

x 50376
1996
174

THESE DE DOCTORAT

Présentée à
l'Université des Sciences et Techniques de Lille

Spécialité
GENIE CIVIL

20466

CARACTERISATION DES PROPRIETES DE LA PEAU DES BETONS DE STRUCTURES

Par
CHAMSEDDINE Farid

Soutenu le 11 juillet 1996 devant le jury composé de :

F. BUYLE-BODIN	Université d'Artois	Président
C. ABDUNUR	LCPC - Paris	Rapporteur
D. BREYSSE	CDGA - Talence	Rapporteur
J.F. SHAO	Université de Lille I	Examineur
I. SHAHROUR	E.C. - Lille	Examineur
B. TONNOIR	LRPC - Haubourdin	Examineur
V. BAROGHEL-BOUNY	LCPC - Paris	Examineur

SCD LILLE 1



D 030 297145 2

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre des recherches menées par la section "Ouvrage d'Art" du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Lille sous tutelle du L.C.P.C. de Paris, en collaboration avec Monsieur B. TONNOIR à qui j'exprime ma reconnaissance pour avoir suivi l'étude jusqu'à son achèvement.

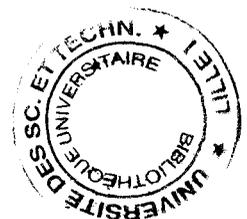
Qu'il me soit permis d'exprimer mes remerciements à Monsieur I. SHAHROUR pour avoir assuré la direction de la thèse, ainsi qu'à Monsieur C. ABDUNUR pour le soutien moral qu'il m'a témoigné.

J'exprime à Monsieur D. MATUSZAK ma sincère amitié pour l'aide qu'il m'a apportée lors de la réalisation des essais.

Je suis gré également à Messieurs Ph. DUNEZ et P. MANDATI pour leur collaboration pratique, ainsi qu'à Madame C. VANDERBEKE pour les soins apportés à la dactylographie de ce manuscrit.

C'est avec plaisir que j'exprime mon immense gratitude à Mademoiselle A. PARIS qui m'a été d'un grand secours, dans les moments les plus difficiles.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à mes parents et à mes professeurs qui ont suscité en moi le goût des sciences et le sens de la réflexion...



SOMMAIRE

RESUME (court)	
RESUME	
INTRODUCTION	1
NOTATIONS ET CONVENTIONS DE SIGNE	3

PREMIERE PARTIE

COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA PEAU DU BETON FACE A LA DESSICCATION

1.1. - Introduction	5
1.2. - Définitions générales	6
1.2.1. - <u>Fonction esthétique</u>	6
1.2.2. - <u>Fonction protectrice</u>	8
1.3. - Rappel des travaux antérieurs	11
1.4. - Phénomènes thermique et hydrique	15
1.4.1. - <u>Réaction d'hydratation. Retrait endogène</u>	16
1.4.2. - <u>Séchage naturel. Retrait de dessiccation</u>	17
1.4.2.1. <i>Cinétique de dessiccation</i>	19
1.4.2.2. <i>Effets mécaniques du retrait</i>	23
1.4.2.3. <i>Fissuration de peau</i>	25
1.4.3. - <u>Apport de la méthode de libération des contraintes</u>	28
1.5. - Conclusion de la première partie	31

DEUXIEME PARTIE

PLAN EXPERIMENTAL, MESURES EFFECTUEES ET MODE OPERATOIRE

2.1. - Introduction	36
2.2. - Plan expérimental	37
2.2.1. - <u>Caractérisation d'un béton "jeune"</u>	37
2.2.1.1. Coffrage	37
2.2.1.2. Confection et préparation des dalles	38
2.2.2. - <u>Caractérisation des bétons "vieux"</u>	39
2.3. - Echantillons d'essais	40
2.3.1. - <u>Carottage</u>	40
2.3.2. - <u>Sciage</u>	42
2.4. - Mode opératoire	42
2.4.1. <u>Mesure du module d'élasticité dynamique</u>	43
2.4.2. <u>Calcul du pourcentage granulaire</u>	45
2.4.3. <u>Mesure de la résistance au fendage</u>	47
2.5. - Conclusion	49

•	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	84
•	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87
•	ANNEXES	95
I.	- <i>Principe de la méthode de libération des contraintes.</i>	97
II.	- <i>Données de fabrication du béton.</i>	98
III	- <i>Carottage réalisé sur les dalles.</i>	101
IV.	- <i>Mesures de la masse volumique, du coefficient d'absorption, de la porosité et de la teneur en eau.</i>	103
V.	- <i>Tableaux récapitulatifs des résultats obtenus à 4 mois.</i>	105
VI.	- <i>Tableaux récapitulatifs des résultats obtenus à 16 mois.</i>	115
VII.	- <i>Tableaux récapitulatifs des résultats obtenus sur les vieux bétons.</i>	123
VIII.	- <i>Compositions des éprouvettes normalisées.</i>	130
IX.	- <i>Modélisation de la distribution granulaire sur les premiers millimètres du parement.</i>	131

RESUME (court)

Cette étude est une contribution à la caractérisation des propriétés de la peau des bétons exposés à la dessiccation. Le but est d'apporter de nouvelles connaissances sur l'effet de peau qui induit des variations dans les teneurs en ciment, granulat et eau, ainsi que dans la porosité des différentes couches superficielles, affectant la durabilité des ouvrages.

Dans l'étude théorique, après un rappel des travaux antérieurs, nous avons abordé les mécanismes physico-chimiques qui ont des effets macroscopiques sur le comportement mécanique du béton, en mettant l'accent sur ceux d'origine hydrique dont les conséquences sont plus importantes que ceux d'origine thermique. Ensuite, nous avons présenté quelques résultats obtenus sur des ouvrages réels en béton précontraint par la méthode de libération. Ces résultats ont mis en évidence la participation négligeable d'une peau d'épaisseur variable, à la reprise de l'effort normal dans les structures.

Le travail se poursuit par la présentation et l'exploitation d'un plan expérimental portant sur la caractérisation des propriétés de la peau des bétons réalisée sur des dalles de 4 et 16 mois d'âge et sur des ouvrages régionaux d'âge égal ou supérieur à 20 ans.

L'analyse des résultats recueillis a permis d'évaluer les différences entre la qualité de la peau et celle du coeur des structures.

Mots clés : béton, parement, enrobage, peau, dessiccation, retrait, séchage, hydratation, fissuration, contrainte, essai.

Abstract

This thesis presents a contribution to the characterization of the properties of the surface layer of concrete, indicated as concrete skin, exposed to the desiccation. The goal of this study is to obtain knowledges about the skin-effect which induces variations in cement, aggregate and water content and in porosity over the surface layers and so affects durability of structures.

A theoretical study allowed us to analyze the physico-chemical mechanisms, which show macroscopic effects on the mechanic behaviour of concrete : the hydrous effects are more important than the thermic effects. Then, we have represented some experimental results, obtained on real prestressed concrete's structures with the method of stress liberation. These results have also showed a skin with a non-constant thickness which its participation negligible in the equilibrium as normal stress.

This study continues with the presentation and exploitation of an experimental program on the characterization of properties of the concrete skin realized on flags of 4 and 16 months and on regional structures more than 20 years old.

The analysis of results allowed us to estimate the differences between skin and core of concrete.

Key-words : concrete, surface, coverage, skin, desiccation, shrinkage, drying, hydration, crack, stress, test.

RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'étude des propriétés spécifiques de la peau des bétons ainsi que de leurs variations en fonction de la profondeur du parement exposé à la dessiccation.

Dans une première partie théorique, nous définissons la peau selon ses fonctions esthétique (aspect du parement) et protectrice (béton d'enrobage) en abordant d'une manière succincte les différents facteurs qui interviennent dans sa durabilité. Ensuite, nous rappelons les travaux antérieurs montrant la présence de gradients, parfois importants, dans les principales propriétés du béton lorsqu'on se déplace de la surface externe vers le coeur de l'ouvrage.

Cette partie se poursuit par l'étude des phénomènes physico-chimiques qui se produisent dans le matériau lui-même au cours de sa vie. Parmi ces phénomènes, le plus important s'avère être le séchage naturel. Ce phénomène se manifeste par une fissuration de peau provoquée par le retrait de dessiccation qui a son origine dans le déséquilibre hygrométrique entre le béton et le milieu ambiant. Un autre aspect du comportement mécanique de la peau face à la dessiccation a pu être révélé à partir des mesures de contraintes effectuées sur des ouvrages réels par la méthode de libération. Il a été montré que la distribution des contraintes est telle qu'une peau d'épaisseur variable peut être considérée soit fissurée, soit le siège de contraintes "adoucies" et intervient donc peu dans le fonctionnement mécanique des ouvrages.

La deuxième partie définit le plan expérimental permettant l'analyse des rôles de l'âge et des conditions de coulage et de cure du béton (type de paroi, enduction des parois). Un béton usuel réalisé au laboratoire est analysé à 4 et 16 mois, et les mesures sont complétées par celles effectuées sur 4 ouvrages en service de 20 et 40 ans. Les mesures portent sur 192 disques parallèles aux parois externes, sciés dans des éprouvettes carottées de 100 mm de diamètre. Une procédure spécifique a été mise au point pour obtenir des disques de géométrie quasi-parfaite (sans perte de matière lors du sciage). Les mesures concernent les caractéristiques mécaniques (module d'élasticité dynamique, résistance en traction par fendage) et physiques (masse

volumique, porosité, taux d'absorption d'eau, teneur en eau et pourcentage granulaire), aussi bien sur des échantillons en l'état "naturel" que secs ou saturés. Le plan expérimental réalisé a permis de montrer l'évolution de ces caractéristiques en fonction de la profondeur du parement extérieur.

La troisième partie est consacrée à la présentation et l'interprétation des données expérimentales. L'étude de l'évolution des caractéristiques mesurées met en évidence, pour tous les bétons testés, qu'une couche superficielle d'environ 10 mm d'épaisseur possède des propriétés plus ou moins différentes de celles à coeur. Une observation essentielle porte sur la différence systématique et quasi inchangée du module d'élasticité dynamique entre le coeur et la peau de l'éprouvette, que celle-ci soit enduite ou pas. Cet "affaiblissement normal" de la peau serait donc attribué à sa propre structure granulaire et non à un déficit d'hydrates pouvant résulter du séchage naturel. Aussi, cette peau qui rend compte de son affaiblissement normal peut toujours révéler un désordre profond qui n'est que l'expression d'une pathologie généralisée de la structure.

INTRODUCTION

Entre le coeur d'un béton et l'action du milieu extérieur, les couches superficielles, autrement dit la "peau", constituent le siège de phénomènes physico-chimiques intenses et peuvent présenter différents types de désordres révélant parfois une pathologie généralisée de la structure.

En effet, au cours du temps, l'altération des couches superficielles peut se produire par interaction d'agents exogènes soit avec le liquide interstitiel soit avec la matrice de celles-ci. Les caractéristiques physico-chimiques se trouvent ainsi modifiées et il en résulte des variations, parfois importantes, dans les principales propriétés du matériau lorsqu'on se déplace de la surface externe vers le coeur. En fonction des conditions d'exposition, ces variations visent à affaiblir le degré de service initial de la peau (fonction protectrice, fonction esthétique, comportement mécanique) et plus généralement de la structure.

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de caractériser les propriétés physiques et chimiques de la peau des bétons exposés à la dessiccation. Il s'agit d'un problème important dans le contexte du diagnostic de l'état de santé des ouvrages car ce sont les propriétés de cette peau qui jouent un rôle déterminant dans les processus d'éclatement superficiel, de microfissuration, d'agression chimique et de détérioration de la surface. Il va sans dire qu'il n'est pas question de "tout connaître à partir du parement", ce qui serait présomptueux, mais d'apporter un support expérimental aux surveillants d'ouvrages, permettant de mieux apprécier le degré de gravité des désordres constatés. D'autant plus qu'ils ne disposent jusqu'à lors, pour poser un diagnostic, que de la seule vue de l'aspect des surfaces pouvant donner au béton toute sa personnalité.

Cette étude se compose de trois parties :

La première décrit les phénomènes physico-chimiques qui ont des effets macroscopiques sur le comportement mécanique du béton, en mettant l'accent sur ceux d'origine hydrique dont la cinétique est beaucoup plus étendue dans le temps

que ceux d'origine thermique et donc des conséquences moins faciles à maîtriser. Ensuite, on présente quelques résultats obtenus par des mesures de contraintes effectuées sur des ouvrages réels par la méthode de libération. Ces résultats ont pu mettre en évidence qu'une peau, de quelques millimètres d'épaisseur, était soit fissurée (à contrainte nulle), soit le siège de contraintes faibles ou "adoucies". Dans un béton précontraint, la participation de cette peau à la reprise de l'effort normal a pu être considérée comme négligeable.

La deuxième présente l'étude expérimentale portant sur la caractérisation des propriétés de la peau des bétons exposés à la dessiccation. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes provenant de dalles de 4 et 16 mois d'âge et d'ouvrages régionaux d'âge égal ou supérieur à 20 ans. Cette caractérisation a permis de montrer les variations des propriétés mesurées en fonction de la profondeur des éprouvettes testées.

La troisième est consacrée à l'analyse des données recueillies dans la partie expérimentale orientée vers l'évolution des caractéristiques mesurées. Cette partie compare les résultats obtenus pour les différents bétons étudiés en déterminant des relations entre ces caractéristiques et en formulant, le cas échéant, des lois correspondantes.

NOTATIONS ET CONVENTIONS DE SIGNE

E_s - module d'élasticité statique, (GPa).

E₁, E₂, E₃ - modules d'élasticité dynamiques à l'état "naturel"(I),
sec (II) et saturé (III) respectivement, (GPa).

r₁, r₂, r₃ - masses volumiques correspondantes, (g/cm³).

A_b - coefficient d'absorption d'eau, (%).

W - teneur en eau, (%).

P - porosité ouverte accessible à l'eau, (%).

P* - porosité pondérée de la pâte de ciment durcie, (%).

B - résistance en traction par fendage, (MPa).

G - pourcentage granulaire surfacique, (%).

d moy/s - distance moyenne par rapport à la surface externe, (mm).

σ - écart-type.

V - coefficient de variation, (%).

PREMIERE PARTIE

COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA PEAU DU BETON FACE A LA DESSICCATION

1.1. - Introduction

1.2. - Définitions générales

1.2.1. - Fonction esthétique

1.2.2. - Fonction protectrice

1.3. - Rappel des travaux antérieurs

1.4. - Phénomènes thermique et hydrique

1.4.1. - Réaction d'hydratation. Retrait endogène

1.4.2. - Séchage naturel. Retrait de dessiccation

1.4.2.1. Cinétique de dessiccation

1.4.2.2. Effets mécaniques du retrait

1.4.2.3. Fissuration de peau

1.4.3. - Apport de la méthode de libération des contraintes

1.5. - Conclusion de la première partie

PREMIERE PARTIE

COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA PEAU DU BETON FACE A LA DESSICCATION

1.1. - Introduction

Dans cette première partie, après une présentation des fonctions générales de la peau des bétons, nous aborderons les phénomènes physico-chimiques qui se produisent dans le matériau au cours de sa vie et entraînent des effets macroscopiques sur son comportement mécanique. Parmi ces phénomènes, ceux d'origine hydrique ont des conséquences plus importantes que ceux d'origine thermique. Le retrait de dessiccation qui a son origine dans le déséquilibre hygrométrique entre le béton et le milieu ambiant provoque à la surface des contraintes de traction dépassant, le plus souvent, la résistance du matériau et donnant lieu à la fissuration de peau. Les conséquences de la dessiccation sur la distribution des contraintes normales dans le béton et sur le comportement mécanique de la peau ont pu être révélées à partir des mesures directes de contraintes effectuées sur de vieux ouvrages en béton précontraint par la méthode de libération. En particulier, il a été montré qu'une peau, de quelques millimètres d'épaisseur, était soit fissurée (à contrainte nulle), soit le siège de contraintes faibles ou "adoucies". La participation de cette peau à la reprise de l'effort normal pouvait être considérée comme négligeable.

La caractérisation des propriétés physiques et mécaniques de la peau permettrait d'évaluer l'ampleur de la dessiccation sur celle-ci dont le rôle est déterminant dans la durabilité des ouvrages.

1.2. - Définitions générales

1.2.1. - Fonction esthétique

L'aspect de la surface du béton, lorsque ce dernier doit rester visible, est une caractéristique importante qui intervient directement dans l'esthétique de l'ouvrage.

Pour les architectes, cette "surface du béton" est appelée également "Peau du béton" (prescriptions techniques, 1988). Elle est définie pour les bétons lisses, bruts de décoffrage, comme étant le parement composé des éléments fins (ciments et fines de sable) qui enrobent les gros granulats (gravillons et graviers), constituant le squelette du béton (Fig. 1.1.). Le mortier d'éléments fins, qui constitue cette peau et qui vient au contact des moules et des coffrages, a une épaisseur plus ou moins importante en fonction de la composition du béton et de la qualité de sa mise en oeuvre.

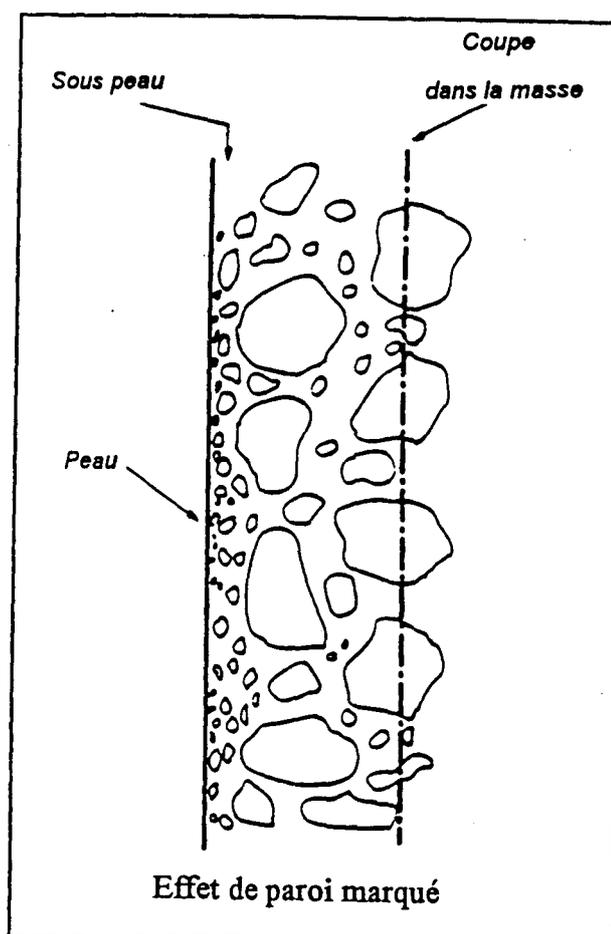


Figure 1.1. : Aspects du béton suivant les coupes effectuées en fonction de la surface de démoulage d'après Venuat (1989)

Qu'elle soit obtenue après décoffrage, ou vue du public, la surface du béton désigne aussi le parement, face extérieure d'un élément de construction, solidaire ou non de la structure, Mathivat (1992).

Les caractéristiques du béton de surface peuvent être variées en raison :

- . de la texture et de la couleur des matériaux constitutifs,
- . de son aptitude au moulage qui permet d'obtenir aisément des reliefs,
- . des traitements divers qui modifient la texture ou la forme de sa surface.

On peut distinguer au moins trois types de surface :

- les surfaces brutes de démoulage dont les caractéristiques dépendent directement de la couleur du béton, de la forme du moule et de sa peau ;
- les surfaces de béton travaillées dont les caractéristiques de surface ont été modifiées par un traitement généralement mécanique. On peut distinguer :
 - . les surfaces travaillées à l'état frais ,
 - . les surfaces à granulats apparents,
 - . les surfaces travaillées à l'état durci ;
- les surfaces constituées de parements rapportés. Il s'agit d'un béton de surface qui n'est plus apparent mais servant de support à des éléments de nature différente.

Ces divers types de surface peuvent être employés pour tous les éléments destinés à rester apparents avec, dans certains cas, une affinité particulière liée au type de fabrication, à la destination ou au coût de l'élément. En outre, il est possible de combiner entre eux certains de ces différents types de surface et d'obtenir ainsi des effets plus riches. Les processus d'élaboration de ces types de surfaces sont étudiés par un grand nombre d'auteurs. A consulter, par exemple, Darcemont (1982).

Les parements de béton, en l'absence de traitement particulier, vieillissent mal et présentent de graves défauts. Cependant, certains défauts sont souvent observés dès le décoffrage des éléments béton. Geoffroy (1990) distingue dix défauts parmi les mieux connus :

- les variations de teinte sur des zones de grande surface,
- les efflorescences de carbonate de calcium,
- les taches noires,
- les pommelages ou phénomènes de transparence des graviers,
- les traces de rouille,
- le ressuage de surface,
- les nids de cailloux,
- les fuites de laitance au droit des joints,
- les soufflures ou empreintes de bulles,
- les fissures de retrait.

Ces défauts d'aspect de parements sont souvent les signes extérieurs de pauvreté de la qualité intrinsèque des bétons mis en oeuvre (composition, vibration, coffrage...). Dans le souci d'éviter ces anomalies plusieurs auteurs, Adam (1961, 1971), Bake et Amice (1967), Huberty (1980), Morog (1980)... soulignent l'importance de la maîtrise de fabrication des bétons, qui doit être accompagnée d'une mise en oeuvre correcte.

1.2.2. - Fonction protectrice

Cette fonction est très connue : le béton d'enrobage protège chimiquement et physiquement l'acier contre la corrosion. En effet, l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé protégeant les armatures noyées dans le béton. Cette capacité de protection peut s'évaluer en termes de qualité du béton de recouvrement et d'épaisseur de recouvrement ou d'enrobage, Duval (1992).

Selon la classe d'environnement auquel l'ouvrage est exposé, les codes de calcul du béton armé aux états limites (BAEL) fixent les épaisseurs minimales d'enrobage. Ainsi, pour réduire les conséquences de l'hétérogénéité du béton d'enrobage lorsque les armatures sont trop proches de la surface et pour augmenter la durée de la pénétration des agents agressifs jusqu'à l'armature, il y a avantage à varier les épaisseurs minimales en fonction des conditions climatiques.

Lorsque l'épaisseur ou la résistance du béton d'enrobage n'est pas suffisante, ce dernier peut se soumettre à des dégradations qui conduisent facilement à la corrosion des armatures et par suite à la détérioration de l'ouvrage.

Une première origine de cette corrosion électrochimique des armatures est la diminution du pH due à la carbonatation. Ce phénomène résulte de la pénétration du CO₂ atmosphérique qui, suite à une réaction acido-basique, entraîne la transformation de la portlandite en carbonate de calcium. La surface de l'armature s'oxyde uniformément provoquant un gonflement qui conduit à l'éclatement du béton d'enrobage.

Une deuxième origine est la présence d'ions chlorures dans le béton rapportés par les sels du milieu extérieur. La carbonatation du béton d'enrobage et/ou la pénétration des chlorures, lorsqu'elles atteignent l'armature, dépassent cette dernière c'est-à-dire enlèvent sa protection naturelle contre la rouille par abaissement du niveau d'alcalinité du milieu.

En terme de cinétique, l'évolution du béton d'enrobage et de l'armature peut être schématisée selon un modèle proposé par Tuutti (1982) à la figure 1.2. On peut constater que la corrosion de l'acier se déroule suivant deux étapes distinctes : dans la première dite "amorçage", l'acier est protégé initialement par l'alcalinité élevée de la solution interstitielle dans le béton, et il se forme une couche passive mince d'oxydes protecteurs. La carbonatation du béton en diminuant le pH et/ou une quantité suffisante des chlorures peuvent détruire cette passivité et amorcer le passage à la deuxième étape dite "propagation de la corrosion" (point A). La vitesse de corrosion se mesure à l'apport d'oxygène et surtout à l'humidité ambiante. La propagation de la corrosion conduit progressivement à la formation de fissures et à l'éclatement du béton d'enrobage (point B).

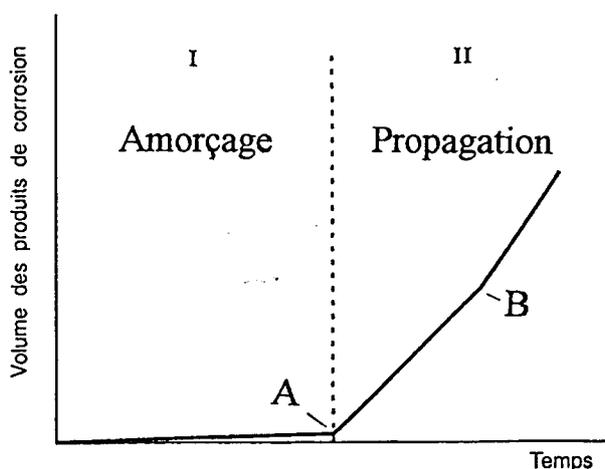


Figure 1.2. : Cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage d'après Tuutti (1982)

D'après une étude approfondie de ces deux étapes, développée par Duval (1992), on peut constater que :

- la propagation de la corrosion s'amorce pour une concentration en ions chlore de l'ordre de 0.5 % en poids par rapport au ciment. Ces ions, agissant en quelque sorte comme un catalyseur, influent sur la vitesse de corrosion qui est donc sensiblement proportionnelle à la quantité de sels ajoutée jusqu'à 2 % en chlorures.
- la corrosion se propage pour un pH de l'ordre de 11.4 dans le béton carbonaté et s'accroît lorsque le pH diminue. En présence de chlorures, elle se produit même en milieu très basique autour d'un pH de 12.
- la propagation de la corrosion n'a lieu qu'en présence d'oxygène pour une humidité relative supérieure à 80 %, l'influence de la température n'étant importante qu'au dessus de 10 °C. La résistivité du béton contrôle la vitesse de corrosion et toute réduction de la porosité limite cette propagation.
- la migration des ions OH⁻, qui repassive les armatures, et les produits d'oxydation initiaux, qui freinent l'accès de l'oxygène, empêchent le développement de la corrosion dans les fissures lorsque leur largeur ne dépasse pas 0.3 - 0.4 mm . Aussi, lorsque les fissures sont normales aux armatures, la corrosion reste localisée dans des zones étroites. En revanche, il n'en est pas de même pour le cas fréquent où les fissures se développent parallèlement aux armatures et contribuent au décollement du béton d'enrobage.

Pour éviter le développement de la corrosion, l'auteur souligne qu'il faut autant que possible allonger la période d'amorçage en utilisant des bétons compacts et peu perméables ayant évidemment une épaisseur d'enrobage suffisante . Ainsi, en présence de chlorures, les additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice, fillers) peuvent être bénéfiques.

1.3. - Rappel des travaux antérieurs

La composition et les propriétés de la peau du béton sont depuis longtemps mal connues, Kreijger (1970). Une première publication de Mamillan en 1973 abordait l'hétérogénéité du matériau à partir des mesures de propagation du son, effectuées en surface sur des poutres âgées de trois ans. L'intérêt de ces mesures est que la vitesse du son est liée à la résistance du béton. Dans le béton compact, la vitesse est élevée et la résistance est grande. Inversement, dans le béton plus poreux, la vitesse est faible et donc la résistance diminue. Il a été établi que la vitesse du son la plus faible était relative à une propagation dans une couche périphérique d'environ 30 mm d'épaisseur. Ce résultat était à priori assez surprenant puisque les poutres étaient conservées dans des conditions habituelles et constituées d'un très bon béton donnant une résistance en compression à 28 jours supérieure à 45 MPa. Afin de vérifier cette hétérogénéité du béton, l'investigation a été poursuivie sur des éprouvettes obtenues par découpes successives dans les éléments testés. Ainsi, on a pu montrer que le module d'élasticité dynamique diminue de 17% et la porosité augmente de 21% en se déplaçant latéralement du cœur vers le parement de l'éprouvette. L'auteur estime que l'abaissement de la qualité de la zone périphérique du matériau est dû à la perte d'eau par dessiccation (béton moins bien hydraté, moins compact et plus poreux...).

Une synthèse des résultats d'essais de Kreijger (1984), effectués depuis 1970 et reposant sur des études faites sur des coupes obtenues par sciage et des examens stéréologiques, montre que la peau du béton est constituée de trois couches différentes par leurs propriétés mécaniques, électriques, physiques et chimiques :

- une couche de pâte de ciment (0,1 mm d'épaisseur)
- une couche du mortier (5 mm)
- une couche du béton (30 mm).

L'auteur, mettant en évidence un "effet de peau" dû essentiellement à la mise en place et à la cure du béton (effet du coffrage, ségrégation, évaporation, fissuration excessive...), montre que cet effet conduit à des variations dans les teneurs de ciment, granulats et eau, ainsi que dans la porosité des différentes couches superficielles, ce qui affecte la durabilité : retrait et gonflement différentiel, hygrique et thermique, résistance et déformabilité différentielles. L'accroissement de la sorption

d'eau par une plus grande porosité de la peau du ciment et du mortier accompagné d'une augmentation du rapport E/C peut causer un gonflement accru par gel/dégel et notamment s'il y a eu usage de sels dégivrants, Kreijger (1984). L'accroissement de porosité de la peau détermine une érosion et une usure plus fortes et des agents agressifs pénètrent plus rapidement dans le matériau y intensifiant les réactions chimiques. Il en résulte des variations, parfois importantes, dans les principales propriétés du matériau lorsqu'on se déplace de la surface externe vers le coeur de l'ouvrage. D'après la figure 1.3, qui rend compte de ces variations, on peut souligner qu'il se crée une peau poreuse, apte à absorber rapidement l'eau à son contact. La diminution du module de finesse au voisinage du parement, traduit la forte concentration en grains fins dans cette zone.

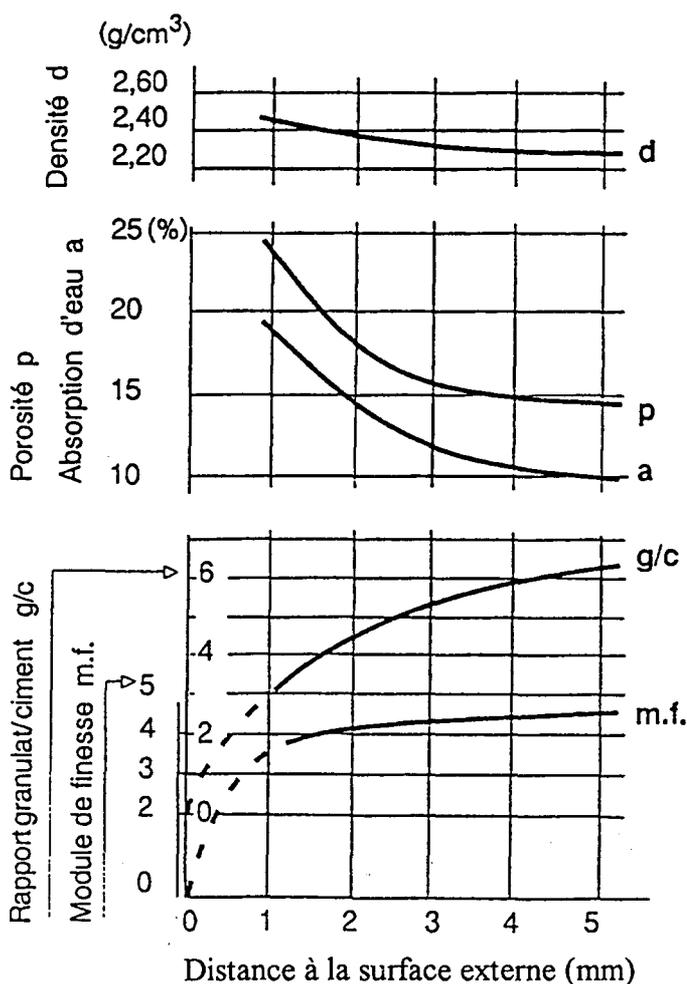


Figure 1.3. : Variations de la qualité d'un béton dans les premiers millimètres proches d'un parement exposé d'après KREIJGER (1984)

Béton (325 kg de CPA/m³ ; E/C = 0,54 granulats/ciment = 6,1)
 conservé 7 jours dans l'eau (20°C) et 21 jours à l'air (20°C; 65 % HR)

Les examens stéréologiques relatifs à la composition granulaire des bétons testés, montrent que le rapport granulat / ciment augmente en fonction de la distance à la surface externe, Kreijger (1973). En affirmant que la plupart des propriétés du matériau sont déterminées par le pourcentage granulaire, l'auteur cherche à établir une estimation des propriétés de la peau à partir d'une combinaison de ses résultats expérimentaux avec les expressions de Hoobs (1969, 1971). Ces expressions donnent la dépendance du coefficient de compressibilité, du module d'Young, du fluage, du retrait et de la dilatation thermique du béton vis-à-vis des propriétés physiques de ses constituants et de la concentration volumétrique en agrégat. En effet, en considérant le béton comme un composite constitué de particules d'agrégat uniformément disposées dans une matrice de ciment, on suppose que ces deux phases restent "parfaitement" unies avant et après chargement, retrait et dilatation. On montre que si le coefficient de compressibilité ou le module d'Young de l'agrégat sont infinis et si le retrait ou la dilatation thermique de l'agrégat sont nuls, la théorie prédit que :

$$Q = Q_m (1 - D_a) / (1 + D_a)$$

où Q_m est le fluage, le retrait ou la dilatation thermique de la matrice et Q la valeur correspondante pour le béton, D_a est concentration volumétrique de l'agrégat. Ainsi, la combinaison des résultats obtenus par Kreijger (1975) avec ceux de Hoobs (1971) donne lieu au graphique présenté par la figure 1.4, (la formule donnée pour le retrait a été appliquée pour un rapport des modules d'élasticité $E_{agrégat}/E_{ciment} = 3$).

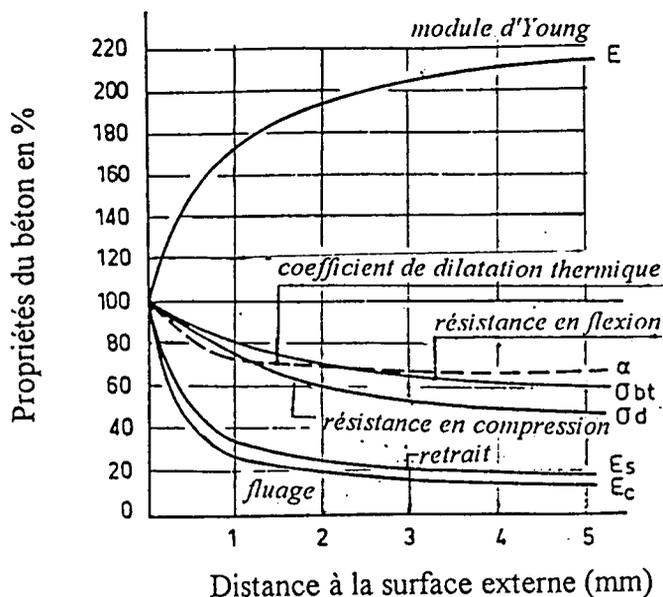


Figure 1.4. : Estimation des propriétés du béton dans les premiers millimètres du parement exposé d'après KREIJGER (1984)

Certaines expressions dérivées de l'approche citée ci-dessus, sont en accord suffisant avec des mesures du module d'Young, du fluage et du retrait faites sur le béton, Hoobs (1971). Elles sont aussi similaires à celles obtenues par le modèle de Hashin (1962) et de Hashin et Shtrickman (1963) permettant le calcul des caractéristiques de déformabilité des composites biphasiques à partir de la connaissance de celles des phases, sur la base d'une description simplifiée du système. En effet, ce modèle propose de considérer un composite à inclusions sphériques multimodales, dispersées dans une matrice, et suppose que l'empilement des sphères composites formées d'un grain entouré d'une "coque" de matrice, constitue un arrangement "appolonien". En remarquant que le calcul des contraintes et des déformations du matériau, soumis à une pression extérieure, se réduit à celui de la sphère composite isolée, on trouve les expressions du module de compressibilité, de la déformation libre (retrait ou gonflement du composite) ou encore du coefficient de dilatation thermique. Il est à noter ici qu'une amélioration intéressante de ce modèle a été proposée récemment par De Larrard (1992) prenant en compte les limites de l'étendue granulaire et la borne supérieure de concentration en inclusion qui en découle.

Dans une étude analysant les mécanismes de défense du béton face aux agressions chimiques, Vernet (1992) montre que pour un béton préparé et mis en place selon les règles de l'art, la peau des bétons constitue une barrière d'hydrates qui est le résultat des interactions entre les processus de précipitation et les processus de diffusion qui résultent de la réaction chimique entre les hydrates de surface et les agents agressifs du milieu extérieur. Cette barrière dite donc "diffusionnelle", utilisant les produits des réactions avec le milieu extérieur, ralentit voire empêche la progression des ions agresseurs vers le coeur du matériau. En effet, lorsque les éléments régulateurs du pH de la phase aqueuse des capillaires sont consommés à la surface du béton par un afflux permanent d'agresseurs acides, le pH finit par baisser au dessous de 9, domaine où aucun hydrate basique n'est stable. Le système ciment-eau parvient alors dans la stabilité du carbonate de calcium, des hydroxydes de fer, de l'aluminium et de la silice. Ces produits, ayant une structure de gels, forment en surface une couche continue consommant des quantités importantes d'ions H^+ et ralentissant la progression des acides vers le coeur du béton. L'intensité de l'agression détermine, selon Grube (1982), l'épaisseur de cette barrière de gel, et la peau se constitue lorsque la vitesse d'attaque devient négligeable. D'après Vernet (1992) plusieurs couches constituent chimiquement cette peau :

- une couche de surface couverte de très petits cristaux de CaCO_3 (vatérite, aragonite, calcite), presque toujours jointifs,
- une couche d'hydroxydes d'aluminium et de fer provenant des sulfo-aluminoferrites,
- une couche du gel de silice qui évolue d'une manière continue jusqu'au silicate de calcium hydraté, plus stable en milieu acide que les aluminates.

Comme pour la plupart des fronts d'attaque acide, la vitesse de progression de la peau suit une loi de diffusion simple en \sqrt{t} , et dépend de la porosité et de l'hygrométrie qui facilite la formation de l'acide carbonique H_2CO_3 . Des modèles de la progression des fronts acides, développés par Grube (1989) et Buil (1991), montrent que dans le cas des eaux de forte concentration en dioxyde de carbone, l'attaque dépend majoritairement de la vitesse de déplacement du liquide et de la teneur en calcium. Dans une eau douce immobile, l'attaque est presque stoppée, et elle est nulle dans une eau calcaire.

- Dans le souci de faciliter à l'ingénieur la meilleure exploitation des mécanismes de défense du béton, Vernet (1992) souligne l'importance de la réduction de la perméabilité du matériau.

Ces travaux sont en majeure partie le fruit d'une estimation qui ressort d'une approche plus théorique et restent dans l'ensemble très peu nombreux pour couvrir tous les aspects du problème. Aussi, nous paraît-il utile, d'aborder les mécanismes physiques et chimiques qui se produisent dans le matériau au cours de sa vie conditionnant ses caractéristiques et entraînant des effets macroscopiques sur son comportement mécanique.

1.4. - Phénomènes thermique et hydrique

Le matériau béton, souvent défini comme un mélange simple de granulats, de ciment et d'eau, présente un comportement mécanique assez complexe. Au cours du temps, les propriétés des granulats restent stables. C'est donc la pâte de ciment durcie qui est à l'origine de cette complexité dans le comportement du béton puisqu'elle ne cesse d'évoluer dans ses propriétés durant toute la vie du matériau. L'évolution continue de

cette pâte triphasique (solide, liquide, gaz), dont les phases sont chimiquement et physiquement interactives, agit sur le "squelette" granulaire et détermine, par conséquent, le comportement macroscopique du béton. Deux phénomènes physico-chimiques majeurs peuvent expliquer ce comportement : l'hydratation du ciment et le séchage naturel.

1.4.1. - Réaction d'hydratation. Retrait endogène

La pâte de ciment durcie est formée à partir d'une réaction chimique entre le ciment et l'eau appelée réaction d'hydratation. Cette réaction se manifeste par un remplissage progressif des espaces entre les grains de ciment anhydres initiaux, par des amas d'hydrates et l'apparition de ponts de matière entre ces hydrates.

La réaction d'hydratation est exothermique : lors de la prise du béton c'est-à-dire au moment où la réaction d'hydratation se produit dans sa quasi-totalité, la chaleur dégagée est de l'ordre de 150 à 350 joules par gramme du ciment, ce qui provoque dans les structures des élévations de température assez importantes allant en quelques heures jusqu'à 60°C et plus selon la masse bétonnée. Après la prise, l'hydratation se ralentit, ce qui conduit au refroidissement du matériau. De ce fait, même si la température extérieure est constante, le béton manifeste une déformation d'origine thermique : une expansion suivie d'une contraction, Acker (1985).

En principe, la réaction d'hydratation se produit avec un échange hygrométrique entre la pâte de ciment durcie et le milieu ambiant ; une description physique de ces processus donnée par Acker (1988-a), permet de poser l'hypothèse de leur découplage. On peut donc parler, en conditions isothermes et en l'absence d'échange hygrométrique avec l'extérieur, de l'existence d'un seul retrait endogène qui s'explique par le phénomène d'autodessiccation, résultant de l'hydratation, (Buil, 1979 ; Acker, 1986). Ce retrait est de l'ordre de 10^{-4} et s'effectue pour la majeure partie en quelques jours.

Dans les pièces massives, compte tenu que le béton est mauvais conducteur, la chaleur dégagée par l'hydratation s'accumule au coeur où les températures sont plus élevées que dans les zones externes et les dilatations thermiques sont différentes : le coeur des

pièces refroidit moins vite que la surface et comme, parallèlement au dégagement de chaleur, la résistance à la déformation croît, l'inertie à celle-ci crée des tensions internes, Acker (1987). Il en résulte des contraintes de compression à coeur et des contraintes de traction en surface pouvant dépasser la résistance à la traction du béton et provoquant des microfissurations. Ces dernières sont réparties sur toute la surface de la structure, Acker (1984), mais elles ont peu d'importance en raison de leur faible profondeur et du fait qu'elles se referment lors de l'équilibre thermique du béton, Sakillariou (1982).

Par la suite, nous allons donc négliger les conséquences du retrait endogène sur le comportement mécanique du béton déterminé essentiellement, hors charges de service, par les phénomènes hydriques.

1.4.2. - Séchage naturel. Retrait de dessiccation

En général, pour des raisons de mise en oeuvre, l'eau de gâchage représente, selon le type de béton, jusqu'à plus du double de l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Cette dernière partie consommée durant l'autodessiccation, ne dépasse jamais, 25 % du poids du ciment, Acker (1989). L'autre partie en excès est une eau libre en état transitoire susceptible soit de se combiner au liant, soit de s'évaporer à partir de la surface exposée à la dessiccation. Le phénomène du transfert de l'eau en excès vers l'extérieur, à la recherche d'une hygrométrie d'équilibre, est communément appelé séchage naturel. Il est extrêmement lent, (l'Hermite, 1973 ; Bazant, 1976) et dépend de la forme et des dimensions de la structure, Bazant (1982-a).

De nombreux auteurs se sont penchés sur ce phénomène, (Buil, 1979 ; Baron, 1982 ; Wittmann, 1986). Dans ce travail nous l'aborderons schématiquement afin de mettre en évidence ses effets sur le comportement mécanique du béton en général et de la peau en particulier.

Le béton est un matériau poreux et sa porosité est généralement supérieure à 10 %. On peut distinguer deux types de pores : les pores capillaires de grands diamètres qui dépendent du rapport E/C, et les pores de gel de petits diamètres qui sont des caractéristiques intrinsèques des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.

Au cours du séchage, le départ d'eau commence d'abord dans les pores capillaires et continue ensuite dans les pores de gel. La vitesse de dessiccation décroît donc dans le temps, bien que le séchage d'eau absorbée par les pores de gel provoque un taux de retrait plus grand que le séchage des pores capillaires qui est quantitativement plus important, Abiar (1986). Cette évaporation concernant une partie retenue dans les pores capillaires provoque le retrait de dessiccation, Miao (1988). Dans le cas d'une dessiccation précoce, la réduction du volume de ciment entrant en réaction augmente très fortement la porosité du ciment durci, Baron (1992).

Bien que dans le cas du séchage naturel, le retrait endogène et le retrait de dessiccation se combinent, l'hypothèse de découplage de ces derniers, proposée en 1.4.1., ainsi que les effets du retrait endogène achevés au moment du décoffrage nous permettent dès lors de considérer le béton comme un matériau chimiquement non vieillissant et en équilibre thermique avec le milieu ambiant, mais avec une teneur en eau encore élevée. La déformation d'un matériau séchant sans vieillir pourrait donc définir le retrait de dessiccation. Ce retrait potentiel est difficile à mesurer directement à cause de la présence des fissures superficielles (nous reviendrons sur ce point en 1.4.2.3.) et de la lenteur du phénomène, Bazant (1982-a).

Des essais sur éprouvettes de pâte pure, séchées de manière uniforme conduisent Verbeck (1968) à constater que le retrait linéique final est de l'ordre de 10^{-2} . Les méthodes d'homogénéisation et le calcul par la méthode des éléments finis ont permis d'estimer un rapport des retraits béton/matrice compris entre 0.1 et 0.2, Roelfstra (1985) ; la valeur du retrait potentiel du béton est donc de l'ordre de 10^{-3} . Compte tenu des fissures superficielles, les valeurs du retrait données par le règlement sont de l'ordre de $2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-4}$.

Les effets mécaniques du retrait de dessiccation sont, en majeure partie analogues à ceux du retrait endogène mais comme nous avons pu constater d'après le paragraphe précédent, la différence essentielle réside dans la durée des phénomènes. Il est donc nécessaire de décrire la cinétique de dessiccation avant de mettre en évidence les conséquences qui en résultent.

1.4.2.1. Cinétique de dessiccation

La cinétique de dessiccation est déterminée essentiellement par le déséquilibre hygrométrique avec le milieu ambiant provoquant le transfert de l'humidité de l'intérieur du matériau vers sa surface exposée au séchage.

La répartition de la teneur en eau à l'intérieur du béton et son évolution dans le temps peuvent être déterminées par un procédé expérimental qui est la gammadensimétrie, Attolou (1985), et un modèle de diffusion non linéaire basé sur une relation exponentielle, proposée par Klopfer (1974), entre le coefficient de diffusivité et la teneur en eau, et inclus dans un programme de calcul par la méthode des éléments finis, Mensi (1988), (fig. 1.5 et 1.6). La gammadensimétrie, ne pouvant être utilisée qu'en laboratoire sur des éprouvettes "bidimensionnelles", a montré la très forte non linéarité du processus ce qui rend l'exploitation des résultats expérimentaux très limitée en l'absence d'un modèle numérique fondé sur des lois physiques, Acker (1991). Le modèle de diffusion cité ci-dessus, rend compte de l'allure générale des distributions de la teneur en eau et de leur évolution dans le temps mais ne permet ni l'extrapolation à long terme, ni l'analyse des effets locaux (gradients en surface, effet de fissure...).

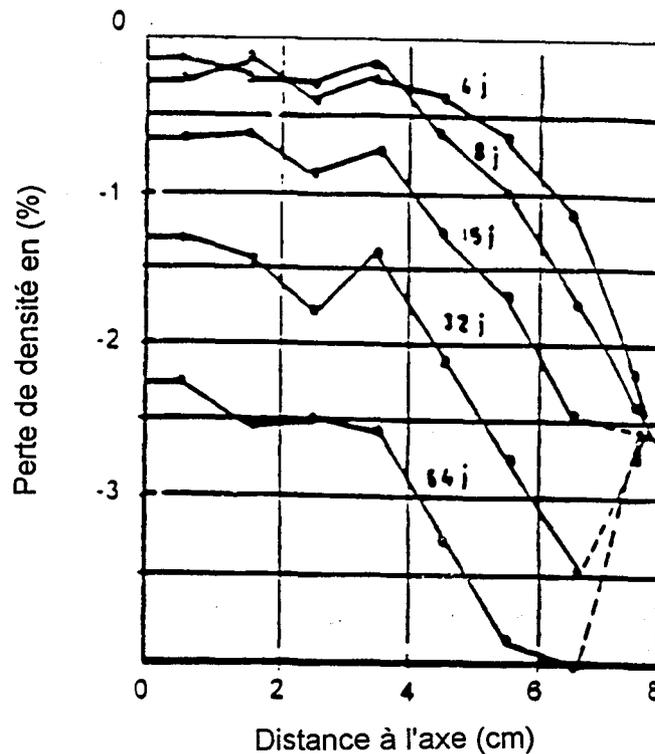


Figure 1.5. : Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau dans une éprouvette en béton de diamètre 16 cm. (Les parties en ligne tiretée correspondent à des zones affectées par la carbonatation), Attolou (1985)

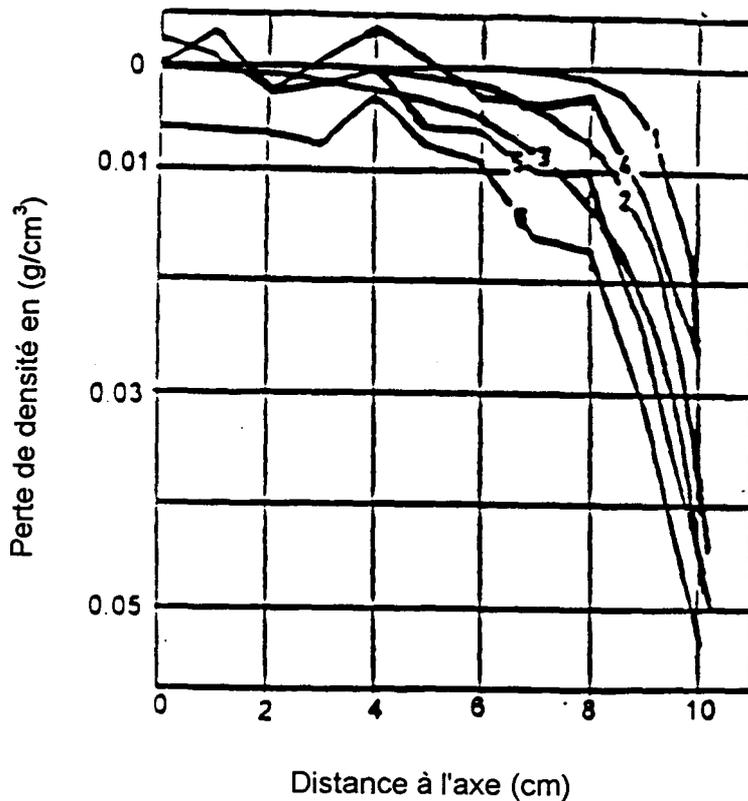


Figure 1.6. Comparaison entre les mesures et le calcul de l'évolution dans le temps de la distribution de la teneur en eau dans une éprouvette de diamètre 21 cm, Acker (1988-a)

- courbes 1-2-3 : calculées à 7, 28 et 56 jours
- courbes 4-5-6 : mesurées à 7, 28 et 56 jours

Les connaissances actuelles sur la cinétique de la dessiccation et sa durée permettent de faire les observations suivantes :

- les résultats expérimentaux d'Acker (1988-a) montrent que les gradients restent longtemps très forts et localisés au voisinage de la surface. Ils sont responsables de la fissuration de peau dont nous parlerons ultérieurement
- le séchage est un phénomène très lent. Ainsi, pour les éprouvettes normalisées servant aux essais mécaniques du béton, le séchage dure plus de quinze ans. La durée du séchage dépend du facteur d'échelle qui vérifie une loi en \sqrt{t} classique dans les phénomènes de diffusion (Fig.1.7). Les conséquences de cette propriété qui peut être expliquée qualitativement et quantitativement par un effet de structure, Acker

(1992), sont schématisées sur la figure 1.8 où on voit bien que le séchage met quelques mois pour affecter la zone superficielle des éprouvettes d'essais normalisés, plusieurs années pour les éléments de structure courants et dépasse la durée de vie prévisible pour les pièces massives. La présence des fissures superficielles empêche l'observation directe du retrait de dessiccation potentiel du béton car il est difficile de "sécher une éprouvette, si petite soit-elle, en limitant les gradients à une valeur telle qu'elle ne fissure pas", Acker (1988-a).

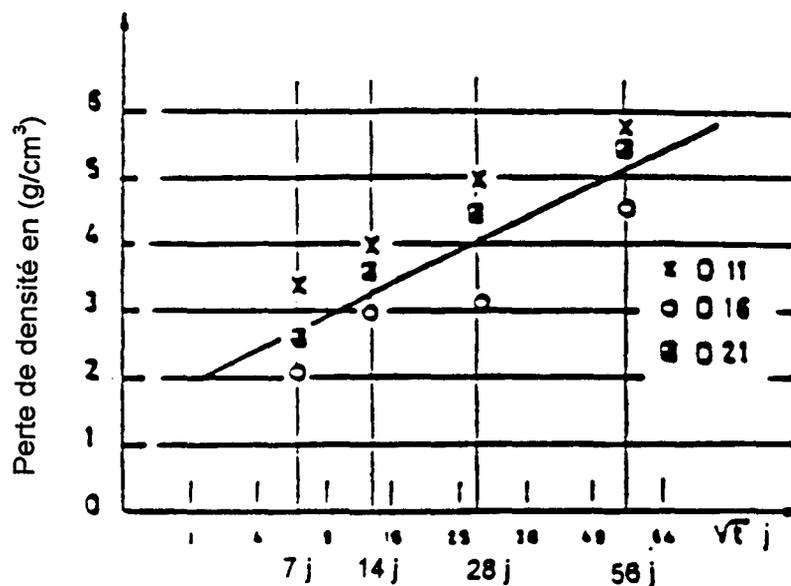


Figure 1.7. : Evolution de la perte en eau mesurée dans les éprouvettes de diamètre : 11,16 et 21 cm en fonction de \sqrt{t} , Acker (1988-a)

- Pour les pièces de faible épaisseur, séchant de manière symétrique, les effets apparents du séchage se réduisent au seul "retrait", défini dans les règlements sous forme d'une déformation uniforme. Dans les ouvrages courants, selon l'épaisseur de la structure, le séchage se traduit par une déformation moyenne, une fissuration superficielle et une flexion imposée par la dissymétrie de la pièce, les conditions aux limites et la dissymétrie de la fissuration, Acker (1988-b). Ce dernier effet a pu être constaté par Diruy (1987) sur les pièces en béton précontraint, lorsque la contrainte de l'une des deux fibres extrêmes est proche de zéro (fig. 1.9).

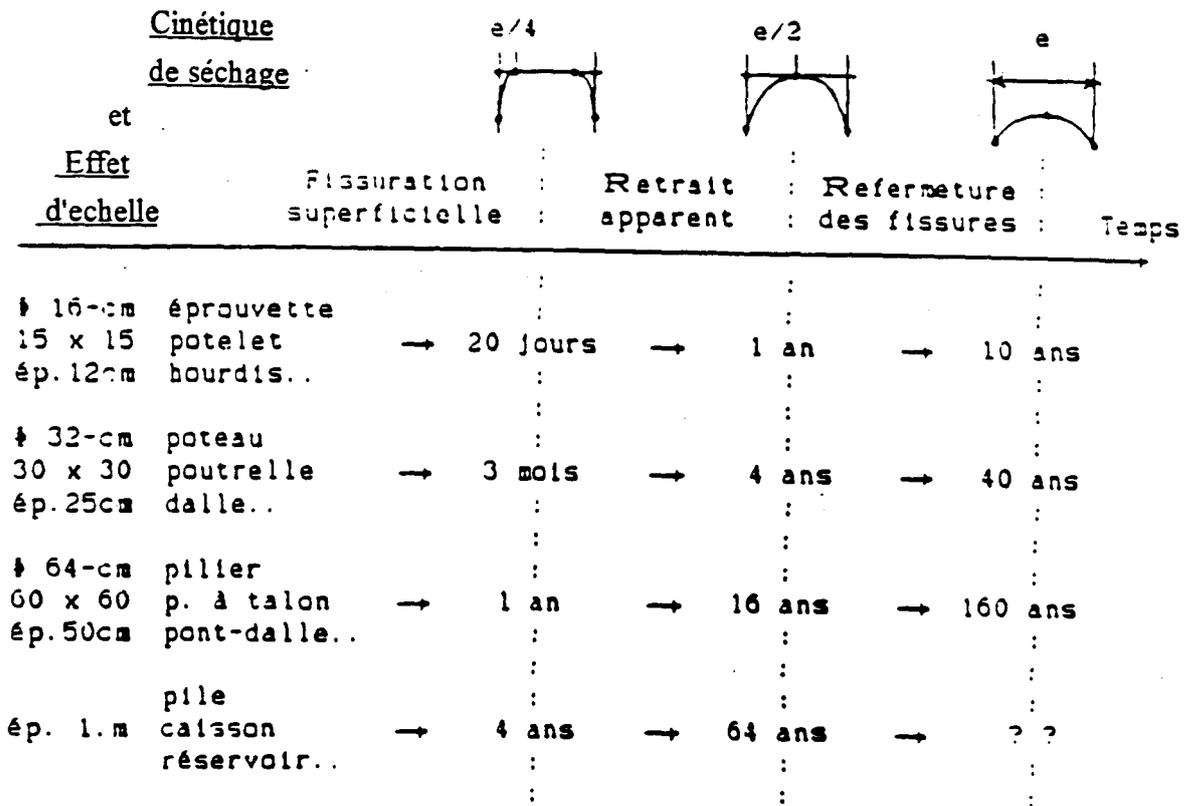


Figure 1.8. : Cinétique de dessiccation et effet d'échelle, Acker (1988-a)

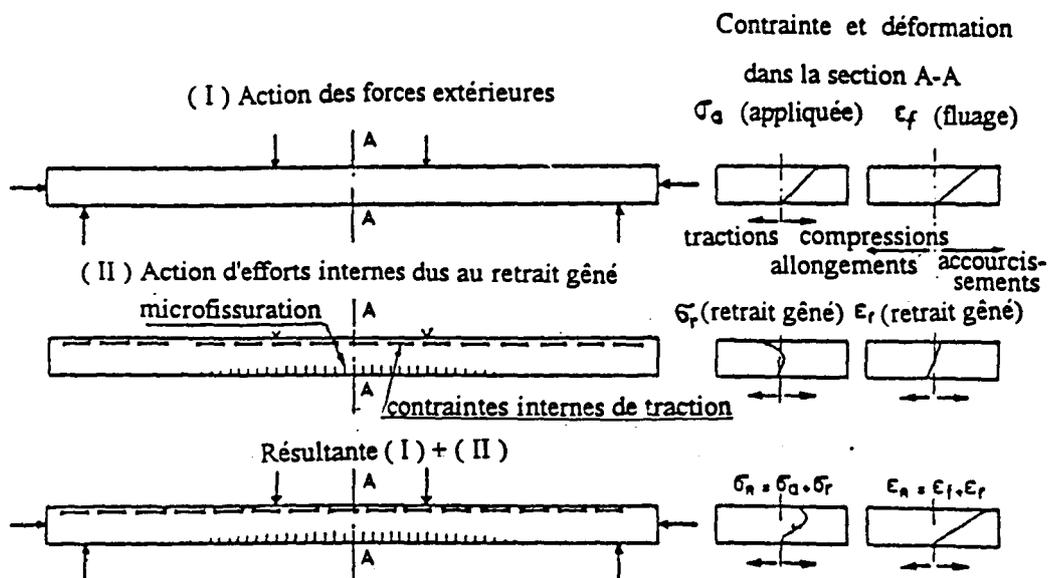


Figure 1.9. : Effet de flexion ajouté par une fissuration de peau plus importante sur la face décomprimée d'une poutre en béton précontraint (Diruy, 1987)

Pour compléter l'étude de la cinétique de dessiccation, notons qu'il faut prendre en compte l'existence des déformations imposées par un champ d'humidité. Selon Acker (1992), la relation entre ces déformations et la teneur en eau ne peut pas être représentée par des modèles linéaires.

Pour le cas de diffusion unidimensionnelle, un modèle intéressant de l'évolution du champ d'humidité dans une dalle infinie en béton a été proposé par Miao (1989).

1.4.2.2. Effets mécaniques du retrait

Etant donné que le retrait du béton n'est pas libre, l'évaporation entraîne des contraintes internes. Il s'agit des contraintes de compression au coeur et de traction en peau. Ce phénomène illustré par Bazant (1982-b) sur la figure 1.10. montre que lorsque les contraintes atteignent la résistance en traction, le béton se fissure et une redistribution des contraintes internes se produit avec une contrainte nulle dans les zones fissurées. Même dans les petites pièces, on trouve bien un retrait apparent résultant des contraintes résiduelles dans le béton.

Moyennant un calcul en élasticité linéaire, Acker (1988-b) explique ce qui se passe dans un cylindre de diamètre 16 cm et de hauteur 100 cm, conservé pendant 56 jours en atmosphère sèche : l'intensité de ces contraintes (fig. 1.11) ne correspond pas au comportement visco-élastique du matériau. Ce comportement peut être expliqué pour la part du "fluage de dessiccation" par un mécanisme faisant intervenir ces distributions transversales des contraintes, et la fissuration qui en résulte, Acker (1987). Sur la figure 1.12, on constate que les tractions induites sont très supérieures à la résistance du matériau. De ce fait, la peau est fissurée plus ou moins profondément.

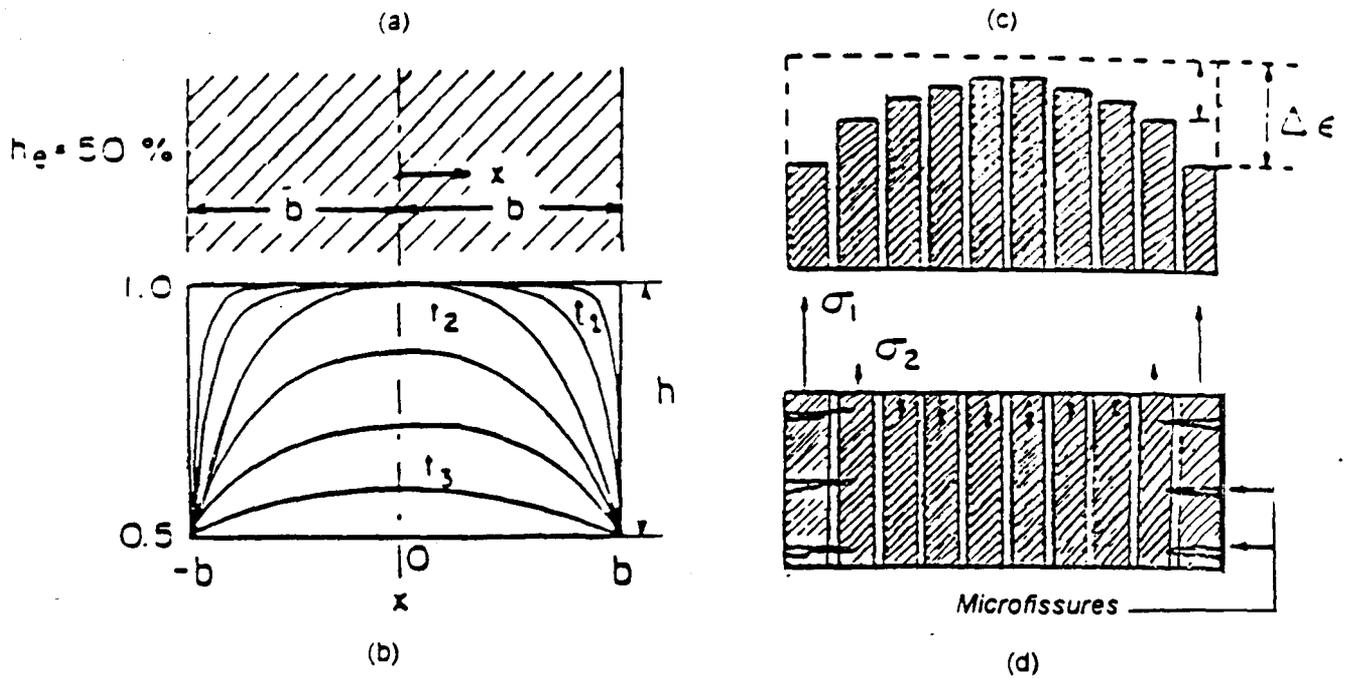


Figure 1.10. : Modélisation des effets dus au retrait de dessiccation (Bazant, 1982-b)

- a - Une dalle infinie d'épaisseur $2b$ exposée dans l'air ($HR = 50\%$)
- b - L'évolution dans le temps de la teneur en eau de la dalle
- c - L'éprouvette est découpée en cylindres concentriques ayant la même teneur en eau (cas du retrait libre)
- d - Les contraintes et la fissuration de peau dans le cas réel.

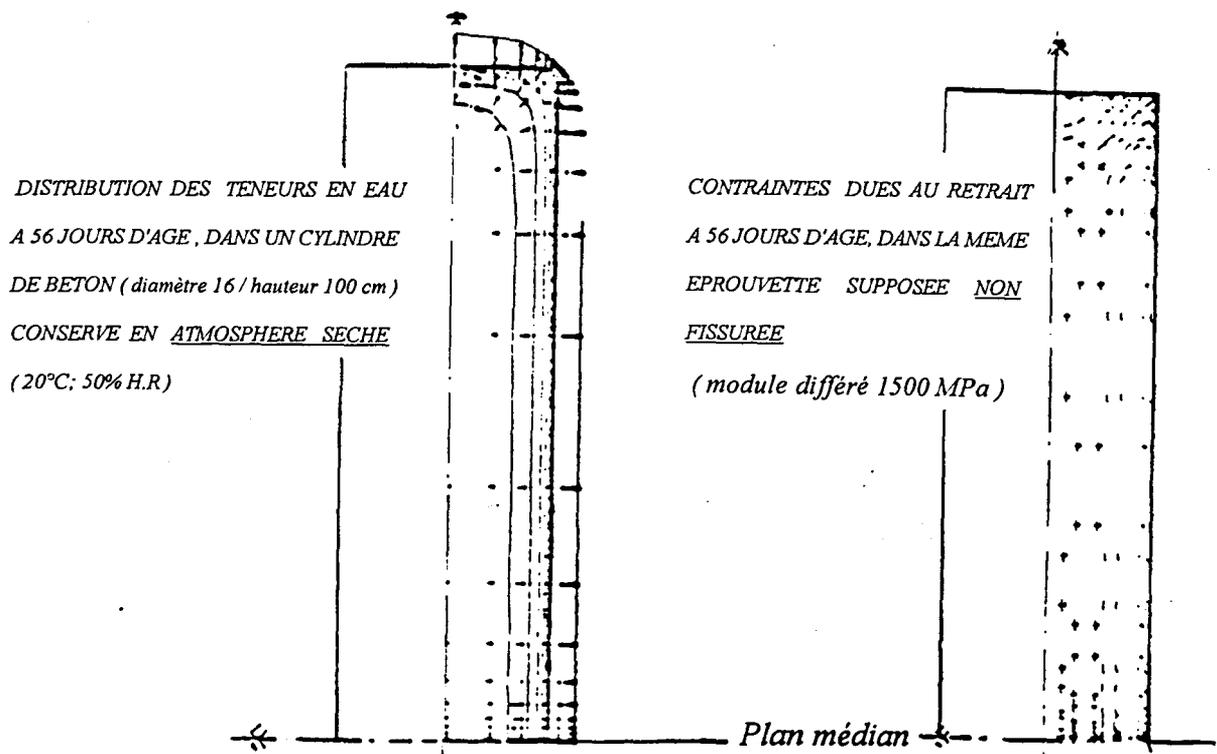


Figure 1.11. : Contraintes calculées dans un cylindre de béton, supposé non fissuré, Acker (1988-b)

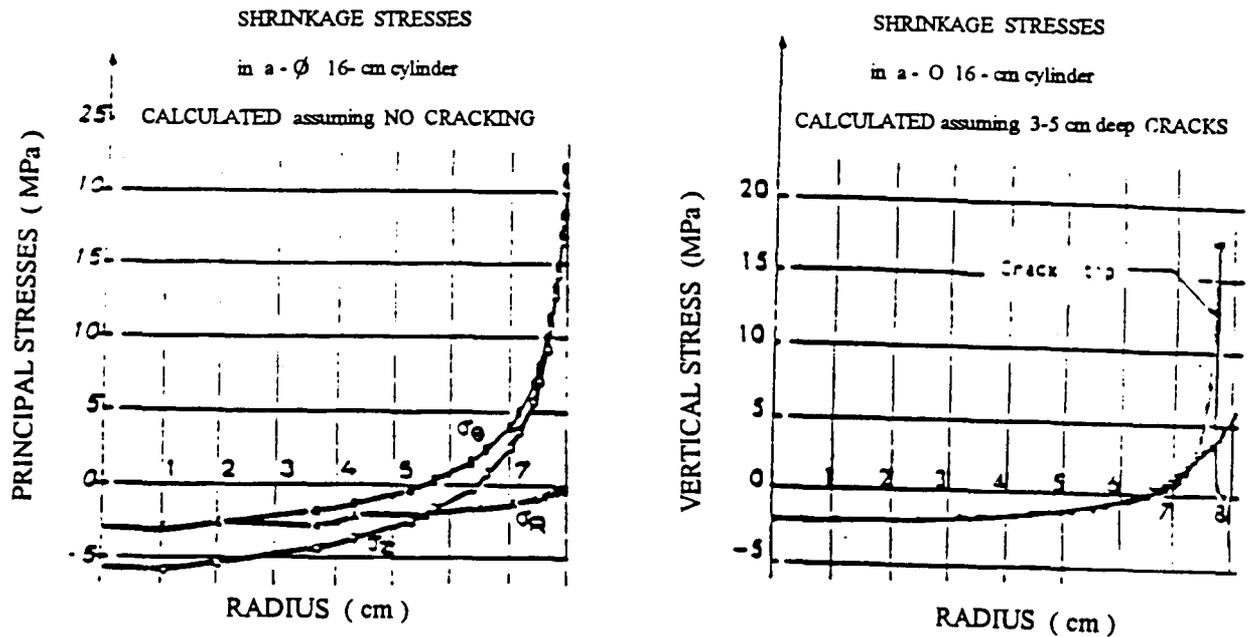


Figure 1.12. : Distribution des contraintes avec fissuration et sans, Acker (1988-b)

1.4.2.3. Fissuration de peau

Les mécanismes de cet endommagement de peau ainsi que les conséquences sur le comportement mécanique du matériau n'ont fait l'objet de travaux que récemment. Un modèle proposé par Wittmann (1980) pour le calcul des effets de la dessiccation sur la distribution des contraintes internes, décrit cet endommagement de peau par une fissuration franche. Le modèle montre ainsi que l'application d'une charge de compression, en diminuant la fissuration de peau, augmente la déformation résultante due au retrait. Cet effet selon Wittmann (1980, 1985) peut expliquer une partie importante du fluage de dessiccation.

Le modèle dû à Bazant et Coll. (1974, 1985) considère, contrairement au modèle précédent que l'endommagement de peau correspond à la formation d'une zone microfissurée permettant la transmission de contraintes de traction. Comme dans le cas du modèle de Wittmann, l'application d'une charge de compression réduit l'endommagement de peau et il en résulte une augmentation du retrait apparent du béton. Ce retrait supplémentaire est, selon Bazant, une propriété intrinsèque au matériau contrairement à l'effet d'endommagement peau qui est dû à un champ hétérogène des contraintes. Cette conclusion a été confirmée par une série d'essais de

retrait et de fluage réalisée sur un béton de maturité élevée et analysée numériquement par Buil (1990). Ces essais présentent un intérêt particulier car ils permettent d'évaluer la part du fluage "intrinsèque" au matériau intervenant dans le fluage de dessiccation, bien que l'analyse complète du phénomène reste, selon Thelandersson (1988), très délicate à cause de la méconnaissance des paramètres intrinsèques au béton.

Moyennant un outil numérique simple, Acker (1987) a pu mettre en évidence un autre aspect du mécanisme de fissuration : dans les petites pièces, lorsque le séchage atteint le coeur et lorsque la vitesse de retrait de celui-ci devient la même que celle de la peau, les fissures se referment. La fermeture totale de ces fissures impliquerait une disparition des contraintes internes et un retrait final identique quelle que soit l'épaisseur de la pièce. La fermeture libre des fissures est peu probable du fait des contraintes initiales autour des grains et des déformations résiduelles qui en résultent.

Ce mécanisme pose le problème de la distribution spatiale de cette fissuration (profondeur, ouverture et espacement des fissures) sans toutefois mentionner le problème du comportement du béton fissuré qui lui aussi n'est pas élémentaire, Mazars (1989). En effet, plus les fissures apparaîtront espacées, plus elles seront ouvertes et donc profondes. Leur profondeur dépend essentiellement du gradient de teneur en eau au voisinage de la surface. Ce gradient variant avec le temps, la géométrie de cette distribution évolue aussi. Bazant (1979) caractérise la fissuration superficielle par une multi-localisation que l'on observe sur la figure 1.13 : plus les fissures sont profondes, plus elles sont espacées. Acker (1988-a) explique, selon un modèle stochastique développé par Rossi (1987), permettant de simuler la fissuration en prenant en compte la distribution spatiale aléatoire des résistances du matériau, qu'au cours de la propagation des fissures principales, les fissures secondaires se referment augmentant ainsi l'ouverture des premières (Fig. 1.14). Ceci explique le retard d'apparition des fissures et l'évolution de leur ouverture non proportionnelle au retrait de dessiccation. Dans le cas du béton armé, ce mécanisme est plus complexe et nécessite, selon Acker (1988-a), un modèle de comportement de la liaison acier-béton qui expliquerait le rôle du ferrailage de peau dans la fissuration superficielle. Ajoutons que, pour prévenir ce genre de fissuration, on évite une dessiccation trop importante en assurant une cure efficace du béton frais. Une nouvelle technique, Al-

Tayyib (1988), consiste à utiliser des fibres de polypropylène (résistance à la traction de 600 MPa, module d'Young de 3,5 GPa) en faible proportion (de l'ordre de 0,1 à 0,5 % en volume). Ces fibres retardent l'apparition des fissures et diminuent leur ouverture, Grzyłowski (1990), paramètre géométrique très important pour la durabilité des ouvrages.

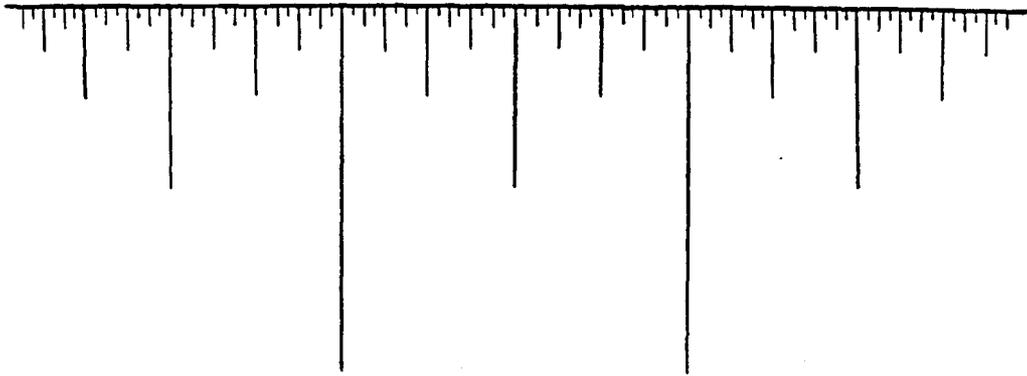


Figure 1.13. : Schéma fractal de l'évolution des profondeurs de fissures, Acker (1988-a)

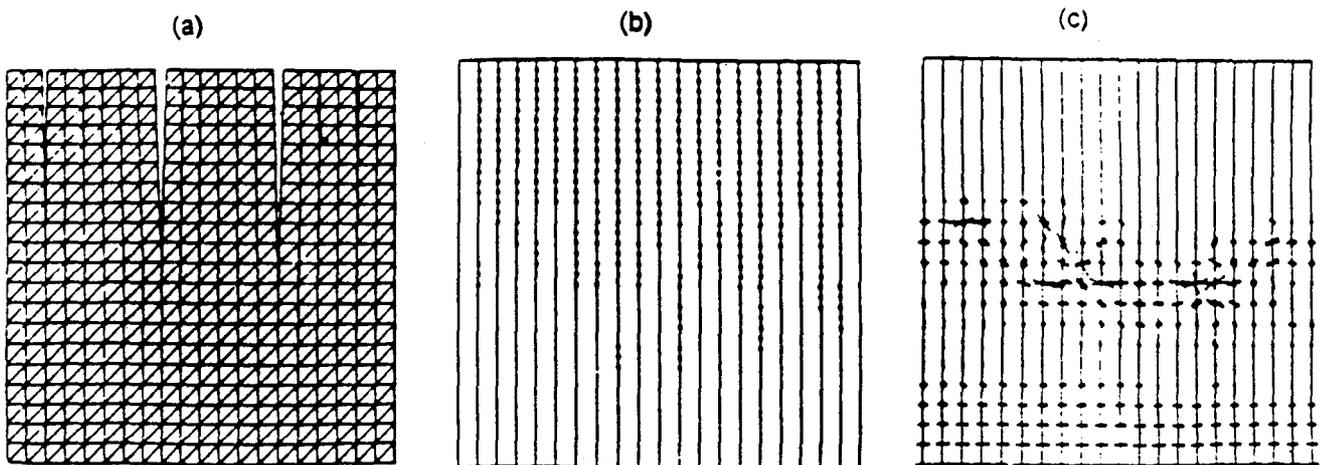


Figure 1.14. : Fissuration superficielle due au retrait de dessiccation, simulée avec le modèle stochastique Rossi (1987). Le maillage représente un élément de peau de 20x20 mm de 3 mois d'âge, séché dans des conditions courantes (20°C, 50 % HR), Acker (1988-a)

- a - maillage déformé
- b - noeuds "ouverts" représentant les fissures effectives du béton
- c - contraintes principales.

1.4.3. - Apport de la méthode de libération des contraintes

Dans une structure en béton suffisamment grande, ayant séché depuis un certain temps, le champ des contraintes initiales induit par le séchage est très intense et assez complexe, à cause de la fissuration de peau. Cette fissuration qui apparaît inévitablement même si la structure est précontrainte, Acker (1981), est depuis longtemps difficile à prendre en compte quantitativement. Le développement par Abdunur (1985, 1987), d'une méthodologie d'évaluation des contraintes dans les ouvrages a pu faciliter l'examen des contraintes résiduelles dans le béton et par conséquent, l'estimation de la distribution des contraintes au voisinage du parement.

Cette méthodologie, adaptée des méthodes de libération des contraintes utilisées en mécanique des roches, permet la mesure directe de la contrainte totale en un endroit quelconque d'un ouvrage en béton précontraint. Elle consiste en une suppression locale des contraintes par création d'une entaille de profondeur croissante, suivie d'une compensation contrôlée du champ des déplacements en surface. La pression de compensation est indicatrice de la valeur de la contrainte absolue de compression, normale au plan de l'entaille (voir annexe I). Etant donné que la contrainte absolue est une grandeur à composantes résiduelles et appliquées, le problème est de trouver, un champ de contraintes statiquement admissible, satisfaisant au mieux aux résultats des mesures.

Parmi les premiers essais de libération des contraintes, ceux réalisés par Miao (1988) sur des dalles de différentes épaisseurs, ayant séché pendant 56 jours. Sur l'ensemble des résultats obtenus, deux types de comportement ont été constatés : au cours de la création de l'entaille en surface, les deux lèvres s'ouvrent, ceci met en évidence l'importance des effets mécaniques dus au retrait de dessiccation ; après la libération des contraintes, le comportement de la structure, sous une pression dans l'entaille, reste linéaire. Ceci indique que, même si le béton est superficiellement endommagé par les retraits, l'endommagement n'a pratiquement pas d'influence sur son comportement en pression.

Le comportement linéaire en compression, après libération des contraintes a pu être interprété en élasticité linéaire, par une modélisation tridimensionnelle en éléments finis (CESAR, Humbert (1986)), qui a permis de simuler les résultats expérimentaux de manière satisfaisante. Pour l'évaluation des contraintes dues au retrait de dessiccation, Miao propose un champ de contraintes illustré sur la figure 1.15. Au coeur du matériau, l'influence des fissures de peau étant faible, ce champ est supposé proportionnel à celui de la teneur en eau déterminée expérimentalement. Vers la peau, une répartition des contraintes de traction est représentée par une courbe parabolique, fonction de la fissuration superficielle. Cette distribution qui suggère un "adoucissement" du profil des contraintes près du parement, est confirmée par Abdunur, Acker et Miao (1989), à partir des simulations numériques avec le modèle stochastique de Rossi (1987), (fig. 1.16.), et similaire à celle donnée par Bazant (1992).

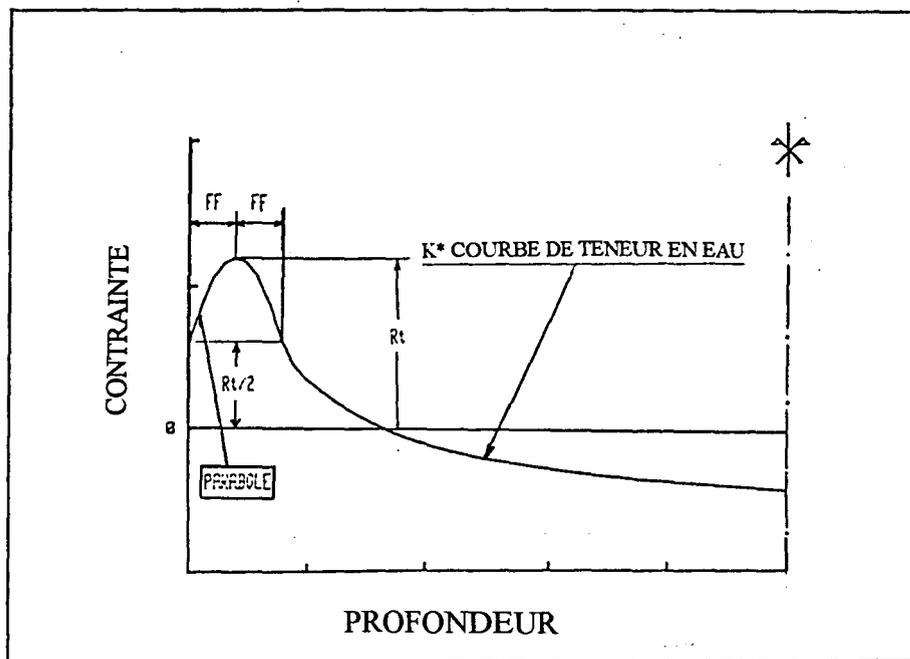


Figure 1.15. : Distribution supposée des contraintes initiales montrant l'adoucissement de celles-ci sur les premiers millimètres du parement. Le paramètre FF étant la profondeur de la zone affectée par la fissuration, R_t - la résistance à la traction du matériau, Miao (1988).

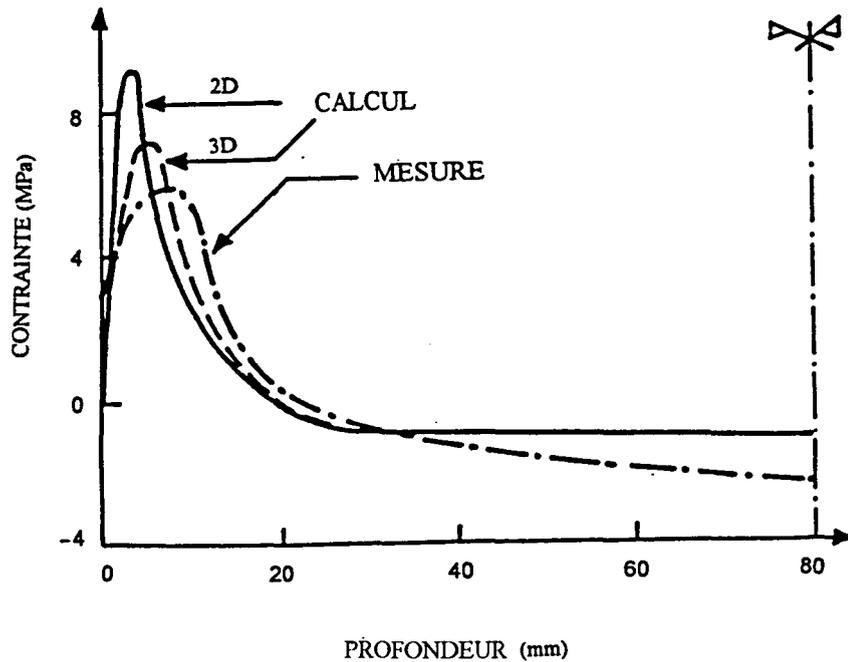
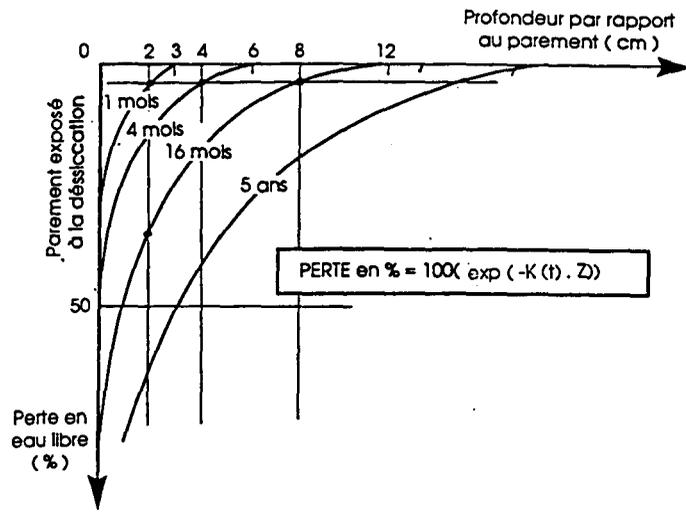


Figure 1.16. : Contrainte due au retrait de dessiccation : Comparaison des résultats des calculs bidimensionnel et tridimensionnel par le modèle de Rossi (1987) avec les résultats expérimentaux obtenus sur une dalle d'épaisseur 16 cm, (Abdunur, Acker, Miao, (A.I.P.C. - Lisbonne/1989))

Un autre mode d'exploitation des résultats expérimentaux obtenus par la méthode, a été développé par Ghomrani (1991). Ce mode s'appuie d'une part, sur la modélisation tridimensionnelle de l'essai, et d'autre part, sur les résultats obtenus par Acker (1988-a) concernant le séchage d'éprouvettes en béton. La distribution des contraintes de retrait a été représentée, de manière simplifiée, par une loi exponentielle en fonction de la profondeur du parement exposé à la dessiccation, (fig. 1.17.). En admettant que la distribution "optimale" est équivalente à une distribution "uniforme", à hauteur C_{max} , limitée au coeur de la section, Tonnoir (1994) introduit la notion de "Po", peau à contrainte supposée nulle, et donc inefficace à la reprise de l'effort normal dans la structure. Selon l'auteur, "Po" permet d'évaluer grossièrement la profondeur concernée par le déficit superficiel des contraintes. De fait, l'épaisseur Po estimée sur 38 entailles, réalisées dans des ouvrages précontraints, varie de 5 à 20 mm. La figure 1.18. montre les résultats obtenus par Ghomrani (1991), pour une dalle en béton sous précontrainte contrôlée de 6 MPa, et rend compte de cette définition particulière de la peau, d'acceptation purement mécanique.



Si on admet les hypothèses suivantes :

- Distribution exponentielle des teneurs en eau libre dans un béton d'un âge donné.
- Potentialités de retrait dimensionnel proportionnelles à la perte en eau libre.
- Autocontraintes proportionnelles au retrait gêné ($\sigma = \epsilon \cdot E$)

Alors,
La distribution des contraintes dans les premiers centimètres d'une pièce en béton est de la forme :

$$\sigma = A - B \cdot \exp(-C \cdot Z)$$

Figure 1.17. : Courbes exponentielles de la dessiccation d'un béton exposé à l'air, simplifiées à partir des résultats d'Acker (1988-a).

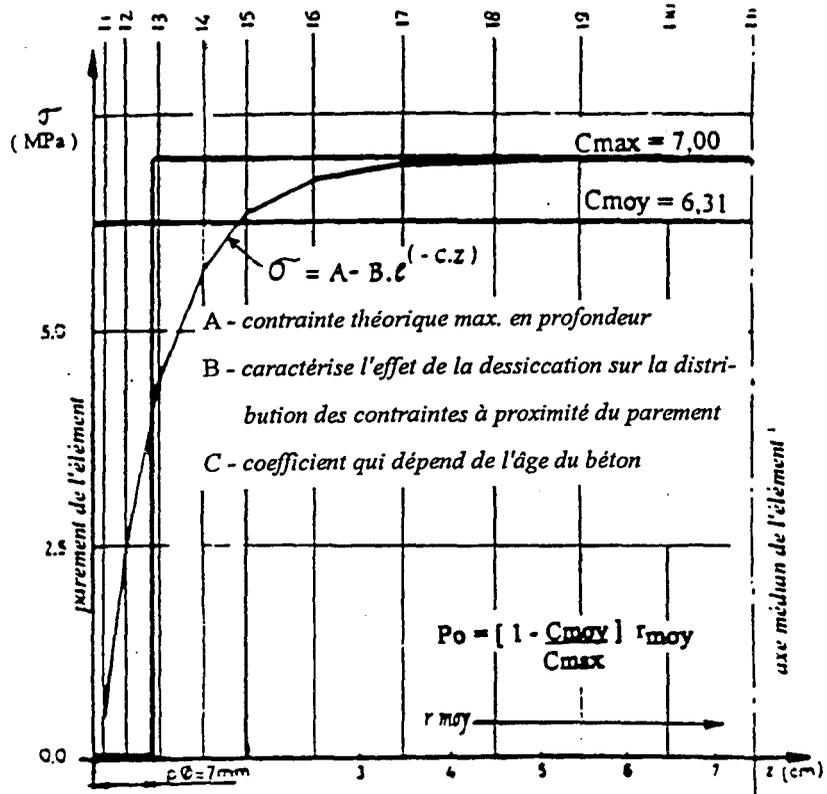


Figure 1.18. : Diagramme des contraintes relevées dans une dalle (précontrainte 6 MPa) par la méthode de libération Ghomrani (1991)

L'exploitation des résultats obtenus, a permis à Ghomrani (1991) de tester l'incidence des différentes hypothèses possibles (béton fissuré, contraintes "adoucies" ou non), sur la valeur de la contrainte absolue recherchée. Les représentations graphiques des distribution des contraintes en fonction de la profondeur du béton, qui tiennent compte de ces hypothèses, sont données à la figure 1.19. On constate que si l'allure des contraintes est différente sur les premiers millimètres, elle est en revanche, pratiquement identique en profondeur et aboutit, après intégration numérique, à des valeurs de contraintes moyennes qui avoisinent 0,3 MPa, dans un élément non chargé.

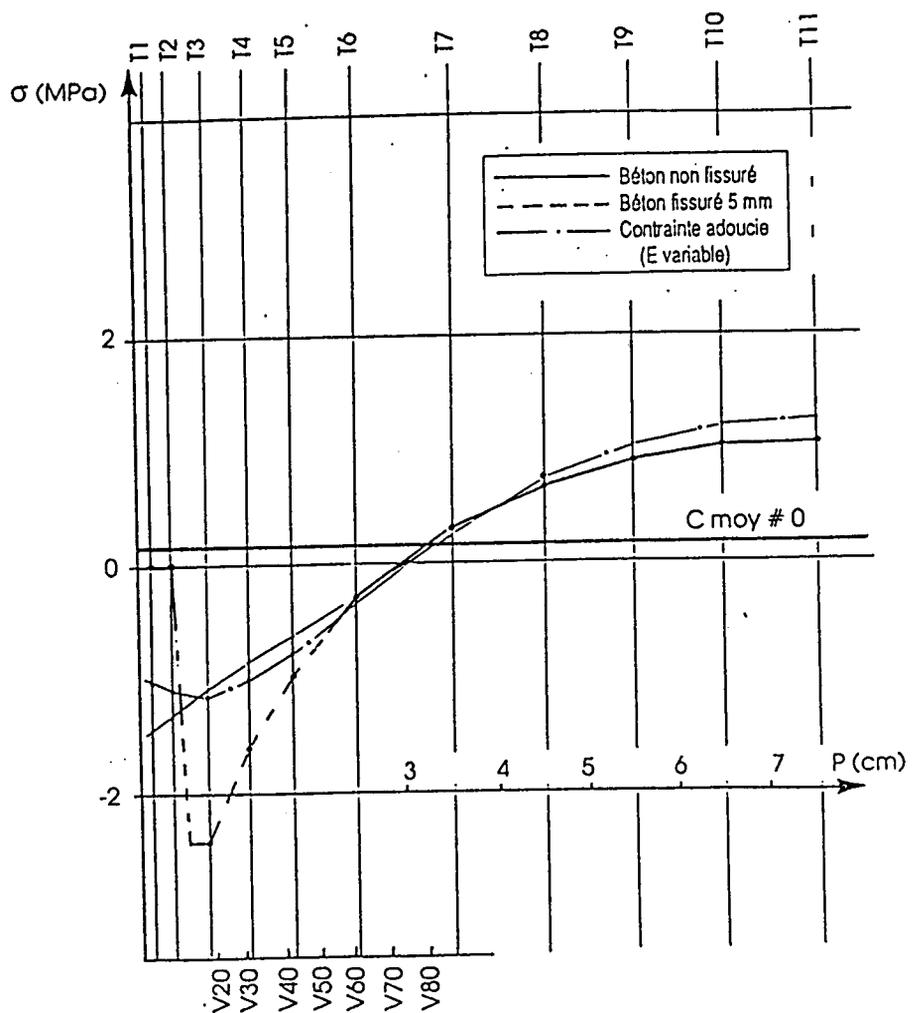


Figure 1.19. : Evolution de la distribution des contraintes moyennes en fonction de la profondeur, et selon l'option de fissuration choisie. Ghomrani (1991)

Quelle que soit l'option de résolution choisie pour accéder au profil des contraintes, les auteurs, précédemment cités, s'accordent tous à montrer que dans les premiers millimètres du parement, on est en présence d'un déficit important de contraintes par rapport au coeur du matériau.

Enfin, il est à noter que le profil des contraintes superficielles, obtenu par la méthode de libération, dépend directement de la résistance du matériau à la traction et de son module de déformation. L'obtention de cette dernière caractéristique pour la peau, zone singulière, présente donc un intérêt tout particulier pour affiner l'interprétation des mesures des contraintes dans les ouvrages.

1.5. - Conclusion de la première partie

La composition et les propriétés de la peau des bétons jouent un rôle prépondérant dans les processus d'éclatement superficiel, de microfissuration, d'agression chimique et de détérioration de la surface. Les paramètres dégagés par les études montrent que les dégradations qui affectent les surfaces résultent en général de la non application de précautions simples. Dans la plupart des cas, celles-ci sont suffisantes pour assurer la durabilité. Le béton doit être compact, c'est à dire qu'il doit avoir une porosité interconnectée minimale. Cette qualité s'obtient à partir d'une composition optimale où interviennent le dosage en ciment, la taille des granulats et la teneur en eau. Certains impératifs doivent être également respectés lors de la mise en oeuvre : vibration, serrage, protection des armatures et délai de mise en charge.

La connaissance de l'évolution de la structure du béton et de la modification de ses caractéristiques en fonction des conditions d'ambiance, constitue aussi une garantie permettant d'agir sur la tenue des ouvrages. Les processus thermique et hydrique qui se produisent dans le matériau dès sa mise en place et durant toute sa vie, sont aujourd'hui bien maîtrisés grâce à l'étude de l'évolution de la pâte de ciment durcie et de son interaction avec les granulats. C'est ainsi que l'importance du retrait de dessiccation qui provoque la fissuration de peau, a pu être révélée alors que il n'y a pas longtemps, le phénomène de séchage naturel était presque ignoré.

Face à la dessiccation, la complexité du comportement du béton est surtout liée à son hétérogénéité (composition, distribution des pores). Cette complexité est encore accrue par la manière dont les propriétés de la peau évoluent dans le temps. Les travaux antérieurs concernant ce problème, sont très peu nombreux et ne permettent pas une évaluation quantitative, au delà de quelques millimètres d'épaisseur, des différences entre les propriétés de la peau et celles du coeur de l'ouvrage. L'objectif de la présente étude étant de mettre en évidence ces différences ainsi que les facteurs déterminants, la deuxième partie sera consacrée à la présentation du plan expérimental et du mode opératoire dont on dispose pour l'atteindre.

DEUXIEME PARTIE

PLAN EXPERIMENTAL, MESURES EFFECTUEES ET MODE OPERATOIRE

2.1. - Introduction

2.2. - Plan expérimental

2.2.1. - Caractérisation d'un béton "jeune"

2.2.1.1. Coffrage

2.2.1.2. Confection et préparation des dalles

2.2.2. - Caractérisation des bétons "vieux"

2.3. - Echantillons d'essais

2.3.1. - Carottage

2.3.2. - Sciage

2.4. - Mode opératoire

2.4.1. Mesure du module d'élasticité dynamique

2.4.2. Calcul du pourcentage granulaire

2.4.3. Mesure de la résistance au fendage

2.5. - Conclusion

DEUXIEME PARTIE

PLAN EXPERIMENTAL, MESURES EFFECTUEES ET MODE OPERATOIRE

*"L'expérience est la source unique de vérité ; elle seule peut vous
apprendre quelque chose de nouveau" Henri Poincaré*

2.1. - Introduction

La réalisation d'une étude expérimentale nécessite une bonne maîtrise des moyens techniques mis en oeuvre. Dans le choix de ces moyens, nous avons pris en compte non seulement la qualité et la fiabilité des essais, mais aussi le coût et la durée du plan expérimental.

Ce travail consiste à étudier les propriétés physiques et mécaniques du béton en fonction de la profondeur du parement exposé à la dessiccation. L'objectif est de mettre en évidence les différences de qualité entre la peau et le coeur du matériau ainsi que les facteurs déterminants.

Dans cette partie, nous présentons l'ensemble des essais réalisés à partir des prélèvements carottés dans des bétons de compositions et d'états hydriques différents, âgés de 4 mois à 40 ans. Des rondelles ont été débitées par sciage, parallèlement aux

parois externes des éprouvettes carottées. Un système spécifique d'enrobage a été conçu pour obtenir des rondelles de géométrie quasi-parfaite. Les procédures suivies pour la réalisation des essais sont détaillées.

L'analyse des données recueillies dans la partie expérimentale nous permettra par la suite d'établir des relations entre les caractéristiques mesurées, en formulant, le cas échéant, les lois correspondantes.

2.2. - Plan expérimental

Le problème posé dans cette étude, la caractérisation de la peau des bétons soumis à la dessiccation, imposait l'élaboration d'un programme expérimental précis. Ce programme consiste à analyser les rôles de l'âge et des conditions de coulage et de cure (type de paroi, enduction des parois). Un béton usuel réalisé au laboratoire est analysé à quatre et seize mois d'âge, et les mesures sont complétées par celles effectuées sur 4 ouvrages régionaux présumés "normaux" de 20 et 40 ans.

2.2.1. - Caractérisation d'un béton "jeune"

2.2.1.1. Coffrages

Le plan expérimental d'essais a nécessité la fabrication au laboratoire de six dalles ayant la même composition de béton. Tout d'abord, on a procédé au dessin et au calcul des moules en fonction des opérations de montage, de coulage et démontage. Ensuite, pour la formulation du béton, nous avons choisi un matériau représentatif des bétons régionaux employés pour la construction des ouvrages d'art. Nous avons réalisé six dalles de 52,5 x 20 cm de section et 52,5 cm de longueur utilisant deux matériaux de coffrage différant par l'étanchéité et la texture des parois : en planches et en contre-plaqué bakérisé. Le premier, autrefois largement utilisé pour les bétons coulés en place, donne en général de bons résultats grâce à sa facilité d'absorption de l'eau excédentaire et l'élimination des bulles d'air. L'autre coffrage est beaucoup plus lisse et peut être considéré comme étant imperméable.

Dans l'objectif d'étudier l'effet de paroi sur les caractéristiques du béton, nous avons été conduit à distinguer également coffrage vertical et coffrage horizontal.

Le coffrage vertical a été utilisé pour la réalisation des dalles DI, DI', DII et DIII.

Le coffrage horizontal a été utilisé pour la réalisation des dalles DIV et DV : le schéma des différents coffrages est représenté sur la figure 2.1.

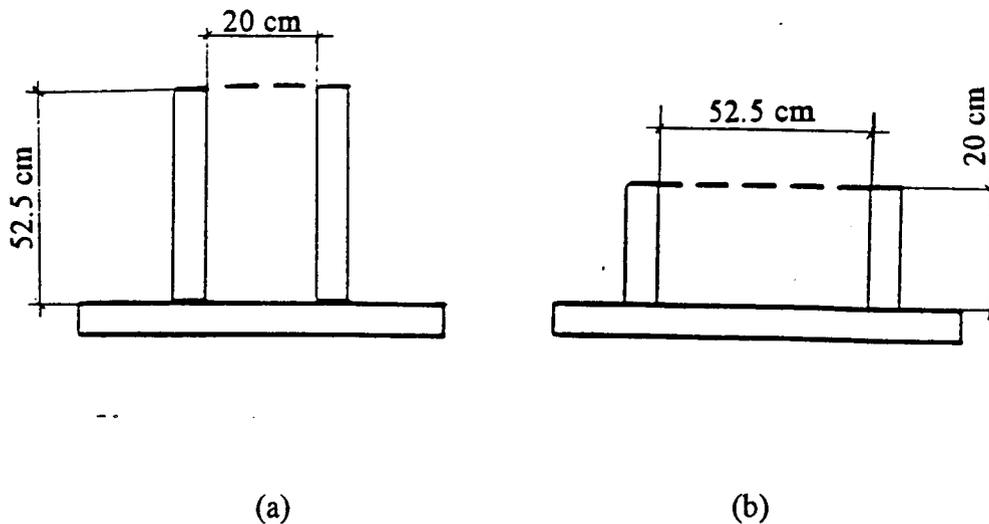


Figure 2.1. - Différents coffrages utilisés pour la réalisation des dalles
(a) - Coffrage vertical (DI, DI', DII, DIII)
(b) - Coffrage horizontal (DIV, DV)

2.2.1.2. Confection et préparation des dalles

En conservant la même composition du béton, trois gâchées ont été confectionnées pour le bétonnage des dalles dans un malaxeur à train valseur Couvrot Lainé MTV 150. Un temps de malaxage de trois minutes, compté dès le moment où toutes les composantes (granulats, ciment, eau) étaient introduites, a été adopté afin d'obtenir des mélanges suffisamment homogènes. Le serrage est effectué par pervibrateurs électriques ϕ 25 mm.

Formule théorique utilisée (pour 1 m³)

Ciment CPA 55 VICAT (NF-301)	400 kg
Sable roulé du Boulonnais 0/4	780 kg
Gravier concassé G1 du Boulonnais 5/12,5	500 kg
Gravier concassé G2 du Boulonnais 12,5/20	540 kg
Eau de gâchage	192 litres
Rapport E/c en poids	0,48
Masse volumique apparente	2,412 t/m ³

Il est à noter que c'est une formule régionale de béton de tablier d'ouvrages d'art. Les caractéristiques des bétons confectionnés figurent dans l'annexe 2.

Juste après le décoffrage (2 jours après le bétonnage), seule la dalle DI' est recouverte d'une couche de résine sur toutes ses faces afin d'assurer la protection de son eau libre contre l'évaporation. Les dalles sont conservées sur des palettes selon le positionnement initial des coffrages utilisés, à l'air libre (mêmes conditions de dessiccation).

2.2.2. - Caractérisation des bétons "vieux"

Le lot étudié concerne des ouvrages régionaux présumés "normaux" de tous points de vue (nature et composition du béton, âge, conditions de mise en oeuvre, niveaux de chargement et d'agressivité subis...).

Cette étape de l'étude permettrait de mettre en évidence les différences significatives entre les caractéristiques de la peau et celles du coeur de l'ouvrage. Le lot sélectionné est composé de 4 ouvrages indiqués dans le tableau 2.1.

Désignation	Nature de l'ouvrage	Partie à tester	Nature du ciment	Dosage (kg/m ³)	Age (ans)	Environnement
1 - Pont du CD 48	O.A.B.P.	Ame	CPA	400	20	Site urbain (zone industrielle)
2 - PI 328	P.I.C.F.	Piédroit	CPA	350	20	Site rural
3 - PI 338	P.I.P.O.	Piédroit	CPA	350	20	Site rural
4 - Pont de St.-Momelin	V.I.P.P.	Ame	CPA	400	40	Site rural

Tableau 2.1. : Ouvrages régionaux sélectionnés pour la caractérisation d'un béton "vieux"

2.3. - Echantillons d'essais

2.3.1. - Carottage

a) *En laboratoire*

A l'âge de 4 mois, 14 carottes de ϕ 96 mm ont été prélevées sur l'ensemble des dalles afin d'être testées. Les dalles seront réexposées à la dessiccation pendant 1 an pour effectuer ensuite 10 carottages à l'âge de 16 mois. On obtient ainsi 24 éprouvettes de diamètre 96 x hauteur 200 mm dont la désignation est reportée dans l'annexe 3.

b) *In-situ*

8 carottages ϕ 96 sont pratiqués sur les ouvrages destinés à caractériser le vieux béton. Les éprouvettes obtenues sont désignées par le nom des ouvrages (2 éprouvettes par ouvrage).

Dans le but d'obtenir des rondelles dont la géométrie est la plus parfaite possible (sans éclats en fin du tronçonnage), nous avons procédé à l'enrobage des carottes afin d'assurer leur rigidité lors du sciage. L'enrobage est réalisé dans une boîte métallique de forme cylindrique ayant un diamètre légèrement supérieur à celui de la carotte. L'espace entre la boîte et la carotte est rempli de soufre fondu. De plus, pour empêcher le collage du soufre aux parois de la carotte, on interpose un papier de verre facile à éliminer après le sciage (Fig. 2.2. et 2.3.).



Figure 2.2. - Papier de verre collé aux parois de l'éprouvette

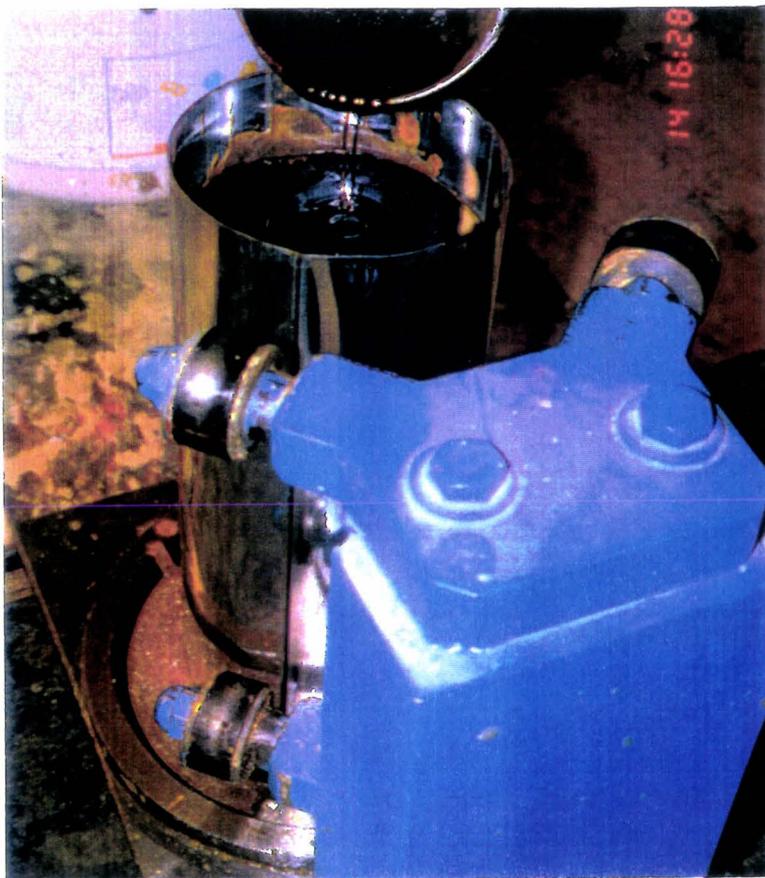


Figure 2.3. - Moulage de l'éprouvette

2.3.2. - Sciage

L'objectif du sciage est d'obtenir des rondelles à partir d'une carotte. Lors du tronçonnage, la meule est arrosée avec un liquide de refroidissement afin d'éviter les dommages thermiques et d'éliminer les résidus de coupe pour obtenir un meilleur enlèvement de la matière.

Pour chaque éprouvette, nous avons pratiqué un sciage transversal pour débiter ainsi 6 rondelles d'épaisseur 8 à 9 mm chacune (Fig. 2.4.).

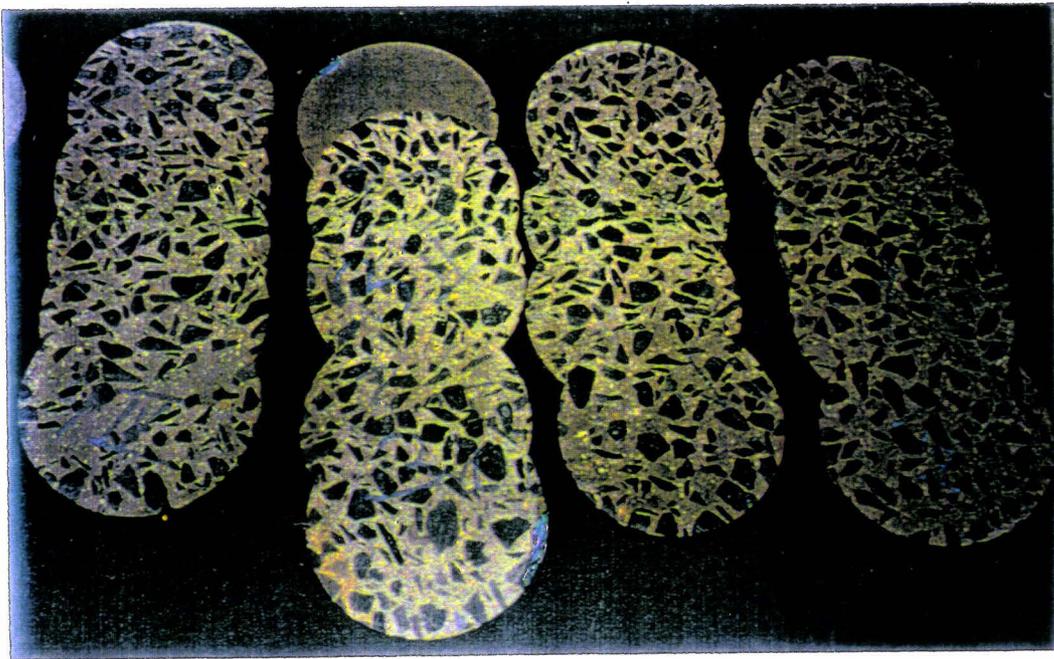


Figure 2.4. - Rondelles obtenues par sciage

2.4. - Mode opératoire

Les caractéristiques mesurées sont : la masse volumique (ρ), le coefficient d'absorption d'eau (A_b), la porosité (P) et la teneur en eau (W), le module d'élasticité dynamique (E), le pourcentage granulaire (G) et la résistance au fendage (B).

L'ensemble de ces mesures nous permettrait par la suite, d'établir des corrélations entre

les paramètres physiques du matériau (r , Ab , P , W et G) et les paramètres mécaniques (E , B).

Les méthodes adoptées pour la mesure de r , Ab , P et W sont exposées dans l'annexe IV (essais normalisés). Nous ne présenterons donc ci-après que les méthodes de mesure de E , G et B .

2.4.1. Mesure du module d'élasticité dynamique

a) Définition

La mesure du module d'élasticité dynamique s'effectue par des méthodes vibratoires. Le Grindo-Sonic est un fréquencesmètre qui analyse les vibrations naturelles de l'objet, suite à une excitation par choc. Il permet le calcul du module à partir de la mesure de la fréquence de vibration naturelle de l'échantillon (Fig. 2.5.).

b) Principe

L'énergie acquise par un corps frappé au moyen d'un objet se dissipera en un phénomène vibratoire amorti. Ce phénomène est complexe et dépend de la nature et de la force de l'impact, ainsi que des caractéristiques mécaniques et physiques de l'objet vibrant. Le détecteur piézo-électrique est mis en contact avec la pièce à mesurer qui subit un coup léger au moyen d'un marteau approprié. L'affichage du Grindo-Sonic (double période de vibration) apparaît presque instantanément au panneau frontal, l'instrument est remis à zéro et la mesure suivante peut être effectuée.

Il est intéressant de noter que l'intensité de la vibration décroît vers le centre du disque et les résultats de mesure seront déterminés principalement par les propriétés du matériau extérieur, le noyau ayant relativement peu d'influence. Notons aussi que l'homogénéité du matériau est d'autant plus grande que la dispersion des lectures est plus petite. La fréquence naturelle de vibration fournie par le "Grindo-Sonic" est liée au module d'élasticité théorique d'un disque en béton par la formule suivante, Harris (1961) :

$$E = \frac{4\pi^2 N^2 \phi d^4 (1-\nu^2)}{(6,09)^2 e^2} \quad (1)$$

Avec :

- N - fréquence propre du disque, (s^{-1})
- ϕ - poids volumique du disque, ($g.s^2/mm^4$)
- d - diamètre du disque (mm)
- ν - coefficient de Poisson
- e - épaisseur du disque (mm)

Tous calculs faits, soit :

$$E \text{ (GPa)} = 5,2.10^3 \frac{m d^2}{G^2 e^3} \quad (2)$$

Avec :

- G - affichage du fréquencemètre (double période de vibration en μs)
- m en (g) ; e et d en (mm)

Toutes les mesures du module dynamique effectuées sur les rondelles suivent les mêmes étapes :

- évaporation des eaux de carottage et sciage (parements secs),
- mesure de l'épaisseur ainsi que du diamètre de la rondelle,
- détermination de la masse :

- (I) - à l'état "naturel" : les carottes ont été prélevées, tronçonnées et testées tout de suite après évaporation de l'eau de refroidissement.
- (II) - à l'état sec : les rondelles ont été totalement séchées en étuve à 60 °C. Le béton est supposé à une teneur en eau libre nulle.
- (III) - à l'état saturé : les rondelles ont été immergées dans l'eau jusqu'à masse constante. Le béton est supposé à une teneur en eau libre maximale.

- détermination de la fréquence pour les différents teneurs en eau,
- calcul du module correspondant (E_1 , E_2 , E_3) par la formule (2).

On note ici que le conditionnement de l'état I dit "naturel" pèse sur l'incertitude de la représentativité de E_1 . Il n'en est pas de même pour E_2 et E_3 , grâce à la stabilité de leurs états (on reviendra sur ce sujet lors de l'interprétation des résultats expérimentaux).

Afin d'étudier l'effet des conditions de mûrissement du matériau, un lot d'échantillons de béton jeune, prélevés à 4 mois et immergés dans l'eau d'une façon continue pendant un an, a fait l'objet de la mesure du module (Etat IV).

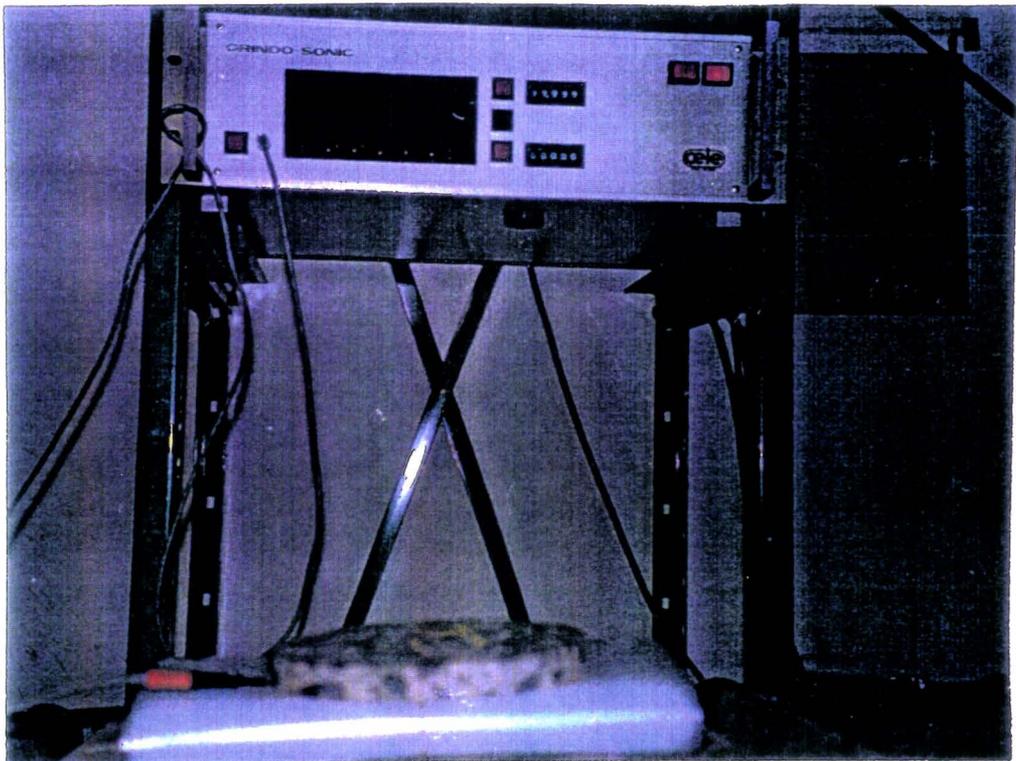


Figure 2.5. - Mesure du module d'Young au Grindo-Sonic.

2.4.2. Calcul du pourcentage granulaire

L'estimation du pourcentage granulaire sur les rondelles s'effectue de façon semi-automatique par saisie manuelle des contours des granulats, digitalisation et calcul d'aires à l'aide du logiciel AutoCAD. En effet, sur un film transparent, et pour chaque

rondelle, on reproduit les contours des granulats apparents sur les deux faces de celle-ci en ne tenant compte, conventionnellement, que de ceux dont la taille dépasse 2 mm (Fig. 2.6 et 2.7).

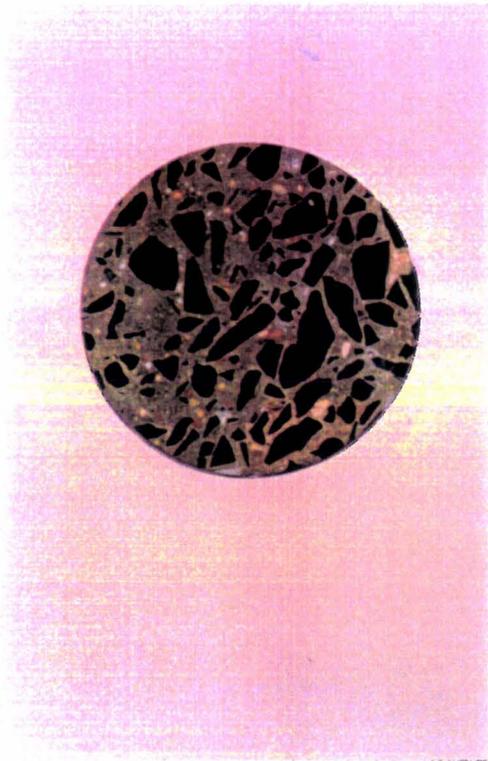


Figure 2.6. - Face sciée d'une carotte de béton, montrant la structure granulaire dans la pâte de ciment.

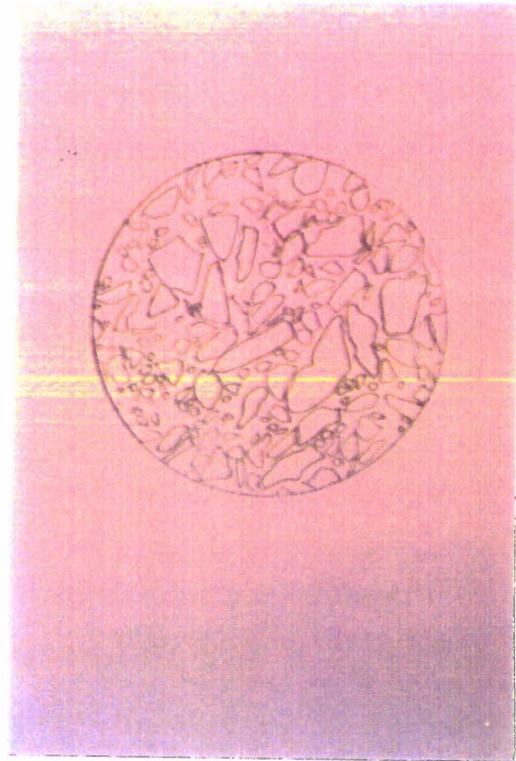


Figure 2.7. - Dessin tracé sur un film transparent, reproduisant les différents granulats noyés dans la pâte de ciment.

Au moyen d'un stylet de pointage, le dessin est ensuite repris par digitalisation sous AutoCAD. Cette digitalisation consiste à saisir les contours des granulats comme étant des polygones constituées de segments de droites représentant une entité unique. Afin d'assurer l'exactitude du dessin digitalisé, nous avons adopté une précision d'esquisse, ou incrément d'enregistrement, de 0,01 mm.

A partir du dessin digitalisé, le pointage des entités obtenues permet de calculer leurs aires. Dans le cas d'une polyligne ouverte, le calcul de l'aire s'effectue en supposant qu'une droite assure la liaison du dernier au premier point. Il est donc nécessaire de vérifier au préalable, si les contours tracés décrivent tous des aires fermées. En pointant ces contours, une valeur courante des aires mesurées est conservée et on peut ajouter ou soustraire les aires ultérieures à la valeur totale. Le pourcentage granulaire "surfacique" affecté à la rondelle, est obtenu comme la moyenne des pourcentages mesurés sur chacune des deux faces.

Pour évaluer l'influence de la digitalisation sur la précision des résultats, des calculs répétés d'aires ont été effectués sur des dessins digitalisés contenant une combinaison de formes géométriques dont on connaît la valeur théorique de la surface. Ces calculs montrent une imprécision moyenne de l'ordre de $\pm 0.5 \%$ par rapport à la valeur théorique de référence.

2.4.3. Mesure de la résistance au fendage

L'essai normalisé de rupture par fendage permet de déterminer une caractéristique dite "résistance au fendage". Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort induit des contraintes de traction dans plan passant par ces génératrices où se produit la rupture. Etant donné que l'éclatement de nos échantillons n'est pas conforme à la norme NF P 18-408, nous avons tenté de vérifier si l'essai pouvait fournir un "indice mécanique" en corrélation avec les autres caractéristiques mesurées.

L'essai de fendage a donc été adapté aux dimensions de la rondelle (Fig. 2.8.), et effectué sur la presse Mohr et Federhaff de charge nominale de 1000 daN et de sensibilité de mesure de 2 daN. A l'aide d'un gabarit de centrage permettant un centrage à 0.5 mm près, la rondelle est placée entre les plateaux de la presse, le contact entre les plateaux et l'échantillon se faisant par l'intermédiaire de deux bandes de contre-plaqué. La mise en charge s'effectue d'une manière continue et sans chocs.

La vitesse de chargement est maintenue constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 10 daN par seconde. A partir de la charge maximale enregistrée au cours de l'essai, on calcule la résistance correspondante B en mégapascals, par la relation suivante :

$$B = 6,37 \frac{F}{d \cdot e}$$

où :
F - charge maximale (kN)
d - diamètre de la rondelle (cm)
e - épaisseur de la rondelle (cm)

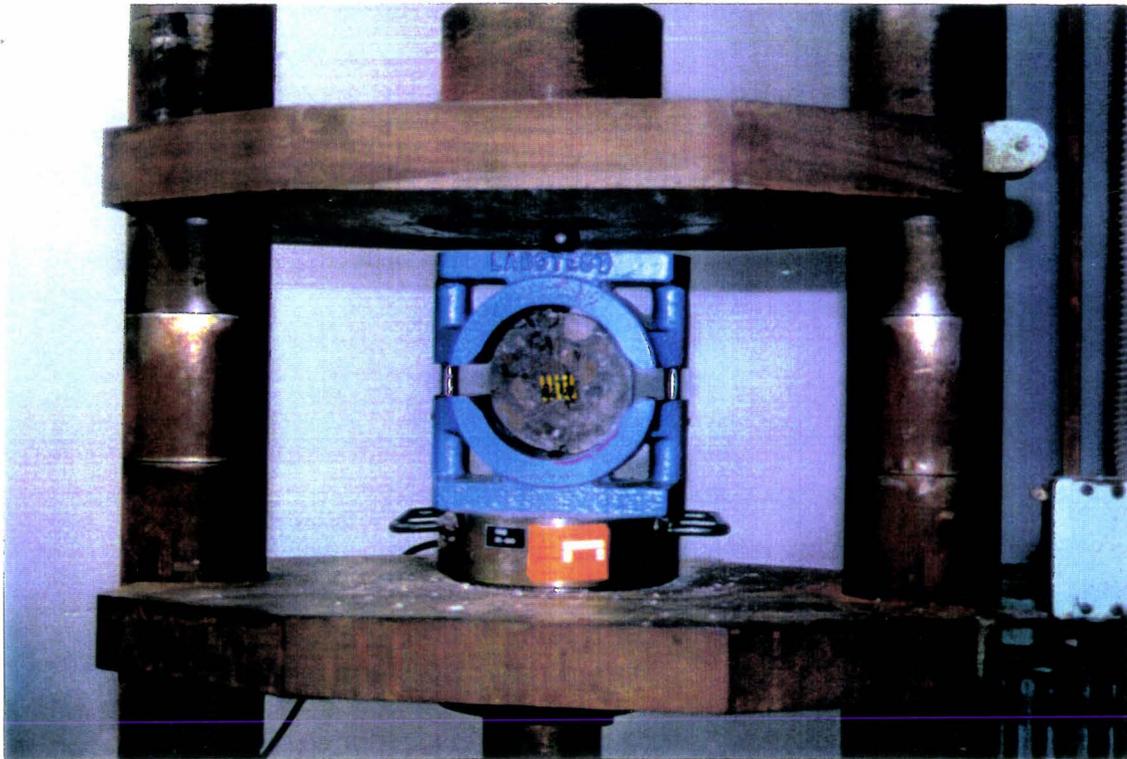


Figure 2.8. - Essai de fendage sur les rondelles

2.5. - Conclusion

Cette partie a été consacrée à la présentation du plan expérimental qui comporte le prélèvement de 32 carottes dans des dalles d'un béton usuel, confectionnées au laboratoire et âgées de 4 et 16 mois et des ouvrages régionaux d'âge égal ou supérieur à 20 ans.

Grâce à un système d'enrobage des carottes, les opérations de découpe successives fournissent des rondelles, de géométrie quasi-parfaite (sans perte de matière), repérées par la distance moyenne au parement exposé à la dessiccation. Au total, on obtient 192 rondelles comparables pour lesquelles les différents essais envisagés sont mis au point. Ces essais portent sur les caractéristiques mécaniques (module d'élasticité dynamique, résistance en traction par fendage), et physiques (masse volumique, porosité, taux d'absorption d'eau, teneur en eau et pourcentage granulaire), aussi bien sur les rondelles à l'état "naturel" que sèches et saturées. La réalisation des essais permettrait de montrer l'évolution des caractéristiques mesurées en fonction de la profondeur des éprouvettes.

Dans la troisième partie, nous allons présenter et interpréter les données recueillies sur les différents bétons testés, selon le plan expérimental ainsi défini.

TROISIEME PARTIE

ANALYSE DES DONNEES EXPERIMENTALES

3.1. - Présentation des résultats

3.1.1. - Béton jeune

3.1.1.1. *Béton âgé de 4 mois*

3.1.1.2. *Béton âgé de 16 mois*

3.1.2. - Vieux bétons

3.2. - Analyse des résultats

3.2.1. - Commentaires

3.2.2. - Première rondelle

3.2.3. - Effet de l'enduction

3.2.4. - Effet de paroi

3.2.5. - Effet de l'âge et des conditions de traitement

3.3. - Corrélations par régression

3.3.1.- Rappel de la méthode de régression linéaire

3.3.2.- Corrélations entre E, P* et G

3.4. - Conclusion de la troisième partie

TROISIEME PARTIE

ANALYSE DES DONNEES EXPERIMENTALES

3.1. - Présentation des résultats

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'étude expérimentale décrite dans la partie précédente et correspondant aux différents bétons testés. A partir de l'ensemble des résultats rassemblés pour chaque carotte et reportés en annexes V, VI et VII, nous distinguons trois séries de résultats que nous présenterons successivement.

La première série concerne les résultats moyens obtenus sur 12 carottes prélevées dans les dalles réalisées au laboratoire et âgées de 4 mois. La seconde série concerne les résultats moyens sur 10 éprouvettes, obtenus pour le même béton à l'âge de 16 mois. La troisième est relative à ceux obtenus sur 8 éprouvettes destinées à caractériser les vieux bétons (2 éprouvettes par ouvrage).

3.1.1. - Béton jeune

3.1.1.1 Béton âgé de 4 mois

Les résultats expérimentaux correspondant à un béton âgé de 4 mois sont reportés graphiquement sur la figure 3.1. On note que les résultats obtenus sur 2 éprouvettes

prélevées dans la dalle enduite d'une couche de résine ne sont pas pris en compte ici ; ils seront exposés en 3.2.3 lors de l'étude de l'effet d'enduction du béton.

3.1.1.2. - Béton âgé de 16 mois

La figure 3.2. présente les résultats moyens obtenus pour le même béton à l'âge de 16 mois. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus à 4 mois sera établie en 3.2.5. lors de l'étude de l'effet de l'âge et des conditions de traitement.

3.1.2. - Vieux bétons

Les figures 3.3.a., 3.3.b., 3.3.c. et 3.3.d. rassemblent les résultats moyens fournis par un lot de 4 ouvrages régionaux de 20 et 40 ans d'âge.

Les tableaux 3.1. et 3.2. présentent, pour toutes les structures testées, les statistiques des variations des caractéristiques mesurées sur toutes les rondelles, à l'exception de la rondelle R_0 qui présente des différences significatives avec les suivantes (voir également les tableaux exposés en annexes V et VI, établis pour les résultats obtenus en fonction de la distance moyenne du parement). Les coefficients de variation sont en pratique indépendants des caractéristiques moyennes. Ce n'est pas le cas de l'écart type qui, à dispersion égale, est d'autant plus grand que la caractéristique moyenne est élevée. On considérera donc, de préférence, les valeurs des différents coefficients de variation. Ainsi, on constate au sein d'un échantillon homogène, que les valeurs des modules dynamiques de déformation sont relativement peu dispersées ($v = 2$ à 6%). Il en est de même des valeurs de la porosité et du pourcentage granulaire où les coefficients de variation sont généralement compris entre 3 et 10% et entre 5 et 11% respectivement. La dispersion des résultats obtenus par l'essai de fendage s'est avérée élevée, soit un coefficient de variation compris entre 8 et 24% .

Caractéristique		Dallettes (4 mois)				
		min.	moy.	max.	σ	v (%)
E1	(GPa)	30,26	33,95	36,80	1,91	5,6
E2		23,28	28,20	32,05	1,65	5,8
E3		36,91	41,60	46,17	2,24	5,4
r1	(g/cm ³)	2,28	2,35	2,42	0,03	1,3
r2		2,22	2,30	2,37	0,04	1,8
r3		2,37	2,43	2,48	0,03	1,2
Ab	(%)	4,14	5,21	6,83	0,76	14,6
W		1,40	2,51	4,08	0,61	24,0
P		10,84	13,5	16,46	1,30	9,6
G	(%)	35,72	44,10	53,43	4,48	10,2
B	(MPa)	2,48	3,85	5,53	0,91	23,6

Caractéristique		Dallettes (16 mois)				
		min.	moy.	max.	σ	v (%)
E1	(GPa)	37,44	43,14	47,70	1,98	4,5
E2		33,87	38,10	42,61	1,66	4,3
E3		37,60	43,50	47,80	1,94	4,4
r1	(g/cm ³)	2,34	2,39	2,47	0,04	1,6
r2		2,25	2,31	2,39	0,04	1,7
r3		2,38	2,44	2,48	0,03	1,2
Ab	(%)	4,27	5,12	6,27	0,51	9,8
W		2,63	3,80	5,03	0,55	14,4
P		10,87	12,80	15,14	1,09	8,5
G	(%)	32,93	42,10	48,97	4,68	11,1
B	(MPa)	2,65	3,93	5,44	0,65	16,5

Tableaux 3.1. : Statistiques des mesures effectuées sur le béton jeune

Caractéristique		Pont du CD 48					Pont de St Momelin				
		min.	moy.	max.	σ	v (%)	min.	moy.	max.	σ	v (%)
E1	(GPa)	44,82	46,44	48,05	1,14	2,5	44,47	45,64	46,88	1,13	2,5
E2		41,56	43,70	45,15	1,18	2,7	35,03	38,20	40,54	2,12	5,5
E3		47,33	48,51	49,95	1,02	2,1	45,34	49,30	52,66	2,14	4,3
r1		2,39	2,41	2,44	0,02	0,8	2,41	2,45	2,50	0,03	1,2
r2	(g/cm ³)	2,32	2,36	2,40	0,03	1,3	2,36	2,39	2,44	0,03	1,3
r3		2,41	2,44	2,47	0,02	0,8	2,48	2,50	2,54	0,02	0,8
Ab		2,45	3,50	3,91	0,41	11,8	3,06	3,94	5,27	0,62	15,7
W	(%)	1,88	2,34	2,76	0,27	11,5	1,67	2,26	3,01	0,33	14,5
P		8,35	8,72	9,25	0,30	3,4	8,32	10,30	13,13	0,72	7,0
G		40,48	43,2	46,70	1,80	4,1	42,15	43,20	45,21	1,21	2,8
B	(MPa)	3,44	4,78	6,26	0,98	20,4	3,28	4,00	6,16	0,83	20,7

Caractéristique		PI 328					PI 338				
		min.	moy.	max.	σ	v(%)	min.	moy.	max.	σ	v (%)
E1	(GPa)	38,66	41,16	42,66	1,47	3,5	37,73	40,22	44,10	2,41	5,4
E2		32,67	34,12	36,20	0,98	2,8	31,04	33,50	36,87	1,88	5,6
E3		40,78	43,51	44,91	1,52	3,5	39,87	42,50	46,50	2,40	5,6
r1		2,31	2,34	2,38	0,02	0,8	2,31	2,35	2,38	0,02	0,8
r2	(g/cm ³)	2,22	2,25	2,28	0,02	0,9	2,21	2,25	2,28	0,04	1,6
r3		2,39	2,42	2,45	0,02	0,8	2,40	2,43	2,46	0,02	0,8
Ab		5,86	6,7	7,08	0,45	6,7	6,30	7,20	7,83	0,60	8,3
W	(%)	3,60	4,16	4,64	0,30	7,2	4,01	4,26	4,41	0,15	3,5
P		15,18	16,88	17,83	0,82	5,0	16,08	17,60	18,97	1,05	6,0
G		35,53	38,40	41,72	1,78	4,6	34,25	37,50	40,58	1,91	5,1
B	(MPa)	2,44	3,32	4,06	0,55	16,4	2,84	3,14	3,79	0,27	8,6

Tableaux 3.2. : Statistiques des mesures effectuées sur les vieux bétons

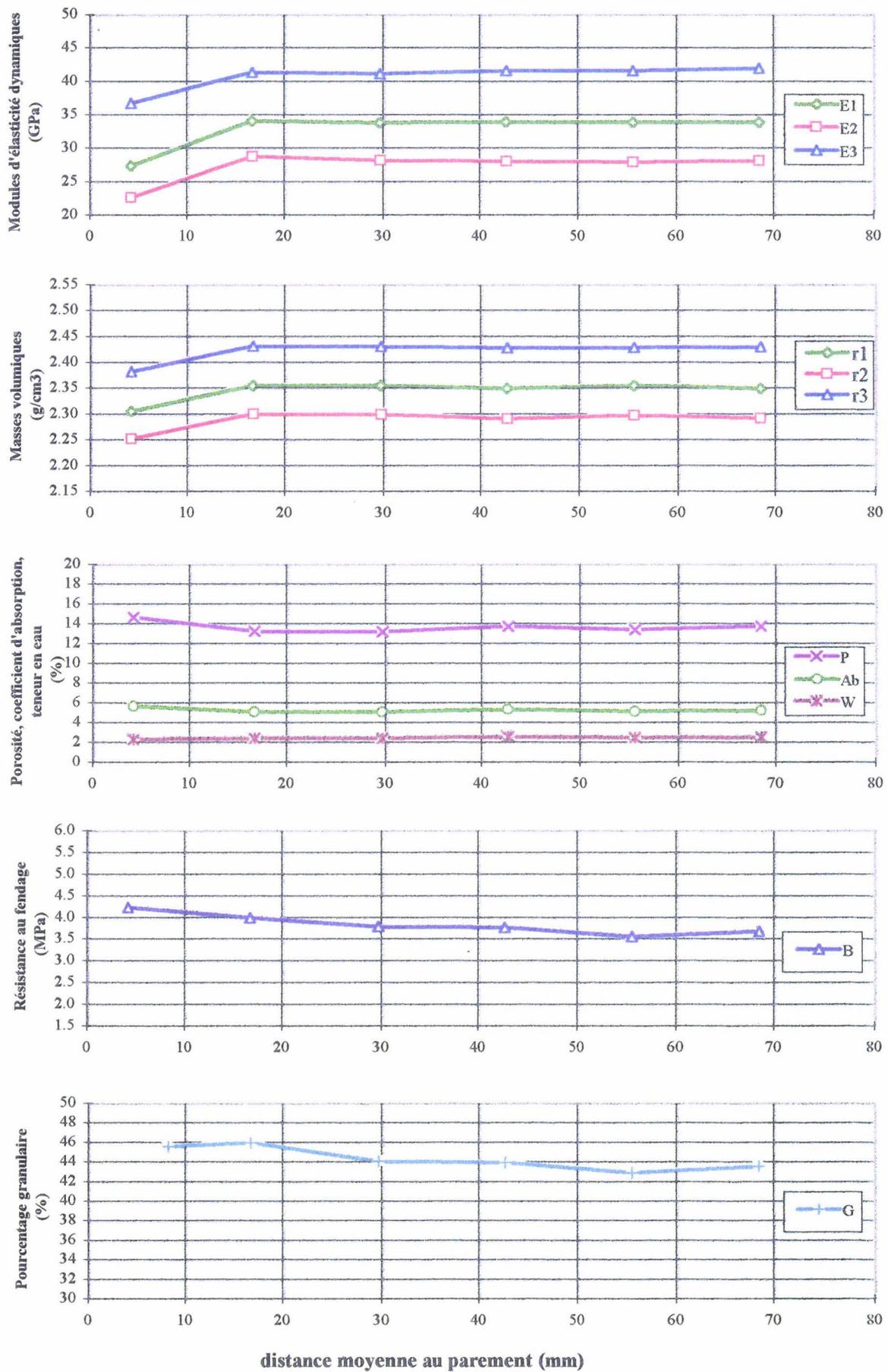


Figure 3.1 - Courbes moyennes obtenues sur des dallettes de 4 mois d'âge

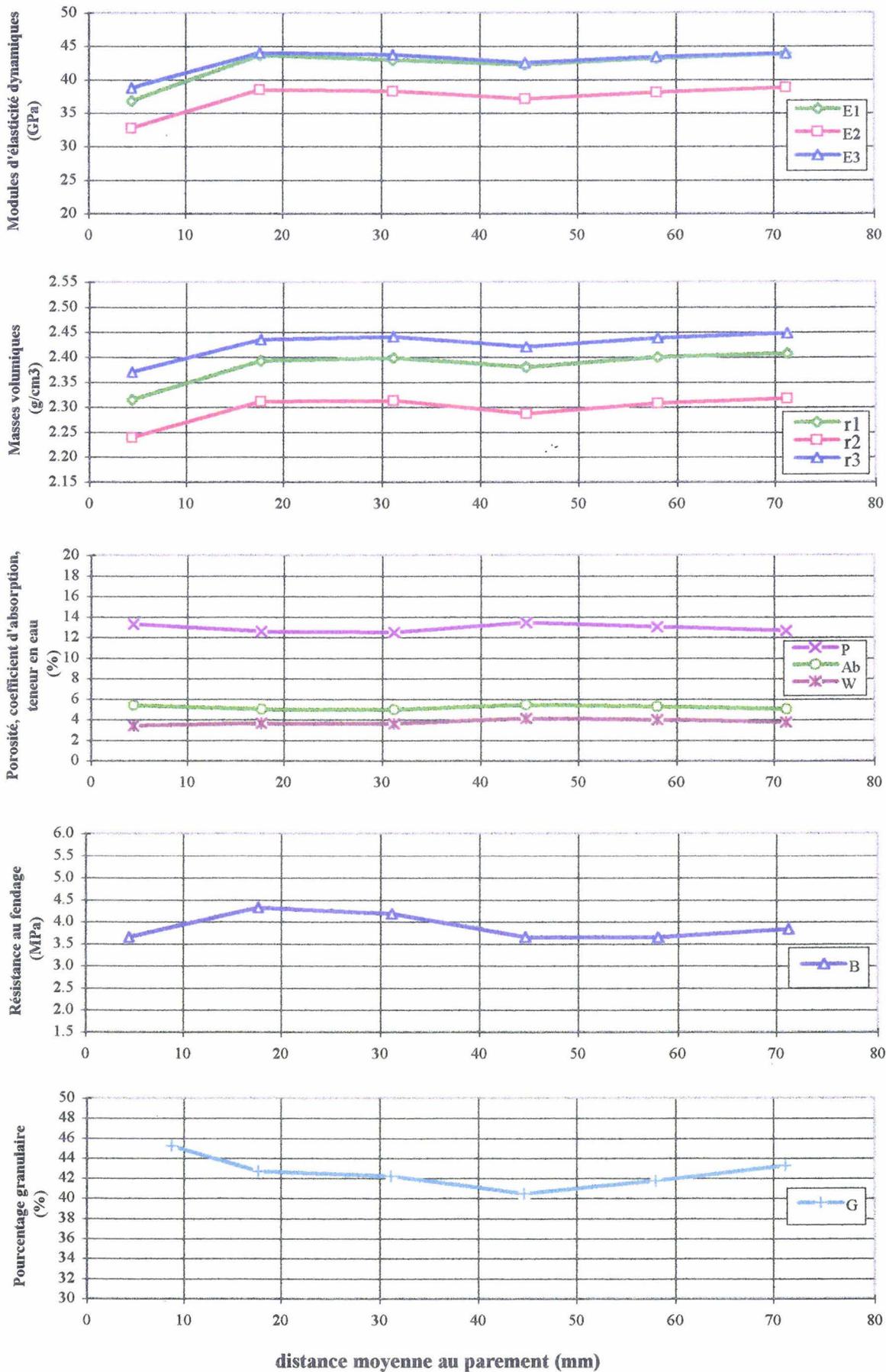


Figure 3.2 - Courbes moyennes obtenues sur les mêmes dalles à l'âge de 16 mois

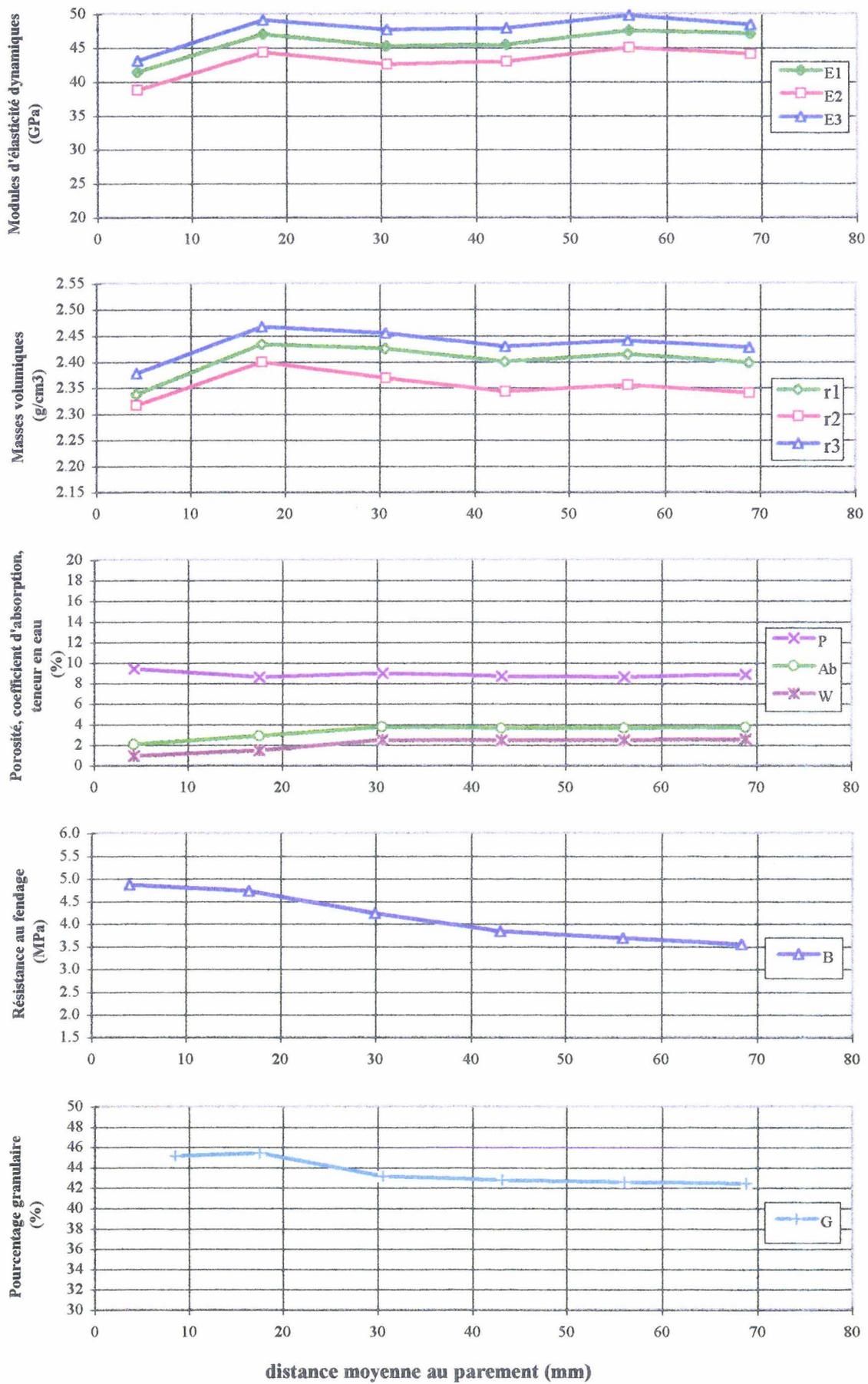


Figure 3.3.a - Résultats obtenus sur le pont du CD 48 (O.A.B.P., CPA 40, 20 ans)

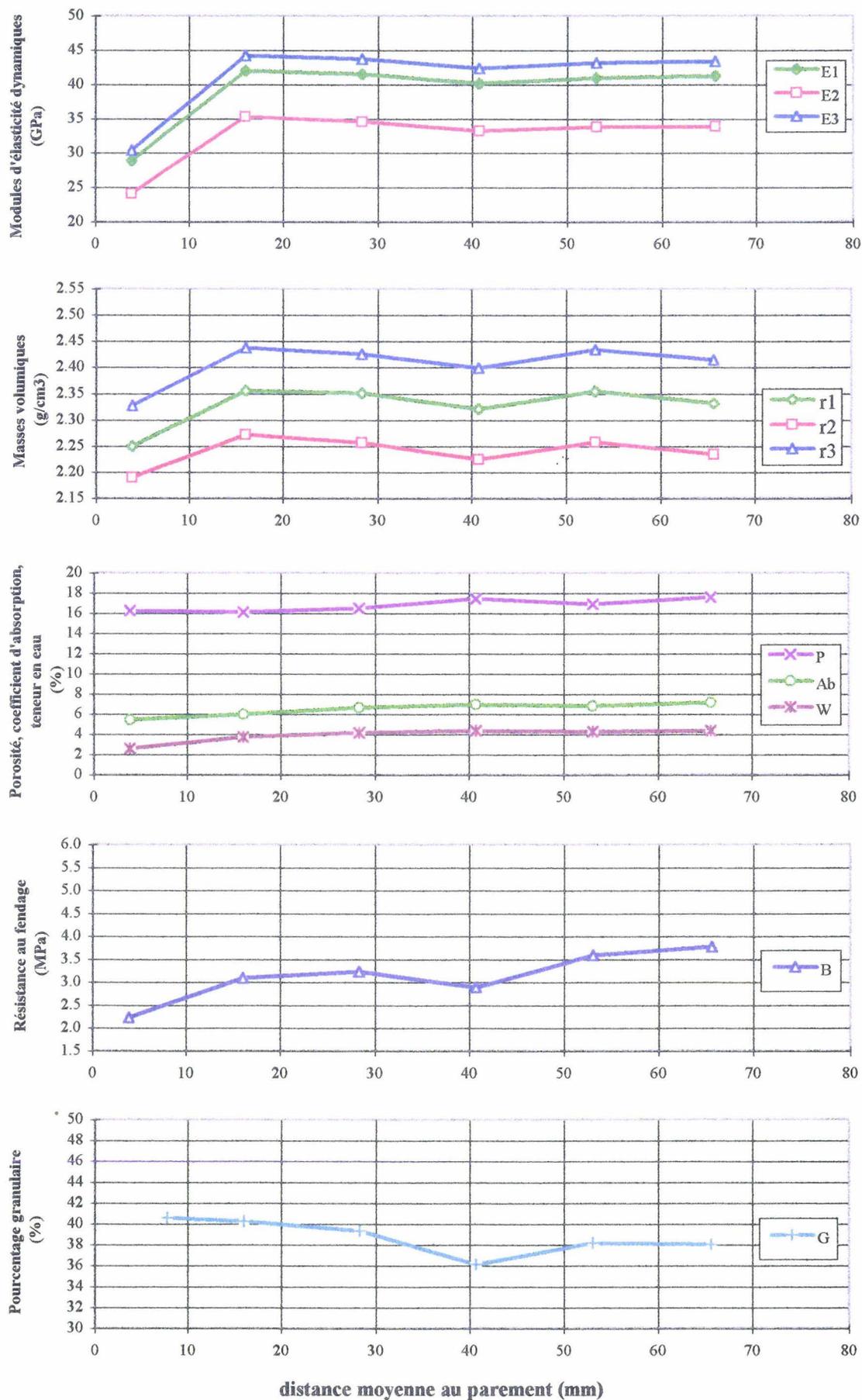


Figure 3.3.b - Résultats obtenus sur le P.I. 328 (P.I.C.F., CPA 35, 20 ans)

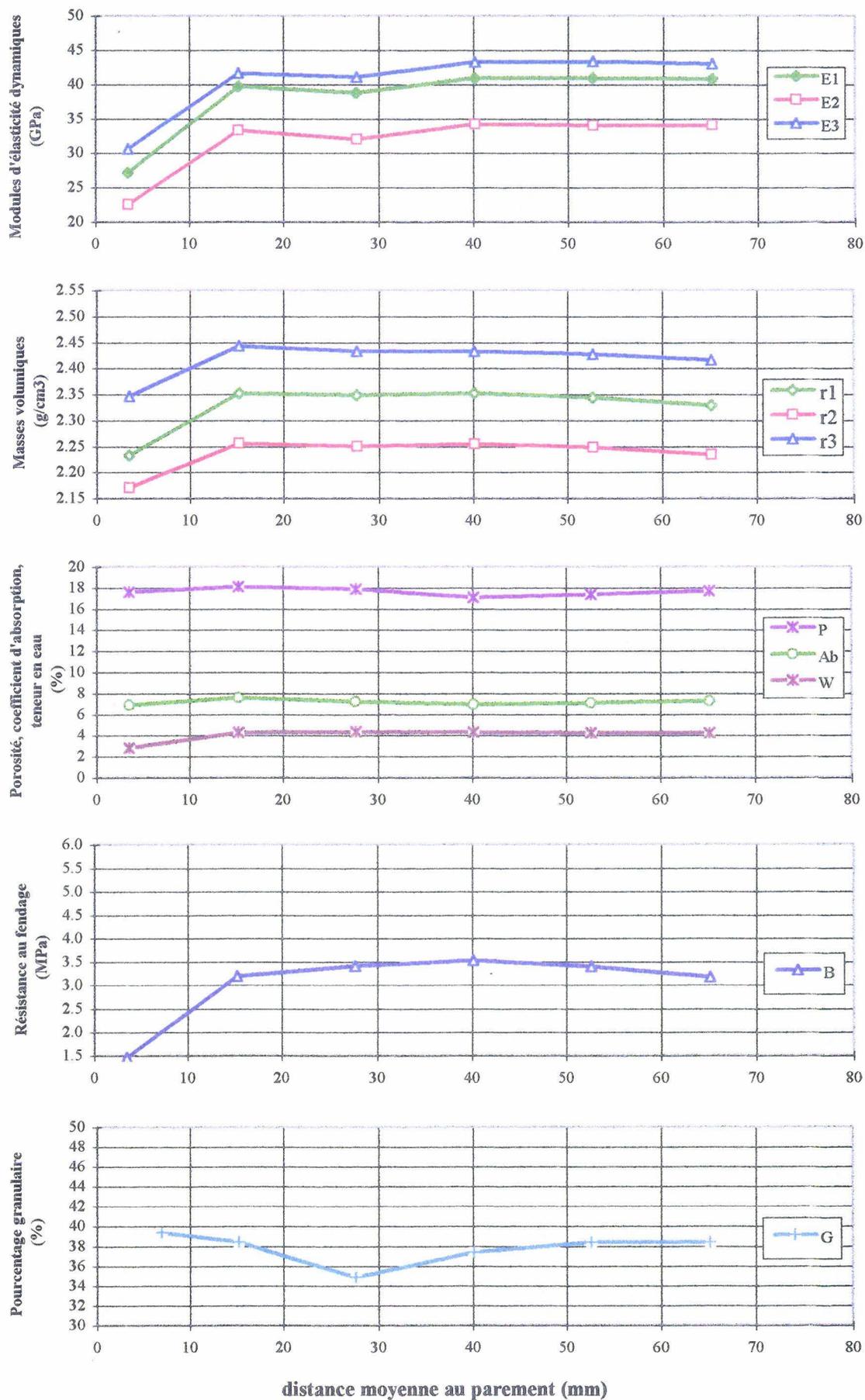


Figure 3.3.c - Résultats obtenus sur le P.I. 338 (P.I.P.O., CPA 35, 20 ans)

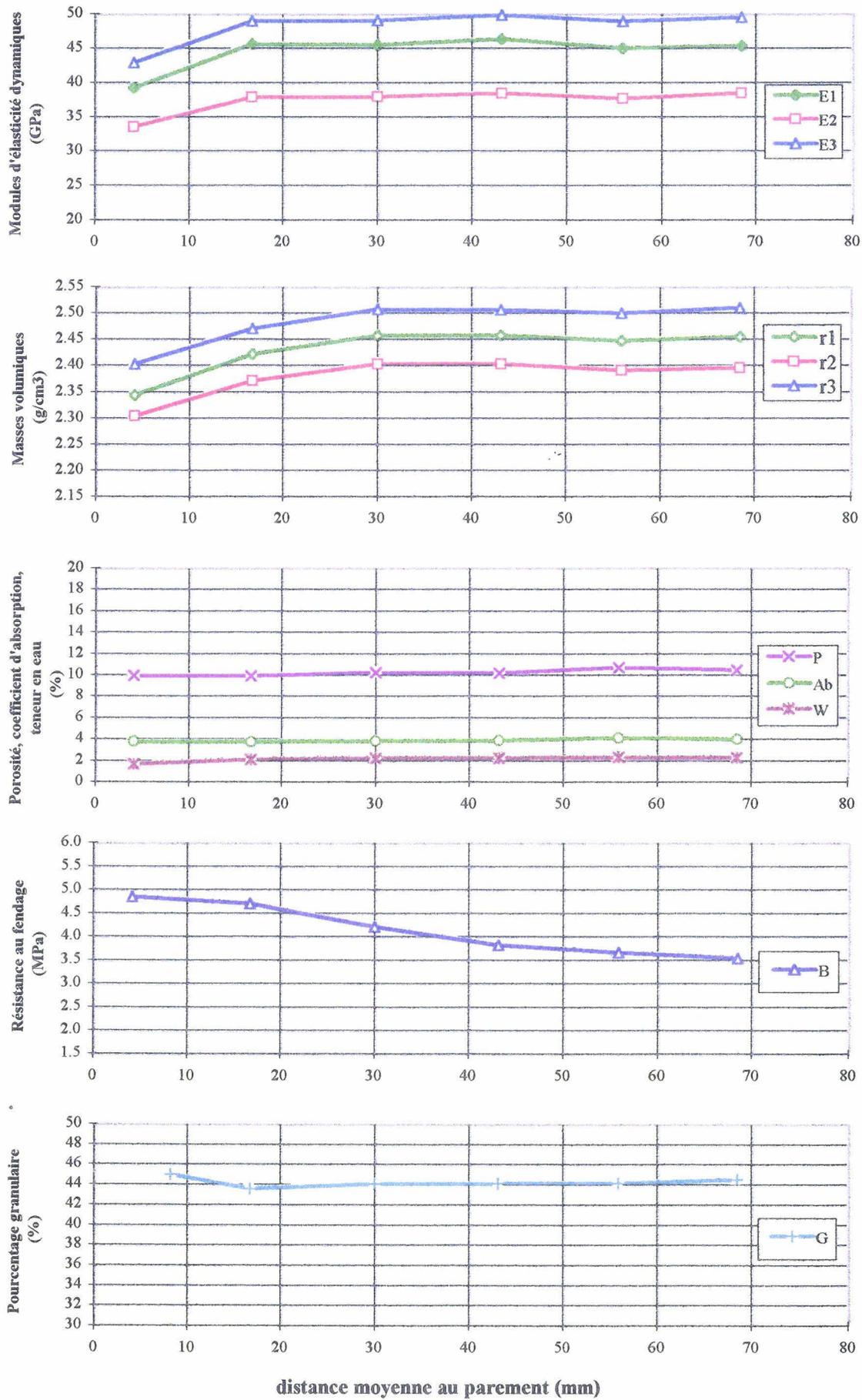


Figure 3.3.d - Résultats obtenus sur le pont de St Momelin (V.I.P.P., CPA 40, 40 ans)

3.2. - Analyse des résultats

Pour l'analyse des résultats expérimentaux, on signalera que ceux présentés graphiquement en 3.1., 3.2. et 3.3. sont complétés par l'ensemble des résultats reportés en annexes V, VI et VII.

3.2.1. Commentaires

Avant de discuter et d'interpréter les résultats expérimentaux, il nous paraît nécessaire de faire les observations suivantes :

- Lorsque le module statique d'Young E_s est obtenu par les méthodes conventionnelles, au cours d'un essai de compression, il y a généralement des différences sensibles entre les résultats donnés par des éprouvettes semblables, provenant de la même gâchée de béton. Cette grande variation des résultats est due aux erreurs provoquées par la méthode d'essai et non pas à une réelle dispersion de la caractéristique mesurée. Ces erreurs peuvent trouver leur source dans le manque d'uniformité des contraintes appliquées aux extrémités des échantillons et, par suite, dans les différences entre les contraintes locales et la contrainte moyenne appliquée à l'échantillon, Jones (1962). En revanche, nous avons pu constater sur les résultats expérimentaux (voir tableaux 3.1. et 3.2.), que la dispersion des valeurs du module dynamique, fournies par la méthode adoptée dans cette étude sont beaucoup plus faibles. L'utilisation d'une méthode basée sur la mesure de la fréquence propre des échantillons limite d'une part le nombre d'échantillons nécessaire pour établir une valeur moyenne de référence et fournit d'autre part, des mesures plus précises.
- A notre connaissance, malgré le grand nombre d'essais réalisés sur le béton pour comparer le module dynamique avec le module statique, une seule étude due à Jones (1962) a permis d'établir une relation corroborée par la plupart des résultats expérimentaux. En effet, à partir des essais de résonance en flexion effectués sur des poutres et comparés à des essais statiques, l'auteur a montré que :

$$E_d = E_s + 7,03. \quad (a)$$

(les modules sont exprimés en GPa)

L'auteur estime que la différence entre les deux modules pourrait s'expliquer par l'importance des charges appliquées lors des essais. Dans l'essai dynamique, les contraintes sont si faibles que le béton peut être considéré comme n'étant pas chargé, alors que des contraintes appréciables sont appliquées dans le cas de l'essai statique. En effet, le béton présente de très nombreuses microfissures qui se situent principalement aux interfaces entre agrégat et mortier. Lorsque les charges sont appliquées au béton, les microfissures sont plus prononcées, mais ne s'amplifient pas nécessairement lorsqu'il s'agit de charges fixes de faible importance. La formation de nouvelles microfissures dans le béton équivaut à la réduction de son module d'élasticité, elle augmente l'inflexion de la courbe charge/fatigue et provoque une différence d'inclinaison entre la courbe de mise en charge et la courbe de déchargement, donc une déformation permanente pendant le cycle de chargement, Jones (1962).

Afin d'estimer la relation entre les deux modules à l'état sec et à l'état saturé, nous avons effectué des mesures de fréquence en flexion et des essais de compression sur des éprouvettes normalisées (16x32cm). 6 éprouvettes saturées en eau depuis la confection ont été testées, puis séchées en étuve à 60 °C et à nouveau testées. Les compositions des éprouvettes sont exposées en annexe VIII.

Les résultats présentés dans le tableau 3.3. concernant les différences entre les deux modules obtenus à l'état saturé, sont en bon accord avec la relation ci-dessus. Ainsi, pour le béton 1, la différence moyenne est de 6,4 GPa, pour le béton 2, elle est de 7,2 GPa.

Béton	Eprou- vette 16x32cm	Perte en eau l/m ³	Etat saturé			Etat sec		
			E _d	E _s	E _d - E _s	E _d	E _s	E _d - E _s
			GPa			GPa		
1 (5 ans)	ep1	68,1	51,8	44,9	6,9	36,2	35,5	0,7
	ep2	67,9	51,9	44,5	7,4	36,9	36,3	0,6
	ep3	67,3	52,8	45,5	7,3	37,9	37,3	0,6
2 (3 ans)	ep4	59,3	52,1	45,5	6,6	39,4	38,9	0,5
	ep5	58,6	52,7	46,5	6,2	39,1	38,6	0,5
	ep6	58,3	53,5	47,2	6,3	39,8	39,2	0,6

Tableau 3.3. - Comparaison entre les modules statique et dynamique à l'état sec et à l'état saturé sur des éprouvettes 16x32cm.

En revanche, à l'état sec, les valeurs obtenues pour les deux modules se sont révélées très voisines. Si on suppose que, dans l'état sec, les modules sont de même en relation du type (a) pour que le module dynamique soit, là encore, plus grand que le module statique, nous sommes alors conduits à supposer un endommagement par le séchage des fibres périphériques des éprouvettes, qui affecterait davantage la valeur du module dynamique. L'explication pourrait être la suivante : lors de l'essai statique, les déformations d'une éprouvette résultent de la contribution moyenne du coeur et des fibres périphériques à la reprise des efforts de compression. Il n'en est pas de même pour l'essai dynamique : l'éprouvette étant sollicitée par vibration en flexion, la mesure reflète surtout les déformations des fibres externes les plus endommagées.

- L'incertitude sur la définition de l'état supposé "naturel", pèse sur la représentativité du module d'élasticité dynamique correspondant. Le mode opératoire de débit des rondelles introduit irrémédiablement une perturbation de la teneur en eau libre à l'état naturel : les premières rondelles presque sèches, (R_0 en particulier), sont réhumidifiées par le sciage tandis que les suivantes, presque saturées, perdent une partie de leur teneur en eau entre le temps du débit et celui de la mesure de E_1 . Dans ces conditions, les valeurs mesurées de E_1 permettent de situer approximativement les échantillons entre leurs deux états sec et saturé mais ne peuvent donc pas être considérées comme réellement représentatives de l'état naturel du matériau.
- Le pourcentage granulaire surfacique mesuré sur des rondelles provenant des dalles dont on connaît la composition, fournit des valeurs moyennes légèrement plus grandes que la valeur théorique ($1040/2300 = 40 \%$, 2300 kg/m^3 étant la masse volumique des granulats). La prise en compte des plus gros grains de sable, difficiles à distinguer des granulats, peut être à l'origine de cette différence qui reste cependant faible (3 %).

Pour les rondelles R_0 , le pourcentage granulaire illustré par les figures 3.1., 3.2. et 3.3. représente le résultat de la mesure effectuée sur la seule face située à 8 mm du parement (épaisseur de la rondelle). Afin de trouver le profil de la teneur granulaire à proximité immédiate de la paroi, nous avons développé une modélisation exposée en annexe IX. Cette modélisation suppose une inclusion sphérique et une

distribution pondérale linéaire en fonction de la dimension des granulats. On montre en particulier que, pour une fraction granulaire 5/20, le rapport entre la densité volumique de la rondelle et la densité surfacique mesurée à 8 mm est de 0,705. Ce coefficient sera pris en compte dans les corrélations établies en 3.3.2. entre les caractéristiques mesurées.

- Sur un ouvrage suspect d'attaque sulfatique ou de réaction alcali-silice, on cherche généralement à caractériser l'endommagement de la peau dû à ces phénomènes. Comme nous avons pu le remarquer, l'essai de fendage appliqué sur des échantillons de faible épaisseur, fournit des valeurs très dispersées et d'interprétation difficile. Toutefois, les faibles valeurs de résistance au fendage observées sur les rondelles Ro de la peau des ouvrages PI 328 et PI 338 (de l'ordre de 35 à 50 % par rapport à celles données à coeur), laissent à penser que ces ouvrages sont affectés par une fissuration superficielle. L'essai de fendage pourrait donc être un moyen de dépistage des bétons suspects de certaines pathologies telles que les réactions de gonflement de type sulfatique ou alcali-silice.

3.2.2. - Première rondelle

Les résultats des essais ont pu mettre en évidence, pour tous les bétons testés, que la première rondelle, soit une couche superficielle de 8 mm d'épaisseur, possède des caractéristiques plus ou moins différentes de celles mesurées au coeur de la structure. Dans le tableau 3.4. chiffrant ces caractéristiques, on remarque notamment une chute sensible du module de déformation dynamique et de la masse volumique à proximité du parement. Les valeurs de la porosité pondérée de la pâte de ciment suggèrent aussi que cette couche est généralement plus poreuse que le coeur du matériau.

En première analyse, on pourrait penser que la diminution de la qualité de la couche superficielle serait due à ce que l'eau libre, dans cette zone, a tendance à s'évaporer plutôt que de se combiner au ciment pendant la phase du durcissement. La solidité des liaisons intergranulaires déterminant le module du matériau pourrait être affectée par la faible densité des hydrates de ciment au niveau de la surface exposée. Ainsi, à

l'exception des ouvrages PI 328 et PI 338 suspects, comme on l'a vu, de certaines pathologies confirmées par l'essai de fendage, on observe que la différence sur le module dynamique (E_2 ou E_3) du béton, entre la peau (R_0) et le coeur ($\sum_{i=1}^5 R_i / 5$) est de l'ordre de -6 GPa. Cette différence quasi constante, est constatée indépendamment de l'âge et de la composition du béton. Elle pourrait donc constituer une valeur de référence caractérisant un "affaiblissement normal" de la peau des bétons. Cependant, ce résultat obtenu quelle que soit la teneur en eau de l'éprouvette, nous conduit à nous interroger sur la part réelle de la dessiccation dans l'affaiblissement de la couche superficielle. Nous tenterons d'y répondre en 3.2.3.

	Structure	Rondelle	Nbre échantillons	E_2	E_3	r_2	r_3	A_b	W	P	P*	G	B
				GPa		g/cm ³		%				MPa	
BETON JEUNE	Dallettes (4 mois)	R_0	12	22.6	36.8	2.25	2.38	5.69	2.34	14.7	27.0	45.6	4.24
		$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	60	28.2	41.6	2.30	2.43	5.21	2.51	13.5	24.2	44.1	3.85
	Dallettes (16 mois)	R_0	10	32.7	38.7	2.23	2.36	5.36	3.37	13.3	24.3	45.2	3.65
		$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	50	38.1	43.5	2.31	2.44	5.12	3.80	12.8	22.1	42.1	3.93
VIEUX BÉTONS	Pont du CD 48	R_0	2	38.6	43.1	2.32	2.38	2.06	0.91	9.4	17.1	45.1	3.57
	O.A.P.B. (20 ans)	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	10	43.7	48.5	2.36	2.44	3.50	2.34	8.7	15.3	43.2	4.78
		R_0	2	24.1	30.4	2.19	2.33	5.42	2.58	16.3	27.4	40.56	2.23
	P.I.C.F. (20 ans)	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	10	34.1	43.5	2.25	2.42	6.69	4.16	16.9	27.4	38.4	3.32
		R_0	2	22.5	30.6	2.17	2.35	6.85	2.81	17.6	29.0	39.4	1.46
	P.I.P.O. (20 ans)	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	10	33.5	42.5	2.25	2.43	7.20	4.26	17.6	28.2	37.5	3.14
		R_0	2	33.6	42.9	2.31	2.40	3.82	1.70	10.0	18.2	45.1	4.87
	Pont de St. M.	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	10	38.2	49.3	2.39	2.50	3.94	2.26	10.3	18.2	43.2	4.00

Tableau 3.4. - Première rondelle et la moyenne des suivantes

3.2.3. Effet de l'enduction

Pour évaluer la part de la dessiccation dans l'affaiblissement de la qualité de la peau, on se reportera aux résultats moyens fournis par les dalles âgées de 4 mois, présentés dans le tableau 3.4. (béton non protégé de la dessiccation), et ceux donnés en annexe V concernant les carottes I.5 et I.6. Celles-ci ont été prélevées dans la dalle enduite d'une couche de résine juste après le décoffrage, empêchant ainsi (ou du moins limitant fortement) les échanges hydriques avec l'ambiance.

Les résultats obtenus figurent dans le tableau de synthèse présenté en 3.5. Etant donné que pour la même formulation, les valeurs des caractéristiques obtenues dans les deux cas (béton enduit et non enduit) sont différentes, on préférera mener la comparaison sur les différences calculées pour chaque béton, entre les caractéristiques de la peau (S) et le coeur (C). De fait, on constate que ces différences sont quasiment identiques. Il en résulte que l'enduction de la surface ne semble pas modifier "l'affaiblissement normal" de la peau car la différence sur le module dynamique du béton entre la peau et le coeur s'est révélée là encore de l'ordre de - 6 GPa.

		E ₂	E ₃	A _b	W	P	G	B
		(GPa)		(%)				(MPa)
Béton non enduit	S1	22.64	36.83	5.69	2.34	14.7	45.6	4.24
	C1	28.23	41.56	5.21	2.51	13.5	44.1	3.85
	C1-S1	5.60	4.70	-0.50	0.16	1.20	1.50	-0.49
Béton enduit	S2	35.44	40.50	4.53	2.94	11.7	44.1	6.17
	C2	41.50	45.90	4.01	2.84	10.45	43.0	6.28
	C2-S2	6.10	5.40	-0.52	0.10	1.25	1.10	0.11

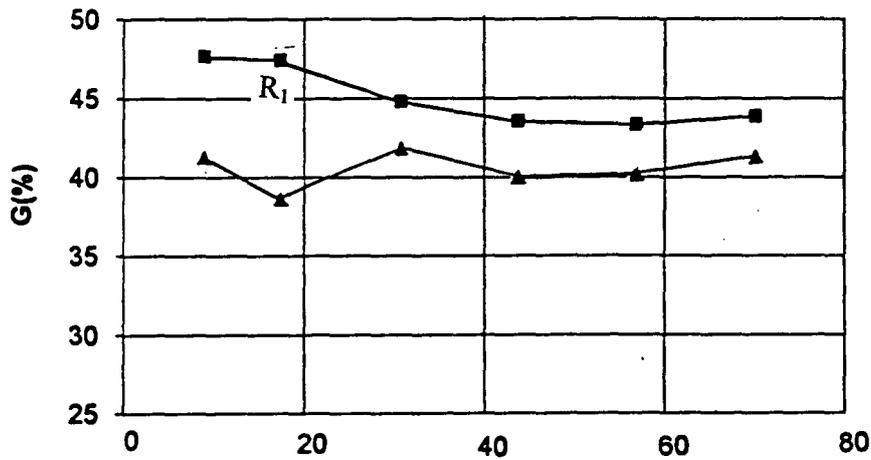
Tableau 3.5. - Effet de l'enduction sur un béton âgé de 4 mois

Nous avons formulé en 3.2.2. que cet affaiblissement pouvait tenir à une perturbation du mûrissement due à la dessiccation. S'il en était ainsi, nous aurions donc dû observer une amélioration de la qualité de la peau par rapport à celle du coeur d'un béton enduit, et donc partiellement, sinon totalement protégé de la dessiccation. Puisque ce n'est pas le cas, l'affaiblissement ne peut trouver son explication que dans des différences structurelles entre la peau et le coeur, et plus particulièrement dans la composition granulaire spécifique des premiers millimètres au voisinage des parois.

3.2.4. - Effet de paroi

Le coffrage des éléments en béton provoque un phénomène connu sous le nom d'effet de paroi. En effet, pendant la mise en place du béton, les granulats ont tendance à buter et à s'immobiliser contre les armatures et les parois des moules. Au voisinage des surfaces rigides, le béton se serre mal parce que les granulats ne peuvent se mouvoir que dans les directions sensiblement parallèles aux parois. Ceci provoque un enrichissement local en éléments fins et en eau et la compacité s'en trouve donc diminuée, par suite d'une porosité supplémentaire apparaissant dans cette zone.

Les études précédentes concernant ce problème, traitent généralement des mélanges granulaires secs et unimodaux (Caquot (1937), De Larrard (1994)). Quant à nous, nous avons cherché à identifier le changement de granularité du béton au voisinage du coffrage. L'identification est réalisée sur les dalles par la différence en pourcentage granulaire, mesuré pour les carottes dont la face testée a été coffrée (coffrage vertical) et celles dont la face a été talochée (coffrage horizontal). La figure 3.4. représente les pourcentages granulaires moyens sur 14 carottes prélevées d'un béton coffré en contre-plaqué bakéliné et en planches, et 8 carottes prélevées du même béton non coffré. On observe sur la rondelle R_1 pour un béton coffré (coulé verticalement), une concentration en granulats ayant tendance à diminuer à partir d'environ 20 mm comptés à partir du parement externe. Rappelons ici que les valeurs du pourcentage granulaire obtenues pour les rondelles R_0 , représentent celles mesurées sur la seule face disponible située à 8 mm du parement. Il y a donc lieu d'être prudent dans l'interprétation de ce graphe en ce qui concerne les résultats correspondants.



distance moyenne par rapport au parement

Figure 3.4. - Pourcentage granulaire mesuré pour un béton avec et sans effet de paroi.

—■— Béton coffré
—▲— Béton non coffré

Les conséquences de l'effet de paroi sur la variabilité des caractéristiques mesurées sont illustrées par le tableau 3.6. qui montre, selon que la face testée est coffrée ou non, les résultats moyens obtenus sur les dalles âgées de 4 mois. On remarquera que, malgré leurs faibles écarts, les valeurs de porosité obtenues sur R_0 peuvent différencier un parement glacis coffré et une surface talochée (de porosité supérieure). Il en est de même pour le coefficient d'absorption. Ainsi, la porosité de la face coffrée en planches est moindre grâce à la facilité du bois d'absorber localement l'eau excédentaire. Cet effet correctif ne se produit pas dans le cas d'une face coffrée en contre-plaqué où l'absorption d'eau est réduite, voire nulle (voir tableau 3.6.). Les différences entre les valeurs des modules dynamiques pour ces deux types de coffrage sont très voisines ce qui ne nous permet pas de tirer de conclusion à ce sujet.

			E ₂	E ₃	r ₂	r ₃	A _b	P	G	B
			(GPa)		(g/cm ³)		(%)			(MPa)
Face coffrée	en contre- plaqué	R ₀	23.9	37.8	2.26	2.40	5.61	14.5	47.8	3.85
		$\sum_{i=1}^5 R_i/5$	28.7	42.5	2.31	2.44	4.95	12.9	44.2	3.65
	en plan- ches	R ₀	23.5	36.6	2.27	2.41	5.46	13.9	46.9	4.12
		$\sum_{i=1}^5 R_i/5$	28.9	41.0	2.30	2.43	5.30	13.6	45.8	3.72
Face non coffrée	R ₀		20.5	35.3	2.23	2.34	6.01	15.7	42.5	4.72
	$\sum_{i=1}^5 R_i/5$		26.9	41.5	2.28	2.42	5.38	13.9	42.4	4.38

Tableau 3.6. - Caractéristiques obtenues en fonction de la nature du coffrage sur les dalles âgées de 4 mois

3.2.5. - Effet de l'âge et des conditions de traitement

Cet effet, jugé sur l'ensemble des résultats obtenus pour le module d'élasticité dynamique et qui peut, dans une certaine mesure, représenter la qualité du béton, nous suggère les remarques suivantes :

- Le module d'élasticité dynamique est, apparemment, fonction de l'état hydrique du matériau : il est plus faible à l'état sec, plus élevé à l'état saturé, (voir fig. 3.1., 3.2. et 3.3.). Nous avons également pu remarquer que, lorsque les échantillons avaient été séchés en étuve, puis saturés dans l'eau, ils présentaient une augmentation significative du module dynamique. Cette augmentation semble donc provenir de la contribution de l'eau à renforcer la structure de la pâte de ciment. Les résultats expérimentaux montrent que l'amélioration du module après saturation en eau, est d'autant plus marquée que le béton est jeune : pour les dalles testées à 4 mois d'âge, le module dynamique des premiers millimètres passe de 22,6 GPa à l'état sec

à 36,8 GPa à l'état saturé, soit une augmentation de 62 % ; à coeur, cette augmentation est de l'ordre de 48 %. Au delà de 4 mois d'âge, les différences constatées n'excèdent pas 30 %, (voir tableau 3.4.). Le mûrissement du béton étant très rapide au jeune âge, les faibles valeurs du module du béton sec peuvent s'expliquer par un endommagement provoqué par le séchage, dont les conséquences sont très sensibles sur des hydrates de ciment fragiles.

- Le module dynamique du béton est fonction des propriétés élastiques et de la concentration en volume de ses constituants, ceux-ci pouvant schématiquement être divisés en pâte de ciment et en granulats. L'augmentation du module dynamique avec l'âge, des échantillons ayant le même pourcentage granulaire, découle directement du gain en module élastique de la pâte de ciment, donc de son degré d'hydratation. Les résultats expérimentaux, obtenus sur les échantillons provenant des dalles testées à 4 et 16 mois, montrent que la relation entre le module dynamique et l'âge paraît différente selon que l'on considère l'état sec ou l'état saturé. En effet, le module dynamique du béton sec, passe pour les premiers millimètres de 22,6 GPa à 4 mois à 32,7 GPa à 16 mois, soit une augmentation de 45 % qui s'accompagne d'une diminution de la porosité de l'ordre de 1,5 % seulement. En revanche, le module du béton saturé passe de 36,8 GPa à 38,7 GPa, soit une faible augmentation, de l'ordre de 5 %. Les variations des valeurs des modules constatées à coeur sont presque identiques (voir tableau 3.4.). Or, étant donné que la différence obtenue à l'état sec traduit probablement un endommagement conséquent, par le séchage du béton testé à 4 mois, on peut admettre comme significative, la seule augmentation du module obtenue à l'état saturé. Les conséquences des traitements subis par les rondelles sur les caractéristiques mécaniques mesurées, seront développées en 3.3.2.
- Pour des échantillons âgés de 4 mois et immergés dans l'eau d'une façon continue pendant un an, la valeur du module dynamique s'est avérée très proche de celle donnée par des échantillons comparables débités à l'âge de 16 mois et immergés ensuite dans l'eau pendant 3 semaines. Ainsi que cela peut être constaté grâce aux

résultats présentés par la figure 3.5., la faible différence entre les modules E_3 et E_4 des deux lots d'échantillons (de l'ordre de 1 GPa), montre qu'au delà de 4 mois le mûrissement dans l'eau des rondelles ne semble pas modifier la valeur du module dynamique à l'état saturé, et ce, même pour la première rondelle. Il en est de même pour l'essai de fendage car les valeurs correspondantes se sont révélées, elles aussi, très voisines (voir annexes V et VI).

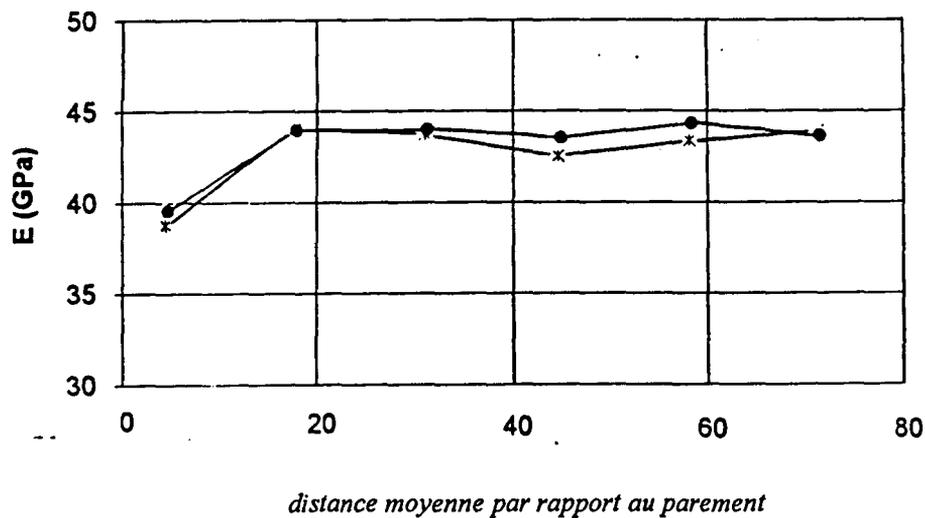


Figure 3.5. - Variations du module d'élasticité pour deux lots d'échantillons
 —x— E_3 - échantillons débités à l'âge de 16 mois et immergés dans l'eau pendant 28 jours
 —•— E_4 - échantillons débités à l'âge de 4 mois et immergés dans l'eau pendant 1 an

3.3. - Corrélations par régression

3.3.1. - Rappel de la méthode de régression linéaire

En considérant un modèle connu par son expression analytique et un ensemble de résultats expérimentaux représentant les variables du modèle, l'analyse par régression

consiste à calculer les coefficients inconnus qui conduisent à la meilleure représentation des expériences. Le calcul s'effectue en minimisant les écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées par diverses méthodes, la convergence peut être difficile en raison de la non-linéarité des problèmes généralement étudiés. Parmi ces méthodes, celle des moindres carrés, utilisée ici, s'applique lorsque la fonction "écart" $\lambda(a)$ dépendant des coefficients caractéristiques inconnus a_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), est choisie comme la somme des carrés des écarts :

$$\lambda(a) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \xi_j^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [y_j^c(a, x_j) - y_j^e(x_j)]^2$$

avec y_j^e et y_j^c les valeurs expérimentales et calculées de l'un des paramètres en fonction des autres, désignés par x_j (le j -ième point expérimental), (fig. 3.6.).

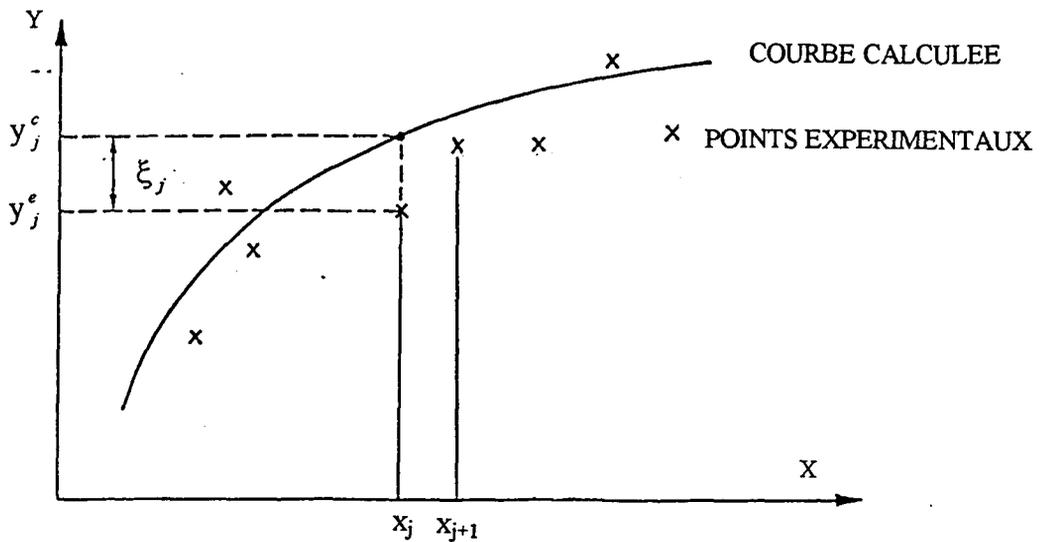


Figure 3.6. - Représentation des résultats expérimentaux par une courbe d'identification

On utilise la méthode de régression linéaire lorsque l'expression des valeurs calculées est linéaire en fonction des coefficients a_i :

$$y_j^e = A_0(x_j) + A_1(x_j) a_1 + \dots + A_n(x_j) a_n$$

La minimisation de $\lambda(a)$ s'effectue en écrivant $\partial\lambda / \partial a_k = 0 \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, n$ et grâce à la linéarité on trouve directement, avec $A_{ij} = A_i(x_j)$:

$$\sum_i \left(\sum_j A_{jk} A_{ji} \right) a_i = \sum_j A_{jk} (y_j^e - A_0)$$

La matrice $\sum_j A_{jk} A_{ji}$ étant symétrique, la résolution de ce système linéaire permet facilement de trouver les inconnus a_i .

3.3.2. - Corrélations entre E, P* et G

Afin d'évaluer les conséquences des conditions de traitement subies par les rondelles sur les caractéristiques mesurées, nous avons tenté, à partir d'une régression linéaire multiple réalisée sur le logiciel STATGRAPHICS, de trouver une relation entre le module de déformation dynamique du béton sec ou saturé d'une part (variable dépendante), et les propriétés des constituants d'autre part : la porosité de la pâte de ciment (ou porosité pondérée) et le pourcentage granulaire (variables indépendantes, la matrice de corrélation nous suggérant un coefficient de corrélation (P*,G) égal à 0,03)

L'analyse montre effectivement que les coefficients des variables indépendantes varient en fonction des échantillons étudiés et notamment de leur état hydrique. Ainsi, les figures 3.7. et 3.8. illustrent les effets de la porosité pondérée (P*) et du pourcentage granulaire (G) sur le module dynamique à l'état sec E_2 , calculés sur 120 rondelles provenant des dalles âgées de 4 et 16 mois, les résultats obtenus sur les rondelles R_0 étant exclus. Les domaines relatifs aux différentes familles de rondelles sont indiqués sur le plan (E, P*). La négligence de l'effet de l'âge dans les corrélations tentées indique l'aspect qualificatif de celles-ci, étant donné que seule la prise en compte de toutes les rondelles, fournit des relations avec des coefficients de corrélation acceptables de l'ordre de 0,70 à 0,80.

Si on considère dans l'exemple étudié, les pentes des droites représentant les effets des composantes, on en déduit que seule la porosité pondérée expliquerait la quasi-totalité des variations du module dynamique obtenu à l'état sec, l'influence du pourcentage

granulaire étant négligeable (fig. 3.7. et 3.8.).

Ainsi, la relation donnant avec un coefficient de corrélation $r = 0,69$, E_2 en fonction de G et P^* est :

$$E_2 = 0,01 G - 1,7 P^* + 70,7 \quad (1)$$

où P^* et G sont exprimés en pourcentage et E_2 en GPa.

La relation (1) montre qu'une augmentation de la porosité pondérée de 10 % se traduit par une chute du module dynamique de 17 GPa. Cette relation peut se mettre d'une façon plus explicite en fonction des valeurs moyennes (\bar{E}_2 , \bar{G} et \bar{P}^*) et on obtient donc :

$$E_2 = 0,01(G - \bar{G}) - 1,7(P^* - \bar{P}^*) + \bar{E}_2$$

soit :
$$E_2 = 0,01(G - 43,2) - 1,7(P^* - 22,8) + 33,5$$

Les mêmes effets étant recherchés sur le module à l'état saturé E_3 , on constate que les variations de celui-ci peuvent être expliquées par les deux composantes ayant des coefficients significatifs (fig. 3.9. et 3.10.). La relation trouvée avec $r = 0,74$ est :

$$E_3 = 0,31 G - 0,81 P^* + 47,6 \quad (2)$$

La même reformulation de la relation (2) donnant cette fois :

$$E_3 = 0,31 (G - 43,2) - 0,81(P^* - 22,8) + 42,7$$

Cette relation attribue un effet non négligeable au pourcentage granulaire en réduisant corollairement l'effet de la porosité pondérée.

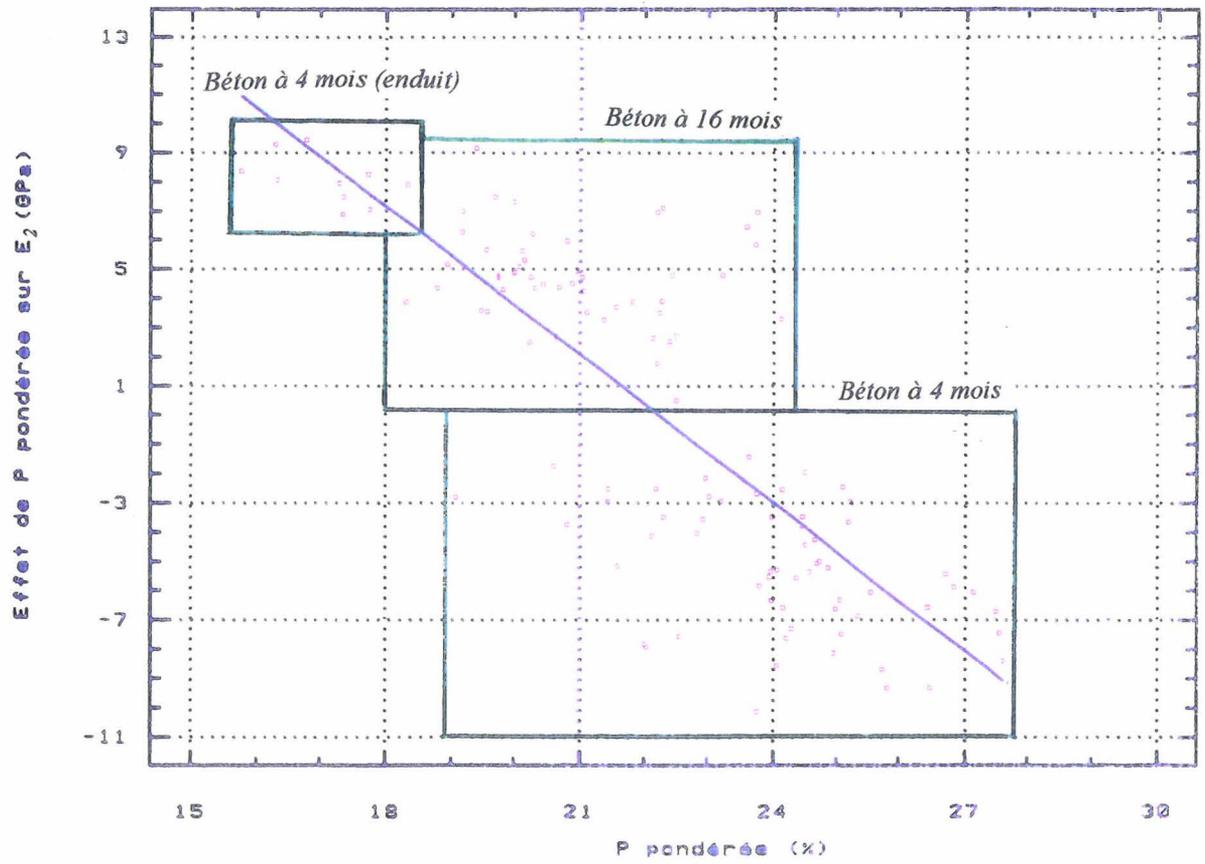


Figure 3.7. - Effet de la porosité pondérée sur E_2 (module dynamique à l'état sec) obtenu sur les dalles âgées de 4 et 16 mois.

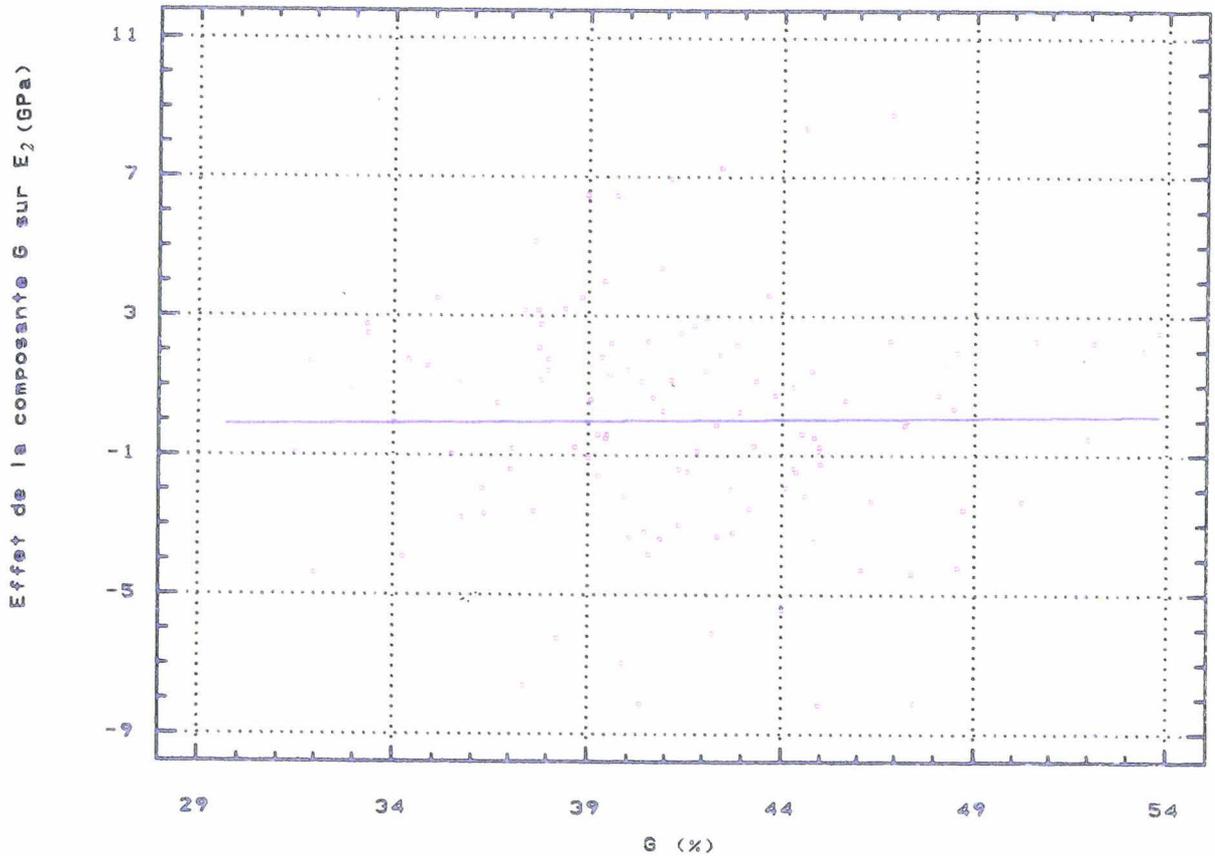


Figure 3.8. - Effet du pourcentage granulaire sur E_2 (module dynamique à l'état sec) obtenu sur les dalles âgées de 4 et 16 mois.

Effet de P pondérée sur E_3 (GPa)

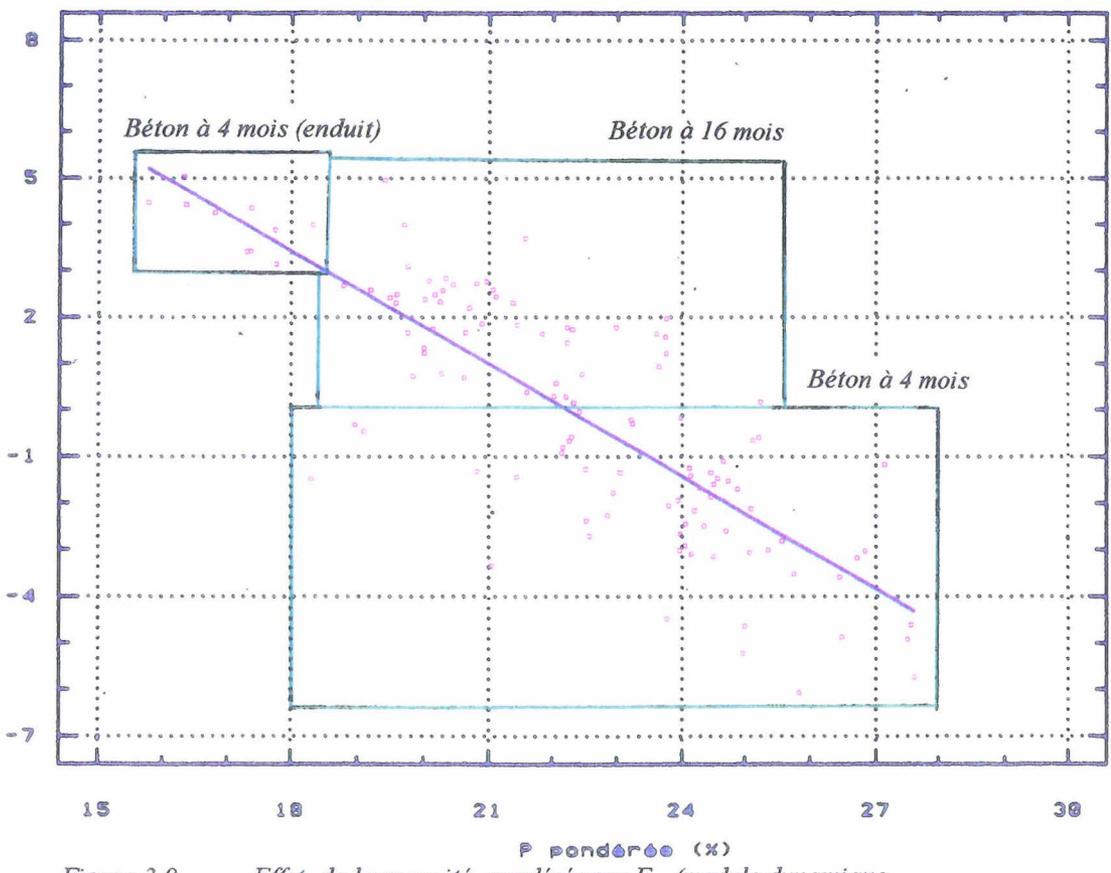


Figure 3.9. - Effet de la porosité pondérée sur E_3 (module dynamique à l'état saturé) obtenu sur les dalles âgées de 4 et 16 mois.

Effet de la composante G sur E_3 (GPa)

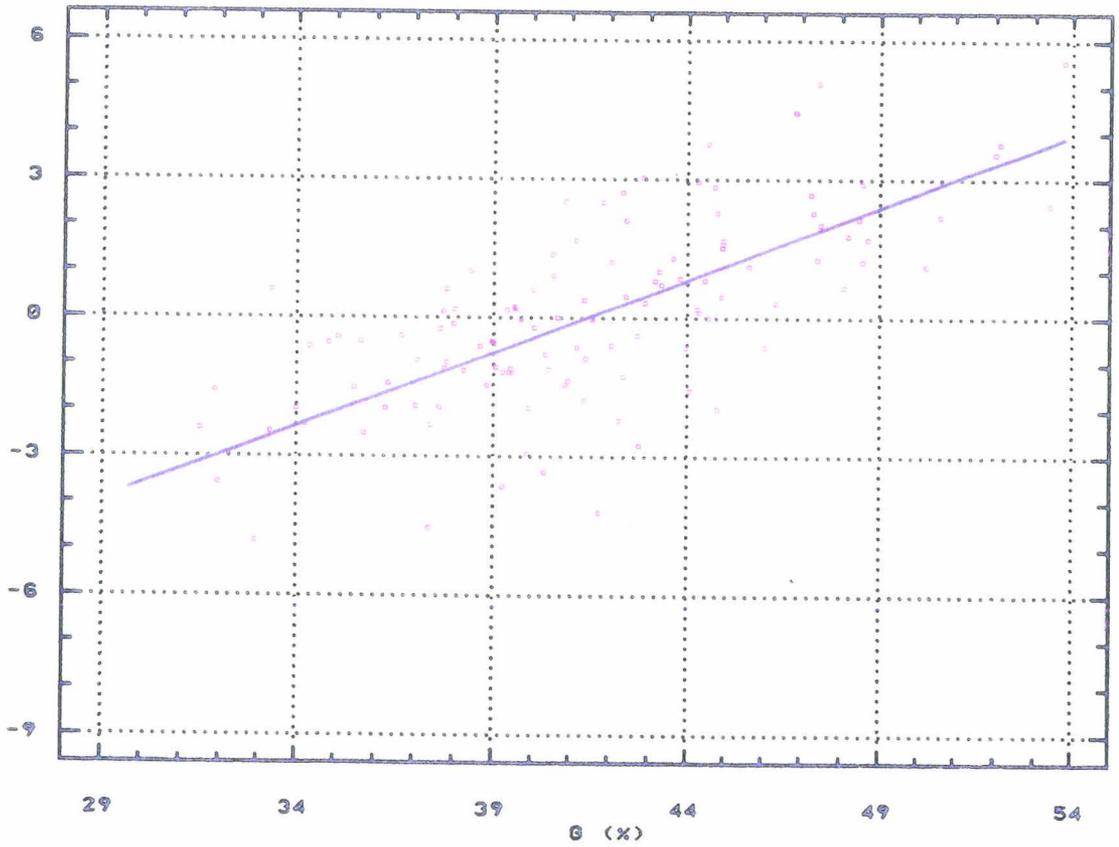


Figure 3.10. - Effet du pourcentage granulaire sur E_3 (module dynamique à l'état saturé) obtenu sur les dalles âgées de 4 et 16 mois.

Dans un deuxième temps, les mêmes corrélations ont été recherchées sans exclure les résultats obtenus sur les rondelles R_0 . Nous avons tenu compte du coefficient correctif permettant d'estimer le taux granulaire volumique à partir du taux surfacique mesuré sur la seule face située à 8 mm du parement. Ce coefficient est obtenu par une modélisation de la distribution granulaire dans les premiers millimètres à proximité de la paroi, exposée en annexe IX. La prise en considération des résultats concernés, à faible pourcentage granulaire, ne semble pas modifier de manière significative, les pentes des droites représentant les effets des composantes P^* et G sur les modules dynamiques. Les figures 3.11. et 3.12. montrent à titre indicatif, l'effet du pourcentage granulaire sur E_2 et E_3 respectivement. Ainsi, les relations obtenues sont les suivantes :

$$\text{- à l'état sec, (r = 0,73) : } E_2 = 0,04 (G - 41,3) - 1,66 (P^* - 22,4) + 32,5 \quad (3)$$

$$\text{- à l'état saturé, (r = 0,78) : } E_3 = 0,28 (G - 41,3) - 0,74 (P^* - 22,4) + 41,9 \quad (4)$$

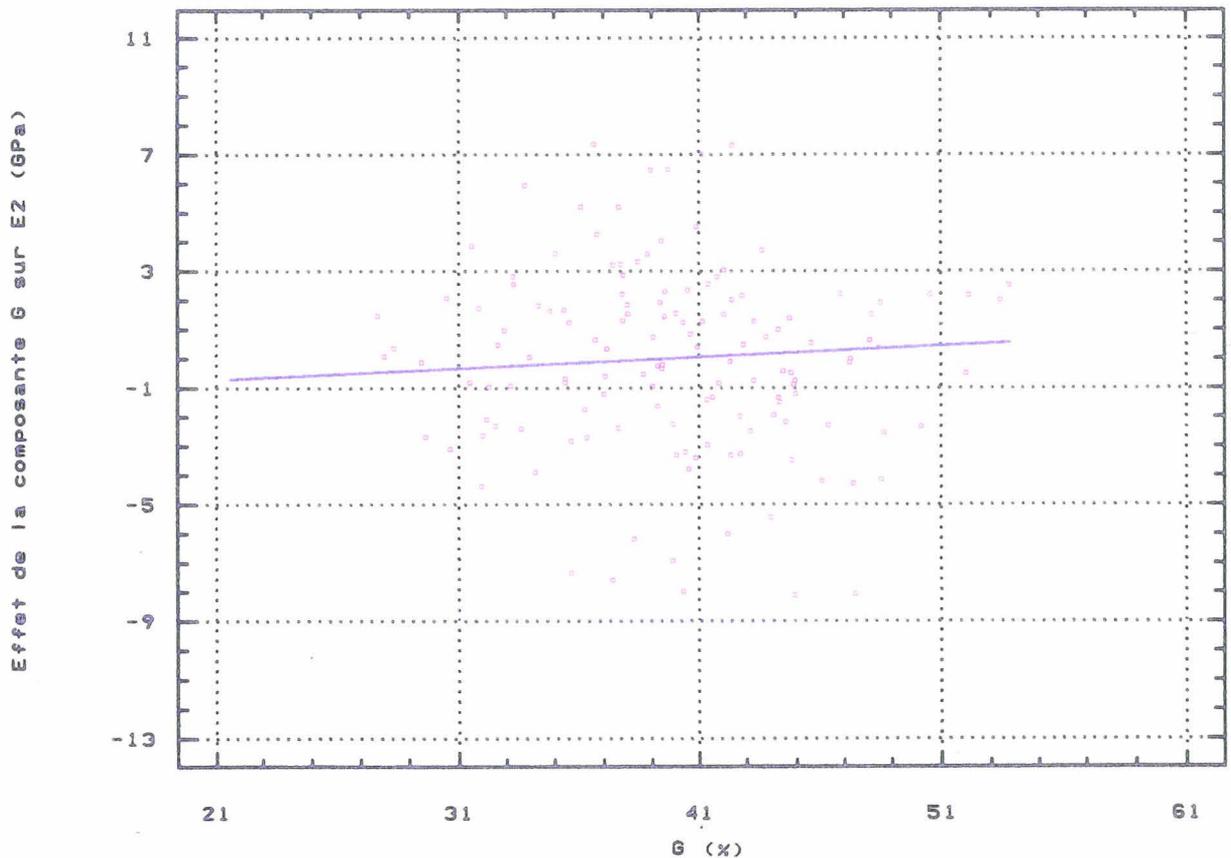


Figure 3.11. - Effet du pourcentage granulaire sur E_2 obtenu sur les dalles, compte tenu, en plus, des résultats relatifs aux rondelles R_0 .

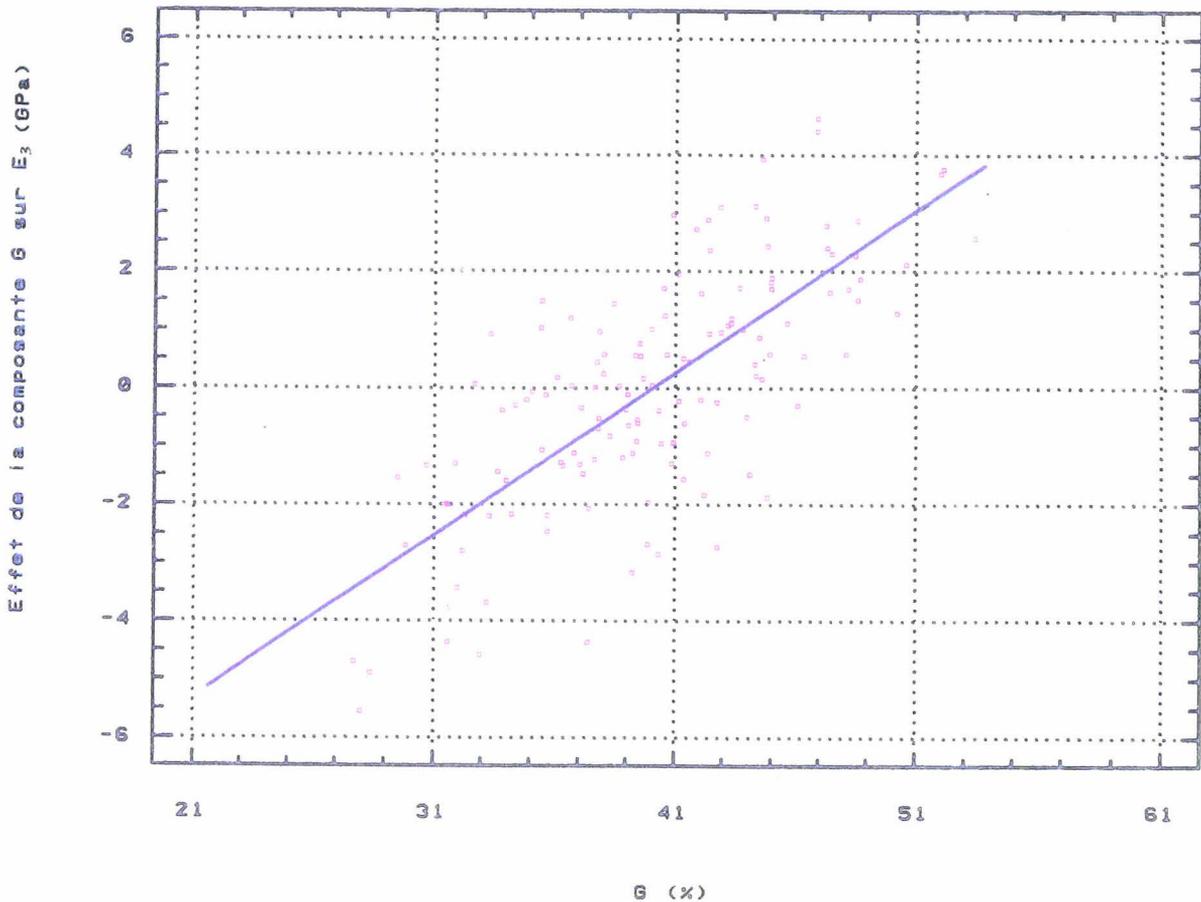


Figure 3.12. - Effet du pourcentage granulaire sur E_3 obtenu sur les dallettes, compte tenu, en plus, des résultats relatifs aux rondelles R_0 .

La contribution du pourcentage granulaire aux variations du module dynamique qui est négligeable d'une part (relations (1) et (3)), et significative d'autre part (relations (2) et (4)), peut surprendre a priori. De fait, les travaux de Hashin (1962) et de Hoobs (1961, 1971), cités dans la première partie montrent que les propriétés du béton sont déterminés par le pourcentage granulaire. Peut-être faut-il incriminer les conséquences des traitements subis par les rondelles ? Pour répondre à cette question, revenons tout d'abord sur quelques résultats et réflexions relatifs au béton :

La structure du béton peut être décrite schématiquement en considérant deux zones différentes : la liaison pâte-granulats et la pâte de ciment hors de cette liaison.

Dans les bétons ordinaires (de granulats non poreux), la liaison pâte-granulats constitue une zone moins résistante dont la fragilité est due, d'une part, à une

structuration particulière des hydrates et d'autre part, à l'existence de vides et de microfissures, principalement autour des granulats les plus gros, Maso (1980), Bascoul (1981). Les vides proviennent de bulles d'air ou de gouttelettes d'eau emprisonnées sous les granulats lors de la mise en place dans les moules. Les microfissures résultent d'une concentration de contraintes due aux effets du retrait de la pâte. Ces microfissures se développent préférentiellement dans la direction des grands cristaux de portlandite qui sont orientés selon leur plan de clivage, ce qui favorise l'extension des discontinuités, Maso (1980).

La pâte de ciment hydratée est parsemée de vides qui constituent la porosité. Ces vides sont plus ou moins remplis d'eau selon le degré d'humidité relative en équilibre avec la pâte. Une partie de cette eau, tout en étant mobile, participe à la cohésion de la pâte de ciment durcie, Feldman (1971), Sierra (1974).

Le séchage des rondelles en étuve à 60 °C réputé "doux", provoque néanmoins une dessiccation accélérée qui affecte la cohésion de la pâte et génère des potentialités de retrait. Les granulats, s'opposant aux déformations de retrait, se trouvent soumis à des efforts de compression s'exerçant sur les zones de contact. La pâte liante, dont la contraction est gênée, tend à se resserrer autour des granulats, est mise en traction et se rompt à l'interface. La microfissuration se propage ensuite dans la matrice.

La perte de la cohésion de la pâte durcie due à la déshydratation, et surtout, les ruptures d'adhérence dans les zones de collage pâte-granulats pourraient expliquer d'une part, les faibles valeurs du module obtenues à l'état sec et d'autre part l'influence négligeable des granulats sur celui-ci, comme semblent le montrer les régressions.

A contrario, la saturation en eau des rondelles contribue à la réhydratation du ciment, au remplissage des pores et à la fermeture des microfissures par suite du gonflement de la pâte durcie. L'état de tension des cristaux d'hydrates de ciment qui assurent la soudure entre les granulats et la pâte s'en trouve donc modifié. Ceci expliquerait les valeurs élevées du module à l'état saturé et l'influence apparente du pourcentage granulaire sur cette caractéristique E_3 .

Par ailleurs, l'adhérence de la pâte aux granulats joue un rôle important, surtout pour la résistance à la traction. De par leur adhérence et leur résistance propre, les

granulats participent à la résistance à la traction du béton. Cela peut se concevoir ainsi : une fissure qui se propage dans la pâte et en lisière d'un granulat, est cousue par celui-ci, si son adhérence à la pâte est importante. Sinon ; il se décolle de sa gaine et tout se passe, comme si son volume était vide dans le béton, (fig. 3.13.).

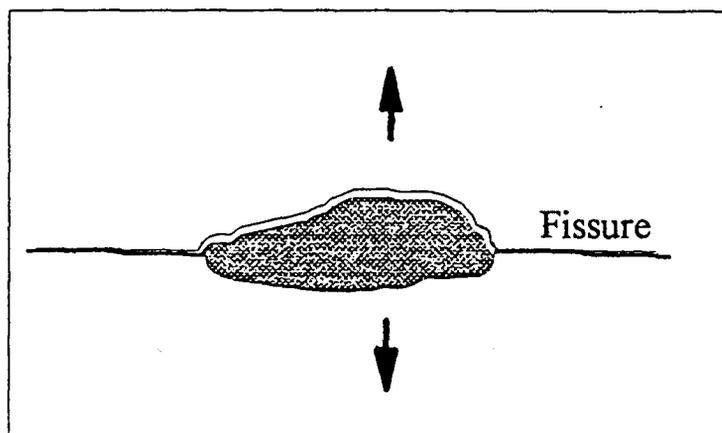


Figure 3.13. - Rôle de l'adhérence pâte-granulat sur la résistance à la traction

Les résultats des essais de fendage réalisés à l'état sec et à l'état saturé et présentés à la figure 3.14., corroborent assez bien les assertions précédentes. Ces résultats ont été obtenus sur un échantillon de 20 rondelles ($\varnothing = 100$ et $e = 10$ mm) débitées dans deux carottes provenant d'un béton âgé de deux ans, et de même composition que les dalles. D'après la figure 3.14. on remarque que les valeurs de B obtenues à l'état saturé sont nettement plus élevées que celles obtenues à l'état sec. La résistance moyenne à l'état saturé représente 1,5 fois celle à l'état sec.

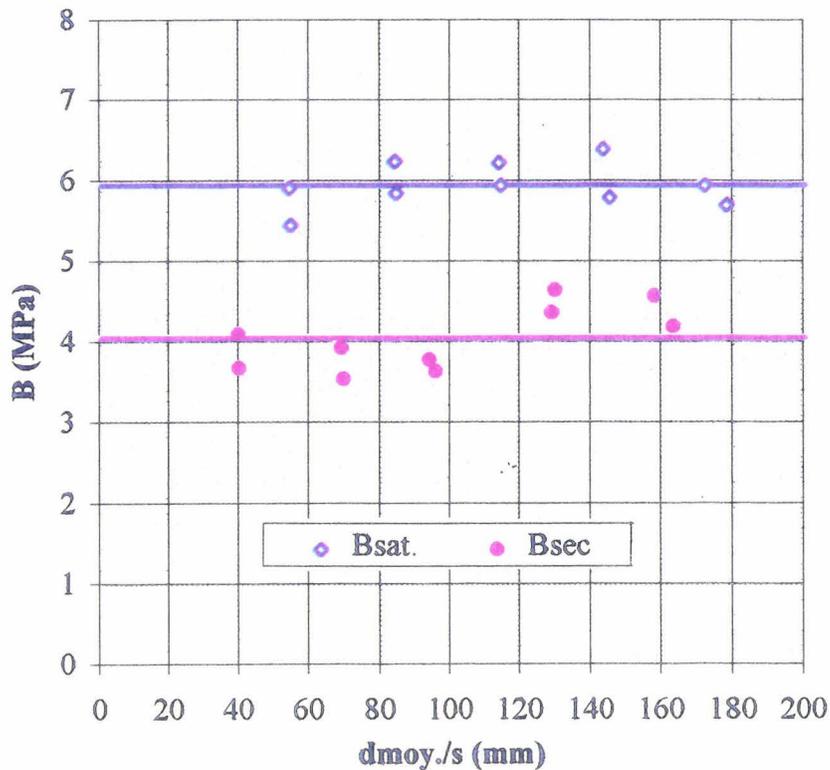


Figure 3.14. - Essais de traction par fendage réalisés à l'état sec ou à l'état saturé

Les conséquences des traitements subis par les rondelles sur les résultats obtenus, nous conduisent à estimer que l'état saturé reste le plus représentatif du fonctionnement réel des ouvrages. En effet, cet état diffère de l'état naturel par la seule faible différence des teneurs en eau. En revanche, l'état sec obtenu par dessiccation accélérée, est caractérisé par la présence d'un champ de contraintes internes très long à s'atténuer. Ce en quoi, cet état diffère de l'état naturel, les caractéristiques mécaniques étant pénalisées.

Enfin, il y a lieu de constater que la taille maximale des granulats comparée à l'épaisseur des rondelles étant relativement faible, celles-ci ne peuvent pas être considérées aussi "homogènes" que des échantillons de béton de plus grandes dimensions tels que les éprouvettes normalisées 16x32 cm. De fait, la dispersion des valeurs mesurées est importante et les coefficients de corrélation ne dépassent pas 0,8. Aussi, faut-il souligner que nous avons cherché à prendre en considération davantage l'aspect qualitatif des relations trouvées plutôt qu'admettre une justesse rigoureuse des coefficients obtenus.

3.4. - Conclusion de la troisième partie

Après les opérations de carottage et de sciage, tous les échantillons ont subi, dans les mêmes conditions expérimentales, les essais fixés par le plan de travail. Parmi les résultats obtenus, on remarque que :

- L'exploitation des mesures effectuées sur 192 échantillons a mis en évidence que la seule première rondelle, soit une peau de 8 mm d'épaisseur, est de qualité moindre par rapport au coeur du matériau. Une différence de -6 GPa environ, sur le module de déformation dynamique du béton saturé est constatée entre la peau et le coeur, indépendamment de la nature du coffrage, de l'âge, et de la composition du béton. Ce chiffre pourrait constituer une valeur de référence caractérisant un "affaiblissement normal" de la peau des bétons.
- Pour des dalles d'épaisseur 20 cm, la méthode de calcul du pourcentage granulaire a permis d'identifier l'effet de paroi sur environ 20 mm comptés à partir du parement. Les différences observées sur les caractéristiques mesurées selon la nature du coffrage se sont révélées négligeables. Cependant, les valeurs de porosité des premiers millimètres peuvent, malgré les faibles écarts enregistrés, différencier l'état d'un parement glacis coffré et une surface talochée.
- La comparaison des résultats obtenus sur des éprouvettes prélevées dans un béton enduit et non enduit montre que l'enduction n'entraîne pas une amélioration de "l'affaiblissement normal" de la peau par rapport au coeur. Nous estimons donc que cet affaiblissement trouverait son origine dans la structure granulaire des premiers millimètres au voisinage des parois et non pas dans un déficit en hydrates de ciment dû à la dessiccation.
- Le module d'élasticité dynamique est fonction de l'état hydrique du matériau : il est plus faible à l'état sec, plus élevé à l'état saturé. Les résultats obtenus sur les dalles montrent qu'au delà de 4 mois d'âge, le mûrissement dans l'eau des rondelles ne semble pas modifier les valeurs du module à l'état saturé.

- L'analyse par régression linéaire des résultats expérimentaux a permis d'établir des relations entre le module de déformation dynamique (E), la porosité pondérée (P*) et le pourcentage granulaire (G) ; et la modélisation proposée de la distribution granulaire à proximité immédiate du parement a favorisé la prise en compte des résultats relatifs aux rondelles R_0 dans cette analyse. Les relations trouvées mettent en évidence les conséquences des traitements subis par les rondelles sur les caractéristiques mesurées. Ainsi, à l'état saturé, l'analyse fournit des relations cohérentes. En revanche, à l'état sec, l'influence du pourcentage granulaire sur les variations du module dynamique s'est révélée négligeable. Ce résultat nous conduit à suspecter des ruptures d'adhérence dans les zones pâte-granulat, dues au séchage des rondelles.
- L'essai de fendage réalisé sur les rondelles, s'il fournit des résultats généralement dispersés, peut néanmoins rester un moyen de dépistage des bétons suspects de certaines pathologies se manifestant par un endommagement spécifique de la peau. De plus, une synthèse des résistances moyennes obtenues montre que ces dernières sont en bonne concordance avec le module de déformation dynamique et la porosité. Ainsi, quelle que soit la caractéristique choisie (E_2 , E_3 , P ou B), elle conduit à hiérarchiser la qualité des bétons testés, conformément au tableau ci-après (ordonné du béton le plus faible au béton le plus performant).

Structure	Rondelle	E_2	E_3	P	P*	G	B
		(GPa)		(%)			MPa
PI 328 et 338	R_0	23.3	30.5	17.0	28.2	40.0	1.85
	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	33.8	43.0	17.3	27.9	38.0	3.23
Dallettes (4 mois)	R_0	22.6	36.8	14.7	27.0	45.6	4.24
	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	28.2	41.6	13.5	24.2	44.1	3.85
Dallettes (16 mois)	R_0	32.7	38.7	13.3	24.3	45.2	3.65
	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	38.1	43.5	12.8	22.1	42.1	3.93
Pont de St Momelin	R_0	33.6	42.9	10.0	18.2	45.1	4.87
	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	38.2	49.3	10.3	18.2	43.2	4.00
Pont du CD 48	R_0	38.6	43.0	9.40	17.1	45.1	3.57
	$\sum_{i=1}^5 R_i / 5$	43.7	48.5	8.70	15.3	43.2	4.78

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Considérations générales

Qu'il nous soit permis, en arrivant à la conclusion de ce travail, de rappeler que les travaux antérieurs dont nous avons eu connaissance abordaient l'étude d'une peau limitée à quelques millimètres d'épaisseur. Dans notre recherche, nous avons effectué une étude expérimentale permettant une caractérisation quantitative des différentes propriétés du matériau béton en fonction de sa profondeur par rapport au parement exposé à la dessiccation.

A partir de prélèvements carottés, nous avons conçu une méthodologie de conditionnement des éprouvettes permettant d'obtenir, par sciage transversal, des rondelles de géométrie quasi-parfaite. Le plan expérimental a nécessité ensuite l'adaptation des moyens techniques pour la réalisation de nos essais. L'élaboration et l'application de ces moyens constituent dans l'ensemble un pas en avant.

Du côté expérimental, les possibilités qu'ouvre l'étude sur le diagnostic des ouvrages anciens sont particulièrement intéressantes. Ainsi, nous avons montré que le mode opératoire se prêtait bien à mettre en évidence l'évolution des propriétés du matériau au cours du temps.

D'une manière générale, les résultats qui ressortent de cette étude confirment les prédictions théoriques sur l'existence d'une peau de quelques millimètres d'épaisseur, de qualité moindre par rapport au cœur du matériau. Au delà de la première rondelle, et à compter de 12 mm de profondeur, le béton ne paraît pas affecté et cette constatation concerne tant le béton jeune que le vieux béton.

Pour ce qui concerne la mesure du module d'élasticité dynamique, nous avons montré qu'une différence de -6 GPa entre la peau et le coeur était généralement constatée indépendamment de la nature du coffrage, de l'âge et de la composition du béton. Ce chiffre pourrait donc constituer une valeur de référence caractérisant un "affaiblissement normal" de la peau des bétons. Un examen comparatif des résultats obtenus sur un béton enduit ou non, nous conduit à estimer que cet affaiblissement tient probablement davantage à la structure granulaire du premier centimètre du béton au voisinage des parois qu'à un effet de dessiccation. A ce sujet, il serait intéressant d'étudier l'affaiblissement concerné sur des bétons de granulométrie plus grossière.

Les caractéristiques mesurées ne semblent pas suivre pour tous les échantillons des lois de distribution parfaites en fonction de la profondeur par rapport au parement. Cependant, les courbes moyennes qui ont pu être dégagées confirment les lois théoriques : ainsi, lorsque A_b , W , et P croissent, r , E décroissent et inversement.

Par ailleurs, l'analyse par régression linéaire multiple des résultats expérimentaux a pu mettre en évidence la difficulté d'appréhender les caractéristiques mécaniques dans les divers états hydriques. Nous estimons que l'état saturé reste le plus représentatif du fonctionnement réel des ouvrages, les caractéristiques mécaniques mesurées dans cet état paraissant également les plus fiables.

Perspectives finales

On peut penser que certains résultats de l'étude entreprise qui améliorent la connaissance de la peau du béton vont permettre d'optimiser l'exploitation des mesures effectuées en parement des structures. A ce titre, la méthode de libération des contraintes qui suppose la constance du module d'élasticité dans l'épaisseur des structures, devrait gagner en précision en tenant compte de ces résultats.

Par ailleurs, l'élaboration dans la partie expérimentale d'une méthodologie de caractérisation du matériau dans son épaisseur, pourra être un moyen de

dépistage des ouvrages suspects de certaines pathologies qui conduisent à un endommagement spécifique de la peau, souvent invisible à l'oeil nu.

Enfin, notre étude pourrait fournir des éléments utiles pour une recherche complémentaire, qui tiendrait compte de l'effet de la proximité des armatures passives sur les caractéristiques du béton d'enrobage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

ABDUNUR C. - Mesure de contraintes sur ouvrages d'art par une méthode de libération miniaturisée. Bulletin de liaison de LPC, n° 138, pp. 5-14, juillet (1985).

ABDUNUR C., MIOA B., ACKER P., LELIEVRE A. - Evaluation des contraintes dues au séchage du béton par la méthode de libération des contraintes. Rapport AFREM Paris, novembre (1987).

ABDUNUR C., ACKER P., MIAO B. - "Superficial shrinkage of concrete : evaluation and modelling", Proc. IABSE Symp., Lisbon (1989).

ABIAR P. - "Cinétique de dessiccation et déformations différées du béton (analyse et modélisation)", thèse de Doctorat - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, (1986).

ACKER P. - Fissuration à la construction dans les ouvrages d'art ; Journée "d'étude - "Les fissurations des bétons" - I.T.B.T.P. n° 398, pp.64-73, Paris, oct. (1981).

ACKER P. - Drying of concrete : consequences for the evaluation of creep tests Fundamental research on creep and shrinkage of concrete. Martinus Nijhoff, pp. 149-169, (1982).

ACKER P., DIRUY M., LAU M.Y. - "Interprétation du comportement à long terme des ouvrages d'art en béton précontraint : rôle des migrations d'eau", Proceedings du Symposium RILEM - Budapest, sept. (1984).

ACKER P., FOUCRIER C., MALIER Y. - "Temperature - related Mechanical Effects in Concrete Elements and Optimization of the Manufacturing Process" in "Properties of Concrete at Early Ages", ACI, J.F. Young ed., Chicago, octobre (1985).

ACKER P. - "Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et application aux ouvrages d'art", Annales de l'ITBTP, n° 442, série Béton, 235 (1986).

ACKER P., BOULAY C., ROSSI P. - "On the importance of initial stresses in concrete and of the resulting mechanical effects", Cement and Concrete Research, vol. 17, n° 5, pp. 755-764, (1987).

ACKER P. - "Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique", Rapport de Recherche LPC, n° 152, juillet (1988-a).

ACKER P. - Retraits et fissurations des bétons, Annales de l'ITBTP, n° 466, série Béton 255, (1988-b).

ACKER P., MIAO B. - Résistances mécaniques et déformabilité des bétons : influence des conditions thermohygrométriques, compte rendu convention ATILH-LCPC, activités LCPC, n° 348015, (1989).

ACKER P., BOUNY V., PIAU J.M., TORRENTI J.M. - Effets thermiques et hydriques dans les bétons, rapport scientifique 1990, GRECO - Géomatériaux, pp. 451-458, (1991).

ACKER P. - "Retraits et fissurations du béton", Documents scientifiques et techniques AFPC, p. 42, (1992).

ADAM M.M. - Etude sur les parements de béton apparent. Annales de l'ITBTP, mars-avril (1961).

ADAM M.M. - Aspect du béton - collection de l'ITBTP, éd. Eyrolles, (1971).

AL-TAYYIB A.J., AL-ZAHRANI M.M., RASHECDUZZAFAR and AL-SULAIMANI G.J. - Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the Arabian Gulf environment, Cement Concrete Research, 18, 4, pp. 561-570, (1988).

ATTOLOU A. - Etude du séchage du béton par gammadensimétrie. Compte rendu LCPC, AER 1.30.11.4, (1985).

B

BAKE et AMICE : Recommendations for the production of high quality concrete surfaces (Cement and Concrete Association, S.F.P., 41, UDC 693-548-6), Londres, mars (1967).

BARON J. - "Les retraits de la pâte de ciment", in "Le Béton Hydraulique", Presses de l'ENPC, pp. 485-501, (1982).

BARON J. - "Introduction à la durabilité des bétons". La durabilité des bétons. Presses de l'ENPC, pp. 23-38, (1992).

BASCOUL A. - Formation des microfissures. Journée d'étude - "Les fissurations des bétons" - I.T.B.T.P. n° 398, pp. 7-22, Paris, oct. (1981).

BAZANT Z.P. and Wu, S.T. - "Creep and shrinkage law for concrete at variable humidity", J.ENGNG Mech. Div. ASCE 100, pp. 1183-1207, (1974).

BAZANT Z.P., ASGHARI A., SCHMIDT J. - "Experimental study of creep of hardened Portland cement paste at variable water content", Materials and Structures, vol. 9, n° 52, (1976).

BAZANT Z.P., OHTSUBO H., AOH K. - "Stability and post-critical growth of a system of cooling or shrinkage cracks", International Journal of Fracture, vol. 15, p.443, (1979).

BAZANT Z.P., RAFTSHOL W.J. - Effect of cracking in drying and shrinkage specimens, Cement and Concrete Research, vol. 12, (1982-a).

BAZANT Z.P. - "Mathematical models for creep and shrinkage "in concrete" in "Creep and Shrinkage in Concrete Structures", edited by Z.P., BAZANT and F.H., WITTMANN WILEY, (1982-b).

BAZANT Z.P. and CHERN J.C. - "Concrete creep at variable humidity : constitutive law and mechanism", Matériaux et Constructions 18 ; pp. 1-20, (1985).

BAZANT Z.P., KRISTEK V., and VITEK J.L. - Drying and Cracking Effects in Box-Girder Bridge Segment. Journal of Structural Engineering, Vol. 118, n° 1, January, (1992).

BUIL M. - Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante. Rapp. rech. LPC 92, p.72, (1979).

BUIL M. - Etude numérique simplifiée de l'effet de fissuration superficielle du béton dans des essais de fluage de dessiccation récents. Matériaux et Constructions 23, pp. 341-351, (1990).

BUIL M. and REVERTEGATE.-. Modelling cement attack by pure water, 2nd Int. Symp.on stabilization/solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes, Williams bourg, May 29 -june, (1990).

C

CAQUOT A. - Rôle des matériaux inertes dans le béton, Mémoire de la Société des Ingénieurs Civils en France, (1937).

CHAMSEDDINE F. S. - "Qu'est ce que la peau des bétons ?", Rapport interne du LRPC - Lille, (1993).

CHAMSEDDINE F. S. - Caractérisation de la peau d'un béton jeune. Compte rendu du LRPC, Lille (1994).

D

DE LARRARD F., LE ROY R. - Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances. LCPC, Material and Structures, 25, pp. 464-475, (1992).

DE LARRARD F., SEDRAN T., ANGOT D. - Prédiction de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. Bull. Liaison LCPC - n°194, nov.- dec. (1994).

DARCEMONT M. - L'esthétique des parements en béton in "Le béton hydraulique" Paris, Presses de l'ENPC, (1982).

DIRUY M. - Fluage des structures en béton précontraint. Le point sur les expérimentations faites par le LCPC depuis quinze ans, Ann. ITBTP, 455, série béton 248, juin, pp. 119-136, (1987).

DUVAL P. - La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. La durabilité des bétons. Presses de l'ENPC, pp. 173-225, (1992).

F

FELDMAN R. F. - The flow of helium into the interlayer spaces of hydrated portland cement paste. Cement and Concrete Research, 1, pp. 285 - 300, (1971).

G

GEOFFRAY J.M. - Guide technique "Défauts d'aspects des parements en béton" LCPC, (1990).

GHOMRANI A. - Mise au point et exploitation d'une méthode de mesure de la contrainte absolue dans les structures en béton. Thèse de doctorat présentée à l'Université des Sciences et Techniques de Lille, (1991).

GRUBE H., RECHENBERG W. - Durability of concrete structures in acidic water, Cement Concrete Research, 12, p. 236, (1982).

GRZYBOWSKI M., and SHATT S.P., Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, 87, pp. 138-148, (1990).

H

HARRIS C. M. and CREDE C. F. - Shock and vibration handbook. Basic Theory and Measurements, vol 1, pp. 1-25, (1961).

HASHIN Z. - The elastic moduli of heterogeneous materials. J.appl. Mech., vol. 29, pp. 143-150, (1962).

HASHIN Z. and SHTRIKMAN S. - A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. J. Mech. Phys. Solids, vol. 11, pp. 127-140, (1963).

HOOBS D.W. - Bulk modulus, shrinkage and thermal expansion of a two phase material. Nature, Lond.; Vol 222, pp. 849-851, (1969).

HOOBS D.W. - The dependence of bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration, Materials and structures, March-April n° 20, pp. 107-114, (1971).

HUBERTY - "Durabilité d'aspect des bétons apparents. Le vieillissement des façades" CSTC FEBE, Belgique, (1980).

HUMBERT P., PIAU J.M. - CESAR, Mode d'emploi - Version 2.0.0. Document LCPC, sept. (1986).

J

JONES R. - Non-destructive testing of concrete. Cambridge University. Press-London, (1962).

K

KLOPFER H.Von, - "Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen", Bauverlag, Berlin, (1974).

KREIJGER P.C. - Structuren (structures) Eindhoven University of Technology, p.24, (1970).

KREIJGER P.C., DEHAAS G.D., NIEL E.M.M.G., SLGTER J.C., STEIN H.N., THEISSING E.M., VAN WALLENDIAEL M. - The shrinkage of hardening cement paste and mortar, Cement and Concrete Research, vol. 5, pp. 295-320, (1975).

KREIJGER P.C. - "The skin of concrete - composition and properties"; Matériaux et Constructions, pp. 275-283, (1984).

L

L'HERMITE R.G., MAMILLAN M. - "Répartition de la teneur en eau dans le béton durci.", Annales de l'ITBTP, n° 309-310, (1973).

M

MAMILLAN M. - "L'hétérogénéité du béton, mise en évidence par la vitesse du son", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 309-310, pp. 35-38, sept-oct. (1973).

MASO J.C. - La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydraté, 7ème Congrès International de la Chimie des Ciments, Rapport principal 1, pp. 1-14, Paris, (1980).

MATHIVAT J., BOITEAU C. - Procédés généraux de construction. Tome I, Coffrage et bétonnage. Editions Eyrolles, (1992).

MAZARS J., BAZANT Z.P. - "Cracking and damage : strain localization and size effects", Elsevier (1989).

MENSI R., ACKER P., ATTOLOU A. - "Séchage du béton : analyse et modélisation", Materials and Structures, vol. 21, p.3, (1988).

MIAO B. - "Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton", thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, (1988).

MIAO B. - "Effets mécaniques dus au retrait à la dessiccation du béton". Rapport des Laboratoires, LCPC Paris, p. 144, (1989).

MOROG - Le beau béton, éditions du Moniteur, (1980).

P

Prescriptions techniques Betocib "La pierre de l'avenir". Les bétons de ciment blanc, Paris, (1988).

R

ROELFSTRA P.E., SADOUKI H., WITTMANN F.H. - "Le béton numérique", Matériaux et Constructions, vol. 18, n° 107, pp. 327-335, (1985).

ROSSI P., RICHER S. - "Numerical modelling of concrete cracking based on a stochastic approach". *Materials and Structures*, vol. 20, p.334, (1987).

S

SAKELLARIOU A. - "Contribution à la connaissance de phénomènes de fissuration du béton jeune", thèse présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, (1982).

SIERRA R. - Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques. Rapport de recherche n° 39. LCPC, sept. (1974).

T

THELANDERSSON S., MARTENSSON A., DAHLBLOM O. - "Tension softening and cracking in drying concrete", *Materials and Structures*, vol. 21, p.416, (1988).

TONNOIR B. - Rapport de recherches du réseau de LCPC, Exploitation de mesures de contrainte par Libération et mesures de tension à l'Arbalète, pratiquées dans des ouvrages précontraints, déc. (1994).

TUUTTI K. - Corrosion of Steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed. Stockholm, (1982).

V

VENUAT M. - Pratique des ciments, mortiers et bétons, Paris. Edition du Moniteur, p.284, (1989).

VERBECK G.J., HELMUTH R. H. - "Structures and physical properties of cement paste". Proc. Vth Intern. Symp. On the Chemistry of Cement, Session III.1, Tokyo, (1968).

VERNET C. - "Stabilité chimique des hydrates - Mécanismes de défense du béton face aux agressions chimiques". La durabilité des bétons, "Presses de l'ENPC, pp. 129-139, (1992).

W

WITTMANN F.H., ROELFSTRA P.E. - "Total deformation of loaded drying concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 10, (1980).

WITTMANN F.H., "Water and mechanical propertie of concrete", in "Le béton et l'eau", actes d'un séminaire CISC, St Rémy-les-Chevreuse, (CILF, Paris, 1987) pp. 104-121, juin (1985).

WITTMANN F.H. - "Mechanism of creep and shrinkage", preprints of the Fourth Rilem Int. Symposium on Creep and Shrinkage of concrete : mathematical modelling. Evanston , (1986).

ANNEXES

ANNEXE I : PRINCIPE DE LA METHODE DE LIBERATION DES
CONTRAINTES.

ANNEXE II : DONNEES DE FABRICATION DU BETON.

ANNEXE III : CAROTTAGE REALISE SUR LES DALLETTES.

ANNEXE IV : MESURES DE LA MASSE VOLUMIQUE, DU
COEFFICIENT D'ABSORPTION, DE LA POROSITE
ET DE LA TENEUR EN EAU.

ANNEXE V : TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS
OBTENUS A 4 MOIS.

ANNEXE VI : TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS
OBTENUS A 16 MOIS.

ANNEXE VII : TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS
OBTENUS SUR LES VIEUX BETONS.

ANNEXE VIII: COMPOSITIONS DES EPROUVETTES NORMALI-
SEES.

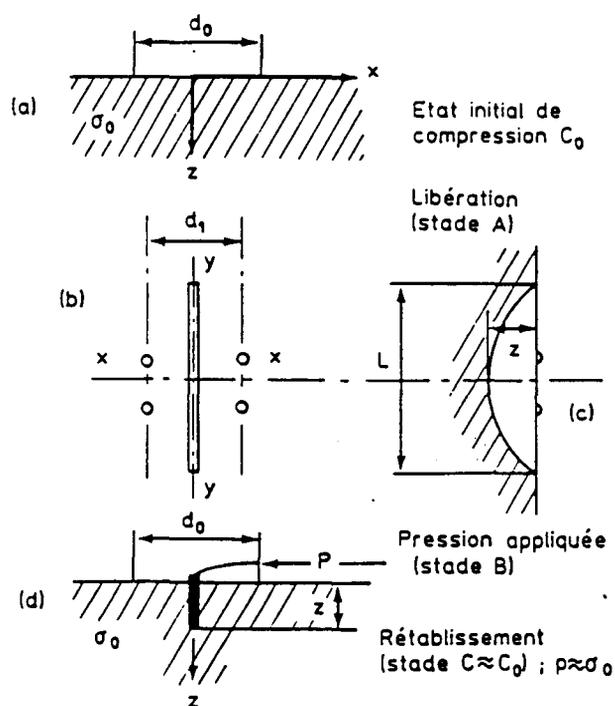
ANNEXE XI : MODELISATION DE LA DISTRIBUTION GRANU-
LAIRE SUR LES PREMIERS MILLIMETRES DU
PAREMENT.

ANNEXE I

PRINCIPE DE LA METHODE DE LIBERATION DES CONTRAINTES

La méthode de libération, mise au point par Abdunur (1985), est une méthode de mesure directe des contraintes absolues et de leur variation dans un ouvrage en béton précontraint, dans le but d'évaluer son état statique réel et surveiller l'efficacité d'un éventuel renforcement.

Cette méthode dont le principe est illustré par le schéma ci-dessous, consiste en une suppression locale des contraintes par enlèvement mécanique de matériau, suivie d'une compensation contrôlée des déplacements à l'aide d'un verin ultra-plat épousant la forme de l'entaille réalisée. En effet, après l'estimation des directions principales des contraintes sur la surface auscultée, un champ de déplacements de référence est matérialisé par des bases de mesures extensométriques. L'entaille est ensuite pratiquée dans un plan normal à l'une des directions principales, et le vérin y est introduit et mis sous pression pour permettre le rétablissement du champ initial de déplacements au bord des lèvres de l'entaille. La mesure de la pression de compensation indique une valeur approchée de la contrainte de compression normale au plan de l'entaille.



Principe de la méthode de libération des contraintes, Abdunur (1985)

ANNEXE II

DONNEES DE FABRICATION DU BETON

Coffrage:

Deux types de coffrage ont été utilisés pour la réalisation de 6 dalles de 0,52x0,52x0,2 m : en planches et en contreplaqué bakéliné.

Composition du béton (pour 1 m³) :

- Sable roulé du Boulonnais 0/4 SH	780 kg
- Gravier concassé du Boulonnais 5/12.5	500 kg
- Gravier concassé du Boulonnais 12.5/20	540 kg
- Ciment CPA 55 VICAT (NF 15-301)	400 kg
- Eau de gâchage	192 l

Le rapport eau/ciment = 0,48

La masse volumique théorique du béton : 2,412 t/m³

Bétonnage:

Pour le confectionnement des dalles, trois gâchées ont été réalisées dans un malaxeur fixe du laboratoire à axe vertical et mouvement planétaire, de 150 l de capacité :

- Gâchée 1: Dalles DI, DII et DIII
- Gâchée 2: Dalle DI' (cette dalle a été enduite d'une couche de résine)
- Gâchée 3: Dalles DIV et DV

Temps de malaxage (Norme NFP 18-404):

- Malaxage sec : 60 secondes
- Introduction d'eau : 30 secondes
- Malaxage humide : 180 secondes

Affaissements au cône d'ABRAMS (Norme NFP 18-451):

- Gâchée 1: 7,5 cm
- Gâchée 2: 8,5 cm
- Gâchée 3 :6,5 cm

Masses volumiques moyennes :

- Gâchée 1:
 - * Pour le béton frais : 2,389 g/cm³
 - * Pour le béton durci : 2,410 g/cm³

- Gâchée 2:
 - * Pour le béton frais : 2,449 g/cm³
 - * Pour le béton durci : 2,460 g/cm³

- Gâchée 3 :
 - * Pour le béton frais : 2,385 g/cm³
 - * Pour le béton durci : 2,400 g/cm³

Essais de compression :

Les essais de compression sont réalisés sur les éprouvettes 16x32 cm à l'âge de 28 jours suivant la norme 18 - 406 sur une presse TONIPAC de 2000 kN de charge nominale et de domaine de charge utilisable de 1500 kN.

- Gâchée 1:
 - * la résistance moyenne : 50,7 MPa
 - * le module d'élasticité : 34, 2 GPa

- Gâchée 2:
 - * la résistance moyenne : 56,1 MPa
 - * le module d'élasticité : 36, 8 GPa

- Gâchée 3 :
 - * la résistance moyenne : 51,8 MPa
 - * le module d'élasticité : 33, 8 GPa

Les données du bétonnage sont résumées dans le tableau ci-dessous :

N° de gâchée	Affaissements (cm)	Masse volumique des éprouvettes (g/cm ³)		Résistance à la compression à 28 j (cylindre 16/32 cm) (MPa)	Module d'élasticité à 28 j (GPa)
		Béton frais	Béton durci		
1	7,5	2,389	2,41	50,7	34,2
2	8,5	2,44	2,46	56,1	36,8
3	6,5	2,385	2,40	51,8	33,8

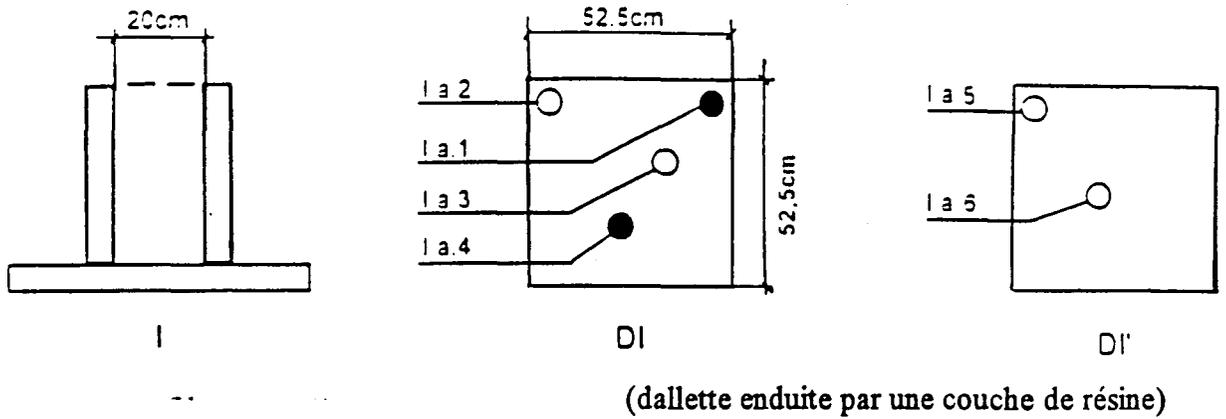
ANNEXE III

CAROTTAGE REALISE SUR LES DALLETTES

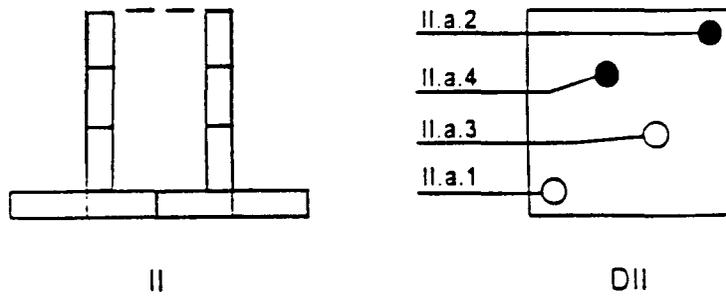
- à 4 mois (béton très jeune)
- à 16 mois (béton jeune)

1. - Coffrage vertical :

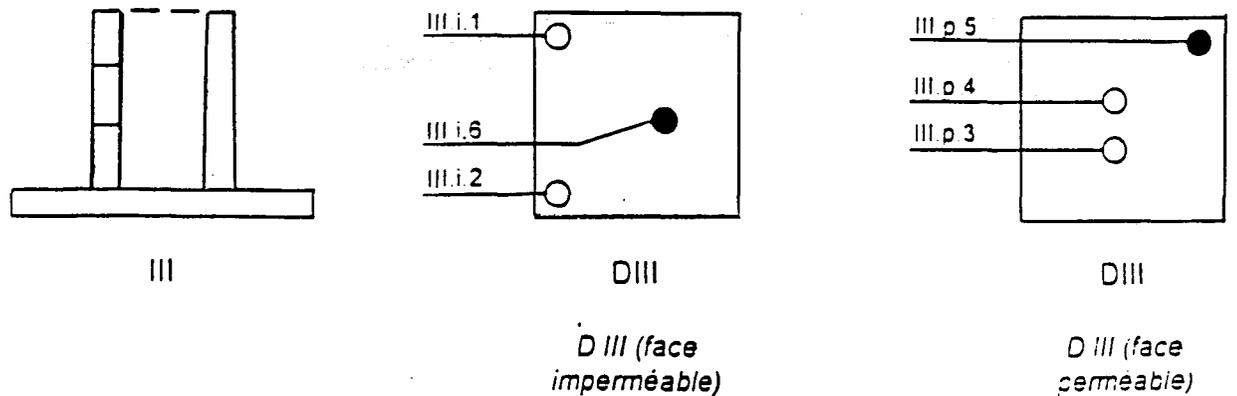
1-a : coffrage en contreplaqué



1-b : Coffrage en planches

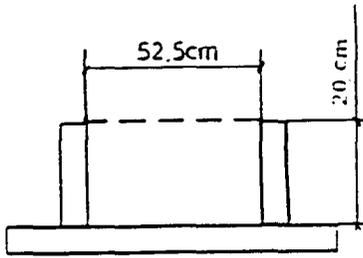


1-c : coffrage mixte

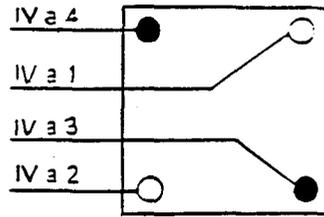


2 - Coffrage horizontal

2-a : coffrage en contreplaqué

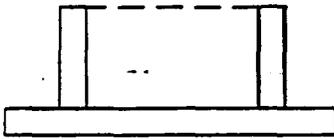


IV

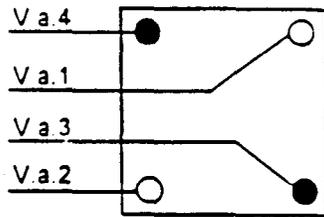


D IV

2-b : coffrage en planches



V



D V

ANNEXE IV

MESURES DE LA MASSE VOLUMIQUE, DU COEFFICIENT D'ABSORPTION, DE LA POROSITE ET DE LA TENEUR EN EAU

Les conditions de détermination de la masse volumique, du coefficient d'absorption, de la porosité et de la teneur en eau du béton sont définies par le mode opératoire EDF/CEMETS N° E TEGE CE 86 079 B (janvier 1986). Ce mode opératoire permet notamment de mesurer le volume d'un échantillon en béton, mortier ou coulis durcis par pesée hydrostatique.

Le calcul des caractéristiques recherchées nécessite les mesures suivantes :

- M - masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état,
- M_s - masse de l'échantillon sec (séchage en étuve à 60 °C jusqu'à la constance du poids),
- M_a - masse dans l'air de l'échantillon imbibé (immersion dans l'eau pendant 24 h à 20 °C),
- M_w - masse dans l'air de l'échantillon saturé en eau (désorption sous vide suivie d'une immersion dans l'eau à 20 °C jusqu'à la constance du poids),
- M'_w - masse dans l'eau de l'échantillon saturé en eau.

Ainsi, on aura :

- **la masse volumique sèche**: définie comme le quotient de la masse de l'échantillon sec par le volume qu'il occupe. Celui-ci est déterminé par pesée hydrostatique comme la différence M_w-M'_w représentant le volume d'eau déplacé V; si μ_e est la masse volumique de l'eau, la masse volumique sèche (M_s / V) est donc :

$$\gamma_2 \text{ (g/cm}^3\text{)} = \mu_e M_s / (M_w - M'_w)$$

- **la masse volumique saturée**: définie comme le quotient de la masse de l'échantillon sec par le volume qu'il occupe.

$$\Gamma_3 \text{ (g/cm}^3\text{)} = \mu_e M_w / (M_w - M'_w)$$

- **la porosité**: définie comme le rapport du volume des vides accessibles à l'eau, au volume total de l'échantillon exprimé en pourcentage.

Si le volume des vides est $\mu_e (M_w - M_s)$ et le volume total est $\mu_e (M_w - M'_w)$ on obtient:

$$P \text{ (\%)} = 100 (M_w - M_s) / (M_w - M'_w)$$

- **le coefficient d'absorption**: définie comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon, entraînée par une imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon.

$$A_b \text{ (\%)} = 100 (M_a - M_s) / M_s$$

- **la teneur en eau**: définie comme le rapport de la différence entre la masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état et sa masse sèche, à la masse sèche de l'échantillon.

$$W \text{ (\%)} = 100 (M - M_s) / M_s$$

ANNEXE V

TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS OBTENUS A 4 MOS

Carotte	Rondelle	Masse (g)	Diam. (mm)	e (mm)	μ (g/cm ³)	Grindo	Ei (GPa)	dmoy./s (mm)
IA2 I- Rondelles à l'état naturel	R0	129.70	96.33	7.90	2.25	648	30.23	3.95
	R1	161.70	96.33	9.33	2.38	511	36.79	16.57
	R2	138.00	96.33	8.06	2.35	600	35.33	29.26
	R3	162.80	96.33	9.43	2.37	508	36.30	42.01
	R4	157.00	96.33	9.13	2.36	530	35.44	55.29
	R5	142.30	96.33	8.20	2.38	584	36.51	67.95
II- séchées à l'étuve à 60°C jusqu'à masse constante	R0	126.61	96.33	7.90	2.20	688	26.18	3.95
	R1	157.42	96.33	9.33	2.32	544	31.60	16.57
	R2	134.45	96.33	8.06	2.29	636	30.63	29.26
	R3	158.22	96.33	9.43	2.30	546	30.54	42.01
	R4	152.32	96.33	9.13	2.29	570	29.72	55.29
	R5	137.11	96.33	8.20	2.29	627	30.52	67.95
III- saturées en eau (3 à 4 semaines)	R0	133.62	96.33	7.90	2.32	590	37.57	3.95
	R1	165.12	96.33	9.33	2.43	476	43.30	16.57
	R2	140.96	96.33	8.06	2.40	557	41.87	29.26
	R3	166.02	96.33	9.43	2.42	473	42.70	42.01
	R4	160.14	96.33	9.13	2.41	494	41.61	55.29
	R5	145.83	96.33	8.20	2.44	543	43.28	67.95
IV- immergées dans l' eau pendant 1 an (*)	R0	133.93	96.33	7.90	2.33	572	40.06	3.95
	R1	165.43	96.33	9.33	2.43	465	45.46	16.57
	R2	141.19	96.33	8.06	2.40	543	44.13	29.26
	R3	166.29	96.33	9.43	2.42	461	45.03	42.01
	R4	160.42	96.33	9.13	2.41	481	43.96	55.29
	R5	146.02	96.33	8.20	2.44	530	45.49	67.95
IA3 I	R0	137.40	96.40	8.45	2.23	639	26.95	4.23
	R1	163.00	96.40	9.50	2.35	522	33.72	17.20
	R2	150.00	96.40	8.65	2.38	567	34.84	30.28
	R3	156.80	96.40	9.25	2.32	544	32.35	43.23
	R4	162.80	96.40	9.30	2.40	548	32.57	56.50
	R5	152.30	96.40	8.75	2.38	585	32.10	69.53
II	R0	135.03	96.40	8.45	2.19	693	22.52	4.23
	R1	160.35	96.40	9.50	2.31	556	29.23	17.20
	R2	147.92	96.40	8.65	2.34	613	29.39	30.28
	R3	153.29	96.40	9.25	2.27	584	27.44	43.23
	R4	160.65	96.40	9.30	2.37	613	25.68	56.50
	R5	150.27	96.40	8.75	2.35	651	25.58	69.53
III	R0	144.01	96.40	8.45	2.34	552	37.85	4.23
	R1	169.37	96.40	9.50	2.44	469	43.40	17.20
	R2	155.05	96.40	8.65	2.46	513	43.99	30.28
	R3	162.96	96.40	9.25	2.41	480	43.18	43.23
	R4	168.50	96.40	9.30	2.48	475	44.87	56.50
	R5	158.04	96.40	8.75	2.47	507	44.35	69.53
IIA1 I	R0	131.80	96.45	8.14	2.22	667	26.57	4.07
	R1	151.10	96.45	8.77	2.36	558	34.80	16.53
	R2	152.00	96.45	8.85	2.35	558	34.07	29.34
	R3	151.10	96.45	8.87	2.33	560	33.40	42.20
	R4	147.50	96.45	8.76	2.30	568	32.90	55.01
	R5	149.30	96.45	8.66	2.36	549	36.90	67.72
II	R0	129.04	96.45	8.14	2.17	743	20.96	4.07
	R1	148.57	96.45	8.77	2.32	605	29.11	16.53
	R2	149.26	96.45	8.85	2.31	610	27.99	29.34
	R3	147.86	96.45	8.87	2.28	603	28.19	42.20
	R4	144.20	96.45	8.76	2.25	613	27.61	55.01
	R5	146.87	96.45	8.66	2.32	593	31.11	67.72

III	R0	136.08	96.45	8.14	2.29	567	37.96	4.07
	R1	156.04	96.45	8.77	2.44	502	44.40	16.53
	R2	157.16	96.45	8.85	2.43	505	43.01	29.34
	R3	156.45	96.45	8.87	2.41	513	41.21	42.20
	R4	153.19	96.45	8.76	2.39	523	40.30	55.01
	R5	154.08	96.45	8.66	2.44	500	45.91	67.72
IIA3 I	R0	131.60	96.50	8.23	2.19	670	25.47	4.12
	R1	158.50	96.50	9.13	2.37	543	34.20	16.80
	R2	157.80	96.50	9.30	2.32	541	32.46	30.01
	R3	153.80	96.50	9.19	2.29	555	31.15	43.26
	R4	152.10	96.50	8.93	2.33	555	33.58	56.32
	R5	159.70	96.50	9.25	2.36	518	36.41	69.41
II	R0	128.35	96.50	8.23	2.13	727	21.09	4.12
	R1	154.76	96.50	9.13	2.32	591	28.19	16.80
	R2	153.23	96.50	9.30	2.25	603	25.37	30.01
	R3	148.55	96.50	9.19	2.21	620	24.11	43.26
	R4	147.74	96.50	8.93	2.26	608	27.18	56.32
	R5	155.59	96.50	9.25	2.30	563	30.03	69.41
III	R0	135.69	96.50	8.23	2.25	587	34.21	4.12
	R1	162.67	96.50	9.13	2.44	494	42.41	16.80
	R2	162.50	96.50	9.30	2.39	504	38.51	30.01
	R3	159.21	96.50	9.19	2.37	516	37.31	43.26
	R4	156.81	96.50	8.93	2.40	513	40.52	56.32
	R5	164.06	96.50	9.25	2.42	483	43.03	69.41
IV	R0	136.50	96.50	8.23	2.27	563	37.41	4.12
	R1	163.25	96.50	9.13	2.44	479	45.27	16.80
	R2	162.90	96.50	9.30	2.39	482	42.21	30.01
	R3	159.80	96.50	9.19	2.38	498	40.20	43.26
	R4	157.20	96.50	8.93	2.41	500	42.76	56.32
	R5	164.45	96.50	9.25	2.43	472	45.16	69.41
IIIi1 I	R0	135.10	96.55	8.20	2.25	641	28.91	4.10
	R1	151.30	96.55	8.86	2.33	551	34.73	16.63
	R2	158.10	96.55	9.04	2.39	534	36.38	29.58
	R3	154.20	96.55	8.96	2.35	536	36.17	42.58
	R4	147.00	96.55	8.64	2.32	575	33.42	55.38
	R5	141.10	96.55	8.53	2.26	596	31.02	67.97
II	R0	132.50	96.55	8.20	2.21	691	24.40	4.10
	R1	148.33	96.55	8.86	2.29	587	30.00	16.63
	R2	155.74	96.55	9.04	2.35	567	31.79	29.58
	R3	151.21	96.55	8.96	2.31	574	30.93	42.58
	R4	144.11	96.55	8.64	2.28	619	28.27	55.38
	R5	137.71	96.55	8.53	2.20	644	25.93	67.97
III	R0	141.09	96.55	8.20	2.35	568	38.45	4.10
	R1	156.84	96.55	8.86	2.42	501	43.55	16.63
	R2	162.86	96.55	9.04	2.46	486	45.24	29.58
	R3	159.51	96.55	8.96	2.43	493	44.23	42.58
	R4	152.45	96.55	8.64	2.41	522	42.05	55.38
	R5	147.57	96.55	8.53	2.36	544	38.95	67.97
IV	R0	141.45	96.55	8.20	2.36	540	42.65	4.10
	R1	156.96	96.55	8.86	2.42	489	45.75	16.63
	R2	163.10	96.55	9.04	2.46	471	48.24	29.58
	R3	159.89	96.55	8.96	2.44	483	46.19	42.58
	R4	152.80	96.55	8.64	2.42	512	43.81	55.38
	R5	147.86	96.55	8.53	2.37	527	41.58	67.97
IIIi2 I	R0	147.10	96.65	8.90	2.25	594	28.73	4.45
	R1	158.10	96.65	9.14	2.36	524	36.63	17.47
	R2	156.70	96.65	9.10	2.35	537	35.03	30.59
	R3	157.80	96.65	9.12	2.36	525	36.66	43.70
	R4	157.40	96.65	9.18	2.34	536	34.40	56.85
	R5	151.60	96.65	9.08	2.28	560	31.37	69.98

II	R0	142.69	96.65	8.90	2.19	660	22.57	4.45
	R1	153.95	96.65	9.14	2.30	572	29.93	17.47
	R2	151.90	96.65	9.10	2.28	587	28.42	30.59
	R3	153.35	96.65	9.12	2.29	575	29.70	43.70
	R4	152.31	96.65	9.18	2.26	594	27.10	56.85
	R5	145.91	96.65	9.08	2.19	619	24.71	69.98
III	R0	152.71	96.65	8.90	2.34	530	37.46	4.45
	R1	162.08	96.65	9.14	2.42	493	42.42	17.47
	R2	160.92	96.65	9.10	2.41	502	41.16	30.59
	R3	161.87	96.65	9.12	2.42	490	43.17	43.70
	R4	161.75	96.65	9.18	2.40	505	39.82	56.85
	R5	156.80	96.65	9.08	2.35	522	37.34	69.98
IIIp3 I	R0	120.10	96.62	7.33	2.23	740	27.03	3.67
	R1	154.40	96.62	9.08	2.32	549	33.22	15.87
	R2	155.00	96.62	9.30	2.27	556	30.26	29.06
	R3	160.40	96.62	9.40	2.33	537	32.51	42.41
	R4	155.80	96.62	9.31	2.28	556	30.32	55.77
	R5	159.50	96.62	9.38	2.32	541	32.05	69.11
II	R0	116.95	96.62	7.33	2.18	843	20.29	3.67
	R1	149.98	96.62	9.08	2.25	601	26.92	15.87
	R2	150.26	96.62	9.30	2.20	613	24.13	29.06
	R3	156.10	96.62	9.40	2.26	605	24.93	42.41
	R4	149.69	96.62	9.31	2.19	622	23.28	55.77
	R5	154.78	96.62	9.38	2.25	593	25.89	69.11
III	R0	124.68	96.64	7.33	2.32	633	38.37	3.67
	R1	159.43	96.64	9.08	2.39	506	40.40	15.87
	R2	160.07	96.64	9.30	2.35	511	37.01	29.06
	R3	165.21	96.64	9.40	2.40	488	40.56	42.41
	R4	159.53	96.64	9.31	2.34	510	36.91	55.77
	R5	164.35	96.64	9.38	2.39	495	39.47	69.11
IIIp4 I	R0	138.80	96.50	8.59	2.21	651	25.02	4.30
	R1	146.60	96.50	8.75	2.29	581	31.39	16.97
	R2	147.50	96.50	8.83	2.28	584	30.42	29.76
	R3	153.90	96.50	9.08	2.32	546	33.39	42.71
	R4	155.30	96.50	9.10	2.33	540	34.22	55.80
	R5	147.10	96.50	8.78	2.29	572	32.17	68.74
II	R0	135.42	96.50	8.59	2.16	726	19.63	4.30
	R1	143.55	96.50	8.75	2.24	631	26.06	16.97
	R2	144.33	96.50	8.83	2.23	636	25.10	29.76
	R3	150.77	96.50	9.08	2.27	594	27.64	42.71
	R4	152.31	96.50	9.10	2.29	590	28.12	55.80
	R5	144.21	96.50	8.78	2.25	620	26.84	68.74
III	R0	144.76	96.50	8.59	2.30	555	35.90	4.30
	R1	152.59	96.50	8.75	2.38	524	40.17	16.97
	R2	153.46	96.50	8.83	2.38	526	39.01	29.76
	R3	159.90	96.50	9.08	2.41	497	41.87	42.71
	R4	160.75	96.50	9.10	2.42	491	42.85	55.80
	R5	152.39	96.50	8.78	2.37	518	40.63	68.74
IV	R0	145.39	96.50	8.59	2.31	532	39.25	4.30
	R1	152.98	96.50	8.75	2.39	509	42.68	16.97
	R2	153.94	96.50	8.83	2.38	508	41.96	29.76
	R3	160.36	96.50	9.08	2.41	484	44.28	42.71
	R4	161.20	96.50	9.10	2.42	480	44.96	55.80
	R5	152.74	96.50	8.78	2.38	505	42.85	68.74
IVA1 I	R0	125.20	96.40	8.07	2.13	663	26.19	4.04
	R1	146.50	96.40	8.91	2.25	570	30.80	16.53
	R2	150.20	96.40	9.05	2.27	562	31.00	29.51
	R3	151.80	96.40	9.14	2.28	551	31.64	42.60
	R4	152.70	96.40	9.07	2.31	548	32.93	55.71
	R5	148.80	96.40	8.80	2.32	565	33.05	68.64

II	R0	121.95	96.40	8.07	2.07	705	22.56	4.04
	R1	142.48	96.40	8.91	2.19	615	25.73	16.53
	R2	146.43	96.40	9.05	2.22	605	26.08	29.51
	R3	148.12	96.40	9.14	2.22	594	26.57	42.60
	R4	149.49	96.40	9.07	2.26	587	28.10	55.71
	R5	145.82	96.40	8.80	2.27	605	28.25	68.64
III	R0	132.40	96.40	8.07	2.25	600	33.82	4.04
	R1	153.11	96.40	8.91	2.35	528	37.52	16.53
	R2	156.94	96.40	9.05	2.38	514	38.73	29.51
	R3	158.31	96.40	9.14	2.37	507	38.98	42.60
	R4	158.97	96.40	9.07	2.40	500	41.18	55.71
	R5	154.82	96.40	8.80	2.41	514	41.55	68.64
IVA2 I	R0	136.50	96.45	8.49	2.20	634	26.84	4.25
	R1	163.30	96.45	9.65	2.32	513	33.40	17.32
	R2	158.30	96.45	9.30	2.33	525	34.54	30.79
	R3	154.20	96.45	9.01	2.34	542	34.72	43.95
	R4	147.20	96.45	8.60	2.34	560	35.70	56.75
	R5	150.50	96.45	8.90	2.31	553	33.77	69.50
II	R0	132.97	96.45	8.49	2.14	693	21.89	4.25
	R1	158.13	96.45	9.65	2.24	563	26.85	17.32
	R2	153.36	96.45	9.30	2.26	575	27.90	30.79
	R3	149.26	96.45	9.01	2.27	600	27.42	43.95
	R4	143.44	96.45	8.60	2.28	619	28.47	56.75
	R5	145.83	96.45	8.90	2.24	610	26.89	69.50
III	R0	142.01	96.45	8.49	2.29	563	35.42	4.25
	R1	167.78	96.45	9.65	2.38	482	38.88	17.32
	R2	162.71	96.45	9.30	2.39	491	40.59	30.79
	R3	158.59	96.45	9.01	2.41	507	40.80	43.95
	R4	151.97	96.45	8.60	2.42	523	42.26	56.75
	R5	154.71	96.45	8.90	2.38	516	39.87	69.50
IV	R0	142.68	96.45	8.49	2.30	543	38.25	4.25
	R1	168.38	96.45	9.65	2.39	468	41.38	17.32
	R2	163.14	96.45	9.30	2.40	480	42.58	30.79
	R3	159.01	96.45	9.01	2.42	495	42.92	43.95
	R4	152.37	96.45	8.60	2.42	508	44.90	56.75
	R5	155.12	96.45	8.90	2.39	503	42.07	69.50
VA1 I	R0	103.10	96.45	6.54	2.16	798	28.00	3.27
	R1	145.00	96.45	8.65	2.29	562	34.31	14.87
	R2	152.40	96.45	8.91	2.34	544	35.22	27.65
	R3	148.60	96.45	8.76	2.32	556	34.59	40.48
	R4	129.20	96.45	7.60	2.33	632	35.64	52.66
	R5	144.60	96.45	8.45	2.34	565	36.32	64.69
II	R0	101.78	96.45	6.54	2.13	847	24.53	3.27
	R1	142.53	96.45	8.65	2.26	589	30.71	14.87
	R2	149.72	96.45	8.91	2.30	579	30.54	27.65
	R3	145.76	96.45	8.76	2.28	593	29.83	40.48
	R4	126.81	96.45	7.60	2.28	674	30.76	52.66
	R5	141.99	96.45	8.45	2.30	596	32.05	64.69
III	R0	108.28	96.45	6.54	2.27	730	35.14	3.27
	R1	150.39	96.45	8.65	2.38	516	42.22	14.87
	R2	158.00	96.45	8.91	2.43	498	43.57	27.65
	R3	154.62	96.45	8.76	2.42	508	43.11	40.48
	R4	134.37	96.45	7.60	2.42	579	44.17	52.66
	R5	150.08	96.45	8.45	2.43	520	44.50	64.69
VA2 I	R0	129.60	96.55	8.01	2.21	648	29.11	4.01
	R1	159.20	96.55	9.30	2.34	517	35.89	16.66
	R2	132.40	96.55	7.70	2.35	621	36.45	29.16
	R3	157.20	96.55	9.24	2.32	527	34.78	41.63
	R4	156.40	96.55	9.05	2.36	534	35.87	54.78
	R5	150.50	96.55	8.72	2.36	561	34.96	67.66

II	R0	126.62	96.55	8.01	2.16	691	25.01	4.01
	R1	154.74	96.55	9.30	2.27	549	30.94	16.66
	R2	128.84	96.55	7.70	2.29	661	31.31	29.16
	R3	152.83	96.55	9.24	2.26	565	29.42	41.63
	R4	152.65	96.55	9.05	2.30	568	30.94	54.78
	R5	146.43	96.55	8.72	2.29	598	29.94	67.66
III	R0	134.54	96.55	8.01	2.29	587	36.83	4.01
	R1	163.93	96.55	9.30	2.41	485	42.00	16.66
	R2	136.39	96.55	7.70	2.42	570	44.57	29.16
	R3	161.71	96.55	9.24	2.39	496	40.39	41.63
	R4	160.98	96.55	9.05	2.43	492	43.49	54.78
	R5	154.96	96.55	8.72	2.43	517	42.38	67.66
IV	R0	135.22	96.55	8.01	2.31	563	40.24	4.01
	R1	164.38	96.55	9.30	2.41	475	43.91	16.66
	R2	136.88	96.55	7.70	2.43	566	45.37	29.16
	R3	162.20	96.55	9.24	2.40	480	43.26	41.63
	R4	161.30	96.55	9.05	2.43	478	46.17	54.78
	R5	155.16	96.55	8.72	2.43	500	45.37	67.66
IA5 I	R0	153.59	96.06	9.04	2.34	506	38.96	4.52
	R1	185.01	96.06	10.46	2.44	415	45.04	18.27
	R2	181.75	96.06	10.26	2.44	422	45.34	32.63
	R3	180.50	96.06	10.25	2.43	424	44.74	46.89
	R4	176.29	96.06	9.98	2.44	430	46.02	61.00
	R5	176.71	96.06	10.01	2.44	429	45.93	75.00
II	R0	149.13	96.06	9.04	2.28	515	36.52	4.52
	R1	179.76	96.06	10.46	2.37	427	41.34	18.27
	R2	176.81	96.06	10.26	2.38	434	41.70	32.63
	R3	175.20	96.06	10.25	2.36	437	40.88	46.89
	R4	172.09	96.06	9.98	2.38	440	42.91	61.00
	R5	172.05	96.06	10.01	2.37	439	42.71	75.00
III	R0	157.20	96.06	9.04	2.40	495	41.67	4.52
	R1	188.30	96.06	10.46	2.48	414	46.06	18.27
	R2	184.70	96.06	10.26	2.48	421	46.30	32.63
	R3	183.40	96.06	10.25	2.47	423	45.67	46.89
	R4	179.00	96.06	9.98	2.47	427	47.39	61.00
	R5	179.30	96.06	10.01	2.47	428	46.83	75.00
IA6 I	R0	263.04	96.15	15.11	2.40	312	37.65	7.56
	R1	218.30	96.15	12.32	2.44	355	44.53	25.27
	R2	212.03	96.15	11.98	2.44	368	43.78	41.42
	R3	206.76	96.15	11.71	2.43	378	43.32	57.27
	R4	216.49	96.15	12.10	2.46	362	44.83	73.17
	R5	213.63	96.15	12.05	2.44	363	44.54	89.25
II	R0	255.67	96.15	15.11	2.33	322	34.36	7.56
	R1	212.17	96.15	12.32	2.37	363	41.39	25.27
	R2	205.88	96.15	11.98	2.37	377	40.50	41.42
	R3	200.63	96.15	11.71	2.36	386	40.31	57.27
	R4	210.80	96.15	12.10	2.40	370	41.78	73.17
	R5	207.70	96.15	12.05	2.37	371	41.46	89.25
III	R0	267.70	96.15	15.11	2.44	308	39.32	7.56
	R1	221.60	96.15	12.32	2.48	354	45.46	25.27
	R2	215.30	96.15	11.98	2.48	365	45.18	41.42
	R3	210.00	96.15	11.71	2.47	375	44.71	57.27
	R4	219.50	96.15	12.10	2.50	360	45.96	73.17
	R5	216.90	96.15	12.05	2.48	362	45.48	89.25

IA2	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B*(MPa)	G (%)
R0	3.95	2.357	2.301	2.428	4.73	12.75	2.44	4.98	52.37
R1	16.57	2.416	2.352	2.466	4.18	11.41	2.72	4.81	53.43
R2	29.26	2.393	2.331	2.445	5.02	11.39	2.64	4.75	40.34
R3	42.01	2.411	2.343	2.458	4.41	11.55	2.90	4.89	46.08
R4	55.29	2.410	2.338	2.458	4.45	12.02	3.08	5.53	42.26
R5	67.95	2.347	2.261	2.413	5.53	14.42	3.78	5.05	42.86

IA3	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.23	2.282	2.243	2.392	5.68	14.92	1.76	3.13	49.88
R1	17.20	2.350	2.312	2.442	4.77	13.00	1.66	3.39	47.25
R2	30.28	2.394	2.361	2.475	4.18	11.38	1.40	3.80	48.58
R3	43.23	2.356	2.303	2.448	5.55	14.52	2.29	2.93	46.85
R4	56.50	2.398	2.366	2.482	4.14	11.56	1.34	2.92	47.50
R5	69.53	2.378	2.346	2.468	4.48	12.14	1.35	2.92	44.94

IIA1	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.07	2.354	2.305	2.431	4.93	12.57	2.14	4.96	50.28
R1	16.53	2.378	2.338	2.456	4.40	11.75	1.70	3.78	52.03
R2	29.34	2.362	2.319	2.442	4.79	12.28	1.84	3.52	48.71
R3	42.20	2.344	2.294	2.427	5.37	13.33	2.19	5.03	44.58
R4	55.01	2.323	2.271	2.413	5.76	14.16	2.29	4.60	40.46
R5	67.72	2.401	2.362	2.478	4.24	11.60	1.66	3.95	53.80

IIA3	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B* (MPa)	G (%)
R0	4.12	2.346	2.288	2.419	5.26	13.09	2.53	4.61	40.68
R1	16.80	2.388	2.332	2.451	4.68	11.92	2.42	4.01	50.24
R2	30.01	2.345	2.277	2.415	5.59	13.77	2.98	4.43	44.82
R3	43.26	2.295	2.217	2.376	6.56	15.90	3.53	4.56	39.92
R4	56.32	2.340	2.273	2.412	5.59	13.95	2.95	4.06	44.35
R5	69.41	2.378	2.317	2.443	4.82	12.60	2.64	4.94	48.48

IIIi1	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B* (MPa)	G (%)
R0	4.10	2.302	2.258	2.404	5.58	14.63	1.96	5.39	43.24
R1	16.63	2.351	2.305	2.438	4.97	13.23	2.00	5.02	44.81
R2	29.58	2.408	2.372	2.480	3.89	10.84	1.51	5.27	47.41
R3	42.58	2.368	2.322	2.449	4.75	12.74	1.98	4.42	40.58
R4	55.38	2.350	2.304	2.437	5.13	13.33	2.00	4.45	38.26
R5	67.97	2.284	2.229	2.389	6.24	15.97	2.47	4.04	36.35

IIIi2	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.45	2.298	2.229	2.386	6.46	15.66	3.09	4.62	46.02
R1	17.47	2.392	2.329	2.453	4.84	12.31	2.70	3.97	46.34
R2	30.59	2.363	2.291	2.426	5.34	13.60	3.16	4.24	44.92
R3	43.70	2.385	2.318	2.446	5.06	12.88	2.91	4.54	47.31
R4	56.85	2.361	2.285	2.427	5.44	14.17	3.34	3.87	40.88
R5	69.98	2.305	2.218	2.383	6.71	16.55	3.90	3.93	35.72

IIIp3	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.67	2.311	2.250	2.398	5.60	14.86	2.69	3.27	49.96
R1	15.87	2.345	2.278	2.422	5.42	14.37	2.95	3.84	45.64
R2	29.06	2.335	2.264	2.412	5.62	14.78	3.15	3.49	42.78
R3	42.41	2.373	2.309	2.444	5.06	13.47	2.76	3.15	43.99
R4	55.77	2.356	2.264	2.412	5.75	14.87	4.08	2.71	37.40
R5	69.11	2.351	2.281	2.431	5.38	13.57	3.05	3.11	39.89

IIIp4	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B* (MPa)	G (%)
R0	4.30	2.273	2.218	2.371	6.04	15.29	2.49	5.18	47.40
R1	16.97	2.316	2.268	2.411	5.68	14.27	2.12	3.62	48.19
R2	29.76	2.314	2.264	2.407	5.73	14.32	2.19	3.74	48.10
R3	42.71	2.324	2.277	2.415	5.40	13.80	2.08	4.87	48.56
R4	55.80	2.351	2.306	2.403	5.05	12.78	1.96	4.71	52.14
R5	68.74	2.358	2.312	2.443	4.99	13.57	2.00	4.42	50.63

IvA1	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.04	2.216	2.158	2.343	7.59	18.50	2.67	5.47	30.46
R1	16.53	2.267	2.205	2.369	6.83	16.46	2.82	4.28	34.97
R2	29.51	2.281	2.224	2.384	6.33	15.96	2.57	3.62	34.25
R3	42.60	2.297	2.241	2.395	6.19	15.40	2.48	4.50	39.26
R4	55.71	2.318	2.269	2.413	5.70	14.40	2.15	4.01	41.37
R5	68.64	2.332	2.285	2.426	5.61	14.10	2.04	4.49	43.30

IvA2	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B* (MPa)	G (%)
R0	4.25	2.302	2.242	2.394	5.74	15.25	2.66	3.89	45.32
R1	17.32	2.363	2.288	2.428	5.48	13.97	3.27	4.99	44.10
R2	30.79	2.359	2.285	2.424	5.44	13.94	3.22	4.99	42.74
R3	43.95	2.343	2.268	2.411	5.52	14.19	3.31	3.73	44.49
R4	56.75	2.348	2.288	2.425	5.41	13.61	2.62	3.84	44.97
R5	69.50	2.358	2.285	2.425	5.53	13.91	3.20	5.19	42.38

VA1	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.27	2.303	2.273	2.418	5.13	14.53	1.30	3.97	44.46
R1	14.87	2.354	2.314	2.442	4.73	12.83	1.79	4.67	44.30
R2	27.65	2.362	2.321	2.449	4.61	12.77	1.74	4.12	44.98
R3	40.48	2.336	2.291	2.430	5.11	13.93	1.95	2.48	44.74
R4	52.66	2.341	2.298	2.436	5.04	13.69	1.88	2.87	42.35
R5	64.69	2.352	2.309	2.441	4.87	13.16	1.84	3.67	44.30

VA2	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B* (MPa)	G (%)
R0	4.01	2.326	2.272	2.214	5.51	14.21	2.36	5.87	46.78
R1	16.66	2.347	2.281	2.414	5.27	13.56	2.88	5.28	43.82
R2	29.16	2.348	2.285	2.421	5.01	13.36	2.76	4.71	41.86
R3	41.63	2.371	2.305	2.438	5.15	13.39	2.86	4.82	41.38
R4	54.78	2.371	2.314	2.439	4.68	12.62	2.45	5.28	43.18
R5	67.66	2.360	2.296	2.430	5.03	13.38	2.78	4.45	40.06

IA5	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.52	2.341	2.273	2.396	4.81	12.30	2.99	6.01	43,06
R1	18.27	2.400	2.332	2.442	4.25	11.08	2.92	7.16	44,14
R2	32.63	2.423	2.357	2.463	4.07	10.52	2.79	7.91	45,41
R3	46.89	2.410	2.339	2.448	4.28	10.92	3.03	5.74	41,41
R4	61.00	2.445	2.387	2.483	3.55	9.58	2.44	4.60	42,91
R5	75.00	2.437	2.373	2.473	3.98	10.00	2.71	5.81	43,16

IA6	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	7.56	2.408	2.341	2.451	4.24	11.01	2.88	6.33	45,12
R1	25.27	2.423	2.355	2.458	4.02	10.47	2.89	6.23	44,07
R2	41.42	2.421	2.351	2.457	4.04	10.75	2.99	7.13	44,04
R3	57.27	2.409	2.338	2.447	4.22	10.92	3.06	6.28	41,35
R4	73.17	2.446	2.382	2.480	3.75	9.83	2.70	5.75	42,05
R5	89.25	2.416	2.349	2.454	3.95	10.41	2.86	6.13	40,50

(*) Essais réalisés sur des rondelles prélevées à 4 mois et testées après immersion dans l'eau pendant 1 an.

MESURES PRISES SUR LES DALLETES AGEES DE 4 MOIS
(MOYENNES SUR 12 CAROTTES)

dmoy./s	E1	E2	E3	E4*	r1	r2	r3
(mm)	(GPa)				(g/cm³)		
4.04	27.42	22.64	36.83	39.64	2.31	2.25	2.38
16.62	34.16	28.77	41.41	44.07	2.36	2.30	2.43
29.58	33.83	28.22	41.17	44.08	2.36	2.30	2.43
42.56	33.97	28.06	41.64	43.64	2.35	2.29	2.43
55.57	33.92	27.94	41.62	44.43	2.36	2.30	2.43
68.41	33.89	28.14	41.98	43.75	2.35	2.29	2.43

dmoy./p	Ab	P	W	B	B*	G
(mm)	(%)			(MPa)		(%)
4.04	5.69	14.69	2.34	4.24	4.99	45.57
16.62	5.10	13.26	2.42	3.99	4.62	46.01
29.58	5.13	13.20	2.43	3.80	4.65	44.12
42.56	5.35	13.76	2.60	3.77	4.55	43.98
55.57	5.18	13.43	2.51	3.56	4.64	42.93
68.41	5.29	13.75	2.56	3.68	4.68	43.56

Remarques: 1- Les carottes l'A5 et l'A6 prélevées de la dalle enduite d'une couche de résine ne sont pas prises en compte.

2- E4*, B* sont des caractéristiques moyennes sur 6 carottes dont les rondelles ont été immergées dans l'eau pendant 1 an.

Ecarts types et coefficients de variation
des caractéristiques obtenues à 4 mois

E ₁		E ₂		E ₃		E ₄ *		r ₁		r ₂		r ₃	
σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V
GPa	%	GPa	%	GPa	%	GPa	%	g/cm ³	%	g/cm ³	%	g/cm ³	%
1.6	5.7	2.0	8.9	1.6	4.4	2,0	5,1	0,04	1,7	0,04	1,7	0,06	2,5
1.8	5.4	1.9	6.7	2.1	4.9	1,7	3,9	0,04	1,7	0,04	1,7	0,03	1,2
2.2	6.6	2.6	9.2	2.7	6.5	2,4	5,5	0,04	1,7	0,04	1,7	0,03	1,2
1.8	5.5	2.2	7.6	2.0	4.8	2,1	4,7	0,03	1,3	0,04	1,7	0,05	2,1
1.6	4.7	2.1	7.5	2.1	5.2	1,2	2,6	0,03	1,3	0,03	1,3	0,02	0,8
2.2	6.5	2.5	8.8	2.6	6.1	1,8	4,1	0,03	1,3	0,04	1,3	0,02	0,8

A _b		P		W		B		B*		G	
σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V
%	%	%	%	%	%	MPa	%	MPa	%	%	%
0,76	13,3	1,50	10,2	0,48	20,5	0,94	22,1	0,86	17,2	2,9	6,4
0,70	13,7	1,41	10,6	0,55	22,7	0,44	11,0	0,65	14,1	3,3	7,2
0,69	13,4	1,50	11,3	0,67	27,5	0,32	8,4	0,53	11,4	2,6	5,8
0,58	10,8	1,17	8,5	0,52	20,0	1,05	27,8	0,44	9,6	3,1	6,9
0,53	10,2	1,00	7,4	0,75	29,8	0,77	21,6	0,67	14,4	4,0	9,4
0,71	13,4	1,43	10,4	0,82	32,0	0,65	17,6	0,45	9,6	5,4	12,4

ANNEXE VI

TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS OBTENUS A 16 MOIS

Carotte	Rondelle	Masse (g)	Diam. (mm)	e (mm)	μ (g/cm ³)	Grindo	Ei (GPa)	d moy./s (mm)
IA1 I- Rondelles à l'état naturel	R0	165.89	96.30	9.65	2.36	485	37.85	4.83
	R1	174.09	96.30	9.90	2.41	439	44.89	18.60
	R2	172.93	96.30	9.90	2.40	445	43.40	32.50
	R3	169.32	96.30	9.60	2.42	462	43.24	46.25
	R4	169.97	96.30	9.60	2.43	454	44.95	59.85
	R5	168.42	96.30	9.50	2.43	470	42.88	73.40
II- séchées à l'étuve à 60°C jusqu'à masse constante	R0	160.37	96.30	9.65	2.28	514	32.57	4.83
	R1	168.45	96.30	9.90	2.34	459	39.74	18.60
	R2	166.19	96.30	9.90	2.30	464	38.36	32.50
	R3	162.71	96.30	9.60	2.33	481	38.33	46.25
	R4	163.98	96.30	9.60	2.35	470	40.46	59.85
	R5	162.04	96.30	9.50	2.34	486	38.59	73.40
III- saturées en eau (3 à 4 semaines)	R0	169.22	96.30	9.65	2.41	477	39.91	4.83
	R1	176.20	96.30	9.90	2.44	437	45.86	18.60
	R2	174.60	96.30	9.90	2.42	445	43.82	32.50
	R3	171.01	96.30	9.60	2.45	462	43.67	46.25
	R4	171.61	96.30	9.60	2.45	453	45.58	59.85
	R5	170.00	96.30	9.50	2.46	469	43.47	73.40
IA4 I	R0	153.33	96.27	8.94	2.36	513	39.30	4.47
	R1	163.07	96.27	9.23	2.43	471	45.05	17.56
	R2	160.53	96.27	9.16	2.41	503	39.79	30.75
	R3	161.20	96.27	9.21	2.40	480	43.16	43.94
	R4	158.43	96.27	9.02	2.41	502	41.28	57.05
	R5	158.88	96.27	8.89	2.46	484	46.52	70.01
II	R0	148.71	96.27	8.94	2.29	549	33.28	4.47
	R1	157.95	96.27	9.23	2.35	494	39.67	17.56
	R2	154.92	96.27	9.16	2.32	507	37.79	30.75
	R3	155.60	96.27	9.21	2.32	503	37.94	43.94
	R4	152.61	96.27	9.02	2.32	527	36.09	57.05
	R5	154.08	96.27	8.89	2.38	509	40.79	70.01
III	R0	157.13	96.27	8.94	2.41	513	40.27	4.47
	R1	165.93	96.27	9.23	2.47	473	45.46	17.56
	R2	163.57	96.27	9.16	2.45	484	43.78	30.75
	R3	164.13	96.27	9.21	2.45	480	43.95	43.94
	R4	161.27	96.27	9.02	2.46	503	41.86	57.05
	R5	161.48	96.27	8.89	2.50	492	45.76	70.01
IIA2 I	R0	169.47	96.20	9.88	2.36	470	38.34	4.94
	R1	171.38	96.20	9.73	2.42	449	44.41	18.74
	R2	174.92	96.20	9.95	2.42	442	43.74	32.58
	R3	180.93	96.20	10.60	2.35	421	41.25	46.86
	R4	155.51	96.20	8.75	2.45	484	47.69	60.53
	R5	166.24	96.20	9.40	2.43	457	46.12	73.61
II	R0	163.99	96.20	9.88	2.28	503	32.39	4.94
	R1	166.72	96.20	9.73	2.36	480	37.80	18.74
	R2	169.51	96.20	9.95	2.34	473	37.01	32.58
	R3	172.91	96.20	10.60	2.24	446	35.12	46.86
	R4	150.67	96.20	8.75	2.37	504	42.61	60.53
	R5	160.70	96.20	9.40	2.35	477	40.92	73.61
III	R0	172.52	96.20	9.88	2.40	463	40.22	4.94
	R1	174.47	96.20	9.73	2.47	448	45.41	18.74
	R2	178.11	96.20	9.95	2.46	443	44.34	32.58
	R3	184.61	96.20	10.60	2.40	426	41.10	46.86
	R4	157.99	96.20	8.75	2.48	489	47.46	60.53
	R5	169.17	96.20	9.40	2.48	463	45.72	73.61

IIA4 I	R0	152.85	96.33	8.90	2.36	540	35.88	4.45
	R1	160.67	96.33	9.05	2.44	477	45.97	17.43
	R2	160.98	96.33	9.13	2.42	480	44.30	30.52
	R3	162.99	96.33	9.39	2.38	473	42.46	43.78
	R4	162.61	96.33	9.29	2.40	484	41.78	57.12
	R5	155.98	96.33	8.92	2.40	490	44.17	70.22
II	R0	147.26	96.33	8.90	2.27	570	31.02	4.45
	R1	154.80	96.33	9.05	2.35	506	39.36	17.43
	R2	156.85	96.33	9.13	2.36	508	38.54	30.52
	R3	156.67	96.33	9.39	2.29	503	36.09	43.78
	R4	156.18	96.33	9.29	2.31	512	35.86	57.12
	R5	150.73	96.33	8.92	2.32	520	37.90	70.22
III	R0	156.25	96.33	8.90	2.41	518	39.86	4.45
	R1	164.01	96.33	9.05	2.49	480	46.34	17.43
	R2	164.92	96.33	9.13	2.48	482	45.01	30.52
	R3	166.02	96.33	9.39	2.43	480	41.99	43.78
	R4	165.71	96.33	9.29	2.45	488	41.88	57.12
	R5	158.99	96.33	8.92	2.45	494	44.29	70.22
III6 I	R0	146.39	96.40	8.68	2.31	555	35.18	4.34
	R1	165.50	96.40	9.50	2.39	461	43.89	17.43
	R2	158.41	96.40	9.10	2.39	482	43.72	30.73
	R3	170.39	96.40	9.75	2.39	448	44.26	44.15
	R4	158.48	96.40	9.05	2.40	479	45.03	57.55
	R5	154.62	96.40	8.85	2.39	501	42.95	70.50
II	R0	142.06	96.40	8.68	2.24	577	31.58	4.34
	R1	160.11	96.40	9.50	2.31	485	38.36	17.43
	R2	153.47	96.40	9.10	2.31	508	38.14	30.73
	R3	164.89	96.40	9.75	2.32	471	38.75	44.15
	R4	153.34	96.40	9.05	2.32	515	37.69	57.55
	R5	147.76	96.40	8.85	2.29	526	37.23	70.50
III	R0	150.84	96.40	8.68	2.38	538	38.57	4.34
	R1	169.25	96.40	9.50	2.44	464	44.31	17.43
	R2	161.73	96.40	9.10	2.44	484	44.27	30.73
	R3	173.59	96.40	9.75	2.44	451	44.50	44.15
	R4	161.62	96.40	9.05	2.45	484	44.98	57.55
	R5	158.51	96.40	8.85	2.45	508	42.82	70.50
IIIp5 I	R0	151.83	96.30	9.05	2.30	505	38.73	4.53
	R1	177.70	96.30	10.25	2.38	430	43.04	18.18
	R2	166.90	96.30	9.55	2.40	463	43.11	32.08
	R3	167.89	96.30	9.60	2.40	462	42.87	45.65
	R4	161.70	96.30	9.25	2.40	478	43.12	59.08
	R5	155.18	96.30	8.90	2.39	495	43.32	72.15
II	R0	147.19	96.30	9.05	2.23	534	33.58	4.53
	R1	171.55	96.30	10.25	2.30	451	37.77	18.18
	R2	160.87	96.30	9.55	2.31	483	38.18	32.08
	R3	161.58	96.30	9.60	2.31	480	38.22	45.65
	R4	155.23	96.30	9.25	2.30	492	39.07	59.08
	R5	149.24	96.30	8.90	2.30	511	39.09	72.15
III	R0	154.73	96.30	9.05	2.35	505	39.47	4.53
	R1	180.21	96.30	10.25	2.41	432	43.24	18.18
	R2	169.02	96.30	9.55	2.43	463	43.65	32.08
	R3	169.97	96.30	9.60	2.43	461	43.59	45.65
	R4	163.60	96.30	9.25	2.43	480	43.26	59.08
	R5	157.09	96.30	8.90	2.42	495	43.85	72.15

IVA3 I	R0	138.54	96.30	8.45	2.25	576	33.37	4.23
	R1	166.87	96.30	9.73	2.36	462	40.99	17.31
	R2	168.94	96.30	9.75	2.38	463	41.00	31.05
	R3	166.54	96.30	9.70	2.36	467	40.35	44.78
	R4	160.40	96.30	9.40	2.34	483	39.92	58.33
	R5	160.90	96.30	9.28	2.38	480	42.14	71.67
II	R0	133.11	96.30	8.45	2.16	584	31.19	4.23
	R1	159.94	96.30	9.73	2.26	474	37.32	17.31
	R2	161.60	96.30	9.75	2.28	469	38.22	31.05
	R3	158.78	96.30	9.70	2.25	478	36.72	44.78
	R4	153.08	96.30	9.40	2.24	496	36.13	58.33
	R5	153.88	96.30	9.28	2.28	493	38.20	71.67
III	R0	141.59	96.30	8.45	2.30	562	35.83	4.23
	R1	169.44	96.30	9.73	2.39	463	41.44	17.31
	R2	171.61	96.30	9.75	2.42	462	41.83	31.05
	R3	169.17	96.30	9.70	2.39	469	40.64	44.78
	R4	162.55	96.30	9.40	2.37	485	40.12	58.33
	R5	163.34	96.30	9.28	2.42	483	42.25	71.67
IVA4 I	R0	146.16	96.35	8.80	2.28	528	37.14	4.40
	R1	164.42	96.35	9.50	2.37	465	42.81	17.55
	R2	162.51	96.35	9.30	2.40	475	43.23	30.95
	R3	156.52	96.35	9.02	2.38	494	42.19	44.11
	R4	154.16	96.35	8.91	2.37	501	41.91	57.08
	R5	166.48	96.35	9.55	2.39	467	42.31	70.31
II	R0	141.35	96.35	8.80	2.20	543	33.96	4.40
	R1	158.88	96.35	9.50	2.29	492	36.95	17.55
	R2	156.66	96.35	9.30	2.31	499	37.76	30.95
	R3	150.55	96.35	9.02	2.29	518	36.91	44.11
	R4	148.07	96.35	8.91	2.28	525	36.66	57.08
	R5	160.22	96.35	9.55	2.30	488	37.29	70.31
III	R0	149.66	96.35	8.80	2.33	531	37.60	4.40
	R1	167.68	96.35	9.50	2.42	467	43.29	17.55
	R2	165.63	96.35	9.30	2.44	477	43.69	30.95
	R3	159.67	96.35	9.02	2.43	494	43.04	44.11
	R4	157.23	96.35	8.91	2.42	501	42.75	57.08
	R5	169.77	96.35	9.55	2.44	467	43.14	70.31
VA3 I	R0	116.30	96.30	7.08	2.26	667	35.60	3.54
	R1	167.35	96.30	9.85	2.33	453	41.15	16.00
	R2	165.01	96.30	9.50	2.38	469	42.19	29.68
	R3	157.65	96.30	9.33	2.32	500	37.44	43.09
	R4	162.80	96.30	9.50	2.35	477	40.24	56.51
	R5	154.30	96.30	8.98	2.36	500	41.17	69.74
II	R0	112.42	96.30	7.08	2.18	678	33.30	3.54
	R1	161.57	96.30	9.85	2.25	469	37.07	16.00
	R2	157.72	96.30	9.50	2.28	482	38.18	29.68
	R3	150.10	96.30	9.33	2.21	513	33.87	43.09
	R4	155.14	96.30	9.50	2.24	493	35.90	56.51
	R5	148.02	96.30	8.98	2.26	517	36.94	69.74
III	R0	119.48	96.30	7.08	2.32	663	37.01	3.54
	R1	170.13	96.30	9.85	2.37	460	40.57	16.00
	R2	167.84	96.30	9.50	2.43	472	42.37	29.68
	R3	160.25	96.30	9.33	2.36	503	37.61	43.09
	R4	165.52	96.30	9.50	2.39	482	40.07	56.51
	R5	156.86	96.30	8.98	2.40	504	41.19	69.74

VA4 I	R0	148.65	96.30	8.83	2.31	532	36.79	4.42
	R1	162.30	96.30	9.33	2.39	466	44.38	17.50
	R2	165.32	96.30	9.48	2.39	458	44.61	30.90
	R3	163.26	96.30	9.38	2.39	460	45.08	44.33
	R4	166.08	96.30	9.40	2.43	461	45.37	57.72
	R5	154.22	96.30	8.74	2.42	491	46.20	70.79
II	R0	144.43	96.30	8.83	2.25	547	33.81	4.42
	R1	156.75	96.30	9.33	2.31	480	40.40	17.50
	R2	159.70	96.30	9.48	2.31	472	40.57	30.90
	R3	157.62	96.30	9.38	2.31	484	39.32	44.33
	R4	160.54	96.30	9.40	2.34	483	39.95	57.72
	R5	149.19	96.30	8.74	2.34	516	40.47	70.79
III	R0	152.95	96.30	8.83	2.38	525	38.87	4.42
	R1	165.70	96.30	9.33	2.44	471	44.35	17.50
	R2	168.61	96.30	9.48	2.44	462	44.71	30.90
	R3	166.65	96.30	9.38	2.44	464	45.23	44.33
	R4	169.21	96.30	9.40	2.47	462	46.03	57.72
	R5	157.20	96.30	8.74	2.47	494	46.53	70.79

IA1	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.83	2.383	2.304	2.431	5.01	12.70	3.44	3.88	50.86
R1	18.60	2.442	2.363	2.471	4.30	10.87	3.35	4.46	48.97
R2	32.50	2.418	2.324	2.456	4.65	11.77	4.06	4.02	46.53
R3	46.25	2.432	2.337	2.442	4.71	11.93	4.07	3.22	45.61
R4	59.85	2.463	2.376	2.487	4.38	11.05	3.65	3.40	47.95
R5	73.40	2.434	2.342	2.456	4.55	11.51	3.94	3.30	44.36

IA4	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.47	2.354	2.283	2.413	5.31	12.93	3.11	3.55	51.61
R1	17.56	2.400	2.325	2.443	4.65	11.75	3.24	3.74	47.56
R2	30.75	2.379	2.296	2.424	5.08	12.83	3.63	3.57	42.95
R3	43.94	2.384	2.301	2.427	4.98	12.62	3.60	3.78	44.73
R4	57.05	2.376	2.289	2.419	5.10	12.98	3.81	3.52	46.79
R5	70.01	2.422	2.349	2.462	4.46	11.28	3.12	4.09	49.32

IIA2	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.94	2.410	2.332	2.452	4.78	12.13	3.34	3.46	45.48
R1	18.74	2.429	2.363	2.472	4.27	10.97	2.79	4.45	46.70
R2	32.58	2.416	2.341	2.459	4.70	11.88	3.19	3.04	44.10
R3	46.86	2.340	2.236	2.389	6.27	15.14	4.64	2.73	36.01
R4	60.53	2.438	2.362	2.477	4.50	11.47	3.21	2.89	46.20
R5	73.61	2.413	2.333	2.456	4.78	12.13	3.34	3.63	43.44

IIA4	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.45	2.339	2.253	2.391	5.66	13.77	3.80	4.69	41.60
R1	17.43	2.359	2.273	2.408	5.51	13.51	3.79	4.79	45.23
R2	30.52	2.402	2.340	2.447	4.76	12.04	2.63	5.44	39.64
R3	43.78	2.375	2.283	2.419	5.53	13.62	4.03	4.75	38.44
R4	57.12	2.367	2.273	2.412	5.66	13.87	4.12	4.62	35.60
R5	70.22	2.393	2.312	2.439	5.06	12.67	3.48	5.07	42.97

IIIi6	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.34	2.347	2.278	2.413	5.42	14.08	3.05	3.58	47.64
R1	17.43	2.359	2.282	2.419	5.18	13.03	3.37	3.98	42.76
R2	30.73	2.399	2.324	2.449	4.91	12.51	3.22	4.67	41.46
R3	44.15	2.393	2.316	2.438	4.83	12.23	3.34	3.69	44.48
R4	57.55	2.397	2.319	2.444	4.96	12.52	3.35	2.93	45.81
R5	70.50	2.429	2.321	2.447	5.10	12.87	3.44	2.65	47.55

IIIp5	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.53	2.382	2.309	2.428	4.60	11.89	3.15	4.42	51.82
R1	18.18	2.484	2.398	2.435	4.58	11.71	3.59	5.12	46.28
R2	32.08	2.401	2.314	2.431	4.63	11.74	3.75	4.78	47.55
R3	45.65	2.410	2.319	2.439	4.74	12.04	3.91	3.42	44.15
R4	59.08	2.421	2.324	2.449	4.93	12.53	4.17	3.73	42.69
R5	72.15	2.406	2.314	2.436	4.80	12.17	3.98	3.63	42.75

IVA3	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.23	2.332	2.241	2.384	5.81	14.29	4.08	2.58	39.44
R1	17.31	2.373	2.274	2.409	5.36	13.51	4.33	4.72	39.41
R2	31.05	2.364	2.261	2.401	5.66	14.00	4.54	4.46	39.72
R3	44.78	2.361	2.251	2.397	6.01	14.72	4.89	4.16	38.97
R4	58.33	2.380	2.271	2.417	5.68	14.09	4.78	4.65	37.43
R5	71.67	2.382	2.278	2.418	5.58	14.00	4.56	4.94	37.66

IVA4	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.40	2.333	2.256	2.388	5.73	13.26	3.40	3.15	40.02
R1	17.55	2.361	2.281	2.406	5.13	12.64	3.49	3.95	35.48
R2	30.95	2.371	2.286	2.417	5.29	13.09	3.74	3.88	35.64
R3	44.11	2.362	2.272	2.409	5.62	13.75	3.96	3.78	34.84
R4	57.08	2.359	2.266	2.406	5.74	14.02	4.12	3.65	34.37
R5	70.31	2.370	2.281	2.426	5.47	13.59	3.90	3.79	37.74

VA3	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.54	2.318	2.241	2.381	5.71	14.12	3.45	3.74	39.06
R1	16.00	2.398	2.315	2.436	5.87	14.37	4.62	3.94	33.34
R2	29.68	2.495	2.385	2.415	4.79	12.25	3.58	3.60	41.78
R3	43.09	2.347	2.235	2.386	6.20	15.11	5.03	3.50	32.93
R4	56.51	2.345	2.235	2.384	6.14	14.95	4.94	3.51	33.31
R5	69.74	2.472	2.371	2.412	5.42	13.61	4.24	3.55	38.84

VA4	dmoy./p (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.42	2.342	2.276	2.411	5.44	13.49	2.92	3.50	44.48
R1	17.50	2.377	2.296	2.427	5.19	13.08	3.54	4.11	41.16
R2	30.90	2.379	2.298	2.429	5.09	12.84	3.52	4.36	42.44
R3	44.33	2.383	2.301	2.429	5.24	13.15	3.58	3.48	44.58
R4	57.72	2.401	2.321	2.445	4.97	12.53	3.45	3.46	46.88
R5	70.79	2.402	2.324	2.448	4.89	12.48	3.37	3.62	47.45

MESURES PRISES SUR LES DALLETES AGEES DE 16 MOIS
(MOYENNES SUR 10 CAROTTES)

dmoy./s	E1	E2	E3	r1	r2	r3
(mm)	(GPa)			(g/cm³)		
4.41	36.82	32.67	38.76	2.31	2.23	2.36
17.63	43.66	38.44	44.03	2.39	2.31	2.43
31.17	42.91	38.28	43.75	2.39	2.31	2.44
44.69	42.23	37.13	42.53	2.38	2.28	2.42
58.08	43.13	38.04	43.40	2.39	2.30	2.43
71.24	43.78	38.74	43.90	2.40	2.31	2.44

dmoy./p	Ab	P	W	B	G
(mm)	(%)			(MPa)	(%)
4.41	5.35	13.26	3.37	3.65	45.20
17.63	5.00	12.54	3.61	4.33	42.69
31.17	4.96	12.49	3.59	4.18	42.18
44.69	5.41	13.43	4.10	3.65	40.47
58.08	5.21	13.00	3.96	3.64	41.70
71.24	5.01	12.63	3.74	3.83	43.21

Ecarts types et coefficients de variation
des caractéristiques obtenues à 16 mois

E ₁		E ₂		E ₃		r ₁		r ₂	
σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V
GPa	%	GPa	%	GPa	%	g/cm ³	%	g/cm ³	%
1,8	4,9	1,1	3,3	1,5	3,8	0,03	1,3	0,03	1,3
1,7	3,9	1,3	3,3	1,9	4,3	0,04	1,6	0,04	1,7
1,5	3,5	0,9	2,3	1,0	2,2	0,03	1,3	0,03	1,3
2,2	5,1	1,7	4,6	2,2	5,3	0,03	1,3	0,04	1,7
2,5	5,8	2,3	6,2	2,4	5,6	0,04	1,6	0,04	1,7
1,9	4,	1,5	3,9	1,7	3,8	0,03	1,3	0,03	1,3

r ₃		A _b		P		W		B		G	
σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V	σ	V
g/cm ³	%	%	%	%	%	%	%	MPa	%	%	%
0,02	0,8	0,42	7,8	0,84	6,3	0,35	10,3	0,60	16,4	5,1	11,3
0,02	0,8	0,53	10,6	1,17	9,3	0,53	14,6	0,45	10,4	5,5	12,8
0,02	0,8	0,33	6,6	0,71	5,6	0,52	14,4	0,70	16,7	3,4	8,2
0,02	0,8	0,66	12,9	1,24	9,2	0,57	13,9	0,54	14,8	4,8	11,9
0,03	1,2	0,57	10,9	1,23	9,5	0,58	14,6	0,59	16,2	5,8	13,9
0,02	0,8	0,39	7,7	0,91	7,2	0,46	12,3	0,72	18,8	4,1	9,6

ANNEXE VII

TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS OBTENUS SUR LES VIEUX BETONS

Carotte	Rondelle	Masse (g)	Diam. (mm)	e (mm)	μ (g/cm ³)	Grindo	Ei (GPa)	dmoy./s (mm)	
328 D (PICF 20 ans)	R0	135.92	99.18	7.91	2.22	717	27.32	3.96	
	R1	143.75	99.18	8.05	2.31	583	41.47	15.94	
	R2	145.86	99.18	8.18	2.31	578	40.80	28.05	
	I- Rondelles à l'état naturel	R3	149.74	99.18	8.48	2.29	570	38.66	40.38
		R4	153.42	99.18	8.62	2.30	559	39.21	52.93
		R5	140.588	99.18	7.92	2.30	603	39.81	65.2
II- séchées à l'étuve à 60°C jusqu'à masse constante	R0	133.32	99.18	7.91	2.18	763	23.67	3.96	
	R1	138.74	99.18	8.05	2.23	613	36.20	15.94	
	R2	140.06	99.18	8.18	2.22	610	35.18	28.05	
	R3	143.77	99.18	8.48	2.19	598	33.72	40.38	
	R4	147.15	99.18	8.62	2.21	587	34.10	52.93	
	R5	135.122	99.18	7.92	2.21	637	34.29	65.2	
III- saturées en eau (3 à 4 semaines)	R0	140.94	99.18	7.91	2.31	711	28.81	3.96	
	R1	149.71	99.18	8.05	2.41	580	43.64	15.94	
	R2	151.03	99.18	8.18	2.39	573	42.99	28.05	
	R3	155.20	99.18	8.48	2.37	565	40.78	40.38	
	R4	159.29	99.18	8.62	2.39	555	41.30	52.93	
	R5	146.123	99.18	7.92	2.39	599	41.93	65.2	
328 R (PICF 20 ans) I	R0	133.23	99.26	7.74	2.22	696	30.39	3.87	
	R1	156.76	99.26	8.61	2.35	544	42.52	16.05	
	R2	155.22	99.26	8.55	2.35	549	42.21	28.63	
	R3	148.27	99.26	8.30	2.31	565	41.62	41.05	
	R4	155.25	99.26	8.51	2.36	550	42.66	53.46	
	R5	154.2	99.26	8.60	2.32	540	42.59	66.01	
II	R0	129.07	99.26	7.74	2.15	762	24.56	3.87	
	R1	150.99	99.26	8.61	2.27	595	34.23	16.05	
	R2	148.99	99.26	8.55	2.25	600	33.92	28.63	
	R3	141.98	99.26	8.30	2.21	624	32.67	41.05	
	R4	148.79	99.26	8.51	2.26	608	33.46	53.46	
	R5	147.363	99.26	8.6	2.21	596	33.42	66.01	
III	R0	137.92	99.26	7.74	2.30	691	31.91	3.87	
	R1	161.22	99.26	8.61	2.42	538	44.71	16.05	
	R2	159.65	99.26	8.55	2.41	543	44.38	28.63	
	R3	152.92	99.26	8.30	2.38	559	43.85	41.05	
	R4	159.86	99.26	8.51	2.43	544	44.91	53.46	
	R5	159.245	99.26	8.6	2.39	535	44.81	66.01	
338 D (PIPO 20 ans) I	R0	114.47	99.36	6.72	2.20	872	25.47	3.37	
	R1	149.21	99.36	8.31	2.32	589	38.48	14.90	
	R2	148.27	99.36	8.29	2.31	593	37.99	27.21	
	R3	152.63	99.36	8.53	2.31	576	38.05	39.64	
	R4	149.65	99.36	8.44	2.29	582	37.73	52.13	
	R5	150.065	99.36	8.45	2.29	569	39.44	64.58	
II	R0	112.41	99.36	6.72	2.16	950	21.07	3.37	
	R1	143.35	99.36	8.31	2.22	628	32.52	14.90	
	R2	142.15	99.36	8.29	2.21	638	31.47	27.21	
	R3	146.30	99.36	8.53	2.21	617	31.79	39.64	
	R4	143.36	99.36	8.44	2.19	628	31.04	52.13	
	R5	143.726	99.36	8.45	2.19	612	32.65	64.58	
III	R0	120.67	99.36	6.72	2.32	838	29.07	3.37	
	R1	154.65	99.36	8.31	2.40	587	40.15	14.90	
	R2	154.03	99.36	8.29	2.40	590	39.87	27.21	
	R3	158.86	99.36	8.53	2.40	570	40.44	39.64	
	R4	155.72	99.36	8.44	2.38	575	40.22	52.13	
	R5	156.188	99.36	8.45	2.38	565	41.63	64.58	

338 R (PIPO 20 ans) I	R0	121.94	99.52	7.05	2.22	789	28.79	3.61
	R1	152.99	99.52	8.40	2.34	570	40.92	15.55
	R2	154.07	99.52	8.45	2.34	577	39.50	28.09
	R3	158.15	99.52	8.65	2.35	536	43.80	40.63
	R4	157.12	99.52	8.58	2.35	539	44.10	53.24
	R5	147.523	99.52	8.17	2.32	575	42.14	65.61
II	R0	117.48	99.52	7.05	2.14	850	23.90	3.61
	R1	146.56	99.52	8.40	2.24	612	34.00	15.55
	R2	147.65	99.52	8.45	2.25	623	32.47	28.09
	R3	151.64	99.52	8.65	2.25	575	36.50	40.63
	R4	151.06	99.52	8.58	2.26	578	36.87	53.24
	R5	141.78	99.52	8.17	2.23	615	35.40	65.61
III	R0	127.87	99.52	7.05	2.33	765	32.11	3.61
	R1	159.47	99.52	8.40	2.44	567	43.10	15.55
	R2	159.21	99.52	8.45	2.42	567	42.27	28.09
	R3	162.70	99.52	8.65	2.42	530	46.09	40.63
	R4	162.03	99.52	8.58	2.43	533	46.50	53.24
	R5	152.64	99.52	8.17	2.40	570	44.37	65.61
STM1 (VIPP 40 ans) I	R0	139.57	96.51	8.24	2.32	543	40.98	4.12
	R1	151.43	96.51	8.65	2.39	494	46.44	16.57
	R2	169.76	96.51	9.38	2.47	461	46.88	29.58
	R3	152.40	96.51	8.50	2.45	509	46.39	42.52
	R4	157.42	96.51	8.80	2.45	490	46.60	55.17
	R5	142.92	96.51	7.98	2.45	549	45.19	67.56
II	R0	136.842	96.51	8.24	2.27	586	34.50	4.12
	R1	148.382	96.51	8.65	2.34	530	39.53	16.57
	R2	166.099	96.51	9.38	2.42	492	40.27	29.58
	R3	149.132	96.51	8.50	2.40	545	39.60	42.52
	R4	154.828	96.51	8.80	2.41	521	40.54	55.17
	R5	139.618	96.51	7.98	2.39	575	40.25	67.56
III	R0	142.365	96.51	8.24	2.36	531	43.71	4.12
	R1	154.335	96.51	8.65	2.44	475	51.19	16.57
	R2	172.702	96.51	9.38	2.52	441	52.11	29.58
	R3	155.04	96.51	8.50	2.49	488	51.34	42.52
	R4	160.211	96.51	8.80	2.49	465	52.66	55.17
	R5	145.496	96.51	7.98	2.49	518	51.68	67.56
STM2 (VIPP 40 ans) I	R0	135.27	96.40	7.96	2.33	587	37.61	3.98
	R1	165.33	96.40	9.42	2.40	461	44.97	16.67
	R2	168.84	96.40	9.66	2.39	452	44.30	30.21
	R3	158.07	96.40	8.96	2.42	478	46.48	43.52
	R4	160.61	96.40	9.16	2.40	482	43.47	56.58
	R5	143.81	96.40	8.16	2.41	529	45.71	69.24
II	R0	133.388	96.40	7.96	2.30	625	32.72	3.98
	R1	161.723	96.40	9.42	2.35	507	36.37	16.67
	R2	164.979	96.40	9.66	2.34	497	35.80	30.21
	R3	154.512	96.40	8.96	2.36	526	37.52	43.52
	R4	155.92	96.40	9.16	2.33	529	35.03	56.58
	R5	140.244	96.40	8.16	2.35	582	36.82	69.24
III	R0	139.328	96.40	7.96	2.40	562	42.27	3.98
	R1	168.795	96.40	9.42	2.46	456	46.93	16.67
	R2	172.797	96.40	9.66	2.45	448	46.15	30.21
	R3	161.728	96.40	8.96	2.47	473	48.56	43.52
	R4	164.778	96.40	9.16	2.46	478	45.34	56.58
	R5	147.792	96.40	8.16	2.48	526	47.51	69.24

CD48 a (O.A.B.P. 20 ans) I	R0	135.22	96.45	7.98	2.32	567	40.04	3.99
	R1	158.00	96.45	9.01	2.40	474	46.51	16.49
	R2	124.94	96.45	7.15	2.39	602	45.62	28.57
	R3	154.5	96.45	8.94	2.37	480	45.40	40.61
	R4	154.06	96.45	8.88	2.37	472	47.77	53.52
	R5	152.79	96.45	8.85	2.36	481	46.09	66.38
II	R0	134.14	96.45	7.98	2.30	573	38.89	3.99
	R1	156.47	96.45	9.01	2.38	482	44.54	16.49
	R2	121.84	96.45	7.15	2.33	610	43.33	28.57
	R3	150.71	96.45	8.94	2.31	487	43.02	40.61
	R4	149.96	96.45	8.88	2.31	479	45.15	53.52
	R5	148.69	96.45	8.85	2.30	492	42.87	66.38
III	R0	137.50	96.45	7.98	2.36	563	41.29	3.99
	R1	160.4	96.45	9.01	2.44	469	48.23	16.49
	R2	126.45	96.45	7.15	2.42	591	47.91	28.57
	R3	156	96.45	8.94	2.39	471	47.61	40.61
	R4	155.5	96.45	8.88	2.40	466	49.47	53.52
	R5	154.6	96.45	8.85	2.39	477	47.42	66.38
CD48 (O.A.B.P. 20 ans) I	R0	152.88	96.28	9.10	2.31	478	42.80	4.55
	R1	193.24	96.28	10.98	2.42	385	47.47	18.59
	R2	158.41	96.28	9.03	2.41	481	44.82	32.60
	R3	155.95	96.28	8.98	2.39	478	45.43	45.61
	R4	154.02	96.28	8.80	2.40	480	47.28	58.49
	R5	154.20	96.28	8.88	2.39	470	48.05	71.33
II	R0	151.37	96.28	9.10	2.28	502	38.42	4.55
	R1	189.67	96.28	10.98	2.37	396	44.04	18.59
	R2	154.94	96.28	9.03	2.36	494	41.56	32.60
	R3	152.38	96.28	8.98	2.33	487	42.77	45.61
	R4	150.54	96.28	8.80	2.35	488	44.71	58.49
	R5	150.74	96.28	8.88	2.33	480	45.04	71.33
III	R0	155.60	96.28	9.10	2.35	471	44.87	4.55
	R1	195.70	96.28	10.98	2.45	378	49.87	18.59
	R2	160.40	96.28	9.03	2.44	471	47.33	32.60
	R3	158.20	96.28	8.98	2.42	468	48.08	45.61
	R4	156.00	96.28	8.80	2.43	470	49.95	58.49
	R5	156.10	96.28	8.88	2.41	467	49.27	71.33

328 D	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.96	2.246	2.203	2.329	5.09	17.32	1.95	2.7	37.92
R1	15.94	2.334	2.253	2.431	6.07	17.03	3.60	3.53	38.75
R2	28.05	2.331	2.238	2.413	6.87	17.02	4.14	3.81	38.51
R3	40.38	2.308	2.216	2.392	7.16	17.83	4.26	3.33	35.53
R4	52.93	2.327	2.232	2.415	7.00	17.29	4.16	3.52	37.04
R5	65.20	2.321	2.230	2.412	7.12	17.65	4.05	4.06	37.55

328 R	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.87	2.247	2.177	2.325	5.74	15.15	3.22	1.75	43.21
R1	16.05	2.376	2.289	2.444	5.86	15.18	3.82	2.65	41.72
R2	28.63	2.369	2.274	2.437	6.43	15.92	4.18	2.64	40.17
R3	41.05	2.332	2.233	2.404	6.72	16.98	4.43	2.44	36.71
R4	53.46	2.381	2.282	2.451	6.55	16.43	4.34	3.65	39.24
R5	66.01	2.340	2.237	2.416	7.08	17.49	4.64	3.47	38.51

338 D	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.37	2.219	2.179	2.337	6.15	16.26	1.83	1.68	36.78
R1	14.90	2.339	2.246	2.422	7.30	17.17	4.09	3.55	36.32
R2	27.21	2.330	2.233	2.418	7.64	18.45	4.32	3.37	35.46
R3	39.64	2.331	2.234	2.424	7.48	17.96	4.30	3.26	38.51
R4	52.13	2.310	2.212	2.401	7.80	18.58	4.41	3.57	37.54
R5	64.58	2.313	2.215	2.405	7.75	18.49	4.39	3.17	38.24

338 R	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.61	2.246	2.162	2.355	7.55	18.83	3.79	1.23	42.02
R1	15.55	2.365	2.263	2.465	7.83	18.97	4.39	2.84	40.58
R2	28.09	2.367	2.267	2.446	6.79	17.22	4.35	3.43	34.25
R3	40.63	2.374	2.274	2.442	6.32	16.11	4.29	3.79	36.25
R4	53.24	2.378	2.284	2.452	6.30	16.08	4.01	3.22	39.21
R5	65.61	2.344	2.251	2.426	6.76	16.83	4.05	3.17	38.51

STM1	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.12	2.339	2.293	2.385	3.68	9.54	1.99	5.17	45.44
R1	16.57	2.417	2.368	2.463	3.61	9.52	2.05	6.16	43.4
R2	29.58	2.499	2.445	2.542	3.46	9.48	2.19	4.22	45.21
R3	42.52	2.475	2.422	2.518	3.53	9.49	2.20	4.08	43.2
R4	55.17	2.470	2.429	2.514	3.06	8.32	1.67	3.96	46.12
R5	67.56	2.473	2.415	2.517	3.73	9.95	2.30	3.57	44.73

STM2	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.98	2.352	2.319	2.422	3.95	10.42	1.41	4.56	44.66
R1	16.67	2.429	2.376	2.480	3.93	10.40	2.23	3.28	43.82
R2	30.21	2.419	2.363	2.475	4.30	11.09	2.34	4.23	42.97
R3	43.52	2.441	2.386	2.498	4.26	10.95	2.30	3.58	45.07
R4	56.58	2.426	2.355	2.489	5.27	13.13	3.01	3.39	42.15
R5	69.24	2.439	2.378	2.506	4.28	11.08	2.32	3.52	44.32

CD48a	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	3.99	2.342	2.323	2.382	1.91	9.01	0.81	3.48	44.51
R1	16.49	2.424	2.400	2.461	2.45	8.56	1.98	3.44	44.05
R2	28.68	2.416	2.355	2.445	3.70	8.87	2.54	4.39	43.81
R3	40.84	2.389	2.330	2.412	3.77	9.03	2.58	3.46	41.09
R4	53.75	2.398	2.334	2.421	3.64	8.65	2.48	5.3	42.89
R5	66.62	2.387	2.322	2.415	3.91	9.25	2.76	4.86	40.48

CD48	dmoy./s (mm)	r1 (g/cm ³)	r2 (g/cm ³)	r3 (g/cm ³)	Ab (%)	P (%)	W (%)	B (MPa)	G (%)
R0	4.55	2.331	2.307	2.372	2.20	9.76	1.00	3.66	45.65
R1	18.59	2.441	2.396	2.473	3.23	8.59	1.88	4.05	46.69
R2	32.60	2.434	2.380	2.464	3.75	9.00	2.34	4.81	42.48
R3	45.61	2.409	2.354	2.444	3.46	8.35	2.24	6.26	44.42
R4	58.49	2.428	2.373	2.459	3.56	8.54	2.31	5.12	42.24
R5	71.33	2.409	2.355	2.439	3.46	8.40	2.30	6.13	44.28

MESURES PRISES SUR LES VIEUX OUVRAGES

(MOYENNES SUR 2 CAROTTES/ OUVRAGE)

328 (P.I.P.O. 20 ans):

dmoy./s	E1	E2	E3	r1	r2	r3
(mm)	(GPa)			(g/cm ³)		
3.91	28.86	24.11	30.36	2.25	2.19	2.33
15.99	41.99	35.22	44.17	2.36	2.27	2.44
28.34	41.51	34.55	43.69	2.35	2.26	2.42
40.72	40.14	33.20	42.31	2.32	2.22	2.40
53.19	40.94	33.78	43.10	2.35	2.26	2.43
65.61	41.20	33.85	43.37	2.33	2.23	2.41

dmoy./s	Ab	P	W	B	G
(mm)	(%)			(MPa)	(%)
3.91	5.41	16.23	2.58	2.23	40.57
15.99	5.97	16.10	3.71	3.09	40.24
28.34	6.65	16.47	4.16	3.23	39.34
40.72	6.94	17.41	4.35	2.89	36.12
53.19	6.77	16.86	4.25	3.59	38.14
65.61	7.10	17.57	4.34	3.77	38.03

338 (P.I.P.O. 20 ans):

dmoy./s	E1	E2	E3	r1	r2	r3
(mm)	(GPa)			(g/cm ³)		
3.49	27.13	22.48	30.59	2.23	2.17	2.35
15.22	39.70	33.26	41.63	2.35	2.25	2.44
27.65	38.75	31.97	41.07	2.35	2.25	2.43
40.13	40.93	34.14	43.27	2.35	2.25	2.43
52.68	40.91	33.95	43.36	2.34	2.25	2.43
65.10	40.79	34.03	43.00	2.33	2.23	2.42

dmoy./s	Ab	P	W	B	G
(mm)	(%)			(MPa)	(%)
3.49	6.85	17.55	2.81	1.46	39.40
15.22	7.57	18.07	4.24	3.20	38.45
27.65	7.22	17.83	4.33	3.40	34.86
40.13	6.90	17.04	4.30	3.53	37.38
52.68	7.05	17.33	4.21	3.40	38.38
65.10	7.25	17.66	4.22	3.17	38.38

Pont de St. Momelin (VIPP 40 ans):

dmoy./s	E1	E2	E3	r1	r2	r3
(mm)	(GPa)			(g/cm ³)		
4.05	39.30	33.61	42.99	2.35	2.31	2.40
16.62	45.70	37.95	49.06	2.42	2.37	2.47
29.90	45.59	38.04	49.13	2.46	2.40	2.51
43.02	46.43	38.56	49.95	2.46	2.40	2.51
55.88	45.03	37.79	49.00	2.45	2.39	2.50
68.40	45.45	38.54	49.59	2.46	2.40	2.51

dmoy./s	Ab	P	W	B	G
(mm)	(%)			(MPa)	(%)
4.05	3.81	9.98	1.70	4.87	45.05
16.62	3.77	9.96	2.14	4.72	43.61
29.90	3.88	10.28	2.27	4.23	44.09
43.02	3.89	10.22	2.25	3.83	44.14
55.88	4.17	10.72	2.34	3.68	44.14
68.40	4.01	10.51	2.31	3.55	44.53

Pont de CD 48 (O.A.B.P. 20 ans):

dmoy./s	E1	E2	E3	r1	r2	r3
(mm)	(GPa)			(g/cm ³)		
4.27	41.42	38.66	43.08	2.34	2.32	2.38
17.54	46.99	44.29	49.05	2.43	2.40	2.47
30.59	45.22	42.45	47.62	2.42	2.37	2.45
43.11	45.42	42.89	47.84	2.40	2.34	2.43
56.01	47.53	44.93	49.71	2.41	2.35	2.44
68.86	47.07	43.95	48.35	2.40	2.34	2.43

dmoy./s	Ab	P	W	B	G
(mm)	(%)			(MPa)	(%)
4.27	2.05	9.39	0.90	3.57	45.08
17.54	2.84	8.58	1.93	3.75	45.37
30.59	3.73	8.94	2.44	4.60	43.15
43.11	3.62	8.69	2.41	4.86	42.76
56.01	3.60	8.60	2.40	5.21	42.57
68.86	3.68	8.83	2.53	5.50	42.38

ANNEXE VIII

COMPOSITIONS DES EPROUVETTES NORMALISEES

- La composition du béton des éprouvettes 1, 2 et 3, âgées de 5 ans (pour 1 m³) :

CPA 55 LUMBRES	350 kg
Sable de RHIN 0/5	710 kg
Gravier de LESSINES 4/7	210 kg
Gravier de LESSINES 7/20	900 kg
Eau	185 l

Le rapport e/c = 0,528

- La masse volumique théorique du béton : 2,355 t/m³.

- La composition du béton des éprouvettes 4, 5 et 6, âgées de 3 ans (pour 1 m³) :

CPA 55 PMES GAURIN	400 kg
Sable roulé du Boulonnais 0/4	780 kg
Gravier concassé du Boulonnais 5/12	500 kg
Gravier concassé du Boulonnais 12/20	540 kg
Eau	170 l

Le rapport e/c = 0,425

La masse volumique théorique du béton : 2,390 t/m³.

ANNEXE IX

MODELISATION DE LA DISTRIBUTION GRANULAIRE SUR LES PREMIERS MILLIMETRES DU PAREMENT

Principe : Considérons un béton en masse indéfinie, comportant un pourcentage G de granulats, (fig. 1).

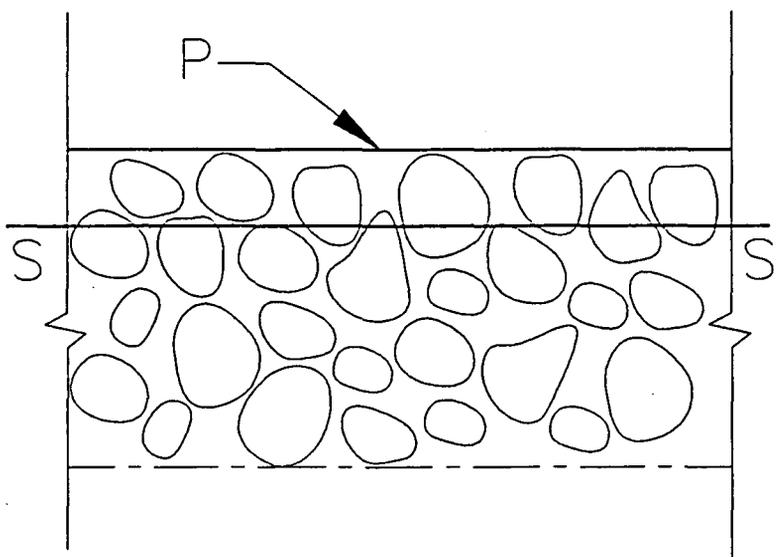


Figure 1

Si nous imaginons couper ce béton par un plan SS' , l'aire des granulats coupés représente $G\%$ de la surface totale de la tranche.

Considérons maintenant ce béton au contact d'une paroi coffrée P . Un plan parallèle à P et infiniment voisin de la paroi ne coupe aucun granulat, mais au fur et à mesure que ce plan s'écarte de P en lui restant parallèle, le pourcentage de l'aire des granulats coupés croît progressivement. Il devient G à partir d'une distance de P qui augmente avec la dimension maximale des granulats. On peut penser que l'estimation de G à partir de la surface des granulats coupés est correcte dès l'instant que ceux-ci ne sont pas butés par le coffrage.

La modélisation proposée suppose que les granulats sont sphériques et que la courbe granulométrique est linéaire entre les diamètres minimal et maximal des granulats et définie en fonction de la densité granulaire telle que : $G (\%) = \int_{d=d_{\min}}^{d=d_{\max}} g d\phi$

De fait, la mise en équation va tenter de rendre compte de l'effet de la proximité du parement sur la réduction de la surface moyenne des granulats coupés par un plan parallèle à la paroi. Pour un granulat de diamètre d donné, nous avons supposé qu'à une distance du parement supérieure ou égale à $\frac{d}{2}$, la surface moyenne coupée n'était pas affectée (puisque toutes les sections sont possibles, jusqu'au grand cercle). En revanche, pour ce granulat, sur une distance inférieure à $\frac{d}{2}$, certaines sections proches du grand cercle ne sont plus possibles, car le granulat est buté par la paroi. La "section moyenne" s'en trouve donc réduite. Il convient donc d'intégrer l'aire des sections réduites pour l'ensemble de la courbe granulométrique en faisant varier le diamètre d de d_{\min} à d_{\max} .

Calcul : Considérons une calotte sphérique de diamètre d et calculons le diamètre moyen de la section définie par une distance a du parement inférieure à $\frac{d}{2}$, (fig. 2).

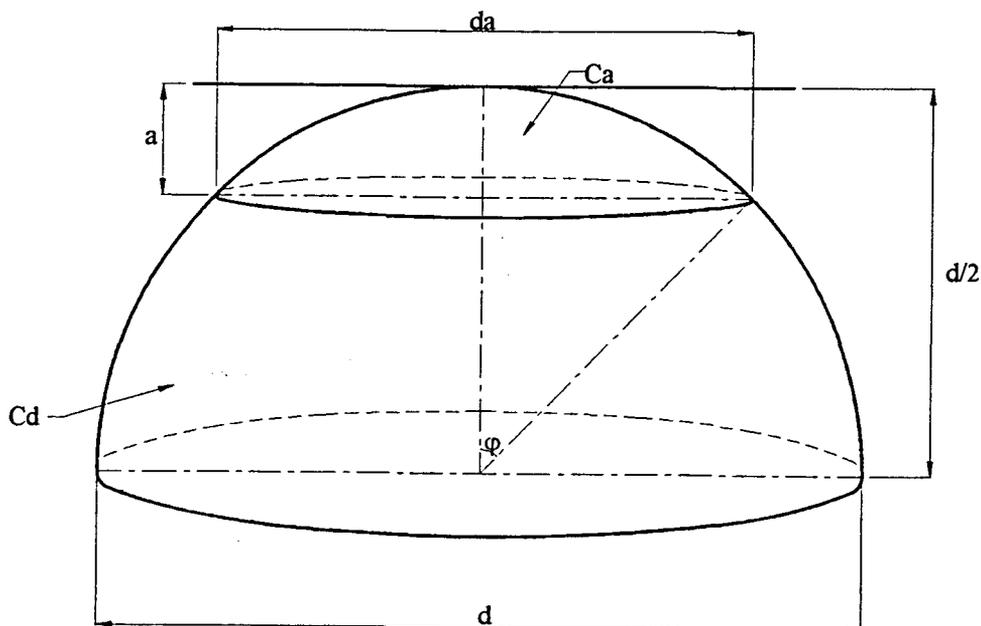


Figure 2

Le volume de la calotte C_a , déterminée par la distance a , peut être donné en fonction de l'angle φ tel que :

$$\cos \varphi = \frac{r - a}{r} = 1 - \frac{a}{r}$$

$$\begin{aligned} V_\varphi &= \int_0^\varphi r \, d\varphi \sin \varphi \pi r^2 \sin^2 \varphi = \pi r^3 \int_0^\varphi \sin^3 \varphi \, d\varphi \\ &= \pi r^3 \int_0^\varphi (\cos^2 \varphi - 1) \, d\cos \varphi \\ &= \pi r^3 [\cos^3 \varphi - 3 \cos \varphi + 2] \end{aligned} \quad (2)$$

En exprimant (2) en fonction de a on obtient : $V_a = \frac{\pi}{3} a^2 [3r - a]$ (3)

D'autre part, on a : $V_a = \pi \frac{\bar{d}_a^2}{4} a$ (4)

avec \bar{d}_a - diamètre moyen des cercles de "coupure"

$$(3) = (4) \Rightarrow \bar{d}_a^2 = \frac{4}{3} a [3r - a]$$

ou : $r = \frac{d}{2} \Rightarrow \bar{d}_a^2 = \frac{4}{3} a \left[\frac{3d}{2} - a \right]$ (5)

Par ailleurs, dans la masse du béton, le diamètre moyen \bar{d} de la section circulaire d'un granulat est donné par :

$$\pi \frac{\bar{d}^2}{4} \cdot \frac{d}{2} = \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} \Rightarrow \bar{d}^2 = \frac{2}{3} d^2 \quad (6)$$

Les teneurs granulaires T , estimées sur une section du béton, sont proportionnelles au carré des diamètres des granulats coupés. A proximité du parement ces teneurs sont proportionnelles à Q tel que :

$$Q = \frac{\bar{d}_a^2}{\bar{d}^2} = \frac{a}{2r} \left(3 - \frac{a}{r} \right) \quad (7)$$

Ainsi,
$$T_s(a) = \int_{d=d_{\min}}^{d=d_{\max}} g \, d\phi = \int_{d_{\min}}^{2a} g \, d\phi + \int_{2a}^{d_{\max}} g^* \, d\phi$$

avec : $g^* = Q g$

$$\begin{aligned} T_s(a) &= g(2a - d_{\min}) + \int_{2a}^{d_{\max}} g \left[\frac{a}{2r} \left(3 - \frac{a}{r} \right) \right] d\phi \\ &= g(2a - d_{\min}) + \int_{2a}^{d_{\max}} g \left[\frac{a}{d_{\max}} \left(3 - \frac{2a}{d_{\max}} \right) \right] d\phi \\ &= g(2a - d_{\min}) + g(d_{\max} - 2a) \left[\frac{3a}{d_{\max} - 2a} \text{Log} \frac{d_{\max}}{2a} - \frac{a}{d_{\max}} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

En remplaçant g par $\frac{G}{d_{\max} - d_{\min}}$ dans l'expression (8), on obtient :

$$T_s^*(a) = \frac{G}{d_{\max} - d_{\min}} \left[(2a - d_{\min}) + d_{\max} - 2a \text{Log} \frac{d_{\max}}{2a} - \frac{a}{d_{\max}} \right] \quad (9)$$

Le pourcentage granulaire volumique sur une distance du parement $z \leq a$ sera obtenu par :

$$T_v = \int_0^z T_s(a) da \quad (10)$$

Exemple d'application :

Pour une fraction granulaire 5/20, le tableau suivant donne $T_s(a)$ et $T_v(a)$, rapportés au pourcentage granulaire volumique G :

- $T_s(a)$, taux granulaire surfacique mesuré à une distance a du parement
- $T_v(a)$, taux granulaire volumique moyen sur une épaisseur a .

a	Ts(a)/G	Tv(a)/G	Tv(a)/Ts(a)
mm			
0	0.000		
0.2	0.110	0.065	0.596
0.4	0.181	0.108	0.598
0.6	0.239	0.144	0.601
0.8	0.289	0.175	0.604
1	0.334	0.203	0.608
1.2	0.374	0.229	0.612
1.4	0.410	0.252	0.615
1.6	0.444	0.274	0.619
1.8	0.475	0.295	0.622
2	0.504	0.315	0.625
2.2	0.531	0.333	0.628
2.4	0.556	0.351	0.631
2.6	0.586	0.368	0.628
2.8	0.618	0.385	0.622
3	0.649	0.402	0.619
3.2	0.678	0.418	0.617
3.4	0.704	0.434	0.617
3.6	0.729	0.450	0.618
3.8	0.752	0.465	0.619
4	0.773	0.480	0.621
4.2	0.793	0.495	0.624
4.4	0.812	0.509	0.627
4.6	0.829	0.522	0.630
4.8	0.845	0.536	0.634
5	0.860	0.548	0.638
5.2	0.874	0.561	0.642
5.4	0.887	0.572	0.646
5.6	0.898	0.584	0.650
5.8	0.909	0.595	0.654
6	0.920	0.606	0.659
6.2	0.929	0.616	0.663
6.4	0.938	0.626	0.668
6.6	0.946	0.635	0.672
6.8	0.953	0.645	0.677
7	0.959	0.654	0.681
7.2	0.965	0.662	0.686
7.4	0.971	0.670	0.691
7.6	0.976	0.678	0.695
7.8	0.980	0.686	0.700
8	0.984	0.694	0.705
8.2	0.987	0.701	0.710
8.4	0.990	0.708	0.715
8.6	0.992	0.714	0.720
8.8	0.995	0.720	0.724
9	0.996	0.727	0.729
9.2	0.998	0.732	0.734
9.4	0.999	0.738	0.739
9.6	0.999	0.744	0.744
9.8	1.000	0.749	0.749
10	1.000	0.754	0.754

D'après le tableau précédent, on constate qu'à 8 mm comptés à partir du parement, les taux granulaires surfacique $T_s(8)$, et volumique $T_v(8)$, représentent respectivement 0,984G et 0,694G. Le coefficient correctif permettant d'estimer le taux granulaire volumique de la rondelle R_0 (d'épaisseur 8 mm), à partir du taux surfacique mesuré sur la face intérieure de celle-ci est donc :

$$k = T_v(8)/T_s(8) = 0,694/0,984 = 0,705$$