d'éprouvettes a été conservée dans l'air à 18°C avec une hygrométrie relative de 50% . Une deuxième série d'éprouvettes a été conservée dans l'eau à 18°C.

On constate que les résistances du mortier de barytine sont inférieures à celles du mortier de sable de rivière ( friabilité de l'agrégat ). Par contre , les caractéristiques mécaniques des autres mortiers sont supérieures à celles des mortiers ordinaires.

#### Action du plastifiant sur le retrait :

Des essais ont été effectués sur du mortier de barytine avec incorporation de plastocrète de la Société Sika , 164, rue du Faubourg Saint Honoré , PARIS 8 ème. Le plastocrète est un plastifiant entraîneur d'air qui confère au béton une grande maniabilité et réduit le dosage en eau.

Le but était de connaître l'action du plastocrète sur le retrait.

Trois séries de 3 éprouvettes ( témoins ) sans produit d'addition , avec 0,65 % de plastocrète et 1,30 % de plastocrète ( par rapport au poids du ciment ) ont été faites avec de l'agrégat normal (sable de Leucate et de Fontainebleau ). Trois autres séries semblables ont été exécutées avec l'agrégat de barytine 0/2 mm de même granulométrie que l'agrégat normal précédent.

Les retraits et gonflements sont donnés dans le tableau n° 2 . On voit que le retrait est comparable pour les 6 séries .

On peut conclure que l'agrégat de barytine et le plastifiant ne modifient pas le retrait aux premiers âges .

Le plastocrète semble augmenter légèrement le gonflement.

#### 4 - Etude des bétons .

Cette étude comprend deux parties :

PROPRIETES PHYSIQUES DES MORTIERS LOURDS

Agrégats	Sable rivière	Barytine	Itabira	Diellette	Fonte	Magnétite	Ferrophosphore
Ciment CPA Kg	750	600	500	750	550	600	700
Sable Kg	1350	2400	2650	1950	4550	2310	2800
Eau	260	220	300	300	200	250	320
E/C	0,34	0,36	0,60	0,40	0,36	0,41	0,45
Densité	2,2	3,10	3,3	2,80	5,20	3,05	3,6
Retrait air 50% à 28 j. en $\mu/m$	- 560	-620	- 640	- 529	- 400	-1038	-1150
Gonflement eau 18° à 28 j. ep $\mu/m$	+ 94	+150		+ 150	+ 118	+ 352	+ 300
Résist. comp. à 7 j.	399	337	251	441	410		
à 28 j.	427	360	307	575	605		
Résist. traction à 7 j.	39,8	32	24,4	44	37,4		
à 28 j.	39,3	33,1	33,3	53	49	52	
Résist. comp. à 7 j.	423	297	488	413	456		466
à 28 j.	415	373	336	593	565		620
Résist. traction à 7 j.	39,5	31,5	34,5	49	36		35
à 28 j.	40,7	34,7	35	50	48	62	45

Tableau n° 1.-

- 1 ) Etude des facteurs internes qui influent sur les caractéristiques du béton.
- 2 ) Etude des facteurs de préparation , malaxage et mise en place ainsi que du contrôle

des bétons .

- a ) Etude des facteurs internes :

Les caractéristiques physiques essentielles demandées à un béton lourd de protection sont au nombre de 4, soit :

- posséder une excellente compacité
- être homogène
- être maniable
- avoir un minimum de retrait

Ces qualités ne sont d'ailleurs pas indépendantes.

La formule de résistance donnée par Ferret pour les mortiers et applicable aux bétons  $R = K \left[ \frac{c}{c+e+v} \right]^2$  peut s'écrire  $R = K \left[ \frac{c}{c+e} \right]^2$  si l'on néglige le vide (négligeable dans les bétons de protection). Si l'on appelle  $\omega$  la compacité du mélange sec et  $a$  le volume absolu des agrégats , on a :

$$c + a + e = I \qquad \omega = a + c$$

La formule de Ferret peut se mettre sous les relations suivantes :

$$R = K \left[ \frac{c}{I + c - \omega} \right]^2 \qquad (1)$$

$$\text{ou } R = K \left[ \frac{I}{I + \frac{e}{c}} \right]^2 \qquad (2)$$

La première relation montre que la résistance croît avec la compacité si on laisse fixe  $c$ . La deuxième relation montre que si l'on diminue la proportion de ciment et dans la même mesure l'eau, la résistance ne diminue pas.

La qualité d'un béton étant fonction de la compacité , on pourrait croire que la densité est également une qualité . Ce n'est pas toujours exact. En effet , si nous reprenons dans la formule de Ferret le rapport  $\frac{c}{c+e}$  et que nous remplaçons  $c$  par  $C$  poids du ciment , ce rapport peut s'écrire si  $\delta$  est la densité du béton et  $A$  le poids des agrégats  $I - \frac{e}{\delta - A}$  .

Cette relation montre :

- 1 ) que si la densité augmente uniquement par augmentation du poids des agrégats, la qualité du béton reste inchangée. Par contre , elle peut diminuer si  $A$  augmente plus vite que  $\delta$  .
- 2 ) Que si la densité diminue uniquement par diminution du poids des agrégats , la qualité du béton peut rester inchangée ou même s'améliorer . En effet , si le poids des agrégats diminue , il faudra que celui du mortier augmente pour conserver le même volume unitaire . Or , comme la densité du mortier est nettement inférieure à celle des agrégats , la densité réelle du béton diminue.

Donc, un bon béton n'est pas forcément celui qui présente le maximum de densité.

RETRAIT ET GONFLEMENT ( en  $\mu$  / m )

Eprouvettes  $\phi$  4 x 4 x 16 cm

Rapport E/C = 0,50

Agrégat	Séries	RETRAITS				GONFLEMENTS			
		2 j.	7 j.	14 j.	28 j.	2 j.	7 j.	14 j.	28 j.
Leucate Fontainebleau	Témoin	31	406	531	625	31	63	63	94
	0,65 % de plastocrète	0	313	469	563	94	125	125	125
	1,30 % de plastocrète	0	375	500	531	125	250	250	250
Barytine	Témoin	0	313	531	625	63	156	156	156
	0,65 % de plastocrète	0	313	500	625	125	219	250	250
	0,130 % de plastocrète	0	313	500	594	125	281	281	281
Barytine		Perte de poids à l'air en %				Perte de poids à l'eau en %			
	Témoin	3,41	3,63	5,91	6,15	0,40	0,70	0,80	0,93
	0,65 % de plastocrète	2,12	4,89	5,49	5,62	0,52	0,78	0,95	0,95

Tableau n° 2 .-

L'homogénéité est également un facteur important de la qualité souvent difficile à obtenir sur les chantiers mal équipés pour mettre en oeuvre le béton dense . Certes , il est difficile de réaliser des mélanges homogènes des constituants surtout quand on se trouve en présence d'agrégats de densités différentes . Si les constituants du mortier restent presque toujours homogènes , il n'en est pas de même pour les gros agrégats , d'où la nécessité des multiples précautions pour éviter la ségrégation.

Certains auteurs caractérisent le facteur d'homogénéité par le rapport mortier / agrégats , rapport qui doit présenter une valeur minima déterminée pour que la compacité du béton reste bonne. ( fig 3 ).

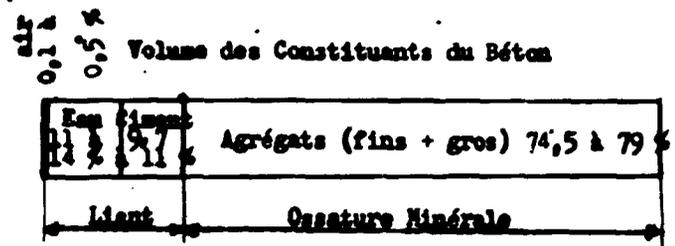
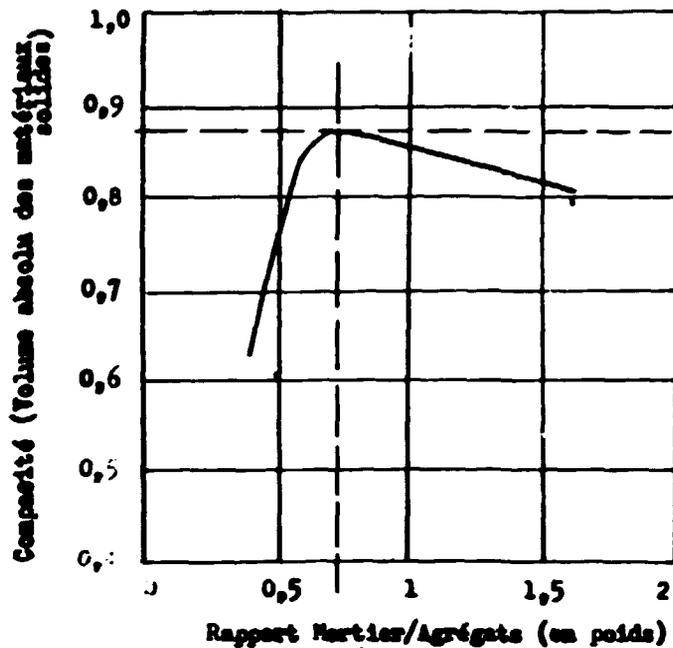


Fig. 3 - Variation de la Compacité en fonction du rapport Mortier/Agrégats

Si l'on trace la courbe de variation de la compacité en fonction du rapport mortier/agrégats des bétons lourds que nous avons étudiés , nous arrivons aux mêmes conclusions et à une courbe équivalente à celle obtenue par le laboratoire Central des Ponts et Chaussées ( pour les bétons à granulométrie continue ) à savoir que la compacité croit très rapidement pour ne décroître que très lentement . Cette courbe montre qu'il est encore plus dangereux que dans le béton classique, de confectionner un béton correspondants aux dosages situés à gauche du point maximum de la compacité . Il vaut mieux augmenter les proportions de mortier au détriment de la compacité.

Un contrôle granulométrique sérieux et constant , surtout des sables est indispensable pour éviter des déboires dans l'homogénéité et la compacité du béton. Il faut établir pour chaque classe un fuseau granulométrique permettant de fixer des variations possibles sans négliger les modifications dues à la friabilité de certains agrégats ( par exemple , la barytine ). Une analyse granulométrique doit être faite pour chaque arrivage d'agrégats sur chantier.

L'étude de la composition du béton est en général faite d'après les méthodes récentes de Vallette et de Faury . La méthode Vallette purement expérimentale convient bien pour les bétons lourds avec incorporation d'agrégats métalliques . Elle donne une granulométrie discontinue . De grandes précautions sont à prendre lors de la mise en oeuvre du béton à cause de sa tendance à la ségrégation.

D'application pratique , elle consiste en partant d'un volume maximum de gros agrégats à introduire dans le moule un volume suffisant de mortier pour éliminer les vides compris entre les agrégats . Monsieur Lezy , Ingénieur au Laboratoire des Ponts et Chaussées a perfectionné cette méthode qui par approximations successives donne un béton à grande compacité avec un minimum d'eau. ( 29 ).

La méthode de Faury qui tient compte de l'effet de paroi , de la technique moderne de mise en place , du ferrailage , est souvent utilisée pour l'étude de la composition des bétons de protection.

Elle donne une granulométrie continue , et convient très bien pour les agrégats de barytine , de magnétite , ilménite , etc... car la densité spécifique des gros agrégats est en général inférieure aux sables et aux gravillons ( présence de stérils à l'intérieur des gros agrégats ). La théorie de Faury , clairement exposée par l'auteur dans son ouvrage " Le Béton " ne sera pas développée dans cet exposé. Néanmoins, certaines valeurs de coefficient indiquées par Faury et liées aux moyens de mise en oeuvre ne sont plus valables. ( 33 ).

La théorie de M. Faury est de considérer un béton comme composé de deux constituants, l'un allant de 0 à  $\frac{D}{2}$  et l'autre de  $\frac{D}{2}$  à D . Ces 2 constituants forment une courbe appelée courbe de référence qui est tracée sur un graphique dont l'axe des abscisses est gradué proportionnellement à  $\sqrt[5]{d}$ , d étant le diamètre des agrégats, et l'ordonnée proportionnellement au volume absolu des grains.

La détermination de l'ordonnée du point de brisure V située sur l'abscisse du point D/2 s'obtient par la relation  $\sqrt[5]{\frac{D}{2}} = A + 17 \sqrt[5]{D}$  ; A étant un coefficient numérique qui dépend de la nature des matériaux utilisés et des moyens de mise en oeuvre . De même , pour rechercher l'indice des vides (volume total de l'eau de prise et de l'air inclus dans le volume unité du béton) , M. Faury utilise une relation  $I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}}$  ou K est un coefficient numérique qui dépend de la consistance du béton, de la puissance du serrage et de la nature des agrégats. Les valeurs des coefficients K et A liées aux moyens de mise en oeuvre ont fait l'objet de récentes études pour en déterminer les nouvelles valeurs.

Les tableaux ci-dessous indiquent ces nouvelles valeurs pour des agrégats concassés ( les agrégats pour bétons lourds sont toujours concassés ) déterminées par le laboratoire des Ponts et Chaussées . A noter que ces coefficients sont déjà périmés car la mise en place des bétons lourds fait usage de pervibrateurs encore plus puissants que ceux indiqués dans le tableau . ( 32 ).

VALEURS DES COEFFICIENTS K

Moyens de mise en place du béton	Coefficient de Faury	Nouvelles valeurs
Mise en place par piquage	0,430 - 0,460 et au-dessus	0,350 et au-dessus
Vibrations moyennes		
Table vibrante 50 c/s	0,400 - 0,430	0,300 - 0,335
Pervibrateur 200 c/s		0,305 - 0,315
Vibrations poussées		
Table vibrante 50 c/s	0,350 - 0,370	0,265 - 0,295
Pervibrateur 200 c/s		0,290 - 0,305
Vibrations puissantes		
Table vibrante 100 c/s	0,350 et au-dessous	0,255 - 0,295
Vibrateur de coffrage 200c/s		0,270 - 0,295 et au-dessous

Tableau n° 3

VALEURS DES COEFFICIENTS A

Moyens de mise en place du béton	Coefficient de Faury	Nouvelles valeurs
Vibrations moyennes	34 - 36	25 - 26
Table vibrante 50 c/s ( amplitude 0,3 )		
Pervibrateur 200 c/s a=0,3		25 - 26
Vibrations poussées		
Table vibrante 50 c/s a =0,6	28 - 30	20 - 21
Pervibrateur 200 c/s a = 0,3		20
Vibrations puissantes		
Table vibrante 100 c/s a = 0,8	26 - 28	16 - 19
Vibrateur de coffrage 200 c/s a = 0,3		21 - 22

Tableau n° 4

La maniabilité du béton ou plus précisément l'ouvrabilité est un problème technique étudié en laboratoire mais applicable au chantier. Il importe de connaître parfaitement les moyens de mise en place utilisés sur le chantier .

Un fois la granulométrie fixée , il est essentiel que le mélange des constituants du béton ait des qualités nécessaires pour une bonne mise en place et une bonne stabilité , c'est à dire qu'il ne doit pas être altéré par des erreurs de dosage ou des variations d'humidité des agrégats ou autres contingences ( le manque de stabilité entraine souvent la ségrégation ).

Nous avons vu que les propriétés physiques du béton sont fonction de l'étude de ses constituants que sont le ciment , les agrégats , l'eau , les adjuvants.

Regardons quelles peuvent être maintenant les influences des variations de ces paramètres sur la maniabilité .

Le ciment : Le rapport C/E n'a pas d'action sensible sur la maniabilité. Quand C + E croit avec un C/E constant , la maniabilité croit mais les résistances décroissent ; la proportion de liant C + E est le principal facteur de la maniabilité. La finesse du ciment peut améliorer la maniabilité mais favorise le retrait.

Les agrégats : La forme des agrégats , leur état de surface influent sur la maniabilité surtout avec des concassés . Il est indispensable d'avoir un bon indice volumétrique des graviers.

L'addition de fines permet d'accroître la maniabilité sans augmenter C et E . Mais là aussi , cette augmentation de fines a des conséquences néfastes sur le retrait et les résistances . Le sable a une influence marquée sur la maniabilité mais on a intérêt à le réduire pour avoir un E + C minimum. Comme nous l'avons dit , il faut être très prudent dans le rapport mortier/agrégats pour ne pas créer une hétérogénéité du mélange.

- . PROPRIETES PHYSIQUES DES BETONS LOURDS . -

Type béton	ordinaire	barytine	barytine + Fe	Itabira	Ilménite	ferrophosphore	Diellette
Ciment CPA kg	300	300	350	350	300	350	300
Petits agrégats Kg	650	1340	2080	1350	1750	2050	900
Gros agrégats Kg	1350	1900	2400	2350	1750	2400	2000
c/E	2,1	2,5	3,1	2,3	2,5	2,1	2
Eau	140	120	110	150	120	160	150
Densité	2,30	3,55	4,80	4,10	3,89	4,8	3,4
Retrait air 50% à 7 j. $\mu$ /m	60	100	71	90	232		187
à 28 j.	150	230	214	210	340		363
Gonflement eau 18° à 7 j. $\mu$ /m	38	65		18			44
à 28 j.	71	120		34			44
Résistance compression kg/cm <sup>2</sup> 7 j.	240	230	224	325		278	220
28 j.	390	340	330	470		384	310
Résistance flexion kg/cm <sup>2</sup> 7 j.		38	30	80	35	40	
28 j.	58	50	45	54	50	50	70

Tableau n° 5 .-

COMPOSITIONS CHIMIQUES DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES BETONS DE PROTECTION

( Bétons dosés à 350 Kg de ciment CPA )

Eléments	Ciment CPA	Béton ordinaire	Barytine	Barytine + Fer	Ilménite	Diellette	Itabira	Ferro-phosphore	Magnétite
Densité appar. théorique .	1	2,3	3,55	5	3,80	3,48	4,10	4,80	3,50
SiO <sup>2</sup>	22,2	79	7,43	3,70	5	13,90	1,93	27,15	9,30
CaO	65,3	9,1	6	2,80	5,4	8,80	3,94	4	7,96
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	3,1	3,47	0,74	0,30	2,6	6,20	1,12	0,38	4,41
Fe <sup>2</sup> Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	2,2	0,60	0,28	57,50	48,19	63	82,06	51,40	66,22
MgO	1,4	0,14			2,8	0,80	0,31		0,49
S O <sup>3</sup>	0,9	2,13	1,60	0,70	0,23	0,25	0,10	0,05	0,10
MnO	traces			0,10	0,10	0,16	0,29	0,10	0,32
Cl	traces	0,16	0,10			0,14			
H <sup>2</sup> O		4,80	4,05	3,60	3,60	5,30	5,55	3,12	5,15
S O <sup>4</sup> Ba			74,65	29,30					
P								11	1,80
Ti O <sup>2</sup>					31,7				0,20
Pertes au feu	4,3	1	} 4,10	} 2,10	} 0,38	} 1,65	} 1,20	} 2,80	2
El. non dosés	0,6								

Tableau n° 6

COMPOSITIONS ELEMENTAIRES DES PRINCIPAUX BETONS DE PROTECTION

( Bétons dosés à 350 Kg de ciment CPA )

Eléments	Ciment CPA	Béton ordinaire	Barytine	Barytine + Fer	Ilménite	Diellette	Itabira	Ferro - phosphore	Magnétite
Si	10,40	37,2	3,50	1,74	2,34	6,55	0,91	13,2	1,65
Ca	46,60	6,5	4,30	2	3,86	6,40	2,81	2,85	6,65
Al	1,66	1,9	0,40	0,16	1,38	3,35	0,62	0,20	3,90
Fe	1,64	0,50	0,20	57,50	36,60	44,10	58,54	51,40	48
Mg	0,84	0,10			1,69	0,47	0,19		0,31
Mn				0,07	0,78	0,13	0,22	0,07	0,32
S	0,36	0,90	11,25	4,03	0,22	0,10	0,04	0,04	0,04
O	33,20	51,20	31,70	14,80	33,22	36,63	35,07	17,89	32,68
H		0,54	0,45	0,40	0,40	0,48	0,50	0,35	0,57
Cl	traces	0,16	0,10			0,14			
Ba			44,10	17,20					
P								11	0,78
Ti					19,1				0,12
Pertes au feu	4,30	1	}	}	}	}	}	}	2,05
Eléments non dosés	1								

Tableau n° 7 -

L'influence des gravillons est très importante. Leur abondance donne un béton raide. Leur suppression comme dans la granulométrie discontinue favorise la Ségrégation. Enfin, les cailloux augmentent la difficulté de la mise en place et la ségrégation.

L'eau : Son rôle est important. En pratique, la quantité d'eau est toujours déterminée par des tests. Il est facile de constater que l'addition d'eau croissante dans un mélange sec de ciment et d'agré-gats donne une courbe représentative des valeurs de la densité apparente du mélange identique à celle de la courbe de foisonnement des sables. La quantité d'eau nécessaire pour obtenir la densité maximum et la valeur de cette densité ne sont pas constantes, mais varient avec les moyens de mise en oeuvre.

Les adjuvants : Les plastifiants, les entraîneurs d'air améliorent sérieusement la maniabilité en réduisant la quantité d'eau.

On constate que les variations des constituants du béton, si elles améliorent la maniabilité en défavorisent les propriétés physiques.

IL a donc fallu s'orienter vers une autre solution pour améliorer la maniabilité tout en conservant les propriétés physiques.

Cette solution est apportée par l'emploi de pervibrateurs à haute fréquence. La pervibration nécessite une étude spéciale de l'analyse granulométrique et de la composition du béton mais favorise énormément la mise en place, diminue la quantité d'eau de gachage, augmente la compacité du béton et l'adhérence sur les armatures.

Parmi tous les pervibrateurs que nous avons utilisés, un seul répond à nos besoins ; il s'agit du pervibrateur S. T. V. de Vibratechnique. Les pervibrateurs appelés " Vibrair " ont l'avantage incontesté de tourner à plus de 20.000 fréquences par minute à l'air libre et de ne présenter dans le béton qu'une chute de vitesse minimum de l'ordre de 10 à 25 % suivant les caractéristiques des bétons à haute densité. Les vibreurs pneumatiques concurrents ne dépassent pas 12.000 fréquences.

Le " Vibrair " est une turbine vibrante ne possédant aucun roulement, l'élément vibrant est en même temps moteur, constitué uniquement d'un anneau dont la circonférence intérieure roule sur un axe fixe. Une palette mobile glissant perpendiculairement dans l'axe forme deux chambres et la différence de pression entre ces deux chambres sollicite un mouvement épicycloidal. ( Fig. 4 ).



Figure n° 4 - Vue en coupe du pervibrateur STV.

1 raccord Universel - 2 Poignée rotative- 3 Arrivée d'air - 4 Rotor -  
5 Echappement.

Le principe concurrent est classique , un moteur à air comprimé de système rotatif , entraîne par l'intermédiaire d'un accouplement une masse excentrée sur deux roulements . Le moteur lui-même repose sur deux roulements . Ces inconvénients sont cause de la mauvaise tenue de 4 roulements et plus particulièrement de ceux supportant le balourd et la totalité des vibrations.

Etant donné sa faible vitesse de rotation le balourd est très excentré afin de fournir une puissance raisonnable. Mais ceci crée une trop forte amplitude qui risque de provoquer une ségrégation, si la durée de vibration est un peu trop prolongée , alors que les vibreurs grâce à leur grande vitesse de rotation ont une amplitude normale et les puissances les plus élevées.

Nous avons déjà signalé les conséquences fâcheuses que pourrait avoir le retrait sur l'efficacité de la protection.

Le retrait est un phénomène complexe dépendant de plusieurs facteurs plus ou moins liés entre eux. Citons les principaux : ( 34 ).

- Caractéristiques des sables , pourcentage d'éléments fins inférieurs à 80 µ.
- Dosage de ciment.
- Nature du ciment - degré de finesse.
- Rapport pondéral C/E
- Compacité effective atteinte à la mise en place.
- Conditions de température et d'hygrométrie.
- Volume et épaisseur du béton de protection.
- Pourcentage d'acier si le béton est armé.
- Adhérence du ciment aux agrégats.
- Emploi des plastifiants et entraîneurs d'air.
- Importance des matières en suspension dans l'eau.

Les constatations faites sur les bétons lourds sont à quelques exceptions près , identiques à celles que l'on peut faire sur les bétons classiques à savoir :

- que le retrait est d'autant plus faible que le béton demeure plus longtemps dans une atmosphère humide.
- que le retrait est minimum quand on confectionne le béton avec le minimum de sable, de ciment et d'eau , soit avec un rapport pondéral pâte pure/agrégats le plus petit possible.
- que le retrait est d'autant plus élevé quand le béton durcit dans une ambiance plus sèche.
- que le retrait est d'autant plus élevé que le module de finesse du sable est bas.

Ceci étant , les procédés employés pour exécuter les bétons lourds avec minimum de retrait sont les suivants :

1 ) Comme nous l'avons signalé , surveiller l'analyse granulométrique des sables et éliminer les fillers ( difficile pour les sables provenant du concassage de minerais).

2 ) Composer le béton avec le minimum de ciment tout en conservant une bonne maniabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques.

3 ) Employer le minimum d'eau compatible avec la maniabilité et le compactage en utilisant un plastifiant .

4 ) Comme nous le verrons dans l'étude de la mise en place , maintenir humides les coffrages et le béton surtout si le rapport volume de béton/surface en contact avec l'air ambiant est petit.

5 ) Si l'épaisseur du béton de protection est très importante , prévoir dans la masse des canalisations de refroidissement .

6 ) Ne pas couler le béton quand les conditions météorologiques ne sont pas bonnes ou recourir à l'emploi de " Curing compounds " .

7 ) A chaque fois que cela sera possible , armer le béton ou exécuter au moins un ferrailage de peau afin de contrarier le retrait.

8 ) Utiliser les moyens les plus puissants pour le compactage du béton ( la revibration, très efficace pour l'élimination des microfissures n'est pas réalisable dans la technique des bétons lourds.)

Le tableau n° 5 montre que le retrait à l'air des bétons lourds est plus important que celui du béton classique . La raison principale est la difficulté d'obtenir des sables de concassage convenables : la barytine qui est un agrégat concassé lavé et trié à un retrait très peu supérieur à celui du béton ordinaire.

## II - Préparation , malaxage , mise en place et contrôle du béton frais - ( 37 ) .

a ) Les constituants : Les agrégats doivent présenter une granulométrie uniforme et constante pendant toute la durée du chantier . Un contrôle granulométrique doit être fait à chaque arrivage surtout pour le sable si l'on désire obtenir un béton homogène . La ségrégation des agrégats est réduite en compartimentant chaque classe d'agrégats . Par exemple , pour la barytine , la division en 4 classes 0/3 - 3/7 - 7/15 - 15/30 - rend minimum le danger de ségrégation et permet de corriger la composition du béton. Un drainage de l'aire de stockage des agrégats est recommandé surtout pour les sables afin que l'eau retenue ne soit pas trop élevée. (fig. 5).

Mettre également les agrégats à l'abri du grand vent.



Fig. n° 5 - Stockage des agrégats de barytine et de riblons devant le silo pondéral.

Les opérations pour préparer le mélange doivent toujours être faites par pesées et non par volumes. Un silo pondéral doit être préconisé dès que 100 m<sup>3</sup> de béton lourd sont à mettre en place. Afin de pouvoir contrôler la qualité et la quantité du ciment utilisé, celui-ci sera approvisionné sur chantier en sac et non en vrac et stocké dans un local à l'abri des intempéries et aéré. L'eau introduite dans le malaxeur doit être mesurée à l'aide d'un compteur qui indique le débit de l'eau en litre et le total consommé.

Les adjuvants, sous forme de liquides sont préférés aux adjuvants en poudre pour éviter une mauvaise répartition dans le béton. Le mélange des adjuvants à l'eau de gachage donne de bons résultats.

b) Le malaxage : L'opération du malaxage est essentielle pour l'homogénéité, la maniabilité et les propriétés physiques. Pour les bétons à très haute densité, l'équipement de malaxage doit être capable de fournir un béton de haute qualité malgré le faible pourcentage d'eau, le poids des agrégats et la faible proportion de sable.

Cette qualité est fonction de 4 facteurs : du type de bétonnière, de l'opération de chargement, du temps de malaxage et du déchargement. Il n'y a aucun doute, le malaxeur à axe vertical donne les meilleurs résultats. Sa vitesse de rotation restant faible (à cause de l'effet de la force centrifuge) le mélange intime des agrégats lourds métalliques avec des minéraux est possible et l'opération de déchargement correcte. Ce type de bétonnière est à conseiller.

Les bétonnières à axe horizontal type Faure peuvent convenir. Leur vitesse de rotation ne doit pas être trop rapide. Cette bétonnière sera choisie pour de petits travaux. Les bétonnières à axe incliné sont à proscrire. Elles ne donnent jamais un béton homogène.

Dans une bétonnière, l'introduction des agrégats doit se faire dans un ordre déterminé souvent difficile à observer. Cependant, l'ordre de chargement du Skip peut être respecté surtout si l'on opère avec un silo pondéral.

Cet ordre est le suivant :

- une partie des gros agrégats.
- le ciment.
- le sable.
- le gravillon.
- le complément des agrégats.

Le but principal de cet ordre de chargement est d'éviter que le ciment n'adhère aux parois du silo pondéral et du Skip.

Des quantités assez importantes de ciment peuvent être perdues si ce dernier n'est pas inséré dans les autres matériaux. La bétonnière en route, on introduira d'abord l'eau et seulement après les matériaux. Le temps de malaxage dépend du type et du volume de la bétonnière. Il doit être mesuré à partir du moment où toutes les opérations de chargement sont terminées. Il ne devra pas excéder 3 minutes afin d'éviter une usure ou le broyage des agrégats friables (barytine, ilménite, ferrophosphore, etc....).

Le déchargement doit se faire sans séparation des gros agrégats et du mortier. Cette séparation peut être évitée par l'emploi de plans inclinés et de goulotte comme indiqué à la figure n° 1 ( tableau n° 8).

c ) Le transport : Le transport du béton frais de la bétonnière au lieu de sa mise en place doit être exécuté sans modifier sa consistance et son homogénéité . Si le transport se fait par wagonnets , il faut éviter les chocs aux jonctions de rails.

Tout système de transport par pompe ou méthode similaire , ne semble pas pouvoir être utilisé avec le matériel disponible sur le chantier à cause de la consistance trop ferme du béton.

d ) Contrôle du béton frais : Le contrôle et la qualité du béton frais font l'objet de plusieurs opérations ;

- 1) Contrôle de la plasticité.
- 2) Contrôle de l'eau de gâchage.
- 3) Densité du béton - confection des éprouvettes.

Le cône d'Abrams ou le Slump-test est l'appareil le plus couramment utilisé sur les chantiers pour vérifier la plasticité . Les conditions d'emploi sont annexées au Cahier des Charges des Ponts et Chaussées , modifié par la Circulaire Ministérielle n° 130 du 7 août 1950 . Quoique pas entièrement satisfaisant , surtout pour les bétons secs ou liquides , on admet que l'affaissement ne doit pas être inférieur à 2 cm. Il est surtout d'une indication utile pour distinguer si le béton est sec ou plastique.

La vérification de la quantité d'eau de gâchage et de l'ouvrabilité peut être effectuée en confectionnant des éprouvettes cubiques de 20 cm d'arêtes avec les moyens de mise en place identiques à ceux utilisés pour l'ouvrage. La densité apparente des blocs et l'observation visuelle donnent une bonne indication sur la qualité du béton frais. La conservation des éprouvettes pour les essais physiques doit être réalisée dans des conditions aussi voisines que celles du béton de l'ouvrage.

e ) Mise en place : Suivant la forme des agrégats , la densité du béton , la composition la complexité de la protection , les conditions de mise en place , le procédé de bétonnage peut être différent. (38).

A nos jours , trois procédés sont rentrés dans la pratique.

- Le procédé conventionnel.
- Le procédé par damage.
- Le procédé par injection.

En général , quand les agrégats ont une granulométrie normale , que la ségrégation n'est pas à craindre et que la mise en place n'est pas rendue difficile par la géométrie de la protection , le procédé conventionnel , consistant à préparer le mélange dans une bétonnière doit être préconisé. La mise en place de ce béton doit être effectuée par pervibration énergique mais limitée. Cette méthode est certainement la plus économique et souvent la plus efficace.

Le procédé de damage utilisé surtout pour la confection des blocs de protection et pour l'emploi de gros déchets métalliques , consiste à déposer sur une couche de mortier de quelques centimètres de gros agrégats . Ceux-ci sont ensuite damés énergiquement ou s'il est possible , vibrés puis recouverts d'une

couche uniforme de mortier et ainsi de suite . Si cette méthode à l'avantage d'éviter d'introduire les gros agrégats dans la bétonnière , elle a le défaut de ne pas donner un béton homogène , et d'avoir un emploi fort limité. Le contrôle du béton est difficile et le poids définitif du bloc n'est pas un critère de qualité.

Par contre , le procédé par injection à plusieurs avantages qui viennent compléter le procédé conventionnel . Ces avantages sont les suivants :

- Eviter la ségrégation.
- Mettre en place le béton dans des régions inaccessibles .
- Permettre l'exécution de montages délicats et précis avant bétonnage , la mise en place se faisant sans vibration.
- Permettre une distribution uniforme de matériaux spéciaux ( pandermite , colémanite ) à travers la masse de la protection.
- Rendre possible l'utilisation d'agrégats friables.
- Diminuer le retrait.

Le procédé par injection appelé en Amérique Méthode Prépakt et en Europe Colcrète ou Colgrout , consiste à disposer préalablement de gros agrégats dans le coffrage laissant entre eux les interstices que l'on remplit ensuite avec un mortier spécial ( prépakt ) ou un mortier à haute turbulence ( colcrète ) (40).

Le mortier est introduit à l'aide de tuyaux et injecté aux points les plus bas des coffrages . L'injection se fait souvent sous l'eau. Les bétons obtenus ont d'excellentes densités mais de médiocres résistances mécaniques . Enfin cette méthode à aussi certains désavantages , à savoir :

- Très peu d'entreprises sont , à nos jours , familiarisées avec cette technique .
- La confection des coffrages est délicate et l'étanchéité aux joints difficile.
- Le contrôle de l'injection n'est pas aisé et le prix du béton est élevé.

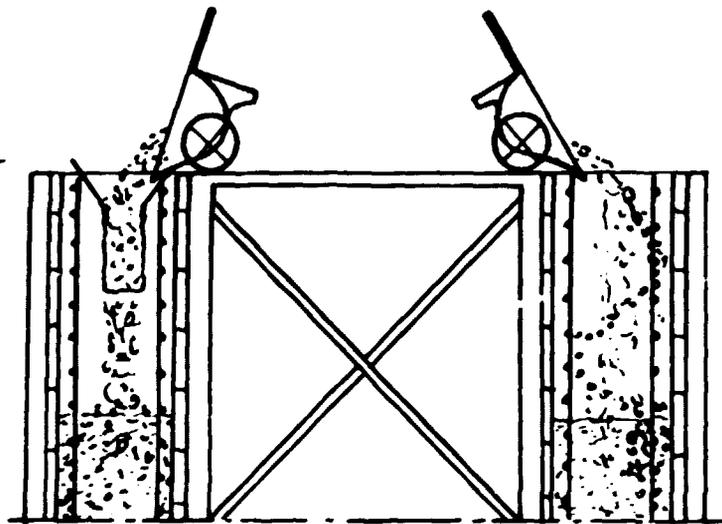
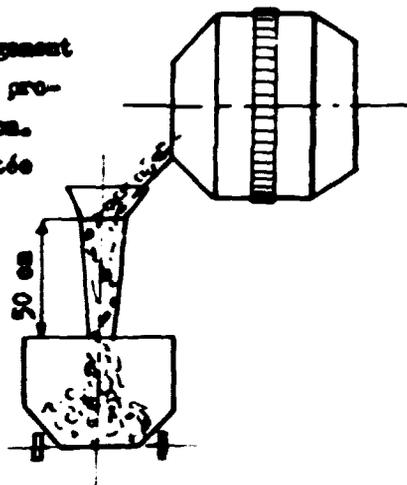
En conclusion , ce procédé est à recommander dès qu'il s'agit de mettre en oeuvre et en place des bétons à composition spéciale , dans des protections compliquées et autour d'éléments délicats et rapprochés les uns des autres.

f ) Coffrages : Les coffrages pour les bétons de protection peuvent être permanents ou démontables . Pour des bétons de protection qui n'exigent pas de grandes tolérances de construction et ne contiennent pas trop d'éléments noyés , les coffrages ordinaires composés de planchers et de contreplaqué peuvent être préconisés. Il est seulement demandé à ces coffrages de résister à la pression des bétons lourds et aux efforts importants engendrés par la pervibration. Le prix du coffrage croît en fonction du nombre d'éléments noyés dans le béton, de la densité du mélange , de la tolérance et de la complexité de la construction. Il peut arriver que l'emploi de coffrage permanent métallique soit alors rentable. Ces coffrages peuvent être préfabriqués en usine et montés sur place , mais souvent le coût de l'élaboration des coffrages métalliques peut être supérieur au prix du béton lourd. Seul l'emploi de plaques minces peut arriver à concurrencer les coffrages en bois. ( 39 ).

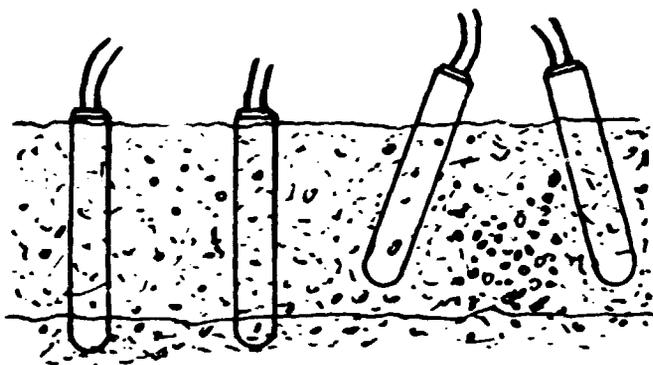
g ) Mise en place : La plus importante précaution à prendre lors des manutentions et de la mise en place du béton frais est d'éviter la séparation des gros éléments du mortier . Il est évident que des concentrations de gros agrégats sont répréhensibles . Il est nécessaire de les disperser dans le béton , sinon, ils peuvent causer de sérieuses imperfections dans la finition. Une attention particulière doit être prise au déchargement des containers ; une reprise du béton avant son introduction dans le coffrage peut redonner au béton son

homogénéité. Lorsque le béton est introduit dans les coffrages d'assez haut, l'usage de plans inclinés et de gouttières est indispensable si l'on veut éviter la destruction de l'homogénéité du béton causée par des chocs multiples des agrégats sur les éléments à noyer dans le béton ou les aciers de renforcement ( fig. 2, tableau 8 ).

**Fig. 1** - Le déchargement direct du malaxeur provoque la ségrégation. Elle peut être évitée par l'emploi de plan incliné et de gouttière.

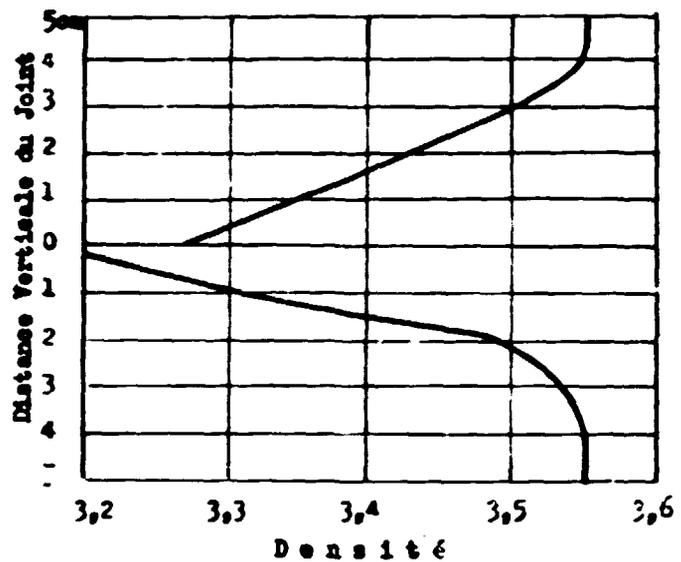


**Fig. 2** - La mise en place du béton dans les coffrages doit se faire à l'aide de conduit flexible pour éviter la séparation des éléments par chocs contre les coffrages ou par ricochets contre les armatures.

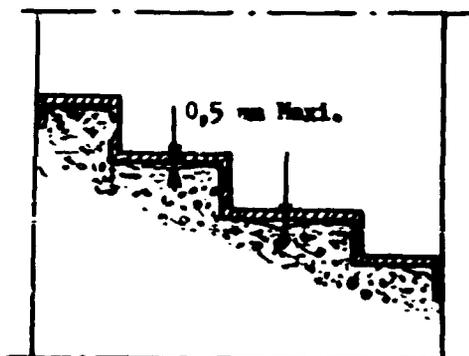


**Fig. 6** - La pénétration des penvibrateurs doit être verticale et à travers la couche supérieure et dans quelques cas de la couche inférieure.

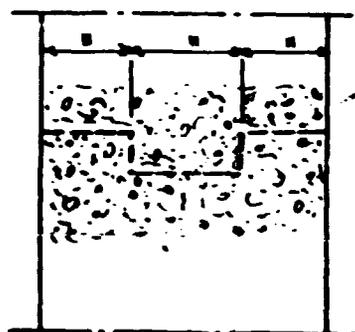
**Fig. 5** - La pénétration quelconque des penvibrateurs n'assure pas la combinaison parfaite des deux couches.



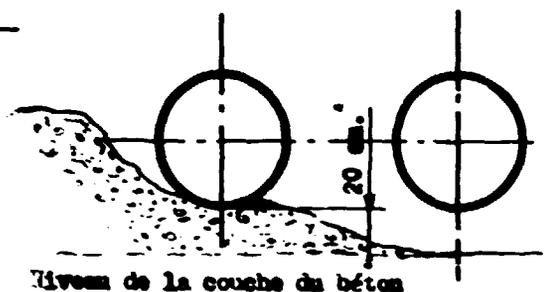
Variation de la densité due à la ségrégation, au travers d'un joint de reprise horizontal.



**Fig. 3** - Vas montrant les vides qui tendent à se produire sous des surfaces horizontales traversant le béton.



**Fig. 7** - Type de joint utilisé dans les reprises de construction des bétons de protection.



**Fig. 4** - Il est préférable de déterminer la couche de reprise sous les tubes passant à travers la protection.

A l'aide de goulottes , le béton doit être répandu par couches horizontales successives surtout quand il s'agit de l'introduire sous des surfaces planes horizontales , ou sous des canaux (fig. 3 et 4 - tableau 8 ).

h ) Vibration : La vibration est le moyen le plus efficace pour obtenir un béton compact et éviter les nids d'abeilles . La pervibration ( vibration interne ) est en général plus effective . Elle agit en diminuant les frottements internes des ( 42 ) éléments du béton qui se comporte alors , même s'il est sec comme un corps liquide plus ou moins visqueux . Certaines recommandations concernent la pervibration des bétons lourds sont à signaler :

- L'équipement pour la pervibration doit être de puissance adéquate et de haute fréquence . L'entreprise doit prévoir une quantité assez importante de pervibrateurs car il faut le dire , ces appareils n'ont pas été étudiés pour mettre en place des bétons à haute densité . Les efforts demandés sont trop considérables et l'usure est importante.

- Les pervibrateurs ne doivent être utilisés pour faire glisser latéralement le béton que sur de petites distances , autrement , le mortier tournant autour de l'aiguille se sépare des gros agrégats ( fig.5 - tableau 8 ).

Les pervibrateurs ne doivent pas être utilisés quand le béton est trop mouillé car les gros agrégats tombent au fond et le mortier vient à la surface.

- Les aiguilles doivent être introduites verticalement et retirées en de nombreux points (distants entr'eux de 30 à 50 cm ) ( fig.6 - Tableau 8 ). De courtes périodes d'introduction en général de 10 à 15 secondes sont préférables à celles qui sont profondes et prolongées.

La remontée d'une fine couche de laitance sur la surface supérieure du béton est le critère d'un béton bien constitué et l'indication que le remplissage et le compactage peuvent être considéré comme terminés. ( fig.6 ).

- L'extraction des aiguilles du béton doit s'effectuer lentement pour ne pas provoquer des trous ou des poches de laitance .

- Afin d'utiliser à fond les avantages de la pervibration , le béton doit être déposé en continu suivant des couches horizontales n'excédant pas 25 cm d'épaisseur ; Chaque couche de béton frais étant placée sur la précédente encore molle , puis à travers la couche entière et dans quelques centimètres de la couche inférieure , la pervibration doit être appliquée .

- Pour les mises en place délicates , comme sous les fenêtres d'observation des cellules , un complément de vibration donne parfois d'excellents résultats . Son utilisation réclame beaucoup de prudence.

i ) Les joints de construction :

Comme dans tout ouvrage en béton l'existence de joints de construction est nécessaire De plus , ces joints facilitent l'introduction du béton à l'intérieur des coffrages , rendent possible les interruptions de bétonnage et permettent d'abaisser la chaleur d'hydratation et l'importance du retrait.

Deux sortes de joints sont à considérer. Les joints verticaux dont le principal intérêt est d'atténuer les effets du retrait et les joints horizontaux permettant une meilleure mise en place ainsi que les reprises de bétonnage si le béton ne peut pas être coulé en une seule fois . Il ne faut pas manquer de choisir conve-

nablement les distances entre joints et d'assurer qu'aucun danger de fissuration ne se développe pendant la durée de vie de la protection , ( 43 ),

Quoique le processus de diffusion dans le joints ne soit pas bien défini, il est de règle d'exécuter les joints de construction en escalier comme l'indique la fig. 7 - tableau 8.



Fig. n° 6 - Pervibrateur en action -Remarquez la remontée de la laitance.

Avant mise en place du béton frais sur les joints de construction , les surfaces de reprises doivent au préalable subir une préparation afin d'obtenir une continuité parfaite de la protection.

Nous avons déjà signalé qu'une bonne mise en place par pervibrateur se reconnaissait à la remontée de la laitance sur la surface du béton compacté. Il subsiste , de ce fait , une faiblesse de densité comme l'indique la fig. 8 - tableau 8 et une région à grand retrait.

Pour éviter les inconvénients , il faut enlever à l'aide d'un jet à air comprimé et d'eau toute la laitance superficielle du béton. Cette opération doit se faire quand le béton est suffisamment durci pour éviter le ravinement de la surface et la formation de flaques d'eau qui laisseraient un film sur la surface du béton après évaporation.

Les surfaces de joints ainsi traitées doivent être maintenues humides ou de préférence être recouvertes d'une couche de sable saturé d'eau de 2cm d'épaisseur. Ces surfaces ne doivent jamais devenir sèches pendant l'interruption du bétonnage.

Avant de placer la nouvelle couche de béton , les surfaces des joints doivent être nettoyées vigoureusement à la brosse métallique. La nouvelle couche de béton sera confectionnée avec un excès de mortier et en diminuant la dimension de gros agrégats utilisés dans le mélange usuel.

L'emploi de barbotine ou de mortier seul doit être interdit.

Les joints verticaux seront piqués et également maintenus humides comme le montre la figure .7.

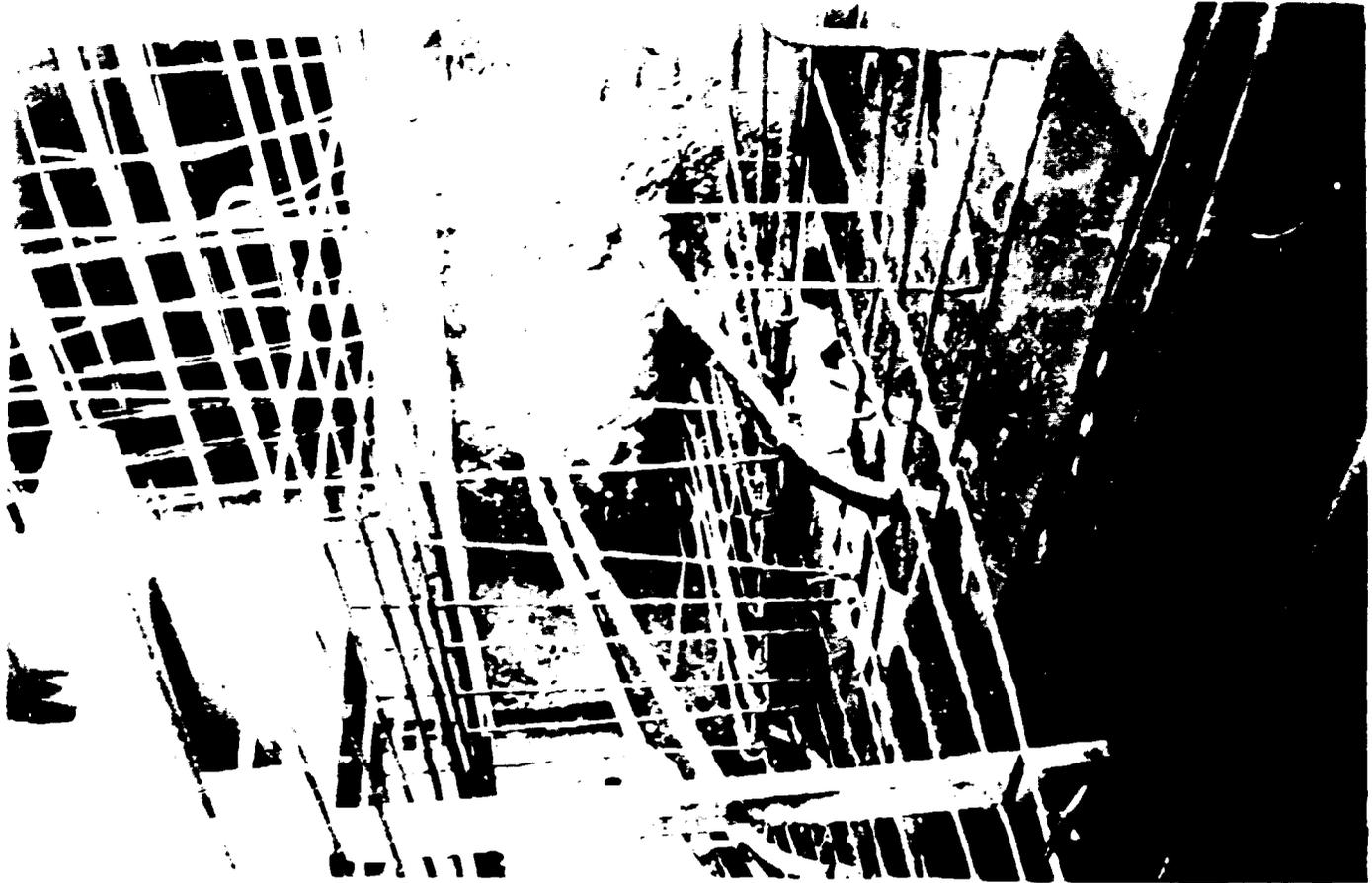


Figure n° 7 - Paroi verticale prête à recevoir le béton frais.

**IV - CARACTERISTIQUES DES BETONS DE PROTECTION .-**

- Les bétons à base de barytine.

- Les bétons à base de minerai de fer.

- Spécifications .

## BETONS A BASE DE BARYTINE.

### 1°) INTRODUCTION .-

C'est en 1954 que furent entreprises en France les premières études sur le béton à base de barytine , études nécessitées par la protection biologique de la pile  $G_4$  à Marcoule alors en construction.

Des trois producteurs de barytine , la Société des Produits Barytiques de l'Hérault , les produits Chimiques Pechiney et la Société des Mines de Garrot, celle des Produits Barytiques de l'Hérault fut choisie pour confectionner le béton lourd de  $G_1$ . En effet , la barytine produite riche en  $SO_4 Ba$  (96%) , permettait d'obtenir un béton lourd de densité égale ou supérieure à 3,6. - De plus, la mine se trouvant à proximité du Centre Nucléaire de Marcoule , elle y parvenait à un prix inférieur à celui des concurrents.

Des tests faits par le laboratoire des Ponts et Chaussées permettaient de conclure que le béton confectionné avec des agrégats de barytine se comportait de façon identique au béton ordinaire.

En 1957 , la construction d'un laboratoire à très haute activité à Saclay obligeait le Service des Travaux et Installations du C.E.A. à reprendre l'étude des bétons à haute densité. ( 45 ).

En plus de la densité , le béton lourd devait avoir de bonnes caractéristiques mécaniques et une bonne maniabilité.

Nous avons arrêté notre choix sur la barytine des Mines de Garrot à 93% de  $SO_4 Ba$ .

Par la suite , beaucoup de bétons lourds mixtes à base de barytine ont été étudiés et en particulier le béton de barytine aux incorporations de riblons. Ce béton a d'ailleurs été choisi pour réaliser l'écran biologique de l'accélérateur Saturne à Saclay.

Parmi les barytines étudiées signalons également celles de Montalembert , de Gavarnie , des Vosges , et de Chaillac dans l'Indre, etc....

### 2°) Le béton de barytine .-

A l'exception de leur poids élevé et de leurs caractéristiques physiques , les agrégats de barytine sont très similaires à ceux utilisés pour le béton normal. On constate que les granulométries (fig. 2, page 65 ) et les proportions de mélange permettant d'obtenir de bons bétons lourds sont identiques à quelques exceptions près de celles employées pour le béton classique ( 44 et 47 ).

#### a ) Les agrégats. .-

La sélection des agrégats de barytine est principalement basée sur la valeur de la densité spécifique , la pureté et la résistance mécanique.

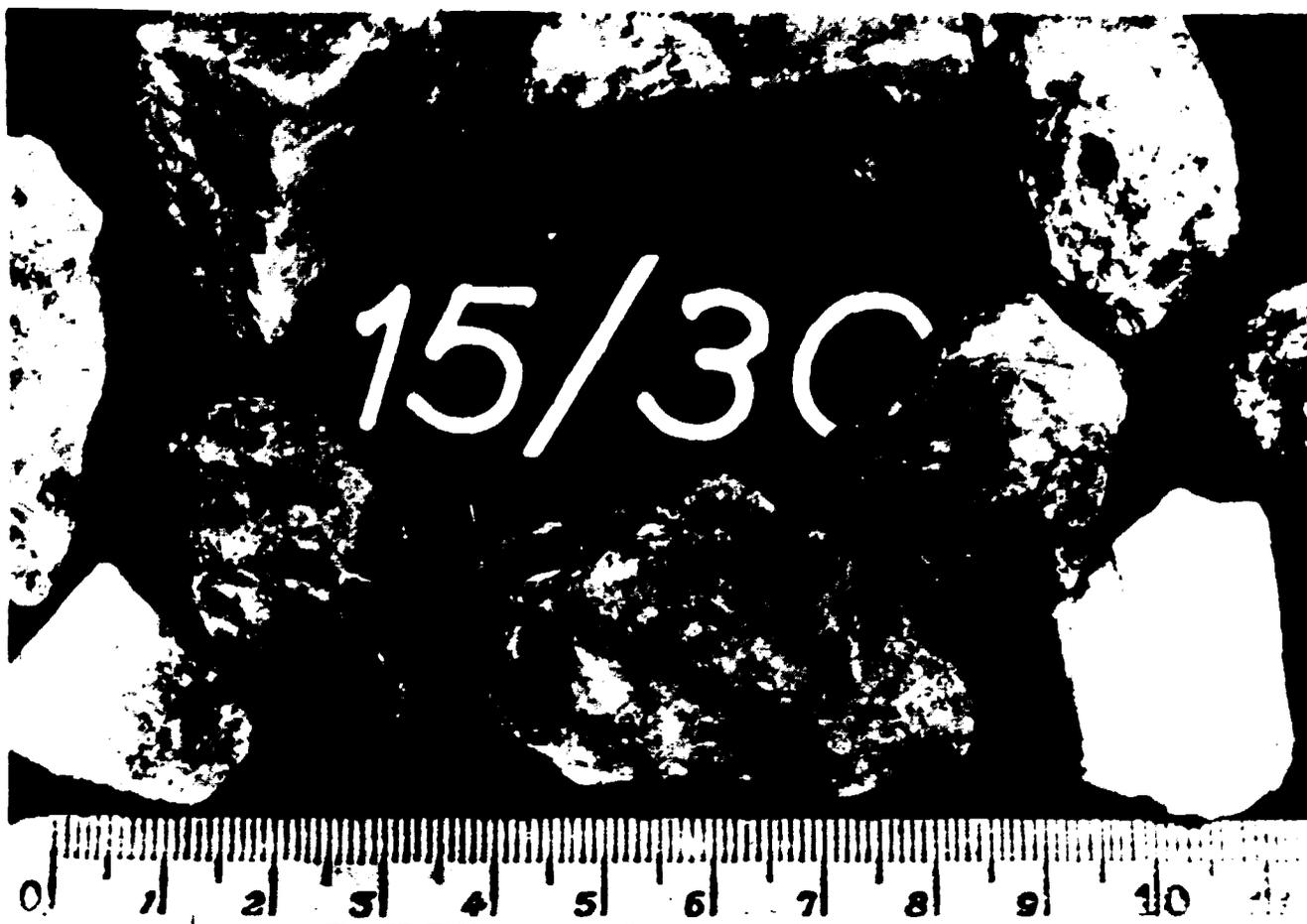


Figure n° 1 - Agrégat de barytine des Mines de Garrot ( Var ).

Afin de permettre d'exécuter les différents tests , 2 à 3 tonnes de barytine logées en sac étaient expédiées vers les laboratoires d'essais. Dès réception de ces matériaux , les analyses chimiques et physiques étaient commencées . ( La prise des échantillons étant conforme aux règles indiquées dans le chapitre " Prospection " ).

- . Résultats des Analyses. -

	Hérault	Péchiney	Garrot
Masse Spécifique ( moyenne )	4,29	4,03	4,15
Résist. mécanique roche	175 Kg/cm <sup>2</sup>	325 Kg/cm <sup>2</sup>	
Composition chimique centésimale			
SO <sub>4</sub> Ba	96	87,20	93 %
SiO <sub>2</sub>	0,20	5,90	2,5
CaO	0,60	0,90	0,62
CaF <sub>2</sub>			3,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,80	1,50	0,50
SO <sub>3</sub>	0,41	0,41	
MgO	traces	0,94	traces
Pertes et El. non dosés	1,89	2,15	0,1

On constate que la barytine de l'Hérault est plus dense car plus riche en  $SO_4 Ba$  mais moins résistante car moins riche en silice. La barytine de Garrot répond aux spécifications demandées à un béton armé à base de barytine. La barytine de l'Hérault est excellente pour des protections courantes en grosse masse.

Suivant la dimension des agrégats, la densité est variable.

Sur la barytine des Arcs ( Garrot ), les mesures de densités sont les suivantes :

	Laboratoire	Chantier
Sable 0/2	4,25	4,15
Petit gravier 2/7	4,29	4,25
Gravier 7/15	4,22	4,20
Cailloux 15/30	4,06	4

Les variations sont expliquées par le fait que le 15/30 n'est pas sélectionné comme le sable et les graviers à l'aide de bacs à pistons. De plus le 15/30 contient des stériles difficiles à éliminer.

b) Préparation des agrégats et Analyses Granulométriques.

Pour faciliter les contrôles et corriger la composition du béton, les agrégats de barytine ont été divisés en 4 classes ( fig. 3 ).



Figure .3. - Classification des agrégats de barytine.

le sable de 0 à 3

le gravier de 7 à 15

le gravillon de 3 à 7

le caillou de 15 à 30

Les agrégats provenant de roches concassées ont des formes généralement angulaires. Parfois les angles sont arrondis par l'abrasion occasionnée par les manutentions et le transport ( voir fig.1.). Après concassage , il est important de laver les agrégats car une couche de filler se dépose sur leur surface. Les sables et gravillons de forme angulaire et parfois subaiguë doivent être débarrassés des fines produites par le concassage . Par contre , on constate que certains sables ne sont pas assez riches en éléments de 0,2 à 1 mm, ce qui rend le béton un peu "raide".

Analyse granulométrique de la Barytine

Sable 0/3				
Module	Ø Passoire	Tamis en microns	Refus cumulés %	Tamisats %
35	3,15		3	97
32	1,60		38	62
29	0,80		64	36
26		315	80,2	19,8
23		160	90,85	9,15
20		80	98,5	1,5

Gravillon 3/7

Module	Ø Passoire	Tamis en microns	Refus cumulés %	Tamisats %
41	12,5		0	100
40	10,		2	98
39	8		12	88
38	6,30		30	70
35	6,15		83,35	16,65
32	3,15		96,35	3,65
29	0,80		98,2	1,80
26		315	100	0

Gravier 7/15

Module	Ø Passoire	Tamis en microns	Refus cumulés %	Tamisats %
44	25		0	100
42	16		4	96
41	12,5		20	80
39	8		77	23
38	6,30		82	18
35	3,15		95	5
32	1,60		97,85	2,15
29	0,80		100	0

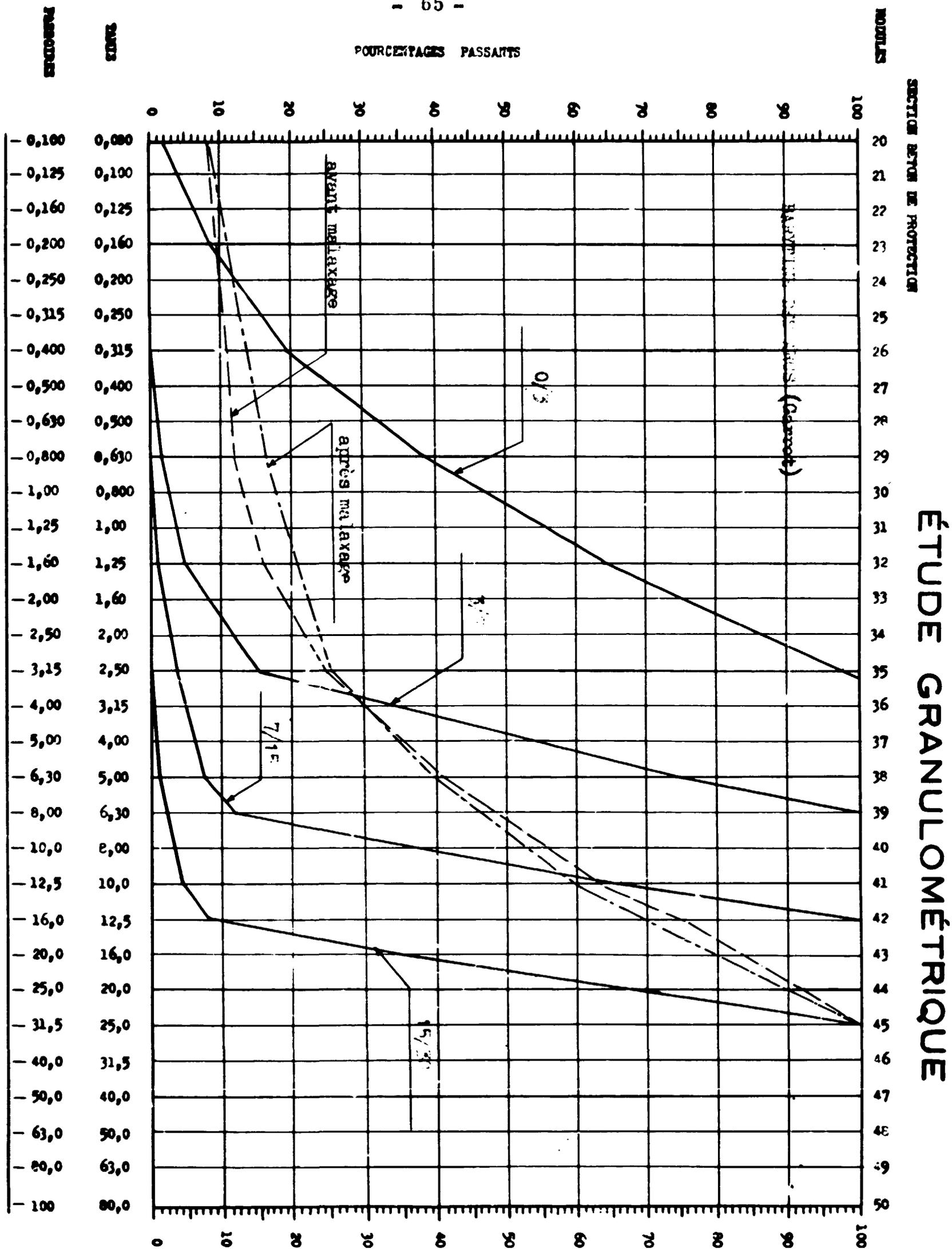


Fig. 2 - Composition du béton avant malaxage et après mise en place.

Caillou 15/30

Module	Ø Passoire	Tamis en microns	Refus cumulés %	Tamisés %
45	31,5		0	100
44	25		22	78
43	20		67	33
42	16		90,5	9,5
41	12,5		95,5	4,5
38	6,30		100	0

c) Caractéristiques physiques des agrégats :

Le sable : Le sable , élément essentiel dans les bétons a été l'objet de nombreuses études .

α ) Foisonnement.

Le foisonnement est l'augmentation de volume que subit un litre de sable sec quand on l'humidifie à une certaine teneur en eau. La densité apparente minimum du sable correspond au foisonnement maximum. La figure 4 donne la variation du poids du sable humidifié et celle du poids de sable sec contenu dans un litre de sable humide . Le foisonnement maximum est obtenu avec 1,85 % d'eau du poids du sable sec pour une densité apparente tassée de 2,69.

β ) Eau de rétention.

La connaissance de la teneur en eau du sable a une grande importance. En effet , comme nous l'avons vu , un sable humidifié foisonne , c'est - à - dire augmente de volume et voit diminuer sa densité apparente. Pour en tenir compte dans le dosage en eau du béton il est nécessaire de connaître la quantité d'eau retenue par le sable. La figure 5 , indique le pourcentage des vides occupés par l'air et l'eau en fonction du pourcentage d'eau d'humidification du sable - le sable de barytine peut retenir jusqu'à 70 l d'eau par tonne de sable sec . En général , il contient 40 à 50 litres d'eau ( dans les conditions météorologiques normales de la région parisienne ).

γ ) Compacité .

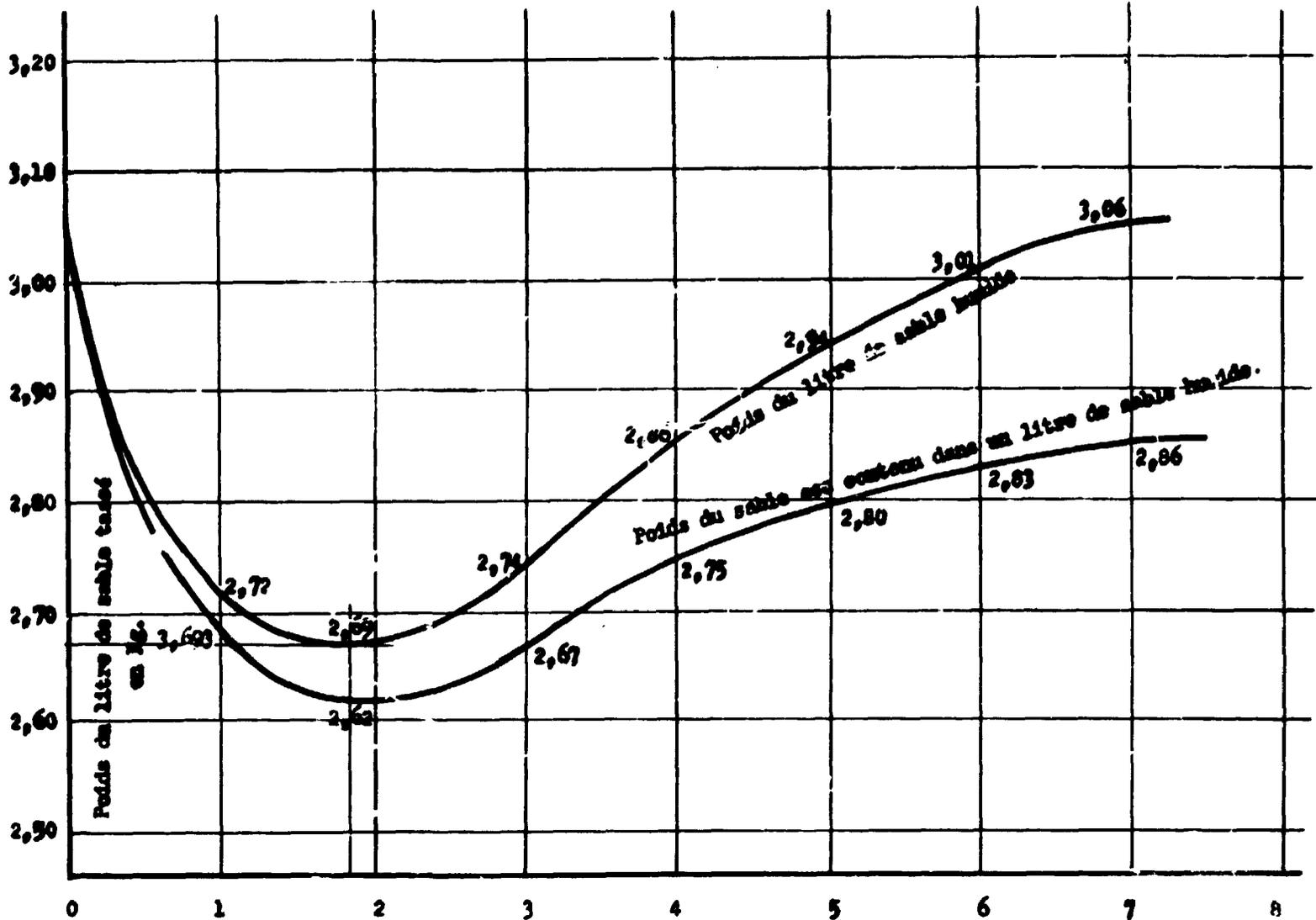
La densité étant un des facteurs importants des bétons ; la recherche des mélanges donnant la compacité maximum devenait indispensable. les fig.6 et 7 représentent les variations des densités apparentes des mélanges binaires pour les différentes classes d'agrégats. Deux méthodes de compactage ont été choisies. Le compactage à la main tel qu'il est écrit dans le chapitre " Prospection " semble donner de meilleurs résultats.

Le gravillon : Le gravillon est l'agrégat qui possède la meilleure densité spécifique ( 4,29). Sa densité apparente non tassée est de 2,175 et tassée de 2,55. La quantité d'eau retenue est de 10 litres par tonne de gravillon sec.

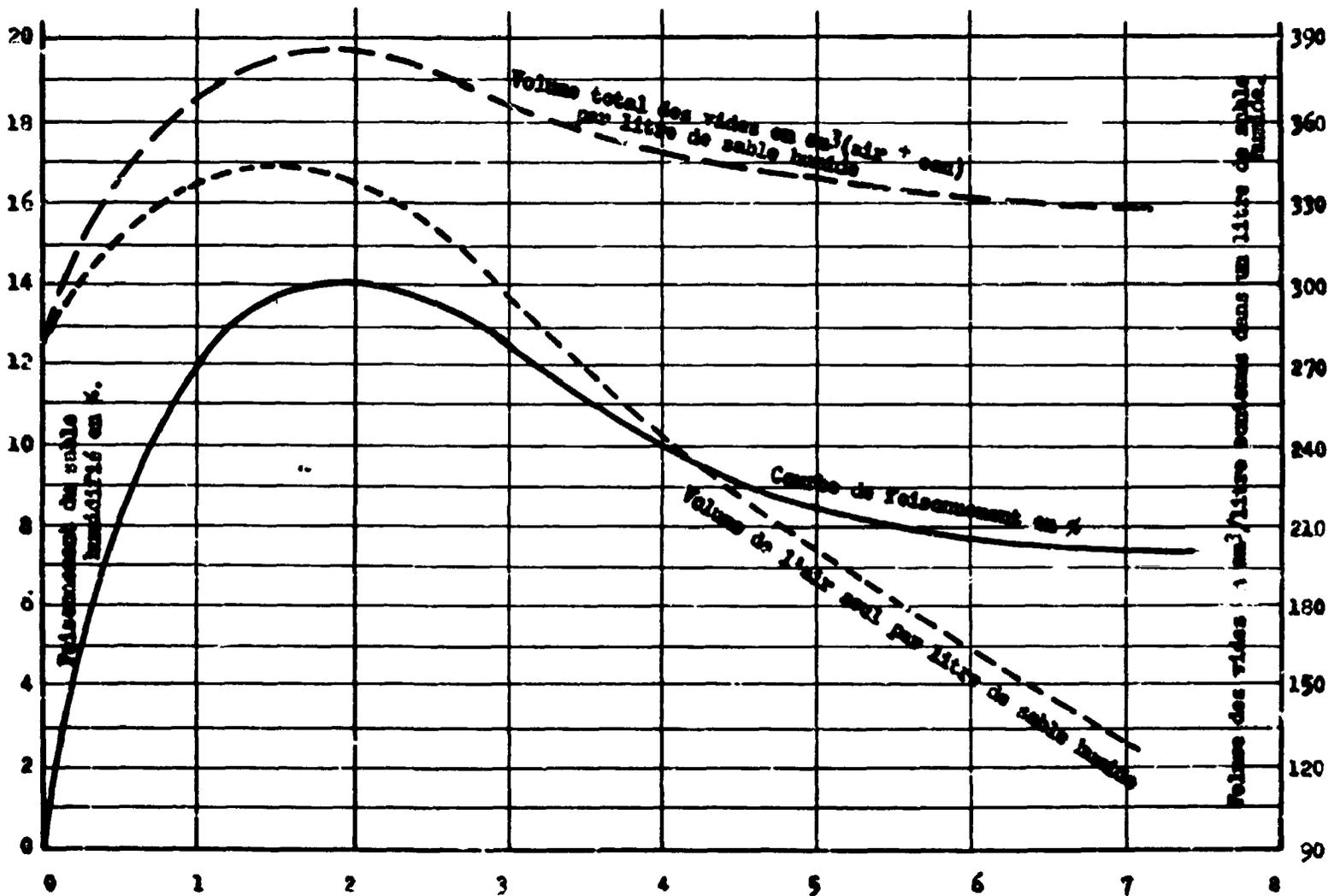
Le Gravier : La valeur du coefficient moyen volumétrique du gravier est de 0,18.

La densité apparente est de 2,57 laissant un vide entre agrégats de 37%. La quantité d'eau retenue est de 5 l. par tonne de gravier sec.

Fig. 4 et 5. ETUDE DU POISSONNEMENT DU SABLE DE BARTINE.



- Pourcentage d'eau (évalué en pourcent du poids de sable sec contenu dans le sable humide)



- ETUDE DU COMPACTAGE DES AGREGATS DE BARYTINE.

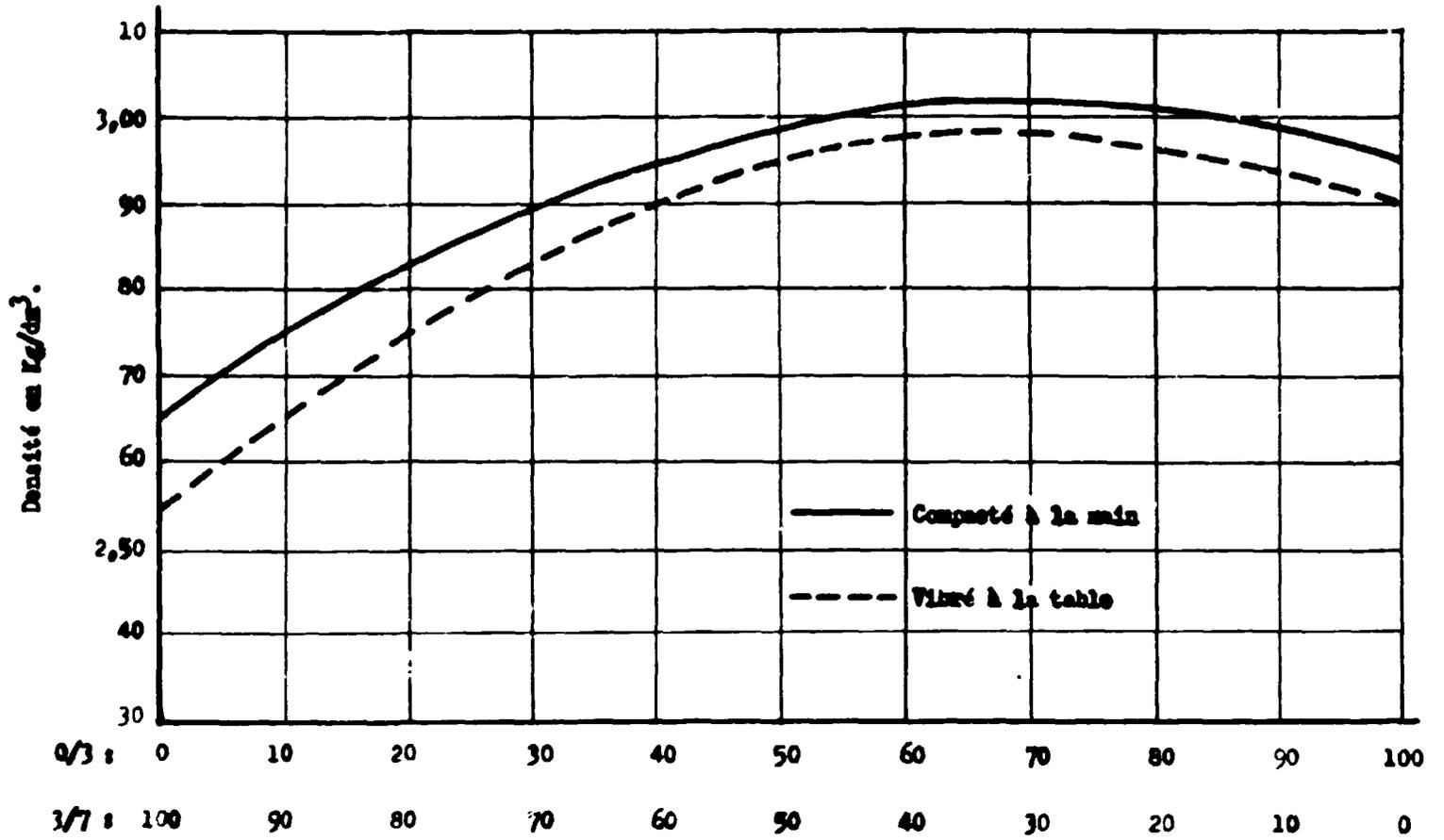


Fig. 6 - Densités Apparentes du Mélange Binaire 0/3 - 3/7.

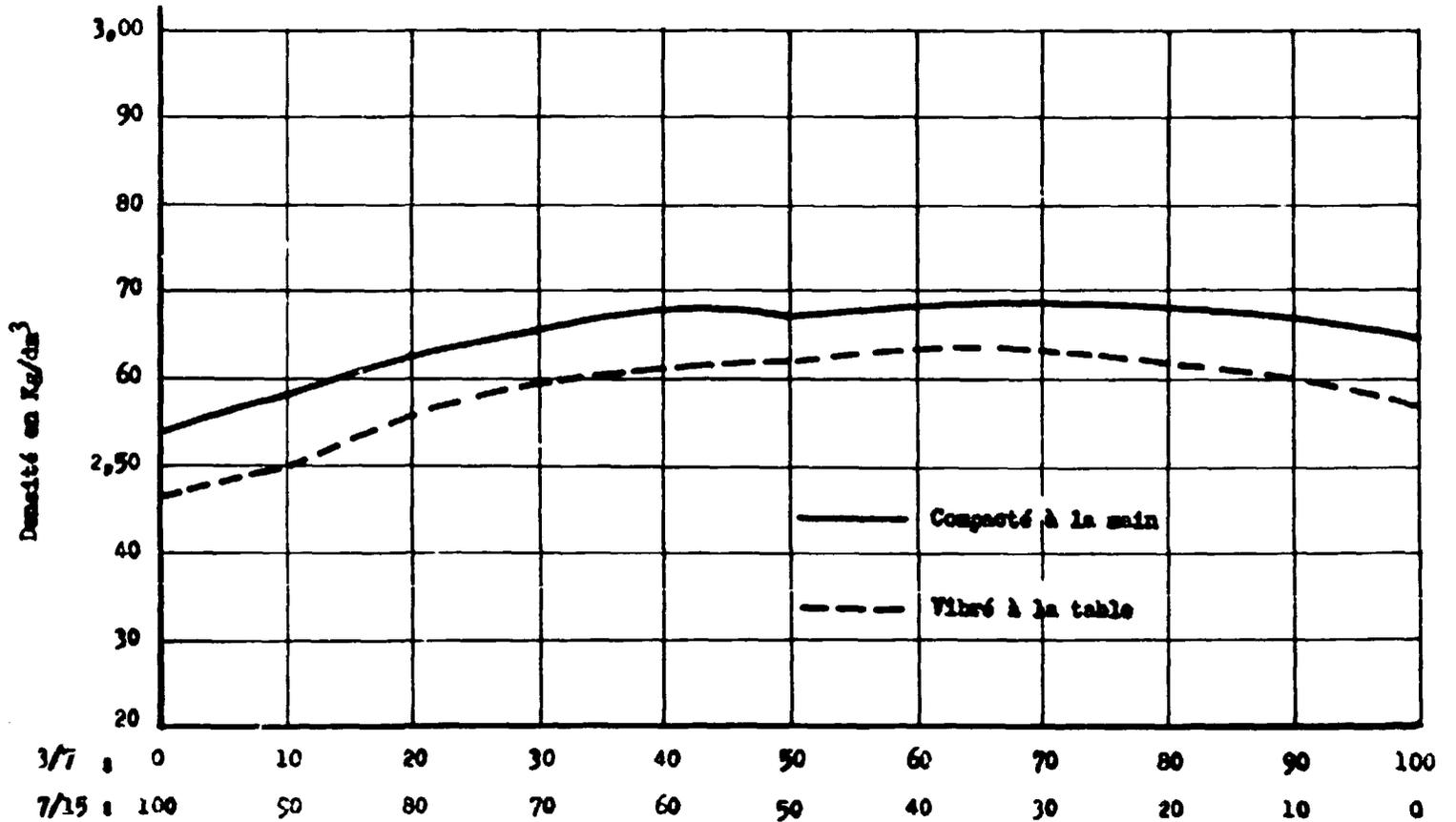


Fig. 7 - Densités Apparentes du Mélange Binaire 3/7 - 7/15.

**Le Caillou : Valeur du coefficient moyen volumétrique : 0,25.**  
**La densité apparente tassée est de 2,39 et non tassée de 2,08.**  
**Le pourcentage de vides laissé par les agrégats est de 31,5 %.**  
**La quantité d'eau retenue est de l'ordre de 4 l, par tonne de caillou**

**d) Abrasion des Agrégats .**

**Les essais d'abrasion des agrégats de barytine n'ont pas été faits par les méthodes classiques . Nous avons préféré réaliser un essai réel, c'est à dire , contrôler la modification de la courbe granulométrique de la composition du béton après malaxage et mise en place dans des moules . La fig.2 permet de constater que les graviers et les cailloux s'effritent pour donner un excédent de fines. ( Temps de malaxage :2 minutes en bétonnière à axe incliné - Temps de vibration à l'aiguille STV :30 secondes) . ( 46 ).**

**Il est très important de tenir compte de cette variation de granulométrie dans les compositions pondérales des agrégats utilisés pour confectionner le béton de barytine.**

**e ) Composition du béton .**

**L'étude de la meilleure composition du béton pour obtenir par la méthode conventionnelle le béton le plus dense mais toutefois maniable est sans aucun doute la plus délicate.**

**En plus des facteurs indiqués dans l'étude générale des bétons , l'analyse des courbes granulométriques et le calcul des proportions des agrégats ont une grande influence sur la densité.**

**Après de nombreux essais dont nous reproduisons ci-dessous les principaux, les courbes granulométriques pratiques des agrégats de barytine ont été déterminées ainsi que les limites de variation de ces courbes .**

**( Voir Figure .8 et Spécifications sur le béton de barytine ).**

**I ) Passant minimum ( peu de fines ).**

0/3	250 kg	300 kg	350 kg
3/7	950	1100	1250
7/15	1000	1000	1000
15/30	1100	900	700
Ciment	300	300	300
eau	104. l.	110. l.	125 l.
Pastocrète	1,55 l.	1,55 l.	1,55 l.
Densité humide	3,52	3,58	3,52
Densité sèche	3,46	3,51	3,45
Observations	Trop raide	Raide	Passable

II ) Moyen.

0/3	250 kg	300 kg	350 kg
3/7	950	1100	1250
7/15	1000	1000	1000
15/30	1100	900	700
Ciment	300	300	300
Eau	95 l.	105 l.	115 l.
Plastocrète	1,55 l.	1,55 l.	1,55 l.
Densité humide	3,63	3,64	3,60
Densité sèche	3,57	3,56	3,54
Observations	Bonne mise en place	Bien	Mise en place facile trop d'eau

III ) Passant maximum ( maximum de fines )

0/3	250 kg	300 kg	350 kg
3/7	950	1100	1250
7/15	1000	1000	1000
15/30	1100	900	700
Ciment	300	300	300
Eau	105 l.	115 l.	126 l.
Plastocrète	1,55 l.	1,55 l.	1,55 l.
Densité humide	3,64	3,66	3,62
Densité sèche	3,57	3,58	3,55
Observations	Mise en place passable		Trop d'eau

On constate qu'il est préférable d'avoir un excès de fines que pas assez; que la densité du béton décroît dans chaque cas quand le dosage en fine augmente ; que la densité croît quand le  $\phi$  des agrégats augmente sauf pour le 15/30 à cause de sa faible densité spécifique.

Compositions proposées :

a ) Mortier :

Ciment	472 kg	
Sable 0/3	2.550 kg	
Eau	231 l.	$Da_h = 3,25$
Plastifiant	1 l. 5	

b ) Mortier 3/7. ( Méthode Valette ) :

Gravillon 3/7	2500 kg	$Da_h = 3,51$
Ciment	340 kg	Eau 130 l.
Sable 0/3	350 kg	Plastifiant 1,5 l.
		$Da_s = 3,46$

Béton 7/15 :

Ciment	300 kg	
Sable 0/3	640 kg	
Gravier 7/15	2570 kg	$Da_h = 3,64$
Eau	120 l.	
Plastifiant	1,5 l.	

POURCENTAGES PASSANTS

MOULINS

SECTION BTON DE PROTECTION

# ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE

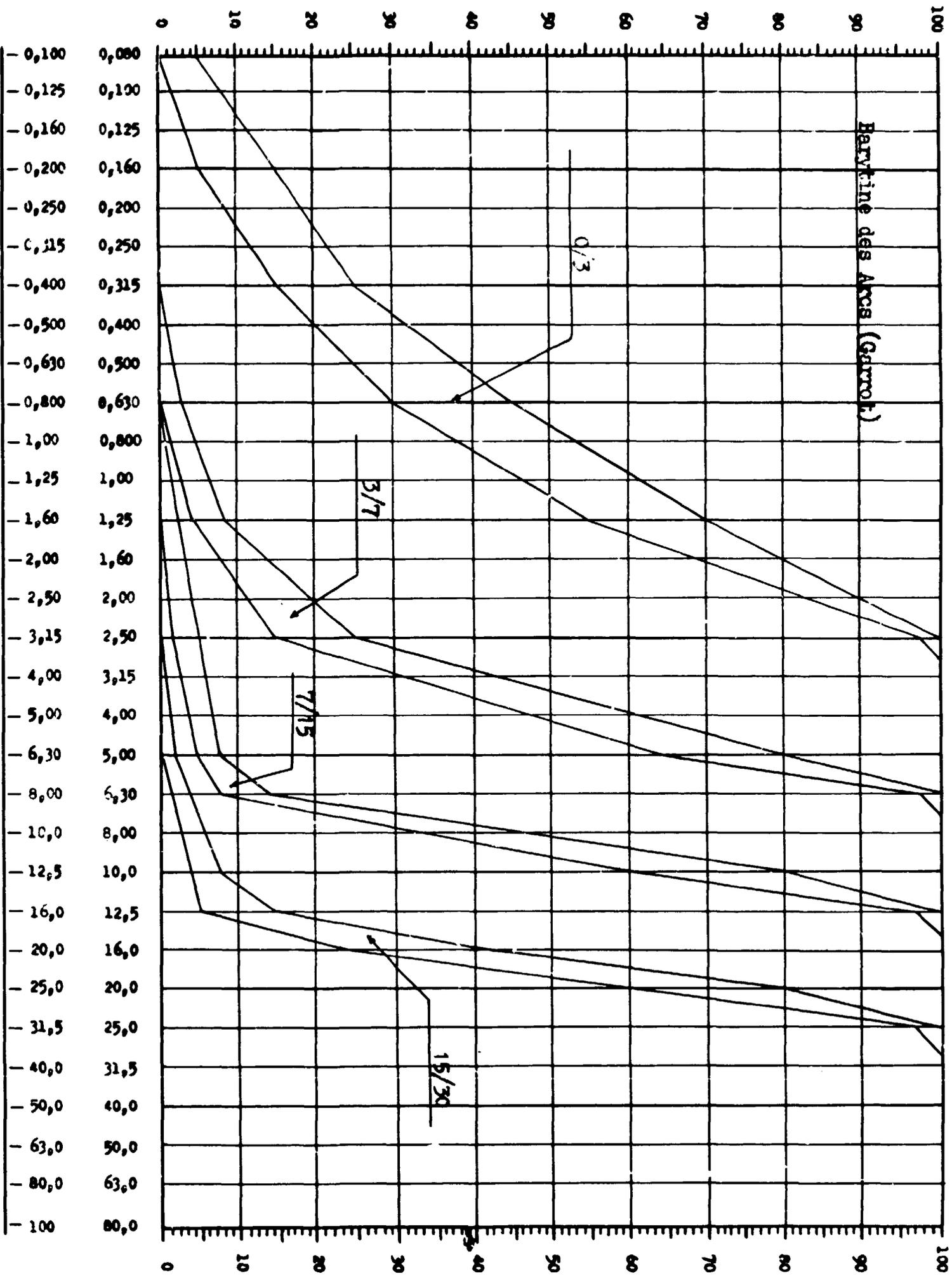


Fig. 8 - Limites de variations des courbes granulométriques des échantillons de barytine

POURCENTAGES PASSANTS



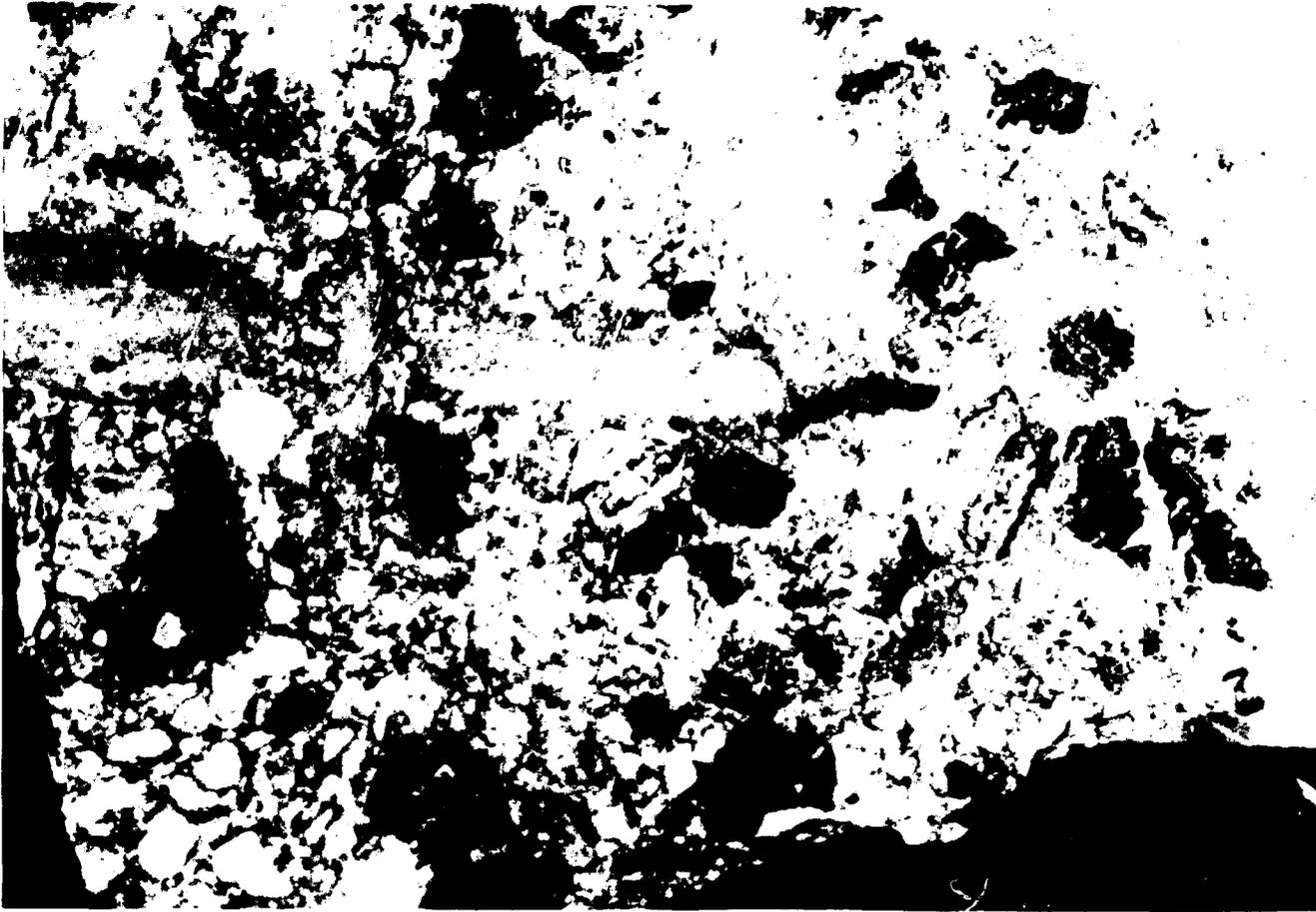


Fig. 9. - Coupe d'un bloc de béton de barytine montrant l'enrobage des Aciers.

	Hérault		Garrot	
	Air	Eau	Air	Eau
7 j.	- 139	+ 65	- 62	+ 34
28 j.	- 262	+ 118	- 201	+ 52
90 j.	- 340	+ 86	- 278	+ 50

On constate que les retraits et gonflements sont équivalents à ceux d'un béton classique .

## ESSAIS DE FLEXION ET DE RUPTURE PAR FLEXION D'UNE POUTRE EN BETON DE BARYTINE

### 1) Généralités.

Une poutre en béton de barytine de 6 m. de longueur et de 0,6 x 0,6 m. de section en béton a été fabriquée à Saclay, le 21-10-1958. Le béton ayant servi à la confection de la poutre avait la composition suivante :

Sable 0/3	300 kg	Densité du béton à 28 j. 3,56
Gravillon 3/7	1100 kg	Résistance Compression à 8j. : 276 Kg/cm <sup>2</sup>
Gravier 7/15	1000 kg	Résistance Compression à 28 j. : 310 Kg/cm <sup>2</sup>
Caillou 15/30	970 kg	Résistance à la Traction à 8 j. : 15 Kg/cm <sup>2</sup>
Ciment CPA Le Coq 250/315	300 kg	Résistance à la Traction à 28j. : 17,5 Kg/cm <sup>2</sup>
Eau	115 l.	
Plastifiant	1,7 l.	

Le béton a été mis en place dans des coffrages métalliques par vibration au moyen de pervibrateurs à aiguille. Les essais ont été réalisés 28 jours après la confection de la poutre.

### 2) Dispositifs d'essais.

La poutre a été placée sur deux appuis constitués par deux rouleaux de 100 mm de diamètre placés entre deux platines en acier.

La largeur des platines était de 25 cm et leur longueur de 60 cm pour que la pression exercée sur le béton ne dépasse pas 20 kg/cm<sup>2</sup> sous la plus forte charge. A l'une des extrémités, le rouleau était calé au moyen de coins pour jouer le rôle de rotule.

Pour l'essai de flexion par charge uniformément répartie (voir Fig. 10), les charges de 3100 Kg (Poids des blocs de béton lourd) étaient appliquées dans l'ordre indiqué par la fig. 12 et de part et d'autre du milieu de la poutre.

La poutre a été chargée jusqu'à l'apparition des premières fissures (fig. 13) puis laissée sous charge pendant 3 jours.

Nous donnons dans la fig. 10 :

- 1) La charge totale appliquée sur la poutre.
- 2) Le moment fléchissant maximum correspondant au milieu de la poutre (compte tenu du poids propre de la poutre).
- 3) Les mesures lues sur les comparateurs effectuées aux quarts et à la moitié de la portée de la poutre (fig. 12).

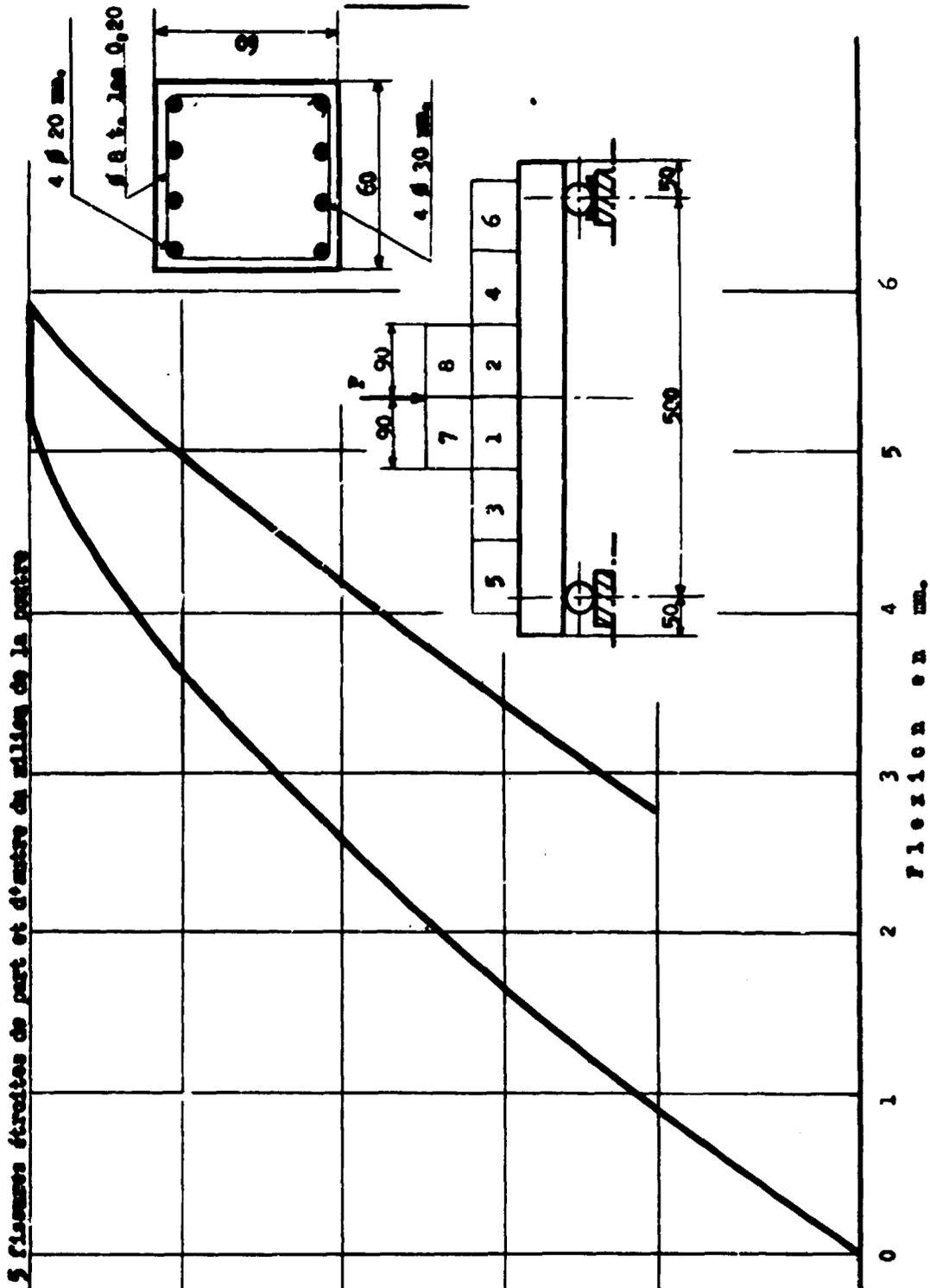
Fig. N°10 BETON DE BARYTINE - Essai de flexion sur poutre en béton armé.

(Agrégats des Mises de Carrot des Armes)

Composition Béton - 3.250 Kgs de mélange d'agrégats de barytine de 0 à 30 mm.  
 300 Kgs de ciment CPA 250/315 - 120 l. d'eau.  $\delta = 3,5\%$ .  
 Armer à béton rond.  
 Essai de flexion effectué à 28 jours.

obtenus par calcul  
 avec  $n = 10$

	$R_{kg}$	$M_{kg}$	$R_b$	$R_{\omega}$	$R_{\omega'}$
7-8	32280	22700	75	535	1640
5-6	26280	16000	53,6	382	1170
3-	20980	11760	46	324	990
Mise 1-2	13880	10195	33,7	246	735
Poids Propre	1660	3840	12,6	50	275



obtenus par calcul avec  $n = 10$

Composition Béton. - 3.250 Kgs de mélange d'agrégats de Barytine de 0 à 30 mm.

300 Kgs de Ciment CPA 250/315 - 120 l. d'eau.  $\delta = 3,96$ .

Acier à béton rond.

Essai de rupture par flexion effectué à 40 jours.

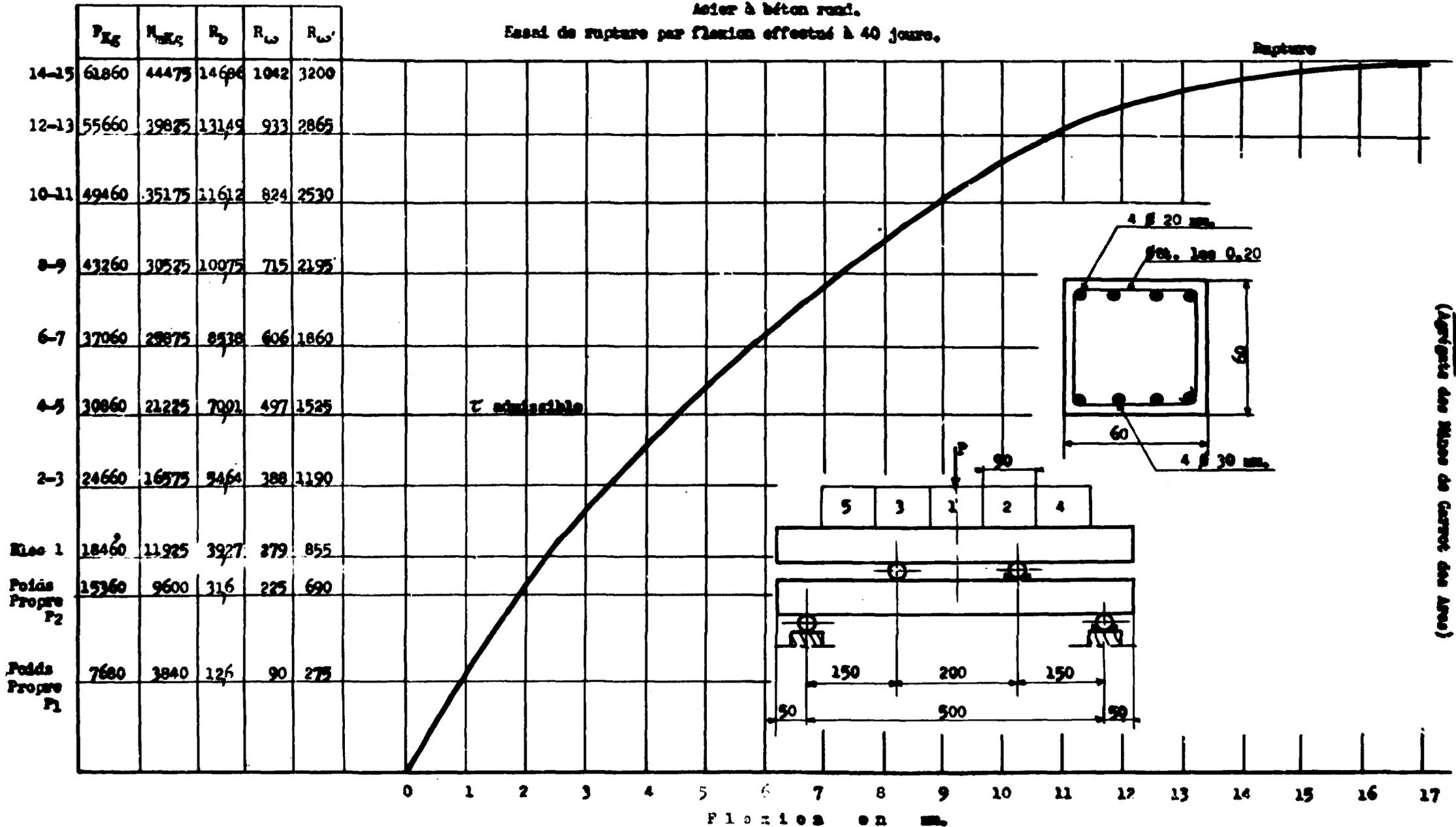


Fig. n° 11. - BEAU DE BARYTINE - Essai de rupture par flexion sur poutre en béton armé. (Agrégats des Mises de Carrot des Armes)

Afin d'éviter les erreurs dues à la non planéité de la surface de la poutre les points des comparateurs étaient appliqués avec une certaine pression sur des plaquettes d'aluminium collées sur le béton de l'axe neutre.

La figure 10 donne la courbe de la flèche en fonction de la charge totale au milieu de la portée de la poutre.

Enfin la figure 13 donne en position et en grandeur, les fissures provoquées par le chargement du bloc n° 8.

Pour l'essai de rupture, nous avons appliqué des charges en deux points situés à 1 mètre de part et d'autre du milieu de la portée, comme l'indique la figure 11.

Pour cela, nous avons utilisé une seconde poutre sur laquelle était appliquée une charge uniformément répartie. Les charges concentrées sur la poutre à étudier étaient transmises par les deux rouleaux placés entre deux platines en acier. L'un des rouleaux était calé au moyen de coins en vue de jouer le rôle de rotule. Les charges de 3.100 Kg étaient appliquées dans l'ordre indiquée par la fig. 12. L'essai a duré 2 jours. Le béton avait 40 jours. La poutre a été chargée jusqu'à la rupture.

Nous donnons dans la figure 11 ;

- 1) La charge totale appliquée sur la poutre .
- 2 ) Le moment fléchissant maximum correspondant au milieu de la portée.
- 3 ) La courbe de la flèche en fonction de la charge totale au milieu de la portée de la poutre.

Dans la figure 12, les mesures lues sur les comparateurs effectuées au milieu de la portée de la poutre, au droit de la charge concentrée et à 0,75 m de l'appui de la poutre.

Enfin la figure 14 donne la répartition et la hauteur des fissures et leur évolution avec l'accroissement de la charge, sur les trois faces visibles de la poutre.

L'entrebaillement des fissures n'a pas pu être correctement mesuré.

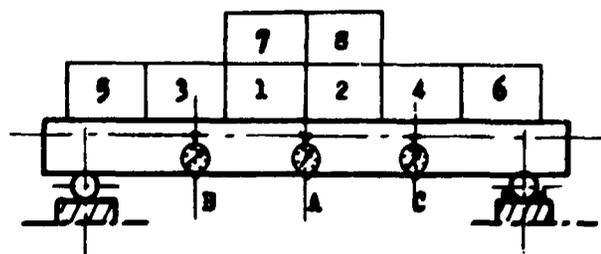
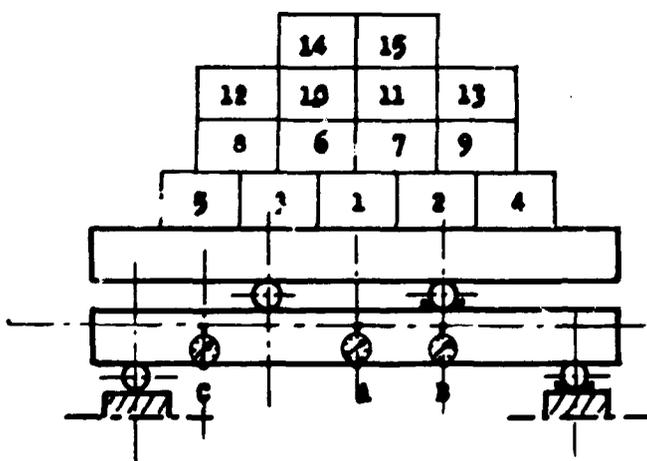
Les numéros figurant près des fissures permettent de voir leur progression en hauteur en fonction de la charge appliquée par le bloc de même numéro.

La poutre s'est rompue en son milieu sous une charge de 61 tonnes. Le début de rupture s'est produit par écrasement du béton comprimé ( fragilité de la barytine ) et fluage des aciers tendus.

La photographie figure 15 montre les fissures et les parties de béton détachées avant rupture de la poutre par charge constante.

Tableau N° 12. MITON DE BARTHELEMY - Essai de Flexion et de Rupture

Flèches en fonction de la Charge en 1/100 de mm.



N° Elee	Comparateurs			Observations
	A	B	C	
P <sub>2</sub>	94	69	43	
"	95	69	44	1 h 30
"	109	79	49	24 h.
"	114	83	52	40 h.
"	115	84	53	48 h.
1	149	110	68	
2	189	144	85	
3	227	171	105	
4	277	204	129	
5	326	253	150	Fissures
5	347	269	160	après 0 h 15
6	408	317	186	
7	497	394	223	
8	586	457	267	
9	672	541	298	
9	718	580	317	après 0 h 15
10	790	638	348	
11	882	720	383	
12	989?	795	432	
13	1090	873	499	
14	z	896	471	
15				Rupture

N° Elee	Comparateurs			Observations
	A	B	C	
	CHARGEMENT			
1	41	36	31	
2	91	75	75	
3	128	111	101	
4	170	142	145	
5	193	163	199	
6	200	180	185	
"	238	194	198	Après 1 h.
"	252	205	210	16 h.
"	273	223	225	21 h.
7	313	253	253	
8	430	325	337	Fissures
"	470	352	399	après 1 h.
"	476	356	363	3 h.
"	480	358	365	19 h.
"	501	372	380	27 h.
"	505	374	381	69 h.
	DECHARGEMENT			
8	467	344	356	
7	424	316	323	
6	407	305	306	
5	395	295	300	
4	357	273	268	
3	324	243	246	
2	266	205	200	
1	205	158	156	
0	185	141	142	après 24 h.

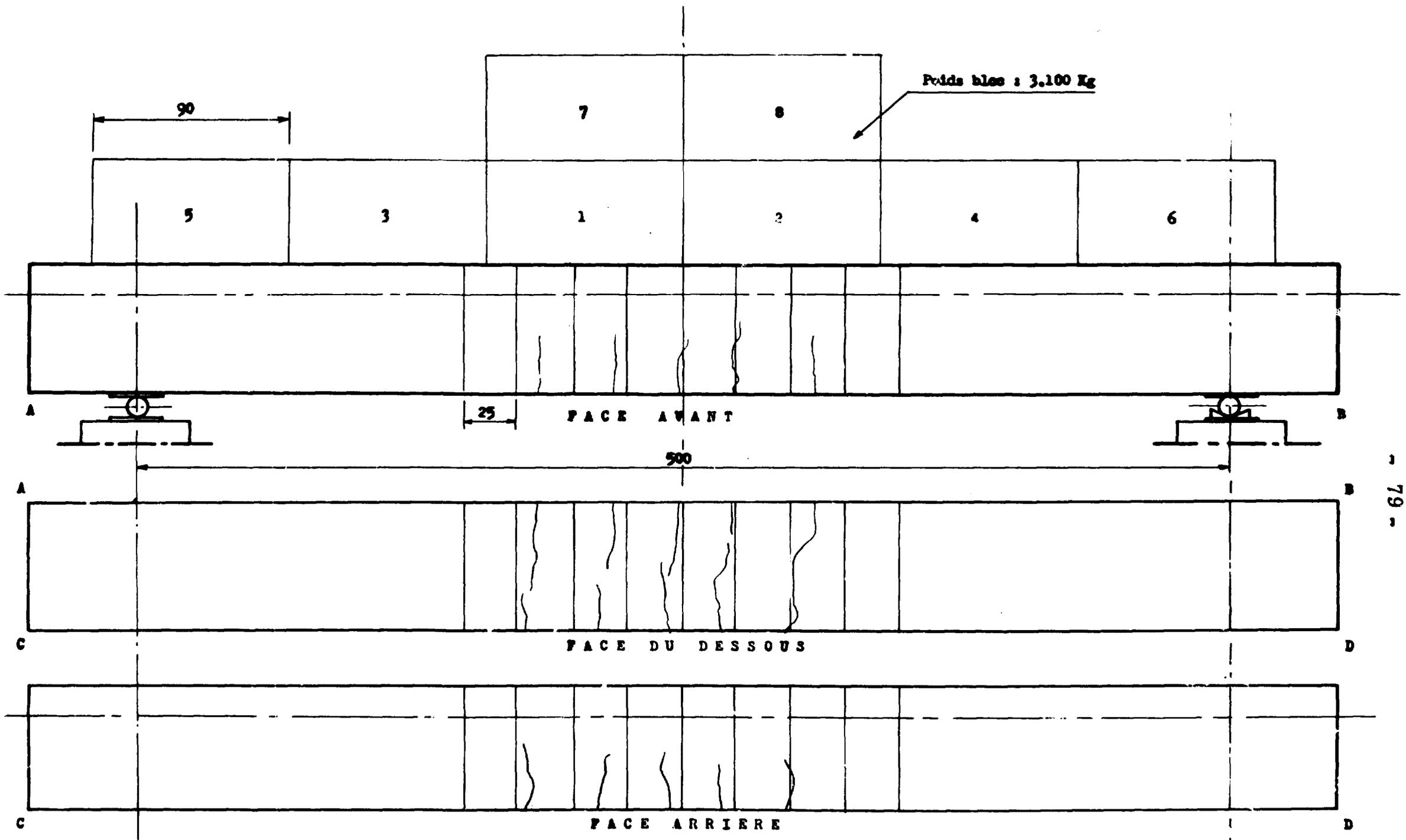


Fig. 13 - Relevé des Fissures de la Poutre en Béton de Barytine Armé (charge uniformément répartie)

Blocs P = 3.100 Kg (répartition indiquée  
sur le tableau de relevés des flèches)

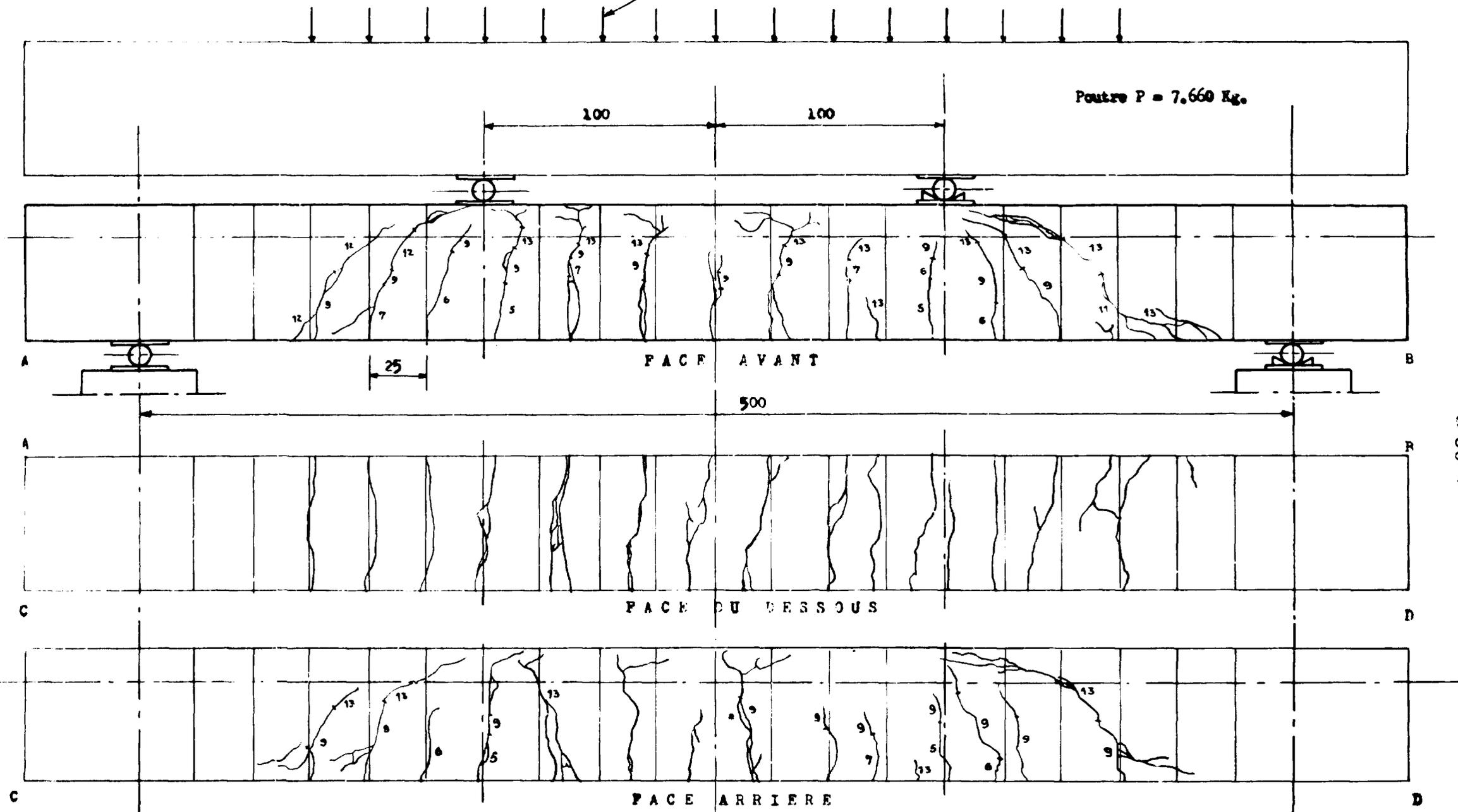


Fig. 14 - Relevé des Fissures de la Poutre en Béton de Barytine Armé (Charges Concentrées).



Figure 15. - Face verticale de la poutre avant rupture montrant les fissures au milieu de la portée de la poutre.

## SPECIFICATIONS POUR LE BETON DE HAUTE DENSITE A BASE DE BARYTINE.

### I - Introduction .-

Ces spécifications comprennent tous les travaux , les matériaux , l'équipement et les outils ainsi que toutes les opérations nécessaires pour la réalisation du béton de barytine de densité  $3,6 \text{ g/cm}^3$ .

### II - Généralités .-

Sauf indications contraires indiquées par le cahier des charges ou ces spécifications , la confection du béton sera conforme aux règles d'utilisation du béton armé B A 45 .

### III - Matériaux .-

#### a ) Ciment :

Pour chaque construction , une seule marque de ciment sera choisie pour la confection du béton. Tout ciment récupéré par nettoyage de sacs ou de silos de stockage ne sera pas utilisé. Le ciment sera livré sur chantier dans des sacs exempts de déchirures , en bon état et de poids normal. Tout sac endommagé sera rejeté. Le ciment sera stocké sur un sol sec , dans un local ventilé.

Les ciments portland artificiels seront conformes à la norme NFP 15.302.

Le ciment portland à haute résistance initiale ne sera employé que sur ordres de l'ingénieur responsable de l'ouvrage.

#### b ) Agrégats :

Les agrégats doivent se composer de barytine à l'état naturel , c'est à dire , de sulfate de baryum (  $\text{SO}_4 \text{ Ba}$  ) extrait et traité suivant les prescriptions ci-dessous .

Le soumissionnaire devra donner tous les détails sur la provenance des agrégats en précisant le lieu.

La barytine ne devra pas être friable et sera absolument garantie exempte de toute particule terreuse, de toute substance chimique susceptible d'attaquer le liant hydraulique ou les fers des ossatures et de toute matière organique même en faible quantité.

Les agrégats ne contiendront pas d'éléments lamellés ou en aiguille en quantité suffisante pour être préjudiciables à la mise en place et à la résistance mécanique du béton. La teneur en  $SO_4^{2-}$  Ba ne devra pas être inférieure à 92 % et supérieure à 96 %.

Tous les agrégats seront concassés, criblés et lavés dans de l'eau propre puis jiggés pour enlever les éléments légers.

Densité :

La densité de la barytine variant suivant les granulométries ( légèrement plus faible pour les gros agrégats ), il sera exigé que la densité spécifique moyenne ne descende pas au-dessous de 4,10.

Cette densité devra être garantie par la mine expéditrice. Le contrôle de la masse spécifique sera exigé pour chaque wagon qui ne devra contenir que des agrégats d'une même granulométrie. Le contrôle sera fait au départ par la mine expéditrice et à l'arrivée par le soumissionnaire.

Le procédé de contrôle sera identique au départ et à l'arrivée. Il sera fait usage de la méthode du picnomètre ou du densimètre de Le Chatelier avec comme liquide l'alcool ou le toluène pour les petits agrégats et la méthode dite du "flacon" pour les gros agrégats.

Il sera fait trois mesures de telle sorte que la masse spécifique enregistrée soit une moyenne; la prise d'échantillon s'effectuera en prélevant sur chaque wagon quatre pelletées de barytine en des emplacements différents; le contenu de ces quatre pelletées sera mélangé pour en faire un tas en forme de cône; on appliquera ensuite la méthode du "quarting" jusqu'à une réduction d'environ 100 gr (pour la méthode du picnomètre).

Classement des agrégats :

La barytine sera livrée aux granulométries suivantes :

0/3                      3/8                      8/15                      15/30

Les sables fins provenant du broyage de la barytine seront traités par des jiggs pour éliminer les stériles. Les agrégats seront classés à l'intérieur des limites suivantes :

Module	Ø passoires en mm	Tamis en laiton ( en µ )	Tamisats % en poids
35	3,15		97 - 100
32	1,60		55 - 70
29	0,80		30 - 45
26		315	15 - 25
23		160	5 - 15
20		80	0 - 5

Les substances nuisibles ne seront pas présentes en excès , aux maxima suivants

	Limites permises % en poids	
- Argiles , craie	recommandé : 0,1	maximum : 0,5
- Sulfure , charbon	0,1	0,5
- Sable plus fin que 0,06 mm	0,1	2

Le gravier provenant du broyage sera également traité par des jiggs. Les agrégats seront classés à l'intérieur des limites suivantes ;

Module	Ø passoires en mm	Tamisats % en poids
39	8	97 - 100
38	6,3	65 - 80
35	3,15	15 - 25
32	1,60	4 - 8
29	0,80	0 - 3

Les substances nuisibles ne seront pas présentes en excès , aux maxima suivants

	Limites permises % en poids	
- Argiles , craie	recommandé : 0,1	maxima : 0,5
- Sulfure , charbon	0,1	0,5
- Sable plus fin que 0,06 mm	0,1	2

Le gravillon provenant du concassage de la barytine sera traité par jiggs si possible . Les agrégats seront classés à l'intérieur des limites suivantes :

Module	Ø passoires en mm	Tamisats % en poids
42	16	97 - 100
41	12,5	60 - 80
39	8	8 - 15
38	6,3	5 - 8
35	3,15	2 - 5
32	1,60	0 - 3

Les substances nuisibles ne seront pas présentes en excès , au maxima suivants :

Limites permises % en poids

- Argiles , craie	recommandé : 0,1	maxima : 0,5
- Sulfures , charbon	0,1	0,5
- Sable plus fin que 0,06 mm	0,1	1

Les gros agrégats provenant du concassage de la barytine seront lavés et triés . Les agrégats seront classés à l'intérieur des limites suivantes :

Module	Ø passoirs en mm	Tamisats % en poids
45	31,5	97 - 100
44	25	60 - 80
43	20	25 - 40
42	16	5 - 15
41	12,5	4 - 8
38	6,3	0 - 2

Les substances nuisibles ne seront pas présentes en excès aux maxima suivants :

Limites permises % en poids

- Argiles - craie	recommandé : 0,1	maxima : 0,5
- Sulfures , charbon	0,1	0,5
- Sable plus fin que 0,06 mm	0,1	1

Agréments des matériaux :

Avant leur emploi , les agrégats seront analysés par un laboratoire d'essais de matériaux. Le choix du laboratoire se fera en commun accord entre l'Administration et l'Entreprise .

Aucun matériau ne sera utilisé avant d'avoir été approuvé . Des essais supplémentaires d'agrégats seront effectués durant la construction s'il y a un changement apparent quelconque dans le matériau .

Toute expédition d'agrégats fins comprenant des éléments d'un module de finesse dépassant de 20/100 les modules de finesse extrême sera refusée , ou au choix de l'ingénieur , pourra être acceptée sous réserve de modifications dans les proportions du mélange.

c ) Eau :

L'eau de gachage ne devra pas contenir de matières organiques , d'acides, de sels , de matières en suspension à plus de 2 gr par litre et d'impuretés en solution non compatibles avec le ciment .

d ) Plastifiant - Entraîneurs d'air - Accélérateurs de prise -

L'emploi de plastifiants additionnés à l'eau de gachage sera recommandé pour accroître la maniabilité des bétons. Il suffira que le plastifiant utilisé soit agréé par un laboratoire d'essais de matériaux.

Les entraîneurs d'air et les accélérateurs de prise seront utilisés que sur avis de l'ingénieur responsable de l'ouvrage .

e ) Les aciers :

Les aciers seront conformes à la toute dernière révision de la norme AFNOR applicable .

Le soudage des aciers sera conforme à la norme P 22 201 et aux règles CM 1956 .

L'utilisation des aciers lisses ou crénelés sera conforme aux règles 1948 -Ronds N 'e 40 - 60 .

IV - Essais des Bétons . -

Les éprouvettes nécessaires pour les essais de contrôle du béton seront toujours prélevées au lieu d'emploi du béton .

Le béton sera renversé sur une aire et remélangé à la pelle avant de l'introduire dans les moules . On s'efforcera de tasser le béton des éprouvettes dans des conditions aussi voisines que celles réalisées pour la mise en place du béton de l'ouvrage.

Les moules en acier seront cubiques de 20 cm de côté pour les essais de compression et de 7 x 7 x 28 pour les essais de traction par flexion .

6 éprouvettes de chaque sorte seront prélevées à chaque coulée ou tous les 10 m<sup>3</sup> de béton mis en place .

Les éprouvettes seront conservées 24 heures dans leur moule protégées par un couvercle , puis après démoulage , elles seront conservées dans le sable humide fin , une épaisseur de 10 cm de sable entourant toutes les faces des éprouvettes .

Tant en moule que dans le sable , les éprouvettes seront conservées à l'abri mais à la température du chantier . 3 éprouvettes seront cassées à 7 jours , les 3 autres à 28 jours . Toutes les éprouvettes seront identifiées sans dégrader les faces.

V - Registre du bétonnage . -

Un registre de toutes les coulées du béton sera soigneusement tenu par l'entreprise . Le registre devra rassembler les renseignements suivants :

- 1 ) Numéro d'identification de la coulée .
- 2 ) Date à laquelle elle a été faite.
- 3 ) Temps au commencement et à la fin de la coulée.

- 4 ) Température au commencement et à la fin de la coulée.
- 5 ) L'emplacement ou les emplacements de la coulée.
- 6 ) Le nombre de m<sup>3</sup> coulés.
- 7 ) Numéro d'identification des éprouvettes de contrôle.
- 8 ) Quantité d'eau de gachage par m<sup>3</sup> de béton confectionné.
- 9 ) Résultats des essais mécaniques à 7 jours.
- 10 ) Résultats des essais mécaniques à 28 jours.
- 11 ) Toutes autres observations selon les indications qui seront fournies.

VI - Stockage des matériaux . -

a ) Les agrégats :

Le stockage des agrégats devra être réalisé avec le plus grand soin dans un emplacement spécialement aménagé à cet effet et compartimenté par type de granulométrie.

Il devra être d'un accès facile pour la vérification et l'identification de chaque expédition. Toutes précautions devront être prises pour qu'aucun mélange de la barytine avec les agrégats traditionnels ou des particules terreuses ne soit possible.

b ) Le ciment :

Le ciment sera stocké à l'abri des intempéries dans un endroit sec et ventilé.

c ) Les aciers :

Les aciers seront mis sous abri et protégés contre la rouille , l'huile ou la distorsion. Seul , l'acier dont on a besoin dans l'immédiat sera retiré du stockage .

d ) Bois de coffrage :

On empilera les panneaux contre-plaqués sur une surface plane , après s'être assuré qu'il n'y a aucune pointe , ou qu'il ne s'est interposé entre eux des graviers ou des particules de béton. Ils seront stockés à l'abri du grand soleil et de la pluie , éventuellement espacés par des tasseaux ou baguettes pendant la mauvaise saison .

VII - Coffrages . -

a ) Matériaux :

Les coffrages seront en bois, en métal ou autre matériau agréé . Les coffrages et échafaudages présenteront une rigidité suffisante pour résister sans déformation sensible aux charges et aux chocs qu'ils sont exposés à subir pendant l'exécution des travaux , compte tenu des forces engendrées par la vibration du béton et de la forte densité des agrégats.

Les coffrages en bois seront en sapin résistant à l'humidité et pas moins de 3,4 cm d'épaisseur normale .

Le contre plaqué comportera au minimum 5 plis et portera la marque C. T. B. qualité 0 ou X .

Les coffrages métallique seront d'un type agréé par l'ingénieur pour donner des surfaces équivalentes à celles prescrites pour les coffrages en bois.

L'huile pour décoffrage sera une huile minérale incolore.

b ) Exécution :

Les coffrages seront exécutés de telle sorte qu'il n'y ait pas de fuites de mortier au moment du serrage du béton par vibration . Leurs faces intérieures seront régulières sans creux ni aspérités , de façon à obtenir des surfaces de coffrages bien nettes . Les calfatages éventuels des joints ne devront faire aucune saillie à l'intérieur des coffrages.

Des orifices temporaires pour le nettoyage et la vérification seront ménagés à la base des coffrages verticaux et à tout autre endroit si le besoin se fait sentir .

Tous les angles du béton seront chanfreinés à 3 cm , à moins qu'il en soit autrement sur les plans.

Toutes les surfaces de coffrage seront recouvertes d'huile de décoffrage avant que les armatures ou les éléments noyés soient placés .

VIII - Mise en place des armatures . -

a ) Conditions générales :

Tout acier d'armature introduit dans les coffrages sera sans bavure , sans huile , sans défaut de structure et conforme aux exigences du § 3 de cette spécification.

b ) Façonnage :

Le façonnage des armatures sera conforme aux dispositions du B.A. 45 , article 5,21 et aux dessins d'exécution approuvés ( formes , dimensions , position , etc... ).

Les barres comme les étriers ne devront présenter aucune ondulation locale. Ces pièces seront ligaturées assez solidement pour éviter tout déplacement pendant la mise en oeuvre du béton.

Lorsque les armatures seront constituées par des aciers profilés, le façonnage et le perçage des trous pour le passage des armatures secondaires seront effectués conformément aux règles CM 1956 relatives à l'exécution des constructions métalliques. L'entrepreneur devra prendre toutes les précautions nécessaires afin d'obtenir une bonne adhérence et un enrobage parfait sur tout leur périmètre, notamment sous les surfaces horizontales et dans les angles rentrants lors de la mise en place du béton.

c ) Mise en place :

La mise en place des armatures et la distance minimum entre elles et aux parois des coffrages seront conformes aux dispositions du BA 45, article 5, 22 et 5, 23. Les espacements libres entre les barres ou groupes de barres devront être suffisants ( au moins 50 mm ) pour permettre l'introduction des perrisseurs.

L'entrepreneur établira, à ses frais, tous les calages et toutes les liaisons nécessaires pour que la position des armatures soit invariable pendant la mise en place du béton. Des cales en acier ou en béton de petits éléments seront placés à intervalles convenables, entre les lits horizontaux d'acier (l'emploi du bois ou de la pierre est interdit).

De même, il fournira et installera tous les boulons, manchons, canalisations, garnitures intérieures et autres organes fixés à demeure qui seront indiqués sur les plans ou nécessaires pour les travaux, à moins qu'il soit spécifié comme devant être fournis ou posés par un autre Corps d'Etat.

IX - Composition du béton . -

Le béton devra avoir une résistance à la compression de  $180 \text{ Kg/cm}^2$  à 7 jours.

Les proportions de matériaux à employer pour la confection de  $1 \text{ m}^3$  de béton à base de barytine dont la courbe granulométrique s'inscrit à l'intérieur des limites prescrites seront les suivantes :

Sable fin 0/3	350 Kg
Gravier 3/8	985 Kg
Gravillon 8/15	985 Kg
Caillou 15/30	920 Kg
Ciment CPA 250/315	300 Kg
Eau	120 l
Plastifiant	1 l. 75

Les agrégats seront pesés et non mesurés en volume. Suivant les conditions météorologiques, la quantité d'eau pourra être modifiée. Le contrôle de la teneur en eau sera effectuée à l'aide du cône d'Abrams. La mesure de l'affaissement se fera 5 minutes après le démoulage. La moyenne des affaissements mesurés ne devra pas être inférieure à 2 cm.

X - Fabrication et mise en place du béton . -

a ) La fabrication du béton sera conforme aux dispositions recommandées dans le BA 45, article 5,31.

Les bétonnières seront si possible d'un type à axe horizontal à moins que l'entreprise possède déjà un malaxeur à axe vertical.

La vitesse de rotation de la cuve de la bétonnière devra permettre l'homogénéisation du mélange dans un temps de malaxage normal ; ce temps ne devra pas excéder 5 minutes .

L'introduction de l'eau de gachage dans la bétonnière sera faite par un ouvrier choisi parmi la main-d'oeuvre qualifiée. Une passerelle judicieusement disposée à l'avant de la machine permettra à cet ouvrier d'examiner facilement le contenu de la cuve et d'y ajouter lentement l'eau jusqu'à ce que la consistance du mélange soit convenable.

b ) Un grand soin sera apporté au chargement des wagonnets , dumper ou benne . Il se fera en versant le contenu de la cuve de la bétonnière sur un plan presque vertical suivi d'une goulotte de longueur supérieure à 50 cm , sinon la ségrégation des agrégats arrivera invariablement .

Le transport du béton depuis le lieu de fabrication jusqu'au lieu d'emploi sera exécuté sans modifier sa consistance et son homogénéité . Tout système de transport de béton par pompage ou méthode similaire sera catégoriquement interdit .

c ) Avant mise en place du béton , tous les coffrages seront nettoyés et débarrassés des chutes de bois , de béton , ou autres matières étrangères et seront approuvés par l'ingénieur responsable des travaux . L'intérieur des coffrages sera abondamment mouillé. On évitera la formation de flaque d'eau et celles qui subsisteraient seront asséchées.

Des paliers seront prévus judicieusement près des coffrages pour y déposer le béton et le cas échéant le mélanger de nouveau avant d'être déposé dans les coffrages. Des goulottes seront utilisées pour éviter les jets de pelle trop longs et prévenir la séparation des divers éléments du béton.

d ) Le béton sera utilisé avant tout commencement de prise. Celui qui aurait commencé à durcir sera rejeté.

Le béton sera déposé en continu suivant des courbes si possible horizontales n'excédant pas 30 cm d'épaisseur de manière à éviter les déplacements de béton déjà serré ou des accumulations de béton frais .

A travers l'épaisseur entière de chaque couche et dans quelques centimètres de la couche du dessous appliquer une pervibration à très haute fréquence , ( 16 à 20.000 V mn ). La pénétration des aiguilles sera verticale et à intervalles réguliers afin d'obtenir une homogénéisation parfaite de la masse du béton . En outre , l'extraction des aiguilles du béton s'effectuera très lentement pour ne pas provoquer des trous ou des poches de laitance.

La durée de la pervibration sera juste suffisante pour accomplir un compactage complet et une bonne adhésion du béton aux aciers ( arrêter la pervibration quand la laitance de ciment reflue à la surface ).

On évitera l'excès de pervibration qui a pour effet de provoquer la ségrégation.

L'entrepreneur devra posséder des pervibrateurs supplémentaires du type agréé par le maître d'oeuvre , en nombre suffisant pour parer aux défaillances, ainsi qu'un compresseur de secours pour la production d'air comprimé.

Pendant le bétonnage les interruptions seront réduites au maximum. Chaque couche de béton frais sera placée sur la précédente encore molle. Les joints de reprises seront faits seulement aux endroits autorisés et exécutés conformément aux plans. Avant chaque reprise de bétonnage , les surfaces du béton précédemment mis en place seront nettoyées à vif par un brossage métallique et au besoin piquées.

L'ancien béton sera longuement arrosé pour qu'il soit imbibé avant d'être mis en contact avec le béton frais . L'emploi de barbotine de ciment ou de mortier sera interdit mais on pourra modifier le dosage de la première couche en contact avec la surface de reprise en diminuant si possible le diamètre des gros agrégats.

#### XI - Protection du béton -.

a ) Après sa mise en place, le béton et les coffrages seront maintenus en atmosphère humide jusqu'à l'obtention du durcissement normal et pour éviter des fissures de retrait . A défaut de produit spécial formant pellicule étanche à l'évaporation, on pourra protéger le béton à l'aide de sacs mouillés et d'une couche de sable humide. Les formes en acier seront protégées contre une excessive évaporation de l'eau. L'humidité constante sera exigée pendant 7 jours dans les conditions atmosphériques normales . L'arrosage intermittent sera interdit.

b ) En période de froid , des précautions spéciales seront prises jusqu'à ce que la prise soit complète et l'on arrêtera toute nouvelle coulée . Lorsque la température de la journée s'abaissera à + 5°C le bétonnage sera en principe interrompu sauf si l'entreprise dispose de moyens efficaces pour maintenir une température supérieure à 5°C pendant une durée d'au moins 8 jours après le bétonnage. Les faces supérieures des parties récemment bétonnées seront recouvertes de matériaux isolant du gel.

A la reprise du travail , toutes les parties qui auront subi les atteintes de la gelée seront démolies.

#### XII - Décoffrage . -

En aucun cas , les coffrages ou étais ne seront enlevés avant que le béton n'ait acquis une résistance suffisante pour supporter son propre poids et les contraintes auxquelles il sera soumis immédiatement après le décoffrage .

Les résultats des essais de contrôle convenable pourront être utilisés comme preuve que le béton a atteint une résistance suffisante . L'enlèvement des coffrages sera fait progressivement et par efforts purement statiques.

XIII - Finition . -

Les nids d'abeilles et les surfaces poreuses seront repiqués , saturés d'eau et remplis avec un mortier composé de ciment et d'agrégats fins dans les mêmes proportions que le béton décrit dans ces spécifications et avec un minimum d'eau .

Toutes les surfaces seront nettoyées à l'eau savonneuse à l'aide de brosses dures .  
Toutes les taches et incrustations seront enlevées . On rincera à l'eau claire .

## BETON DE BARYTINE AVEC INCORPORATION DE RIBLONS

### 1 ) Introduction . -

Au début de l'année 1958 , alors que la construction de l'accélérateur se terminait le S.T.I. proposait au Département Saturne à Saclay un nouveau type de béton pouvant résoudre le problème de la protection biologique du synchrotron à protons . ( 71 ).

Le béton , à composition mixte de barytine et d'agrégats métalliques , produits d'estampage , de découpage et de poinçonnage , permettait , en effet , de réaliser toute une gamme de bétons allant du simple béton de barytine à 3,6 au béton de fer à densité 6,3.

De nombreux essais réalisés soit à Saclay par le laboratoire S.T.I., soit par les laboratoires d'essais des Ponts - et - Chaussées , indiquaient que ce béton possédait de bonnes caractéristiques physiques et que les risques de ségrégation n'étaient pas à craindre si la mise en place était effectuée correctement. (50)

### 2 ) Les agrégats . -

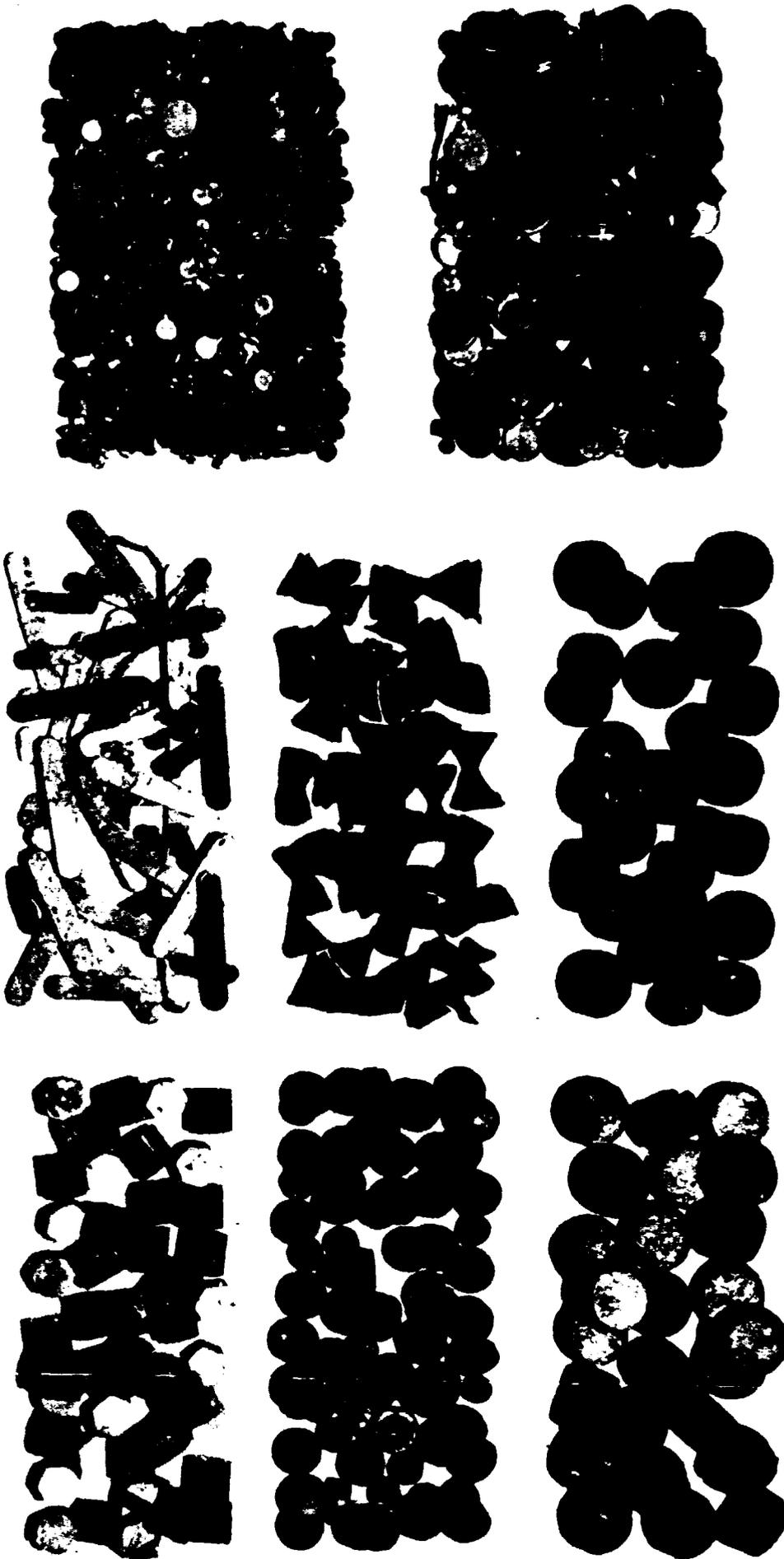
Les agrégats utilisés pour confectionner ce béton sont : la barytine (voir le chapitre précédent ) et les agrégats métalliques dénommés " riblons ". Les riblons se comportent comme des matériaux inertes car ils ne contribuent pas aux réactions chimiques produisant le phénomène de prise de la masse du béton.

Comme le montre la figure 16 , les agrégats d'acier sont utilisés principalement comme gros agrégats et sont constitués de matériaux de récupération , de débouchures de tôles métalliques , ou de déchets d'estampage ( 49 ). Pour la plupart , les éléments étaient plats et circulaires ayant un diamètre maximum de 25 mm et une épaisseur de 15 mm . Le lot n° 3 était composé de débouchures de cornières Dexion de 2 mm d'épaisseur et de différentes longueurs . Certains lots étaient composés d'éléments de formes variées (débouchures d'écrous et éléments hexagonaux , etc. . ).

Les agrégats livrés au laboratoire étaient rouillés et gras . Les essais préliminaires nous indiquaient que la rouille n'avait pas d'effet sur l'hydratation des ciments .

Le temps de prise de la pâte contenant une certaine quantité de rouille est légèrement plus important que pour la pâte normale mais demeure dans le temps fixé par les normes.

Comme nous le verrons dans les applications , la graisse adhérente aux agrégats ne nous a jamais causé de surprise . Nous avons constaté que la pervibration à haute fréquence débarrassait les agrégats des matières grasses qui remontaient à la surface du béton avec la laitance . Les agrégats observés après mise en place , surtout le type n° 3 , étaient d'un éclat remarquable . Le malaxage y contribue également.



1. - Petite mitraille de  $\phi$  1,6 à 12.  
 $D_a = 3,55$  ;  $D_c = 4,40$  ;  $D_s = 7,7$

2. -- Petite débouchure  $\phi$  4 à 20.  
 $D_a = 3,49$  ;  $D_c = 4,31$  ;  $D_s = 7,66$

3. - Débouchures Cornières Dexion.  
 $e = 2\text{mm}$  ;  $l = 10\text{mm}$  ;  $L = 52-14-10$   
 $D_a = 3,27$  ;  $D_c = 4,04$  ;  $D_s = 7,36$

4. - Débouchures d'écrous .  
 $e = 15\text{ mm}$  ;  $l = 20\text{mm}$  ;  $L = 35\text{ mm}$   
 $D_a = 2,57$  ;  $D_c = 3,37$  ;  $D_s = 7,54$

5. - Débouchures d'estampage .  
 $\phi = 25\text{ mm}$  ;  $e = 7\text{ mm}$   
 $D_a = 3,41$  ;  $D_c = 3,87$  ;  $D_s = 7,30$

6. - Éléments de barre hexagonale.  
 $l = 14\text{mm}$  ;  $h = 15\text{ mm}$   
 $D_a = 4,19$  ;  $D_c = 4,88$  ;  $D_s = 7,80$

7. - Petite débouchure d'estampage.  
 $\phi = 15\text{ mm}$  ;  $e = 6\text{ mm}$   
 $D_a = 3,4$  ;  $D_c = 3,9$  ;  $D_s = 7,35$

8. - Galets ( poinçonnage ).  
 $\phi = 25\text{ mm}$  ;  $e = 15\text{ mm}$   
 $D_a = 4,23$  ;  $D_c = 4,91$  ;  $D_s = 7,67$

Figure . 16 - Principaux agrégats métalliques utilisés dans la confection des bétons lourds.

Caractéristiques des Agrégats :-

a) Analyses granulométriques . ( fig. 17 ).

Ne sont instructives que pour les catégories comprenant des éléments de dimensions variées . Les riblons livrés soit au laboratoire , soit sur le chantier, étant de diverses provenances et de dimensions quelconques , nous nous sommes efforcés de les répartir en deux classes principales , l'une de 4 à 12 mm et l'autre de 12 à 30 mm.

Quand les riblons de mêmes dimensions étaient livrés en grande quantité , ils formaient à eux seuls une catégorie bien distincte ( par exemple , les n°3 et 4 ).

Analyse Catégorie n° 1

Module	Ø Passoire	Refus cumulés %	Tamisats %
42	16	0	100
40	10	1,3	98,7
39	8	50	50
38	6,30	81	19
35	3,15	98	2
32	1,60	99	1
29	0,80	100	0

Catégorie n° 2

44	25	0	100
43	20	39,2	60,8
42	16	40,7	59,3
40	10	68,5	31,5
39	8	79	21
38	6,3	82	18
35	3,15	96	4
34	2,50	100	0

Catégorie n° 3

47	50	20	80
45	31,5	53	47
40	10	61	39
39	8	100	0

Catégorie n° 4

44	25	7	93
43	20	90	10
42	16	94	6
40	10	100	0

MOULINS

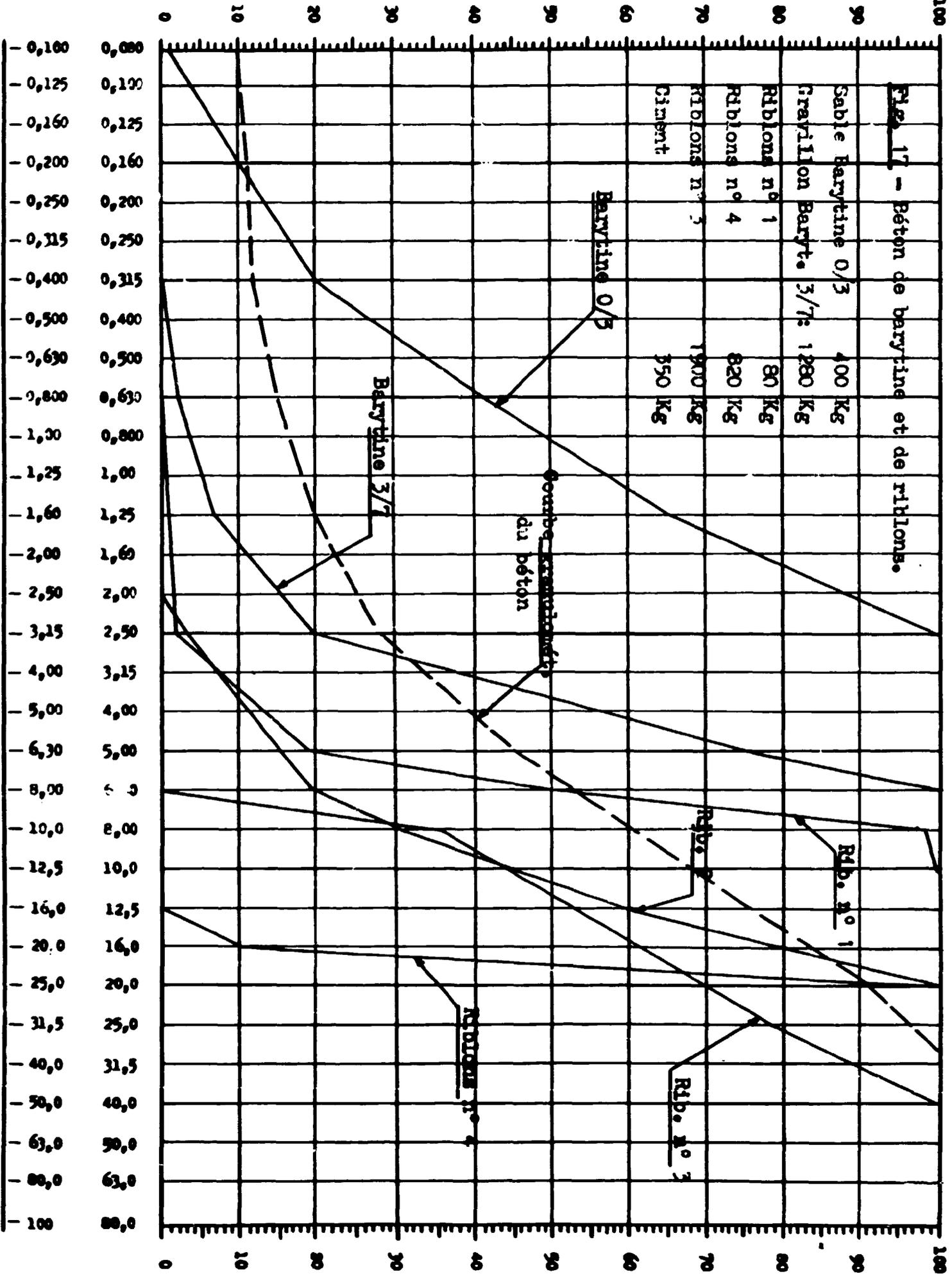
SECTION BÉTON DE PROTECTION

# ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE

POURCENTAGES PASSANTS

PASSANTS

SIEUS



**Fig. 17 - Béton de barytine et de rbbblons.**

Sable Barytine 0/3	400 Kg
Gravillon Baryt. 3/7	1280 Kg
Rbblons n° 1	80 Kg
Rbblons n° 4	820 Kg
Rbblons n° 3	1900 Kg
Ciment	350 Kg

Courbe granulométrique du béton

Barytine 3/7

Barytine 0/3

Rbbl. n° 1

Rbbl. n° 2

Rbbl. n° 3

Rbblons n° 4

POURCENTAGES PASSANTS

b) Densités spécifiques et apparentes .

Toutes les densités spécifiques ( $D_g$ ), densités apparentes non tassées ( $D_a$ ) et densités apparentes tassées ( $D_c$ ) sont données dans le tableau fig. 16 pour chaque catégorie de riblons.

On remarquera que les éléments ayant un excellent coefficient volumétrique sont ceux qui possèdent les meilleures caractéristiques (n° 6 et 8). Malheureusement, nous n'avons reçus que quelques tonnes de ces riblons.

La catégorie n° 3, composée de plaquettes a une très mauvaise densité apparente. Par contre, sa densité apparente tassée est bonne et explique la raison de son utilisation dans nos bétons.

Les plus mauvais éléments sont les catégories 4 et 5 qui nous ont toujours donné des bétons de densité plus faible.

Composition du béton . -

Après la détermination des caractéristiques physiques des agrégats, il restait à rechercher la sélection des proportions des matériaux inertes composant le béton désiré.

Dans le cas du béton lourd, à base de barytine les proportions étaient fonction de deux facteurs principaux - la densité maximum et la maniabilité. Ici, le problème était un peu différent. Il consistait à obtenir le maximum de densité en incorporant le moins possible de riblons, l'excédant étant de la barytine (béton économique), la maniabilité et les caractéristiques physique demeurant excellentes.

Connaissant les maxima des densités apparentes tassées de chaque agrégat, il était possible d'établir des proportions théoriques valables pour une densité de béton donnée. La solution consistant à remplir les vides laissés par les agrégats métalliques par un mortier de barytine nous a donné les meilleurs résultats (fig. 12), pour les bétons de densité supérieure à 4,70. Pour les densités inférieures, l'utilisation du 7/15 est recommandée.

La mise en place est très facile, la maniabilité excellente et le danger de ségrégation inexistant si la pervibration n'est pas trop prolongée.

La figure 18 donne les proportions de barytine et de riblons en fonction de la densité. Ce diagramme a été réalisé d'après de nombreux essais avec un dosage en ciment de 350 Kg et une quantité d'eau de 110 litres par  $m^3$ .

Pour les fortes densités, l'emploi de grenaille de fonte est nécessaire. Nous avons utilisé des grenailles n° 0, 16 et 50, correspondant à des diamètres moyens d'environ 4 mm, 1 mm et 0,30 mm. Leur composition élémentaire comprend 94 % de fer, 2,9 % de carbone, 0,75 % de phosphore et 1,5 % de silicium.

Leur densité apparente tassée varie de 3,90 (n° 0) à 5 (n° 50), la densité spécifique étant de 7,40.

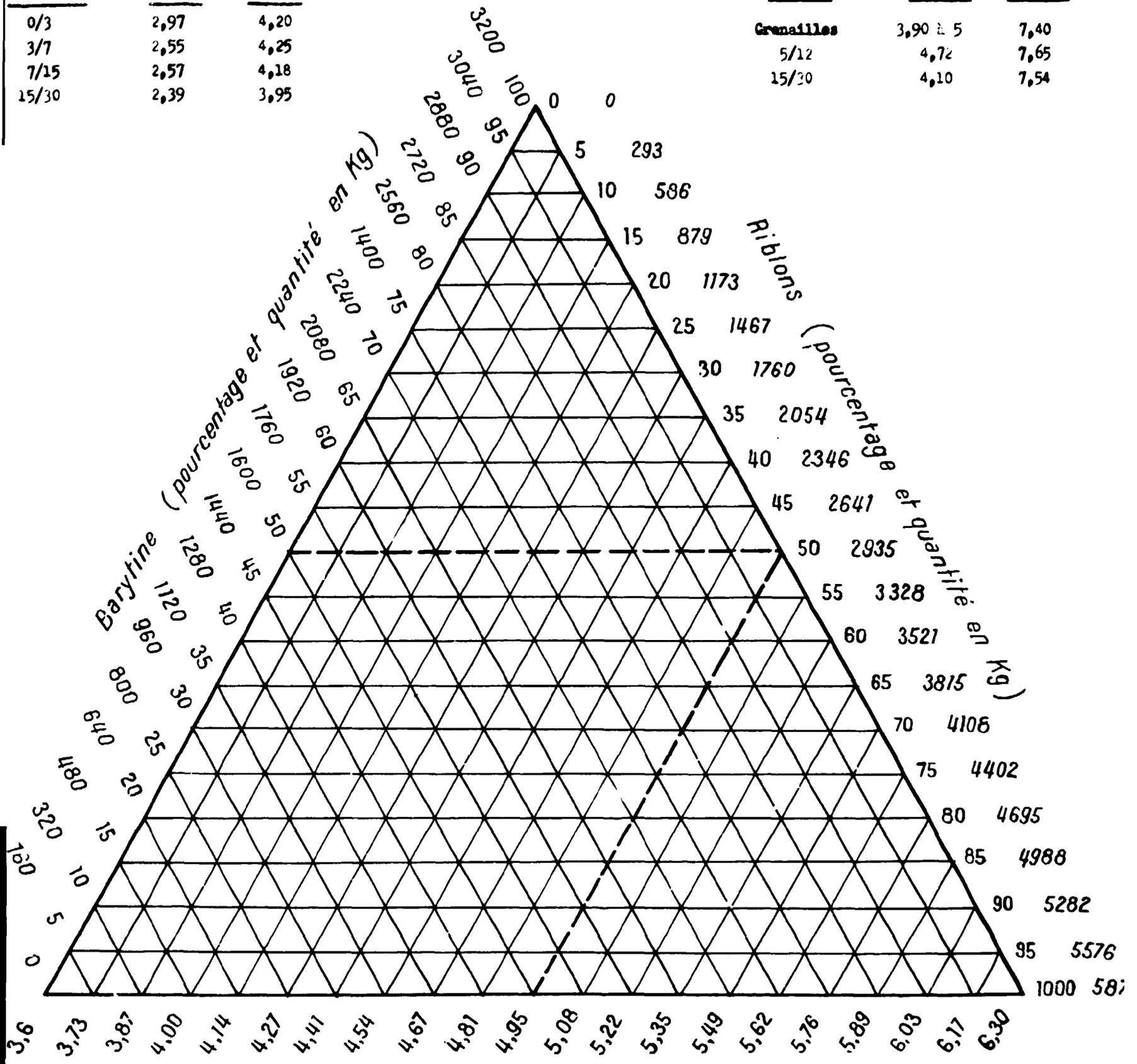
Des études de mortiers de fonte ont été faites pour contrôler la stabilité. Les essais sont satisfaisants dans l'ensemble).

REPRESENTATION TRIANGULAIRE DES DENSITES APPARENTES DES DIFFERENTS BETONS COMPOSES  
EN FONCTION DE LEUR TENEUR EN BARYTINE ET EN RIBLONS



Dimensions des Barytines	Densité App. tassée	Densité Spécif.
0/3	2,97	4,20
3/7	2,55	4,25
7/15	2,57	4,18
15/30	2,39	3,95

Dimensions des Riblons	Densité App. tassée	Densité Spécif.
Grenailles	3,90 à 5	7,40
5/12	4,72	7,65
15/30	4,10	7,54



Densités apparentes ( Béton à 28 jours)

Nota: béton dosé à 350 Kg de ciment.

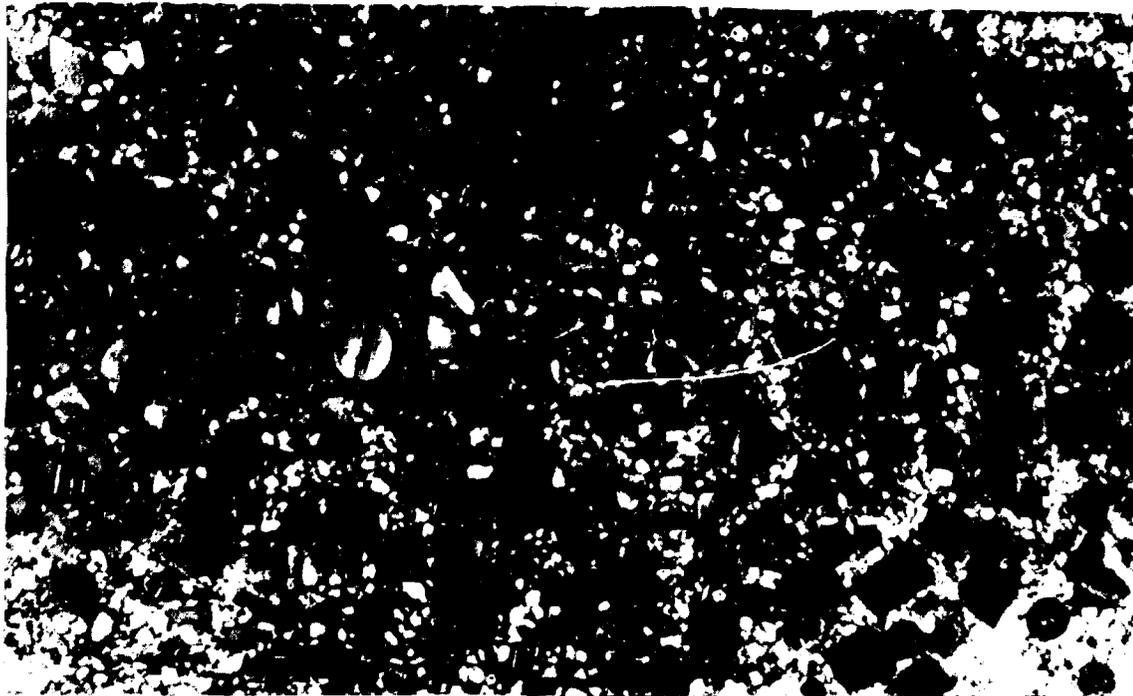


Figure.19 - Surface polie d'un bloc de béton montrant la répartition des agrégats métalliques et de barytine.

Afin de contrôler les risques de ségrégation, des éprouvettes prismatiques de 20 x 30 de section et de 80 cm de hauteur ont été coulées avec un dosage de 2.500 Kg de riblons, 1.800 Kg de barytine et 350 Kg de ciment. Le béton a été mis en place, le moule disposé debout (arête de 80 cm verticale). La détermination expérimentale du centre de gravité du prisme a permis de constater que le béton était homogène.

Dosage de quelques bétons.

Dosage proposé par la laboratoire des Ponts et Chaussées :

Ciment	350 Kg	
Riblons 10/50	2500 Kg	Densité à la confection : 4,65
Barytine 15/30	360 Kg	Densité à 7 jours : 4,62
- 7/15	400 Kg	Densité à 28 jours : 4,62
- 0/3	505 Kg	
Eau	130 l.	
Plastocrète	1,75 l.	

Résistance à la compression à 7 jours	: 205 Kg/cm <sup>2</sup>
- - à 28 jours	: 215 -
Résistance à la traction à 7 jours	: 20 -
- - à 28 jours	: 25 -

Nous n'avons pas adopté la méthode des Ponts et Chaussées qui, à notre avis, n'est pas intéressante (utilise trop d'agrégats de fer). Les dosages suivants sont ceux étudiés à Saclay et utilisés dans la pratique.

1 ) Utilisation des agrégats 3 et 5 .

Barytine 0/2	400 Kg.	Densité humide : 4,85 Difficile mise en place Résistance à la compression : à 10 jours . = 230 Kg/cm <sup>2</sup> à 28 jours . = 250 Kg/cm <sup>2</sup>
Barytine 2/7	1280 Kg.	
Ribbons n° 3	900 Kg.	
Ribbons n° 5	1900 Kg.	
Ciment CPA 250/315	350 Kg	
Eau	110 l.	
Plastifiant	1,75 l.	

2 ) Utilisation des agrégats 1 - 3 - 5.

Barytine 0/2	400 Kg	Densité humide : 4,90 Bonne mise en place Résistance à la compression : à 28 jours : 290 Kg/cm <sup>2</sup> à 90 jours : 410 Kg/cm <sup>2</sup> Résistance à la traction : à 28 jours : 28 Kg/cm <sup>2</sup>
Barytine 2,7	1280 Kg	
Ribbons n° 1	80 Kg	
- n° 5	1900 Kg	
- n° 4	820 Kg	
Ciment CPA 250/315	350 Kg	
Eau	110 l.	
Plastifiant	1,75 l.	

3 ) Utilisation des agrégats 1 - 2 - 8

Barytine 0/2	400 Kg	Densité humide : 4,92 Bonne mise en place Résistance à la compression : à 23 jours : 350 Kg/cm <sup>2</sup> à 90 jours : 457 Kg/cm <sup>2</sup> Résistance à traction : à 28 jours : 33 Kg/cm <sup>2</sup>
Barytine 2,7	1280 Kg	
Ribbons n° 1 et 2	1000 Kg	
- n° 8	1800 Kg	
Ciment CPA 250/315	350 Kg	
Eau	110 l.	
Plastifiant	1,75 l.	

4 ) Utilisation des agrégats 1 - 2 - 6 .

Fonte n° 50	350 Kg	Densité sèche : 6,34
Fonte n° 16	900 Kg	
Ribbons n° 1	700 Kg	
- n° 2	900 Kg	
- n° 6	3000 Kg	
Ciment	350 Kg	
Eau	155 l.	
Plastocrète	1,75 l.	



Figure .20 - Section d'un bloc de béton de densité 4,82 montrant l'arrangement des riblons avec la barytine.

#### CONCLUSION.

Ces bétons avec incorporation de riblons , de mise en place plus facile que le béton de barytine , seront choisis , de préférence , pour des densités supérieures à 3,70. Ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques et leur mise en oeuvre est facile. Une difficulté persiste encore - la protection contre la corrosion des agrégats apparents sur les surfaces de béton décoffré.

### BETON DE BARYTINE AVEC GRENAILLE DE FONTE

Ce béton est utilisé pour accroître la densité de la protection en béton de barytine dans des régions où la mise en place est délicate et difficile à contrôler, par exemple, sous les fenêtres d'observation de cellules à haute activité, autour des canaux, etc....

Son emploi est limité surtout à cause de son prix très élevé, la tonne de grenaille coûtant 55.000 Fr.

A titre indicatif, nous précisons les caractéristiques d'un béton de barytine + grenaille de fonte :

1/ Composition pour 1m<sup>3</sup> -

Barytine 5/20	2.180 Kg	
Grenaille n° 0	805	
Grenaille n° 16	540	Densité humide : 4,50
Grenaille n° 50	450	Mise en place facile par pervibration ou table vibrante.
Ciment	350	
Eau	140 l.	
Plastocrète	1,75 l.	

Résistance à la compression à	7 jours	215 Kg/cm <sup>2</sup>
à	28 jours	338
à	90 jours	347

Résistance à la flexion	à 7 jours	37 kg
	à 28 jours	28
	à 90 jours	80

Retrait à l'air sec à 50 % hygrométrie	à 7 jours	- 0,082 x 10 <sup>-4</sup>
	à 28 jours	- 1,105 x 10 <sup>-4</sup>
	à 90 jours	- 1,687 x 10 <sup>-4</sup>

Retrait dans l'eau douce à 18° C	à 7 jours	+ 1,295 x 10 <sup>-4</sup>
	à 28 jours	+ 1,569 x 10 <sup>-4</sup>
	à 90 jours	+ 1,985 x 10 <sup>-4</sup>

## BETONS A BASE DE MINERAL DE FER

### INTRODUCTION

Dans ce chapitre sont présentées les propriétés physiques de plusieurs types de bétons lourds confectionnés avec des minerais de fer utilisés comme agrégats inertes. Ces minerais sont des magnétites, la ferrophosphore, les ilménites, les limonites-goethite, les itabirites.

Les bétons réalisés avec ces matériaux ont des densités s'échelonnant entre 3,5 à 4,8.

Si en Amérique, ces bétons furent à maintes reprises utilisés dans la protection de réacteurs ou de cellules à haute activité - (69), il n'en est pas de même en France. A part le béton de protection de la pile EL 3 à Saclay, confectionné avec des minerais d'Itabira, ces bétons n'ont donné lieu qu'à des études de laboratoire (53). Les résultats des essais faits sur plusieurs de ces bétons sont développés dans les pages qui suivent.

#### 1° - Le béton au ferrophosphore :

a) Introduction : La construction de laboratoires à très haute activité surtout en Amérique (61) a contraint les constructeurs à se procurer des agrégats très lourds permettant d'obtenir des densités de bétons supérieures à 4,5. Ces bétons devaient avoir de bonnes caractéristiques mécaniques et être maniables pour répondre à la complexité de la protection - (fenêtres, hublots, portes, trappes, ferrailage; etc....).

En Amérique, le béton au ferrophosphore a eu une grande vogue grâce à ses excellentes résistances mécaniques (58) et à la non oxydation de l'agrégat. En effet, il semble qu'un béton réalisé avec des agrégats métalliques et comme liant un ciment à base d'oxychlorure de magnésium (63) (dont le but est d'augmenter la teneur en eau du béton) voit ses résistances mécaniques décroître après 6 mois d'âge.

Cette décroissance de résistance est causée par l'oxydation progressive des agrégats détériorant les propriétés d'adhérence du liant.

C'est pourquoi le béton avec riblons et incorporation de fines de fonte a été remplacé dans certaines applications par un béton confectionné à l'aide d'agrégats de phosphore de fer non commerciale, matériau très stable aux réactions chimiques de l'eau et de ciment.

Malheureusement, en France, ce matériau est assez rare. Son prix de revient quoique modeste à la source arrive à être très élevé quand l'agrégat est prêt à l'emploi (transport, concassage, criblage, manutention, pertes, taxes, etc...).

L'étude sur le béton au ferrophosphore entreprise en 1958 avait pour but de déterminer la composition et la dimension des agrégats permettant d'obtenir un béton de densité maximum et de connaître ses caractéristiques mécaniques et nucléaires.

b) Les agrégats .

Un lot de 16 tonnes de ferro-phosphore commandé par le C. E. A. fut livré au Laboratoire d'essais . Ce matériau logé en fût se présentait sous forme de blocs parallélépipédiques de dimensions approximatives 20 x 20 x 35 cm. De nombreux blocs étaient d'ailleurs cassés par le transport et les manutentions. Le concassage du ferro-phosphore confirmait sa fragilité et nous fournissait un pourcentage de fines très important. Une partie de ces fines n'ont d'ailleurs pas été utilisées , rendant le prix de revient du ferro-phosphore encore plus onéreux.

Le produit concassé fut ensuite criblé et reparti en trois grandes classes :

- un sable 0/5
- un gravillon 5/15
- un gravier 15/30

ayant respectivement les densités spécifiques de 6,5 - 6,42 et 6,40.

c) Analyse granulométrique (Fig. 21 )

Sable 0/5

Module	Ø Passoire	Tamis en microns	Refus cumulés %	Tamisats %
38	5,3		0	100
35	3,15		21	79
32	1,60		50	50
29	0,80		75	25
26		315	98	2
23		160	99	1
20		80	100	0

Gravillon 5/15

42	16		0	100
41	12,5		17	83
40	10		48	52
39	8		70	30
38	6,3		88	12
37	5		96	4
36	4		100	0

Gravier 15/30

45	31,5		0	100
44	25		4	96
43	20		35	65
42	16		100	0

d) Composition du béton.

A partir des trois classes d'agrégats (0/5-5/15-15/30), deux compositions de béton ont été déterminées, l'une à granulométrie continue par la méthode FAURY, et l'autre à granulométrie discontinue par la méthode VALLETTE.

Dosages proposés.

Méthode FAURY

Sable 0/5	1050 Kg	Densités apparentes :
Gravillon 5/15	1200 Kg	à 7 jours 4,83
Gravier 15/30	2180 Kg	à 28 jours 4,81
Ciment CPA /250/315	350 Kg	à 90 jours 4,80
Eau	160 l.	
Plastocrète	1,750 Kg	

Méthode VALLETTE

Sable 0/5	1420 Kg	
Gravier 15/30	3010 Kg	Densités apparentes :
Ciment CPA/250/315	350 Kg	à 7 jours 4,83
Eau	140 l.	à 28 jours 4,82
Plastocrète	1,750 Kg	à 90 jours 4,80

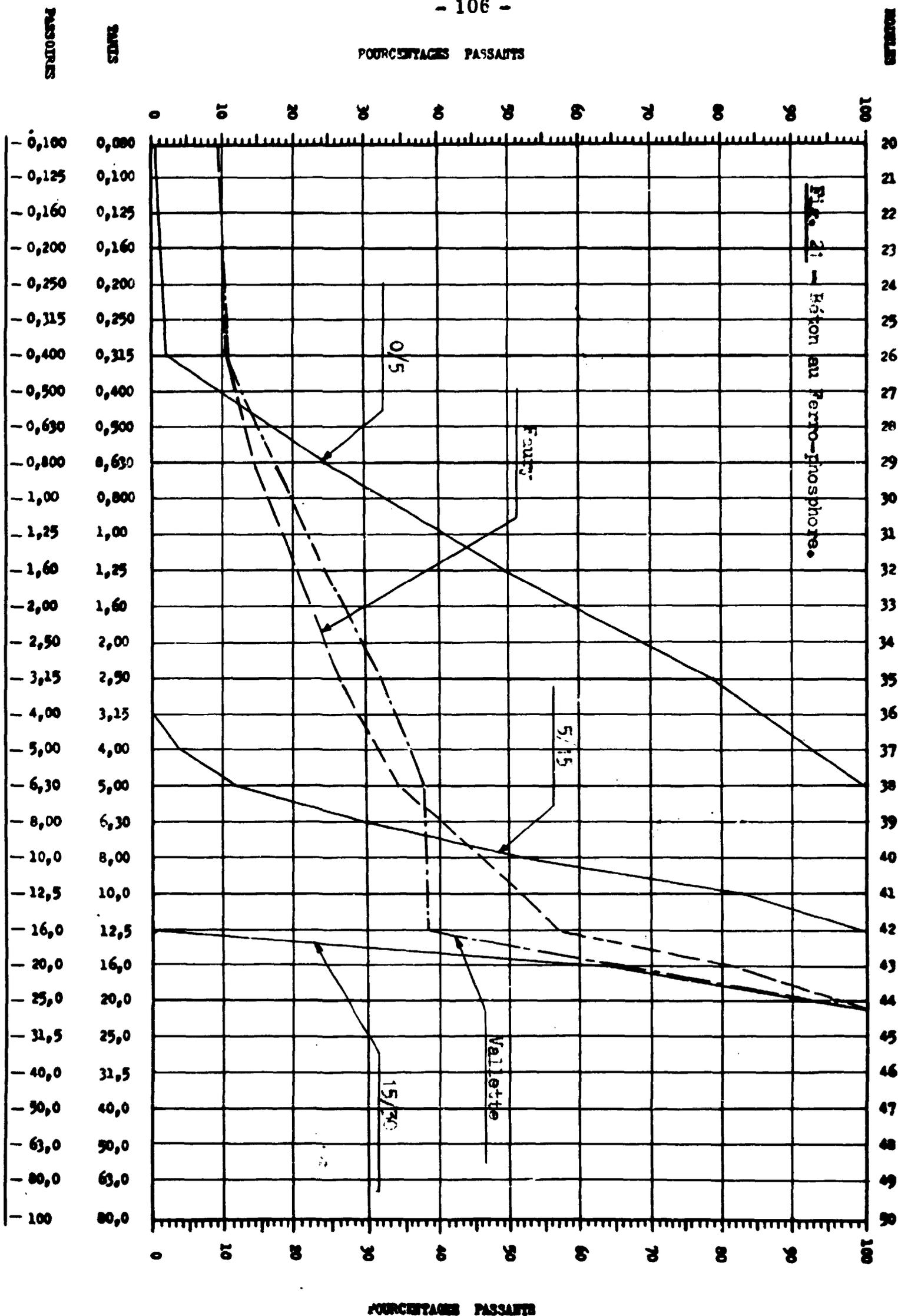
e) Résultats des essais physiques.

1) Compression

	Air humide	7 jours	246 Kg/cm <sup>2</sup>
Faury	" "	28 jours	406 Kg/cm <sup>2</sup>
	" "	90 jours	
	" "	7 jours	278 Kg/cm <sup>2</sup>
Vallette	" "	28 jours	384 Kg/cm <sup>2</sup>
	" "	90 jours	473 Kg/cm <sup>2</sup>
	Air sec à	7 jours	214 Kg/cm <sup>2</sup>
Faury	" "	28 jours	271 Kg/cm <sup>2</sup>
	" "	90 jours	
	" "	à 7 jours	274 Kg/cm <sup>2</sup>
Vallette	" "	28 jours	400 Kg/cm <sup>2</sup>
	" "	90 jours	398 Kg/cm <sup>2</sup>

SECTION NETTE DE PROJECTION

# ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE



POURCENTAGES PASSANTS

2 ) Rupture (essais Brésiliens )

<u>Faury</u>	Air sec à	7 jours	23,5 Kg/cm <sup>2</sup>
	" "	28 jours	31,3 Kg/cm <sup>2</sup>
<u>Vallette</u>	Air humide	7 jours	28 Kg/cm <sup>2</sup>
	" sec	7 jours	30,3 Kg/cm <sup>2</sup>

2) Le béton à base d'ilménite .

C'est au cours de l'étude de la protection du synchrotron à protons à Saclay que le S.T.I. a été amené pour la première fois en France à étudier le béton à base d'ilménite .

La Société Minerais et Métaux nous fit parvenir du gisement du Lac Allard (Canada) près de 700 Kg d'ilménite de qualités différentes - afin de nous permettre de fournir au département "Saturne " le complément d'informations relatives à ce béton.

La densité maximum atteinte par ce béton ne pouvant excéder 3,90 , il fut décidé de ne pas utiliser l'ilménite pour réaliser la protection de l'accélérateur . Cependant , cette étude nous permis d'avoir des résultats intéressants pouvant convenir pour des protections de densité 3,80.

Les pages qui suivent donnent les principales caractéristiques des bétons à base d'ilménite .

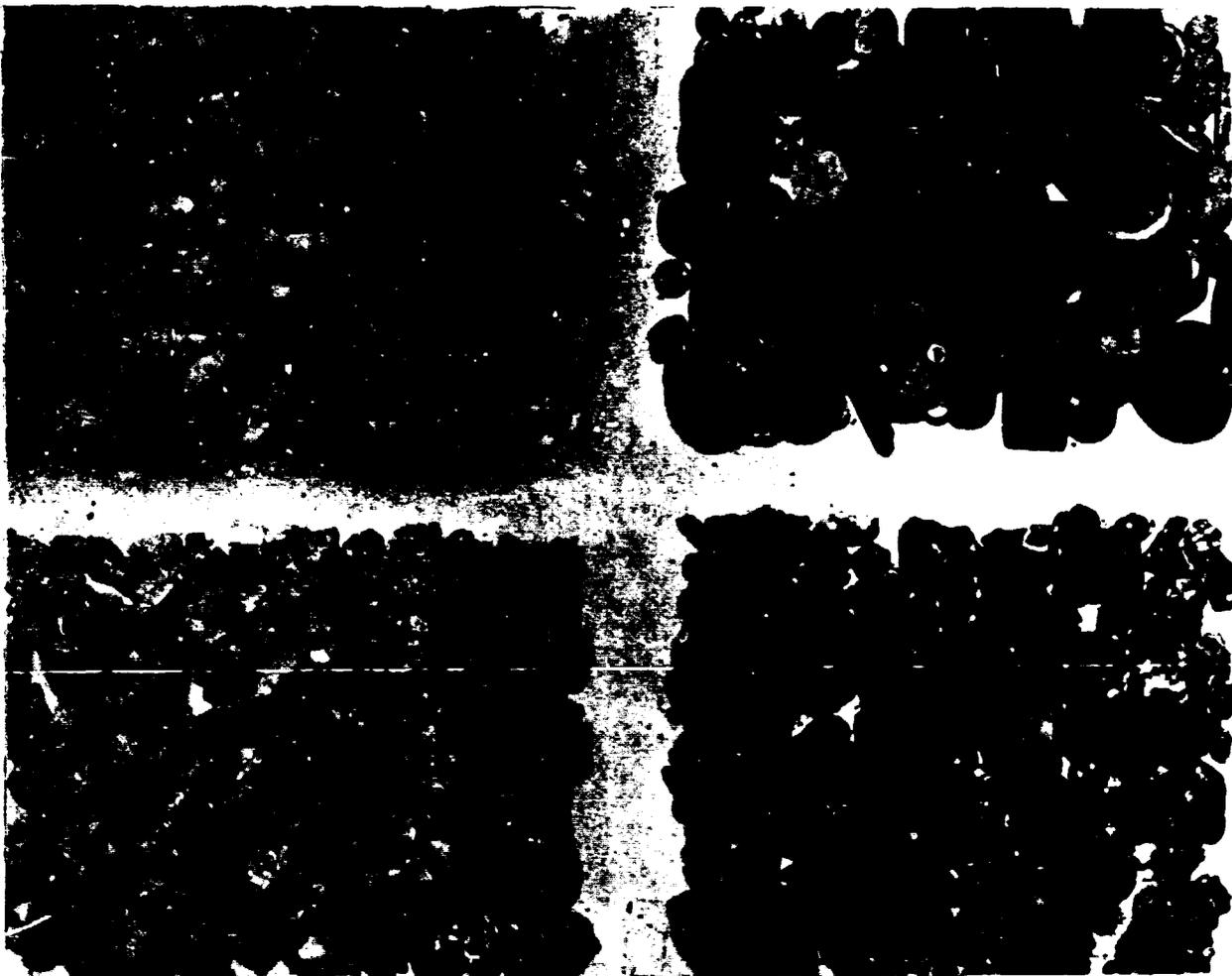


Fig. 22 - Les principaux Matériaux Lourds . de gauche à droite ( la barytine et les riblons.  
( le ferro-phosphore et l'ilménite.

a ) Analyses granulométriques.

Qualité n° 1            Minerai tout venant    0 - 76 mm.

Il y a tout d'abord lieu de préciser que nous ne parlerons ici que de la qualité n° 1 améliorée ( voir chapitre prospection p. 21 ).

Granulométrie indiquée par la Q.I.T. ( Canada )

<u>Dimensions</u>	<u>Refus cumulés %(moy)</u>	<u>Tamisats %</u>
3 "    ( 76 mm )	2,5	95 - 100
2 "    ( 51 mm )	12,5	80 - 95
1 "    ( 25 mm )	32,5	50 - 85
3/8"   ( 9,5 mm )	45	40 - 70
4 mesh ( 4,7 mm )	72,5	15 - 40
14 mesh ( 1,17 mm )	87,5	5 - 20
48 -    ( 0,29 mm )	91	3 - 15
100 -   ( 0,15 mm )	95,5	1 - 10
200 -   ( 0,07 mm )	97,5	0 - 5

Granulométrie correspondant à l'échantillon reçu.

<u>Module</u>	<u>Ø Passoire</u>	<u>Refus cumulés en %</u>	<u>Tamisats %</u>
48	63	0	100
47	50	6,7	93,3
45	31,5	19,8	80,2
44	25	22	78
41	12,5	29	71
38	6,3	54,8	45,2
35	3,15	72	28
32	1,60	85	15
29	0,80	92	8
26	0,40	94	6

Poids spécifique moyen annoncé     $P_s = 4,5$   
Poids spécifique moyen mesuré         $p_s = 4 \text{ à } 4,6$   
Densité en vrac sans tassement       $D = 2,84$

Le poids spécifique varie suivant la grosseur et la nature des morceaux. Il est inférieur à 4,4 pour les éléments supérieurs à 12 mm et peut descendre à 4.

Qualité n° 2 : Minerai tout venant exempt de fines 10/51.

( nous n'avons pas reçu cet échantillon ).  $p_s = 4,5$ .

Qualité n° 3 : Minerai broyé , granulométrie inférieure à 10 mm.

Granulométrie indiquée par Q. I. T.

<u>Dimensions</u>	<u>Refus cumulés % (moyen)</u>	<u>Tamisats %</u>
3/8 ( 9,5 mm )	2,5	95 - 100
3 mesh ( 6,7 mm )	22,5	65 - 90
4 mesh ( 4,7 mm )	45	40 - 70
8 mesh ( 2,37 mm )	70	15 - 45
14 mesh ( 1,17 mm )	80	10 - 30
28 mesh ( 0,59 mm )	87,5	5 - 20
48 mesh ( 0,29 mm )	91	3 - 15
100 mesh ( 0,15 mm )	95	0 - 10
200 mesh ( 0,07 mm )	97	0 - 6

Granulométrie correspondant à l'échantillon reçu

<u>Module</u>	<u>Ø Passoire</u>	<u>Tamis en <math>\mu</math></u>	<u>Refus cumulés %</u>	<u>Tamisats %</u>
41	12,5		0	100
39	8		7	93
38	6,3		27,5	72,5
35	3,15		58	42
32	1,60		77,5	22,5
29	0,80		87	13
26		315	91	9
23		160	94	6
20		80	97	3

Poids spécifique annoncé  $p_s = 4,3$   
 " " mesuré  $p_s = 4,5$

Si on compare ces résultats à ceux de la qualité n° 1 , on en déduit que la qualité n°3 provient d'un minéral non sélectionné.

Qualité n° 4 : Minéral broyé 0,6/10 mm

Granulométrie indiquée par Q. I. T.

<u>Dimensions</u>	<u>Refus cumulés % (moyen)</u>	<u>Tamisats %</u>
3/8" ( 9,5 mm )	2,5	95 - 100
3 mesh ( 6,7 mm )	22,5	65 - 90
4 mesh ( 4,7 mm )	55	30 - 60
8 mesh ( 2,37 mm )	70	15 - 30
14 mesh ( 1,17 mm )	90	5 - 15
28 mesh ( 0,59 mm )	96,5	1 - 7

Granulométrie correspondant à l'échantillon reçu.

<u>Module</u>	<u>Ø Passoire</u>	<u>Tamis en <math>\mu</math></u>	<u>Refus cumulés %</u>	<u>Tamisats %</u>
41	12,5		0	100
39	8		9	91
38	6,30		39	61
35	3,15		75,5	24,5
32	1,6		92	8
29	0,8		96,5	3,5
26		315	98,5	1,5
23		160	99	1
20		80	99,5	0,5

Poids spécifique moyen annoncé	$p_g = 4,6$
" " " mesuré	$p_g = 4,7$
Densité apparente réelle	$d = 4,61$
" en vrac sans tassement	$D = 2,57$
" " " avec tassement max.	$D_m = 3,04$

Qualité n° 5 : Fines de tamisage 0,15/5 mm.

Granulométrie indiquée par Q.I. T.

<u>Dimensions</u>	<u>Refus cumulés % (moyen)</u>	<u>Tamisats %</u>
4 mesh (4,7 mm)	2,5	95 - 100
28 mesh (0,59 mm)	20	70 - 90
48 mesh (0,29 mm)	50	25 - 50
100 mesh (0,15 mm)	87,5	5 - 20

Granulométrie correspondant à l'échantillon reçu

<u>Module</u>	<u>Tamis en <math>\mu</math></u>	<u>Refus cumulés %</u>	<u>Tamisats %</u>
32	1250	0	100
30	600	6	94
29	630	18,5	81,5
26	315	58	42
23	160	87	13
20	80	95,5	4,5
17	40	99,5	0,5

Poids spécifique moyen annoncé :	$P_g = 4,60$
" " " mesuré	$p_g = 4,70$
Densité apparente réelle :	$d = 4,48$
Densité en vrac sans tassement suivant humidité :	$D = 2,35$ à $2,57$
Densité en vrac avec tassement maximum :	$D_m = 2,91$

b ) Composition du béton .

Les qualités 2 - 4 et 5 sont celles qui semblent devoir convenir le mieux comme granulats lourds ; ce sont , du moins , celles qui sont préconisées par le producteur .

Se basant sur les résultats obtenus au Canada , que nous résumons à la fin du chapitre la Q.I.T. estime qu'un mélange constitué par 85 % d'ilménite , qualité 4 et 15 % d'ilménite , qualité 5 serait celui qui permettrait d'obtenir la meilleure densité de béton.

Nous avons utilisé la plus grande partie des échantillons que nous a envoyés Minerais et Métaux en étudiant le comportement de plusieurs éprouvettes de béton constituées à partir de divers mélanges agrégats/ciments contenant des proportions différentes d'ilménite , qualité 1 ou 2 - 4 et 5 .

1° ) Mélange Q.I.T.

Ilménite n° 4	2950 Kg	85 %	
" n° 5	520 Kg	15 %	D <sub>a</sub> humide = 3,91
Ciment	300 Kg		à 1 jour = 3,84
Eau	150 l.		à 7 jours = 3,81
Plastocrète	1,75		

Mise en place difficile.

2° ) Composition avec qualités 4 et 5 et éléments limités à 25/30 triés de la qualité 1 ou 2 .

( 2 )	( 1 )	
1400 ilménite n° 5	500 Kg	( 1 )
1575 " n° 4	1830 Kg	D <sub>a</sub> à 3 jours = 3,91
525 " 10/30	1200 Kg	à 90 jours = 3,89
275 Ciment	300 Kg	
120 Eau	130 l.	( 2 )
1,75 Plastocrète	1,75 l.	D <sub>a</sub> à 8 jours = 3,86

c ) Résultats des essais .

1 ) Traction. ( Composition n° 1 )

Essais de traction à 7 jours :	21 Kg/cm <sup>2</sup>
à 28 jours :	30 Kg/cm <sup>2</sup>
à 90 jours :	35 Kg/cm <sup>2</sup>

2 ) Retrait ( Composition n° 1 )

	4 J.	10 J.	14 J.	28 J.	90 J.
1	28	180	162	286	
2	54	232	214	340	465
3	36	198	198	320	465

MOULINS

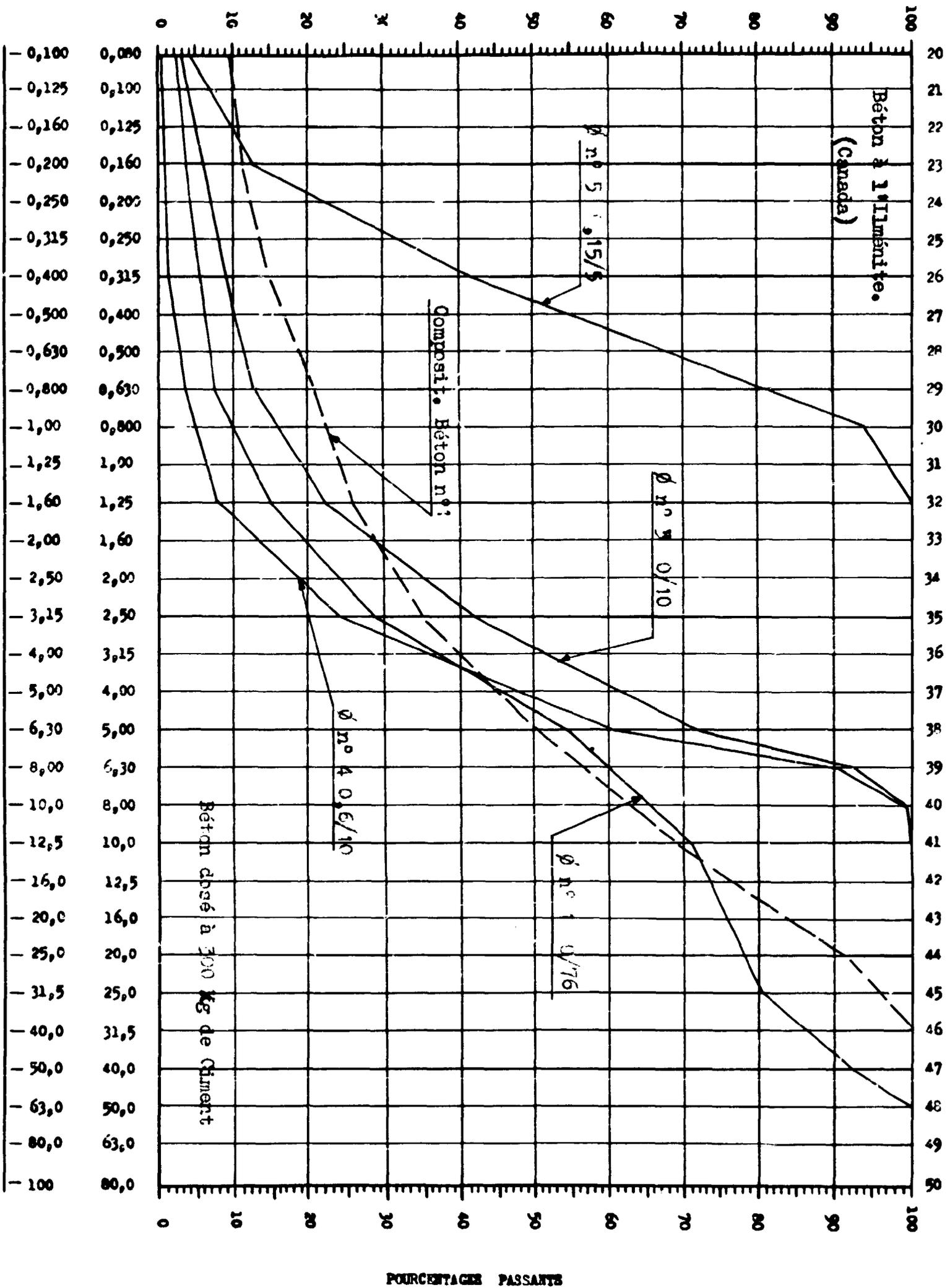
SECTION BÉTON DE PROTECTION

# ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE

POURCENTAGES PASSANTS

MASES

PASSANTS



POURCENTAGES PASSANTS

d) Résultats d'essais canadiens .

La Q.I.T. a fait procéder en Mars 1958 à divers essais par un laboratoire spécialisé de Montréal, " The Warnock Hersey Cy " , dans le but de déterminer la composition du béton le plus dense qui pourrait être obtenu , présentant une résistance d'au moins 3.000 psi (livres par pouce carré ) soit 210 Kg/cm<sup>2</sup> après 28 jours.

Les échantillons utilisés ont été les suivants :

Passant au tamis U. S. Standard	Ech. 1 gros agrégat	Ech. 2 moyen agrégat	Ech. 3 agrégat fin
3 "	100 %		
2 1/2 "	95		
2 "	92,5		
1 1/2 "	87		
1 "	70,5		
3/4 "	61,5		
1/2 "	41		
3/8 "	6,5	100 %	
1/4 "	3,8	75	
4 mesh	2,0	54,6	
8 mesh		20	
16 mesh		7,6	100 %
30 mesh		3,0	78,3
50 mesh		1,0	35,5
100 mesh		0,3	10,2
200 mesh		0,1	0,8

( 2 )

( 4 )

( 5 )

Correspond à qualité 2

Correspond à qualité 4

Correspond à qualité 5

Remarques :

avec une granulométrie un peu plus étendue de part et d'autres.

avec un peu plus de particules 1/4 " à 3/8 "

avec un peu plus de particules très fines.

On a déterminé les densités absolues suivantes :

$p_g = 4,24$  pour l'échantillon 1 ( qualité 2 )

$p_g = 4,60$  " " 2 ( qualité 4 )

Après essais portant sur différents mélanges agrégats/mortiers , le laboratoire a préconisé les mélanges suivants , correspondants à un mètre-cube de béton et contenant chacun 3.525 Kg d'ilmérite :

	Mélange 1	Mélange 5
Ilménite Echant. 1 ( qual. 2 )	-	1.700 Kg 50 %
" " 2 ( " 4 )	3.000 Kg 85 %	1.330 Kg 37,5 %
" " 3 ( qual. 5 )	525 Kg 15 %	435 Kg 12,5 %
Ciment ( $p_g = 3,14$ )	300 Kg	275 Kg
Eau	120 Kg	110 Kg
	3.945 Kg	3.910 Kg

Ces mélanges contiennent en outre un agent entraîneur d'air ( $10 \text{ cm}^3$  par sac de ciment) et de la pozzolithe (  $1/4 \text{ lb}$  par sac ) qui contribuent à augmenter la densité en réduisant au minimum les quantités de ciment et d'eau nécessaires .

Les résultats obtenus en laboratoire sur diverses éprouvettes de béton ont été les suivants :

	<u>Mélange 1</u>	<u>Mélange 5</u>
Facilité de mise en oeuvre	Assez bonne	Très bonne
	247,4 lbs/cu.ft	245,8 lbs/cu.ft
Densité de béton	soit 3,96	soit 3,94
Résistance à la compression		
après 7 jours	2.760 psi.	3.240 psi.

Les résultats obtenus avec le mélange 1 sont améliorés par une pervibration en deux temps : la densité passe alors à 252 lbs/cu.ft , soit 4,04 et la résistance atteint 3.580 psi ( $252 \text{ Kg/cm}^2$  ).

### Conclusion .

L'ilménite doit permettre d'obtenir , d'une manière générale des densités de bétons de l'ordre d'au moins 3,80 .

En comparant cette densité à celles obtenues avec les barytines , on constate que l'emploi d'ilménite à la place de barytine se solde par un gain de densité de béton de l'ordre de 0,25 , ce qui est appréciable.

### 3°) Béton à base de Magnétite .

Le besoin de béton dense pour la construction de plus en plus fréquente de cellules à haute activité nous a amené à étudier les bétons à base de magnétite . Le minerai de magnétite a été sélectionné grâce à son prix de revient économique , permettant d'obtenir le béton lourd le moins cher , de densité voisine de 3,5 . En Amérique , l'usage de ce béton à la place de béton classique pour les protections gamma permet de réduire le coût de celles-ci ( 57 ) . L'incorporation de limonite ou goethite sous forme de sable fin ( 74 ) confère au béton de magnétite des propriétés particulièrement intéressantes et économique pour la protection des piles de recherches . Ces propriétés peuvent être encore améliorées par l'addition de colémanite (52) ou de boro calcite , mais il y a lieu de faire très attention aux modifications de prise du mortier de ces bétons.

En France , nous en sommes au début de l'étude du béton de magnétite (Magnétite de Segré ) et du béton de magnétite avec limonite de Rougé . Nous ne pensons guère dépasser la densité 3,5 ; la qualité de la magnétite de Segré était nettement moins bonne que la magnétite du Nevada (Amérique ) ( 51 ) , permettant d'obtenir des bétons de 225 pci à 255 pci ( 3,60 à 3.83 g/cm<sup>3</sup> ) ( 56 ) .

Néanmoins , les études seront poussées à fond car ses caractéristiques mécaniques sont excellentes et ce béton offre des propriétés nucléaires intéressantes.

a ) Les agrégats .

Les mines de Segré dans la Loire Atlantique sont susceptibles de fournir différentes qualités de minerais :

- Minerai de décarburation : 52,5 à 53 % de Fe.

Echantillon n° 2 0,5/5 mm

- Minerai de haut fourneau à 50 % environ de Fe.

Echantillon n° 3 8,30 mm et n° 4 2,5/8 mm

- Minerai de magnétite concentrée à 64 % environ de Fe

Echantillon n° 6 0/150 microns.

	Densités	n° 2	n° 3	n° 4	n° 6
Densité en vrac ( non tassée		2,30	2,06	1,92	2,3
( tassée		2,96	2,57	2,25	3,2
Densité apparente		3,96	3,85	3,67	
Densité absolue		4,20	4,06	3,80	4,59

Analyses granulométriques .

Echantillon n° 2 - 0,5/5mm.

Module	Ø Passoire	Tamis en µ	Refus cumulés %	Tamisats %
38	6,30		0	100
35	3,15		35	65
32	1,60		63	37
29	0,80		75,5	24,5
26		315	82	18
23		160	87	13
20		80	94,5	5,5

Echantillon n° 3 - 8/30

45	31,5		0	100
44	25		9	91
41	12,5		67	33
38	6,3		96	4
35	3,15		98	2

Echantillon n° 3 - 8/30 ( suite )

Module	Ø Passoire	Tamis en µ	Refus cumulés %	Tamisats %
29	0,80		99	1
23		160	99,5	0,5

Echantillon n° 4 - 2,5/8 mm

41	12,5		0	100
39	8		13	87
38	6,3		54	46
35	3,15		89	11
32	1,60		94	6
29	0,80		95	5
23		160	97	3

Echantillon n° 6 - 0/0,315 .

29	0,80		0	100
26		315	1,5	98,5
23		160	14,5	85,5
20		80	65	35
17		40	75	25

Composition et essai du béton .

Composition proposée :

Ciment	270 Kg	Densité apparente humide	$D_a = 3,57$
Fines n° 6	70 Kg	" " à 28 jours	3,50
Sable n° 2	1120 Kg		
Gravier n° 3	2000 Kg	Résistance à la traction :	
Eau	140 l.	Conservation dans l'eau à 28 jours :	62 Kg/cm <sup>2</sup>
Plastocrète	1,75 l.	" " l'air -	52 Kg/cm <sup>2</sup>

Retrait ( en microns par m. ) du mortier à 600 Kg de ciment et 2.300 Kg de magnétite.

	48 h.	4 j.	7 J.	8 j.	15 j.	28 j.
Gonflement	88	176	228	264	299	352
Retrait	194	422	581	616	793	1038

Le retrait semble très important . Les essais complémentaires le confirmeront.

**NOMENCLATURE DES BETONS LOURDS**

TYPE DE BETON	Prop. gr. agrégats	Prop. pet. agrégats	Ciment Kg.	eau de gachage l.	Densité	Prix du béton (1)		eau conservée en l/m <sup>3</sup>	
						à la T.	au m <sup>3</sup>	Minimum	Maximum
Classique vibré	1.194	694	350	160	2,3	2.480	6.700	50	160
Classique + pandermite	1.210	580	350	160	2,23	17.800	39.700	103	210
Classique + grenaille Fonte	1.380	1.700	350	135	3,50	28.140	98.500	50	130
Barytine	1.905	1.335	300	120	3,55	13.275	47.125	42	120
Barytine + Ferrophosphore	1.960	1.680	350	180	4,10	21.150	87.500	50	180
Barytine + Itabira	2.500	1.030	300	155	3,88	22.200	86.000	42	150
Barytine + Itabira + grenaille	2.600	800/450	300	150	4,20	26.300	110.600	42	150
Barytine + Colémanite + Limonite	2.200	325	360	211	3	16.160	48.500	82	240
Barytine + Riblons	2.800	1.680	350	110	4,85	21.000	105.000	50	110
Barytine + grenaille	2.180	1.780	350	140	4,45	28.900	128.900	50	140
Barytine + riblons + grenaille	4.095	1.240	350	105	5,75	26.430	150.000	50	105
Barytine (prépart)	2.360	615	470	180	3,5				
Itabira	2.350	1.350	350	150	4,1	25.800	106.000	50	150
Itabira + grenaille	2.460	1.860	350	135	4,73	35.900	170.000	50	135
Diellette + grenaille	2.030	1.860	350	140	4,30	30.500	131.000	75	160
Diellette	2.030	970	350	150	3,4	12.300	41.800	80	180
Magnétite	1.860	1.280	300	145	3,45	12.250	42.400	48	160
Ferrophosphore	2.400	2.050	350	160	4,8	27.800	134.000	50	160
Ilménite	2.125	1.425	275	140	3,84	15.780	60.000	39	140
Riblons	3.720	2.150	350	100	6,3	32.746	206.300	50	100

(1) Prix des matériaux entrant dans la confection de 1 m<sup>3</sup> de béton (T.V.A. comprise ou taux réduit. Prix Valeur 1959). Sont exclus, la mise en oeuvre, les coffrages et renforcements, la vibration, l'amortissement du matériel.



## **V - APPLICATIONS PRATIQUES**

- La protection biologique du Synchrotron à Protons " Saturne " .
- Le béton des cellules à très haute activité du " L E C I "

## PROTECTION BIOLOGIQUE DU SYNCHROTRON A PROTONS " SATURNE "

### I - Généralités sur la protection .-

L'aimant et les sections droites sont entourés sur presque la totalité de leur pourtour extérieur d'un mur de béton lourd de 3 mètres d'épaisseur . Il reste suffisant tant que le nombre de particules frappant la cible ne dépasse pas 2 ou 3 fois  $10^{10}$  . Pour les intensités plus grandes , cette protection devra être renforcée et complétée par un mur intérieur et un toit couvrant entièrement l'aimant .

Le projet a été élaboré au début de 1958 avec le concours du Docteur Lindenbaum du B. N. L. et de la S. O. G. E. I. , Bureau d'Etudes Industriel de Saturne .

Les murs de protection ont été conçus , compte tenu de l'expérience acquise à Brookhaven et pour une intensité du faisceau de  $10^{12}$  protons par cycle , en supposant 20 cycles par minute . (68).

La protection comporte quatre parties distinctes ( fig. 1 ) .

- 1 - un mur fixe entourant l'accélérateur sur  $150^\circ$  environ .
- 2 - un mur mobile sur les  $210^\circ$  non protégés par le mur fixe .
- 3 - un renforcement de la protection au droit du mur fixe .
- 4 - un toit de 1,80 m d'épaisseur sur l'ensemble de la machine .

Les deux premières parties sont actuellement réalisées ; les deux autres sont à l'état de projet .

Le mur fixe est en béton classique de densité 2,3 de 5 m. de hauteur et de 2m. d'épaisseur .

Dans la zone où la forme du mur est susceptible de varier suivant les nécessités de l'expérimentation , le mur est composé de blocs mobiles de dimensions et formes diverses , de manière à former un mur de 3 m. de hauteur et de 3 m. d'épaisseur en béton de densité moyenne 4,2 .

La construction de ce mur a posé un problème complexe de mise en oeuvre de béton à très haute densité . L'étude des différents bétons que l'on pouvait envisager d'utiliser a été confiée au Service des Travaux et Installations ( S. T. I. ) en collaboration avec la S. O. G. E. I.

Après avoir éliminé le béton à l'ilménite à cause de sa densité trop faible , et le béton au ferrophosphore en raison de son prix de revient trop élevé , le béton de barytine et d'agrégats métalliques a finalement été préconisé.



Le Hall et la Protection autour de l'anneau de Saturne . .

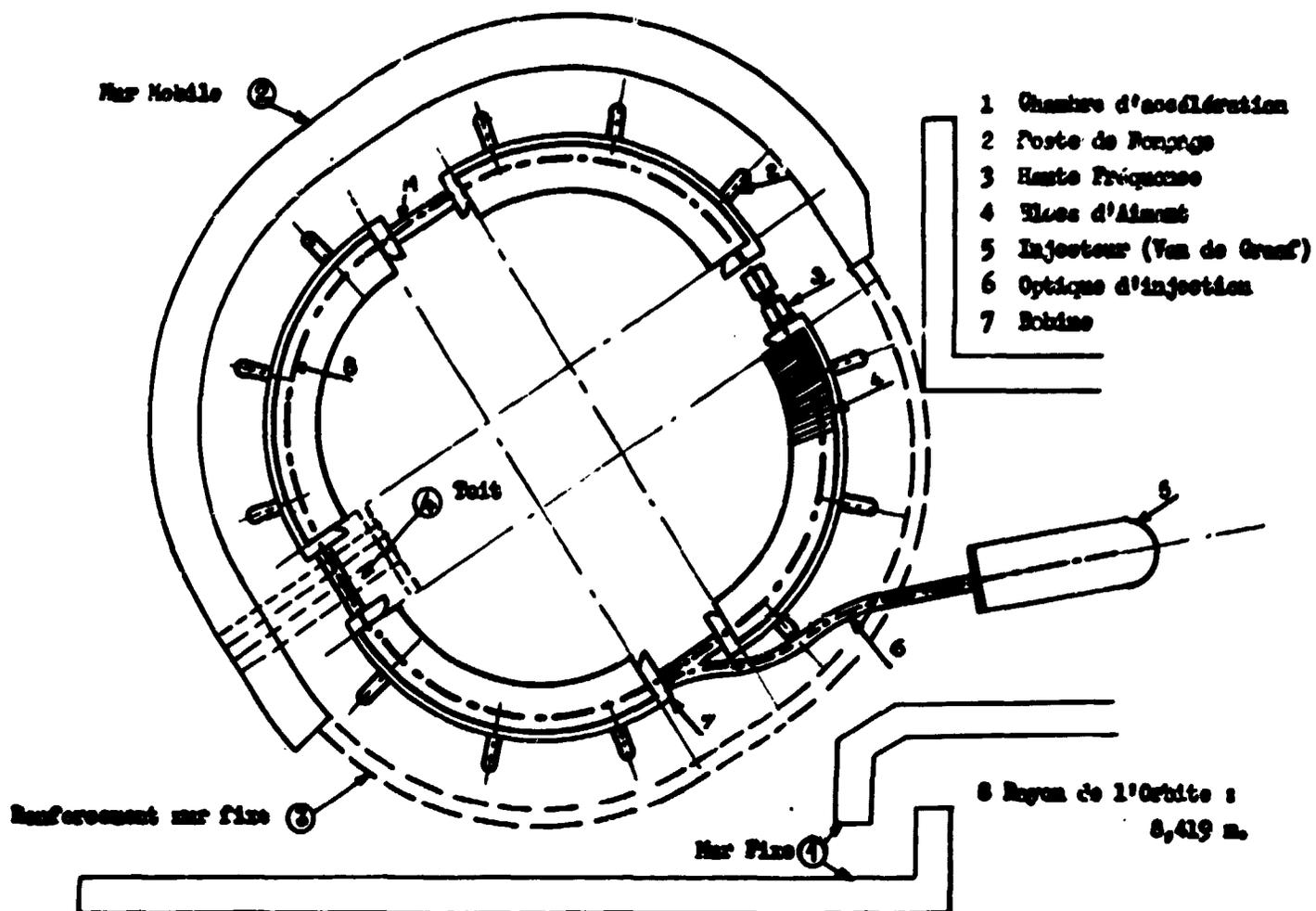


Fig. 1 - Schéma du Synchrotron à Protons.

II - Le mur mobile -

a) Forme théorique ( fig. 2 ).

Cette forme suppose l'accélérateur fonctionnant seul , sans aucune expérience de physique nécessitant des déformations et des traversées de la protection .

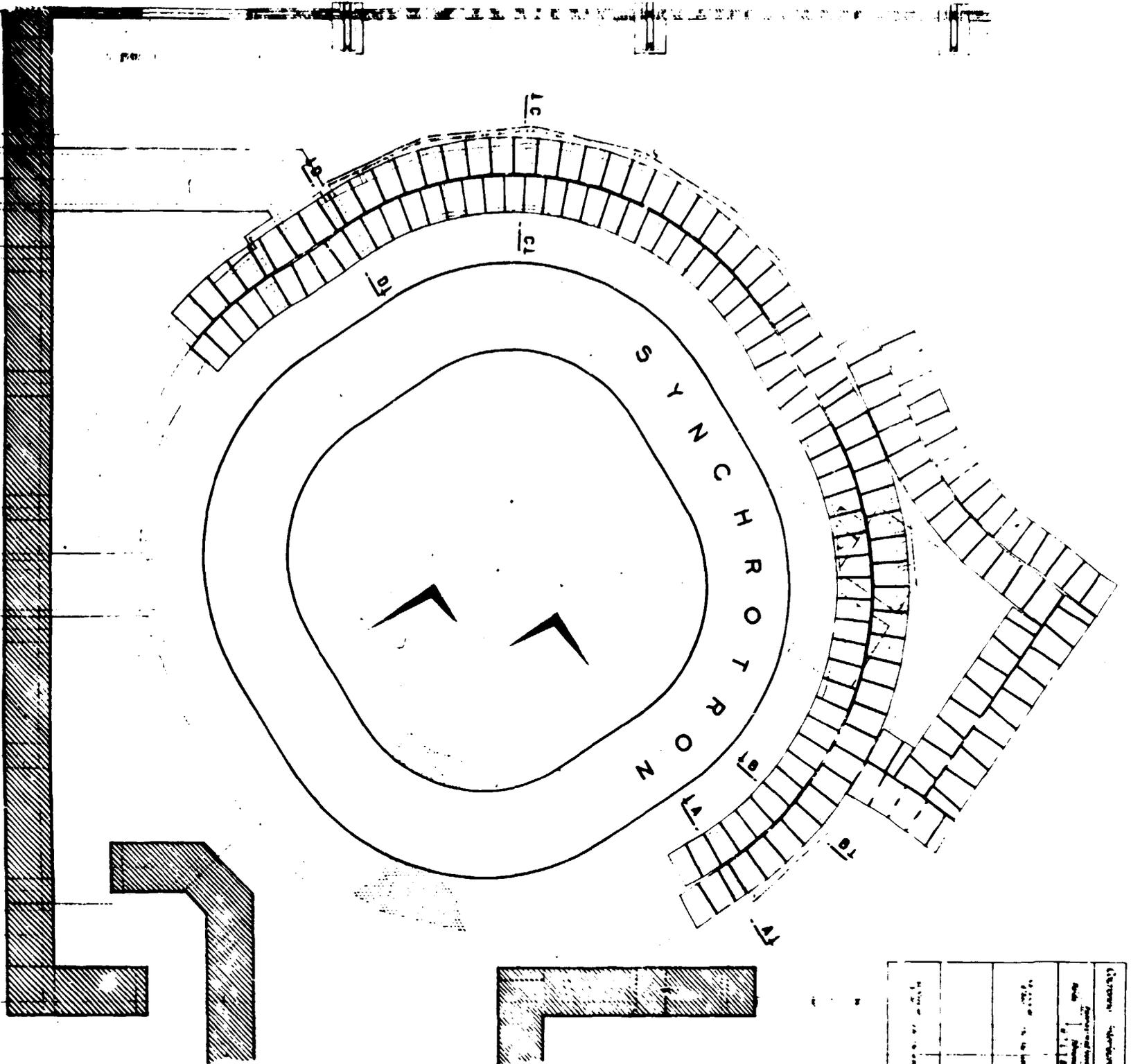
Elle consiste en un secteur de couronne de rayon moyen de 13,25 m , de 3 m. d'épaisseur et de 3 m . de hauteur entourant l'aimant sur un angle de 210 ° environ.

Elle comprend 3 couches superposées .

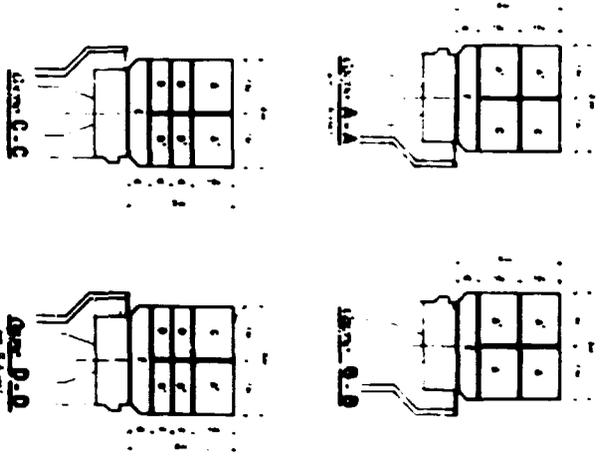
1 ère couche : de 0 à 0,60 m. Elle comprend 67 blocs , type E et 6 blocs type F , tous en béton de barytine de densité 3,55 .

Ces blocs de forme trapézoïdale de 3 m. de long et 0,60 de hauteur ont une largeur moyenne de 0,80 m. pour le type E et la moitié pour le type F.

2 ème couche : de 0,60 m. à 1m80 . Cette couche située au niveau de passage du faisceau est composée de plusieurs types de blocs . Elle comprend des blocs type A , C , B et D tous en béton de barytine sur la couronne extérieure et des blocs type A' , C' , B' , D' en béton aux agrégats métalliques sur la couronne intérieure . Ces blocs de forme trapézoïdale ont tous 1,20m. de hauteur sauf les quelques blocs type B, D, B', D'



Designation	Dimensions	Material	Notes
1	100 x 100 x 10	Aluminum	Support plate
2	150 x 150 x 15	Steel	Shielding block
3	200 x 200 x 20	Concrete	Outer shielding
4	250 x 250 x 25	Lead	Inner shielding
5	300 x 300 x 30	Brass	Structural support
6	350 x 350 x 35	Aluminum	Access panel
7	400 x 400 x 40	Steel	Base plate
8	450 x 450 x 45	Concrete	Foundation
9	500 x 500 x 50	Lead	Final shielding
10	550 x 550 x 55	Aluminum	Outer casing



**ALUMINUM SUPERGRIDS**  
**SATURNIC**  
**MAN DE PROTECTION**  
**TRUQUE**

Outil de mesure de longueur et de diamètre  
 INSTRUMENTS DE MESURE  
 100-01  
 10/20/50

qui n'ont que 0,60 m. La composition de cette couche étant variable, il est difficile de donner le nombre exact de blocs la formant. A titre indicatif, il peut y avoir environ quelques 126 blocs.

3<sup>ème</sup> couche : de 1m80 à 3 m. Elle comprend 36 blocs type A et 5 blocs type C, tous en béton de barytine de densité 2,55 situés sur la couronne extérieure et 61 blocs type A' en béton aux agrégats métalliques de densité 4,80. Les blocs de forme trapézoïdale ont tous 1,20 m. de hauteur et 1,50 m. de longueur et une largeur moyenne de 1m. pour le type A, 0,875 m pour le type A' et 0,50m pour le type C. Comme on peut le remarquer, tous les blocs ont une section horizontale trapézoïdale. Cette forme a deux avantages :

D'une part, de permettre la réalisation de sections rectangulaires par la disposition " tête - bêche ",

D'autre part, de faciliter l'encastrement d'un bloc dans une portion de mur préalablement ouverte.

Les tolérances générales de dimensions et de planéité étant de l'ordre de quelques millimètres, on arrive ainsi à réaliser une juxtaposition satisfaisante.

Toutefois, afin d'éviter des fentes continues radiales à des hauteurs voisines de celles du faisceau (1,49 m.) on réalise dans les deux couches supérieures un chicanage des blocs (voir photo n° 3).

a) Déformations et traversées ( photo n° 5 ) :

L'implantation d'aimants et de collimateurs pour les expériences de physique impose des déformations parfois importantes de tout un secteur du mur mobile. Bien entendu, ces déformations plus ou moins complexes ne peuvent plus être réalisées par juxtaposition parfaite des blocs. Dans la mesure du possible, l'épaisseur est ramenée partout à l'épaisseur réglementaire. On utilise pour cela des blocs de petites dimensions type G et K ainsi que des briques de plomb et de béton.

Les éléments de mur destinés au passage des faisceaux sont réalisés à l'aide de blocs de béton traversés longitudinalement par un fourreau en acier usiné, d'un diamètre de 205 mm. (blocs type R et S). Ces fourneaux peuvent être obturés par des bouchons de fonte, soit par des collimateurs.

Les traversées se faisant entre 1,20 m. et 1,80 m. de hauteur (1,49 m. théorique) on peut être amené à couper la 2<sup>ème</sup> couche en deux, d'où l'utilisation de deux blocs type B à la place d'un A.

III - Casemates ( photo n° 6 ) -

Le mur mobile, tel qu'il vient d'être décrit est en principe, suffisant pour assurer la protection de personnel contre les radiations ionisantes. Il n'est, par contre, pas assez efficace (surtout par l'absence du toit) pour atténuer le bruit de fond régnant autour des appareils.

Pour diminuer ce bruit de fond (provenant surtout de la diffusion dans l'air) au profit des faisceaux secondaires entrant dans les appareils de physique, nous avons été amenés à réaliser des " Casemates " mobiles dont les murs et le toit sont formés par des blocs et des poutres parallélépipédiques.

Ces poutres de 6 m. de longueur et de 0,6 m. x 0,6 m. de section sont en béton de barytine armé, pouvant résister à une surcharge de 3 T/m.

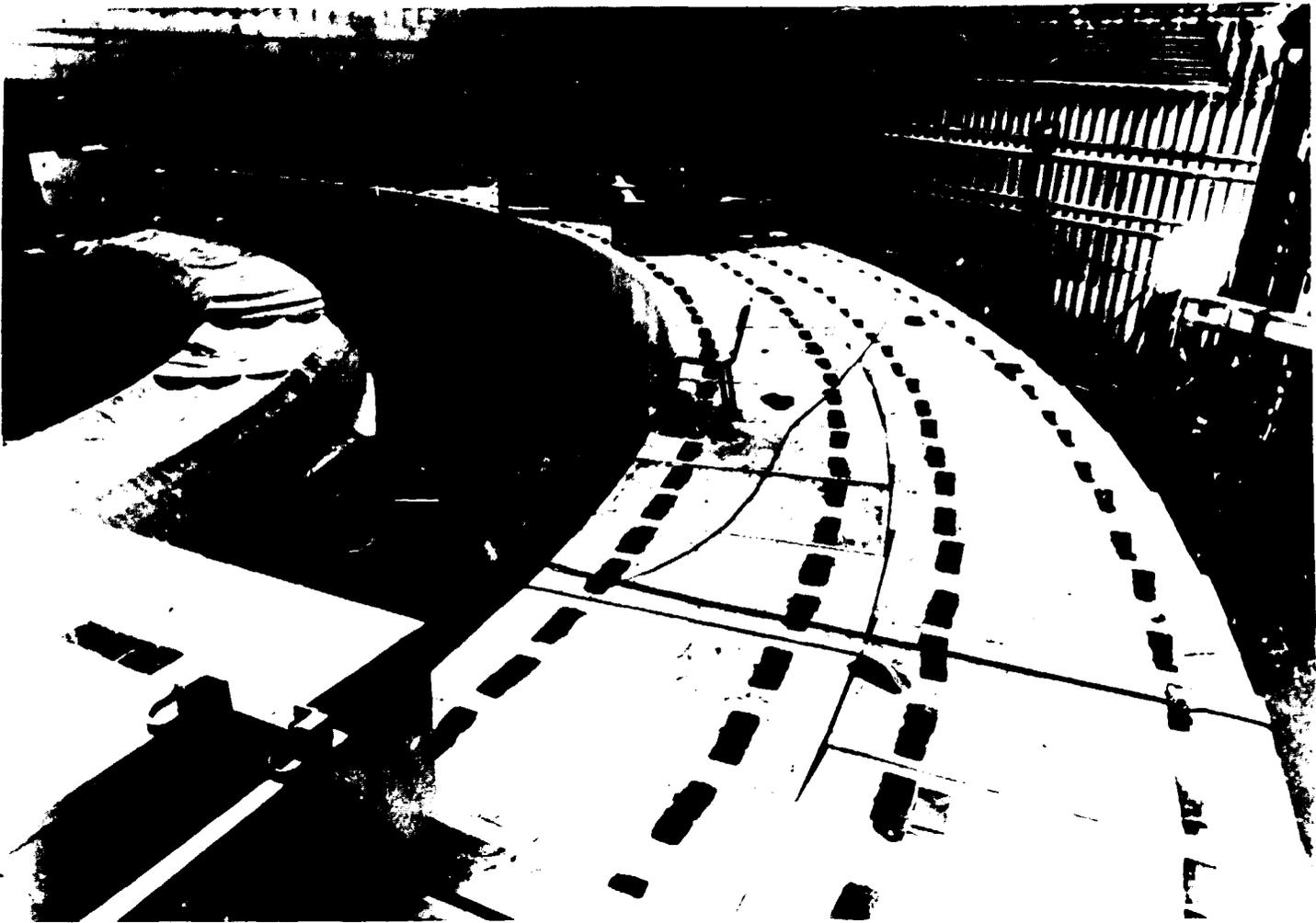


Figure. 3 - Vue de la partie supérieure du mur montrant les décrochements .-

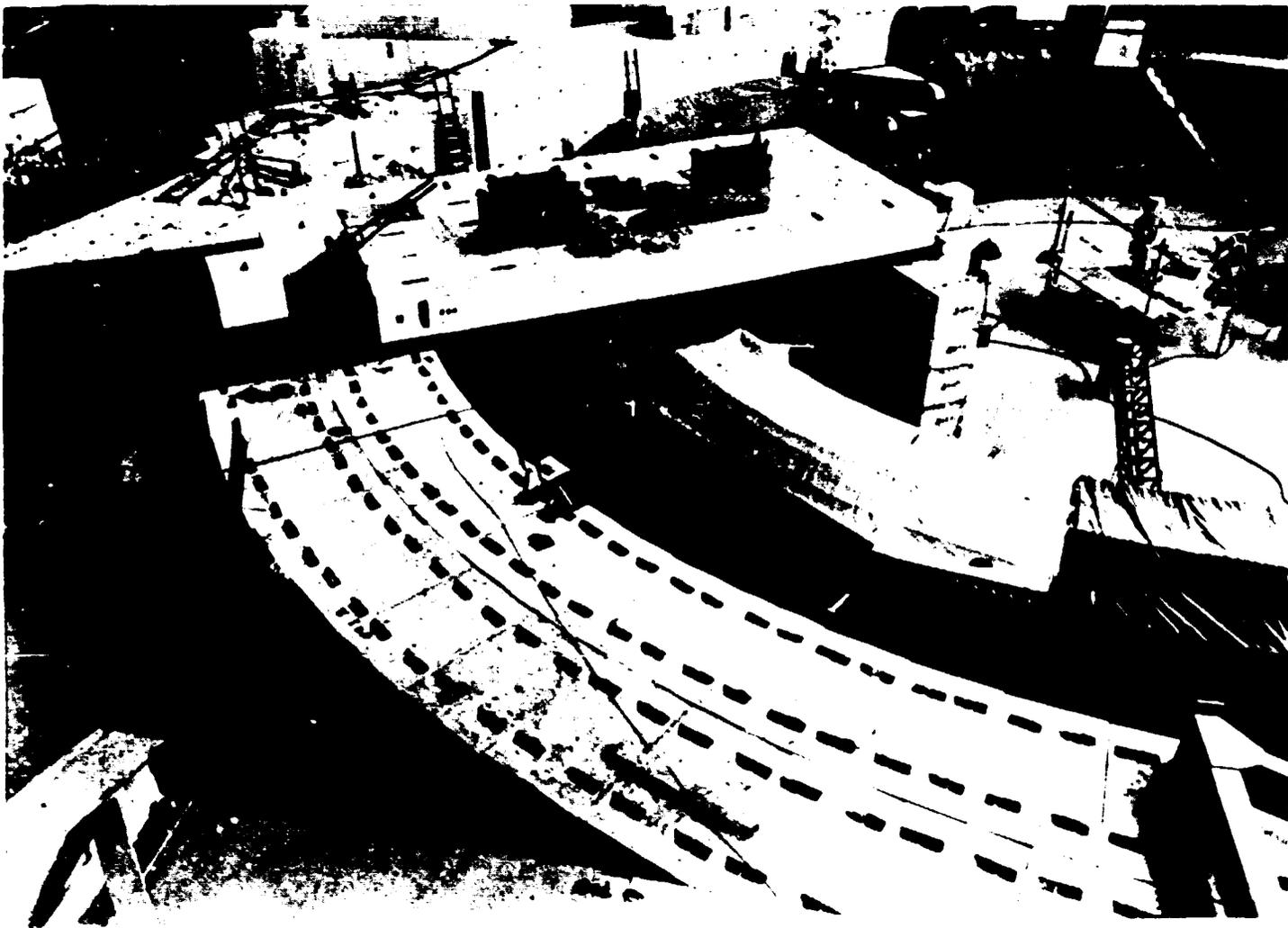


Figure n° 4 - Vue générale du mur et d'un élément de toit expérimental. -

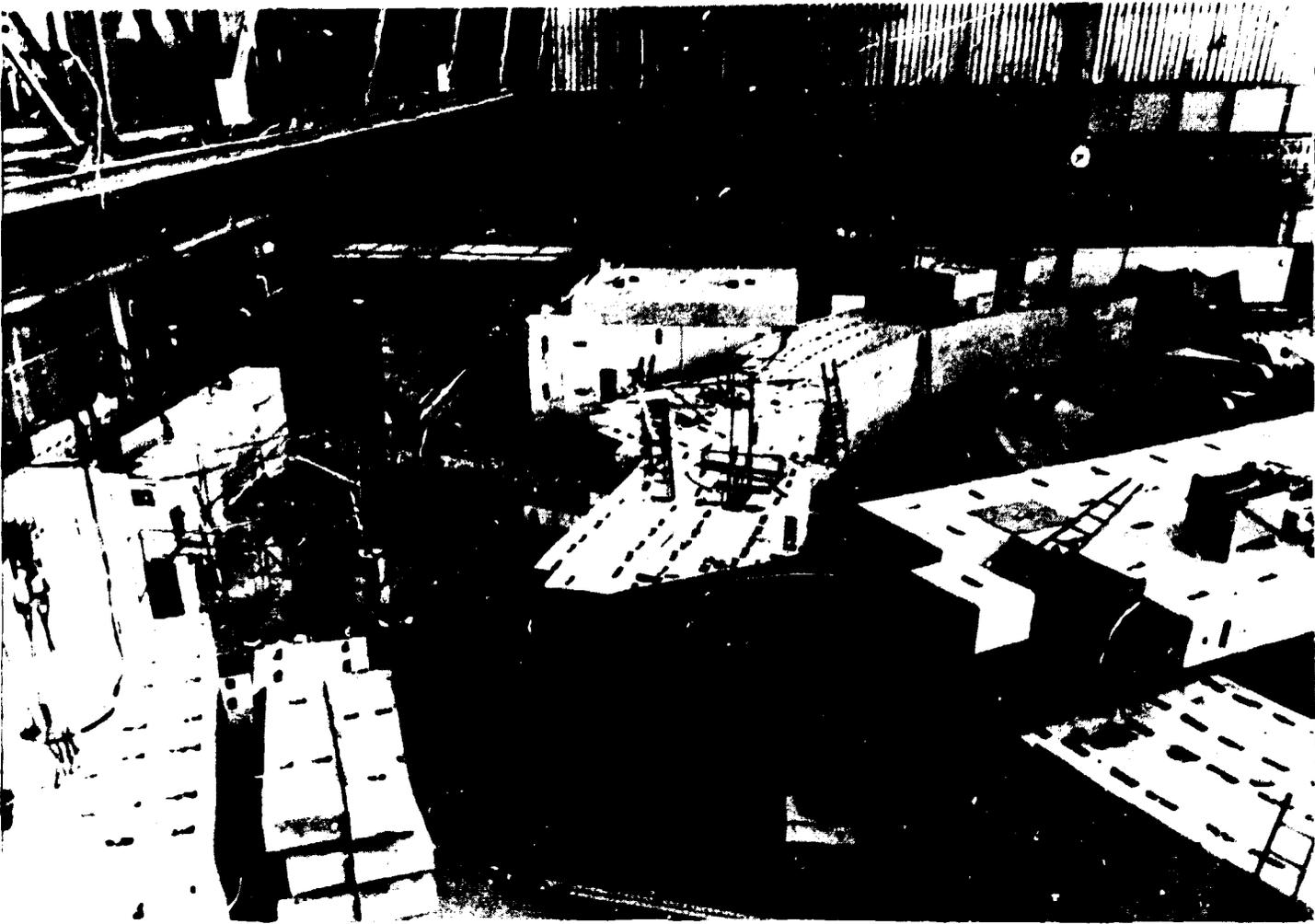


Figure n° 5 - Vue d'ensemble sur la zone d'expérience .-

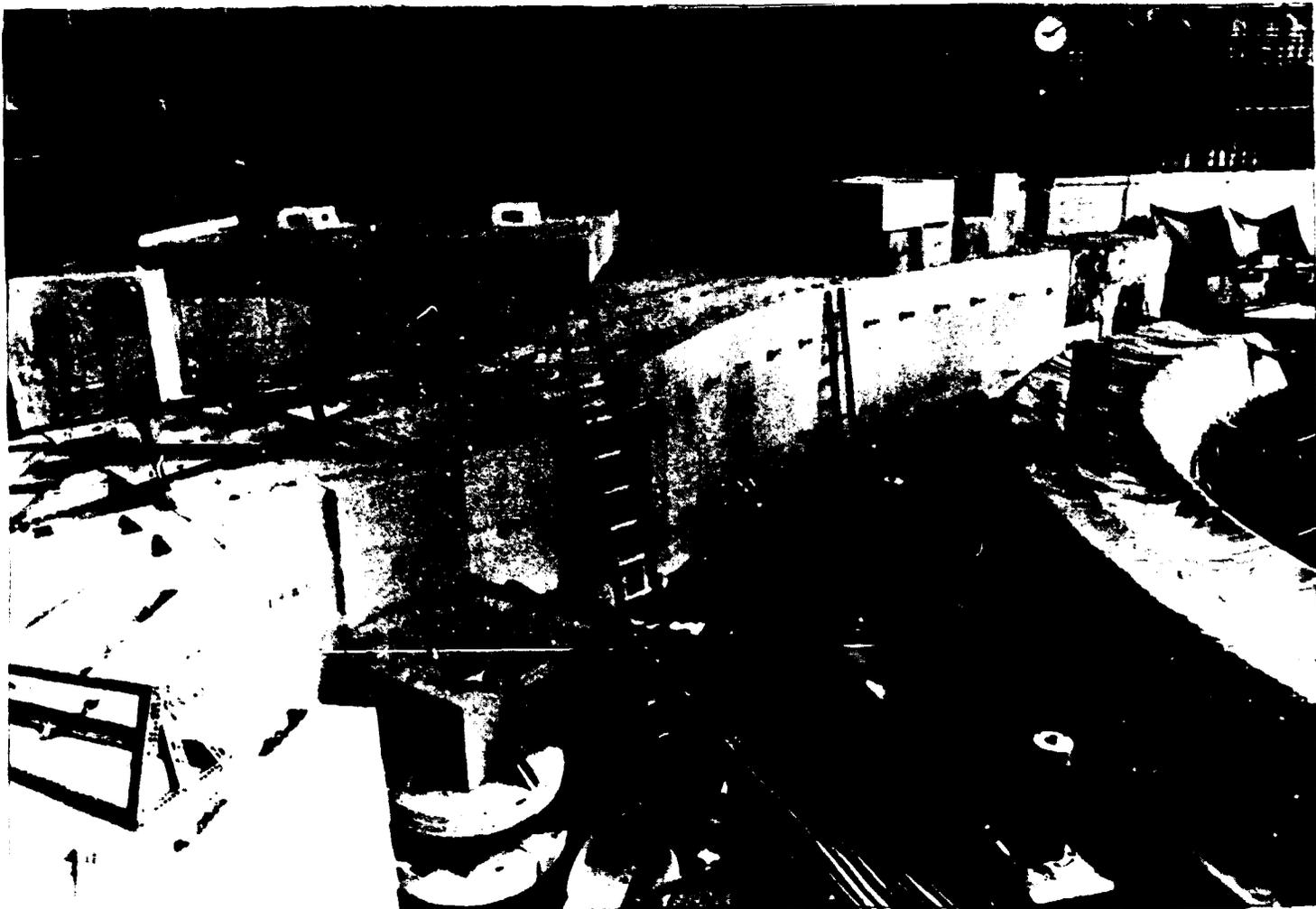


Figure n° 6 - Traversée du mur par un faisceau. -



a ) Aire de fabrication du béton .

Cette aire , quoique classique , possède un parc de stockage des agrégats assez particulier. ( voir fig. 5, p. 52 du chapitre des Etudes Générales des Bétons ). Huit cases à agrégats , réparties dans un secteur de 180° convergent vers un silo pondéral . Les parois de ces cases sont conçues en tenant compte de l'importante poussée exercée par les agrégats métalliques dans le cas où les cases voisines sont vides . Une dalle en béton maigre est , auparavant , coulée pour permettre la manutention plus aisée des agrégats et éviter la présence de particules terreuses . Le gavage des riblons se fait en utilisant un système "Pelle tractée " . Les riblons livrés par camions sont répartis dans les cases 1 - 3 - 4 - 5 suivant leurs dimensions ( fig. 8 ). Il est procédé au contrôle des agrégats avant déchargement mais il est souvent difficile d'apprécier si l'ensemble de l'expédition est correcte . Nous avons dû parfois refuser des arrivages non conformes aux spécifications (agrégats trop gros , trop plats ; calaminés , etc...).

Nous avons comme principaux fournisseurs la Société Minerais et Métaux, Sté Aéria , avenue de l'Opéra , Ets GAUTHIER , rue de chateaudun , OTTO Lazar -rue des Vignes , Priolet et Cuissard - rue Rennequin .

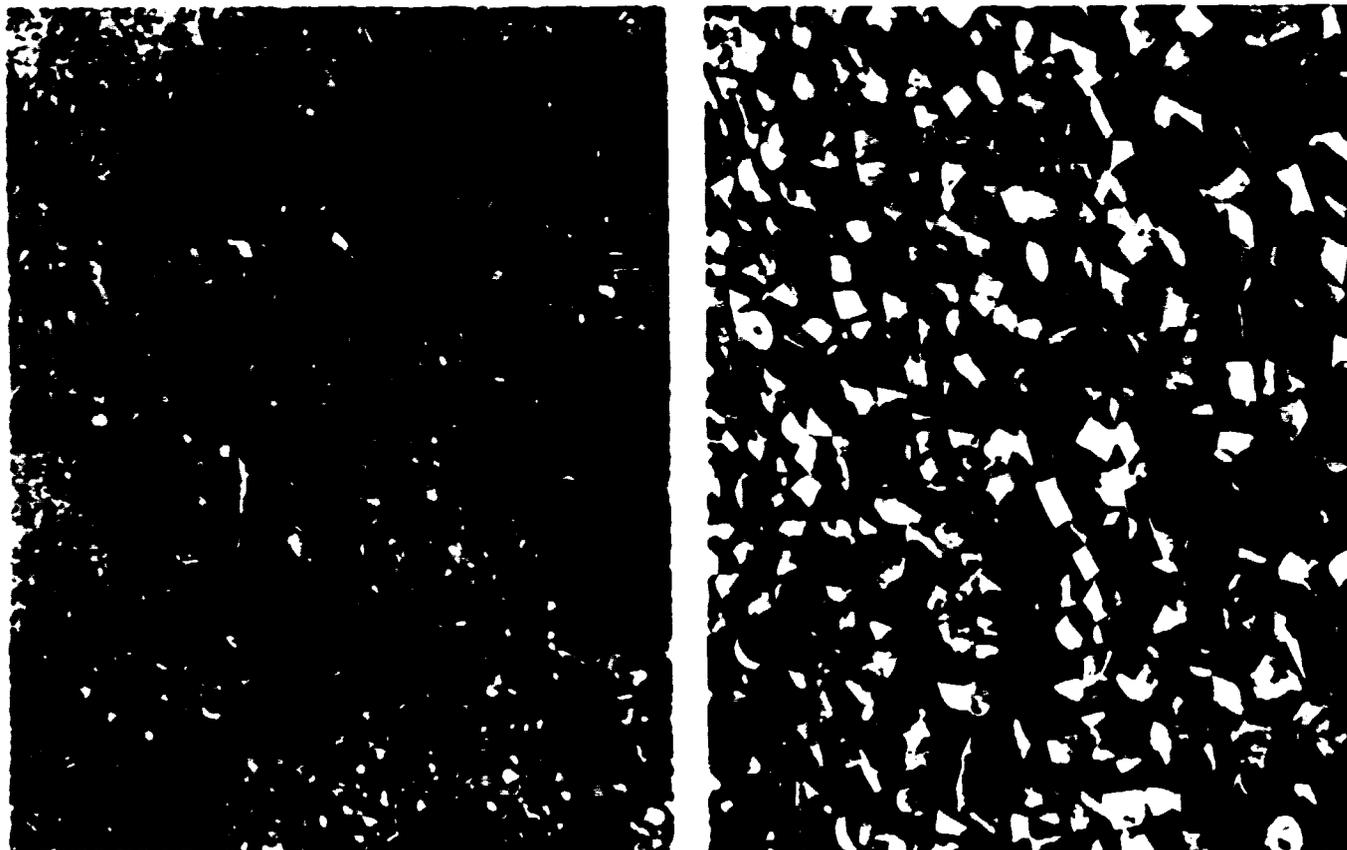


Fig. 8 - Agrégats Métalliques . Riblons 12/30 et 4/12.

L'approvisionnement des agrégats étant assez long , nous avons dû constituer un stock avant de lancer la fabrication des blocs . Il s'en suit une corrosion superficielle arrivant parfois à souder les riblons entre eux.

Certaines catégories d'agrégats , une fois introduites dans le silo pondéral sont lavées à grand jet d'eau pour les débarasser des particules fines d'usinage et des poussières . Nous avons ainsi obtenu des gains importants de densité et de résistances .

L'abrasion produite par le malaxage des riblons et de la barytine finit de nettoyer les

Trois hommes suffisent pour alimenter la bétonnière , la cadence de fabrication étant de  $1,5 \text{ m}^3$  à l'heure .

b) Aire de fabrication des blocs .

L'aire de fabrication et de stockage est constituée par une dalle en béton armé , avec chape incorporée et déterminée pour résister à une surcharge uniformément répartie de  $10 \text{ T/m}^2$  . Longue de  $100 \text{ m}$  . , elle permet la fabrication , la vérification et le stockage de quelques 600 blocs de dimensions diverses .

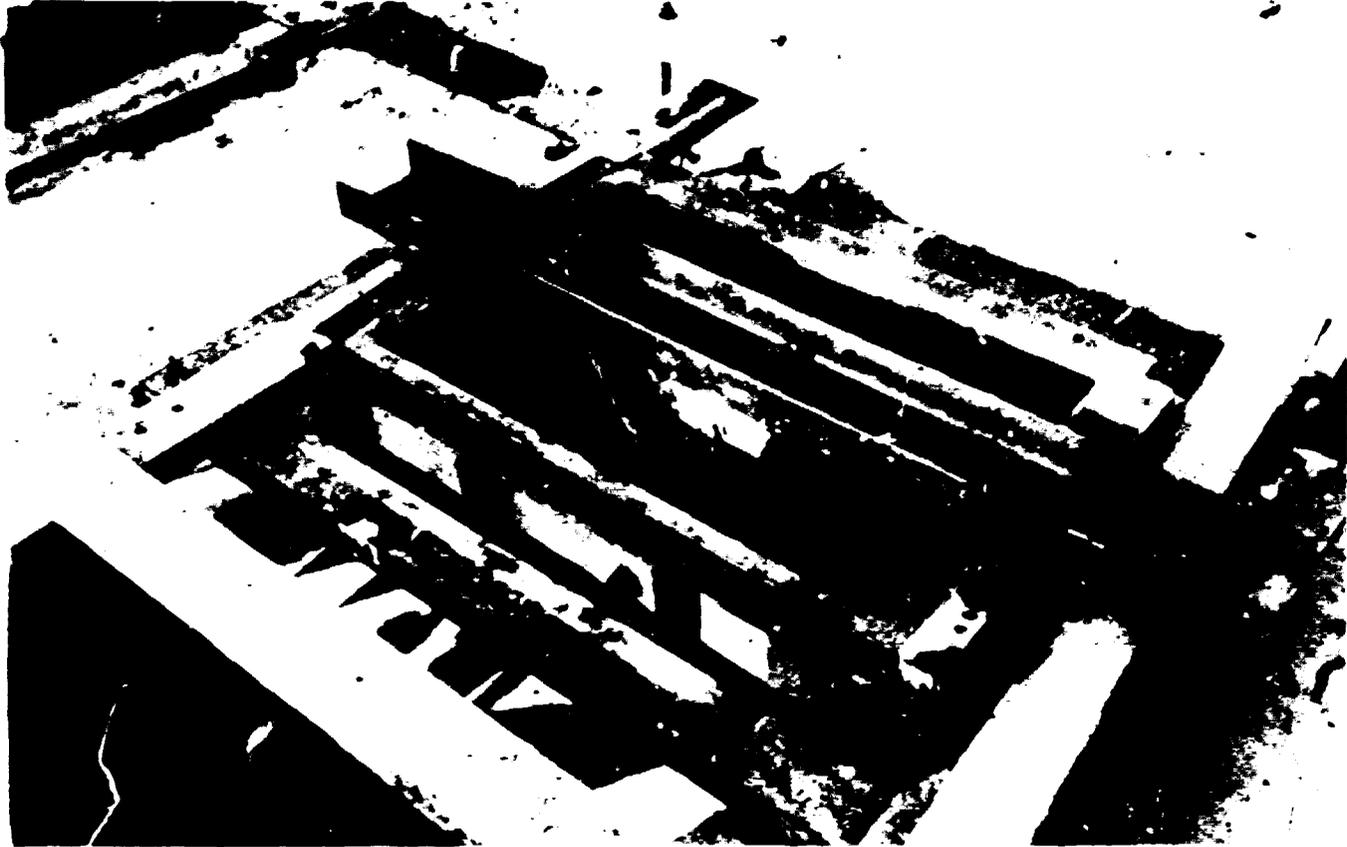


Fig. 9 - Moule mis en place , prêt à recevoir le béton .

Dans le sens longitudinal , l'aire de fabrication est divisée en trois bandes parallèles , le long desquelles sont scellés des crochets . Ces crochets maintiennent comme le montre la fig. 9 , adhérents au sol , les moules pendant la mise en place du béton . Faisant suite à l'aire de fabrication , un tronçon de  $4 \text{ m}$  . de planéité parfaite , est réservé pour la vérification des blocs . L'extrémité de l'aire est utilisée pour le stockage des blocs terminés .

Un portique roulant , équipé d'un palan de 10 tonnes , commandé électriquement permet les nombreuses manutentions des blocs et des moules .

B - Les moules . -

Les moules , en tôle de  $5 \text{ mm}$  , renforcée par des fers cornières , n'ont que quatre côtés , le fond n'existant pas . (Les blocs sont coulés directement sur la chape enduite au préalable , d'huile de décoffrage ) .

Les faces latérales sont rendues solidaires entre elles au moyen de clavettes (voir fig. 9) . Pour éviter les déformations dues à la poussée du béton lourd pendant la pervibration , des fers U de  $100$  encerclent le

pression nécessaire pour rendre le moule solidaire du sol.

### C - Les blocs. -

Comme l'indiquent les spécifications , une grande variété de blocs étaient à réaliser . Nous n'en décrivons qu'un seul type , la fabrication des autres étant identique , dans les grandes lignes.

Comme le montre la fig. 10, les blocs comportent un encadrement complet en cornières 50 x 50 x 5 , soudées bout à bout . Toutes les soudures extérieures ont été meulées afin d'avoir une surface unie.

Les tolérances sur les dimensions des côtés et des diagonales des blocs étant très serrées il s'avère nécessaire de soigner l'exécution des encadrements . Si ceux-ci s'encastraient parfaitement dans les moules , l'obtention d'un bloc dans les tolérances exigées par le Cahier des Charges serait certaine à condition bien entendu que les faces du moule demeurent planes . Chaque bloc possède , au moins un point d'ancrage destiné à la manutention. Cet ancrage est réalisé par un fer rond de 20 à 30 mm, suivant le poids des blocs , scellé profondément dans le béton . Certains blocs (type M ) comptent trois points d'ancrage , à raison d'un par type de face (fig. 11 ). Pour le passage du crochet de levage , des évidements sont réservés par l'intermédiaire de boîtes métalliques . Pour que l'eau accumulées dans ces boîtes puisse s'écouler , deux tubes de  $\varnothing$  12 mettent en communication un évidement avec les deux autres . Des blocs identiques réalisés au CERN (71) après être restés 1 an dehors avaient eu leur ancrage profondément corrodé par la présence d'eau dans les évidements .

### D ) Confection des blocs et vérification . -

Dès que le moule est rempli de béton lourd compacté , la laitance venue en surface est enlevée à l'aide d'un jet d'eau et d'air comprimé . Nous avons constaté que dans cette laitance se trouvait une partie des graisses et impuretés encore adhérentes aux agrégats métalliques avant pervibration . En effet , la pervibration débarrasse et nettoie parfaitement les agrégats - Des agrégats introduits dans la bétonnière , rouillés superficiellement , apparaissent dans les blocs , avec un éclat remarquable. - C'est pourquoi nous avons accepté des livraisons d'agrégats légèrement gras . Les résistances mécaniques sont en concordance avec nos observations .

Une fois la laitance enlevée , la surface supérieure du bloc est égalisée à l'aide d'un mortier de barytine .

Le décoffrage se fait 6 heures après confection du bloc , grâce à l'addition au béton , d'un accélérateur de prise , le "Sika 3 " .

La vérification des blocs consiste à contrôler leur forme géométrique et leur poids . Les tolérances définies à la page 2 des spécifications sont contrôlées à l'aide de règles métalliques graduées de longueur variable suivant les dimensions des blocs. La vérification de la forme géométrique du bloc s'effectue exclusivement en se basant sur le contrôle des longueurs des arêtes et des diagonales des différentes faces , en commençant par la face supérieure et en passant ensuite aux 4 faces latérales . Le contrôle des diagonales de la 6<sup>ème</sup> face permet de faire un recoupement des mesures . Nous insistons ici , sur l'importance du contrôle de la longueur des diagonales , qui permet la vérification des angles et de la verticalité des faces latérales .

En ce qui concerne la planéité , la méthode consiste à vérifier la rectitude des 4 arêtes d'une face par rapport à cette face . c'est-à-dire à mesurer le creux ou le ventre maximum que représente cette

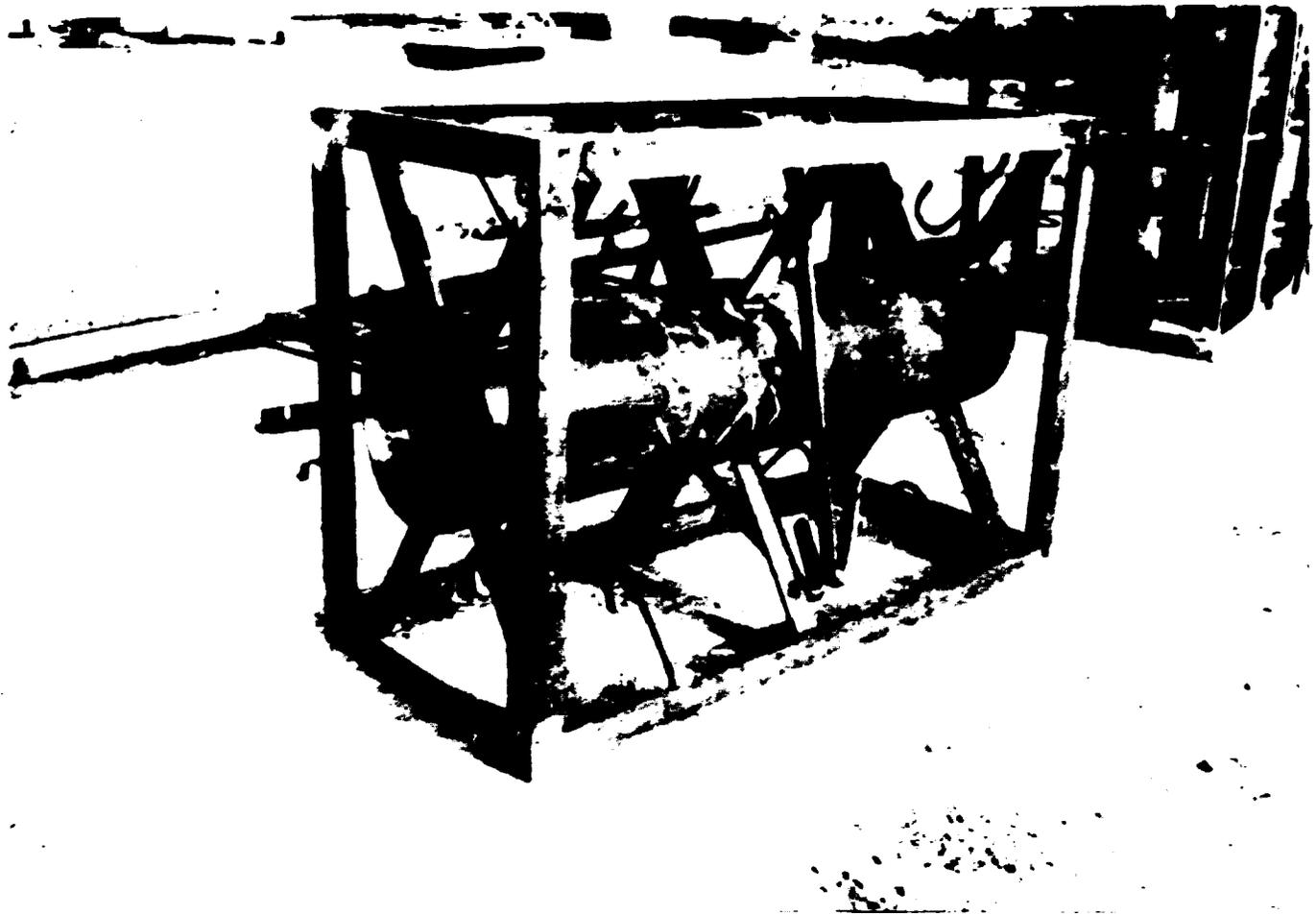


Figure n° 10 - Encadrement en cornière d'un bloc type S.



Figure n° 11 - Bloc Type M. (A remarquer - les tubes reliant les évidements). -

Toutes les valeurs mesurées sont relevées sur un registre dans lequel sont inscrites les cotes théoriques . Les blocs ne satisfaisant pas aux tolérances sont rejetés , à fortiori pour les blocs dont les faces ne présentent pas une excellente planéité. ( principalement les faces verticales ).

Le contrôle du poids des blocs se fait en 2 temps :

a ) Par la prise d'échantillons ( cubes de 20 cm d'arête ). Mesure de la densité apparente du béton frais . Certains cubes sont conservés pour les essais mécaniques .

b ) par la mesure du poids du bloc après rectification s'il y a lieu , à l'aide d'une balance romaine de 10 tonnes .

Enfin , signalons qu'un contrôle de la mise en place et de l'homogénéité du béton est rendu possible par le polissage d'une face verticale qui permet ainsi d'observer la répartition des riblons sur toute la hauteur . ( Quand la pervibration est trop prolongée , les riblons s'accumulent au fond du bloc ).

#### E - Rectification - Peinture .-

La plupart du temps , les blocs sortaient du moule avec des surépaisseurs parfois importantes . (négligeables si les moules ont un fond ). Il semble préférable de rectifier les blocs avec de grosses meules au carborundum que de les rejeter .

De plus , cette rectification permet de fournir les blocs dans les tolérances exigées et de préparer ces surfaces pour l'application de la peinture .

La protection des blocs confectionnés avec du béton de barytine avec incorporation de riblons fut délicate à résoudre . Précisons que le revêtement devait être appliqué sur le chantier où les blocs n'étaient pas à l'abri des intempéries . La principale difficulté a constitué à stopper la corrosion des riblons apparents sur les faces du bloc ; Si non le béton se détériore par gonflement dû à l'oxyde de fer.

Après de nombreux essais , deux systèmes de revêtement nous ont donné satisfaction . Le revêtement au néoprène et le revêtement au caoutchouc isomérisé.

Le choix du primer a une importance capitale . C'est lui qui arrête provisoirement la corrosion et permet la bonne adhésion du revêtement au béton . Nous avons en définitive , choisi le revêtement au caoutchouc isomérisé , celui au néoprène étant trop coûteux.

Nota : Les projets du mur de protection , comme de l'ensemble des installations de " SATURNE " ont été étudiés par la S O G E I et la fabrication des blocs confiée à la Compagnie Française d'Entreprises.

**SPECIFICATIONS POUR LA FABRICATION DE BLOCS DE PROTECTION EN BETON**

**DE HAUTE DENSITE A BASE DE BARYTINE ET D'AGREGATS METALLIQUES. -**

**I - INTRODUCTION .-**

Ces spécifications comprennent les travaux , les matériaux , l'équipement et les outils ainsi que toutes les opérations nécessaires pour la fabrication de 4.000 tonnes ou 970 m<sup>3</sup> de béton à haute densité en forme de blocs amovibles pour la protection biologique autour du synchrotron " Saturne " au Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay .

Le projet précise qu'une partie de la protection sera réalisée en béton de densité 3,6 à base de barytine , le restant de densité 4,8 étant à base de barytine et d'agregats métalliques .

**II - DESCRIPTION DES TRAVAUX .-**

Fabrication des différents types de blocs de protection à haute densité dont les caractéristiques sont indiquées ci-dessous :

Nombre	Désignation	Longueur	Hauteur	Largeur	Densité	Observations
145	bloc type A	1,50	1,20	1	3,6	
115	bloc type A'	1,50	1,20	0,875	4,8	
55	bloc type B	1,50	0,60	1	3,6	
54	bloc type B'	1,50	0,60	0,875	4,8	
20	bloc type C	1,50	1,20	0,50	3,6	
5	bloc type D	1,50	0,60	0,50	3,6	
95	bloc type E	3	0,80	0,60	3,6	
10	bloc type F	3	0,40	0,60	3,6	
150	bloc type G	0,90	0,60	0,30	3,6	
50	bloc type K	0,90	0,60	0,30	4,8	
270	bloc type M	1,20	0,60	0,90	4,8	a rec 3 agrafes
20	bloc type N	1,20	0,60	0,90	4,8	avec rainure
38	poutres P	6	0,60	0,60	3,6	
3	poutres Q	6	0,60	0,60	3,6	tubes ø 205
12	blocs R	1,50	0,50	0,40	4,8	tubes ø 205
6	blocs S	0,90	0,40	0,60	4,8	tubes ø 205

**III - TOLERANCES -**

**a ) Dimensions :**

La tolérance sur toutes les dimensions linéaires des côtés et des diagonales sera la

- + 2 mm sur les longueurs inférieures ou égales à 60 cm
- + 3 mm sur les longueurs comprises entre 60 cm et 1,50 m
- + 4 mm sur les longueurs comprises entre 1,50 m et 3 m.

La tolérance sur la planéité des surfaces sera déterminée par rapport au plan tangent horizontal ou vertical. Elle est fixée à + 0 - 5 mm.

Toutes les opérations de vérification des dimensions ne pourront être effectuées que 28 jours après la prise du béton.

Les blocs ne satisfaisant pas aux tolérances ci-dessus seront rejetés et l'entrepreneur aura à sa charge leur renouvellement .

b ) Densité .

Le contrôle de la densité du béton sera effectué 28 jours après sa prise . Le poids des cornières d'angles , des aciers d'encrages et des agrafes sera pris en compte dans le poids . Les évidements pour le passage des crochets de levage ne seront pas défalqués du volume .

Pour le béton à base de barytine , la densité ne devra pas être inférieure à 3,55. Tout bloc accusant une densité inférieure à 3,5 sera rejeté .

Pour le béton à base de barytine avec addition d'agréats métalliques , la densité ne devra pas être inférieure à 4,80 .

Tout bloc accusant une densité inférieure à 4,80 sera pris en compte comme bloc de densité 3,6 .

Seules les dimensions nominales indiquées à l'article II seront utilisées pour le calcul de la densité.

On effectuera les contrôles de densité des blocs après les opérations de vérification spécifiées au § a ) de cet article et après rectification des surfaces s'il y a lieu .

IV - VERIFICATIONS .

L'entrepreneur fera le nécessaire pour avoir à sa disposition des appareils de contrôle permettant de mesurer et de peser les blocs avec la meilleure précision. Ces appareils seront soumis à l'approbation de l'ingénieur responsable des travaux .

Chaque bloc sera numéroté par les soins de l'entrepreneur et le poids mesuré sera inscrit à côté du numéro et sur le registre de bétonnage.

L'entrepreneur construira une aire de vérification aux tolérances et dimensions suffisantes pour permettre la mesure des tolérances dimensionnelles des blocs définis au chapitre III .

Les détails de construction et nature de matériaux seront soumis à l'ingénieur responsable avant exécution.

Toutes les opérations de contrôle et les manutentions nécessaires à ces opérations seront à la charge de l'entreprise.

Un registre spécial rassemblant les relevés des dimensions des blocs sera soigneusement tenu par le vérificateur désigné par l'entreprise .

#### V - CADRES METALLIQUES ET ANNEAUX DE LEVAGE. -

Toutes les arêtes des blocs seront protégées par un encadrement en cornière. Ces cadres seront exécutés aux tolérances indiquées au chapitre III et présenteront toutes garanties de rigidité. Le soudage des cornières et des aciers sera conforme à la toute dernière révision de la norme AFNOR applicable et aux règles CM 1956 . Les soudures extérieures seront meulées.

Les cornières seront de 60 x 60 x 6 pour les blocs type E et F de 40 x 40 x 4 pour les blocs de 30 x 60 x 90 et de 50 x 50 x 5 pour les autres.

Les blocs comporteront à leur partie supérieure des agrafes destinées à leur manutention . Les ancrages seront implantés de telle sorte que le bloc demeure horizontal à la manutention. Les blocs M comporteront trois points d'ancrage à raison d'un par type de face.

#### VI - BLOCS PROTOTYPES. -

Immédiatement après réception de la lettre de commande pour l'exécution des travaux l'entrepreneur fabriquera un bloc prototype de chaque sorte . Les blocs seront vérifiés en poids et dimensions après décoffrage au lieu de 28 jours après la prise du béton comme spécifié au chapitre III .

L'entrepreneur ne pourra entreprendre la fabrication en série des blocs sans un accord préalable de l'ingénieur responsable des travaux sur les blocs prototypes .

#### VII - RECTIFICATION. -

Immédiatement après décoffrage et pendant que le béton n'a pas acquis toute sa dureté, les surfaces des blocs présentant des irrégularités seront rectifiées à l'aide d'une meule au carborundum. Elles devront être lisses et présenter une texture uniforme . Les vides et les parties poreuses auront été au préalable colmatés à l'aide d'un mortier réalisé avec des agrégats lourds .

#### VIII- PEINTURE.

Après expiration d'un délai de 30 jours , les blocs conformes aux spécifications seront préparés pour être peints.

##### a) Préparation :

seront débarrassées de tout encrassement , graisse , vieille peinture , humidité ou autre impureté. Les cornières seront nettoyées à la brosse métallique pour éliminer la rouille et les incrustations.

b ) Peintures :

Les peintures choisies seront dans leur catégorie les meilleures actuellement disponibles . Elles seront stockées sur le chantier dans leurs bidons originaux et scellés. La peinture sera appliquée en respectant strictement les instructions fournies par le fournisseur.

c ) Conditions d'emploi :

Aucune peinture ne sera appliquée quand l'air sera chargé d'humidité, par temps de brouillard ou de pluie et quand la température descendra au-dessous de + 5°C. L'application sera faite dans les règles de l'art et par une main d'oeuvre qualifiée. Chaque couche devra être parfaitement sèche avant l'application d'une autre couche .

d ) Application :

Les chassis métalliques seront livrés sur chantier avec une protection anti-rouille au minium au caoutchouc chloré.

Après bétonnage , les parties métalliques apparentes recevront une seconde couche de minium au caoutchouc chloré .

Sur les blocs de béton de barytine de densité 3,6 seront appliquées deux couches de peinture au caoutchouc chloré provenant des Etablissements Hélic du Bourget ou similaire .

Sur les blocs de béton avec incorporation d'agrégats métalliques seront appliqués un primer au chromate de zinc , une sous couche au caoutchouc isomérisé XF et enfin une couche émail XF au caoutchouc isomérisé provenant des Etablissements de la Seigneurie ou similaire .

e ) Couleur :

la couleur du revêtement sera blanc ivoire . La peinture exacte sera déterminée par l'ingénieur responsable à l'aide de la carte des couleurs .

**IX - STOCKAGE . -**

Un portique de 10 T. prévu sur l'aire de stockage sera laissé à la disposition de l'entreprise.

L'entretien de ce portique sera à la charge de l'entreprise qui devra le remettre en parfait état de fonctionnement à la fin des travaux . Les blocs seront stockés par catégorie , le numéro bien apparent. Des espaces seront réservés entre chaque pile de blocs pour faciliter les manutentions.

X - BETON LOURD A BASE DE BARYTINE .-

Sauf indications spéciales indiquées par le cahier des Charges , se conformer aux spécifications générales sur le béton de haute densité à base de barytine .

XI - BETON LOURD A BASE DE BARYTINE ET D'AGREGATS METALLIQUES .-

a ) Généralités :

Sauf indications contraires indiquées par ces spécifications , la confection du béton à très haute densité sera conforme aux règles d'utilisation du béton armé BA 45.

b ) Matériau :

1 - Ciment : Pour chaque construction , une seule marque de ciment sera choisie pour la confection du béton . Tout ciment sera livré sur chantier dans des sacs exempts de déchirures , en bon état et de poids normal . Tout sac endommagé sera réjeté. Le ciment sera stocké sur un sol sec , dans un local ventilé .

Les ciments portland artificiels seront conformes à la norme NFP 15 302 .

Le ciment portland à haute résistance initiale ne sera employé que sur ordres de l'ingénieur responsable de l'ouvrage .

2 - Agrégats :

Barytine : Les agrégats seront composés de barytine à l'état naturel , c'est à dire principalement de sulfate de baryum (  $SO^4 Ba$  ) traité suivant les prescriptions ci-dessous .

Le soumissionnaire devra donner tous les détails sur la provenance des agrégats en précisant le lieu.

La barytine ne devra pas être friable et sera absolument garantie exempte de toute particule terreuse , de toute substance chimique susceptible d'attaquer le liant hydraulique ou les fers des ossatures et de toute matière organique même en faible quantité.

Les agrégats ne contiendront pas d'éléments lamellés ou en aiguille en quantité suffisante pour être préjudiciables à la mise en place et à la résistance mécanique du béton . La teneur en  $SO^4 Ba$  ne devra pas être inférieure à 92 % et supérieure à 96 %.

Tous les agrégats seront concassés , criblés et lavés dans l'eau propre puis jiggés pour enlever les éléments légers .

3 - Densité : Il sera exigé que la densité spécifique moyenne de la barytine ne descende pas au-dessous de 4,15.

Cette densité devra être garantie par la mise expéditrice . Le contrôle de la masse spécifique sera exigé pour chaque wagon qui ne devra contenir que des agrégats d'une même granulométrie



Les substances nuisibles ne seront pas présentes en excès, aux maxima suivants :

	Limites permises % en poids	
- Argiles , craie	recommandé : 0,1	maxima : 0,5
- Sulfures , charbon	0,1	0,5
- Sable plus fin que 0,06 mm	0,1	2

5 - Ribbons :

Les agrégats d'acier seront utilisés comme gros agrégats. Ils seront constitués de matériaux de récupération , de débouchures de tôles métalliques, ou des déchets d'estampage de l'industrie de transformation.

Les agrégats ne devront pas avoir séjourné longtemps aux intempéries , être absolument garantis exempts de toute particule terreuse , de toute substance chimique susceptible d'attaquer le liant hydraulique ou l'acier lui-même.

Les agrégats rendus par les nécessités d'usinage , légèrement gras ou huileux , seront acceptés , seulement après accord de l'ingénieur responsable des travaux.

Les agrégats métalliques contiendront le moins possible d'éléments à trop grand rapport surface plane sur épaisseur , l'épaisseur étant la plus petite dimension.

6 - Densité :

La densité spécifique exigée ne devra pas être inférieure à 7,30 pour les ribbons de dimensions supérieures à 15 mm et 7,40 pour des ribbons de dimension inférieure à 15 mm ( mitraille ).

Le contrôle de la densité sera fait en utilisant la méthode dite du " flacon ". La prise d'échantillon s'effectuera comme indiqué pour les agrégats de barytine .

7 - Classement des agrégats :

Les ribbons seront livrés aux granulométries approximatives suivantes : 4/12 - 12/20.

Les ribbons étant de diverses provenances , la répartition à l'intérieur des limites des petits agrégats sera effectuée sur chantier au fur et à mesure des livraisons . On s'efforcera d'obtenir une granulométrie sans dispersion .

8 - Agréments des matériaux :

Avant leur emploi , les agrégats seront analysés par un laboratoire d'essais de matériaux . Le choix du laboratoire se fera en commun accord entre l'administration et l'entreprise .

Aucun matériau ne sera utilisé avant d'avoir été approuvé . Des essais supplémentaires d'agrégats seront effectués durant la confection des blocs s'il y a un changement apparent quelconque dans le

Toute expédition d'agrégats fins de barytine comprenant des éléments d'un module de finesse inférieur de 20/100 du module de finesse extrême sera refusée , ou au choix de l'ingénieur , pourra être acceptée sous réserve de modification dans les proportions du mélange .

9 - Plastifiant - Accélérateurs de prises :

L'emploi de plastifiant additionné à l'eau de gâchage , genre plastocrète ou similaire sera recommandé pour accroître la maniabilité du béton . Il suffira que le plastifiant utilisé soit agréé par un laboratoire d'essai de matériaux .

L'emploi d'un accélérateur de prise , genre Sika 3 , sera seulement autorisé lorsqu'il s'agira d'accélérer la rotation des moules ou de diminuer la durée d'immobilisation de l'aire de fabrication.

c ) Essais des bétons -

Les éprouvettes nécessaires pour les essais de contrôle du béton seront toujours prélevées au lieu d'emploi du béton .

On s'efforcera de tasser le béton des éprouvettes dans les conditions aussi voisines que celles réalisées pour la mise en place du béton à l'intérieur des coffrages .

Les moules en acier seront cubiques de 20 cm de côté pour les essais de compression et de 7 x 7 x 28 pour les essais de traction par flexion .

6 éprouvettes de chaque sorte seront prélevées à chaque coulée ou tous les 20 m<sup>3</sup> de béton mis en place .

Les éprouvettes seront conservées 24 heures dans leur moule protégées par un couvercle , puis après démoulage , elles seront conservées dans le sable humide fin , une épaisseur de 10 cm de sable entourant toutes les faces des éprouvettes .

Tant en moule que dans le sable , les éprouvettes seront conservées à l'abri mais à la température du chantier . 3 éprouvettes seront cassées à 7 jours. Les trois autres à 28 jours . Toutes les éprouvettes seront identifiées sans dégrader les faces .

d ) Registre du bétonnage -

Un registre de toutes les coulées du béton sera soigneusement tenu par l'entreprise Le registre devra rassembler les renseignements suivants :

- 1 - Numéro d'identification de la coulée ,
- 2 - Date à laquelle elle a été faite ,
- 3 - Type de béton lourd mis en oeuvre ,
- 4 - Temps au commencement et à la fin de la coulée ,
- 5 - Température au " " " "
- 6 - Numéros des blocs confectionnés ,

- 7 - Nombre de m<sup>3</sup> coulés ,
- 8 - Quantité d'eau de gâchage par m<sup>3</sup> de béton confectionné ,
- 9 - Résultats des essais mécaniques à 7 jours ,
- 10 - Résultats des essais mécaniques à 28 jours ,
- 11 - Densités humides et séchées des éprouvettes ,
- 12 - Poids des blocs .

e ) Stockage des matériaux -

1 - Les agrégats :

Le stockage des agrégats devra être réalisé avec la plus grand soin dans un emplacement spécialement aménagé à cet effet et compartimenté par type de granulométrie .

Il devra être d'un accès facile pour la vérification et l'identification de chaque expédition. Toutes précautions devront être prises pour qu'aucun mélange de la barytine avec les riblons ou des particules terreuses ne soit possible .

2 - Le ciment :

Le ciment sera stocké à l'abri des intempéries dans un endroit sec et ventilé.

f ) COFFRAGES

1 - Matériaux :

Les coffrages seront en métal ou autre matériau agréé. Les coffrages présenteront une rigidité suffisante pour résister , sans déformation sensible , aux charges et aux chocs qu'ils sont exposés à subir pendant l'exécution des travaux , compte tenu des forces engendrées par la pervibration du béton et de la forte densité des agrégats .

L'huile pour décoffrage sera une huile minérale incolore .

2 ) Exécution :

Les coffrages seront exécutés avec précision et de telle sorte qu'il n'y ait pas de fuites de mortier au moment du serrage du béton par pervibration. Leurs faces intérieures seront régulières sans creux ni aspérités et si possible usinées , de façon à obtenir des surfaces de coffrages bien nettes .

Les calfatages éventuels des joints ne devront faire aucune saillie à l'intérieur des coffrages .

Toutes les surfaces de coffrages seront recouvertes d'huile de décoffrage avant que les cadres métalliques soient placés.

g ) Mise en place des éléments métalliques :

L'entrepreneur fournira et installera tous les encadrements en cornières , boulons , manchons , canalisations , garnitures intérieures et autres organes fixés à demeure qui seront indiqués sur les plans ou nécessaires pour la confection des blocs.

De même , il établira à ses frais tous les calages et toutes les liaisons nécessaires pour que la position des divers organes soit invariable pendant la mise en place du béton . Les espacements libres entre les différents éléments devront être suffisants ( au moins 50 mm ) pour permettre l'introduction des aiguilles.

h ) Composition du béton :

Le béton devra avoir une résistance à la compression de 200 Kg/cm<sup>3</sup> à 7 jours. Les proportions de matériaux à employer pour la confection de 1m<sup>3</sup> de béton à base de barytine et d'agrégats métalliques seront les suivantes :

Sable barytine 0/3	400 Kgs
Gravier barytine 3/7	1280 Kgs
Ribbons 4/12	820 Kgs
Ribbons 12/30	1980 Kgs
Ciment C P A 250/315	350 Kgs
Eau	110 litres
Plastifiant	1,75 l.
Accélérateurs	2 l.

Les agrégats seront pesés et non mesurés en volume . Suivant les conditions météorologiques , la quantité d'eau pourra être modifiée.

i ) Fabrication et mise en place du béton :

1 - La fabrication du béton sera conforme aux dispositions recommandées dans le BA 45, article 5,31 .

Les bétonnières seront , si possible , d'un type à axe horizontal à moins que l'entreprise possède déjà un malaxeur à axe vertical .

La vitesse de rotation de la cuve de la bétonnière devra permettre l'homogénéisation du mélange dans un temps de malaxage normal ; ce temps ne devra pas excéder 3 minutes.

L'introduction de l'eau de gâchage dans la bétonnière sera faite par un ouvrier choisi parmi la main-d'oeuvre qualifiée. Une passerelle judicieusement disposée à l'avant de la machine permettra à cet ouvrier d'examiner facilement le contenu de la cuve et d'y ajouter lentement l'eau jusqu'à ce que la consistance du mélange soit convenable .

2 - Un grand soin sera apporté au chargement des wagonnets , dumper ou benne . Il se fera en versant le contenu de la cuve de la bétonnière sur un plan presque vertical suivi d'une goulotte de longueur

supérieure à 50 cm , sinon la ségrégation des agrégats arrivera invariablement .

Le transport du béton depuis le lieu de fabrication jusqu'au lieu d'emploi sera exécuté sans modifier sa consistance et son homogénéité . Tout système de transport de béton par pompage ou méthode similaire sera catégoriquement interdit .

3 - Le béton sera utilisé avant tout commencement de prise . Celui qui aurait commencé à durcir sera rejeté .

Le béton sera déposé en continu suivant des courbes si possible horizontales n'excédant pas 30 cm. d'épaisseur , de manière à éviter les déplacements de béton déjà serré ou des accumulations de béton frais.

A travers l'épaisseur entière de chaque couche et dans quelques centimètres de la couche du dessous , appliquer une pervibration à très haute fréquence - ( 16 à 20.000 V mm ). La pénétration des aiguilles sera verticale et à intervalles réguliers afin d'obtenir une homogénéisation parfaite de la masse du béton. En outre , l'extraction des aiguilles du béton s'effectuera très lentement pour ne pas provoquer des trous ou des poches de laitance .

La durée de la pervibration sera juste suffisante pour accomplir un compactage complet et une bonne adhésion du béton aux aciers ( arrêter la pervibration quand la laitance de ciment reflue à la surface ).

On évitera l'excès de pervibration qui a pour effet de provoquer la séparation des agrégats de barytine des riblons .

j ) Protection du béton .

1 - Après sa mise en place , le béton et les coffrages seront maintenus en atmosphère humide jusqu'à l'obtention du durcissement normal et pour éviter des fissures de retrait. Les formes en acier seront protégées contre une excessive évaporation de l'eau.

2 - En période de froid , lorsque la température de la journée s'abaissera à + 3 °C le bétonnage sera , en principe , interrompu sauf si l'entreprise dispose de moyens efficaces pour maintenir une température supérieure à 5 ° C pendant une durée d'au moins 7 jours après le bétonnage. A la reprise du travail , les blocs qui auront subi les atteintes de la gelée seront rejetés.

## LE BETON DES CELLULES A TRES HAUTE ACTIVITE DU L. E. C. I.

### 1°) Description des Cellules .-

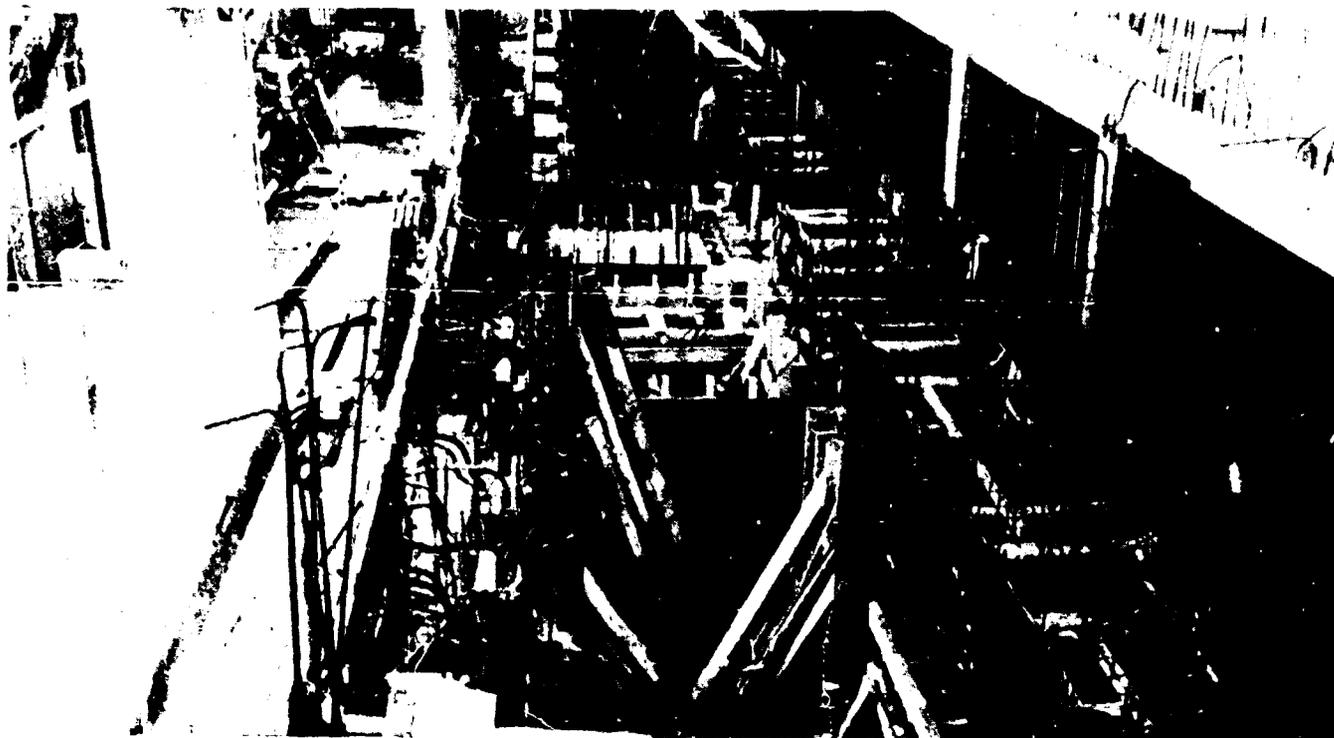
Le laboratoire d'examen de Combustibles Irradiés L. E. C. I. est destiné à l'examen des barreaux de EL 2 et EL 3 , ainsi qu'à l'étude de matériaux combustibles . Il comprend 4 cellules à très forte activité ( 10.000 curies à 1 Mev. ) et 6 cellules à plus faible activité ( 100 à 1.000 curies ) séparées par une cellule destinée au stockage des échantillons ( fig. 1 ). Seules les quatre grandes cellules à très forte activité et la cellule de stockage sont en béton de barytine (  $d = 3,5$  ).

Les épaisseurs des murs avant et arrière sont les mêmes pour toutes les cellules et ont été fixées à 1,03 m. pour la face avant et 85 m pour la face arrière en partie basse ( fig. 3 ).

Pour les grandes cellules , les cloisons inter-cellules , relativement amovibles sont en béton de barytine ainsi que les dalles de couverture amovibles de 50 cm d'épaisseur .

### II °) Confection et mise en place du béton de barytine .-

La construction des cellules de 10.000 curies a nécessité la mise en oeuvre de 150 m<sup>3</sup> de béton de barytine (  $d = 3,55$  ) très ferrailé ( fig. 2 ). Comme nous le verrons plus loin , la forte densité des armatures a compliqué sérieusement la mise en place et nous a conduit à étudier la granulométrie en conséquence.



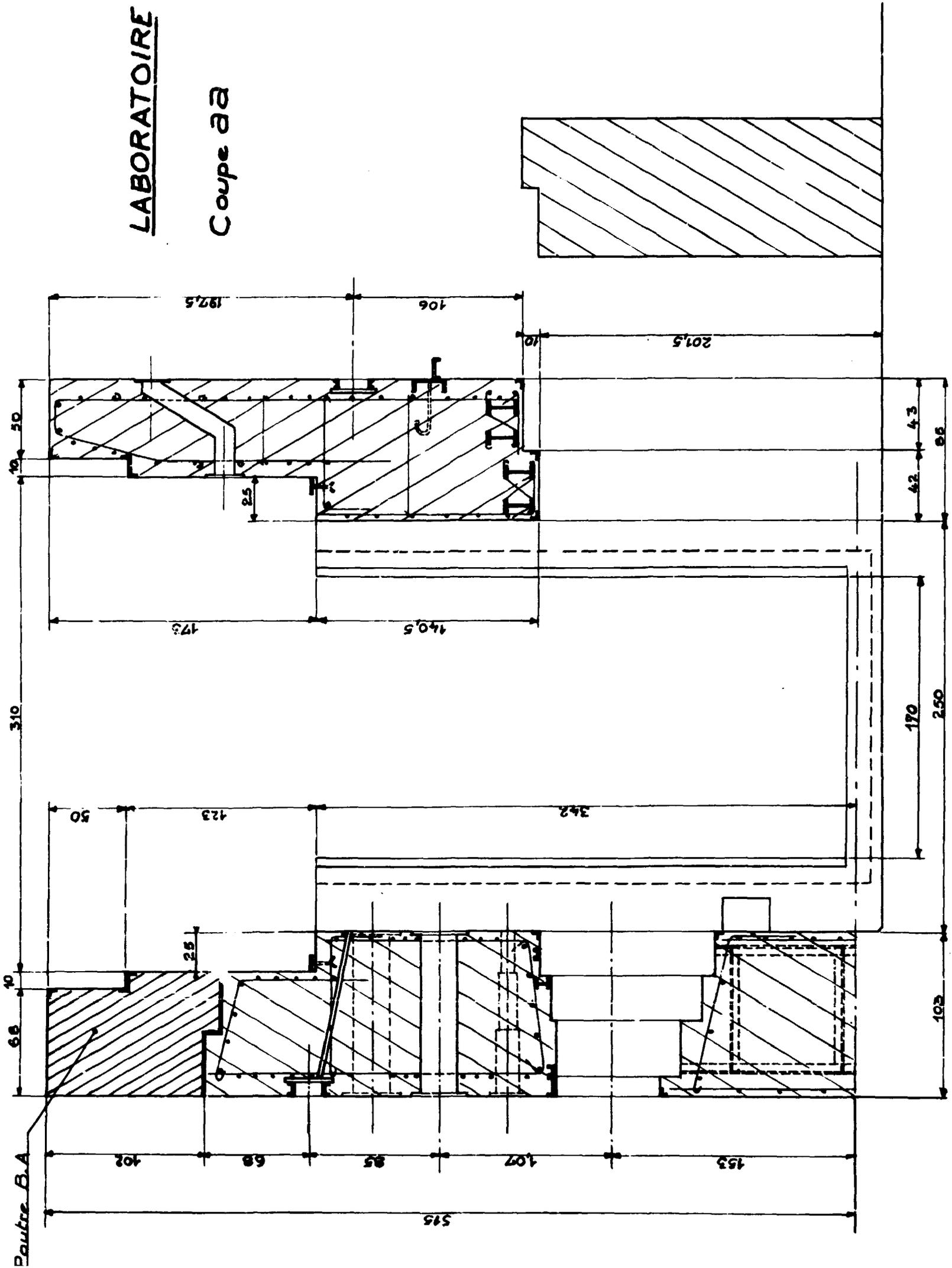
- fig 2 ) Vue générale des cellules avant bétonnage.

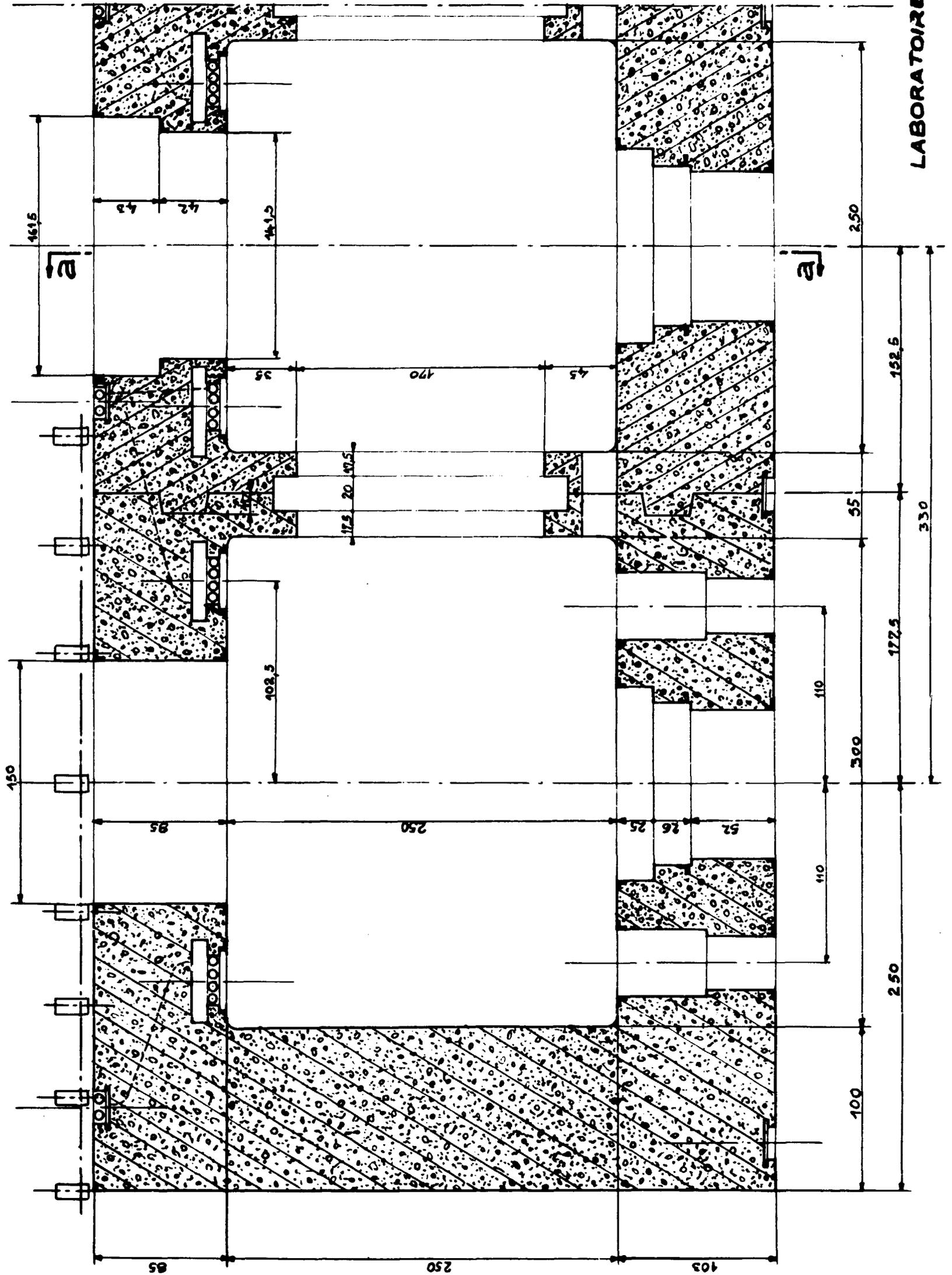


Figure. 1.- Murs des Cellules brut de décoffrage Côté zone de travail .-

LABORATOIRE LECI

Coupe aa





a ) Description du chantier .-

Deux installations de stockage , dosage et malaxage des agrégats , situées de part et d'autre du chantier permettent de confectionner séparément le béton classique et le béton de barytine . Cette double installation a l'avantage de ne pas arrêter la confection du béton classique et d'éviter toute erreur de dosage, de nature de béton et de mélange d'agrégats . L'installation pour la confection du béton de barytine est très similaire à celle du béton classique .

Le parc à agrégats comprend 4 cases ( 1 case par classe d'agrégats ) et un silo pondéral.

Après malaxage dans une bétonnière à axe incliné de 750 l. , le béton est déchargé dans des containers placés sur un wagonnet .

Une distance d'environ 80 mètres sépare l'aire de fabrication du béton au lieu de sa mise en place . Les containers repris par une grue sont vidés sur une plateforme placée dans la cellule (fig. 5) pour pouvoir introduire à l'aide de pelles le béton dans les coffrages.



Fig (5) -Cellule de stockage , coffrée et ferrillée prête à recevoir le béton.

Un puissant compresseur équipé d'un grand réservoir fournit l'air comprimé au Chantier .

Onze ouvriers et un chef d'équipe sont nécessaires pour confectionner et mettre en place le béton , à savoir :

- deux ouvriers pour préparer le mélange dans le silo pondéral ,
- un ouvrier à la bétonnière ,
- deux ouvriers pour pousser le wagonnet
- un grattier

- deux hommes pour mettre à la pelle le béton dans les coffrages
- trois hommes pour le vibrer .

b ) Méthode de bétonnage des cellules .-

Le béton des cellules est coulé par section de petite longueur de façon à localiser les joints de retrait au niveau des cloisons inter-cellules ( fig. 3 ). La première étape de bétonnage , la plus délicate consiste à couler le béton en une seule fois jusqu'au niveau supérieur de la fenêtre . Pour cela , la cellule est d'abord coffrée jusqu'à 1 m. de hauteur afin de bien introduire le béton sous les fenêtres . Cette première partie terminée , on coffre immédiatement à l'aide d'éléments de coffrages préfabriqués jusqu'au niveau de la fenêtre , comme l'indique la fig. 5 -Ce coffrage doit s'opérer sans stopper le bétonnage , ou au maximum avec un arrêt momentané d'une 1/2 heure. - Un décrochement est réalisé à chaque arrêt de bétonnage.

Des précautions variées sont prises pour le ferrailage étant donné les efforts de flexion à escompter dans la face avant qui supporte l'ossature du Hall et du pont roulant ( fig. 6 ). Particulièrement sous les fenêtres, le béton est mis en place par couches successives de 20 cm d'épaisseur et compacté à l'aide de pervibrateur à très haute fréquence ( aiguilles de 100 et de 70 ).

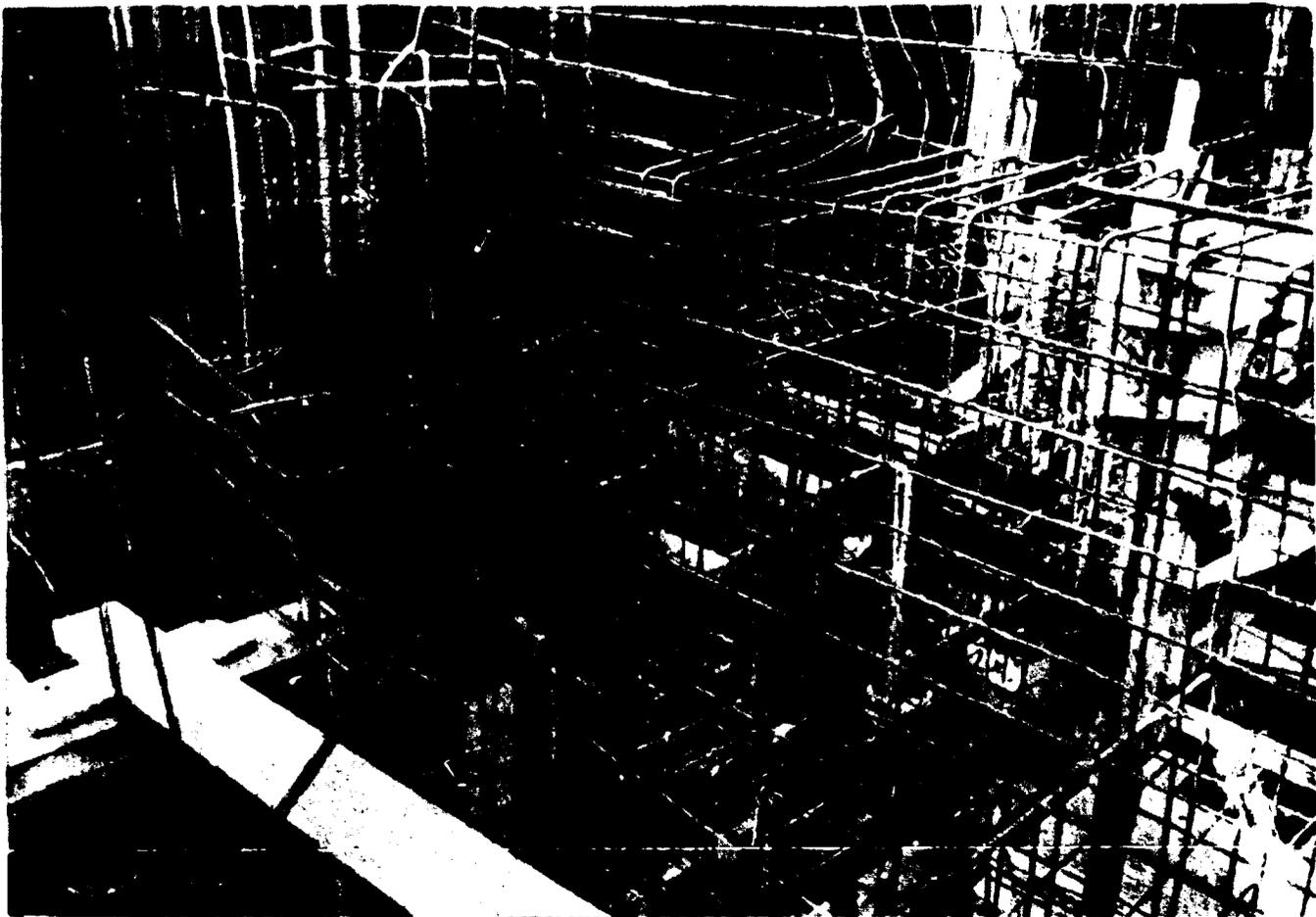


Fig. 6 - Ferrailage d'une face avant de cellule.

c ) Etude de la composition .-

En collaboration avec les services du laboratoire des Ponts et Chaussées , nous avons étudié la meilleure composition en tenant compte des difficultés de mise en place et de l'importance du ferrailage . En définitive , nous avons adopté la granulométrie continue moins favorable à la ségrégation et se prêtant mieux pour la mise en place du béton armé.

Proportions pour un mètre cube

<u>Granulométrie continue</u>		<u>Granulométrie discontinue</u>	
Sable 0/2	320 Kg	Sable 0/2	330 Kg
Gravillon 2/7	1020 Kg	Gravillon 2/7	810 Kg
Gravier 7/15	990 Kg	Gravier 7/15	
Caillou 15/30	920 Kg	Caillou 15/30	2120 Kg
Ciment 250/315	350 Kg	Ciment 250/315	340 Kg
Eau	125 l.	Eau	116 L.
Plastifiant	1,75 l.	Plastifiant	1,75 l.

Résultats ( sur cubes 20 x 20 )

	<u>Poids cube humide</u>	<u>Densité humide</u>	<u>Poids à 8 j.</u>	<u>Dens. à 8 j.</u>	<u>Résist. Com- pression à 7 j.</u>
discontinue	1	28,850	28,650	3,58	230
	2	29,110	28,940	3,617	223
	3	28,950	28,760	3,60	236
continue	1	29,300	29,080	3,64	311
	2	29,450	29,250	3,65	287
	3	29,680	29,400	3,67	273

Evolution du poids des cubes de 20 x 20 avec le temps .

	<u>12 Mars</u>	<u>22 Mars</u>	<u>26 Mars</u>	<u>2 Avril</u>	<u>7 Mai</u>
	29,130	28,900	28,960	28,960	28,900
	29,120	28,690	28,720	28,720	28,650
	29,140	28,900	28,940	28,940	28,870

d ) Observations et enseignements fournis au cours de la confection de la protection.

La construction en France des premières cellules à très haute activité (10.000 curies) nous a permis d'acquérir une bonne connaissance du béton de barytine armé. Nous avons rencontré beaucoup de difficultés nous obligeant à rechercher des moyens de mise en place plus perfectionnés que pour le béton classique .

Nous allons décrire succinctement quelques unes de nos observations et la méthode à employer pour éviter des défauts dans la protection.

1 - Stockage des Agrégats .-

On sait que les agrégats doivent être classés au moins en deux catégories de grosseur : sable , gravier et caillou . La barytine nous parvenait en trois catégories ( 0/8 - 8/15 - 15/30 ). Nous avons exigé , afin de nous permettre de bien étudier la composition du béton ou de la rectifier , le cas échéant , que le

sable nous soit livré en deux catégories : un sable fin de 0/3 et un gravillon de 3/8. Cette division en 4 catégories a l'avantage de diminuer les risques de ségrégation des agrégats , le remplissage du silo pondéral se faisant à la pelle . Il est recommandé également de mettre le sable à l'abri du grand vent.

## 2 - Le silo pondéral et la bétonnière .-

Précisons que l'ordre de remplissage du Skip , donc du silo pondéral , a une certaine importance . Il est recommandé de placer d'abord dans le silo pondéral une partie des gros agrégats , puis le sable et le ciment .- La routine ou les mauvaises habitudes des entreprises font que c'est souvent le sable qui est introduit le premier dans le silo et le ciment à la fin. Cette technique est dangereuse - Par temps de pluie , ou si les agrégats sont humides , le sable et le ciment ont vite fait d'encrasser le silo. Si des précautions ne sont pas prises et si la remise au zéro n'est pas effectuée , la proportion de sable n'est plus respectée . Il est préférable de faire une erreur sur les gros agrégats mis en plus grande quantité que sur le sable .

A moins de l'imposer , il est difficile de faire admettre que la bétonnière à axe horizontal convient mieux pour le malaxage du béton lourd. Pour la confection du béton de barytine , nous avons utilisé une bétonnière de 750 litres , à cuve basculante . Malheureusement , ces engins ne peuvent pas être utilisés correctement . Il ne faut pas perdre de vue que les agrégats étant beaucoup plus lourds que les agrégats traditionnels la capacité de production par gâchée de cette bétonnière se trouve réduite au moins de moitié . Travaillant dans de très mauvaises conditions , la ségrégation du béton est inévitable . Il est indispensable de refaire un malaxage à la pelle avant d'introduire le béton dans les coffrages .

L'instruction sérieuse du conducteur de la bétonnière est indispensable. Une fois faite, elle nous a été très profitable.

Un dosage correct de l'eau ne peut être fait qu'à la vue du béton dans la cuve . Tous les conducteurs ont tendance à mettre trop d'eau et il n'est pas rare d'avoir les premières gâchées mauvaises.

## 3 - Transport du béton .-

Des essais de propulsion du béton de barytine par pompe ou air comprimé ne nous ont pas donné satisfaction. La première gâchée a pu être propulsée après avoir été rendue plus fluide . La seconde a obstrué les canalisations. Ce mode de transport ne nous semble pas possible actuellement et risque de ne pas fournir un béton à hautes caractéristiques .

## 4 - Coffrages .-

Les coffrages doivent être très rigides pour résister sans déformation aux pressions du béton lourd et aux forces très importantes de la pervibration. Nous avons toujours eu des déformations ( murs bombés ou plus épais aux parties supérieures ). On sousestime les forces engendrées par la mise en place du béton lourd . Il faut utiliser , quand la protection le permet , des tirants en acier .

L'étanchéité des coffrages doit être , si possible , parfaite. La perte de laitance provoque des surfaces cavernes . Comme la pervibration doit être puissante et assez prolongée, la quantité de laitance perdue par les joints de coffrage peut être importante .

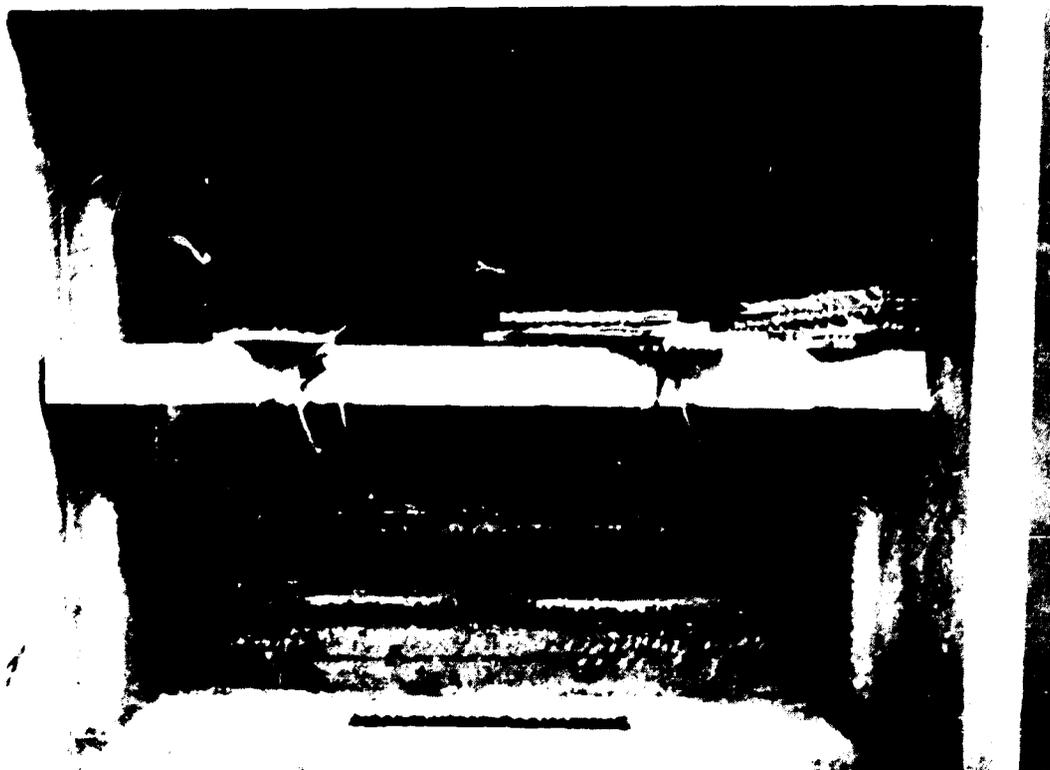


Fig. 7 - Ouverture dans les hublots pour mettre en place le béton sous les surfaces horizontales .

Il est préférable d'appliquer le revêtement directement sur le béton brut de décoffrage. Nous avons constaté que l'interposition d'enduits divers n'assurait pas un revêtement équivalent .

A cette fin , l'usage de contreplaqué est à conseiller . Les joints doivent être spécialement soignés.

#### 5 - Mise en place . -

Dès le début du bétonnage des cellules nous avons rencontré de grandes difficultés pour obtenir une correcte mise en place du béton.

Pour y arriver , nous avons dû intervenir dans trois domaines bien distincts , à savoir sur :

- la plasticité du béton .
- l'introduction du béton dans les coffrages .
- la pervibration du béton.

- La plasticité du béton a été améliorée par l'emploi de plastifiant type plastocrète de la Société Sika , à raison de 2 litres par m<sup>3</sup> (prise plus lente ) et par une toute petite augmentation de l'eau de gâchage . L'augmentation de l'eau doit être faite avec une très grande attention car l'effet contraire peut se produire .

- L'introduction du béton directement du container dans les coffrages doit être interdite. Il nous a été impossible de mettre en place le béton de cette façon dans le coffrage . L'introduction à la pelle

autour du pervibrateur en marche donne d'excellents résultats. Il nous a fallu créer des ouvertures supplémentaires soit dans les coffrages , soit dans les hublots métalliques pour introduire : (fig. 7 )

- le béton sous les surfaces horizontales
- les aiguilles

Elles permettaient également le contrôle du remplissage des décrochements.

Enfin , il faut s'efforcer de couler le béton par nappe horizontale - le béton ne glissant pas , ceci n'a pu être réalisé sous les fenêtres .

- Pour mettre en place le béton , nous avons utilisé les vibrateurs classiques ( à air comprimé ou électriques ) utilisés sur tous les chantiers . Les pervibrateurs, une fois introduits dans ce béton , perdent 30 à 50 % ou même plus de leur énergie . Nous avons utilisé des pervibrateurs assez récents S.T.V. à très haute fréquence . Les résultats sont excellents . Avec ces appareils , les bétons peuvent être gâchés plus secs. L'utilisation de vibrateurs de coffrage ne nous a pas donné satisfaction.

Nota : Dans les régions où la mise en place est très délicate , nous avons coulé du béton à densité plus élevée ( incorporation de minerais de fer ).

#### 6 - Les reprises et les réparations .

Nous avons essayé plusieurs méthodes pour préparer les surfaces de reprise du béton.

La méthode consistant à mettre une couche de mortier sur l'ancienne surface et de couler ensuite le béton frais est à déconseiller ( mauvaise répartition du mortier , risque de fissuration ).

L'application directe de béton frais sur l'ancien béton n'est pas à recommander.

La solution adoptée consiste à attaquer au marteau pneumatique l'ancienne surface et à la nettoyer à l'aide d'un jet d'eau et d'air comprimé.

Sur cette surface ainsi préparée , on coule un béton dans lequel on a diminué le diamètre des gros agrégats .

BIBLIOGRAPHIE

( 1 ) ENGBERG , VORESS

Radiation shields and shielding. A bibliography of unclassified AEC Report literature.

TID - 3032 , 1952 ; TID - 3032 , 1954 .

( 2 ) Concrete for radiation shielding . A Bibliography .

HW - 24071 ; 1952 .

( 3 ) Mme JOLIOT CURIE.

Les radioéléments naturels .

Ed. Hermann et Cie .

( 4 ) BROCARD

Application des isotopes radioactifs à la mesure de la densité et de la teneur en eau des matériaux et des sols.

Annales de l'Inst. Techn. du Bât. et des T. P. , mai 1955 , 89 , 427 - 450.

( 5 ) GLASSTONE R.

Sourcebook on Atomic Energy .

D. Van Nostrand Compagny Inc. Princeton , New-York.

( 6 ) CORK J. M.

Radioactivité et physique Nucléaire .

Dunod , 1949.

( 7 ) CALLAN E. J.

Concrete for radiation shielding.

Journal of the ACI , Sept. 1953 , 17 - 44 .

( 8 ) FOSTER E.

Absorption by concrete of X rays and gamma rays.

Journal of the ACI , Sept. 1953 , 45 - 63 .

( 9 ) GARRICK . B. J.

Dispositif d'arrêt des radiations dans un réacteur nucléaire .

Civil Engineering , 1958 , 28 , 9 , 55- 57 , 3 Fig.

( 10 ) STEPHENSON R.

Introduction to nuclear engineering .

Mc. Graw Hill Book Company , New York , 1954 .

( 11 ) ANONYME

Reactor Handbook Physics . U.S. Atomic Energy Commission.

Mc. Graw Hill Book Compagny Inc. New York , 1955 .

( 12 ) BLIZARD E. P.

Shield Design ( Gamma - Ray Shielding ).

ORNL - janv. 1956 .

( 13 ) JEAGER .

Le béton dans la technique de la protection contre le rayonnement.

Atom. Energ. Dtsch. 1957 , 6 , 2 , 217 - 222 .

( 14 ) BOURGEOIS J.

Etude de la protection des piles .

Cours de Génie Atomique . Tome n° 4 , C.E.A. 1956 .

( 15 ) HORTON C. C.

Reactor Shielding Analysis.

Nuclear Engineering G.B. , 1958 , 3 - 33 , 515 - 520 .

- ( 16 ) BLIZARD , MILLER J.M.  
  
Radiation Attenuation Characteristics of Structural Concrete .  
  
ORNL - 2193 , Aug. 1958 , Oak Ridge .
- ( 17 ) ROCKWELL Th.  
  
Construction of Cheap Shields .  
  
AECD - 3352 , Jan. 1950 , Oak Ridge .
- ( 18 ) BLOSSER , BOND , LEE .  
  
A Study of the Nuclear and Physical properties of the ORNL Graphite Reactor  
Shield.  
  
ORNL. 2195 , Sept. 1958 , Oak Ridge.
- ( 19 ) TARBOX A. , BECK C.  
  
Engineering Study on Reactor Shielding.  
  
AECU - 3862 , Avril 1958 , Washington .
- ( 20 ) LANE JAMES A.  
  
How to design reactor shields for lowest cost.  
  
Nucleonics USA , 1955 , 13 , 6 , 56 - 58 .
- ( 21 ) BUNCH W. L.  
  
Attenuation properties of high density Portland cement concretes as a function of  
temperature .  
  
HW - 54656 , Jan. 1958 , Washington .
- ( 22 ) HALLIDAY D. B.  
  
Heat release in concrete reactor shields .  
  
AERE R/R 1963 .

- ( 23 ) BROWN R.E.  
  
Heavy aggregate investigation  
  
HW - 26574 , Dec. 1952 , Washington .
- ( 24 ) GEAGER T.  
  
Concrete - The convenient reactor shielding .  
  
Atomics World , 1958, 9 , 12 , 416 - 418 .
- ( 25 ) DAVIS H.S.  
  
Composition , Properties and Cost of high density concrete .  
  
HW - 49143.
- ( 26 ) DURIEZ M.  
  
Traité des Matériaux de Construction.  
  
Dunod , 1950 .
- ( 27 ) LAFUMA M.H.  
  
Liants hydrauliques .  
  
Dunod , 1952 .
- ( 28 ) BOGUE R.H.  
  
La chimie du ciment Portland  
  
Eyrolles , 1952 .
- ( 29 ) ARRAMBIDE J. DURIEZ M.  
  
Agréats , Liants et Bétons hydrauliques .  
  
Ed. du Moniteur des travaux Publics , 1958.
- ( 30 ) TROXELL , DAVIS E.  
  
Composition and Properties of Concrete .

- ( 31 ) DAVIS Harold S.  
  
High density concrete for shielding atomic energy plants.  
  
Journal of the ACI , mai 1958 , p. 965 - 977.
- ( 32 ) LEZY  
  
Etude et contrôle des Bétons hydrauliques .  
  
Construction ; Déc. 1958 , p. 387 - 396.  
Janv. 1959 , p. 14 - 20
- ( 33 ) FAURY J.  
  
Le béton . Influence de ses constituants inertes .  
  
Dunod , 1958 , 3ème Ed.
- ( 34 ) DUAR  
  
Dosages et Granulométrie des Bétons.  
  
Le moniteur des Trav. Publics et du Bât. , 21.12.57, p. 44 - 47 .  
1.2.58, p. 31 - 35 .  
N° 30, 33, 34, 36, 38 , 1959.
- ( 35 ) CUGELOT P.C. , WHITE M.G.  
  
Shielding Qualities of different concrete mixtures .  
  
Journal of Applied Physics , may 1950 , p. 369 - 375 .
- ( 36 ) MITTET H.P.  
  
Heavy Aggregate Concrete .  
  
The trend in Engineering at the University of Washington , April 1953.
- (37 ) TUTHILL Lewis H.  
  
Recommended Practice for Measuring , Mixing and Placing Concrete.  
  
J. of the American Concrete Institute , 1958 , 30 , 5 , 535 - 565 , 5 fig.

- ( 38 ) DAVIS , HAROLD S.  
  
How to choose and place mixes for high density concrete.  
  
Nucleonics , June 1955 , 13 , 6 , 60 - 65 .
- ( 39 ) JEAGER  
  
Choix et Mise en oeuvre du béton lourd .  
  
Der Bauingenieur , Aout 1956 .
- ( 40 ) TIRPAK Ed.  
  
Report on design and placement techniques of barytes Concrete for reactor biological shields.  
  
ORNL - 1739 , May 1954.
- ( 41 ) EMMONS C.D.  
  
Field Handling Study of heavy aggregate concrete .  
  
HW - 22845 .
- ( 42 ) BOREL J. -C.  
  
La vibration utilisée dans la fabrication en série d'éléments en Béton.  
  
Cahiers du C.S.T.B. , Déc. 1958 , n° 35 , cahier 285.
- ( 43 ) PRICE , HORTON , SPINNEY.  
  
Radiation Shielding Handbook.  
  
Pergamon Press , 1957 .
- ( 44 ) ANONYME .  
  
Barytes aggregate concrete applied to reactor shielding .  
  
IDO - 24003 , Blaw -Knox Construction Company.
- ( 45 ) TIRPAK Ed.  
  
Barytes aggregates makes heavy concrete for shielding.

( 46 ) NARROW.

Barytes Handle with care.

Engineering News Record , May 1954 , p. 36 - 40 .

( 47 ) WITTE L. P. , BACKSTROM J. E.

Properties of Heavy Concrete made with baryte aggregates.

Journal ACI , Sept. 1954 , Proc. V. 51 , p. 65 - 88.

( 48 ) SAXE Harry Charles

The Physical properties of Barytes - Colemanite concrete and Barytes -

Colemanite - water mixtures .

AECU - 3617 , Feb. 1955.

( 49 ) FIESENHEISER E. I. WASIL B. A.

Heavy Steel - Aggregate Concrete.

Journal of the ACI , Sept. 1955 , p. 73 -82

( 0 ) ANONYME .

Concrete of high density for Shielding Atomic Reactors .

AERE RE/R 1406 , Harwell 1954 .

( 51 ) DAVIS H. S.

High Density Concrete for Reactor Construction.

The consulting Engineer , Octobre 1957 , p. 224 - 226.

( 52 ) HENRIE James O .

Properties of Nuclear Shielding Concrete .

Journal of the American Concrete Institute , July 1959

( 53 ) TOURASSE M.

Les bétons lourds - Propriétés physiques et essais mécaniques .

Conférence de Genève , Sept. 1958 , 15/P/1152 .

( 54 ) SNYDER M.J. , BURKART C.A. , CLEGG J.W.

Engineering properties of high - density concretes .

BMI - 71 , May 1951.

( 55 ) CRUCTZ , E. DOWNES K.

Magnetite Concrete for radiation shielding .

Journal of Applied physics , V.20 , 1949 .

( 56 ) RAPHAEL J.M.

The Structural properties of magnetite concrete .

Proc. of the American Society of Civil Engineers , 1958 , rapport n° 1511 .

( 57 ) HENRIE J.O.

Journal of the American concrete institute , Feb . 1955 , p. 541 - 550.

Magnetite Iron Concrete for Nuclear Shielding.

( 58 ) HARLOW , MATTHEWS .

The use of ferrophosphorus aggregate in making high-density concrete .

KAPL - Feb. 1953 , New York.

( 59 ) GALLAHER , KITZES

Summary Report on Portland Cement Concrete for Shielding .

ORNL - 1414 , March 1953 , Oak Ridge .

( 60 ) PAVLISH , WIND

Concrete fo Pile Shielding .

- ( 61 ) **Hot Laboratories and Equipment Conference , 1958 - 1959**  
**1958 , Chicago - 1959 , Cleveland .**
- ( 62 ) **BLIZARD E. P.**  
**Reactor Shielding .**  
**Nuclear Engineering and Science Congress Cleveland , Déc. 1955,NED 55 - 11.**
- ( 63 ) **BLINDER .**  
**Physical Properties of High Density Concrete .**  
**KAPL - 318 , April 1950 .**
- ( 64 ) **ANONYME .**  
**High Unit Weight Concretes for Radiation Shielding.**  
**Holmes and Narver , Washington .**
- ( 65 ) **DAVIS Harold , Borge O .**  
**High Density Concrete made with hydrous Iron Aggregates.**  
**Journal of the ACI , Avril 1959 , p. 1141 - 1147 .**
- ( 66 ) **ROCKWELL Th.**  
**Reactor Shielding Design Manual .**  
**TID - 7004 - March 1956 .**
- ( 67 ) **GLEN H. M.**  
**Materials of Biological Shielding .**  
**2 nd Nuclear Engineering and Science Conference 1957 , NESC - 51.**
- ( 68 ) **Conference on Shielding of High -Energy Accelerators .**  
**TID - 7545 , New York , April 1957.**

- ( 69 ) DAVIS Harold S. , BROWNE Frederick L. , WITTER Harry C  
  
Properties of High -Density Concrete made with Iron Aggregate.  
  
Journal of the ACI , March 1956 , V.52 , p. 705 - 726.
- ( 70 ) DELANO V. , GOODMAN G.  
  
Shielding Properties of the Concrete.  
  
Journal of Applied Physics . 1950 , 21 , p. 1040.
- (71 ) ACHERMANN H.  
  
The Handling Equipment for the Radiation Shielding Blocks of the CERN  
  
Proton Synchrotron .  
  
CERN 58 - 11 , Juin 1958 .
- ( 72 ) DAVIS Harold .  
  
High Density Concrete for Reactor Construction.  
  
Civil Engineering , Juin 1956 , p. 52 - 56.
- ( 73 ) NARROW Lewis  
  
Barytes Aggregate and Grout Intrusion Method used in Shield for Materials  
  
Testing Reactor .  
  
Civil Engineering , May 1954 , p. 46 - 49.
- ( 74 ) DAVID L. NARVER S.  
  
Proportioning of Mixes for Steel Coarse Aggregate and Limonite and Magnetite  
  
Matrix Heavy Concretes .  
  
Journal of the ACI , Jan . 1956 , p. 537 -548.
- (75 ) BINNER C.R. , WILKIE C. B. , MILLER P.  
  
High Density Concrete Shielding .

T A B L E   D E S   M A T I E R E S

	Pages.
<b>I - <u>INTRODUCTION</u> . -</b>	<b>5</b>
- Protections de cellules à très haute activité.	5
- Protections de piles atomiques et d'accélérateurs de particules	6
- Réduction de l'intensité de rayonnement	6
- Diminution de l'épaisseur de la protection	6
- Homogénéité de la masse du béton	6
- Caractéristiques mécaniques	7
- Prix de revient	7
- Stabilité sous rayonnements	7
-	
<b>II - <u>PROSPECTION DES MATERIAUX</u> .</b>	<b>8</b>
- <u>Prospection des agrégats lourds</u>	9
- 1 - Introduction	9
2 - Nomenclature des matériaux sélectionnés	9
3 - Caractéristiques générales	10
4 - Définition et Mesure de densité	11
5 - Autres caractéristiques	13
6 - Granulométrie des agrégats	14
Références	16
- <u>Etude des principaux matériaux utilisés dans la confection des bétons à haute densité.</u>	17
La barytine	17
1 - Généralités	17
2 - Répartition géographique et ressources	17
3 - Exploitation	18
4 - Traitement du minerai brut d'exploitation	18
5 - Caractéristiques des barytines	20
L'ilménite .	21
1 - Généralités	21
2 - Répartition géographique et ressources	21
3 - Ilménite Q.I.T -Lac Allard - Canada, Exploitation	22
4 - Aspect physique et qualités	24
5 - Composition chimique	25
6 - Prix de revient	25
7 - Conclusions	26
Le ferrophosphore	26
Limonite de Rougé	27

Conclusion	101
5. Béton de barytine avec de grenaille de fonte	102
- <u>Bétons à base de minéral de fer</u>	103
1. Le béton au ferrophosphore	103
a ) Introduction	103
b ) les agrégats	104
c ) analyse granulométrique	104
d ) composition du béton	105
dosages proposés	105
e ) résultats des essais physiques	105
2. Le béton à base de l'ilménite	107
a ) Analyse granulométrique	108
b ) composition du béton	111
c ) résultats des essais	111
Conclusion	114
3. Béton à base de magnétite	114
a ) les agrégats	115
b ) analyses granulométriques	115
c ) composition et essai du béton	116
V - APPLICATIONS PRA TIQUES	118
- <u>La protection biologique du synchrotron à protons " SATURNE "</u>	119
1. Généralités sur la protection	119
2. Le mur mobile	121
3. Les casemates	123
4. Confection des blocs de protection	126
a ) Description du chantier	126
b ) Les moules	128
c ) Les blocs	129
d ) Confection des blocs et vérification	129
e ) Rectification - Peinture	131
- Spécification pour la fabrication des blocs de protection en béton de haute densité à base de barytine et d'agrégats métalliques	132
- Le béton des cellules à très haute activité du L. E. C. I.	143
1.- Description des cellules	143
2.- Confection et Mise en place du béton de barytine	143
a ) Description du chantier	147
b ) Méthode de bétonnage des cellules	148
c ) Etude de la composition	148
d ) Observations et enseignements fournis au cours de la confection de la protection	149
VI - BIBLIOGRAPHIE	153

<b>Les Magnétites</b>	<b>29</b>
A ) La magnétite de Segré	29
B ) Magnétite de Dielette	30
C ) Magnétite de Chaze-Henry	32
<b>Déchets Ferreux</b>	<b>33</b>
<b>III - ETUDE GENERALE DES BETONS DE PROTECTION</b>	<b>36</b>
1 - Introduction	37
2 - Les ciments	37
3 - Les mortiers	38
- Essais physiques des mortiers	40
- Action du plastifiant sur le retrait	40
4 - Etude des bétons	40
- Etude des facteurs internes qui influent sur les caractéristiques du béton	42
- Préparation , malaxage , mise en place et contrôle du béton frais	52
a ) les constituants	52
b ) le malaxage	53
c ) le transport	54
d ) contrôle du béton frais	54
e ) mise en place. Procédés	54
f ) coffrages	55
g ) mise en place dans les coffrages	55
h ) vibration	57
i ) les joints de construction	57
<b>IV . - CARACTERISTIQUES DES BETONS DE PROTECTION.</b>	<b>60</b>
- <u>Bétons à base de barytine</u>	61
- 1 . Introduction	61
- 2. Le béton de barytine	61
a ) Les agrégats	61
b ) Préparation des agrégats et analyses granulométriques	63
c ) Caractéristiques physiques des agrégats.	66
d ) Abrasion des agrégats	69
e ) Composition du béton	69
f ) Résistances mécaniques	72
g ) Adhérence des aciers	72
h ) Retrait	72
- 3 . Essais de flexion et de rupture par flexion d'une poutre en béton de barytine.	74
- Spécifications pour le béton de haute densité à base de barytine	82
4 - Béton de barytine avec incorporation de riblons	93
a ) Introduction	93
b ) Les agrégats	93
- Caractéristiques des agrégats	95
- Composition du béton	97

**FIN**