

---

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

Laboratoire Construction et Environnement

### THESE DE DOCTORAT

Présentée par : **Madani BEDERINA**  
Ingénieur d'état en Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique  
Magister en Matériaux de l'Université de Laghouat

---

# CARACTÉRISATION MÉCANIQUE ET PHYSIQUE DES BÉTONS DE SABLES A BASE DE DÉCHETS DE BOIS

---

Soutenue le 25 Avril 2007

<b>Mr M.K. BERRAH</b>	Professeur, ENP, Alger	Président
<b>Mr M.M. KHENFER</b>	Professeur, Université de Laghouat	Directeur de thèse
<b>Mr A. BALI</b>	Professeur, ENP, Alger	Directeur de thèse
<b>Mme M. QUENEUDÉC</b>	Professeur, IUT d'Amiens (France)	Examinatrice
<b>Mr MT ABADLIA</b>	Professeur, Université de Boumerdés	Examineur
<b>Mr M. BOUHICHA</b>	Professeur, Université de Laghouat	Examineur
<b>Mr K. SILHADI</b>	Maître de Conférence, ENP, Alger	Examineur
<b>Mr A. BRARA</b>	HDR, Directeur de recherche CNERIB	Invité

---

## AVANT PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein :

- du **Laboratoire Construction et Environnement** de l'École Polytechnique dirigé par le professeur **A. BALI**,
- du **Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI)** de l'université de Picardie Jules Vernes à Amiens en France dirigé par le professeur **M. QUENEUDEC**
- et du **Laboratoire de recherche de Génie Civil** de l'Université de Laghouat dirigé, au début par le Professeur **M. BOUHICHA**, puis par le professeur **M.M. FHENFER**.

Que toutes les équipes travaillant dans ces laboratoires trouvent l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier Monsieur **Khenfer Mohamed Mouldi**, Professeur à l'Université de Laghouat, et monsieur **Bali Abederrahim**, Professeur à l'ENP d'Alger, directeurs de cette thèse, pour leur acceptation d'encadrement, leur soutien, leurs conseils et leur confiance à mon égard durant toute les années de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont également à Madame **M. Quéneudec t'Kint**, professeur à l'université de Picardie Jules Vernes, de m'avoir accueilli dans son laboratoire. Son soutien durant mes stages de courte durée, ainsi que son assistance et ses conseils objectifs, m'ont été grandement profitables.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **M.K. BERRAH**, Professeur à l'École Polytechnique qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à remercier également Messieurs **M.T ABADLIA**, Professeur à l'Université de Boumerdés, **M. BOUHICHA**, Professeur à l'Université de Laghouat et **K. SILHADI** Maître de Conférence à l'ENP pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je voudrais remercier également toutes les personnes, dans les trois laboratoires, qui ont apporté une contribution directe au bon déroulement de cette étude, et en particulier, Mr **B. Laidoudi**, Mme **R. Dheilily** et Mr **L. Marmoret** pour leur collaboration dans l'étude thermique et microstructurale et Mr **A. Ziregue** pour son aide dans l'étude mécanique et hydrique.

Je profite aussi de cette occasion solennelle pour adresser mes remerciements à toute ma famille qui m'a toujours encouragé et soutenu toutes au long des années de cette étude.

Je remercie enfin tous ceux qui n'ont pas été cités dans ces quelques lignes et qui ont contribué de près ou de loin par leur aide au bon déroulement de ce travail.

## RESUME

Le présent travail entre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et de la réutilisation des déchets industriels. Il a pour objectif l'allègement des bétons de sables par addition de copeaux de bois et l'étude de l'influence de l'ajout de ces derniers sur les caractéristiques physico – mécaniques des composites ainsi obtenus.

Les matériaux valorisés sont des sables locaux, dunaires et alluvionnaires, se trouvant en grandes quantités dans la région de Laghouat et les déchets réutilisés sont des fillers calcaires et des copeaux de bois provenant respectivement des déchets de concassage de granulats et des déchets de la menuiserie de bois.

Il s'agit donc d'une étude expérimentale qui porte sur la mise au point d'un composite « béton de sable – bois » isolant porteur présentant de bonnes caractéristiques physico – mécaniques.

Pour des teneurs en copeaux de bois allant de 0 à 160 kg/m<sup>3</sup> et des teneurs en filler allant de 0 à 400 kg/m<sup>3</sup>, les résultats obtenus ont montré que l'ajout des copeaux de bois allège bien le composite et réduit même la densité de sa matrice, la structure reste homogène avec une bonne adhérence bois - matrice et les propriétés thermiques sont améliorées. Toutefois, il faut noter la diminution de la résistance mécanique et l'augmentation des variations dimensionnelles. Pour la première, il a été possible d'assurer un compromis résistance mécanique – conductivité thermique permettant d'élaborer un béton de sable léger isolant-porteur. Pour la deuxième, certes les valeurs moyennes obtenues pour le retrait sont plus élevées que celles d'un béton ordinaire, mais elles occupent une bonne place dans la gamme des valeurs préconisées pour les bétons de bois en général. Afin de valider ces résultats, différents modèles théoriques ont été appliqués pour la résistance à la compression et la conductivité thermique et il a été montré qu'il y'a une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques. En ce qui concerne l'étude de l'effet de la proportion des fillers, il faut noter que l'ajout des copeaux de bois ne modifie pas les dosages optimaux de filler nécessaires pour ces bétons de sable sans bois.

La caractérisation de ces composites a été étendue vers une étude de durabilité vis à vis le gel – dégel et le mouillage – séchage et il a été remarqué que les composites étudiés ne posent pas de grands problèmes vis à vis ces deux essais.

Enfin, et dans le but d'améliorer les caractéristiques ainsi obtenues, un traitement par enrobage au ciment a été appliqué aux copeaux de bois avant de les incorporer dans la matrice et il a été enregistré des améliorations considérables dans la plupart des caractéristiques physiques et mécaniques, notamment dans la résistance mécanique et les variations dimensionnelles.

Selon, donc, la proportion des copeaux de bois, il est possible d'obtenir un matériau *porteur* ou *isolant - porteur* ou *isolant* qui permet une utilisation dans les différents types d'éléments de construction.

---

**Mots clés** : milieux poreux, béton de sable, béton léger, béton de bois, copeaux de bois, résistance mécanique, transfert de chaleur, transfert de masse, sonde TPS, conductivité thermique, diffusivité thermique, effusivité thermique, capacité calorifique, capillarité, sorptivité, diffusivité hydrique, modèles théoriques de résistance mécanique, modèles théoriques de conductivité thermique, microstructure, retrait, gel-dégel, mouillage-séchage, traitement de copeaux de bois.

---

## ABSTRACT

---

This work enters within the framework of the valorisation of local materials and the re-use of the industrial wastes. It aims at the lightness of the dune and river sand concrete by addition of wood shavings and at the study of the influence of the latter on the physico - mechanical characteristics of the composites thus obtained. The valorised materials are local dune sands and river sands which exist in large quantities in the area of Laghouat and the re-used wastes are limestone fillers and wood shavings coming respectively from crushing wastes and woodworking activities wastes. It is thus about an experimental study which is based on the elaboration of an insulator-carrier composite "sand concrete - wood" presenting good physico-mechanical characteristics.

For wood contents varied from 0 to 160 kg/m<sup>3</sup> and for filler contents varied from 0 to 400 kg/m<sup>3</sup>, the obtained results show that the addition of the shavings reduces the weight of the composite and reduces even the density of its matrix, the structure remains homogeneous with good adherence wood-matrix and the thermal properties are improved. However, it is necessary to note the reduction in the mechanical strength and the increase in the dimensional variations. For the first one, it was possible to ensure a compromise between mechanical strength and thermal conductivity which allows to have a light carrier-insulator sand concrete. For the second, certainly the average values obtained for the shrinkage are higher than those of an ordinary concrete, but they occupy a good place in the range of the recommended values for wood concretes. In order to validate these results, different theoretical model were applied, in particular for the compressive strength and the thermal conductivity, and it is shown that there is a good concordance between the experimental and theoretical results. Concerning the study of the effect of the proportion of the fillers, it should be noted that the addition of the shavings does not vary the optimal proportions of the fillers which are necessary for the sand concretes without wood.

The characterisation of these composites was extended towards a study of durability opposite freezing-thawing and damping-drying and it was noticed that the studied composites do not pose major problems with regard of these two tests.

Lastly, and in order to improve the characteristics thus obtained, a treatment by coating with cement, was applied to the shavings before incorporating them in the matrix and it have been shown considerable improvements in the majority of the physical and mechanical characteristics, in particular in the mechanical strength and the dimensional variations.

According to the proportion of the shavings in the sand concrete, it is possible to obtain a *carrier* or *insulator - carrier* or *insulator material*.

---

## ملخص

يدخل هذا العمل في إطار استغلال المواد المحلية الغير مستعملة أو القليلة الاستعمال، وكذا إعادة استعمال النفايات الصناعية، حيث يهدف إلى إضافة قصاصات الخشب إلى الخرسانة الرملية قصد التخفيف من وزنها و دراسة مدا تأثير هذه القصاصات على خصائصها الفيزيو- ميكانيكية. المواد المحلية المراد استغلالها هي الرمال الكثبانية و رمال الأودية الموجودة بكميات كبيرة في منطقة الأغواط و النفايات المراد إعادة استعمالها هي مواد كلسية ناعمة و قصاصات خشبية، الأولى مستحضرة بواسطة الغريلة من فضلات المقالع الحجرية والثانية مأخوذة من فضلات أعمال النجارة. يعتبر هذا العمل إذا دراسة مخبرية تتمثل في تشكيل مادة مركبة (خرسانة رملية - خشب) عازلة - حمالة تتميز بخصائص فيزيو- ميكانيكية جيدة.

بتغيير كمية المواد الخشبية من 0 إلى 160 كغ/م<sup>3</sup>، بينت النتائج المحصل عليها أن إضافة القصاصات الخشبية يقلص بشكل كبير وزن الخرسانة الرملية، و يحسن من خصائصها الحرارية، وتركيبها تبقى متجانسة مع تماسك جيد ما بين الخرسانة و الخشب، إلا أننا نسجل انخفاضا ملحوظا في مقاومتها الميكانيكية و زيادة في تغير أبعادها. بالنسبة للمشكل الأول، نشير إلى أنه بالإمكان الوصول إلى التوفيق ما بين العزل الحراري و المقاومة الميكانيكية و الحصول على خرسانة خفيفة، عازلة، حمالة. أما بالنسبة للمشكل الثاني، فصحيح أن القيم المتوسطة المتحصل عليها بالنسبة للانقباض هي أكبر مقارنة بالخرسانة العادية، لكنها تحتل مكانا لا بأس به بين القيم التي ينصح بها في حالة الخرسانة الخشبية عموما.

قصد تأكيد النتائج الميكانيكية و الحرارية المتحصل عليها، حاولنا تطبيق مجموعة من النماذج النظرية المأخوذة من بعض المراجع وأظهرت هذه الأخيرة التوافق الجيد الموجود بين النتائج المخبرية و النظرية. فيما يخص تأثير نسبة المواد الكلسية الناعمة، أثبتت الدراسة أن الكمية اللازمة للخرسانة الرملية لا تتأثر بوجود قصاصات الخشب حيث تبقى هي نفسها تقريبا، سواء بدون خشب أو بوجود الخشب.

توسعت هذه الدراسة لتشمل دراسة ديمومة هذه المادة المركبة ضد تكرار عملية التجمد و الذوبان و عملية التبليل و التجفيف و تبين أن هاتين التجريبتين لا تطرحان مشاكل تستدعي القلق.

في آخر هذه الدراسة، و من أجل تحسين الخصائص المدروسة، تم معالجة قصاصات الخشب و ذلك بتغليفها بدهان إسمنتي قبل إدخالها في الخرسانة الرملية، و سجلنا تحسنا معتبرا في أغلبية الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المدروسة، و نخص بالذكر نتائج الانقباض و المقاومة ضد الضغط.

نشير في الأخير أنه بالا مكان تشكيل خرسانة رملية مخففة بإضافة قصاصات الخشب قابلة للاستعمال في ميدان البناء كمواد حمالة أو عازلة - حمالة أو عازلة، و ذلك حسب كمية الخشب المضافة.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>Chapitre I. RAPPELS THEORIQUES ET SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	6
<b>I.1. LES MILIEUX POREUX</b>	7
I.1.1. CARACTERISTIQUES USUELLES D'UN MILIEU POREUX	8
I.1.2. FRACTIONS VOLUMIQUES ET POROSITE	8
I.1.3. CONNECTIVITE	9
I.1.4. TORTUOSITE	9
I.1.5. LES LIQUIDES DANS LES MILIEUX POREUX	9
I.1.5.1. ADSORPTION PHYSIQUE	9
I.1.5.2. CAPILLARITE	10
<b>I.2. LE BOIS</b>	12
I.2.1. GENERALITES	12
I.2.2. STRUCTURE DU BOIS	12
I.2.2.1. MACROSTRUCTURE	13
I.2.2.2. ULTRASTRUCTURE ET MICROSTRUCTURE	13
I.2.2.3. COMPOSITION CHIMIQUE	14
I.2.3. L'EAU DANS LE BOIS	14
I.2.3.1. MESURE DU TAUX D'HUMIDITE DANS LE BOIS	15
I.2.3.2. DIFFUSION DE L'EAU DANS LE BOIS	15
I.2.4. CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BOIS	15
I.2.5. DURABILITE DU BOIS	16
<b>I.3. BETONS LEGERS</b>	16
I.3.1. INTRODUCTION	16
I.3.2. CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS	17
I.3.3. <i>LES BETONS DE BOIS</i>	19
I.3.3.1. GENERALITES	19
I.3.3.2. FORMULATION	20
I.3.3.3. PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES	20
I.3.3.4. DIFFERENTS TYPES DE MATRICES UTILISEES	21
I.3.3.5. PROBLEMES POSES PAR LES BETONS DE BOIS	21
I.3.4. CONCLUSION	22
<b>I.4. BETONS DE SABLE</b>	22
I.4.1. INTRODUCTION	22
I.4.2. HISTORIQUE	22
I.4.3. INTERET DES BETONS DE SABLE	23
I.4.4. <i>LIMITES DES BETONS DE SABLE</i>	23
I.4.5. <i>DOMAINES D'APPLICATION</i>	23
I.4.6. CARACTERISTIQUES DU BETON DE SABLE FRAIS	24
I.4.6.1. MANIABILITE	24
I.4.6.2. COMPACITE	24
I.4.6.3. FORMULATION	25
I.4.7. CARACTERISTIQUES DU BETON DE SABLE DURCI	25
I.4.7.1. COMPORTEMENT MECANIQUE	25
I.4.7.2. AUTRES PROPRIETES	27

I.4.7.2.1. ADHERENCE AUX ARMATURES.....	27
I.4.7.2.2. RETRAIT.....	27
I.4.7.2.3. FLUAGE.....	27
I.4.7.2.4. DURABILITE.....	27
I.4.7.2.5. COMPORTEMENT THERMIQUE.....	27
I.4.7.2.6. PERMEABILITE.....	28
I.4.7.2.7. MICROSTRUCTURE ET FISSURATION.....	28
I.4.8. LE BETONS DE SABLE ETUDIES DANS LE PRESENT TRAVAIL.....	28
I.4.9. CONCLUSIONS.....	29
<b>I.5. GENERALITES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES.....</b>	<b>30</b>
I.5.1. GENERALITES.....	30
I.5.2. DIFFERENTS PARAMETRES DE TRANSFERT DE CHALEUR.....	30
I.5.2.1. CONDUCTIVITE THERMIQUE .....	30
I.5.2.2. DIFFUSIVITE THERMIQUE.....	31
I.5.2.3. EFFUSIVITE THERMIQUE .....	31
I.5.2.4. CHALEUR MASSIQUE.....	32
I.5.3. DIFFERENTES TECHNIQUES DE MESURE .....	32
I.5.3.1. SELON LE MODE DE CHAUFFAGE .....	32
i)-LES METHODES ELECTROTHERMIQUES .....	32
ii)- LES METHODES PHOTOTHERMIQUES :.....	32
I.5.3.2. SELON LE REGIME DE CHAUFFAGE .....	32
I.5.3.2.1. EN REGIME STATIONNAIRE .....	32
I.5.3.2.2. EN REGIME NON-STATIONNAIRE (VARIABLE) .....	32
a)- METHODE DU THERMOCOUPLE CHAUFFANT.....	33
b)- METHODE DU FILM CHAUFFANT .....	34
c)- TECHNIQUES DE MESURES AVEC LES SONDES A CHOC THERMIQUE « METHODE DE LA SONDE MONOTIGE ».....	34
d)- METHODE DE LA SONDE PLANE.....	34
e)- METHODE FLASH.....	34
f)- METHODE LA BANDE CHAUFFANTE (T.H.S).....	34
<b>I.6. GENERALITES SUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES.....</b>	<b>36</b>
I.6.1. DIFFUSIVITE HYDRIQUE .....	36
I.6.2. SORPTIVITE.....	36
<b>I.7. MODELES D'ESTIMATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE ET DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE.....</b>	<b>37</b>
I.7.1. MODELE DE PREDICTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE.....	37
I.7.2. MODELE DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE.....	39
I.7.2.1. VOLUME ELEMENTAIRE REPRESENTATIF « VER ».....	39
I.7.2.2. CAS DES MILIEUX BIPHASIQUES .....	39
I.7.2.2.1. MODELES BASES SUR LA LOI DE FOURIER .....	39
I.7.2.2.2. MODELES BASES SUR L'ANALOGIE ELECTRIQUE	41
I.7.2.2.3. MODELES EMPIRIQUES OU SEMI EMPIRIQUES .....	43
I.7.2.3. CAS DES MILIEUX TRIPHASIQUES .....	43
<b>I.8. CONCLUSIONS.....</b>	<b>44</b>
 <b>Chapitre II. MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES</b>	 <b>45</b>

<b>II.1. MATIERES PREMIERES</b> .....	46
II.1.1. SABLES: .....	46
II.1.2. CIMENT .....	48
II.1.3. FILLERS .....	49
II.1.4. COPEAUX DE BOIS .....	49
II.1.5. ADJUVANT .....	52
II.1.6. EAU.....	52
<b>II.2. COMPOSITES ETUDIES</b> .....	52
II.2.1. OPTIMISATION DE LA MATRICE .....	52
II.2.2. OPTIMISATION DES PROPORTIONS DES DEUX TYPES DE COPEAUX DE BOIS .....	53
II.2.3. MODE D'AJOUT DES COPEAUX DE BOIS .....	54
II.2.4. MALAXAGE ET CONSERVATION .....	55
<b>II.3. TECHNIQUES EXPERIMENTALES</b> .....	56
II.3.1. CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE .....	56
II.3.1.1. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	56
II.3.1.2. RESISTANCE MECANIQUE.....	56
II.3.1.3. COEFFICIENT D'ABSORPTION .....	57
II.3.1.4. VARIATIONS DIMENSIONNELLES.....	58
II.3.2. ETUDE MICRO ET MACRO – STRUCTURELLE.....	58
II.3.3. CARACTERISATION THERMIQUES.....	59
II.3.3.1. TECHNIQUE DE LA SOURCE PLANE TPS « TRANSIENT PLANE SOURCE ».....	59
II.3.3.1.1. AVANTAGES DE LA METHODE TPS.....	59
II.3.3.1.2. CONCEPTION DE L'ELEMENT TPS.....	59
II.3.3.1.3. HYPOTHESES DE LA METHODE TPS .....	61
II.3.3.1.4. MODELE THEORIQUE DE LA METHODE TPS .....	61
II.3.3.1.5. IDENTIFICATION DES PARAMETRES THERMIQUES.....	66
II.3.4. CARACTERISATION HYDRIQUE.....	70
II.3.4.1. PROCEDURE GENERALE DE L'ESSAI DE CAPILLARITE .....	70
II.3.4.2. DETERMINATION DE LA SORPTIVITE.....	70
II.3.4.3. DETERMINATION DE LA <i>DIFFUSIVITE HYDRIQUE</i> .....	71
II.3.5. ETUDE DE LA DURABILITE.....	74
II.3.5.1. ESSAIS GEL – DEGEL.....	75
II.3.5.2. ESSAI MOUILLAGE-SECHAGE .....	75
<b>II.4. CONCLUSION</b> .....	76
<b>Chapitre III. CARACTERISATION PHYSICO MECANIQUE ET ETUDE STRUCTURELLE DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS</b>	77
<b>III.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DES BETONS DE SABLE A BASE COPEAUX DE BOIS</b> .....	78
III.1.1. ETUDE DE LA MANIABILITE .....	78
III.1.2. ETUDE DE LA MASSE VOLUMIQUE.....	79
III.1.3. ETUDE MICROSTRUCTURELLE.....	80
III.1.3.1. ASPECT GENERAL DU COMPOSITE .....	81
III.1.3.2. PATE DE CIMENT DURCIE.....	82
III.1.3.3. ADHERENCE BOIS-MATRICE .....	83
III.1.3.4. ADHERENCE GRAINS DE SABLE - PATE DE CIMENT.....	85



EFFECTIVE.....	122
IV.1.2.4.1. CAS OU LE MATERIAU EST SUPPOSE BIPHASIQUE.....	123
A- MODELE DE ASSAAD .....	123
B- MODELE DE VEERENDRA ET CHAUDHARY .....	124
C- MODELE DE PANDE ET CHAUDHARY.(1984B).....	126
D- MODELE D’HOMOGENEISATION AUTO- COHERENTE .....	128
IV.1.2.4.2. CAS OU LE MATERIAU EST SUPPOSE TRIPHASIQUE.....	130
A- MODELE PROPOSE PAR JACKSON ET BLACK.....	130
B- MODELE D’HOMOGENEISATION AUTO-COHERENTE	133
IV.1.3..CONCLUSION.....	136
<b>IV.2. ETUDE DE LA DURABILITE.....</b>	<b>136</b>
IV.2.1. INTRODUCTION .....	136
IV.2.2. ESSAI GEL – DEGEL.....	137
IV.2.3. ESSAI MOUILLAGE – SECHAGE.....	139
IV.2.4. COMPARAISON ENTRE LES DEUX ESSAIS DE DURABILITE.....	141
IV.2.5 CONCLUSION .....	142
<b>IV.3. TRAITEMENT DES COPEAUX DE BOIS.....</b>	<b>142</b>
IV.3.1. INTRODUCTION.....	142
IV.3.2. CARACTERISATION DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS TRAITES.....	142
a- STRUCTURE ET DENSITE.....	143
b- CARACTERISTIQUES THERMO-MECANQUES.....	145
c- DURABILITE.....	147
d- VARIATIONS DIMENSIONNELLES.....	
IV.3.3. CONCLUSION.....	149
<b>SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS OBTENUS.....</b>	<b>150</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>152</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>156</b>

# NOMENCLATURE

## Lettres latines

- A : surface spécifique ( $m^2$ )  
A<sub>ab</sub> : Surface absorbante de l'échantillon ( $m^2$ )  
A<sub>b</sub> : absorption  
a : diffusivité thermique ( $m^2.s^{-1}$ )  
A' : constante  
b : effusivité thermique ( $J.m^{-2}.s^{-1/2}.k^{-1}$ )  
C : chaleur massique ( $j.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
C<sub>p</sub> : compacité  
D( $\tau_c$ ) : expression théorique de l'élévation de la température à l'instant t  
D<sub>w</sub> : diffusivité hydrique ( $m^2.s^{-1}$ )  
D<sub>wV</sub> : diffusivité hydrique de la phase vapeur ( $m^2.s^{-1}$ )  
D<sub>wL</sub> : diffusivité hydrique de la phase liquide ( $m^2.s^{-1}$ )  
D<sub>w moy</sub> : diffusivité hydrique moyenne ( $m^2.s^{-1}$ )  
 $\Delta E(t)$  : variation de potentiel dans l'élément TPS (V)  
F' : constante  
i : volume d'eau absorbé par unité de surface  
I intensité d'alimentation (A)  
I<sub>0</sub> : intensité de courant qui passe initialement dans la branche de la sonde TPS (A)  
I<sub>z</sub> : moment d'inertie ( $m^4$ )  
e : Indice des vides  
E<sub>a</sub> : module d'élasticité axial  
E<sub>t</sub> : module d'élasticité tangentiel  
ES<sub>p</sub> : équivalent de sable au piston  
ES<sub>p</sub> : équivalent de sable visuel  
g : pesanteur ( $m/s^2$ )  
G : module de cisaillement  
G<sub>s</sub> : rapport des gradients de température dans les grains solides  
G<sub>a</sub> : rapport des gradients de températures dans les poches d'air.  
h : hauteur de la section de l'éprouvette (m)  
HR : humidité relative (%)  
J<sub>0</sub> : fonction de Bessel modifiée de première espèce  
K : coefficient  
K<sub>H</sub> : constante  
K<sub>ij</sub> : coefficient  
K<sub>l</sub> : nombre d'anneau considéré  
L : longueur (m)  
L<sub>e</sub> : longueur d'échantillon (m)  
 $\Delta L$  : variation en longueur (m)  
M<sub>g</sub> : masse de la phase gazeuse (kg)  
M<sub>l</sub> : masse de la phase liquide (kg)  
M<sub>s</sub> : masse de la phase solide (kg)  
M<sub>t</sub> : masse totale (kg)  
M<sub>e</sub> : masse de l'eau (kg)  
M<sub>f</sub> : module de finesse  
m : nombre de spirales du capteur TPS  
M<sub>z</sub> : moment de flexion kg.m

$n_n$  : nombre de nœuds  
 $n_l$  : distance entre les anneaux concentriques (m)  
 $P_0$  : puissance totale dissipée dans l'élément TPS (W)  
 $P_c$  : potentiel capillaire  
 $q$  : chaleur dégagée par unité de longueur ( $J.m^{-2}$ )  
 $Q$  : flux de chaleur en régime stationnaire ( $W.m^{-1}$ )  
 $r$  : rayon du capillaire  
 $r_p$  : rayon du pore  
 $r_s$  le rayon de la sonde TPS (m)  
 $r_a$  : rayon de la sphère représentant le constituant 'a'  
 $r_b$  : rayon de la coquille concentrique représentant le constituant 'b'  
 $r_c$  : rayon de la coquille concentrique supplémentaire représentant le constituant 'c'  
 $R_c$  : résistance à la compression (MPa)  
 $R_f$  : résistance à la flexion (MPa)  
 $R_t$  : résistance à la traction (MPa)  
 $R_0$  : résistance à la compression à porosité nulle  
 $R_0$  : résistance de l'élément TPS avant le lancement de l'essai ( $\Omega$ )  
 $R_p$  : résistance des différents fils utilisés dans le circuit de mesure ( $\Omega$ )  
 $S_r$  : Degré de saturation (%)  
 $S_w$  : sorptivité ( $m.s^{-1/2}$ )  
 $t$  : temps de mesure (s)  
 $t_e$  : temps caractéristique d'enregistrement (s)  
 $t_{iso}$  : temps caractéristique de l'isolant (s)  
 $T$  : température (K)  
 $T_0$  : température uniforme (K)  
 $\Delta T$  : variation de température (K)  
 $\overline{\Delta T}(\tau_c)$  : variation moyenne de la température de l'élément TPS en fonction du temps (K)  
 $\Delta U(t)$  : variation de potentiel (V)  
 $V_g$  : volume de la phase gazeuse ( $m^3$ )  
 $V_l$  : volume de la phase liquide ( $m^3$ )  
 $V_s$  : volume de la phase solide ( $m^3$ )  
 $V_v$  : volume des vides ( $m^3$ ).  
 $V_t$  : volume total  
 $V_a$  , volume de l'air ( $m^3$ )  
 $V_c$  , volume de ciment ( $m^3$ )  
 $V_w$  , volume de l'eau ( $m^3$ )  
 $V_p$  : volume des pores ( $m^3$ )  
 $v_b$  : la fraction volumique du bois dans le composite  
 $v_{mat}$  : la fraction volumique de la matrice solide dans le composite  
 $v_v$  : la fraction volumique des pores dans le composite  
 $w_n$  : teneur massique en eau  
 $w_{nv}$  : teneur volumique en eau  
 $w_{neq}$  : teneur en eau d'équilibre  
 $w$  : taux d'humidité en masse  
 $w_h$  : largeur de la bande (m)  
 $X$  : représentation de la porosité capillaire

#### **Lettres caractérisant les matériaux**

$B$  : dosage des copeaux de bois ( $kg/m^3$ )  
 $B_m$  : copeaux de bois moyens  
 $B_g$  : gros copeaux de bois

C : dosage en ciment ( $\text{kg/m}^3$ )  
E : dosage en eau  
F : dosage en fillers ( $\text{kg/m}^3$ )  
S : dosage du sable ( $\text{kg/m}^3$ )  
SD : sable de dune  
SA : sable alluvionnaire  
SP : superplastifiant (%)

## Lettres grecques

$\alpha$  : coefficient de température ( $\text{K}^{-1}$ )  
 $\alpha_1$  : rapport entre l'épaisseur de la couche stagnante de fluide en série et la dimension de la cellule élémentaire  
 $\gamma$  : constante  
 $\rho$  : masse volumique apparente ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  
 $\rho_s$  : masse volumique absolue ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  
 $\rho_0$  : masse volumique de l'eau  
 $\theta$  : temps caractéristique de l'expérience (s) (ou teneur volumique en eau)  
 $\theta_e$  : temps caractéristique d'enregistrement  
 $\theta_{\text{iso}}$  : temps caractéristique de l'isolant  
 $\theta_L$  : teneur volumique du liquide  
 $\theta_i$  : fraction volumique de la phase i  
 $\theta_{\text{air}}$  : proportion volumique de la phase gazeuse (air).  
 $\theta(x,t)$  : profils hydriques  
 $\theta_0$  : angle de raccordement du ménisque  
 $\varepsilon$  : porosité totale (%)  
 $\varepsilon_0$  : porosité à résistance nulle (%)  
 $\delta_c$  : connectivité  
 $\xi$  : nombre de branches  
 $\tau$  : tortuosité  
 $\tau_c$  : temps caractéristique  
 $\sigma$  : Tension superficielle à l'interface eau-vapeur  
 $\lambda$  : conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $\lambda_{\text{sec}}$  : conductivité thermique du matériau à sec  
 $\lambda_{\text{sat}}$  : conductivité thermique du matériau à saturation  
 $\lambda_f$  : conductivité thermique de la phase fluide  
 $\lambda_s$  : conductivité thermique de la phase solide  
 $\lambda_{\text{eff}}$  : conductivité thermique effective  
 $\lambda_{ms}$  : conductivité thermique de la matrice solide sèche  
 $\lambda_{\text{air}}$  : conductivité thermique de l'air  
 $\lambda'_s$  : conductivité thermique de la phase solide corrigée ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $\lambda_c$  : la conductivité thermique liée à la résistance de contact  
 $\lambda_i$  : conductivité thermique de la phase i  
 $\lambda_{\text{inf}}$  : bornes inférieure de **Hashin et Strickman**  
 $\lambda_{\text{sup}}$  : bornes supérieure de **Hashin et Strickman**  
 $\varphi$  : densité de flux thermique ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )  
 $\Psi$  : facteur correctif

# LISTES DES FIGURES

## Chapitre I

- Fig. I.1 : Principales phases constituant un milieu poreux non saturé
- Fig. I.2 : Représentation schématique des isothermes de sorptions et de désorption pour un matériau poreux
- Fig. I.3 : quelques types de structures des bétons légers
- Fig. I.4 : Effets du dosage et de la finesse de l'ajout sur la résistance à la compression du béton de sable - d'après
- Fig. I.5 : Modèle de *Zarichniak et Novikov* d'après (**Melka S., 1996**)

## Chapitre II

- Fig. II.1 : Courbes granulométriques des deux sables utilisés
- Fig. II.2 : Analyse chimique des deux sables
- Fig. II.3 : Aspect général des grains des deux sables
- Fig. II.4 : Visualisation des grains des fillers utilisés par MEB (G=5000)
- Fig. II.5 : Courbes granulométriques des deux types de copeaux de bois
- Fig. II.6 : Aspect général de copeaux de bois
- Fig. II.7 : Visualisation des copeaux de bois Par MEB
- Fig. II.8 : Mesure de la densité apparente des copeaux de bois
- Fig. II.9 : Elaboration du composite
- Fig. II.10 : Résistance à la compression en fonction de la proportion de chacun des deux type de copeaux de bois
- Fig. II.11 : Résistance à la compression du composite en fonction de la teneur et de la façon d'ajout des copeaux de bois
- Fig. II.12 : Densité du composite en fonction de la teneur et de la façon d'ajout des copeaux de bois
- Fig. II.13 : Résistance à la compression en fonction de la teneur et de la façon d'ajout des copeaux de bois
- Fig. II.14 : Presse utilisée pour la résistance à la compression
- Fig. II.15 : Presse utilisée pour la résistance à la flexion
- Fig. II.16 : Dispositif utilisé en flexion
- Fig. II.17 : Observation de l'échantillon par Microscope Electronique à Balayage (MEB)
- Fig. II.18 : Forme circulaire du capteur TPS
- Fig. II.19 : Sonde TPS utilisée, système de serrage et les demi-éprouvettes de  $[10 \times 10 \times 5] \text{ cm}^3$
- Fig. II.20 : Introduction de la sonde entre les deux demi-éprouvettes
- Fig. II.21 : Modèle de conduction dans le plan axial et radial (z-y)
- Fig. II.22 : Evolution de la fonction  $D(\tau_c)$  pour  $r_s = 15 \text{ mm}$
- Fig. II.23 : Schéma du pont de Wheatstone
- Fig. II.24 : Schéma du montage utilisé pour la mesure des paramètres thermiques
- Fig. II.25 : Schéma montrant une sonde TPS avec un grand diamètre et des isothermes en forme d'ellipsoïdes
- Fig. II.26 : Schéma d'un modèle de quadripôle thermique
- Fig. II.27 : Evolution de la température en fonction de la racine carrée du temps
- Fig. II.28 : Dispositif utilisé pour l'essai d'imbibition capillaire
- Fig. II.29 : Essai d'imbibition capillaire utilisé pour la détermination des profils hydriques
- Fig. II.30 : Exemple de profil type  $\theta(b)$
- Fig. II.31 : Différentes étapes utilisées pour la détermination des profils hydriques et de la diffusivité hydrique en utilisant la méthode gravimétrique

## Chapitre III

- Fig. III.1 : Evolution de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction de la teneur en bois
- Fig. III.2 : Evolution de la densité sèche des copeaux de bois, de la matrice et du composite en fonction de la teneur en copeaux de bois dans les deux bétons de sable étudiés
- Fig. III.3 : Aspect général du béton de sable
- Fig. III.4 : La pâte de ciment durcie
- Fig. III.5 : Observation de la répartition des copeaux de bois dans la matrice et de la liaison matrice-copeaux de bois au microscope optique
- Fig. III.6 : Mise en évidence de la non pénétration de la matrice dans les alvéoles des copeaux de bois - Espèces se développant près des granulats de bois -

- Fig. III.7 : Liaison matrice-grains de sable
- Fig. III.8 : Espèces se développant près des grains de sables
- Fig. III.9 : Evolution du retrait des deux bétons de sable dans le temps
- Fig. III.10 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de la teneur en copeaux de bois
- Fig. III.11 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de l'âge pour différentes teneurs en copeaux de bois
- Fig. III.12 : Evolution de la résistance mécanique en fonction du rapport ciment / Filler
- Fig. III.13 : Evolution de la conductivité thermique à sec en fonction de la teneur en bois
- Fig. III.14 : Evolution de la conductivité thermique à sec en fonction de la teneur en fillers
- Fig. III.15 : Evolution de la conductivité thermique à sec des deux bétons de sables à sec en fonction de la densité sèche
- Fig. III.16 : Relation entre la conductivité thermique à sec et la résistance à la compression des deux bétons de sables
- Fig. III.17: Evolution de l'effusivité thermique à sec en fonction de la teneur en copeaux de bois
- Fig. III.18 : Evolution de l'effusivité thermique à sec en fonction de la masse volumique sèche
- Fig. III.19: Evolution de la diffusivité thermique à sec en fonction de la teneur en bois
- Fig. III.20: Evolution de la diffusivité thermique à sec en fonction et de la masse volumique sèche
- Fig. III.21 : Evolution de la capacité calorifique à sec en fonction de la teneur en copeaux de bois
- Fig. III.22 : Evolution de la capacité calorifique à sec en fonction et de la masse volumique sèche
- Fig. III.23 : Evolution de la conductivité thermique à saturation des deux bétons de sables en fonction de la teneur en bois
- Fig. III.24 : Différence entre la conductivité thermique à l'état sec et à saturation en fonction de la teneur en bois
- Fig. III.25 : Evolution de la conductivité thermique à saturation des deux bétons de sables en fonction de la porosité totale
- Fig. III.26 : Evolution de la conductivité thermique à saturation des deux bétons en fonction de la densité à l'état saturé
- Fig. III.27 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en copeaux de bois à saturation
- Fig. III.28 : Effusivité thermique en fonction de la masse volumique sèche
- Fig. III.29 : Evolution de la diffusivité thermique à saturation en fonction des teneurs en copeaux de bois
- Fig. III.30 : Evolution de la diffusivité thermique en fonction et de la masse volumique à saturation
- Fig. III.31 : Evolution de la capacité calorifique à saturation en fonction des teneurs en copeaux de bois
- Fig. III.32 : Evolution de la capacité calorifique en fonction et de la masse volumique sèche
- Fig. III.33 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en bois (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> – **Béton de SD**)
- Fig. III.34 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en filler (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> - **Béton de SD**)
- Fig. III.35 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en bois (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> – **Béton de SA** -)
- Fig. III.36 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en filler (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> –**Béton de SA**)
- Fig. III.37 : Evolution de la sorptivité des deux bétons de sables en fonction de la teneur en copeaux de bois
- Fig. III.38 : Evolution de la sorptivité des deux bétons de sables en fonction de la teneur en filler
- Fig. III.39 : Evolution de la diffusivité hydrique des deux bétons de sables en fonction de la teneur volumique en eau et la teneur en copeaux de bois
- Fig. III.40 : Evolution de la diffusivité hydrique en fonction de la teneur volumique en eau selon (**Daian J.F**, (1986))
- Fig. III.41 : Evolution de la diffusivité hydrique par capillarité en fonction de la teneur en eau volumique selon **Goual M.S.**, et **Miniotraité R.**
- Fig. III.42 : Evolution de la diffusivité hydrique par capillarité en fonction de la teneur en eau volumique selon **Bouguerra A** et **Bellini**

#### Chapitre IV

- Fig. IV.1: Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la porosité totale - expérimentales et modèles théoriques –
- Fig. IV.2 : Porosités des deux bétons en fonction de la teneur en copeaux de bois
- Fig. IV.3 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité du composite (Béton de SD)
- Fig. IV.4 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la densité du composite (Béton de SD)
- Fig. IV.5 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité du composite (Béton de SA)
- Fig. IV.6 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la densité du composite (Béton de SA)

- Fig. III.7** : Comparaison des conductivités thermiques des phases solides obtenues expérimentalement avec les conductivités théoriques
- Fig. IV.8** : Modèles parallèle et série de conduction thermique
- Fig IV.9** : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'**Assaad** (béton de SD à l'état sec et à l'état saturé)
- Fig IV.10** : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées le modèle d'**Assaad** (béton de SA à l'état sec et à l'état saturé)
- Fig. IV.11** : Modèle de conduction thermique proposé par **Veerendra et Chaudhary (1980)**
- Fig. IV.12** : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **Veerendra et Chaudhary** (béton de SD à l'état sec et à l'état saturé)
- Fig. IV.13** : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **Veerendra et Chaudhary** (Béton de SA à l'état sec et à l'état saturé)
- Fig. IV.14**: Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **Pande et Chaudhary** (béton de SD à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.15**: Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **Pande et Chaudhary** (béton de SA à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.16** : Schéma représentatif du modèle **d'homogénéisation auto cohérente** dans le cas d'un matériau constitué de 2 composants
- Fig. III.17**: Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **d'homogénéisation auto-cohérente** (béton de SD à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.18**: Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **d'homogénéisation auto-cohérente** (béton de SA à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.19**: Volume élémentaire de **JACKSON et BLACK**
- Fig. IV.20**: Evolution de la contiguïté solide-solide en fonction de la porosité totale et en fonction de densité sèche
- Fig. IV.21** : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **Jackson et Black** (béton de SD à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.22** : Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle **Jackson et Black** (béton de SA à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.23** : Schéma représentatif du modèle d'homogénéisation auto-cohérente dans le cas d'un matériau constitué de 3 composants
- Fig. IV.24**: Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'**homogénéisation auto-cohérente** (béton de SD à l'état sec et saturé)
- Fig. III.25**: Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'**homogénéisation auto-cohérente** (béton de SD à l'état sec et saturé)
- Fig. IV.26** : Evolution de la résistance à la compression des deux bétons en fonction de la teneur en bois, avant et après gel-dégel.
- Fig. IV.27** : Effet des cycles gel - dégel sur la résistance à la compression
- Fig. IV.28** : Effet des cycles gel – dégel sur la masse du béton
- Fig. IV.29** : Evolution de la résistance à la compression des deux bétons en fonction de la teneur en bois, avant et après mouillage-séchage
- Fig. IV.30** : Effet des cycles mouillage-séchage sur la résistance à la compression des deux bétons
- Fig. IV.31** : Effet des cycles mouillage-séchage sur la masse des deux bétons
- Fig. IV.32** : Comparaison entre les résultats des deux essais de durabilité : gel-dégel et mouillage-séchage
- Fig. IV.33** : Aspect général des copeaux de bois avant et après traitement au ciment
- Fig. IV.34** : Aspect général du composite – Répartition des copeaux de bois dans la matrice -Béton de SA-
- Fig. IV.35** : Adhérence bois - matrice
- Fig. IV.36** : Rugosité des copeaux de bois et enchevêtrement copeaux - matrice
- Fig. IV.37** : Densité des deux bétons avant et après traitement de copeaux de bois
- Fig. IV.38** : Résistance à la compression avant et après traitement de copeaux de bois
- Fig. IV.39** : Pertes en résistance dues aux gel-dégel avant et après traitement des copeaux de bois
- Fig. IV.40** : Pertes en résistance dues aux mouillage-séchage avant et après traitement des copeaux de bois
- Fig. IV.41**: Retrait à 28 j des deux bétons de sable avant et après traitement des copeaux de bois

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

**Tableau I.1** : Tableau Récapitulatif des paramètres physiques caractérisant un milieu poreux

**Tableau I.2** : Différentes classes de la porosité

**Tableau I.3** : Propriétés mécaniques, d'après **Salmen** (1986)

**Tableau I.4** : valeurs de la conductivité thermique de quelques essences de bois

**Tableau I.5** : Classification des bétons légers selon le guide **ACI 213R-87**

**Tableau I.6** : Classification des bétons légers selon **Kass J.L et Compbell D (1972)**

**Tableau I.7** : Caractéristiques des bétons de bois selon **Pimienta P. et al** (1994)

**Tableau I.8** : Principaux résultats obtenus dans des travaux précédents Avec les mêmes bétons de sable étudiés dans le présent travail

**Tableau I.9** : Méthodes en régime variable d'après **Degiovanni A. et Degiovanni A.**

## Chapitre II

**Tableau II.1** : Propriétés physiques des deux sables utilisés

**Tableau II.2** : Propriétés physiques du ciment utilisé

**Tableau II.3** - Analyse chimique du ciment utilisé

**Tableau II.3** - Analyse chimique du ciment utilisé

**Tableau II.5**: Analyse chimique des fillers

**Tableau II.6** Composition des deux bétons de sable (sans copeaux de bois)

**Tableau II.7** : Proportions des deux types de copeaux de bois envisagées

## Chapitre III

**Tableau III.1**: Variation de la masse volumique du composite et de la masse volumique de la matrice en fonction de la teneur en copeaux de bois

**Tableau III.2** : Rapports Ca / Si calculés à partir des spectres obtenus par RX (MEB)

**Tableau III.3**: Dosages du ciment et du filler.

**Tableau III.4** : Valeurs moyennes des conductivités thermiques des deux composites à l'état sec et à l'état saturé

**Tableau III.5** : Augmentation, en pourcentage, des différents paramètres thermiques des composites lorsqu'on passe de l'état sec à l'état saturé

**Tableau III.6** : Valeurs expérimentales moyennes de la sorptivité des deux bétons de sables en fonction de la teneur en copeaux de bois et des fillers

**Tableau III.7**: Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité

**Tableau III.8** : Valeurs moyennes de la diffusivité hydrique pour les différentes compositions étudiées

## Chapitre IV

**Tableau VI.1**: Valeurs des coefficients utilisés dans les modèles théoriques et déterminés par régression sur les point expérimentaux

**Tableau VI.2**: Porosité des deux bétons étudiés en fonction de la teneur en copeaux de bois

**Tableau VI.3**: Fractions volumiques des différentes phases

**Tableau VI.4**: Conductivité des grains solides de la matrice

**Tableau VI.5**: Conductivité des grains solides des différents constituants de la matrice

**Tableau VI.6**: Pertes en résistance et en poids dues aux effet des cycles gel-dégel

**Tableau VI.7**: Pertes en résistance et en poids dues aux effet des cycles mouillage-séchage

**Tableau IV.8** : Masses volumiques des deux bétons de sable à base de copeaux de bois, avant et après traitement

**Tableau IV.9** : Résistances à la compression des deux bétons de sable à base de copeaux de bois, avant et après traitement

**Tableau VI.10**: Conductivité thermique avant et après traitement des copeaux de bois

**Tableau IV.11** : Résistances à la compression des deux bétons de sable à base de copeaux de bois traités, avant et après les cycle gel-dégel et mouillage séchage

**Tableau VI.12** : Valeurs moyennes du retrait avant et après traitement des copeaux de bois.

**Tableau**: Principaux résultats obtenus lors de cette étude

---

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

---

## INTRODUCTION GENERALE

Afin de situer ce travail, il est important de rappeler que la demande en matériaux de construction connaît une croissance considérable en rapport avec le développement du pays. Cette demande, estimée à des chiffres très élevés, demeure insatisfaite devant une offre insuffisante. Ce déséquilibre, qui semble aller persister pour les prochaines années, ne peut être surmonté qu'en assurant une exploitation rationnelle des matériaux locaux dont dispose notre pays. La valorisation des matériaux locaux, peu ou pas exploités, est devenue actuellement une solution nécessaire aux problèmes économiques des pays en voie de développement.

Par ailleurs, les grandes quantités de déchets résultants quotidiennement des différents travaux industriels constituent une gêne environnementale et soulèvent des problèmes particulièrement difficiles à résoudre. Notons qu'il est considéré comme déchet tout résidu d'un processus, de transformation ou d'utilisation [Ballester J.M., (1992)]. Or la réutilisation de ces déchets dans la construction pourra résoudre un double problème : d'une part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de la construction. En effet, certains déchets possèdent des qualités très importantes et leur introduction dans certains matériaux de construction améliore certainement leurs propriétés mécaniques ou thermiques etc.

C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons qui utiliseraient des ressources abondantes, peu ou pas exploitées, et présenteraient soit des caractéristiques comparables à celles des bétons usuels, soit des caractéristiques répondant à certaines exigences mal assurées par ces derniers. La valorisation des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets de différentes natures font actuellement l'objet de différentes recherches. Parmi ces matériaux, on trouve le *béton de sable* et les *déchets de bois* qui se sont imposés grâce à leurs propriétés spécifiques et particulières.

Par définition, un béton de sable est un béton ne comportant pas de gravillons ou ne comportant qu'une proportion telle que le rapport massique (**Sable / Gravillon**) soit supérieur à 1. S'il contient des gravillons, on l'appelle, alors, « *un béton de sable chargé* ». Le béton de sable présente beaucoup d'avantages tels que : la petite granularité, la bonne résistance, le bel aspect de surface, l'absence de ségrégation, la facilité de la mise en œuvre, etc. Différentes études ont été menées sur ce matériau et il a été montré notamment que les bétons de sable peuvent remplacer le béton traditionnel dans certains usages et que l'utilisation des fillers est indispensable. Ces derniers améliorent la compacité du béton de sable, sa résistance, sa maniabilité et réduisent le dosage de ciment.

D'autre part, l'ajout de *matériaux lignocellulosiques* dans des matrices cimentaires a fait également l'objet de nombreux travaux et de nombreuses applications en raison de leur légèreté et de leurs qualités thermiques et acoustiques ainsi que du caractère renouvelable des ressources utilisées. L'idée d'introduire des déchets lignocellulosiques dans les bétons de sable afin d'améliorer leurs performances physiques est, donc, séduisante.

La présente étude, qui s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs déjà menés sur des bétons de sables dunaire et alluvionnaires, a justement pour objectif l'introduction de **copeaux de bois** dans des **bétons de sable** afin de formuler un *nouveau béton léger* capable d'assurer un bon compromis *résistance – isolation thermique*. Rappelons qu'un béton léger est défini comme étant un béton dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 kg/m<sup>3</sup>. Ce dernier possède des propriétés qui lui confèrent de nombreux avantages par rapport aux autres bétons traditionnels. Aujourd'hui, il est largement demandé dans les travaux de construction et de rénovation, grâce à son faible poids et ses capacités d'isolation thermique et acoustique. Ces qualités ne sont que quelques exemples des avantages extraordinaires offerts par ces bétons. D'autres propriétés intéressantes peuvent être ajoutées selon la nature du matériau et le mode de l'allègement. Plusieurs types de bétons légers constituent des matériaux d'avenir dont l'usage permet de créer naturellement un environnement intérieur agréable, ce qui réduit les coûts de chauffage et de climatisation dans les constructions d'habitations, commerciales et industrielles. Les bétons légers sont, donc, des matériaux très appréciés par les architectes et les constructeurs, car ils offrent des possibilités d'adaptation à, pratiquement, toute structure.

Le composite ainsi envisagé est, alors, *un béton de sable à base de copeaux de bois*. A part le ciment, chaque matériau de base constituant ce matériau entre soit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, soit dans le cadre de la réutilisation des déchets industriels.

Ces matériaux sont :

- deux sables locaux de différentes natures se trouvant en grandes quantités dans la région de Laghouat : un *sable dunaire* et un *sable alluvionnaire*;
- deux déchets industriels d'origines différentes : des *fillers calcaires* provenant des déchets de concassage et des *copeaux de bois* provenant des déchets de menuiserie.

Une caractérisation générale, basée essentiellement sur l'étude de l'influence de la proportion de copeaux de bois sur les propriétés physico-mécaniques de ce composite, est donc nécessaire. Il est également important de rechercher un compromis convenable entre les propriétés mécaniques et les propriétés thermiques qui permet à ce matériau l'utilisation dans des éléments isolants-porteurs.

Pour atteindre ces objectifs, le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des quatre parties principales suivantes :

- ❖ La première partie est consacrée à une étude bibliographique menée sur les trois thèmes suivants :

- Les propriétés générales des *milieux poreux*, en passant par les *bois*, les *bétons légers* et les *bétons de sable*.
- Des généralités sur les *caractéristiques thermo-hydriques* des milieux poreux et leur mesure.
- Les principaux *modèles* mathématiques de prédiction de la résistance mécanique et de la conductivité thermique dans les milieux poreux.

Cette étude oriente le choix des techniques expérimentales à employer dans les mesures des propriétés physiques des matériaux étudiés.

- ❖ La deuxième partie présente les différents résultats expérimentaux obtenus lors de la *caractérisation des matériaux de base*, puis l'étude de l'élaboration des composites '*bétons de sable - bois*' et enfin l'ensemble des *techniques expérimentales* utilisées pour les différents essais de caractérisation. Pour ces dernières, on a insisté surtout sur la *méthode TPS* utilisé pour les mesures des propriétés thermiques et la *méthode gravimétrique* utilisée pour la détermination des propriétés hydriques.
- ❖ La troisième partie est consacrée à la *caractérisation mécanique* et *thermique* des composites étudiés. Elle a été également consacrée à l'étude de la *densité*, de la *structure*, du *comportement hydrique* et des *variations dimensionnelles*.
- ❖ La quatrième partie est consacrée à la *validation* de quelques *modèles* mathématiques, estimant la résistance mécanique et la conductivité thermique, par comparaison des valeurs obtenues à partir de ces modèles avec les valeurs expérimentales. Une étude de durabilité vis à vis du gel-dégel et du mouillage-séchage a également été menée. A la fin de cette partie, et afin d'améliorer les caractéristiques des matériaux étudiés, un traitement approprié a été appliqué aux copeaux de bois avant de les introduire dans les bétons de sable.

Enfin, une synthèse englobant les principaux résultats obtenus lors cette étude, ainsi qu'une conclusion générale avec certaines perspectives pour les études à venir sont présentées.

# *Chapitre I*

---

RAPPELS THEORIQUES  
ET  
SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

---

## I. RAPPELS THEORIQUES ET SYNTHESSES BIBLIOGRAPHIQUES

Le matériau que nous allons élaborer dans ce présent travail est un **composite** qui fait partie des **matériaux poreux**. C'est un nouveau **béton léger** obtenu par incorporation de **copeaux de bois** dans des **bétons de sable**.

L'étude envisagée est une caractérisation basée essentiellement sur l'étude **physico-mécanique** des **bétons de sable à base de copeaux de bois**.

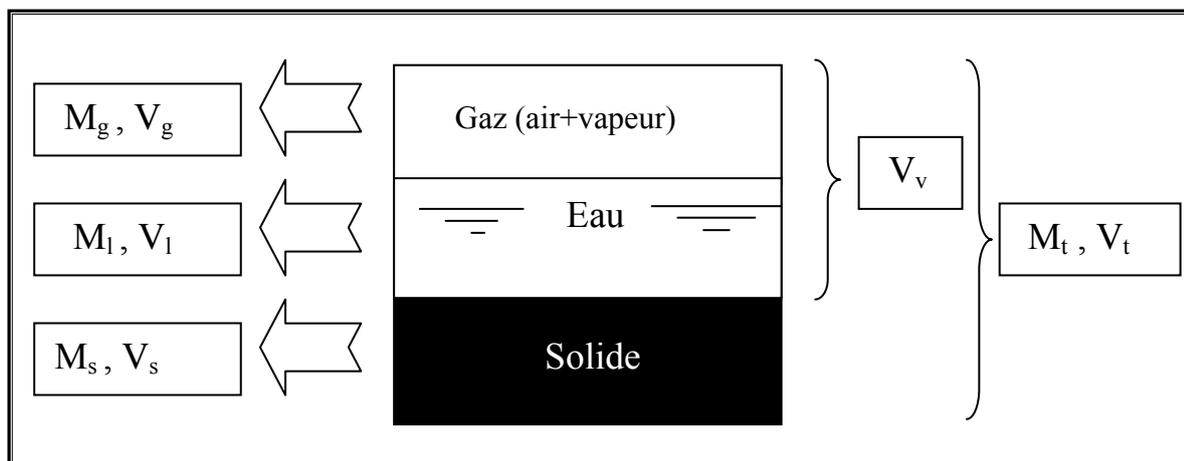
C'est pour cela que nous avons choisi de consacrer ce premier chapitre à :

- premièrement, des généralités sur les **milieux poreux**, puis sur le **bois** et enfin sur les **bétons légers**,
- deuxièmement, des synthèses bibliographiques sur les **bétons de sable**, puis sur les **bétons de bois**
- et enfin, des généralités sur les **transferts de masse et de chaleur** dans les matériaux poreux.

### I.1. MILIEUX POREUX

De nombreux matériaux, tant naturels qu'artificiels, sont des matériaux poreux dont l'espace interstitiel est saturé ou non par un ou plusieurs fluides. La compréhension de leur comportement est importante dans plusieurs domaines d'application comme le Génie Civil ou la Géophysique. En effet, un matériau artificiel, tel que le béton ou bien un matériau naturel tel qu'une argilite, est considéré comme un matériau poreux polyphasique.

Par définition, un milieu poreux est un ensemble hétérogène constitué d'au moins une phase solide, déformable ou non, et une phase fluide englobée dans des vides appelés pores pouvant ou non communiquer entre eux (**figure I.1**). Les milieux poreux sont d'une extrême diversité, non seulement par leurs caractéristiques structurales (forme des grains, géométrie des pores et de la matrice solide), mais aussi par la nature des matériaux constitutifs et leurs interactions physico-chimiques. Ils occupent une place très importante et jouent un rôle considérable dans de nombreux secteurs industriels et phénomènes naturels.



**Fig.I.1** : Principales phases constituant un milieu poreux non saturé

$M_g, M_l, M_s$  : masses des phases : gazeuse, liquide et solide (kg).

$V_g, V_l, V_s$  : volumes des phases : gazeuse, liquide et solide ( $m^3$ ).

$V_v = V_g + V_l$  : volume des vides ( $m^3$ ).

$M_t, V_t$  : masse totale et volume total.

### I.1.1. CARACTERISTIQUES USUELLES D'UN MILIEU POREUX

Différents paramètres physiques, permettant de caractériser un milieu poreux, peuvent être déterminés. Le **tableau I.1** regroupe les principaux paramètres, ainsi que les différentes grandeurs physiques qui définissent un milieu poreux.

**Tableau I.1** : Tableau Récapitulatif des paramètres physiques caractérisant un milieu poreux

<i>Paramètre physique</i>	<i>Etat du milieu</i>		
	<i>Etat sec</i>	<i>Etat non saturé</i>	<i>Etat saturé</i>
<i>Masse volumique absolue</i> ( $\rho_s$ ) ( $kg.m^{-3}$ )	$M_s / V_s$		
<i>Masse volumique apparente</i> ( $\rho$ ) ( $kg.m^{-3}$ )	$M_s / V_t$	$(M_s + M_e) / V_t$	
<i>Porosité</i> ( $\varepsilon$ ) (%)	$V_g / V_t$ $1 - \rho / \rho_s$	$(V_g + V_e) / V_t$	$V_e / V_t$ $(\rho_s - \rho) / (\rho_s - \rho_e)$
<i>Teneur volumique en eau</i> ( $w_{nv}$ )	0	$V_e / V_t$	1
<i>Teneur massique en eau</i> ( $w_n$ )	0	$M_e / M_s$	1
<i>Degré de saturation</i> ( $s_r$ )	0	$V_e / V_v$	1
<i>Indice des vides</i> ( $e$ )	$V_g / V_s$	$(V_g + V_e) / V_s$	$V_e / V_s$

Parfois, pour pouvoir comprendre certains phénomènes, comme par exemple les transferts de chaleur et de masse dans le matériau, une description approfondie du réseau poreux est nécessaire, notamment la taille et la géométrie des vides et la topologie du réseau poreux. Pour obtenir, donc, une représentation plus exacte d'un réseau poreux, il convient de fournir des informations sur :

- La distribution en taille: elle peut s'exprimer soit mathématiquement par une forme intégrale, soit sous une forme différentielle [**Quenard D.**, (1989)]
- La distribution spatiale des pores : l'observation microscopique d'une section du matériau étudié peut nous donner une idée sur la distribution spatiale du réseau poreux dans un plan. Un certain nombre de caractéristiques (porosité, surface spécifique, connectivité, tortuosité, etc.) peut être déduit en utilisant les méthodes de traitement d'image et de morphologie mathématique [**Deshpande S. et al.**, (2004)].

### I.1.2. FRACTIONS VOLUMIQUES ET POROSITE

En général, les vides, ou pores, que présente un milieu poreux, sont de dimensions et de formes variées. Leur grandeur varie des micro-dimensions aux interstices capillaires jusqu'aux canaux plus importants. Un système de pores de cette nature présente des connexions internes et communique avec l'extérieur. La proportion volumique des vides existants sert à définir la porosité.

La porosité dépend de plusieurs facteurs selon la nature du matériau poreux. Dans le cas de la pâte de ciment, par exemple, elle dépend du rapport Eau/Ciment, du type et de la proportion de ciment dans le mélange, des conditions de maturation, du type de granulats ainsi que de leurs proportions dans la composition. Si on y introduit des granulats (cas des bétons), une porosité supplémentaire liée à l'auréole de transition qui se crée autour de ces produits (entraînement d'air) est ajoutée à la porosité initiale du matériau.

La détermination de la distribution des propriétés morphologiques des microstructures s'obtient par la porosimétrie au mercure, l'analyse des isothermes de sorption-désorption d'azote et des mesures d'impédance. Ces microstructures peuvent et doivent être également quantifiées par d'autres méthodes, notamment les techniques de l'analyse d'images sur des coupes du matériau à des échelles dépendant de la taille des microstructures étudiées.

Le terme porosité est souvent accompagné de qualificatifs, qui en renforcent le sens, tels que matricielle, microscopique, intergranulaire, porosité d'interstice, porosité ouverte, etc. [Margat J., (2000)].

Au sens quantitatif de paramètre, différents synonymes sont utilisés : coefficient de porosité, porosité absolue, porosité réelle, porosité totale, porosité vraie [Margat J., (2000)]. Toutefois ces dénominations ne prennent pas toutes en compte la taille des interstices.

Selon la taille moyenne des pores et selon l'état physique de l'eau contenue dans le milieu poreux, la porosité peut être classée comme le montre le **Tableau I.2** [Schoeller, (1955)].

**Tableau I.2** : Différentes classes de la porosité

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0,0001 mm	Microporosité	eau de rétention exclusivement
0,0001 à 2,5 mm	Porosité capillaire	eau capillaire et eau gravitaire
>2,5 mm	Macroporosité	eau gravitaire dominante

Selon que les pores sont connectés ou non, la porosité est dite :

- « *porosité ouverte* » : les vides sont intercommunicants :
- « *porosité close* » ou « *porosité vacuolaire* », dénommée aussi « *porosité résiduelle* » : les vides ne sont pas interconnectés et ne permettent aucune perméabilité.

### I.1.3. CONNECTIVITE

La connectivité est un paramètre topologique qui mesure le degré avec lequel une structure est connectée. Elle peut être définie, selon Fischmeister, comme le plus grand nombre de branches du réseau poreux pouvant être coupées sans créer de parties indépendantes, ç-à-d,

sans déconnecter de pores ou de nœuds du reste du réseau [Dullein F. A. L., (1979)]. Ce paramètre est très peu utilisé dans les modèles de calcul des paramètres thermophysiques. Pour l'évaluer, plusieurs définitions ont été adoptées. Nous citons à titre d'exemple la suivante :

$$\delta_c = \xi - n_n + 1 \quad (I.1)$$

$\xi$  est le nombre de branches et  $n_n$  est le nombre de nœuds dans une structure.

Ces deux paramètres peuvent être déterminés à partir de la reconstruction d'une série de coupes parallèles. Il est à noter que cette méthode reste très longue et difficile à mettre en oeuvre [Quenard D., (1989)].

#### I.1.4. TORTUOSITE

Contrairement à la connectivité, la tortuosité est très utilisée dans les études de transfert de masse et chaleur et elle est souvent introduite dans des modèles de calcul de paramètres thermophysiques [Laurent J.P., (1991) ; Bourgeat A. et al., (1999)]. C'est un paramètre qui caractérise la déviation des lignes de flux lors de la diffusion de la chaleur et/ou de masse dans un milieu poreux [Allaire S.E., et al., (2002)], mais, selon la littérature, sa définition n'est pas toujours claire. Il faut signaler que la saturation partielle de la structure poreuse par un fluide augmente sa tortuosité. [Quenard, (1989)].

Beaucoup d'auteurs relient la tortuosité à la porosité du matériau et plusieurs formules empiriques ont été proposées. Citons à titre d'exemple, les deux méthodes suivantes :

◆ formule empirique :

$$\tau = \left( \frac{L}{L_e} \right)^2 \quad (I.2)$$

Avec

$L$  : la longueur des lignes de flux,

$L_e$  : la longueur de l'échantillon.

◆ Allaire et al (2002) ont utilisé une technique de conduction électrique pour calculer la tortuosité. Ils comparent la résistivité électrique d'un échantillon saturé par un fluide conducteur à la résistivité du fluide de saturation et ils multiplient le rapport ainsi obtenu par la porosité.

#### I.1.5. LES LIQUIDES DANS LES MILIEUX POREUX

Lorsqu'un milieu poreux est mis en contact avec l'humidité, il passe de l'état sec à un état partiellement ou totalement saturé. Ce dernier état peut être caractérisé par les trois paramètres couramment utilisés : *le taux de saturation*, «  $S_r$  », *la teneur volumique en eau* «  $\theta_L$  » ou *la teneur en eau pondérale*.

La fixation de l'humidité dans les milieux poreux s'effectue principalement selon deux mécanismes, l'adsorption physique et la capillarité. Toutefois, il convient d'ajouter l'adsorption chimique lorsque le milieu est susceptible de réagir chimiquement avec l'humidité.

### I.1.5.1. ADSORPTION PHYSIQUE

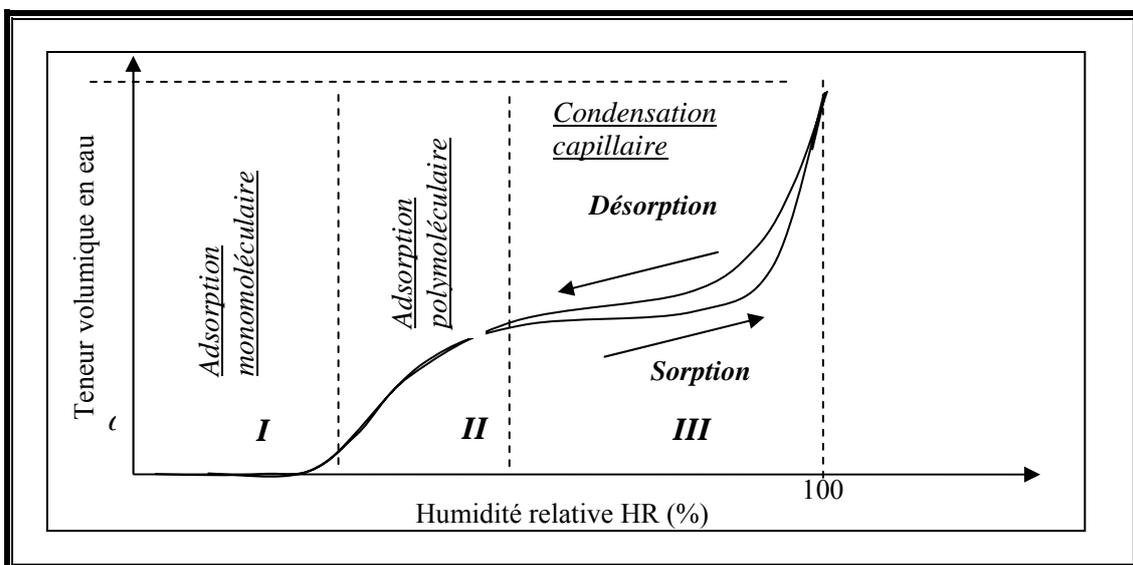
L'activité de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau  $w_n$  et de sa température  $T$ . La courbe représentant, pour une température  $T$  donnée, la teneur en eau  $w_n$  d'un produit en fonction de la valeur de l'humidité relative de l'air en équilibre  $HR$  est appelée :

- **Isotherme d'adsorption** si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- **Isotherme de désorption** si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un solide saturé en eau.

Ces deux courbes sont généralement différentes. Ceci est lié d'une part aux mécanismes de remplissage et de vidange des pores qui sont différents, et d'autre part à la configuration des pores.

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement : produit placé dans un courant d'air chaud et sec à  $T_a$ ,  $HR_a$ . Elle permet de calculer la teneur en eau d'équilibre  $w_{n,eq}$  du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau  $w_n$  du produit en fin de séchage. La valeur de  $w_{n,eq}$  est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage.

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones, chaque zone correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit (**figure I.2**):



**Fig. I.2** : Représentation schématique des isothermes de sorptions et de désorption pour un matériau poreux [Madjoudj N., (2004)]

- **Zone I** : Fixation d'une monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de *Van Der Waals* entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. Dans cette zone, l'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante aura lieu quand toute la surface sera saturée.

- **Zone II** : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale. Dans cette zone l'isotherme est linéaire et l'eau est dans un état entre solide et liquide.

- **Zone III** : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue.

Selon la quantité d'eau fixée, deux types de milieux poreux sont ainsi mis en évidence:

- Les matériaux à comportement dit **hygroscopique**, dans lesquels la quantité fixée par adsorption physique est relativement importante. Ces matériaux ont une grande surface spécifique et un rayon de pores  $<10^{-7}$  m.
- Les matériaux **non hygroscopiques** pour lesquels la quantité d'humidité fixée par adsorption est négligeable. Dans ce cas, l'humidité se trouve fixée par les forces capillaires.

Les isothermes permettent, généralement, de déterminer la surface de la monocouche et l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée. Plusieurs modèles ont été développés pour l'étude des phénomènes de fixation de l'humidité dans les milieux poreux [JANNOT Y., (2003)].

### I.1.5.2. CAPILLARITE

C'est un autre mode de fixation de l'eau qui n'intervient que si la structure poreuse, dont la taille des pores est bien limitée, est mise en contact avec une nappe d'eau en phase liquide.

L'eau en masse présente souvent un comportement mouillant par rapport aux solides constituant les structures poreuses. Ce phénomène se traduit par une tendance à l'étalement du liquide sur la surface des pores et conduit à la formation d'interfaces courbes entre le fluide mouillant liquide et non mouillant gazeux constitué en l'occurrence par l'air humide.

L'équation d'équilibre entre la pression hydrostatique et la tension superficielle permet d'écrire :

$$\sigma \cdot \cos \theta_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \pi r_p^2 \cdot \rho_0 \cdot g \cdot h \quad (I.3)$$

Avec :

$\sigma$  : tension superficielle à l'interface eau-vapeur,

$\theta_0$  : angle de raccordement du ménisque, il est fonction de la nature du liquide et de l'état de la paroi (rugosité, propreté),

$\rho_0$  : masse volumique de l'eau,

r : rayon du capillaire,

$r_p$  : rayon du pore.

L'eau étant considérée comme un liquide parfaitement mouillant, l'angle de raccordement est donc nul, la pression capillaire est en équilibre avec la pression hydrostatique, d'où :

$$P_c = \rho g h \quad (I.4)$$

Avec :

$P_c$  : Le potentiel capillaire

La loi de *Jurin-Laplace* permet de relier le potentiel capillaire existant au niveau de l'interface air-eau des pores, au rayon d'un pore équivalent :

$$p_c = \frac{2\sigma \cos \theta_0}{r_p} \quad (I.5)$$

Où  $\sigma$  : tension superficielle à l'interface eau-air.

## I.2. LE BOIS

### I.2.1. GENERALITES

Le bois a toujours joué un rôle fondamental dans les rapports de l'homme avec son environnement. Dans la construction, et grâce à ses propriétés spécifiques, il a été utilisé, depuis longtemps, comme éléments dans les ouvrages (poteaux, poutres, portes, fenêtres etc.).

Parmi les propriétés positives qu'il possède:

- sa résistance mécanique est relativement élevée (en tension et en compression),
- sa masse volumique modérée,
- sa faible conductibilité thermique,
- il se prête facilement à l'usinage.

Les seuls problèmes qu'on peut rencontrer, en utilisant le bois dans la construction, sont ceux qui peuvent être posés par :

- son hétérogénéité et son anisotropie,
- sa sensibilité à l'humidité.

Mais, la technologie moderne de traitement du bois a permis de surmonter ces problèmes en réduisant sensiblement ces défauts.

Malgré que les propriétés du bois varient considérablement d'une espèce à autre, selon les conditions climatiques, la nature des sols et la vitesse de croissance des arbres, on peut classer les arbres, producteurs de bois, en deux grandes familles :

- ❖ **les résineux** (bois mous)
- ❖ **les feuillus** (bois durs)

### I.2.2. STRUCTURE DU BOIS

Le bois est un matériau fibreux. Ses fibres sont constituées de cellules allongées, de 1 à 3 mm de long et d'environ 0.02 mm de large. Elles sont disposées parallèlement à l'axe du tronc; ce sont elles qui donnent la résistance au bois : celui-ci sera d'autant plus résistant que la densité de fibres sera plus grande.

En fait, et pour bien comprendre le comportement mécanique du bois, ainsi que son comportement hygroscopique, nous devons établir une description à différentes échelles de structure.

Un bref rappel des éléments constitutifs du bois résineux est présenté dans la suite, basé sur les travaux de **Dinwoodie** (1981) et **Tsoumis** (1991).

### I.2.2.1. MACROSTRUCTURE

Le bois présente une structure cellulaire orientée principalement selon la direction de l'axe de l'arbre d'une manière circulaire par la formation de cellules allongées. Ceci reflète la nature anisotrope du bois. On distingue trois directions privilégiées :

- Une direction longitudinale L, suivant l'axe de l'arbre ;
- Une direction radiale R, perpendiculaire aux cernes de croissance ;
- Une direction tangentielle T, perpendiculaire aux deux précédentes directions.

L'échelle d'observation macroscopique ne fait intervenir que des volumes élémentaires suffisamment grands par rapport à la microstructure cellulaire, ce qui permet de formuler l'hypothèse de continuité du milieu. La caractérisation physique de ce matériau est rendue difficile par la présence d'irrégularités locales et d'une hétérogénéité induite par les différentes phases de croissance.

A cette échelle, on peut assimiler le bois à un squelette polymérique composé de cellules constituant des fibres. Les cellules longitudinales appelées trachéides, constituent 90% de la structure cellulaire. L'épaisseur de leurs parois cellulaires change en fonction de la période de croissance, mais le rapport longueur-épaisseur reste assez important de l'ordre de 100 :1.

D'autres types de cellules, appelées parenchymes ou rayons ligneux, sont disposées transversalement. L'arrachement des cellules ménage une grande portion de vides plus ou moins remplis d'eau, ce qui explique la porosité élevée du bois. Cet aspect traduit par la densité du matériau qui constitue un facteur déterminant au niveau de ses caractéristiques mécaniques et thermo-hydriques.

### I.2.2.2. ULTRASTRUCTURE ET MICROSTRUCTURE

L'observation à l'échelle du micron permet une description détaillée des différentes couches de la paroi cellulaire et intercellulaire. La paroi cellulaire est composée d'une paroi primaire entourée par la lamelle mitoyenne et d'une paroi secondaire interne composée de trois couches S1, S2 et S3. La couche S2 est la plus épaisse. Elle peut atteindre 85 % de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire. Les principales composantes chimiques de la paroi cellulaire sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Les chaînes de molécules cellulosiques, entourées d'hémicellulose et incrustées dans la lignine, constitue des microfibrilles en forme de spirales croisées. Les microfibrilles sont les unités structurales de la paroi cellulaire. L'importante épaisseur de la couche S2 et la faible inclinaison de ses microfibrilles reflètent son rôle déterminant dans la réponse mécanique du bois.

Les travaux expérimentaux menés par **Cowdrey et Presion** (1966) montrent que la rigidité d'un bois initial en épicéa augmente de 6 fois quand l'angle d'inclinaison des microfibrilles passe de 40° à 10°. **Walker et Butterfield** (1956) retrouvent cette même constatation avec du bois initial en pin. D'autre part, plusieurs travaux [**Harris et Meylan**, (1965)] soulignent l'impact de la structure anatomique et de l'orientation des microfibrilles sur les phénomènes d'hygroexpansion.

### I.2.2.3. COMPOSITION CHIMIQUE

La cellulose et l'hémicellulose sont les éléments prépondérants de la paroi cellulaire. Ces deux constituants sont très hydrophiles. La cellulose, dans une proportion de l'ordre de 45 %, comporte des régions cristallines (plus de 60 %) interrompues par des zones amorphes qui affaiblissent les liaisons intermoléculaires. La présence de nombreux groupes hydroxyles assure la résistance et une rigidité axiale très élevées qui contribuent significativement à la réponse mécanique du matériau. Les hémicelluloses sont des polymères amorphes ramifiés qui constituent 20 % à 25 % de la paroi cellulaire. La lignine est un polymère hétérogène complexe, amorphe et réticulé. Ses chaînes latérales se rejoignent pour former un réseau tridimensionnel, ce qui lui donne la fonction de colle des fibres adjacentes.

La cellulose et l'hémicellulose ont des caractéristiques mécaniques orthotropes. Quant à la lignine, elle est supposée isotrope [Cousins et al., (1975)]. Les propriétés mécaniques des composantes sèches de la fibre sont données dans le **tableau I.3**.

**Tableau I.3** : Propriétés mécaniques, d'après **Salmen** (1986)

Matériau	$E_a$ (GPa)	$E_t$ (GPa)	G (GPa)	Coefficient de Poisson
Cellulose	134.0	27.2	4.4	0.1
Hémicellulose	8.0	4.0	2.0	0.33
Lignine	3.3	3.3	1.5	0.354

où  $E_a$ ,  $E_t$  et G désignent respectivement les modules axial, tangentiel et de cisaillement.

### I.2.3. L'EAU DANS LE BOIS

L'eau contenue dans le bois peut se trouver sous les trois formes suivantes [Kollmann et Côté (1984) ; Siau (1971)] :

- *l'eau de constitution* : c'est celle qui fait partie de la composition moléculaire du matériau ;
- *l'eau liée* : elle représente l'eau absorbée par les chaînes cellulosiques de la paroi cellulaire ;
- *l'eau libre* : c'est l'eau retenue dans les cavités cellulaires par des forces capillaires.

La teneur en eau « w » du bois est définie par le poids de l'eau contenue dans un échantillon représentatif divisé par son poids à l'état sec. La quantité d'eau maximale absorbée par les parois cellulaires définit le point de saturation des fibres, ce qui correspond à une teneur en eau d'environ 30 %.

Lors du séchage du bois l'eau libre disparaît des cavités cellulaires jusqu'à ce que la limite de saturation des fibres de bois soit atteinte. Au dessous de cette limite, l'équilibre hydrique

s'établit en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air. L'état d'équilibre est décrit par des courbes expérimentales appelées isothermes de sorption (voir § I.1.5.1).

Notons enfin que, selon **Gunderson** (1989), les phénomènes de sorption sont très peu influencés par les effets de chargements mécaniques, par contre, les phénomènes de diffusion hydrique influencent significativement la réponse mécanique du matériau.

### I.2.3.1. MESURE DU TAUX D'HUMIDITE DANS LE BOIS

Pour la détermination expérimentale de la teneur en eau dans le bois, diverses méthodes peuvent être utilisées :

- Mesure par pesée : C'est la méthode la plus précise. La quantité d'eau contenue dans un échantillon de bois est déterminée, par pesées, avant et après séchage à l'étuve.
- Mesure basée sur les propriétés électriques du bois : Puisque la résistivité du bois varie en fonction de sa teneur en eau, on peut déterminer le taux d'humidité du bois en déterminant sa résistance électrique ou sa conductivité.
- Mesure par adsorption d'un rayonnement X : Cette méthode consiste à balayer, par des rayons X, la pièce en bois et à enregistrer, au moyen d'un détecteur, le spectre de la face opposée. A partir de ce dernier, on peut déterminer la densité et le taux d'humidité du bois.
- Mesure par sonde de l'humidité relative : Cette méthode consiste à enfoncer une sonde dans une cavité forée dans le bois et déterminer l'humidité relative de l'air emprisonné à l'intérieur. La teneur en eau locale du bois est déterminée, ensuite, à l'aide de la courbe isotherme de sorption du matériau.

### I.2.3.2. DIFFUSION DE L'EAU DANS LE BOIS

Le phénomène de diffusion a été décrit, par plusieurs auteurs, sous forme d'une équation simple de diffusion en utilisant comme terme moteur la teneur en eau [**Hanhijärvi et al.**, (1990) ; **Torrati**, (1992) ; **Dil-Langer et al.**, (1997)]. L'application de cette hypothèse simplifiée nécessite des conditions isothermes tout au long de l'analyse hydrique.

D'autres formulations plus complètes permettent de prendre en compte la diffusion induite par un gradient thermique [**Bonneau** (1991) ; **Lassere**, (2000)]. Ces approches nécessitent une analyse du transfert de chaleur entre le bois et son milieu d'environnement. Cependant, la relation entre la teneur en eau et la température du bois est très compliquée. Les gradients hydriques produisent un flux de chaleur (effet Dufour) et réciproquement un gradient thermique donne naissance à un flux de masse (effet Soret). A cela il faut ajouter l'influence du taux d'humidité du bois sur ses propriétés thermiques.

### I.2.4. CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BOIS

La conductivité thermique est 10 fois plus faible que celle du béton et 250 fois plus faible que celle de l'acier. Elle varie selon les essences, en fonction de leur masse volumique et de leur taux d'humidité.

Le **tableau I.4** donne les valeurs moyennes de la conductivité thermique des résineux et des feuillus les plus utilisés.

**Tableau I.4** : valeurs de la conductivité thermique de quelques essences de bois

Désignation	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique à 15 % d'humidité (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Résineux</b>		
sapin, Epicia	0.12	400 à 500
pin sylvestre, pin maritime	0.15	500 à 600
<b>Feuillus</b>		
chêne, hêtre, frêne	0.23	600 à 700

### I.2.5. DURABILITE DU BOIS

La majorité des essais expérimentaux sont réalisés sur de courtes durées, où le niveau de contrainte pilote la phase de rupture. Or à moyen et à long terme, le niveau de contrainte n'est pas un critère permettant de définir le seuil de rupture. En effet, plusieurs facteurs combinés permettant de définir, suivant diverses approches, des fonctions caractéristiques capables de décrire l'état d'endommagement du matériau. Les premiers travaux sur l'effet de durée de vie [Wood, (1947)] ont permis de décrire la limite de rupture par une relation entre le niveau et la durée de charge. Par la suite, l'étude des phénomènes différés a permis de combiner les effets hygrothermiques avec l'histoire de chargement afin de réduire la durée de vie d'une structure en bois.

Les méthodes permettant de modéliser la durée de vie sont classées suivant trois approches principales :

- ❖ l'accumulation d'endommagement,
- ❖ la mécanique de rupture,
- ❖ l'énergie de déformation.

## I.3. BETONS LEGERS

### I.3.1. INTRODUCTION

La masse volumique apparente des bétons traditionnels fabriqués avec des granulats rigides est comprise entre 2200 et 2600 kg/m<sup>3</sup>. La masse volumique apparente sèche des bétons légers est inférieure à 1800 Kg/m<sup>3</sup> [RILEM (1970)]. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'American Concrete Institute (1970) limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m<sup>3</sup> après séchage à l'air pendant 28 jours. La norme

**DIN 1042 (1972)**, en Allemagne, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à  $2000 \text{ Kg/m}^3$ .

La masse volumique du béton est généralement diminuée en remplaçant une partie du matériau solide par de l'air.

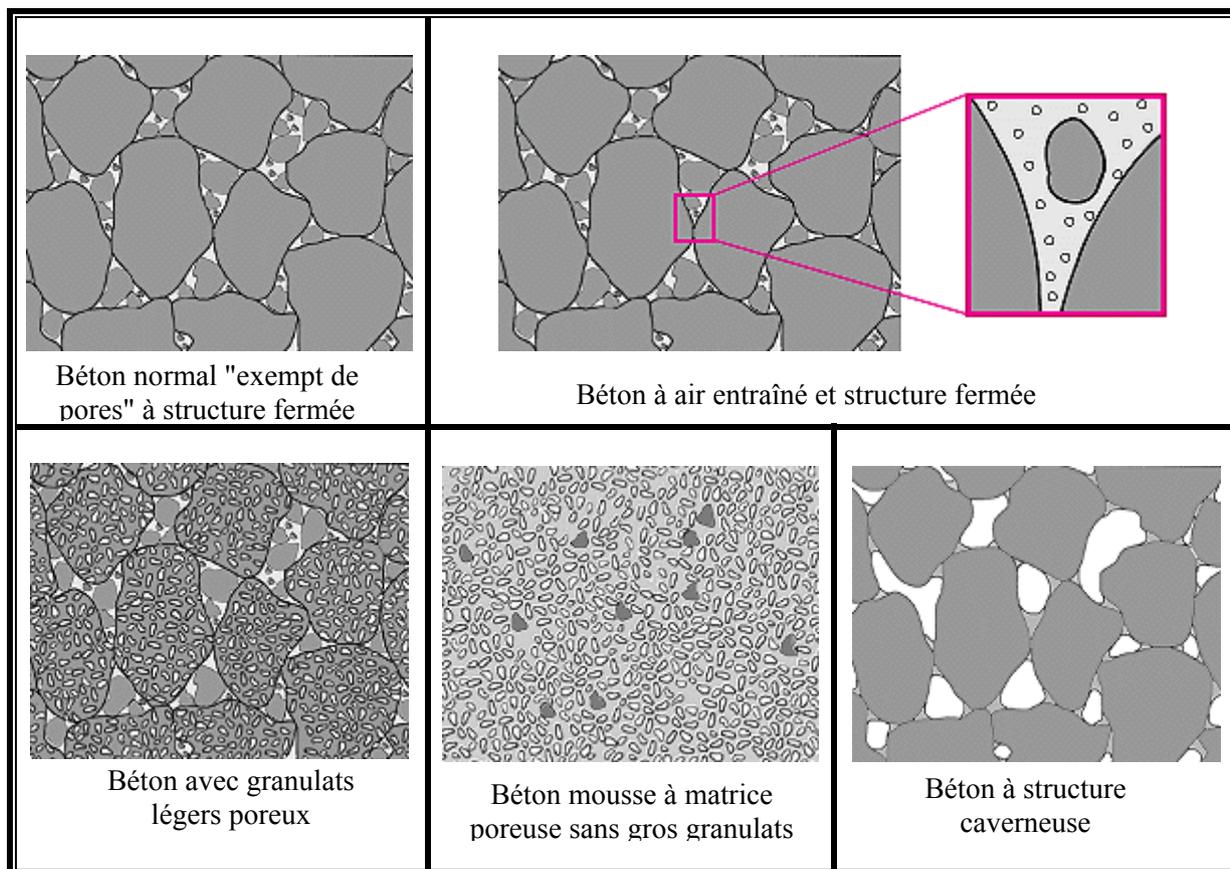
L'incorporation de l'air dans le béton peut avoir lieu dans les trois endroits suivants :

- dans la matrice : le béton, dans ce cas, est appelé « *béton cellulaire* ». Les bulles d'air sont créées, lors du malaxage, soit par réaction chimique, soit par action physique,
- entre les gros granulats: le béton, dans ce cas, est appelé « *béton caverneux* » (ou sans fines, ç-à-d sans sable),
- dans les granulats : le béton, dans ce cas, est appelé « *béton de granulats légers* ».

**Cormon (1973)** propose, dans son livre, une classification selon l'origine des granulats. De nouveaux types de granulats légers sont actuellement utilisés : le verre expansé (meilleure résistance et faible absorption d'eau) [Tasserie M, (1991)], le polystyrène (possibilité de mise en œuvre par pompage) [Carrel P et al., (1982) ; Ferrer M, (1985)], les granulats de bois [Morog D, (1989); Ouali R, (1991)].

Evidemment il est possible d'effectuer des combinaisons comme un béton de type caverneux fabriqué en utilisant des granulats légers.

La **figure I.3**, montre quelques exemples de structures de bétons légers appartenant aux différentes catégories des bétons légers.



**Fig. I.3** : quelques types de structures des bétons légers [Laidoudi B., (2005)]

### I.3.2. CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS

▪ Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide **ACI 213R-87** distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci (**Tableau I.5**).

**Tableau I.5** : Classification des bétons légers selon le guide **ACI 213R-87**

Classification	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Rc (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7 – 17
Béton de faible résistance	300-800	< 7

▪ De même **Kass J.L et Compbell D (1972)**, en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction (**Tableau I.6**) Cette classification a été recommandée par la suite par **RILEM**.

**Tableau I.6** : Classification des bétons légers selon **Kass J.L et Compbell D (1972)**

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	< 1800	Non précise	Non précisée
Résistance à la compression (Mpa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W/m.K)	—	< 0.75	< 0.30

▪ Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

- **Des bétons de remplissage** : leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m<sup>3</sup>, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.
- **Des bétons porteurs isolants** : leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m<sup>3</sup>, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.
- **Des bétons de structure** : Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m<sup>3</sup>. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible.

### I.3.3. LES BETONS DE BOIS

#### I.3.3.1. GENERALITES

Les bétons de bois appartiennent à la famille des bétons légers dont la classification est proposée par **Lafarge Bétons Granulats [Pimienta P., (1994)]**.

**Tableau I.7** : Caractéristiques des bétons de bois selon **Pimienta P. et al., (1994)**

	Rc (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta L/L$ (%)	$\lambda$ (W/m.K)	Rf (MPa)
Valeur-Cible Aliment 2002	3.5 -4	600 – 900	< 1		
NF P14-304	2.5 – 7	< 1700	< 0.45	>0.16	0.5-1.16
NF P14-306	3 – 7	400 – 800	< 0.45		
Règle d'Agrément (1958)	> 0.65	> 450	L < 4 H < 12		
Agresta	2.5 – 4 2.5 - 4	500 – 700 600 – 800 1250	4.5 1.37	0.11– 0.16	1.2-1.9
Granuland Mortier	3.3	800 700	4.9	0.22 0.15	
Fixolite		480	7	0.11 0.14	
Lithophore	> 1.3	950	< 0.9	0.27	

Ils sont obtenus en remplaçant les granulats par des copeaux de bois. Ces composites sont, donc, constitués d'une matrice cimentaire, éventuellement adjuvantée, et de granulats végétaux de granulométrie comparable à celle des granulats traditionnels quoique que de limites granulaires inférieures en ce qui concerne les plus gros grains (20 mm en général). Les fibres ne sont pas comprises dans la dénomination de granulats de bois.

Les premières techniques de construction de bois remontent aux années 50. En raison de leur richesse en forêts, on trouve plusieurs pays, comme le Canada, l'Autriche etc., dans lesquels la place du béton de bois dans la construction est importante. Il faut en effet rappeler que le bois est une matière première renouvelable et ceci d'autant plus que les granulats de bois sont préparés à partir de plantes annuelles comme le chanvre.

L'utilisation des copeaux de bois dans la fabrication des bétons légers contribue à valoriser certains sous-produits de l'industrie du bois. L'idée de recycler les déchets de bois a fait l'objet de plusieurs études [Van Elten G. J., (1995) ; Yun-Long Yue et al., (2000) ; Eustafieci M., (2002) ; Nenitescu C.D, (1988)]. Les granulats de bois ont été incorporés dans les bétons sous plusieurs formes :

- sous forme de cendre, jouant ainsi le rôle de filler [Naik et al, (1999) ; Campbell A. G. (1990) ; Fehrs, (1996)].
- sous forme de copeaux et de fibres dans une matrice de ciment [Mimoune et al, (1999); Bouguerra A., et al., (1999); Tamba S. et al., (2001); Teoreanu I. et al., (2002) ; Jennifer L., (2004); Pascale C. et al, (2006)].

### I.3.3.2. FORMULATION

Il est à noter que la nature fortement hygroscopique des copeaux de bois empêche une utilisation directe en tant que granulats légers dans les bétons. Une pré-humidification s'avère indispensable pour permettre l'hydratation complète du ciment. Les méthodes classiques, donc, de formulation des bétons ne sont pas applicables pour les bétons à base de granulats légers tel que le bois. La plupart des études se sont basées sur l'optimisation de certains paramètres physiques et mécaniques, tels que la maniabilité, la compacité, la résistance mécanique etc., pour déterminer la composition d'un composite bien déterminé [Ledhem A., (1997)].

### I.3.3.3. PROPRIETES PHYSICO - MECANIQUES

Les propriétés mécaniques et physiques du béton à base de granulats de bois dépendent de la nature et des dimensions des copeaux de bois utilisés [Eustafieci M., (2002) ; Mortreuil F.X. et al, (2002)]. Dans tous les cas, les granulats de bois diminuent la résistance mécanique du béton. Cette diminution est parfois acceptable devant une augmentation des propriétés thermiques et acoustiques. La recherche d'un compromis entre la résistance mécanique et les propriétés thermiques, qui permet une utilisation du matériau dans des éléments isolants porteurs, est possible [Pimienta P., (1994) ; Eustafieci M., (2002), Teoreanu I. et al., (2002)].

La résistance mécanique des bétons de bois est, comme pour tous les bétons classiques, une fonction croissante de la masse volumique ainsi que du dosage en ciment. Elle est également

fonction des caractéristiques des granulats. **Pimienta P. et al** (1994) donne une fourchette de 0.5 à 4 MPa pour des masses volumiques comprises entre 400 et 800 kg/m<sup>3</sup> suivant le type de granulat de bois. Le rapport de la résistance à la compression à la traction est de l'ordre de 2 pour un béton de bois alors que pour béton classique il est de l'ordre de 10. Ceci est essentiellement dû aux faibles valeurs obtenues en compression.

Un traitement approprié pour améliorer certaines caractéristiques du béton à base de granulats de bois est aussi possible : réduire l'absorption d'eau des granulats de bois, augmenter la résistance mécanique et améliorer l'adhérence matrice – copeaux de bois [**Mortreuil F.X. et al**, (2002) ; **Gotteicha M.**, (2005) ; **Eustafieci M.**, (2002)].

En ce qui concerne la conductivité thermique des bétons de bois, et selon la technique utilisée, elle varie entre 0.10 et 0.30 W/m.K. Le DTU [**Règles Th-K77**] fixe la valeur de  $\lambda$  à 0.15 W/m.K pour une masse volumique comprise entre 450 et 650 kg/m<sup>3</sup>. Il faut toutefois noter l'influence du taux d'humidité du composite. On admet l'expression :

$$\lambda (w) = \lambda_{\text{sec}} (1 + 0.025w) \quad (\text{I.6})$$

w est le taux d'humidité en masse,  
 $\lambda_{\text{sec}}$  est la conductivité thermique du matériau à sec.

#### I.3.3.4. DIFFERENTS TYPES DE MATRICES UTILISEES

Les matrices minérales constituant les composites de bois peuvent être résumés comme suit :

- ❖ Matrices à base de ciment [**Schwartz et al**, (1983)] ,
- ❖ Matrices à base de ciment de magnésium[ **Pasner et al**, (1988)],
- ❖ Matrices à base de laitier [**Aho**, (1988)],
- ❖ Matrices à base de chaux[**Sionneau P. et al** (1994)].

#### I.3.3.5. PROBLEMES POSES PAR LES BETONS DE BOIS

Les principaux problèmes posés par les bétons de bois sont leurs variations dimensionnelles et leur forte nature hygroscopique [**Bouguerra A. et al.**, (1994) ; **Ledhem A.** (1997)].

Plusieurs études ont été faites pour remédier à ces problèmes. L'ajout de produits chimiques, généralement des sels d'acides minéraux, a permis d'accélérer la prise et le durcissement mais il faut noter le risque d'accentuer ainsi les variations dimensionnelles de la matrice. L'introduction de sable est également utilisée pour diminuer les variations dimensionnelles. Toutefois il faut toujours respecter le compromis masse volumique variations dimensionnelles. L'ajout de composés pouzzolaniques : roches volcaniques, fumée de silice, laitier de haut fourneaux etc., a été effectué dans différents buts : augmenter les caractéristiques mécaniques, réduire la sensibilité du liants aux extraits du bois, diminuer l'alcalinité du milieu par réaction avec la chaux dégagée par l'hydratation du ciment et restreindre ainsi la libération de substances nocives.

### I.3.4. CONCLUSION

Depuis les années 1950, de nombreux travaux ont été effectués sur le comportement différé du bois. Les résultats expérimentaux et théoriques trouvés permettent l'accès au fond de la problématique du couplage thermo-hydrigue de ce matériau poreux. De même, plusieurs travaux ont été effectués également sur le comportement différé de différents types de bétons.

Connaissant les différents résultats trouvés pour les bois et pour les bétons, et en se référant aux quelques résultats obtenus pour les bétons de bois, il est possible, donc, d'étudier un matériau composite formé de béton de sable et de copeaux de bois. C'est le but du présent travail.

## I.4. BETONS DE SABLE

### I.4.1. INTRODUCTION

Comme tous les pays en voie de développement, l'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, et notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturels et artificiels. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire [**Benaïssa A. et al.**, (1992)].

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 [AFNOR] et se compose de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau. Il se distingue des bétons ordinaires par son moindre dosage en gravillons et des mortiers par son moindre dosage en ciment.

Le béton de sable possède des propriétés physiques et mécaniques qui lui permettent de remplacer le béton ordinaire dans certains usages et résoudre certains problèmes économiques et techniques posés par le béton traditionnel. Pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants etc.

### I.4.2. HISTORIQUE

Le béton de sable est une technique connue depuis fort longtemps et a été utilisé dans plusieurs pays et dans des domaines différents. Les pays les plus connus pour l'utilisation de cette technique sont la France et l'URSS. Le béton de sable trouve en effet ses origines dans «le béton aggloméré », mis au point par le Français **Coignet F.** dans le troisième quart du XIX<sup>e</sup> siècle. Ce matériau se composait à l'époque de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Plusieurs ouvrages ont été réalisés à partir de ce matériau et constituent les premières applications de cette technique [**RAPPORT- SABLOCRETE (1987-1991)**]. On peut citer à titre d'exemple : le mur de soutènement à Passy, la maison COIGNET à Saint Denis, la tour de port Said (h=52m) en Egypte et le pont de New York.

La possibilité d'obtenir des niveaux élevés de résistance avec l'utilisation des gros granulats a fait tomber, à une certaine époque, le béton de sable dans l'oubli. A la fin de la deuxième guerre mondiale, le béton de sable revient en force grâce à ses propriétés spécifiques, à la pénurie des gros granulats dans certaines régions et bien entendu à la disponibilité de gros gisements de sable [**Benaïssa A. et al**, (1992)].

Dans les dernières décennies, et vu notamment l'insuffisance de connaissances dans son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau.

#### I.4.3. INTERETS D'UTILISATION DES BETONS DE SABLE

Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Par contre il exige parfois des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques [**Chauvin J.J. et al.**, (1988)]:

♣ **La maniabilité:** le béton de sable, étant plus maniable, permet de faciliter la mise en œuvre, de diminuer l'énergie de la mise en place et d'augmenter les longueurs de pompage.

♣ **La cohésion et l'absence de ségrégation:** le béton de sable assure une assez bonne cohésion, et une absence de ségrégation due à la variation peu importante entre les dimensions des grains.

♣ **Le poids plus faible:** C'est une propriété recherchée dans les travaux de réhabilitation, utilisant des structures anciennes ou pour un matériau de remplissage des structures neuves.

♣ **Faible granularité:** Ce qui rend le béton de sable utile dans les travaux d'injection et pour le bétonnage des milieux fortement ferrailés.

♣ **Bel aspect de surface:** le béton de sable permet la réalisation d'effet architectonique tant sur la forme que sur l'aspect.

Ajoutons à tout cela l'abondance de la matière première dans certaines régions, et la raréfaction des gros granulats.

#### I.4.4. LIMITES DES BETONS DE SABLE

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques [**Chauvin J.J. et al.**, (1988)]:

**i)- Raisons économiques:** L'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment n'est pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas « un plus » dans l'usage envisagé il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé.

**ii)- Raisons techniques :** Le peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable (comme le retrait, fluage, durabilité etc.), exclut, peut être en ce moment, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.

#### I.4.5. DOMAINES D'APPLICATION

Le béton de sable a été utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes [**Chauvin J.J. et al.**, (1988)] :

- dans la préfabrication: murs architecturaux, mobiliers urbains, en bâtiment, voirie, etc.
- dans la projection: travaux de rénovation, ponts, égouts visitables, en bâtiments etc.

- comme béton de sable coulé: dans les routes, autoroutes, aéroports, en bâtiment, etc.

#### **I.4.6. CARACTERISTIQUES DU BETON FRAIS**

##### **I.4.6.1. MANIABILITE**

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Pour un béton de sable, où les grains des granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique, la quantité d'eau nécessaire est plus élevée que celle d'un béton ordinaire. Par conséquent, le rapport E/C (eau/ciment) est nettement supérieur à celui des bétons classiques et se situe généralement entre 0.6 et 0.7. Mais si nous considérons le rapport E/(C+F) (eau/ciment+filler), nous constatons qu'il est similaire à celui d'un béton ordinaire [Projet " *SABLOCRETE* ", (1994)].

##### **i)- EFFET DES FILLERS**

En général, selon la granulométrie du sable, la maniabilité s'améliore avec l'augmentation du dosage en fines (ciment ou filler) [Bederina M., (2000) ; Guoxue Z. et al, (2006)]. Pour certains sables, dunaires par exemple, elle chute, mais après un certain optimum, elle commence à s'améliorer [Chaouche A.A, (1993)]. La maniabilité dépend aussi de la nature des fines incorporées. Logiquement, l'ajout de fines de type sphérique, en diminuant la quantité des vides, devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité [Projet " *SABLOCRETE* ", (1994)].

##### **ii)- EFFET DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE**

Plus le diamètre des grains est grand, meilleure est la maniabilité. Si nous parlons en terme de module de finesse, nous pouvons dire que la maniabilité chute avec l'augmentation du module de finesse [Chauvillard, G et al, (1996) ; Bederina M., (2000) ; Bederina M. et al, (2006)].

##### **iii)- EFFET DU RAPPORT E/C**

A dosage égal en ciment, la maniabilité dépend (comme pour les autres bétons) du rapport E/C ou E/(C+F). Elle augmente généralement avec l'augmentation de ce rapports [Benmalek, M, (1997) ; Bederina M. et al., (2005)].

##### **I.4.6.2. COMPACITE**

La compacité est l'un des paramètres qui influent sur les performances du béton. Or dans un mélange granulaire, plus le diamètre du plus gros grain diminue, plus la porosité augmente. C'est le cas des granulats des bétons de sable, où le diamètre ne dépasse pas 5 mm. Bien que dans ce cas-là cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines, le béton de sable reste toujours moins compact qu'un béton ordinaire [C.E.B.T.P, (1986)].

##### **i)- EFFET DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE**

Plus la porosité du sable est importante, plus le besoin en fines est élevé. Or la porosité dépend de la granulométrie du sable, qui, elle-même, dépend de la nature du sable. A titre d'exemple, un béton de sable alluvionnaire ( $D_{max} \approx 5$  mm) nécessite moins de fines qu'un béton de sable dunaire ( $D_{max} < 1$ ).

## ii)-EFFET DES AJOUTS DE FINES

En général, plus le dosage en fillers augmente, meilleure est la compacité [Chauvin J.J, 1988]. Mais, il faut noter qu'il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer [Bederina M., (2000) ; Bederina M. et al., (2005)]. D'autre part, Plus la finesse des fillers est grande, plus ce dosage optimal en fillers est important et la compacité du béton est plus élevée [Projet " *SABLOCRETE* ", (1994)].

### I.4.6.3. FORMULATION

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques. Dans le cas des bétons, il existe de nombreuses méthodes de formulation permettant de viser les deux propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance, en se fixant généralement la taille des plus gros grains des granulats. Pour les bétons de sable, qui font partie des nouveaux bétons aux propriétés spécifiques intéressantes (finesse, ouvrabilité...), la démarche de formulation demeure très empirique. Différentes approches ont été envisagées pour appréhender les caractéristiques de résistance. Par contre la prise en compte de l'ouvrabilité comme critère de formulation demeure complexe.

Un béton de sable, confectionné essentiellement de sable dont la surface spécifique est très grande, a besoin davantage d'eau et de ciment. Or l'influence négative d'un fort dosage en ciment sur le coût et d'un fort dosage en eau sur les caractéristiques mécaniques et le retrait est bien connue. Il est donc judicieux de remplacer une partie du ciment par du filler et limiter le dosage en eau par l'emploi des adjuvants. Enfin nous pouvons dire que pour formuler un béton de sable, il faut combiner les deux paramètres : maniabilité et compacité [Chauvillard, G et al, (1996)].

Dans la plupart des études rencontrées dans la littérature, des compositions ont été proposées pour des matériaux bien déterminés. Les compositions optimales obtenues sont presque toujours basées sur la combinaison des deux paramètres indiqués précédemment : la compacité et la maniabilité. La seule méthode de formulation qui semble plus ou moins généralisée est celle publiée par LCPC [Chauvillard, G et al., (1996)]. Cette méthode se base également sur les mêmes paramètres cités auparavant.

## I.4.7. CARACTERISTIQUES DU BETON DE SABLE DURCI

### I.4.7.1. COMPORTEMENT MECANIQUE

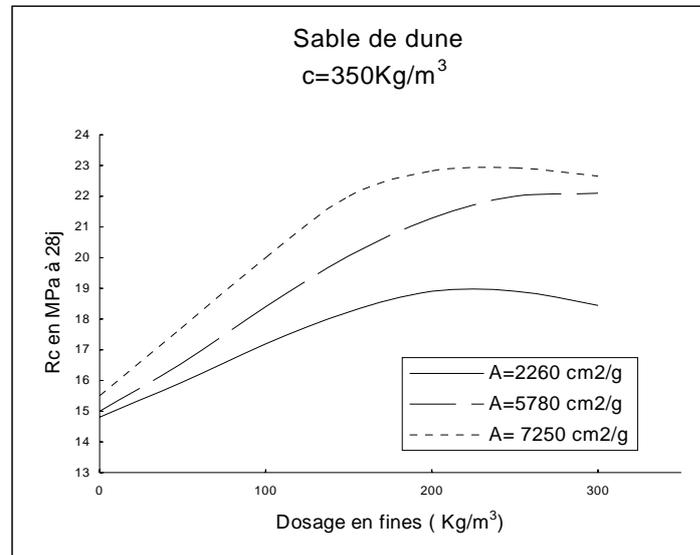
La plupart des études faites sur le béton de sable, surtout celles des années 80, avaient pour but l'amélioration de la résistance. Très peu d'entre elles ont traité d'autres caractéristiques.

#### i)- EFFET DES FILLERS

Le dosage, la finesse et la nature des fines ont une influence sur la résistance mécanique du béton de sable [Sablocrete, (1994)].

Le dosage et la finesse augmentent la compacité. Or l'augmentation de la compacité augmente la résistance [Bederina M., (2000) ; Bederina M. et al., (2005) ; Guoxue Z. et

al., (2006)]. En ce qui concerne la nature des fines, différentes natures ont été essayées et comparées. Le résultat obtenu est que les fines calcaires sont les plus réactives avec le ciment et donnent les meilleures résistances [Coquillat G. (1992), Tsivilisa S. et al., (2000)].



**Fig. I.4** : Effets du dosage et de la finesse de l'ajout sur la résistance à la compression du béton de sable - d'après [Sablocrete, (1994)]

## ii)- EFFET DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE

La résistance n'est pas trop influencée par le diamètre maximal des grains de sable ( $D_{max}$ ) si l'on maintient le rapport E/C fixe. Mais la maniabilité s'améliore avec l'augmentation de  $D_{max}$ . Par contre à des rapports E/C différents et à une maniabilité constante, la résistance diminue avec la diminution de  $D_{max}$ . Ceci est dû, comme nous l'avons déjà vu, au besoin plus élevé en eau. Notons qu'à une même maniabilité, la résistance du béton de sable dunaire est nettement inférieure à celle du béton de sable alluvionnaire [Couret B, (1982) ; C.E.B.T, (1986)].

## iii)- EFFET DU RAPPORT E/C

Comme pour tous les bétons, la résistance du béton de sable diminue avec l'augmentation du rapport E/C.

Pour des compositions avec un dosage en ciment de 250 à 450 kg/m<sup>3</sup>, la résistance est atteinte par adjonction de fines (calcaires généralement) et de plastifiant ; La résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60 MPa selon la composition, l'adjuvant et le mode de la mise en œuvre.

## **I.4.7.2. AUTRES PROPRIETES**

### **I.4.7.2.1. ADHERENCE AUX ARMATURES**

Le béton de sable adhère bien aux armatures. La contrainte d'adhérence moyenne se situe en une bonne position par rapport à celles des bétons traditionnels [Benmalek et al., (1997)]. La granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel puisque à même niveau de résistance, l'adhérence mesurée pour un sable dunaire (très fin) est supérieure à celle obtenue pour un sable alluvionnaire [Projet "SABLOCRETE", (1994)].

La nature des aciers (lisse ou tors) ainsi que leur diamètre ont aussi une influence sur la valeur de l'adhérence [Amrani Y, (1991)].

### **I.4.7.2.2. RETRAIT**

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons (de sable et ordinaire) en fin d'essai (6 mois) est égal à 1.6 correspondant globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48. En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage) [Chaouche, A.A, (1993)], [Benaissa A. et al., (1992)], [Benaissa A., (1992)]. Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire.

### **I.4.7.2.3. FLUAGE**

La cinétique du fluage du béton de sable est plus rapide que celle du béton ordinaire. Les valeurs du fluage du béton de sable sont deux fois plus importantes que celles du béton ordinaire. Notons que ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25 MPa. Un béton de sable plus résistant n'aura pas le même comportement (un fluage plus faible) [Chaouche, A.A, (1993) ; Benaissa A. et al., (1992) ; Benaissa A., (1992)].

### **I.4.7.2.4. DURABILITE**

Les paramètres: porosité, organisation géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons ordinaires. Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Cette distribution poreuse particulière contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis à vis des essais de durabilité [Projet "SABLOCRETE", (1994)].

### **I.4.7.2.5. COMPORTEMENT THERMIQUE**

Il est peut être préférable de comparer les propriétés thermiques des bétons de sable à celles des bétons traditionnels. Cette comparaison montre que ces deux types de béton ne sont pas très différents du point de vue de la thermique. La chaleur massique d'un béton étant égale à la somme des chaleurs massiques de ses constituants, il est normal de trouver une valeur

similaire pour les deux types de béton. La conductivité thermique des bétons traditionnels varie de 1.4 à 1.8 W/m/°C. Les conductivités thermiques mesurées sur béton de sable sont légèrement inférieures. Le béton de sable est alors plus isolant. Ce résultat s'explique par la porosité plus importante du béton de sable.

Les coefficients d'échange thermique sont supérieurs pour le béton de sable et le coefficient de dilatation est du même ordre de grandeur [Projet " **SABLOCRETE** ", (1994)].

#### **I.4.7.2.6. PERMEABILITE**

Bien que le béton de sable soit plus poreux qu'un béton traditionnel, Il est moins perméable. Ceci est peut être surprenant. Mais la taille et la répartition des pores ne facilitent pas la migration de la vapeur à travers le béton. C'est une donnée importante dans le domaine d'isolation des bâtiments.

#### **I.4.7.2.7. MICROSTRUCTURE ET FISSURATION**

A une certaine échelle, la microstructure du béton de sable est continue, homogène et compacte. La pâte de ciment durcie est amorphe et dépourvue de fissures notables. Les observations au MEB établissent que l'hydratation se développe de façon normale et la morphologie de l'interface pâte-granulats ou auréole de transition n'est pas caractérisée par une texture particulière [Rapport **SABLOCRETE**, (1991)]. Le caractère peu fissuré du matériau est corroboré par les travaux de **M. Shejin [Benaissa A., (1992)]**. Par ailleurs, il a été montré la bonne homogénéité due à l'absence de ségrégation [Rapport **SABLOCRETE**, (1991)].

#### **I.4.8. LE BETON DE SABLE ETUDIE DANS LE PRESENT TRAVAIL**

Les deux bétons de sables, dunaire et alluvionnaire, formant la matrice des composites étudiés dans le présent travail ont déjà fait l'objet d'une étude entrant dans le cadre de la préparation du diplôme de magister [**Bederina M., (2000)**]. Une étude rhéologique, mécanique et microstructurale a été effectuée. Notons qu'un troisième béton de sable, a été également étudié. C'était un béton de sable alluvionnaire-dunaire où on a mélangé les deux sables dunaire et alluvionnaire selon des proportions déterminées. Les résultats obtenus sont résumés comme suit :

- L'étude de l'influence de certains paramètres sur la résistance à la compression et sur la résistance à la flexion a confirmé l'existence de dosages optimaux en filler. L'augmentation du dosage en ciment, jusqu'à 450 Kg/m<sup>3</sup>, augmente la résistance. L'augmentation de la finesse des fillers augmente aussi la résistance. A maniabilité constante, le rapport E/C est supérieur à celui des bétons classiques, ce qui impose l'utilisation des adjuvants. Les modules d'élasticité sont inférieurs à ceux des bétons ordinaires.
- Une étude de la fissuration a été également établie. Il a été montré que la résistance à la propagation d'une fissure existante est du même ordre de grandeur que celle des bétons classiques et le comportement du béton de sable est élastique et fragile. La granulométrie des sables et le dosage en filler ont aussi marqué leur influence sur cette résistance. L'observation des bétons de sable par microscope à balayage (MEB) a montré que ceux-ci présentent une texture plus ou moins homogène et leur aspect général ne fait pas paraître de fissures notables.

La conclusion qu'on a pu tirer, enfin, était que la granulométrie a marqué nettement son influence dans chaque étude. Une correction granulaire, réalisée en mélangeant, à des proportions déterminées, le sable de dune avec le sable alluvionnaire, a permis de donner un béton de sable plus maniable, plus compact, plus résistant à la compression, plus résistant à la flexion et plus résistant à la fissuration. Il peut donc être utilisé dans la construction locale, dans certains éléments porteurs ou non. Notons qu'avec la multiplication d'adjuvants et avec une mise en œuvre appropriée nous pouvons augmenter davantage les performances de ce béton.

Le **tableau I.8** suivant regroupe les principaux résultats trouvés :

**Tableau I.8** : Principaux résultats obtenus dans des travaux précédents pour les mêmes bétons de sable étudiés dans le présent travail [**Bederina M.**, (2000) ; **Bederina M. et al.**, (2005)]

Caractéristiques	Béton de sable dunaire	Béton de sable alluvionnaire	Béton de sable alluvionnaire-dunaire
Composition optimale (kg/m <sup>3</sup> )	C : 350 S : 1305 F : 200 E : 245 SP : 1.5 %	C : 350 S : 1465 F : 150 E : 210 SP : 1.5 %	C : 350 S : 1475 F : 140 E : 207 SP : 1.5 %
Résistance à la compression (MPa)	16.80	19.00	25.50
Résistance à la flexion (MPa)	3.68	4.18	5.8-0
Module d'élasticité (MPa)	20 000	22 000	25 000
Taux de restitution d'énergie (J/m <sup>2</sup> )	14.5	17.20	24.50
Intégrale de RICE (J/m <sup>2</sup> )	15.82	19.94	26
Microstructure	Les 3 bétons sont relativement homogènes, pas de fissures notables, grains de sable bien enchevêtrés et enveloppés dans la pâte de ciment et une bonne adhérence grains-pâte de ciment		

#### I.4.9. CONCLUSIONS

Pour avoir un béton de sable avec de bonnes performances mécaniques, Il faut veiller à ce que le béton soit le plus compact possible en choisissant des sables de bonne granulométrie et ayant le plus gros diamètre possible et en comblant bien les vides intergranulaires avec la proportion qu'il faut avec des fillers de bonne nature et de finesse élevée. Notons qu'une bonne mise en œuvre a aussi son effet sur la compacité du béton.

Les essais de retrait, de fluage, d'adhérence aux armatures et de durabilité n'ont fait pratiquement l'objet que de peu d'études récentes. Les résultats obtenus ne concernent que des matériaux et des compositions bien déterminés.

## I.5. GENERALITES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES

### I.5.1. GENERALITES

Le transfert de chaleur est un phénomène d'échange d'énergie qui intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température. Le transfert de chaleur se fait en réalité selon trois modes particuliers : *conduction*, *rayonnement* et *convection*. La connaissance des propriétés thermophysiques d'un matériau permet de comprendre ou de prévoir son comportement lorsqu'il est soumis à des variations de température. Les propriétés thermophysiques qui doivent être généralement connues sont : la diffusivité thermique, la conductivité thermique, la chaleur massique et l'enthalpie de transformation.

### I.5.2. DIFFERENTS PARAMETRES DE TRANSFERT DE CHALEUR

#### I.5.2.1. CONDUCTIVITE THERMIQUE

Le processus de conduction de la chaleur s'effectue spontanément des corps les plus chauds vers les plus froids. La relation fondamentale qui décrit ce phénomène de conduction a été proposée par **Joseph Fourier** en 1822.

On considère que le transfert de chaleur s'effectue par conduction pure, dans la matrice solide et le gaz interstitiel immobile, en l'absence de convection naturelle et transfert de chaleur par rayonnement. La densité de flux thermique  $\varphi$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) est exprimée par la loi de Fourier :

$$\varphi = -\lambda.\text{grad}T \quad (1.7)$$

où  $\lambda$  est le **coefficient de conductibilité thermique** ou **conductivité thermique**. Il traduit l'aptitude d'un matériau à conduire de la chaleur. Par convention, le sens des coordonnées croissantes est pris dans le sens de l'écoulement de la chaleur. Ainsi le gradient de température est de sens inverse à celui du flux de chaleur.

♦ Pour des matériaux homogènes anisotropes, le vecteur flux de chaleur n'est plus colinéaire au vecteur gradient de température. Dans ce cas, les composantes du vecteur flux de chaleur  $\varphi$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) sont des combinaisons linéaires des gradients de température. On a, en coordonnées cartésiennes :

$$\varphi_i = -K_{i1}\frac{\partial T}{\partial x} - K_{i2}\frac{\partial T}{\partial y} - K_{i3}\frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{avec } i=1, 2, 3 \quad (1.8)$$

Les coefficients  $K_{ij}$  sont les composantes d'un tenseur ( $\overline{\Lambda}$ ) d'ordre deux. La loi de Fourier s'écrit alors sous la forme tensorielle :

$$\varphi = -\overline{\lambda}\text{grad}T \quad (1.9)$$

♦ Pour des matériaux hétérogènes anisotropes tels que les composites, les milieux fibreux, etc., la relation précédente peut également être utilisée si l'on peut définir un milieu homogène équivalent.

### I.5.2.2 DIFFUSIVITE THERMIQUE

Lorsqu'un flux de chaleur, de densité  $\varphi$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) traverse un matériau isotrope et homogène, l'équation de conservation de l'énergie en conduction pure s'écrit :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}\varphi = 0 \quad (1.10)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du matériau ;  $C$  la chaleur massique à pression constante.

La densité de flux de chaleur  $\varphi$  donnée par la relation (1.8) et l'équation (1.10) devient :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(-\lambda \text{grad}T) \quad (1.11)$$

Pour un intervalle de température suffisamment faible, on peut considérer que la conductivité  $\lambda$  est, en général, constante. L'équation précédente s'écrit alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\Delta T}{\Delta x^2} \quad (1.12)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (1.13)$$

Le coefficient « a » est appelé la *diffusivité thermique* du matériau. La mesure de la diffusivité et des paramètres  $\rho$  et  $C$  permet la détermination indirecte de la conductivité thermique.

### I.5.2.3. EFFUSIVITE THERMIQUE

L'*effusivité thermique* « b », ou *coefficient d'arrachement thermique*, est la propriété qu'a un corps d'arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact. Elle caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Plus elle est grande, plus le matériau absorbe rapidement les apports de la chaleur.

Considérons un matériau semi-infini porté à une température uniforme  $T_0$ . La face de ce matériau, située en  $x = 0$ , est portée brusquement à une température constante  $T_1$ .

La résolution de l'équation de la chaleur permet le calcul de la densité de flux qui traverse le matériau en  $x = 0$  ; on obtient :

$$\varphi = (T_1 - T_0) \left( \frac{\lambda \rho C}{\pi t} \right) \quad (1.14)$$

La densité de flux  $\varphi$  est proportionnelle au paramètre b :

$$b = (\lambda \rho C)^{1/2} \quad (1.15)$$

Puisque l'effusivité intervient lors d'un contact thermique entre deux milieux, Cette grandeur joue un rôle important dans l'étude en régime variable des parois multicouches. D'une manière générale, on montre que le corps qui a la plus grande effusivité tend à imposer sa température.

#### I.5.2.4. CHALEUR MASSIQUE

La *chaleur massique* est un paramètre important dans la modélisation des phénomènes de transfert thermique dans les matériaux en régime transitoire. Elle traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner de la chaleur. C'est un paramètre qui varie faiblement avec la température de l'ambiance mais de façon importante avec l'humidité relative.

En régime non-stationnaire, l'évolution des températures dans un matériau est liée à son inertie thermique. D'ailleurs, on introduit parfois la notion d'inertie thermique pour définir la capacité thermique d'un matériau.

$$C = \frac{b}{\lambda\rho} \quad (1.16)$$

#### I.5.3. DIFFERENTES TECHNIQUES DE MESURE

De nombreuses méthodes et différents instruments de mesure ont été utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux. Aujourd'hui, et avec l'évolution des appareillages de mesure (ordinateur, etc.) et des systèmes d'acquisition de données couplés à des techniques d'inversion et de traitement de signal, la qualité de mesure est meilleure. Plusieurs paramètres, de milieux ou systèmes hétérogènes, peuvent être estimés simultanément avec des conditions instrumentales simplifiées.

La littérature est très abondante dans ce domaine et de nombreuses techniques de mesures sont aujourd'hui brevetées et normalisées [Degiovanni A., Kubicar L. et al., (1999)] :

##### I.5.3.1. SELON LE MODE DE CHAUFFAGE

Selon le mode du chauffage de l'échantillon étudié on distingue :

**i)- LES METHODES ELECTROTHERMIQUES** : Le chauffage du matériau est obtenu à l'aide d'une résistance électrique.

**ii)- LES METHODES PHOTOTHERMIQUES** : Le matériau est chauffé, donc, par l'absorption des photons ou, plus rarement, par des électrons [Hay B. et al., (1973)].

##### I.5.3.2. SELON LE REGIME DE CHAUFFAGE

Selon le régime du chauffage employé, on distingue deux grandes classes :

**i)- EN REGIME STATIONNAIRE** (permanent) : il s'agit de chauffer un échantillon sur une de ses faces, de le refroidir sur l'autre et de mesurer, en régime stationnaire, la différence de température résultante. Connaissant la densité de flux d'énergie utilisée pour le chauffage, la conductivité est calculée à travers la relation de Fourier (ex. : la plaque chaude gardée).

Cette méthode est, donc, principalement utilisée pour des mesures de la conductivité thermique. De nombreuses techniques ont été développées, dont les plus connues sont, la technique de la plaque chaude gardée [Devisme J.M., (1980)], la méthode du fil chaud [Zhang X. et al., (1993) ; Hladik J., (1990)] et la méthode des cylindres coaxiaux [Hladik J., 1990]. Il faut noter enfin que cette méthode a toutefois ses limites en ce qui concerne la précision de la mesure (fuites thermiques par les capteurs, qualité des contacts capteurs-matériau, etc.).

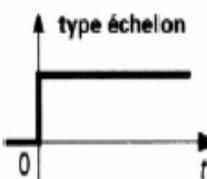
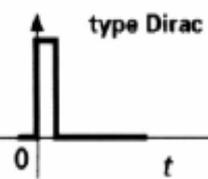
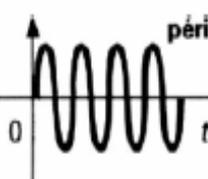
**ii)-EN REGIME NON-STATIONNAIRE** (variable) : Les méthodes en régime variable, les plus utilisées actuellement, sont fondées sur l'exploitation de la variation de la température dans l'échantillon en régime transitoire après une excitation (la sonde à flux linéaire). Toutes

ces méthodes consistent à appliquer, sur un échantillon à l'équilibre, une perturbation thermique, et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps. Ce qui les différencie :

- le type de perturbation (échelon, Dirac, périodique ou quelconque);
- le type de mesure (et le lieu) (températures et/ou flux);
- la géométrie du problème (mur, cylindre, sphère).

Le **tableau I.9** présente la classification de ces méthodes selon ces trois critères.

**Tableau I.9.** : Méthodes en régime variable d'après [Degiovanni A, Degiovanni A].

													<b>Perturbations</b>											
													type échelon			type Dirac			périodiques			de forme quelconque mais finie		
																								
<b>Géom - étrie</b>	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3												
<b>I</b>				A			B																	
<b>II</b>		C		D	E, F		G																	
<b>III</b>	H						I																	
<b>IV</b>	N	O	P	Q				J		K	L, M													
<b>Mesures :</b>																								
I : Température sur la perturbation							<b>Géométrie du problème</b>																	
II : Température hors de la perturbation							1 : Mur																	
III : Températures							2 : Cylindre																	
IV : Flux et une température							3 : Sphère																	

Dans les milieux poreux humides, l'établissement d'un flux permanent entraînerait une migration de l'eau interstitielle alors que l'utilisation des sondes à choc thermique permet d'éviter en grande partie ce phénomène. D'autre part, les méthodes en régime permanent ne permettent d'atteindre que la conductivité thermique alors que les transferts en régime transitoire font intervenir la diffusivité et/ou l'effusivité.

Parmi les méthodes non stationnaires on peut citer:

**a)- METHODE DU THERMOCOUPLE CHAUFFANT**

C'est une variante du fil chaud qui a été proposée par **Bastian G**. Le principe consiste à insérer un thermocouple comme élément chauffant avant le coulage du matériau, ce qui diminue considérablement la résistance de contact. Ce thermocouple servira aussi comme capteur de température d'où l'avantage de cette méthode.

**b)- METHODE DU FILM CHAUFFANT [Hladik J., (1990)]**

Cette méthode a été proposée par **Vernotte P.** en 1937. Les mesures de diffusivité thermique ont été réalisées par la méthode d'impulsion finie (**Seipold**, 1988). Une impulsion d'énergie finie de quelques secondes est produite au centre de l'éprouvette par un filament chauffant. Cette impulsion se propage radialement et est enregistrée par un thermocouple placé à une distance  $d$  de l'axe de l'éprouvette. La réponse thermique de l'échantillon est mesurée pendant quelques secondes.

**c)- TECHNIQUES DE MESURES AVEC LES SONDES A CHOC THERMIQUE  
« METHODE DE LA SONDE MONOTIGE »**

Dans ces techniques on utilise un élément chauffant, en général filiforme, placé dans le matériau et on effectue une mesure de la température en un point du matériau, situé soit sur l'élément chauffant (sonde monotige), soit à une certaine distance de celui-ci (sondes bitige ou tritige, etc.). Cette méthode, connue depuis longtemps, a été largement utilisée par un grand nombre d'auteurs [**Perrin B.**, (1985)] et plusieurs montages ont été conçus à partir de cette méthode.

**d)- METHODE DE LA SONDE PLANE**

Elle fait partie des sondes à choc. Le signal d'entrée est le flux de chaleur dissipé par effet Joule dans l'élément chauffant et le signal de sortie est l'élévation de température mesurée au centre de la sonde.

Une résistance de chauffage est insérée entre deux blocs d'échantillons. Cette sonde débite une puissance constante par unité de surface pendant un bref laps de temps (quelques centaines de secondes) au milieu environnant.

L'élévation de la température superficielle prise au milieu de la sonde par une thermocouple, en fonction du temps, permet de déterminer l'effusivité thermique [**Bouguerra A.**, 1997, **Zhaing X. X.**, 1993].

**e)- METHODE FLASH**

Depuis sa découverte par **Parker et al** [**Hay B.**, **Filtz, J. et al.**], la méthode flash constitue une des méthodes les plus utilisées pour la mesure de la diffusivité thermique d'échantillons solides. La première expérience par méthode flash est une mesure de diffusivité effectuée par **Rudkin et al.**, en 1962.

Le principe consiste à produire une excitation thermique de courte durée sur l'une des faces de l'échantillon et à observer l'évolution de la température sur l'autre face (ou sur la même suivant le dispositif de mesure).

A partir de ce thermogramme, il est possible, par la technique inverse, de déterminer la conductivité thermique du matériau et éventuellement sa capacité thermique massique. Son extension à des matériaux poreux humides, multicouches, composites stratifiés, et semi-transparents et à des mesures des autres paramètres thermiques a été développée par la suite [**Philippi I. et al.**, (1994) ; **Degiovanni A.**].

**f)- METHODE DE LA BANDE CHAUFFANTE (T.H.S)**

La méthode THS est très semblable ou étroitement liée à la technique du fil chaud. La différence essentielle est l'utilisation d'une bande mince en métal au lieu d'un fil. Cette technique a été développée par **S. E.Gustafsson** [**Kubicar L. et al.**, (1999)].

Le principe consiste à placer entre deux échantillons de même composition une bande métallique faisant office d'élément chauffant et de capteur de température [Kubicar L. et al., (1999)].

Après l'établissement de l'équilibre thermique, une puissance constante, que l'on mesure, est appliquée pendant une courte durée et la variation de température de la bande est obtenue à partir de la mesure de sa résistance. La variation de la température de la sonde d'après Gustafsson est donnée par la relation :

$$\Delta T(t) = \frac{q}{2\sqrt{\pi}\lambda} \left\{ \tau_c \operatorname{erf}(\tau_c^{-1}) - \frac{\tau_c^2}{\sqrt{4\pi}} [1 - \exp(-\tau_c^{-2})] - \frac{1}{\sqrt{4\pi}} E_i(-\tau_c^{-2}) \right\} \quad (1.17)$$

Avec :

$\lambda$  : la conductivité thermique du matériau ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

$q$  : la chaleur dégagée par unité de longueur de bande ( $J.m^{-2}$ ).

$\tau_c$  : le temps caractéristique donné par la relation :

$$\tau_c = \frac{\sqrt{4at}}{w_h} \quad (1.18)$$

Avec :

$a$  : La diffusivité thermique du matériau ( $m^2.s^{-1}$ )

$t$  : Le temps de mesure (s)

$w_h$  : Largeur de la bande (m)

$\operatorname{erf}(x)$  est sa fonction erreur et  $-E_i(x)$  est l'intégrale exponentielle :

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-v^2) dv \quad (1.19)$$

$$-E_i(x) = \int_x^\infty v^{-1} \exp(-v) dv \quad (1.19)$$

Gustafsson a montré que pour des valeurs de  $w_h \ll \sqrt{4at}$ , la variation de la tension de la bande chauffante peut être approchée par la relation suivante [Gustafsson S.E., (1987)] :

$$\Delta U(t) = \frac{\alpha U_0^2 I}{4\pi l \lambda} \left( \ln t + \ln \frac{45a}{w_h^2} \right) \quad (1.20)$$

Avec :

$\alpha$  le coefficient de température de la bande ( $K^{-1}$ )

$I$  l'intensité d'alimentation (A)

Les propriétés thermophysiques sont déterminées à partir de la droite donnant  $\Delta U(t)$  en fonction du  $\ln(t)$  dont la pente  $m$  et la constante  $n$  sont données par :

$$m = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (1.21)$$

$$n = m \ln \left( \frac{45a}{w_h^2} \right) \quad (1.22)$$

La conductivité et la diffusivité thermiques du matériau étudié sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$\lambda = \frac{\alpha U_0^2 I}{4\pi l m} \quad (1.23)$$

$$a = \frac{w_h^2}{45} \exp \left( \frac{n}{m} \right) \quad (1.24)$$

Cette technique a fait l'objet d'améliorations, ce qui conduit au développement d'une technique qui porte le nom de son inventeur « Sonde de **Gustaffson** » ou TPS « Transient Plane Source ». Elle est commercialisée par l'entreprise « Hot Disk ». Celle-ci fera l'objet d'une étude détaillée dans le **chapitre II** (§II.3.3.1).

## I.6. GENERALITES SUR LES TRANSFERTS HYDRIQUES

### I.6.1. DIFFUSIVITE HYDRIQUE

Si l'écoulement est considéré unidirectionnel, le seul paramètre intervenant dans le phénomène de transfert d'humidité est la diffusivité hydrique  $D_w$ . Ce paramètre représente, en réalité, la somme de la diffusivité hydrique de la phase vapeur  $D_{wV}$  et de la diffusivité hydrique de la phase liquide  $D_{wL}$ .

Le premier est dominant dans le cas des faibles teneurs en eau tandis que le deuxième est dominant dans le cas des fortes teneurs en eau. Plus de détails sur ce phénomène seront présentés dans l'étude hydrique (**Chap.III**, §III.4.3.2).

❖ Le coefficient de transport en phase vapeur  $D_{wV}$  est déterminé à partir de l'isotherme de sorption [**Daïn J.F.**, (1986) ; **Merouani L.**, (1987) ; **Couasnet Y.**, (1989) ; **Quénard D.**, (1989)].

❖ Le coefficient de transport en phase liquide est déterminé à partir des profils hydriques types  $\theta(b)$  où  $b$  est le variable de *Boltzmann* ( $b=z.t^{1/2}$ ). Les profils types sont déterminés en étudiant l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau  $\theta(z,t)$  dans le matériau lorsque celui-ci est exposé à une absorption d'eau par capillarité. Les techniques utilisées pour suivre l'évolution de la teneur en eau dans le temps et dans l'espace, dans le matériau, sont la technique de l'atténuation des rayons gamma et l'imagerie par résonance magnétique nucléaire [**Crausse P.**, (1983) ; **Perrin B.**, (1985) ; **Bellini J.A.**, (1992) ; **De Freitas V.P et al.**, (1995) ; **Kauffmann J et al.**, (1997)].

En raison de la difficulté d'accéder à un tel matériel dans la plupart des laboratoires, une nouvelle technique a été développée par **Goual M.S.** (2001). C'est une technique gravimétrique qui sert à déterminer les profils hydriques. Les résultats obtenus avec cette méthode ont été comparés à ceux obtenus avec la méthode des rayons gamma et ont été jugés satisfaisants. Plus de détails sur la détermination de la diffusivité hydrique avec cette méthode seront donnés au **Chapitre II** (§ II.3.4.3).

### I.6.2. Sorptivité

En plus du coefficient de transport hydrique  $D_w$ , un autre paramètre, appelé « sorptivité 'S<sub>w</sub>' », a été déterminé dans le présent travail. Il caractérise la capacité d'un matériau poreux, rigide et non saturé à absorber de l'eau par capillarité [**Philip J.R.**, (1957)]. C'est un paramètre qui peut être facilement déterminé et qui est de plus en plus utilisé pour la mesure de la tenue d'un matériau lorsqu'il est exposé à des fluides dans des environnements agressifs. Une présentation théorique et expérimentale sera donnée lors de l'étude hydrique au **chapitre II (§II.3.4.2)**.

Notons enfin qu'il est possible d'estimer la diffusivité hydrique à partir de l'essai de sorptivité. Dans un essai typique, l'absorption cumulative est proportionnelle à la racine carrée du temps. Toutefois, un certain nombre de chercheurs ont observé un comportement différent, notamment quand il y'a un certain potentiel d'interaction chimique et mécanique entre le fluide et le matériau. Dans ce cas l'interprétation courante de cet essai et l'évaluation de la diffusivité hydrique ne sont plus évidentes [ **Küntz M. et al.**, (2001) ; **Lockington D. A. et al.**, (2003) ; **Abd El-Ghany E. A. et al.**, (2004) ].

## I.7. MODELES D'ESTIMATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE ET DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

### I.7.1. MODELE DE PREDICTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE

La résistance mécanique d'un matériau est fortement influencée par la porosité et l'état de la matrice (homogénéité, défauts, etc.). Le problème a fait l'objet de plusieurs études. Un certain nombre de chercheurs se sont penchés sur l'étude de la porosité des matériaux et son influence sur leur résistance mécanique. Les premières études remontent à 1892 et sont dues à **Feret R.** (1892) qui a développé, pour les bétons, la relation empirique :

$$R_c = F' [V_c / (V_c + V_w + V_a)]^2 \quad (I.25)$$

où

$R_c$  est la résistance à la compression à un age donné,

$F'$  est une constante,

$V_c$ ,  $V_w$ ,  $V_a$  sont les volumes respectifs de ciment, eau et air.

Toutefois, cette relation ne tient pas compte du degré d'avancement de l'hydratation qui est un facteur déterminant de la porosité. Les premiers travaux dans ce sens sont attribués à **Power T. C.** (1960), qui a établi la relation empirique suivante pour une pâte de ciment :

$$R_c = A' . X^k \quad (I.26)$$

où

$R_c$  est la résistance à la compression à un age donné,

$A'$  est une constante représentant la résistance intrinsèque de la pâte de ciment hydratée (porosité nulle),

$X$  est une représentation de la porosité capillaire de la pâte donnée,

$k$  varie entre 2.6 et 3.0 et est fonction du degré d'hydratation.

Depuis, de nombreuses relations ont été utilisées pour essayer de rendre compte de la relation entre la résistance mécanique et la porosité :

\* **Bal'shin M. YU.**, (1949) suggère, pour des matériaux céramiques poreux la relation suivante :

$$R_c = R_0 (1-\varepsilon)^k \quad (I.27)$$

Des équations de ce type ont été développées par **Soroka J.** et **Sedera P.J.** pour le plâtre, par **Mindess S.** (1970) pour des silicates de calcaires autoclavés.

\* **Ryshkevitch E.** (1953) propose, pour des matériaux frittés, une relation linéaire entre la porosité et le logarithme de la résistance à la compression:

$$R_c = R_0 \cdot e^{-k\varepsilon} \quad (I.28)$$

Des équations de ce type ont été développées par d'autres chercheurs comme **Knofel D.** (1968), pour des pâtes de ciment et **Manning D. G. et Hope B. B.** (1971), pour des bétons imprégnés de polymères.

\* **Schiller K. K.**, (1960), a suggéré l'équation suivante pour les plâtres

$$R_c = R_0 \ln(\varepsilon_0/\varepsilon) \quad (I.29)$$

Selon cette équation, une relation linéaire existe entre la résistance et le logarithme de la porosité. Des équations de ce type sont utilisées par plusieurs chercheurs pour exprimer l'effet de la porosité sur les pâtes de ciment ou de béton [**Wischers G.**, (1961)].

\* **Hasselman D. P. H.** (1963), a suggéré une relation linéaire entre la résistance et la porosité d'un matériau réfractaire polycristallin :

$$R_c = R_0 - K_H \cdot \varepsilon \quad (I.30)$$

Pour toutes ces relations :

- $R_c$  est la résistance à la compression à un âge donné,
- $R_0$  est la résistance à la compression à porosité nulle,
- $\varepsilon$  est la porosité totale,
- $\varepsilon_0$  est la porosité à résistance nulle,
- $K, K_H$ , sont des constantes empiriques.

Plus récemment, **Watson K.L.**, (1980), a proposé pour des bétons cellulaires autoclavés l'expression :

$$R_c = k \cdot [(V_s / V_p) - (V_s / V_p)_{cr}] \quad (I.31)$$

$R_c$  est la résistance à la compression

$V_s / V_p$  le rapport volumique solide / pore déterminé par pycnométrie à l'hélium,

$(V_s / V_p)_{cr}$  le rapport volumique correspondant à une résistance nulle,

$k$  est une constante empirique.

### I.7.2. MODELE DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

L'étude des paramètres thermiques des matériaux poreux en fonction de leurs caractéristiques spécifiques a fait l'objet de plusieurs recherches. La plupart de ces recherches se sont basées sur l'effet de la porosité du matériau poreux sur sa conductivité thermique [Brigaud F. et al., (1989)].

Si, en raison de l'additivité des enthalpies, le problème de l'estimation de la capacité calorifique d'un milieu poreux peut être aisément résolu, il n'en est pas de même pour la conductivité thermique équivalente. La modélisation de cette dernière est plus complexe. Elle dépend, bien sûr, de la nature et des proportions des constituants, mais aussi de la géométrie du milieu poreux. De nombreuses approches théoriques et expérimentales ont été développées dans ce sens, afin d'interpréter ou de prédire la conductivité thermique effective du milieu poreux. Trois catégories de modèles peuvent être rencontrées :

- ❖ Modèles correspondant à une résolution rigoureuse de la loi de Fourier,
- ❖ Modèles basés sur une analogie électrique, où on utilise la notion du volume élémentaire représentatif,
- ❖ Modèles empiriques ou semi-empiriques, qui eux, fournissent plutôt des modèles de représentation à partir des données expérimentales.

Notons, enfin, que le nombre de modèles estimant la conductivité thermique équivalente d'un milieu poreux est important, et les matériaux, sur les quels on a appliqué ces modèles [Carsona J.K. et al, (1995)], sont aussi nombreux, mais les résultats obtenus ne sont pas toujours précis. Ceci est dû au fait que la structure est simplifiée dans de nombreux modèles.

#### I.7.2.1. VOLUME ELEMENTAIRE REPRESENTATIF « VER »

Sans entrer dans les détails, concernant le choix de la forme et des dimensions d'un *volume élémentaire représentatif* «VER» dans un milieu poreux, nous rappelons simplement que celui-ci est un volume élémentaire qui doit être suffisamment grand pour être représentatif, et suffisamment petit pour que la grandeur qu'on veut définir conserve un caractère local [Degiovanni A, Glaztmaier G.C. et al., (1988)].

Lorsque les propriétés locales, définies sur le VER, sont indépendantes de la position de celui-ci au sein de l'échantillon poreux, le milieu est dit homogène à une échelle qualifiée de macroscopique.

#### I.7.2.2. CAS DES MILIEUX BIPHASIQUES

Parfois, dans les études de modélisation simplifiées, le matériau poreux est supposé constitué de deux phases seulement : une phase solide de conductivité thermique  $\lambda_s$  et une phase fluide de conductivité thermique  $\lambda_f$ . Un grand nombre de modèles mathématiques, plus ou moins complexes, ont été développés pour estimer la conductivité thermique équivalente de différents types de matériaux. Les modèles les plus utilisés sont les modèles parallèles, série, de Maxwell, etc. [Glaztmaier G.C. et al., (1988) ; Pande R.N. et al., (1984)]. De légères modifications sont souvent nécessaires pour adapter le modèle au matériau étudié.

##### I.7.2.2.1. MODELES BASES SUR LA LOI DE FOURIER

Le premier modèle d'estimation de la conductivité thermique d'un milieu biphasique a été proposé par MAXWELL (1898). Ce modèle a été adopté, par la suite, par différents autres auteurs (Hamilton, Rayleigh, Pande, etc.). L'approche utilisée consiste à supposer que le

milieu est constitué d'une phase dispersée dans une autre phase contenue, ce qui rend le modèle plus efficace dans le cas des matériaux de faible porosité où la phase continue est dominante [Maxwell J.C., (1881)].

Selon *Maxwell* l'estimation de la conductivité thermique effective du composite biphasique est donnée par les expressions suivantes :

❖ Dans le cas où la phase continue est constituée de fluide :

$$\lambda_{eff} = \frac{2\varepsilon\lambda_f + (3-2\varepsilon)\lambda_s}{\varepsilon \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + (3-\varepsilon)} \quad (1.32)$$

❖ Dans le cas où la phase continue est constituée de solide :

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \left[ \frac{2-2\varepsilon + (1+2\varepsilon)\left(\frac{\lambda_f}{\lambda_s}\right)}{2+\varepsilon + (1-\varepsilon)\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f}\right)} \right] \quad (1.33)$$

*Fricke* (1924) a établi une relation similaire à celle de *Maxwell* mais pour des formes ellipsoïdales. La conductivité thermique effective peut être exprimée par :

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \left[ \frac{X\lambda_s + \lambda_f - X\varepsilon(\lambda_s - \lambda_f)}{X\lambda_s + \lambda_f - \varepsilon(\lambda_s - \lambda_f)} \right] \quad (1.34)$$

Le paramètre X est associé à la forme de l'ellipsoïde : pour X=2 on retrouve l'expression de *Maxwell* (pores sphériques), les faibles valeurs de X correspondent aux ellipsoïdes aplatis.

$\varepsilon$  est la porosité totale,  $\lambda_f$  est la conductivité thermique de la phase fluide et  $\lambda_s$  est la conductivité thermique de la phase solide.

Un autre modèle dérivé du modèle de *Maxwell* est celui de *Meredith et Tobias* [Mangal R. et al., (2003), Meredith R.E. et al., (1962)]. Dans leur estimation de la conductivité thermique effective, ils utilisent la même approche que le modèle précédent en considérant uniquement un composite biphasique avec des géométries de pores aléatoires. La conductivité thermique effective  $\lambda_{eff}$  est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{eff} = \left[ \frac{A - 2\varepsilon + 0.409B\varepsilon^{7/3} - 2.133C\varepsilon^{10/3}}{A + \varepsilon + 0.409B\varepsilon^{7/3} - 0.906C\varepsilon^{10/3}} \right] \quad (1.35)$$

Avec :

$$k = \frac{\lambda_f}{\lambda_s}, \quad A = \frac{2+k}{1-k}, \quad B = \frac{6+3k}{4+3k} \quad \text{et} \quad C = \frac{3-3k}{4+3k}$$

La limite de ce type de modèles réside dans le fait de considérer une géométrie simple des pores et l'absence d'interaction entre les particules solides. Or, la majorité des milieux

poreux, comme les matériaux cimentaires, ont des porosités importantes souvent supérieures à 20 % et présentent une interaction entre les particules.

Pour ce type de matériau [*Pande et Chaudhary*, (1984)] ont introduit la notion de milieu continu équivalent. Ce modèle sera traité d'une manière détaillée dans le **chapitre IV** (§IV.2.4.1 (C))

### I.7.2.2.2. MODELES BASES SUR L'ANALOGIE ELECTRIQUE

Ce sont des modèles qui tiennent compte seulement de la conduction. Ils supposent le milieu périodique, c-à-d, formé de couches parallèles alternées de fluide et de solide dont les conductivités thermiques respectives sont  $\lambda_f$  et  $\lambda_s$ , et étudient une cellule unité. La plus simple des approches, consiste à remplacer la structure du matériau par des résistances électriques associées en série ou en parallèle ou en combinant des deux modèles.

Les résistances thermiques correspondantes seront en parallèle pour un milieu dans lequel les phases fluide et solide sont continues dans le sens du gradient de température tandis que les couches seront considérées comme perpendiculaires (résistances en série) dans le cas où le flux de chaleur traverse successivement les deux phases (Plus de détails seront donnés au **chapitre III** (§.III.5.2)).

Des variantes de modèles série et parallèle ont été introduites par plusieurs auteurs [*Laurent J.P.*, (1991) ; *Jagjiwanram Singh R.*, (2004) ; *Barea R. et al.*, (2003)], dont le but est de s'approcher au mieux des configurations réelles des matériaux étudiés, en combinant les arrangements des résistances en série et en parallèle.

*Woodside et Mesmer* [*Woodside.*, *Mesmer*, (1961)] ont introduit des coefficients pour le calcul de la conductivité thermique effective d'un milieu biphasique (Plus de renseignements seront donnés au chapitre III (§.III.5.2)).

Le modèle de *Yagi et Kunii* [*Melka S.*, (1996)] fait apparaître le mécanisme de transfert thermique par conduction dans le fluide situé dans l'espace inter-particulaire ainsi que dans la couche de fluide entourant les points de contact entre particules. Les auteurs proposent alors la relation :

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} = \varepsilon_1 + \frac{(1 - \varepsilon_1)\lambda_s}{(1 - \alpha_1)\lambda_f + \alpha_1\lambda_s} \quad (1.36)$$

$\alpha_1$  représente le rapport entre l'épaisseur de la couche stagnante de fluide en série avec le solide et la dimension de la cellule élémentaire, et  $\varepsilon_1$  est donné par l'expression :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon - \alpha_1}{1 - \alpha_1} \quad (1.37)$$

Des valeurs de  $\varepsilon_1$  et  $\alpha_1$  sont proposés par les auteurs [*Melka S.*, (1996)].

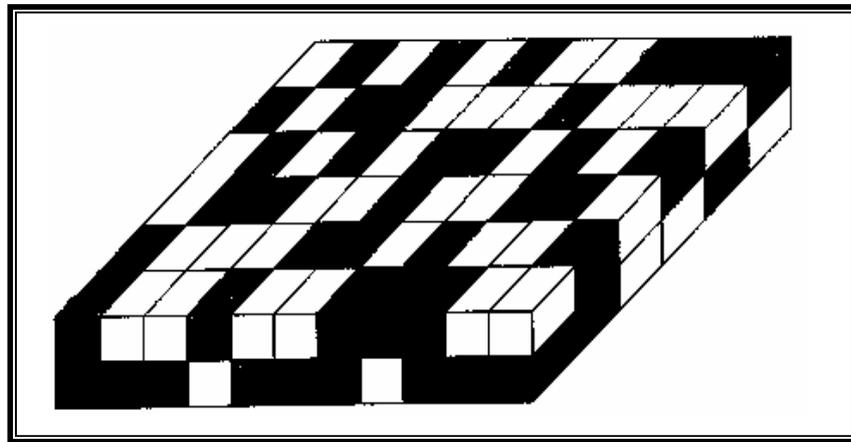
Un autre modèle basé également sur l'analogie électrique, qui a donné une bonne approximation de la conductivité thermique des bétons cellulaires autoclavés et des bétons de bois [*Bouguerra A.*, (1997)], est celui proposé par *J.P Laurent* [*laurent J.P.*, (1991)]. Il introduit un paramètre important, dans le phénomène de la conduction de la chaleur dans les milieux poreux, qui est la tortuosité. Il considère également que la structure interne du matériau est constituée de cellules macroporeuses remplies d'air dans une matrice solide supposée homogène à l'échelle de ces micropores.

La conductivité thermique est fonction des conductivités thermiques de chaque phase, du taux de macroporosité  $n_{mp}$  et de la tortuosité  $\tau = \left(\frac{L}{L_e}\right)^2$  avec  $L$  : la longueur moyenne des lignes de flux et  $L_e$  : la longueur de l'échantillon. Elle est donnée par la relation :

$$\lambda_{sec} = \frac{(1 - n_{mp})\lambda_{ms} + n_{mp}\lambda_{air}}{\tau} \quad (1.38)$$

avec :  $\lambda_{ms}$  conductivité thermique de la matrice solide sèche,  
 $\lambda_{air}$  conductivité thermique de l'air (= 0.0243 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> à 20°C).

**Zarichniak et Novikov** [Melka S., (1996)] représentent le milieu poreux par un arrangement aléatoire de cubes (**figure I.5**).



**Fig. I.5** : Modèle de **Zarichniak et Novikov** d'après [Melka S., (1996)]

Ils montrent que, pour le milieu ainsi constitué, chaque colonne, formée de  $n_c$  cubes ( $n_c$  est le nombre de cubes), est un tube de flux, et la conductivité thermique obtenue pour une couche de deux cubes s'écrit :

$$\lambda_{eff} = \lambda'_s (1 - \varepsilon)^2 + \lambda_f \varepsilon^2 + 4 \frac{\lambda'_s \lambda_f}{\lambda'_s + \lambda_f \varepsilon (1 - \varepsilon)} \quad (1.39)$$

$\lambda'_s$  est la conductivité thermique de la phase solide corrigée pour tenir compte de la résistance de contact :

$$\frac{1}{\lambda'_s} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_c + \frac{\lambda_f}{0.03}} \quad (1.40)$$

où  $\lambda_c$  est la conductivité thermique liée à la résistance de contact.

Pour une couche d'épaisseur  $n_c$  cubes, on obtient :

$$\lambda_{eff} = \sum_{p=0}^{n_c} C_n^p \varepsilon^p (1-\varepsilon)^{n_c-p} \frac{n_c}{\frac{n_c}{\lambda_f} + \frac{n_c-p}{\lambda_s}} \quad (1.41)$$

pour  $n_c=1$ , on aura le modèle parallèle et si  $n$  tend vers l'infini on aura le modèle série.

Il existe d'autres modèles semblables basés sur le même principe, où la conductivité thermique effective du milieu est obtenue par différentes relations, comme les modèles de *Dewhylie et Southwick* [Wyllie M.R.J. et al, (1954)] ; de *Hashin et Shtrikman* et de *Crane et Vachon* (notion de bornes supérieure et inférieure) [Bouguerra A., (1997) ; Ruzicka M., (1998)], de *Chaurasia* [Cernuschia F. et al, (2004)] et bien d'autres [Gori F. et al, (2003), Jiickel M., (1995)].

### I.7.2.2.3. MODELES EMPIRIQUES OU SEMI-EMPIRIQUES

Il existe aussi un nombre important de ce type de modèles. Ce sont des modèles empiriques, ne reposant sur aucune base physique, parfois assimilés à des modèles statistiques. Le modèle le plus utilisé est celui de la moyenne géométrique des conductivités de chacun des constituants de chaque phase, pondérées par leurs fractions volumiques. La conductivité thermique de chaque phase est donnée par la relation :

$$\lambda_i = \lambda_s^{(1-\varepsilon)} \lambda_f^\varepsilon \quad (1.42)$$

Ainsi *Lichtenker* [Melka S., (1996)], en combinant les modèles série et parallèle correspondant à une moyenne géométrique entre les valeurs de la conductivité thermique effective obtenue par chaque modèle, propose l'expression :

$$\lambda_{eff} = \lambda_f \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{(1-\varepsilon)} \quad (1.43)$$

Cette équation n'est valable que pour des rapports :  $0 \leq \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \leq 20$ .

### I.7.2.3. CAS DES MILIEUX TRIPHASIQUES

Puisque la quasi totalité des modèles existants sont structurés de telle façon que leurs équations descriptives ne tiennent compte que des deux états extrêmes, sec ou saturé, du matériau, et puisque, dans la réalité, les matériaux de construction contiennent toujours de l'humidité et les deux états extrêmes ne sont que peu rencontrés, les modèles triphasiques viennent, alors, pour résoudre le problème et envisager les trois phases existants dans le composite.

L'ensemble des modèles estimant la conductivité thermique d'un milieu triphasique adopte le modèle de *De Vries*. D'autres auteurs combinent les modèles basés sur la loi de *Fourier* et ceux basés sur l'analogie électrique [Bouguerra A., (1997), Ledhem A., (1997)].

#### ❖ Modèle de De Vries

**De Vries** assimile le milieu poreux à une phase continue de fluide (eau), dans laquelle sont dispersés des grains solides et des poches d'air de forme ellipsoïdale. En admettant qu'il n

'y a pas d'interactions mutuelles entre les particules de la phase solide, la conductivité thermique du milieu est donnée par la relation:

$$\lambda = \frac{\theta_l \lambda_l + G_s (1 - \varepsilon) \lambda_s + G_a (\varepsilon - \theta_l) \lambda_a}{\theta_l + G_s (1 - \varepsilon) + G_a (\varepsilon - \theta_l)} \quad (1.44)$$

avec

$G_s$  : le rapport des gradients de température dans les grains solides

$G_a$  : le rapport des gradients de températures dans les poches d'air.

Ces coefficients calculés à partir des relations :

$$G_j = \frac{1}{3} \left( \sum_{i=1,2,3} \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_l} - 1 \right) g_{j_i}} \right] \right) \quad (1.45)$$

avec :

$G_i$  : le rapport des gradient de température d'une phase à celui de la phase continue

$i = 1,2,3$  : les trois axes principaux de l'ellipsoïde

$g_{j_i}$  : facteur de forme relatif au constituant j  $\left( \sum_{i=1}^3 g_{j_i} = 1 \right)$

Ces facteurs de formes ont été donnés par *De Vries* à partir des données expérimentales et dépendent, pour les phases fluides, de leurs teneurs volumiques.

- ❖ Les autres modèles triphasiques comme celui de *Jackson et Black* et celui de *la modélisation auto-cogérente* seront traités d'une manière plus détaillée au **chapitre III** (§III.5.2.4.2).

## I.8. CONCLUSIONS

Dans ce premier chapitre nous avons exposé des rappels théoriques et synthèses bibliographiques concernant les différentes caractéristiques descriptives des milieux poreux d'une manière générale, et en particulier des bois, des bétons légers, des bétons de sable et des bétons de bois.

Il a été mis en évidence la complexité des transferts de masse et de chaleur dans les milieux poreux et la difficulté d'estimer les grandeurs thermophysiques dans les matériaux composites.

Avant de rappeler les modèles de prédiction de la résistance mécanique et de la conductivité thermique des milieux biphasiques et triphasiques, un bref tour d'horizon des méthodes de mesures des grandeurs thermophysiques a été donné. Toutefois, les méthodes décrites ne constituent pas une liste exhaustive et en particulier, nous avons choisi de développer dans le **chapitre II** (§II.3.3) les méthodes utilisées et les modifications qui ont été apportées pour permettre une étude aussi fiable que possible des matériaux composites.

# *Chapitre II*

---

*MATERIAUX  
ET  
TECHNIQUES EXPERIMENTALES*

---

## II. MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Les matériaux étudiés sont des bétons de sable à base de copeaux de bois. Ils sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction isolant-porteurs, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice constituée de bétons de sable et l'isolation par la faible conductivité thermique des granulats de bois. Avant d'aborder la caractérisation physico-mécanique de ces matériaux, objectif du présent travail, nous allons consacrer ce deuxième chapitre à une caractérisation générale des matières premières utilisées, puis à l'élaboration des bétons étudiés et enfin à une brève présentation des principales techniques expérimentales utilisées.

### II.1. MATIERES PREMIERES

#### II.1.1. SABLES

La région de Laghouat, comme beaucoup d'autres régions en Algérie, notamment dans les régions du sud, dispose de grands gisements de sables, dunaires et alluvionnaires. Ces sables restent toujours non ou très peu exploités dans la construction. Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, deux sables différents ont été séparément utilisés :

- ❖ Un sable de dune provenant de la région Nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord), il est noté dans ce qui suit **SD** et représenté par la couleur bleue.
- ❖ Un sable alluvionnaire provenant de l'oued M'zi (région de Laghouat), il est noté dans ce qui suit **SA** et représenté par la couleur rouge.

La **figure II.1**, illustrant l'analyse granulométrique réalisée selon la norme **NF P18-560**, montre que SD est un sable fin présentant une granulométrie serrée, par contre SA est un sable relativement grossier et présentant une granulométrie étalée. Le diamètre maximal est 0.63 mm pour SD et de 5 mm pour SA. Il est clair donc, que le diamètre maximal dans les granulats d'un béton de sable est beaucoup plus petit que celui des granulats d'un béton ordinaire. Ceci augmente la surface spécifique des granulats et par conséquent leur porosité. Notons que c'est cette porosité élevée qui impose l'ajout des fillers dans les bétons de sable pour éviter un surdosage en ciment [**CHAUVIN, J.J et al., 1988**]. Les autres caractéristiques physiques de ces deux sables sont regroupées dans le **tableau II-1**. Les valeurs moyennes des masses volumiques apparentes montrent que SA est plus dense, les valeurs des modules de finesse confirment que SD est plus fin et les valeurs de l'équivalent de sable (selon la norme **NF P18 598**) mettent en évidence la propreté des deux sables (pauvres en éléments fins).

**Tableau II.1** : Propriétés physiques des deux sables utilisés

Sable	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$M_f$	$C_p$	$ES_v$	$ES_p$
SD	1428	2596	1.18	55	78	86
SA	1482	2576	2.45	57	84	88

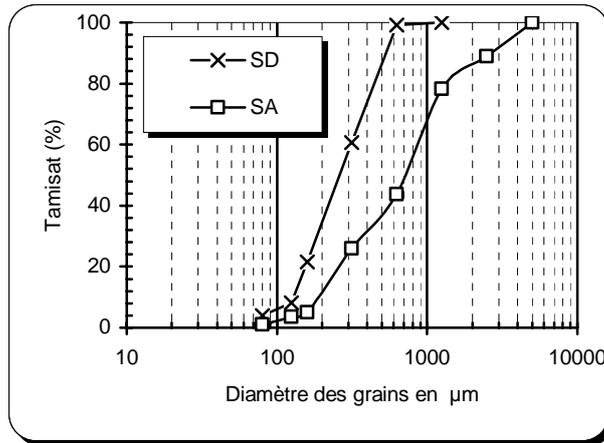
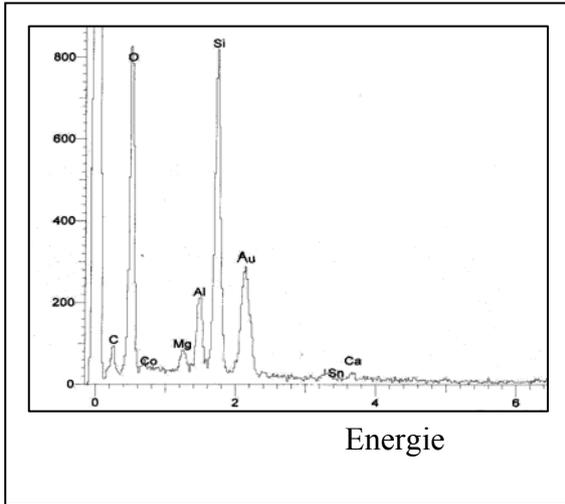
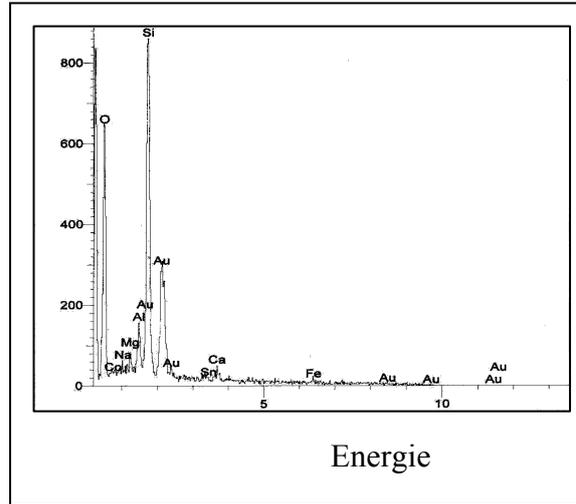


Fig. II.1 : Courbes granulométriques des deux sables utilisés



(a) - SD -



(b) - SA -

Fig. II.2 : Analyse chimique des deux sables

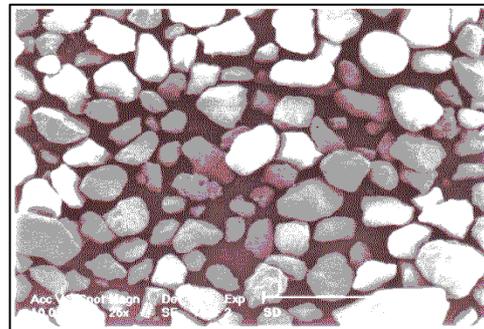
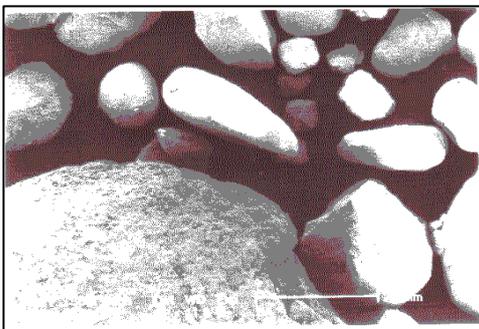


Fig. II.3 : Aspect général des grains des deux sables

L'analyse chimique de ces deux sables, alluvionnaire et dunaire, menée par rayon X révèle la présence d'atomes de Si et O, ce qui correspond à la présence de l'espèce  $\text{SiO}_2$  (silice). De plus le pourcentage atomique important de Si nous indique que  $\text{SiO}_2$  est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques, nous permettent d'établir que les deux sables contiennent aussi quelques traces, en comparaison avec  $\text{SiO}_2$ , d'espèces calcaïques et magnésiennes (**Fig.II.2**).

Les photos présentées à la **figure II-3** montrent l'aspect général des grains, visualisés, à grande échelle, par le microscope électronique à balayage (M.E.B). La majorité des grains semblent avoir des formes arrondies avec une faible angularité. Les grains de SA paraissent plus arrondis et plus gros que ceux de SD.

### II.1.2. CIMENT

Le ciment utilisé est un ciment portland dont la dénomination est **CPJ-CEM II/A** selon la nouvelle normalisation algérienne. Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques sont présentées dans les **tableaux II.2, II.3 et II.4**:

**Tableau II.2 : Propriétés physiques du ciment utilisé**

Masse volumique absolue ( $\rho_s$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	Surface spécifique (A) ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	Temps de prise			
			Début (mn)	Fin (mn)	Durée (mn)
3076,92	289.04	à froid	2h 60mn	4h 10mn	1h 20mn
		à chaud	4h 10mn	1h 52mn	40mn

**Tableau II.3 - Analyse chimique du ciment utilisé**

Elément	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	PF
Quantité (%)	20.66	4.77	2.88	63.31	1.17	2.32	1.06

D'autre part, et d'après la formule de **Bogue**, les constituants principaux de ce ciment sont :

$$\begin{array}{ll} \text{C}_3\text{S} = 57.88 \% & \text{C}_3\text{A} = 7.20 \% \\ \text{C}_2\text{S} = 15.88 \% & \text{C}_4\text{AF} = 8.75 \% \end{array}$$

Il est à noter que ces pourcentages respectent bien les limites recommandées pour les ciments usuels [**Dreux G.**, 1995].

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les résistances mécaniques obtenues à différents âges sont:

**Tableau II.4 :** Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé

à 7 jours		à 14 jours		à 28 jours	
Rc (MPa)	Rt (MPa)	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Rc (MPa)	Rt (MPa)
21.60	06.33	30.50	08.74	38.50	09.87

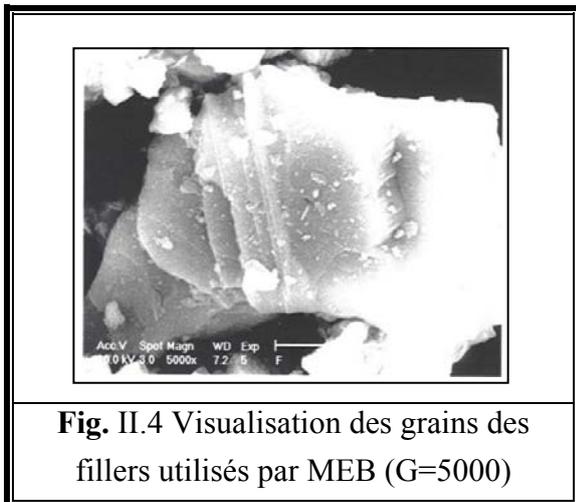
### II.1.3. FILLERS

Les fillers sont destinés à compléter la courbe granulométrique du sable dans sa partie fine et à combler les vides inter-granulaires.

Les fillers utilisés dans notre cas sont obtenus par le tamisage (au tamis 80  $\mu\text{m}$ ) des déchets de concassage d'une carrière se trouvant à la sortie Nord de la ville de Laghouat. Ils sont de nature calcaire comme le montre le **tableau II.5**. Leur composition chimique est presque pure: 97.5 % en poids du matériau sont des carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) avec une très faible présence d'éléments nocifs. Leur poids spécifique est de 2900  $\text{kg/m}^3$  et leur surface spécifique (Blaine) est de 312  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

Il convient de noter que les fillers calcaires sont les plus adaptés aux bétons de sable et donnent les meilleures performances [Coquillat G., 1992].

La **figure II.4** montre la forme des grains de ces fillers visualisée par MEB.



**Fig. II.4** Visualisation des grains des fillers utilisés par MEB (G=5000)

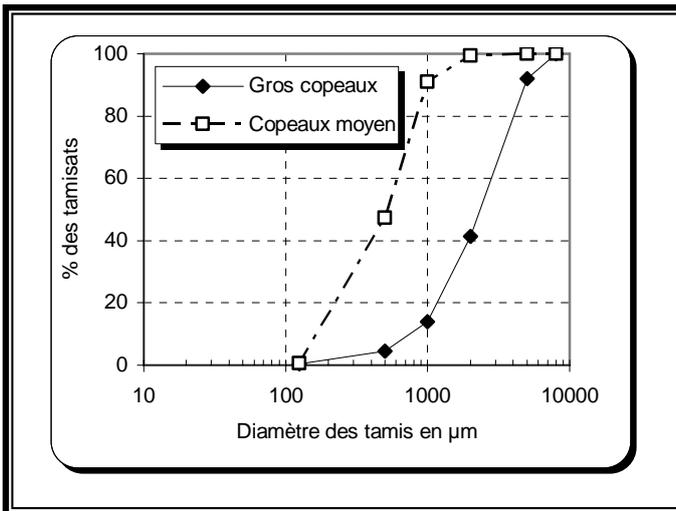
**Tableau II.5:** Analyse chimique des fillers

$\text{CaCO}_3$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{CaSO}_4$ %	$\text{SO}_3^-$ %	% Insolubles
97.50	00.74	00.67	00.83	00.59

### II.1.4. COPEAUX DE BOIS

L'idée d'introduire des copeaux de bois dans des bétons de sable vient dans le but de se débarrasser, premièrement, de ces déchets et deuxièmement de profiter de certaines de leurs caractéristiques physiques (allègement, isolation thermique, isolation acoustique, etc. Rappelons que, grâce à leur structure poreuse, les grains de bois se caractérisent par une faible masse volumique et une bonne rugosité de surface.

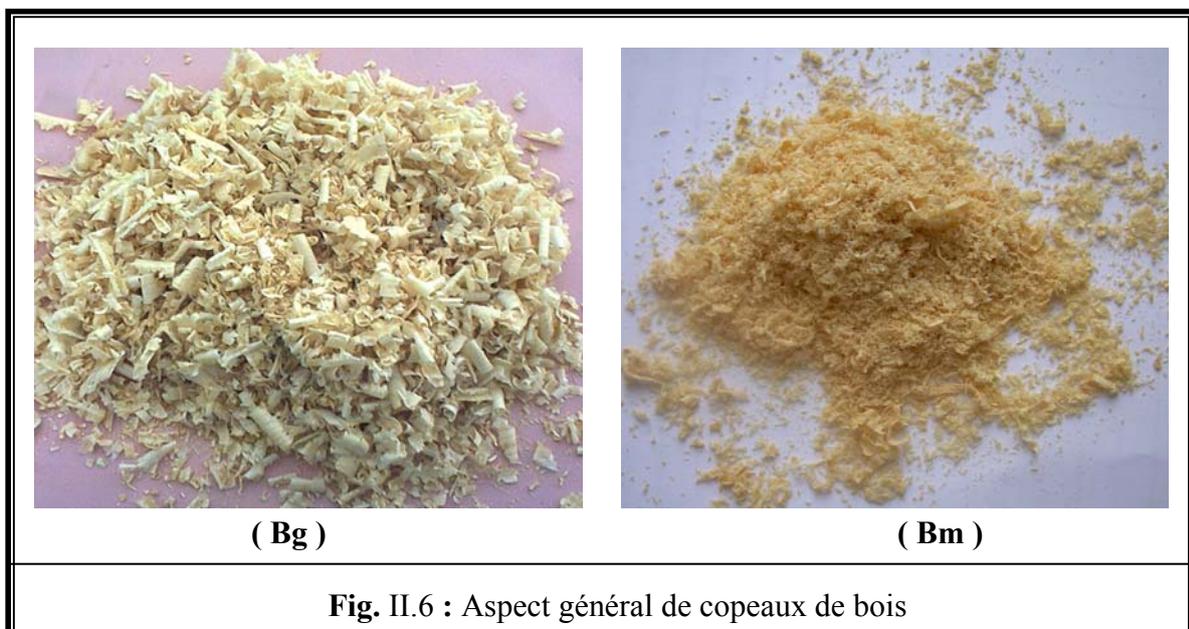
Dans cette étude, deux types de copeaux de même nature mais différents en granulométrie (**figure II.5**) ont été utilisés :



**Fig. II.5:** Courbes granulométriques des deux types de copeaux de bois

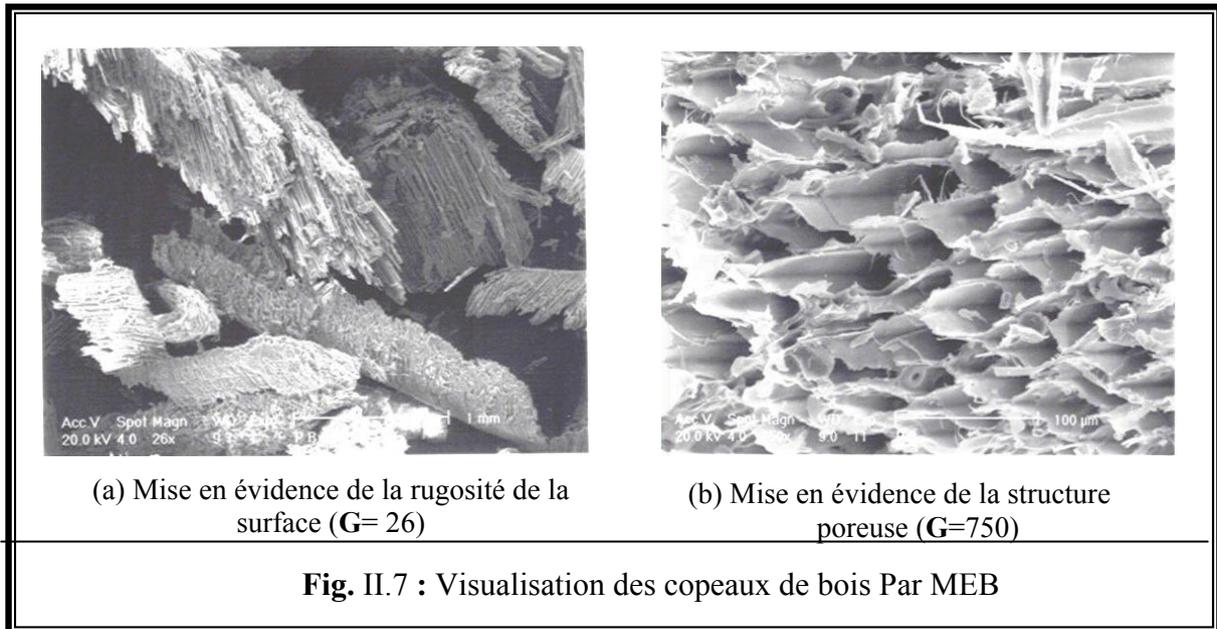
- des copeaux provenant des travaux de *défonçage* ayant une limite granulométrique supérieure voisine de 5 mm et une limite granulométrique inférieure voisine de 0.125 mm. Ils sont notés dans la suite **Bm**.
- des copeaux provenant des travaux de *rabotage* ayant une limite granulométrique supérieure voisine de 8 mm et une limite granulométrique inférieure voisine de 0.125 mm. Ils sont notés dans la suite **Bg**.

Il faut noter que dans le cas de copeaux de bois, ces valeurs n'ont pas d'importance en raison de leur manque de rigidité et de leur forme irrégulière (**fig. II.6**).



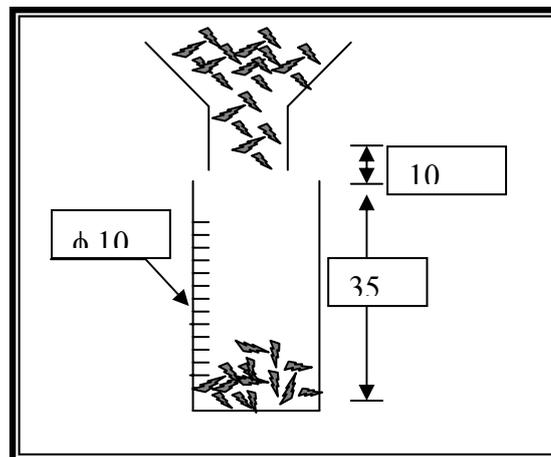
**Fig. II.6 :** Aspect général de copeaux de bois

Les **figures** II.7a et II.7b mettent en évidence respectivement leur rugosité de surface et de leur structure poreuse.



La masse volumique absolue des copeaux de bois a été assimilée à la densité apparente du bois massif que certains auteurs nomment « densité réelle ». La mesure de cette densité a été effectuée sur un bloc de bois massif 'sec' et elle est de l'ordre de 0.512.

La masse volumique apparente des copeaux de bois est très délicate à déterminer car elle dépend de la granulométrie, de la teneur en eau et l'empilement des copeaux (état lâche ou compacté). Après plusieurs essais effectués selon la méthode schématisée dans la **figure II.8** et dans les conditions: HR = 50 % , T = 20 °C, la densité obtenue est de l'ordre de 0.128 pour Bg et 0.185 pour Bm.



**Fig. II.8 : Mesure de la densité apparente des copeaux de bois**

Puisque l'absorption d'eau des granulats légers est importante et variable, elle a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons. Avec le bois, on se trouve en face du même problème d'où la nécessité de déterminer l'absorption d'eau des copeaux de bois utilisés. Exprimée en rapport masse Eau/Copeaux, L'absorption de nos copeaux de bois est

de l'ordre de 0.348 pour Bg et 0.365 pour Bm (soit en moyenne de 36 % pour le mélange utilisé).

Notons que cette forte absorption, qui se situe aux premières minutes, risque d'influencer la quantité d'eau destinée à l'hydratation du ciment. Un pré-mouillage des copeaux de bois avant utilisation est alors indispensable.

### II.1.5 ADJUVANT

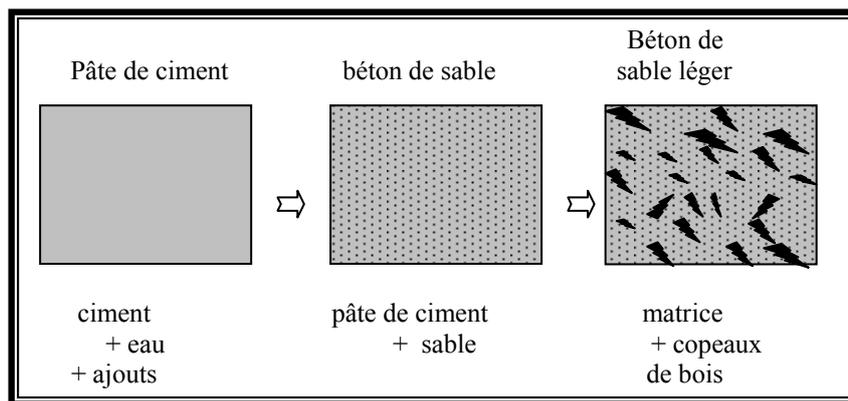
L'adjuvant utilisé est un superplastifiant algérien de type « MEDAPLAST (SP40) ». C'est une solution de Polynaphtalène sulfone (PNS), d'extrait sec 40 % ( $\pm 1\%$ ), de couleur marron et de PH 8.2.

### II.1.6. EAU

L'eau qui a été utilisée pour le gâchage est une eau potable sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

## II.2. COMPOSITES ETUDIÉS

Les composites étudiés sont des bétons de sables, dunaires et alluvionnaire, allégés par ajout copeaux de bois (**Fig. II.9**)



**Fig. II.9** : Elaboration du composite

### II.2.1. OPTIMISATION DE LA MATRICE

Dans des travaux antérieurs, et dans une étude de formulation menée sur des bétons de sable, dunaire et alluvionnaire, élaborés avec les mêmes matériaux de base utilisés dans cette étude [Bederina M., 2000], des compositions optimales ont été déterminées (**tableau II.6**).

**Tableau II.6** : Compositions des deux bétons de sable (sans copeaux de bois)

Matériau	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	F (kg/m <sup>3</sup> )	E (l/m <sup>3</sup> )	SP* (%)
Béton de SD	350	1305	200	245	1.5
Béton de SA	350	1460	150	210	1.5

(\* Le pourcentage de l'adjuvant est calculé, en masse, par rapport à la masse de ciment)

Ces compositions ont été prises comme compositions de base pour la préparation des matrices des deux composites étudiés tout en prévoyant, à chaque fois, l'eau nécessaire à l'absorption des copeaux de bois.

L'allègement des bétons de sable étudiés a été effectué par incorporation des copeaux de bois décrits précédemment. Des études préliminaires ont été effectuées pour :

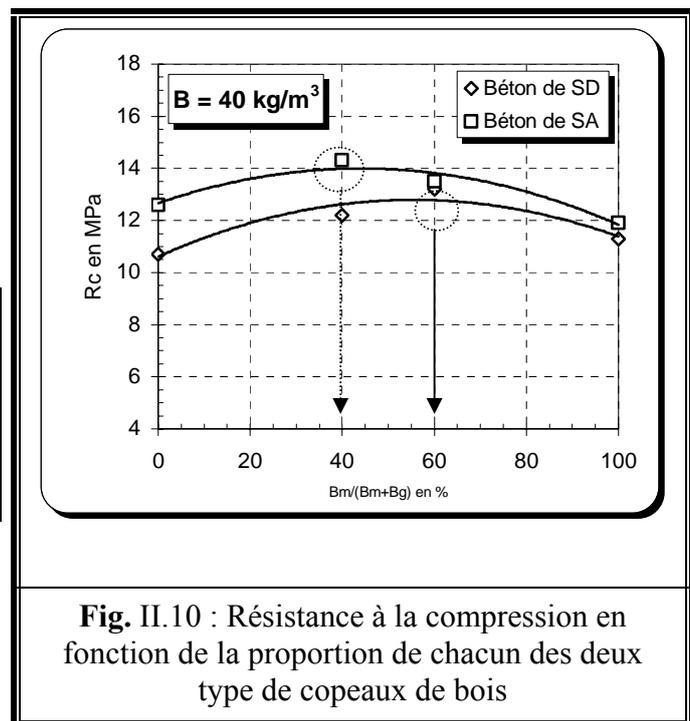
- Optimiser la proportion de chacun des deux types de copeaux de bois Bg et Bm,
- rechercher le mode de l'ajout de ces copeaux de bois au bétons: en plus ou par substitution.

## II.2.2. OPTIMISATION DES PROPORTIONS DES DEUX TYPES DE COPEAUX DE BOIS

Pour cette étude, on a déterminé, pour une quantité donnée de bois, les proportions optimales de chacun des deux types de copeaux de bois Bg et Bm qui donnent les meilleures résistances mécaniques. Pour cela, et en fixant la teneur globale en bois, différentes proportions de Bg et de Bm ont été envisagées (**Tableau II.7**). Pour chaque proportion, des bétons de sables, dunaire et alluvionnaire, ont été élaborés afin d'apprécier l'évolution de la résistances en compression. Notons que pour la préparation des échantillons et la technique de mesure nous avons procédé selon les méthodes décrites dans les paragraphes § II.2.4 et § II.2.4. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes présentées à la **figure II.10**.

**Tableau II.7** : Proportions des deux types de copeaux de bois envisagées

B = (Bg+Bm) (kg / m <sup>3</sup> )	40			
Bg/B en % (massique)	100	60	40	0
Bm/B en % (massique)	0	40	60	100



On constate que, malgré que la quantité de bois soit égale, la résistance est légèrement influencée par la variation de la proportion de chacun des deux types de copeaux (gros et moyens). Elle est légèrement meilleure pour les proportions suivantes:

*60 % de Bm + 40 % de Bg pour le béton de SD  
40 % de Bm + 60 % de Bg pour le béton de SA*

Le sable de dune, qui a un diamètre maximal plus faible (0.63 mm) demande, donc, plus de Bm dont le diamètre de la majorité des grains est compris entre 1.25 et 2 mm. Par contre le sable alluvionnaire, qui a un diamètre maximal de 5 mm, demande plus Bg dont le diamètre de la majorité des grains est compris entre 5 et 8 mm.

Peut être que chacun des deux sables cherche une continuité dans sa courbe granulométrique en prenant l'étendue granulaire qui vient juste après son diamètre maximal.

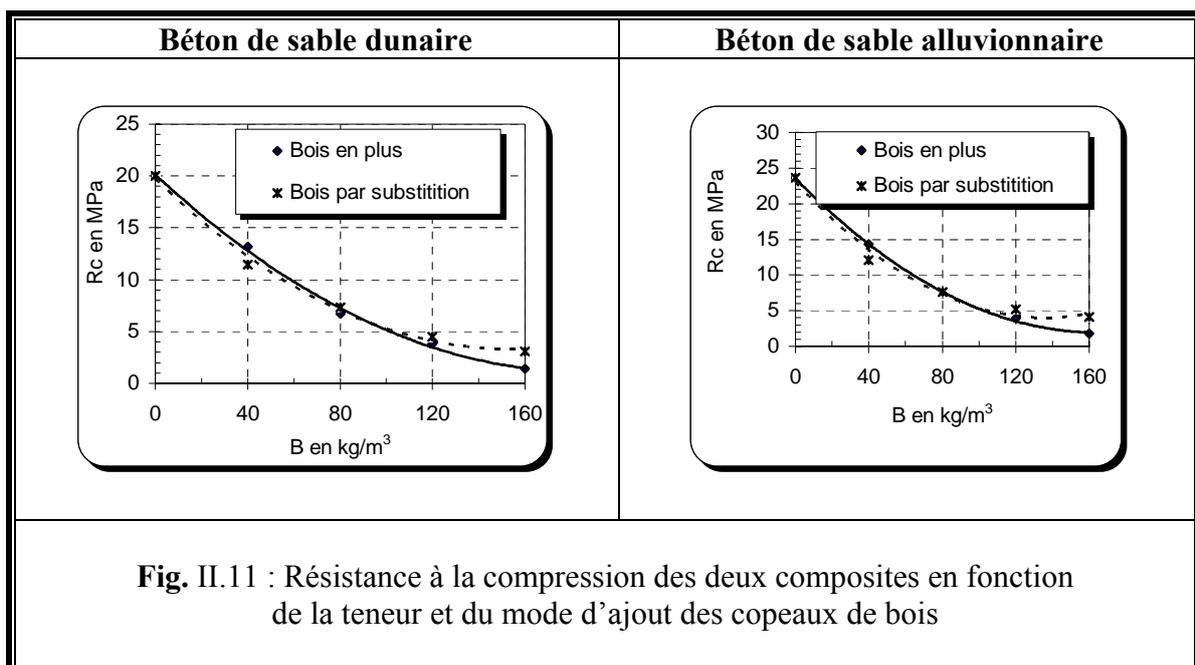
### II.2.3. MODE D'AJOUT DES COPEAUX DE BOIS

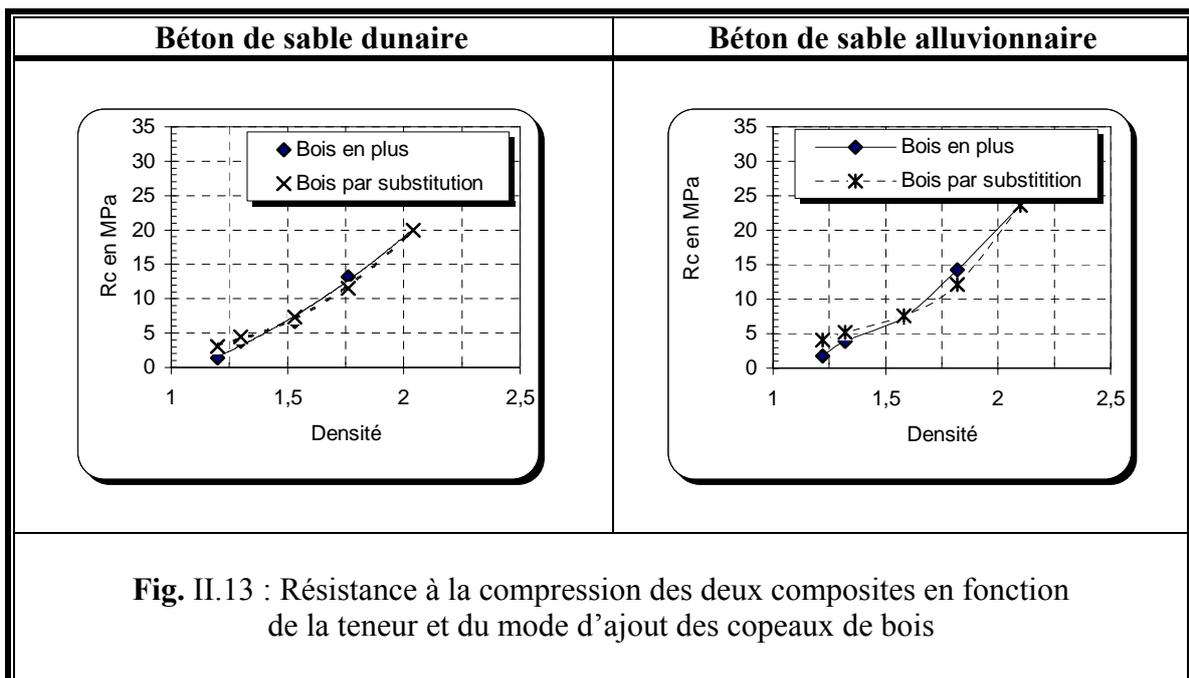
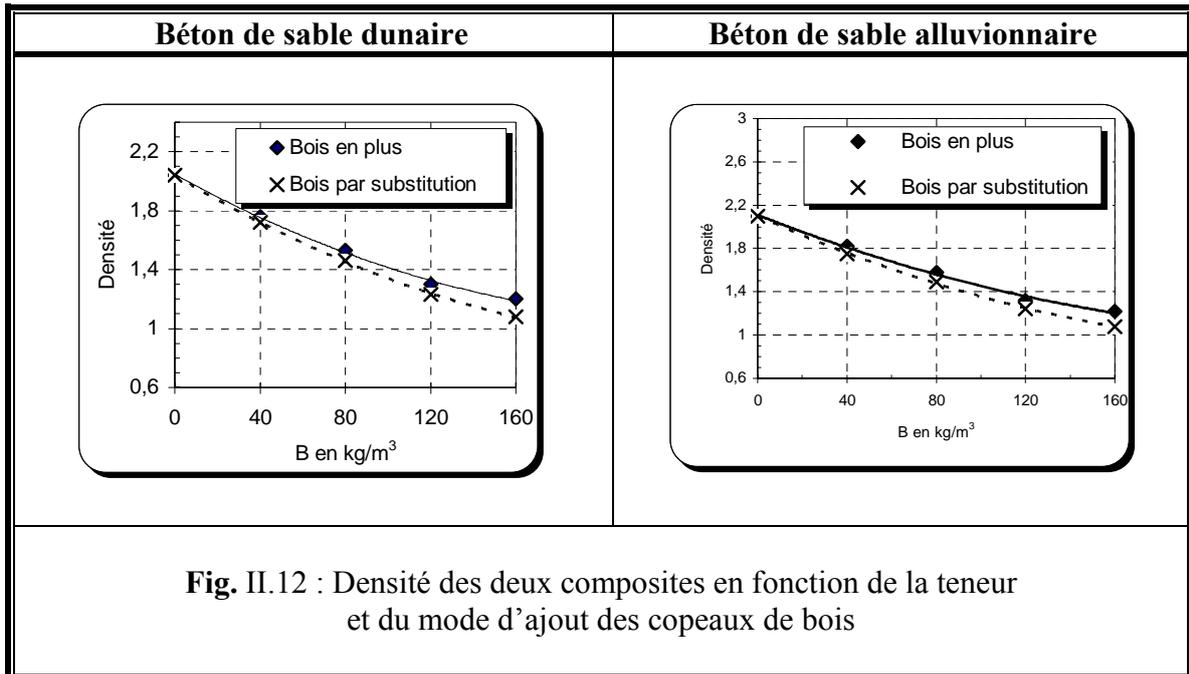
Cette étude a été basée aussi sur la résistance mécanique. Pour introduire les copeaux de bois dans les bétons de sable étudiés, nous nous sommes trouvés devant deux possibilités :

- soit ajouter les copeaux de bois au mélange en *plus*, en supposant qu'on introduit des vides dans le matériau,
- soit par *substitution* volumique avec le sable, en prenant les copeaux de bois comme des agrégats.

Différentes compositions avec différents teneurs en copeaux de bois ont été envisagées pour formuler parallèlement le composite selon les deux méthodes décrites ci-dessus. Concernant la préparation des échantillons et la technique de mesure, cette étude a aussi été effectuée selon les méthodes décrites en § II.2.4 et § II.2.4.

En examinant les courbes présentées à la **figure II.11**, on remarque, qu'au dessous de 120 kg/m<sup>3</sup> de copeaux de bois, la résistance ne change pas beaucoup en modifiant le mode d'ajout. La différence en résistance ne devient, donc, nette qu'au delà de cette teneur en bois. De même, en examinant l'évolution de la densité, on peut aussi remarquer qu'il n'existe qu'une petite différence de densité entre les deux modes d'ajout, notamment pour des teneurs qui ne dépassent pas 100 kg/m<sup>3</sup> environ (**Fig. II.12**). A des densités égales, la **figure II.13** montre bien, que les résistances en compression sont très proches dans les deux cas d'ajout. Pour ces raisons-là, nous avons opté pour le mode d'ajout en plus.





#### II.2.4. MALAXAGE ET CONSERVATION

Pour mieux contrôler l'eau de gâchage, qui joue un rôle important dans les propriétés (physico-mécaniques) des matériaux, les matières premières (sable, ciment, filler et copeaux de bois) sont préalablement séchées. Un malaxage à sec est indispensable pour bien homogénéiser le mélange constitué de sable, de ciment et de filler. Ces derniers sont donc introduits dans un malaxeur et mélangés pendant trois minutes à vitesse lente. Le mélange étant parfaitement homogène, on ajoute les granulats de bois saturés d'eau, en conservant le malaxage à vitesse lente pendant trois minutes. Les copeaux de bois ont été ajoutés au

mélange sec à l'état saturé [Tamba S et al., -2001) ; Jauberthie R. et al., (2001) ; Pascale C. et al., (2006)], pour les raisons suivantes :

- ❖ Il a été remarqué qu'avec des copeaux de bois saturés, la dispersion dans le mélange sec est meilleure.
- ❖ Les copeaux, à l'état saturés, sont plus résistants à l'usure interne causée par le malaxage et leur granulométrie reste presque inchangée.
- ❖ L'eau de gâchage, destinée à l'hydratation du ciment et à la maniabilité du béton, ne sera pas absorbée par les copeaux de bois.

L'eau de gâchage est ensuite ajoutée progressivement. L'homogénéisation du matériau est assurée par un malaxage à vitesse lente pendant trois minutes puis à vitesse rapide une minute. Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées dans une salle humide (90% de HR et 20°C). Au bout de 24 heures elles sont démoulées et conservées, jusqu'au jour de l'essai, en ambiance sèche (50% de HR et 20°C) pour être proche des conditions climatiques des chantiers locaux.

### II.3. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Dans cette partie de ce chapitre, nous allons décrire les principales techniques expérimentales utilisées pour l'identification des différentes caractéristiques des composites étudiés.

#### II.3.1 CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE

##### II.3.1.1. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

La masse volumique apparente ( $\rho$ ) est définie comme étant le rapport de la masse de l'échantillon ( $M$ ) à son volume apparent sec ( $V$ ). La masse est déterminée par pesée à 0,01g près après avoir séché l'échantillon à l'étuve jusqu'à masse constante selon [RILEM, (1974)]. La température de séchage a été fixée à 70°C pour éviter tout risque de changement dans la structure des copeaux de bois. Le volume est déterminé en mesurant les dimensions de l'échantillon à 0.01cm à l'aide d'un pied à coulisse.

##### II.3.1.2. RESISTANCE MECANIQUE

Les résistances étudiées sont la résistance à la compression et la résistance à la flexion. La résistance à la compression est mesurée sur des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm<sup>3</sup> à raison de trois éprouvettes par composition. La presse utilisée est du type "CONTROLS" à double quadrant ayant une capacité maximale de 2000.kN (Fig. II.14).

La vitesse de chargement est préalablement réglée de telle sorte que la rupture surviendra dans au moins 30 secondes après le contact du plateau de la presse avec la surface horizontale de l'éprouvette d'après les recommandations de RILEM. La section de l'éprouvette étant introduite, l'appareil affiche automatiquement la charge de rupture  $F_C$  (kN) et la résistance à la compression  $R_C$  (MPa).

La résistance à la flexion a été mesurée, selon le dispositif de la figure II.16, sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm<sup>3</sup> à raison de trois éprouvettes par composition. La presse utilisée est du type « Matest » ayant une capacité maximale 25 kN (Fig. II.15). La vitesse de chargement a été réglée à 0,05 ± 0.01 MPa /seconde jusqu'à la rupture selon la norme NFP 18-407. La charge à la rupture est lue sur le cadran de la presse et la résistance à la compression est calculée par relation :

$$R_C = \frac{Mz}{I_z} \cdot (h/2) \quad (\text{II.1})$$

où

$Mz$  : le moment max,

$I_z$  : moment d'inertie de la section,

$h$  : hauteur de la section.

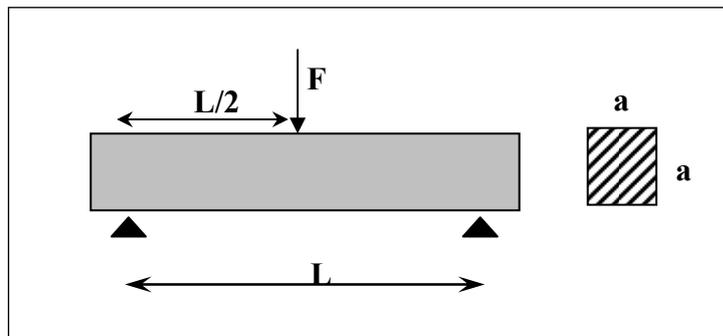


**Fig. II.14** : Presse utilisée pour la mesure de la résistance à la compression



**Fig. II.15**: Presse utilisée pour la mesure de la résistance à la flexion

**Fig. II.16**: Dispositif utilisé en flexion



### II.3.1.3. COEFFICIENT D'ABSORPTION

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau. Il est vrai que la présence d'une certaine porosité allège le béton, mais elle peut être préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel.

L'essai consiste à déterminer un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à une température de 20°C. Après imbibition, l'échantillon est étalé sur une surface

plane non absorbante, et soumis, d'une manière douce, à un flux d'air chaud tout en veillant à ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du matériau.

Le coefficient d'absorption  $A_b$  est défini par la relation :

$$A_b = \frac{Ma - Ms}{Ms} 100 \quad (\text{II.2})$$

où

$M_s$  : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 70°C (70°C pour éviter tout risque de changement dans la structure des copeaux de bois.

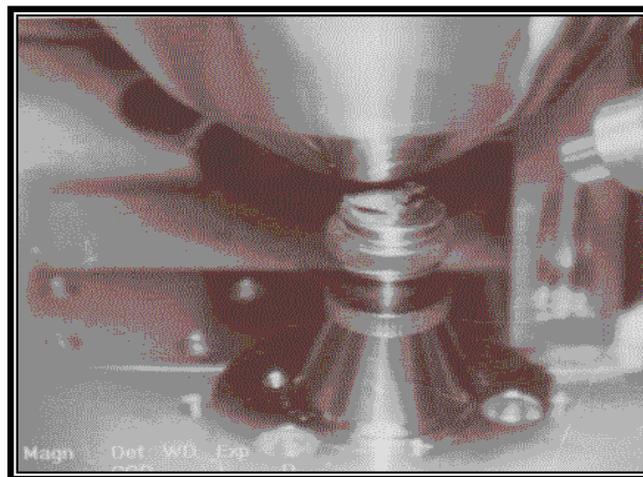
$M_a$  : masse de l'échantillon imbibé (surface sèche)

#### II.3.1.4. VARIATIONS DIMENSIONNELLES

Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm<sup>3</sup> munies de plots à leurs extrémités conformément à la norme NF P 433. Après démoulage à 24 heures, ces éprouvettes, au nombre de trois (03) par composition, sont placées dans un retractor muni d'un comparateur qui nous permet de mesurer le retrait à chaque âge. La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre, à une température variant entre 15°C et 25°C et une humidité relative d'environ 50 %.

#### II.3.2. ETUDE MICRO ET MACRO STRUCTURELLE

La structure des bétons étudiés a été effectuée par analyse d'images en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) pour des agrandissements très élevés et un vidéo - microscope (Controlab®) VH-Z25 muni d'un zoom 25x à 175x (**figure II.17**) pour de faibles agrandissements. Les observations au MEB ont été effectuées sur des surfaces d'échantillons de 5 à 10g, après les avoir rendus conducteurs par métallisation en les couvrant, sous vide, d'une couche d'environ 10 à 20nm d'or et les observations au vidéo - microscope ont été effectuées sur des échantillons provenant de coupes d'éprouvette 4x4x16 cm<sup>3</sup>.



**Fig. II.17:** Observation de l'échantillon par Microscope Electronique à Balayage (MEB)

### II.3.3. CARACTERISATION THERMIQUE

Les essais de la caractérisation thermique ont été réalisés au laboratoire LTI, département de Génie civil de l'IUT d'Amiens en France. La technique utilisée est une technique de mesure connue sous le nom de source plane TPS (Transient Plane Source), déjà utilisée dans plusieurs études sur des matériaux de différentes natures [Bouguerra A., (1997) ; Goual M.S., (2001) ; Asghari M. et al., (2004) ; Laidoudi B., (2005) ; Bashir M. S., (2006) ; Saleh A. Al-Ajlan, (2006)].

Cette technique, qui présente l'avantage de la possibilité de la détermination simultanée de toutes les caractéristiques thermiques d'un matériau à partir d'un seul enregistrement, a été développée par Gustafsson S.E. (1991). C'est une technique expérimentale développée à partir du concept de la technique de la bande chauffante « THS », décrite dans le chapitre I (§I.6.3.2 (f)). Elle est conçue de façon à réduire au minimum les dimensions de l'échantillon et pour maximiser la sensibilité de l'enregistrement de la température (Gustafsson S. E., 1991)

#### II.3.3.1. TECHNIQUE DE LA SOURCE PLANE TPS « TRANSIENT PLANE SOURCE »

##### II.3.3.1.1. AVANTAGES DE LA METHODE TPS

Les principaux avantages de la technique TPS (Transient Plane Source ou Hot Disk) sont :

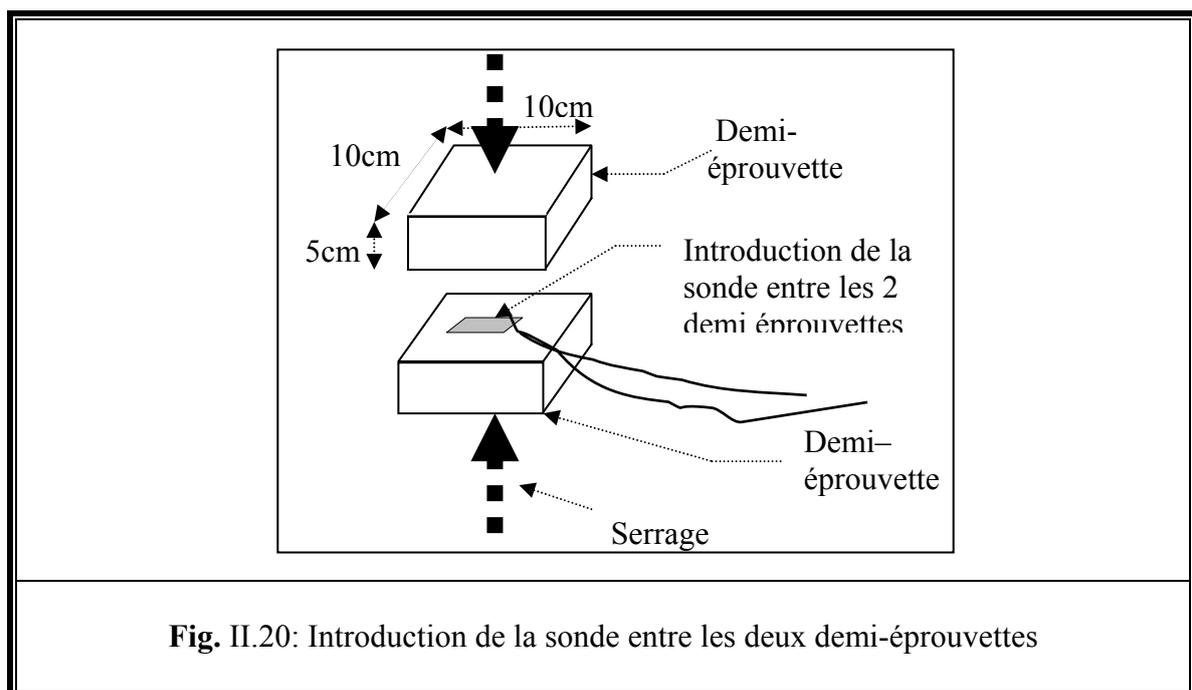
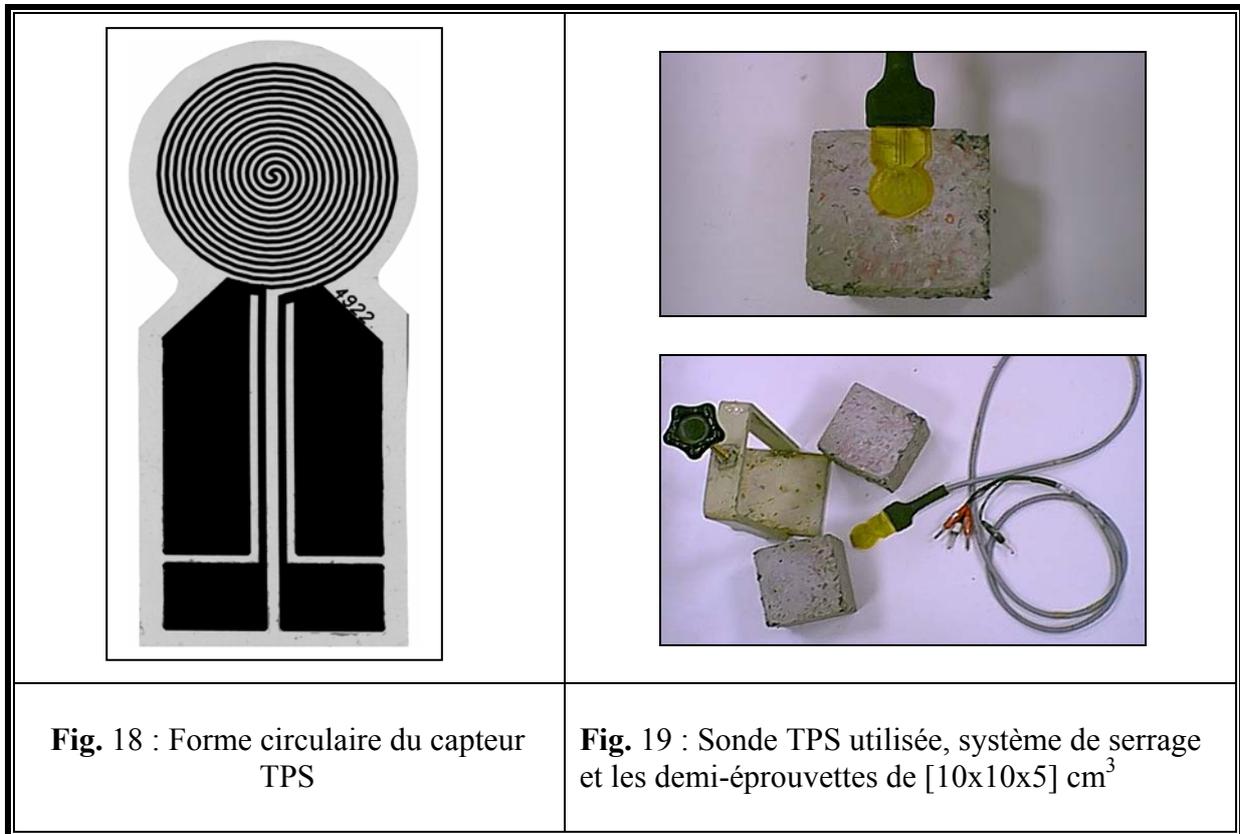
- Elle ne demande pas un matériel sophistiqué ;
- Elle peut faire la mesure de plusieurs paramètres thermiques à la fois ;
- Elle peut être utilisée pour la mesure d'une large gamme de propriétés et dans différentes conditions (liquides, hautes et basses températures, plaques... ) ;
- L'utilisation de capteurs avec une grande surface permet de couvrir une grande surface à l'échelle du volume élémentaire représentatif ;
- La différence entre l'évolution de la température entre la couche d'isolation et le milieu étudié, permet d'étudier des matériaux avec des conductivités thermiques différentes (couches minces) [Haines P.J. et al., (1995) ; Gustavsson J.S. et al., (1998)] ;
- Les mesures peuvent être faites sur des échantillons de diverses formes et de différentes tailles, à condition de posséder au moins une surface plane ;
- Elle est utilisable pour la mesure des propriétés thermophysiques des matériaux anisotropes [Gustavsson M. et al., (2001)].

##### II.3.3.1.2. CONCEPTION DE L'ELEMENT TPS

L'élément TPS qui doit être utilisé dans cette méthode doit être constitué d'un élément résistif jouant, à la fois, le rôle de résistance chauffante et de capteur de température. Il peut, en principe, avoir plusieurs formes (rectangulaire, disque, etc.) et plusieurs tailles suivant la configuration géométrique de l'échantillon, le type de matériau utilisé, etc. Pour des raisons de commodité tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, deux configurations ont été retenues pour le modèle résistif TPS [GUSTAFSSON S.E, (1991)], la forme rectangulaire et la forme disque (**figure II.18**). Cependant il existe plusieurs tailles du capteur afin de pouvoir effectuer des mesures sur des échantillons de différentes dimensions.

Dans ce travail, l'élément TPS utilisé est en forme de disque, dont le capteur TPS est constitué d'une feuille métallique en Nickel en forme de spirales bifilaires insérées entre deux couches isolantes en Kapton pour des températures inférieures à 200°C. Les épaisseurs de la

feuille et de la couche de Kapton sont respectivement de 10 et 25  $\mu\text{m}$ . Les diamètres effectifs des spirales bifilaires sont de 20 et 30 mm et ceux de la couche de Kapton de 25 et 40 mm.



### II.3.3.1.3. HYPOTHESES DE LA METHODE TPS

Le modèle théorique proposé par **Gustafsson** pour la technique TPS repose sur les hypothèses suivantes :

- a)- Le milieu est supposé infini, homogène et isotrope
- b)- La puissance électrique dissipée dans l'échantillon est constante
- c)- LA capacité calorifique et l'épaisseur de l'élément TPS sont négligeables (**[Bouguerra A., (1997) ; [Zhaing X. X., (1993)]**)
- d)- L'effet des couches isolantes et la résistance de contact entre le capteur TPS et l'échantillon sont négligeables
- e)- Les pertes de chaleur à travers les électrodes de l'élément TPS sont négligeables

### II.3.3.1.4. MODELE THEORIQUE DE LA METHODE TPS

Puisque c'est **Gustafsson S. E. (1991)** qui a inventée cette technique, c'est à lui donc que reviennent les premières bases théoriques de cette méthode. Par la suite, différents auteurs ont repris la méthode et l'ont appliquée sur des matériaux différents [**Bouguerra A., (1997) ; Goual M.S., (2001) ; Saxena N.S. et al., (2002) ; Rodríguez-Pérez M.A. et al., (2003) ; Laidoudi B., (2005)**].

Le principe de la méthode, consiste à résoudre l'équation décrivant le transfert conductif dans un milieu infini, homogène et isotrope [**Gustafsson S.E., et al., (1991)**]. Le champ de température peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

où  $a$  est la diffusivité thermique du milieu ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Si l'on suppose que le champ de température à l'instant  $t$ , au point  $(x,y,z)$  due à une quantité de chaleur  $Q\rho C$  instantanément libérée à l'instant  $t = 0$  au point  $(x',y',z')$  s'écrit :

$$T = \frac{Q}{8(\pi at)^{3/2}} \exp \left[ -\frac{\{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2\}}{4at} \right] \quad (\text{II.4})$$

On admet que le modèle de la conduction dans le plan  $y-z$  (**figure II.21**) placé dans un solide infini avec une conductivité thermique  $\lambda(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$ , une diffusivité thermique  $a(\text{m}^2\text{s}^{-1})$  et une chaleur spécifique par unité de volume  $\rho C$ , l'évolution de la température au point  $y,z$  à l'instant  $t$ , due à une puissance émise  $Q$  par unité de surface est donnée par la relation [**Carlsaw et Jaeger, (1959) ; Carlsaw H.S. et al., (1959)**] :

$$\Delta T(y, z, t) = \frac{1}{8\pi^{3/2} \rho c_0} \int_0^t \frac{dt'}{[a(t-t')]^{3/2}} \int_A dy' dz' Q(y', z', t') \exp\left[\frac{-(y-y')^2 - (z-z')^2}{4\lambda(t-t')}\right] \quad (\text{II.5})$$

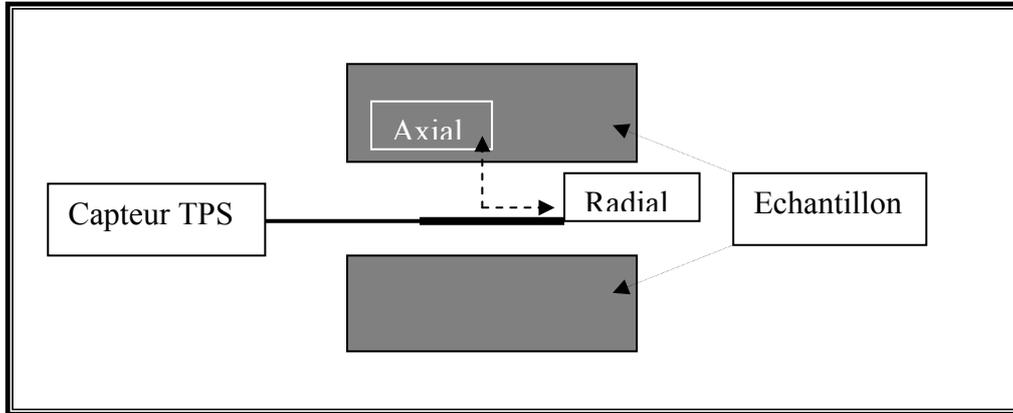


Fig. II.21 : Modèle de conduction dans le plan axial et radial (z-y)

Dans la plupart des cas il est préférable d'exprimer l'évolution de la température en fonction de la variable adimensionnelle  $\tau_c$ . Et avec :  $a(t-t') = \sigma^2 r_s^2$ ,  $\theta = r_s^2 / a$ ,  $\tau_c = (t/\theta)^{1/2}$ . La relation (II.5) devient :

$$\Delta T(y, z, \tau_c) = \frac{1}{4\pi^{3/2} r_s \lambda_0} \int_0^{\tau_c} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_A dy' dz' Q(y', z', t') \exp\left[\frac{-(y-y')^2 - (z-z')^2}{4\sigma^2 r_s^2}\right] \quad (\text{II.6})$$

avec :  $r_s$  le rayon de la sonde TPS (m) et  $\theta$  est le temps caractéristique de l'expérience (s).

L'augmentation en température  $\Delta T(\tau_c)$  induit une variation dans la résistance électrique du capteur TPS  $\Delta R(t)$  donnée par la relation :

$$\Delta R(t) = R_0 (1 + \alpha \overline{\Delta T}(\tau_c)) \quad (\text{II.7})$$

Où

$R_0$  ( $\Omega$ ) est la résistance de l'élément TPS avant le lancement de l'essai,

$\alpha$  ( $K^{-1}$ ) est le coefficient de température de la résistance (TCR)

et  $\overline{\Delta T}(\tau_c)$  (K) est la variation moyenne de la température de l'élément TPS en fonction du temps.

En plus du facteur du temps,  $\overline{\Delta T}(\tau_c)$  dépend également de la puissance émise dans le capteur TPS, des paramètres de conception du capteur TPS, et des caractéristiques thermiques du matériau étudié.

En supposant que le modèle conducteur en forme de disque (élément TPS) est composé de m sources anneaux concentriques et chaque anneau est représenté par une bande métallique d'épaisseur ( $2\nu=10\mu m$ ) et de largeur ( $2d=0,4mm$ ), [Gustafsson, (1989) et (1990)], l'expression théorique de l'élévation de température  $\overline{\Delta T}(\tau_c)$  devient.

$$\overline{\Delta T}(\tau_c) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r_s \lambda} D(\tau_c) \quad (\text{II.8})$$

avec

$$D(\tau_c) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^{\tau_c} d\sigma \cdot \sigma^{-2} \left[ \sum_{n_l=1}^m n_l \sum_{K_l=1}^m K_l \cdot \exp\left(\frac{-(n_l^2 + K_l^2)}{4m^2\sigma^2}\right) J_0\left(\frac{n_l K_l}{2m^2\sigma^2}\right) \right] \quad (\text{II.9})$$

où :

$J_0$  est la fonction de Bessel modifiée de première espèce,

$P_0$  la puissance totale dissipée dans l'élément TPS ( $P_0 = \pi r^2 Q$ ),

$n_l$ : la distance entre les anneaux concentriques (m)

$K_l$  : le nombre d'anneaux considérés

$\theta$  le temps caractéristique défini précédemment (relation II.5) comme le rapport du carré de la longueur caractéristique de l'élément conducteur à la diffusivité thermique du matériau. La longueur caractéristique est égale au rayon de l'élément TPS pour la forme disque et à la moitié de sa largeur pour la forme rectangulaire.

$D(\tau_c)$ , est l'expression théorique de l'élévation de température à l'instant t,

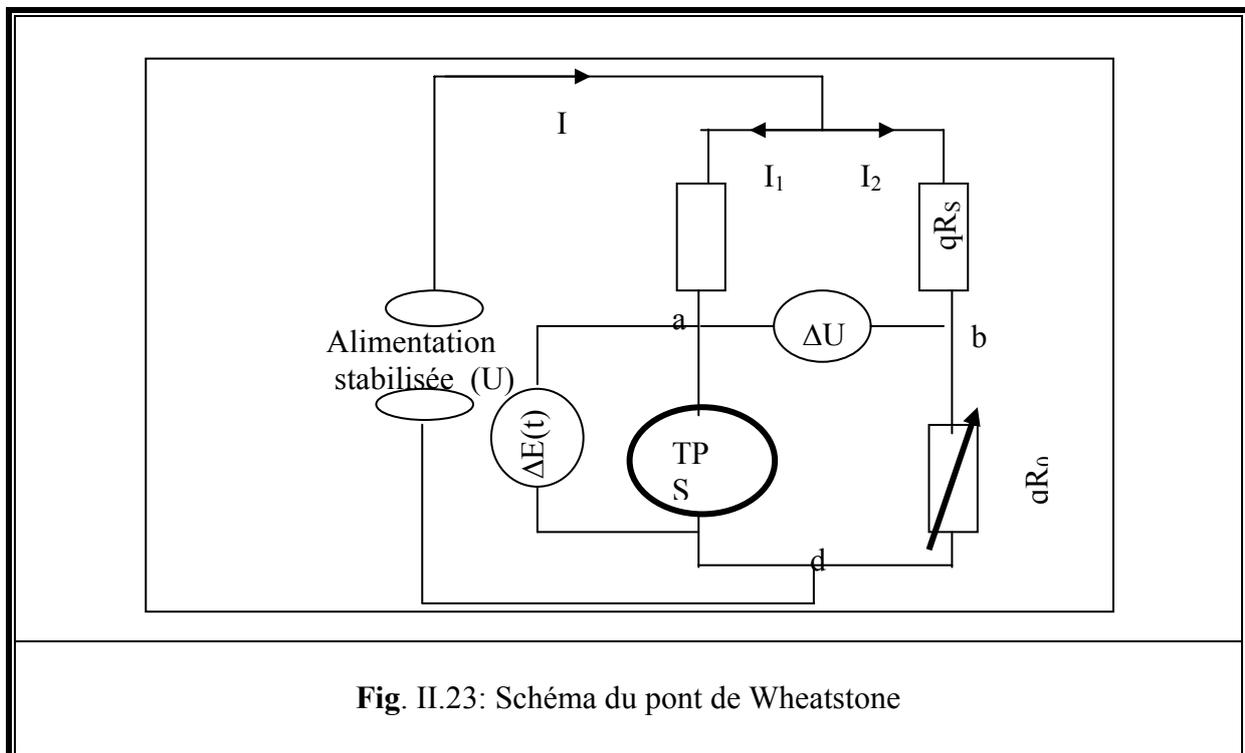
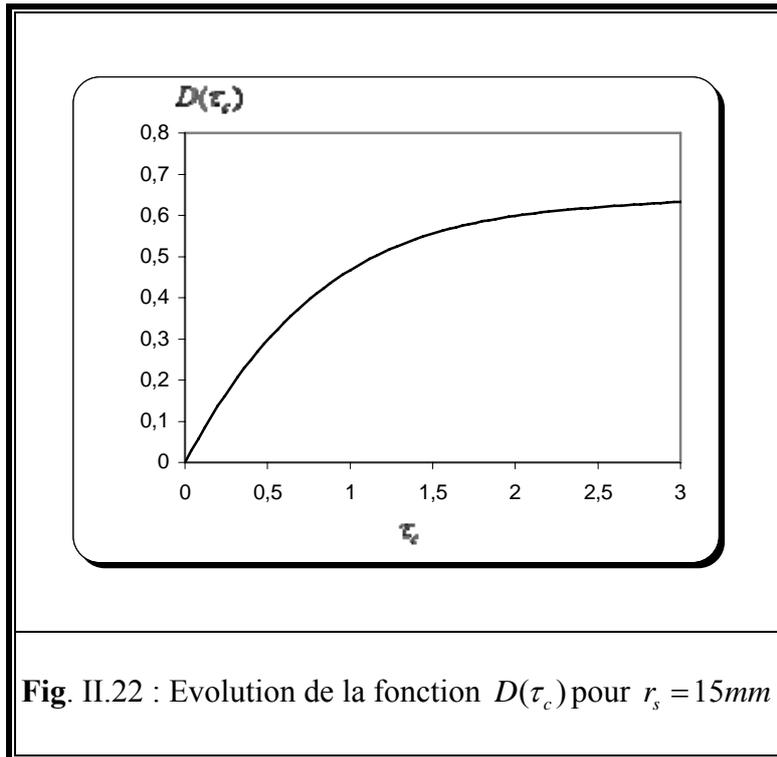
Selon **Gustafsson**, l'approche du modèle en forme bispirale par des sources en anneaux concentriques n'affecte pas les résultats obtenus avec une bonne précision pour des valeurs de  $\tau_c$  comprise entre 0 et 3, intervalle fréquemment rencontré dans les problèmes de thermique [**Bastian G.**, (1989)].

Bien que l'expression (II.9) soit relativement complexe, son calcul numérique ne pose pas de problème particulier. Un programme de calcul sur Matlab, développé par **Bouguerra A.** (1997), a été utilisé pour la détermination de l'expression  $D(\tau_c)$ . Il est d'ailleurs possible de tabuler préalablement ces valeurs, pour un élément TPS donné (diamètre fixé), en fonction de la variable  $\tau_c$ . Cette façon de procéder permet de diminuer considérablement les temps de calcul lors du processus d'identification des paramètres thermiques.

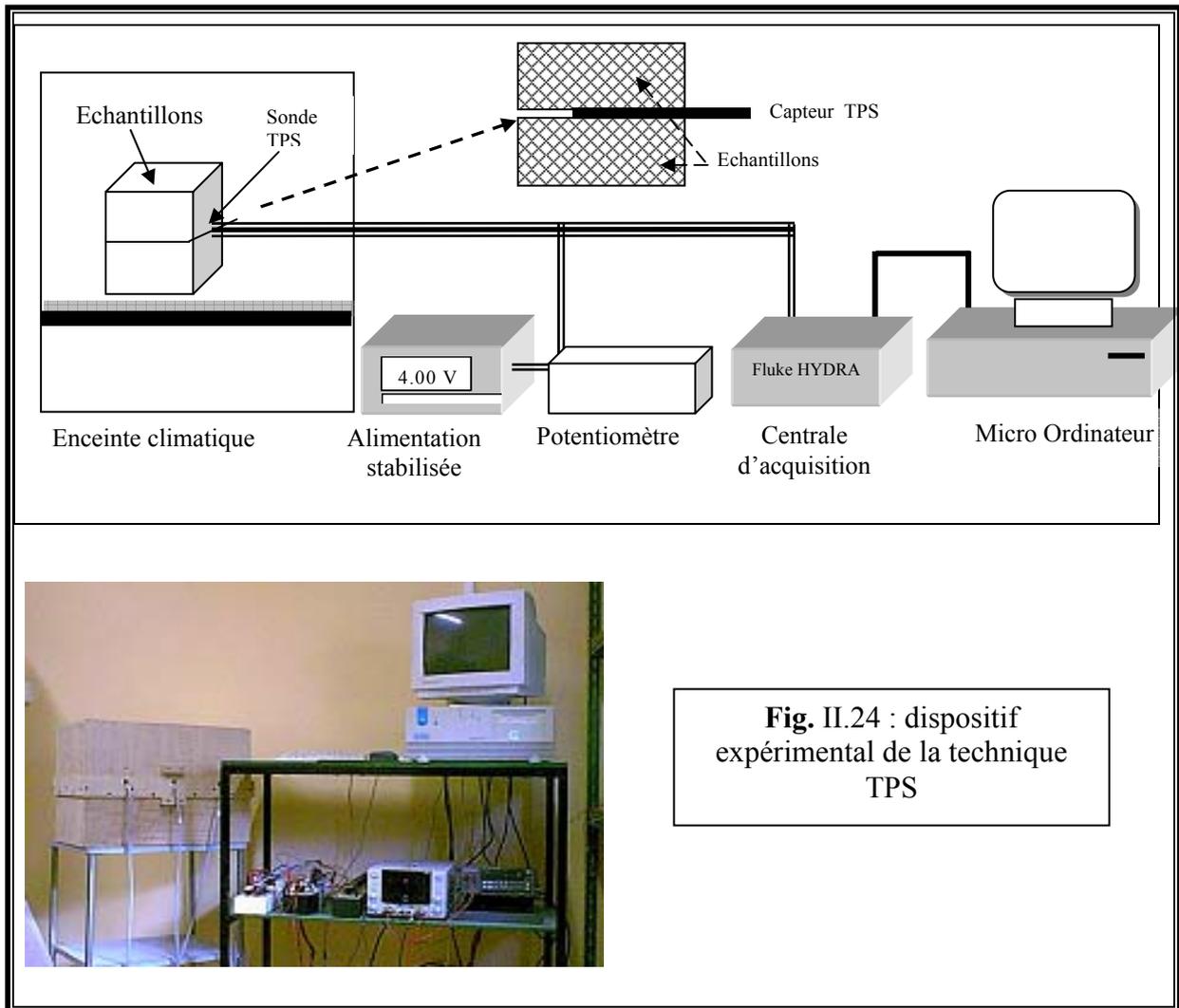
Afin d'obtenir des propriétés thermophysiques représentatives du milieu étudié, **Gustafsson** préconise des valeurs de la variable adimensionnelle  $\tau_c \leq 1$ .

La présentation graphique de la fonction  $D(\tau_c)$  du capteur TPS utilisé ( $r_s = 15\text{mm}$ , m (nombre de spirales)=15), en fonction du  $0 \leq \tau_c \leq 3$  est donnée sur la **figure II.22**.

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé pour la mesure des propriétés thermiques comprend, l'élément TPS, une alimentation stabilisée en tension, un pont de Wheatstone (**figure II.23**), une centrale d'acquisition Type **FLUKE HYDRA** et un micro-ordinateur pour le contrôle et le traitement de données (**figure II.24**).



Après l'établissement de l'équilibre thermique, le pont est équilibré avec une tension d'alimentation faible en ajustant la résistance  $qR_0$  (**Figure II.23**) de sorte que la différence de potentiel  $\Delta U$  entre les branches du pont soit nulle.



A l'équilibre, la variation de potentiel  $\Delta E(t)$  dans l'élément TPS, s'exprime en fonction de la variation de potentiel entre les bornes du pont  $\Delta U(t)$  par la relation suivante :

$$\Delta E(t) = \Delta U(t) [1 - \xi \cdot \Delta U(t)]^{-1} \quad (\text{II.10})$$

Où :

$$\xi = \frac{1}{R_s I_0 \left[ 1 + \frac{q R_p}{q(R_s + R_0) + R_p} \right]} \quad (\text{II.11})$$

$R_p$  est la résistance des différents fils utilisés dans le circuit de mesure ( $\approx 0.05\Omega$ ).

A l'équilibre, la variation de potentiel dans l'élément TPS  $\Delta E(t)$  peut également être exprimée en fonction de la variation de la résistance  $\Delta R(t)$  par la relation :

$$\Delta E(t) = \frac{R_s}{R_s + R_0} I_0 \Delta R(t) \quad (\text{II.12})$$

Où  $I_0$  est l'intensité du courant qui passe initialement dans la branche de la sonde TPS.

Il est à noter qu'une bonne stabilité thermique du milieu et un bon effort de serrage sont recommandés pour minimiser au maximum les erreurs [Devisme J.M., (1980) ; Bransier, J., (1972)]. D'autre part, les dimensions des échantillons doivent être bien choisies afin de satisfaire la condition de la profondeur d'émission de chaleur « Probing Depth » [Gustafsson S.E., (1991) ; Gustafsson S.E., et al., (1991)]. Dans notre cas, les échantillons sont des demi-cubes de  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm}^3$ . De même, et pour minimiser l'influence de la résistance de contact, les surfaces des deux échantillons ont été préalablement polies.

Afin de vérifier, avant chaque essai, la stabilité thermique au niveau des échantillons, deux thermocouples ont été soudés sur les deux plaques de cuivre. L'ensemble est donc introduit dans une enceinte permettant de réguler la température de l'expérience.

A partir des expressions (II.7, II.8 et II.12),  $\Delta E(t)$  peut être exprimée sous la forme :

$$\Delta E(t) = \frac{R_s}{(R_s + R_0)} \frac{I_0 \alpha R_0 P_0}{\pi^{3/2} r_s \lambda} \quad (\text{II.13})$$

### II.3.3.1.5. IDENTIFICATION DES PARAMETRES THERMIQUES

Pour estimer les différents paramètres thermiques des matériaux étudiés, nous avons à comparer le thermogramme expérimental avec le modèle thermocinétique en utilisant la méthode des moindres carrés.

$D(\tau_c)$  est préalablement tabulé, la variation de potentiel entre les deux branches du pont de Wheatstone  $\Delta U(t)$  est enregistrée en fonction du temps et la conductivité thermique  $\lambda(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$  déterminée tout en connaissant le rapport  $\frac{D(\tau_c)}{\Delta E(t)}$ .

En effet, à partir de l'expression de l'élévation de la température expérimentale et de la relation (II.8) donnant l'expression théorique de l'élévation de la température, la conductivité thermique  $\lambda(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$  pourra être estimée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{D(\tau_c)}{\Delta E(t)} \gamma \quad (\text{II.15})$$

Où  $\gamma$  est une constante donnée par la relation :

$$\gamma = \frac{R_s}{R_s + R_0} \frac{\alpha R_0^2 I_0^3}{\pi^{3/2} r_s} \quad (\text{II.16})$$

De même, à partir de la relation (II.10), nous pouvons exprimer la dérivée de  $\Delta E(t)$  par rapport au temps, et en utilisant la relation :

$$C = \frac{\lambda}{a} \quad (\text{II.17})$$

et la dérivée de l'expression

$$\tau_c = \sqrt{\frac{at}{r_s^2}} \quad (\text{II.18})$$

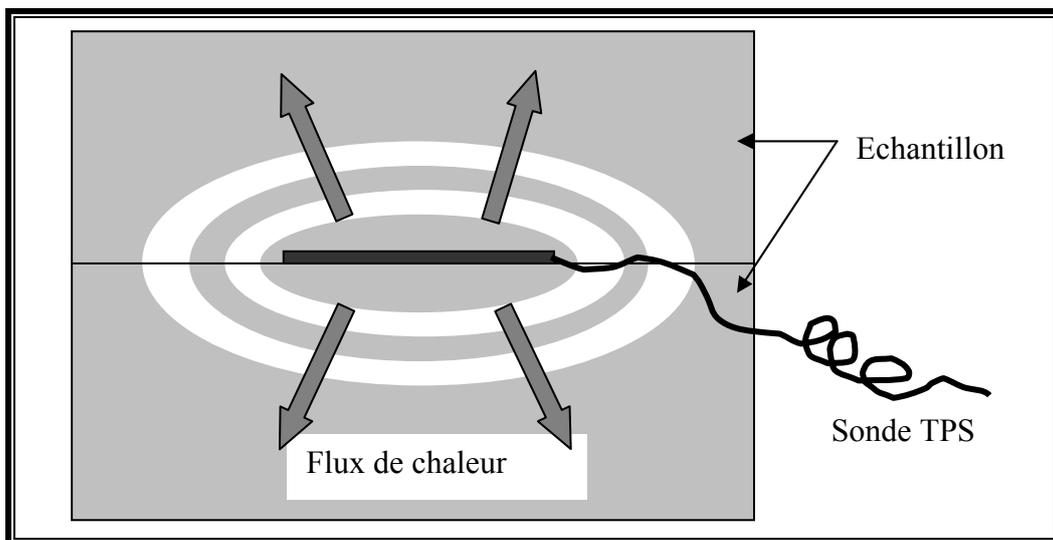
il est possible d'obtenir:

$$\frac{d\Delta E(T)}{dt} \approx \frac{\Delta(\Delta E(t))}{\Delta t} = \frac{R_s}{(R_s + R_0)} \frac{I_0 R_0 \alpha P_0}{\pi^{3/2} r_s^3 C} \left( \frac{1}{2\tau_c} \right) \left[ \frac{\Delta D(\tau_c)}{\Delta t} \right] \quad (\text{II.19})$$

A partir de cette dernière relation (II.19) on peut estimer la chaleur massique  $C(\text{J.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$ , directement par la méthode TPS, à l'aide d'un calcul numérique de  $\Delta E(t)$  et  $D(\tau_c)$ . De même, la diffusivité thermique  $a(\text{m}^2.\text{s}^{-1})$  peut être déterminée à partir de la valeur du temps caractéristique  $\theta$  de l'événement transitoire obtenue par le choix de la valeur de  $\tau_c$  donnant la distance minimale entre la réponse expérimentale  $\Delta E_{\text{exp}}(t)$  (relation (II.10)) et la réponse théorique  $\Delta E_{\text{théo}}(t)$  (**relation** (II.13)).

Afin de simplifier la procédure d'obtention des paramètres thermophysiques des matériaux étudiés, nous avons utilisé un programme de traitement développé sur *Matlab*.

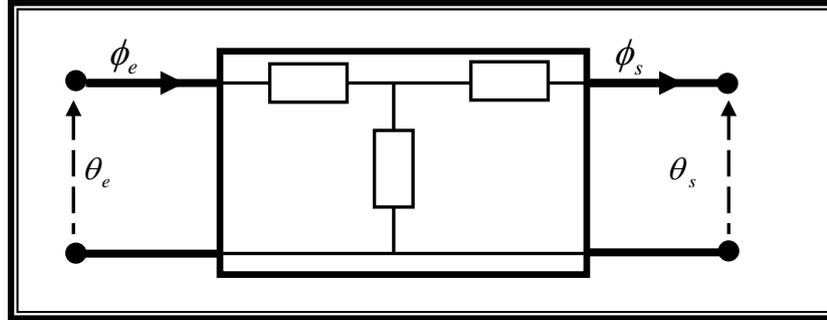
En ce qui concerne l'effusivité thermique, elle peut être déterminée à partir d'un seul enregistrement de la réponse d'un matériau soumis à un flux de chaleur et à partir du même essai, puisqu'à des temps courts, la TPS peut être assimilée à un plan chaud (isothermes plans) (figure II.25) [ZHAING X. X., (1993) ; ZHAING X. X. et al., (1993)].



**Fig. II 25 :** Schéma montrant une sonde TPS avec un grand diamètre et des isothermes en forme d'ellipsoïdes (plan chaud)

L'estimation de l'effusivité thermique à partir de la sonde TPS est obtenue à partir du formalisme basé sur la notion de quadripôle thermique. En effet, cette approche a été déjà utilisée par *Zhang, Degiovani,...*

Ce formalisme permet de relier analytiquement et sous une forme simple les transformées de Laplace de la température et du flux à l'entrée d'un système ( $q_e, F_e$ ) en fonction des transformées de Laplace de la température et du flux en sortie du système ( $q_s, F_s$ ) (**figure II. 26**).



**Fig. II. 26** : Schéma d'un modèle de quadripôle thermique

La notion d'entrée et sortie est conditionnée par la définition même du système. Cette relation analytique simple est déduite de la résolution du problème de transfert non-stationnaire dans l'espace de Laplace qui conduit pour un système passif à une expression du type [**ZHAING X. X.**, (1993) ; **ZHAING X. X. et al.**, (1993), **DEGIOVANNI A.**]:

$$\begin{pmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_s \\ \phi_s \end{pmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Et en présence de termes sources, soit pour un quadripôle actif, à la relation:

$$\begin{pmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_s \\ \phi_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les termes  $A, B, C$  et  $D$  sont fonction des caractéristiques thermiques du milieu étudié. La forme des termes  $X$  et  $Y$  diffère selon la nature du terme source.

Elle permet de représenter un système thermique d'une manière un peu analogue à celle qu'emploie un électricien pour représenter un circuit électrique (impédances et matrices de transfert).

Théoriquement, tout matériau est caractérisé par ses propriétés thermiques d'accumulation et de transmission coexistant et évoluant simultanément dans la matière. Il est donc logique de définir le rapport capacité calorifique ( $Cp$ ) sur résistance thermique ( $Rt$ ) par [**ZHAING X. X.**, (1993) , **DEGIOVANNI A**] :

$$\frac{Cp}{Rt} = \frac{\rho.c.e.S}{\frac{e}{\lambda.S}} = \lambda.\rho.c.S^2 = b^2.S^2 \quad (\text{II.22})$$

avec :  $\lambda$  : conductivité thermique de la paroi ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  
 $\rho$  : masse volumique de la paroi ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  
 $c$  : chaleur massique à pression constante de la paroi ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  
 $S$  : surface de la paroi ( $\text{m}^2$ )

Cette équation (II.22) introduit la quantité  $b = \sqrt{\lambda.\rho.c}$  qui est l'effusivité thermique ( $\text{J s}^{-0.5}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) de la paroi.

La modélisation du système à l'aide du formalisme des quadripôles permet d'exprimer l'évolution de la variation de température  $T(t)-T(0)$  par sa transformée de Laplace. De l'expression précédente (II.20), nous pouvons accéder à l'expression donnant  $\theta$ . L'estimation de l'effusivité passe donc, par les étapes suivantes :

a- détermination du temps  $t$  d'émission de flux durant lequel l'hypothèse du milieu semi infini est valide. Cette hypothèse a été vérifiée dans le cas de la technique TPS.

b- A l'aide du système de quadripôles présenté en (II.20) et dans (II.21), et en passant aux temps longs, nous pouvons déterminer la relation donnant l'effusivité thermique :

$$T(0,t) - T(0,0) = \phi \cdot \left[ Rc - \frac{(m.C_s)_s}{(b.S)^2} \right] + \frac{2.\phi}{b.S.\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t} \quad (\text{II.23})$$

Le tracé de  $[T(0,t)-T(0,0)]$  en fonction de  $\sqrt{t}$  est donc une droite de pente  $\frac{2.\phi}{b.S.\sqrt{\pi}}$  (figure II.28).

La figure II. 27 montre l'évolution de la variation de température mesurée sur une période de 600 s pour une pâte de ciment. Nous observons une bonne corrélation avec un profil linéaire validant les temps courts.

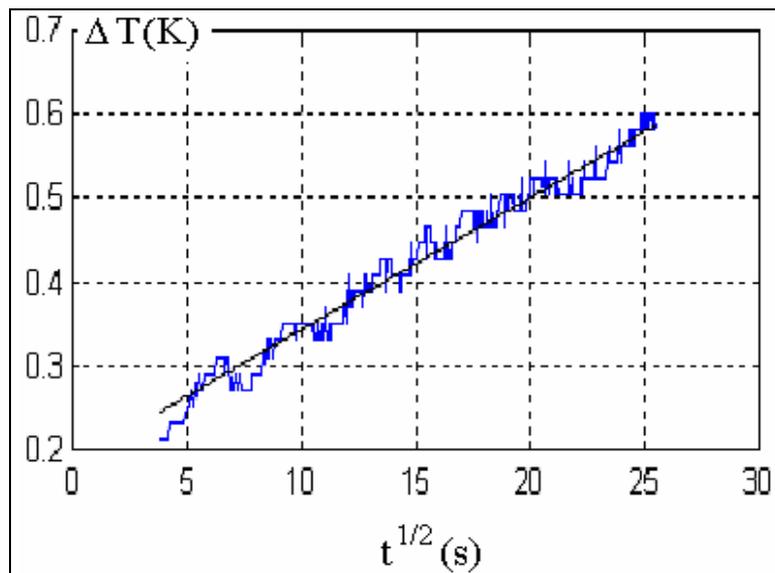


Fig.II.27 : Evolution de la température en fonction de la racine carrée du temps

c- Une fois cette pente déterminée, le calcul de l'effusivité thermique est donc possible.

Un programme développé sur Matlab a été utilisé pour le calcul de l'effusivité thermique par la méthode des moindres carrés.

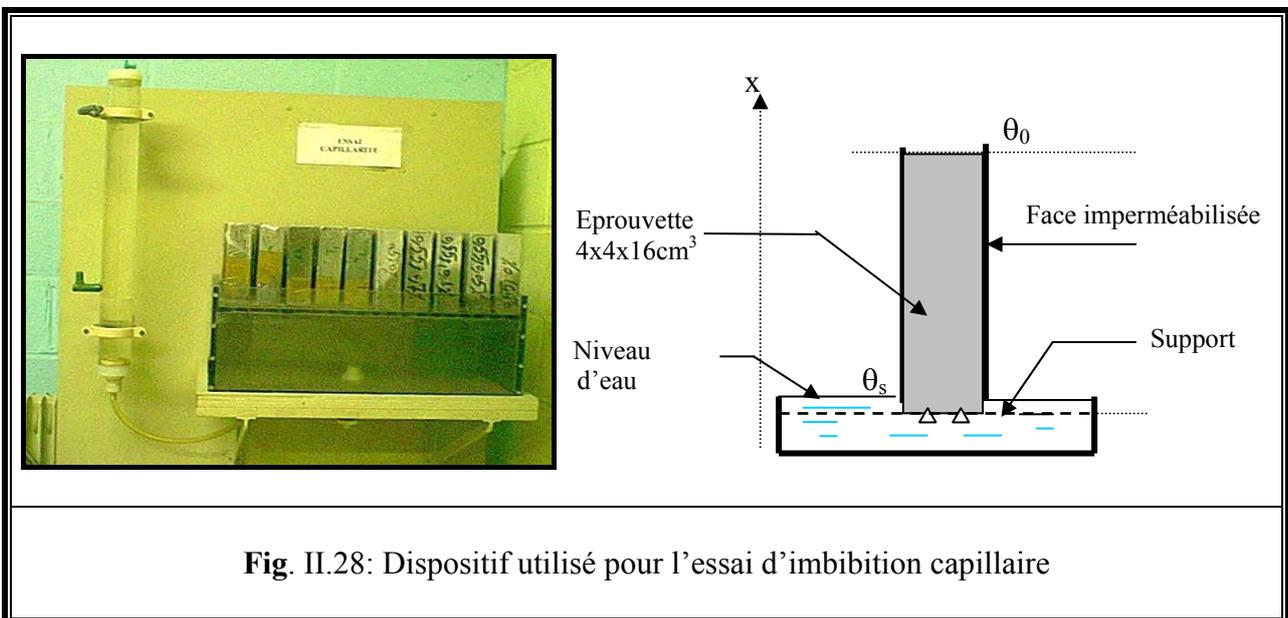
L'approximation aux temps courts est également remarquable dans la mesure où l'inertie de la sonde et la résistance de contact n'apparaissent pas dans la pente de la droite. Ils n'auront donc pas une influence directe sur la détermination de l'effusivité thermique. Ces deux hypothèses ont été déjà validées en supprimant 5% du temps de mesure.

### II.3.4. CARACTERISATION HYDRIQUE

L'essai qui a été utilisé pour la caractérisation hydrique des matériaux étudiés, est l'essai d'imbibition capillaire. Les paramètres ainsi déterminés sont la diffusivité hydrique  $D_w(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  en phase liquide appelé également coefficient de transfert capillaire et la sorptivité  $S_w(\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2})$ .

#### II.3.4.1. PROCEDURE GENERALE DE L'ESSAI DE CAPILLARITE

Afin d'évaluer la sorptivité et la diffusivité hydrique des bétons étudiés des essais de capillarité ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques  $4\times 4\times 16\text{ cm}^3$  préalablement séchées à l'étuve. Pour assurer un écoulement unidimensionnel (sens longitudinal des éprouvettes) et pour éviter les échanges d'humidité avec le milieu extérieur, les faces latérales des éprouvettes ont été préalablement enveloppées par un film plastique étanche. L'éprouvette est ensuite posée verticalement sur l'une de ses deux faces latérales ( $4\times 4\text{ cm}^2$ ) en contact avec l'eau contenue dans un bac de grandes dimensions. La profondeur d'immersion est de 5mm (**figure II.28**).



**Fig. II.28:** Dispositif utilisé pour l'essai d'imbibition capillaire

#### II.3.4.2. DETERMINATION DE LA SORPTIVITE

Ce paramètre hydrique est déterminé en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'éprouvette  $4\times 4\times 16\text{ cm}^3$  en fonction de la racine carrée du temps. Cette évolution est caractérisée en général par deux tronçons linéaires. Le premier, qui est caractérisé par une pente assez importante, est utilisé pour la détermination de la sorptivité du matériau.

$$i = S_w \cdot t^{1/2} \quad (\text{II.24})$$

où  $S_w$  est la sorptivité du matériau et  $i$  le volume d'eau absorbée par unité de surface.

Expérimentalement, la sorptivité est déterminée en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La quantité d'eau absorbée est mesurée par pesée à 0,01g près à différents intervalles de temps et le volume est déduit à l'aide de la masse volumique de l'eau ( $1\text{g/cm}^3$ ). La sorptivité est, donc, définie comme étant la pente de la droite caractérisant l'évolution du volume d'eau en fonction de la racine carrée du temps dans la première période de l'absorption. Notons que la sorptivité, ainsi déterminée, est équivalente au coefficient d'absorption capillaire utilisé par les recommandations de **Rilem [Rilem CPC 11.1 (1974)]**. Le taux d'absorption volumique par unité de surface  $i$  à un instant  $t$  donné est calculé en utilisant la formule :

$$i = \frac{M(t) - M(0)}{\rho_w \cdot A_{ab}} \quad (\text{II.25})$$

où

$M(t)$  : masse de l'échantillon humide à l'instant  $t$ ,

$M(0)$  : masse initiale de l'échantillon à l'état sec,

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau liquide ( $1\text{ g/cm}^3$ ),

$A_{ab}$  : Surface absorbante de l'échantillon ( $4 \times 4 = 16\text{ cm}^2$ ).

En général, les courbes  $i = f(t^{-1/2})$  présentent deux tronçons de droites. Le premier tronçon, de plus forte pente, représente l'absorption d'eau par les capillaires de faibles dimensions tandis que le deuxième, de pente plus faible, représente le remplissage des pores de grande taille. Selon la définition, la sorptivité est donnée par la pente du premier tronçon.

#### II.3.4.3. DETERMINATION DE LA DIFFUSIVITE HYDRIQUE

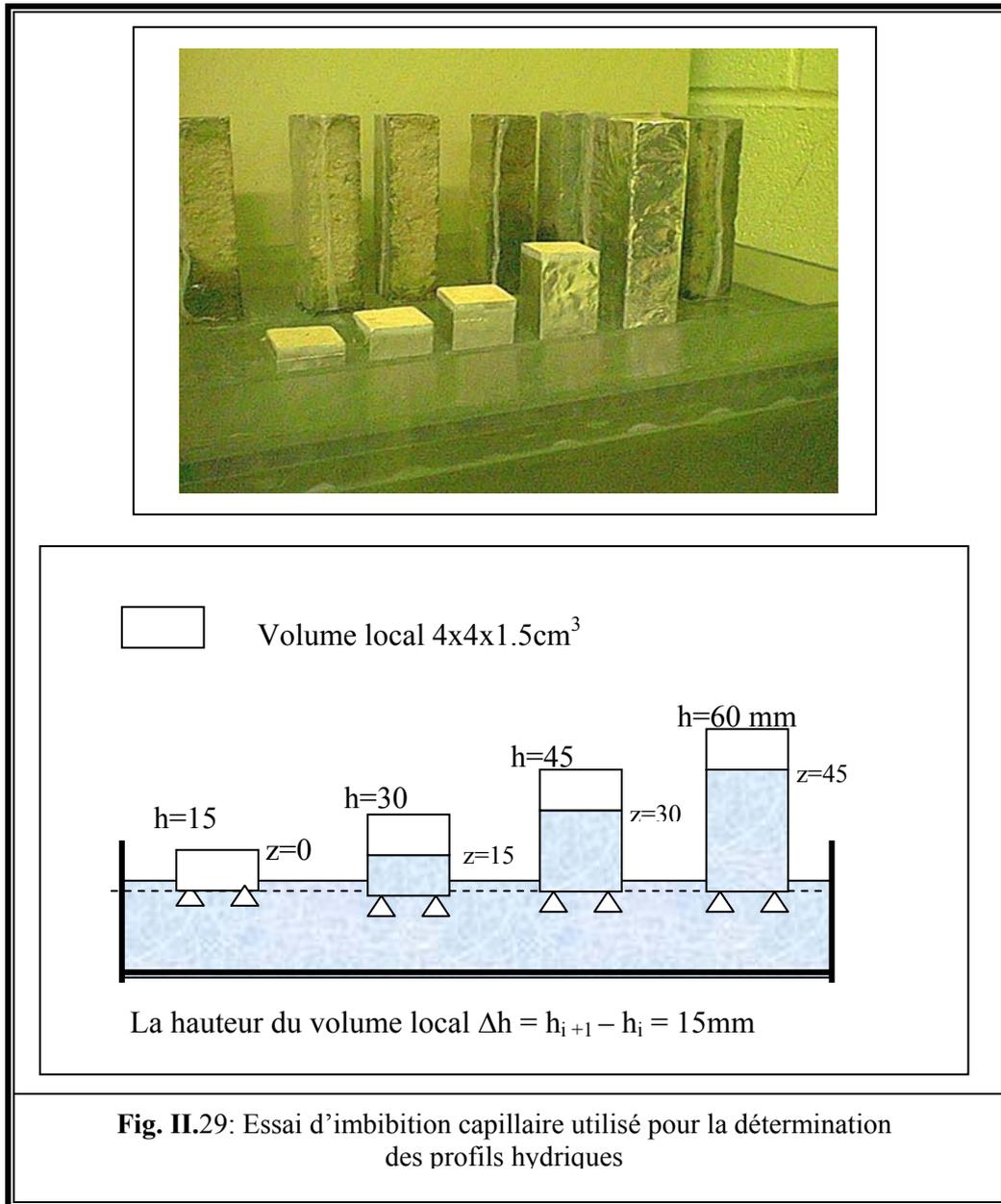
Avant de déterminer la **diffusivité hydrique**, il faut déterminer d'abord les **profils hydriques**  $\theta(x,t)$ . Ces derniers, et pour pouvoir bien suivre l'évolution de la teneur en humidité dans un milieu poreux sur une période de temps assez longue (quelques jours), doivent être, normalement, déterminés par l'atténuation des rayons  $\gamma$  ou la résonance magnétique nucléaire RMN [**Perrin B. et al., (1987)**, **Bellini Da Cunha Neto J.A., (1992)**, **Kaufmann J. et al., (1997)**, **De Freitas V.P. et al., (1991)**]. Mais, malheureusement, ces moyens de mesure ne sont pas toujours accessibles, dans la plupart des laboratoires.

La technique utilisée, donc, pour l'évaluation de la diffusivité hydrique de notre matériau est une technique récemment développée et appliquée par **M.S Goual (2001)**. Elle a été aussi appliquée par différents autres chercheurs [**Benazouk A. et al., (2003)**, **Madjoudj N., (2004)**].

Cette technique ne nécessite qu'une balance de bonne précision, une étuve et un chronomètre. Elle consiste à suivre, dans le temps, l'évolution du volume d'eau absorbé par plusieurs échantillons de hauteurs différentes. Ces derniers sont obtenus par le découpage des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$  à l'aide d'une scie rotative. La différence entre deux hauteurs successives  $h_i$  et  $h_{i+1}$  doit être égale à la hauteur du volume local  $\Delta h$  préalablement fixé. Le volume local est alors égal à  $(A \cdot \Delta h)$  où  $A$  est la section de la face absorbante de l'éprouvette.

Les hauteurs envisagées dans cette étude sont : 15, 30, 45, 60 mm (**figure II.29**).

Le pas, qui est donc de 15 mm, représente la hauteur du volume local et il va nous permettre de suivre les profils hydriques à différents niveaux de l'éprouvette.



L'évolution de la teneur volumique en eau dans le volume local a été déterminée à des abscisses  $z = 15, 30, \text{ et } 45 \text{ mm}$  en utilisant la relation suivante :

$$\theta(z, t) = \frac{V_w(z + 15, t) - V_w(z, t)}{V_{local}} \quad (\text{II.26})$$

avec :

$$V(0, t) = 0$$

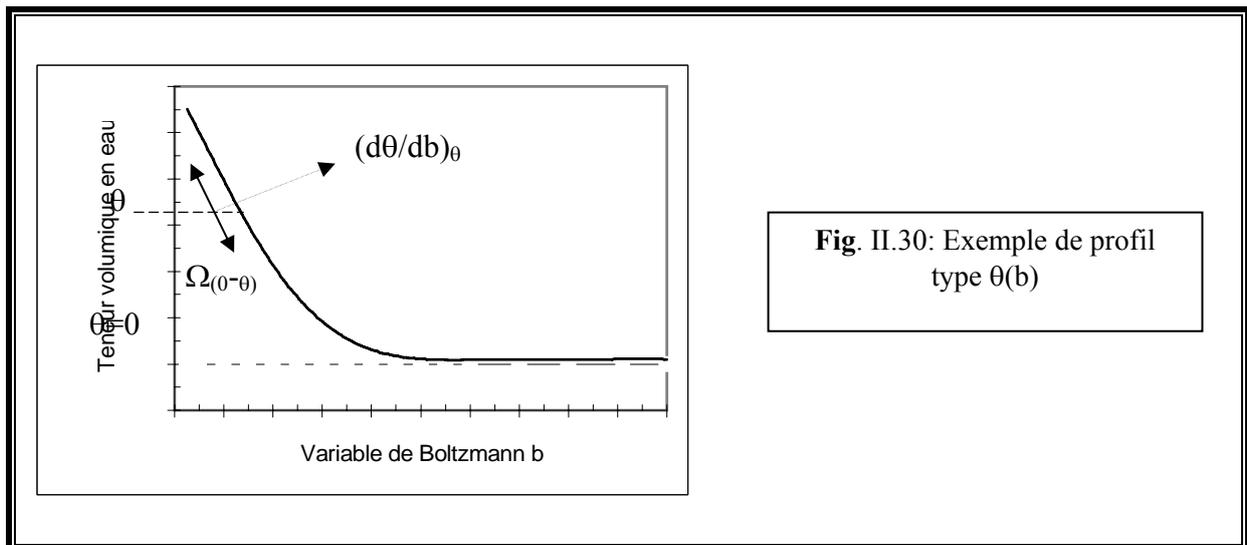
$z$  prend les valeurs 0, 15, 30 et 45 mm,

$V_w(z, t)$  est le volume d'eau absorbé par l'échantillon de hauteur  $h = z(\text{mm})$  à l'instant  $t$ .

Une fois les profils hydriques sont déterminés (relation II.26), on déduit le profil type  $\theta(b)$  en faisant correspondre la teneur en eau  $\theta(z, t)$  à la teneur en eau  $\theta(b = z \cdot t^{-1/2})$  où  $b$  est la variable de **Boltzmann**. La **diffusivité** est ensuite déterminée à l'aide de la formule II.30.

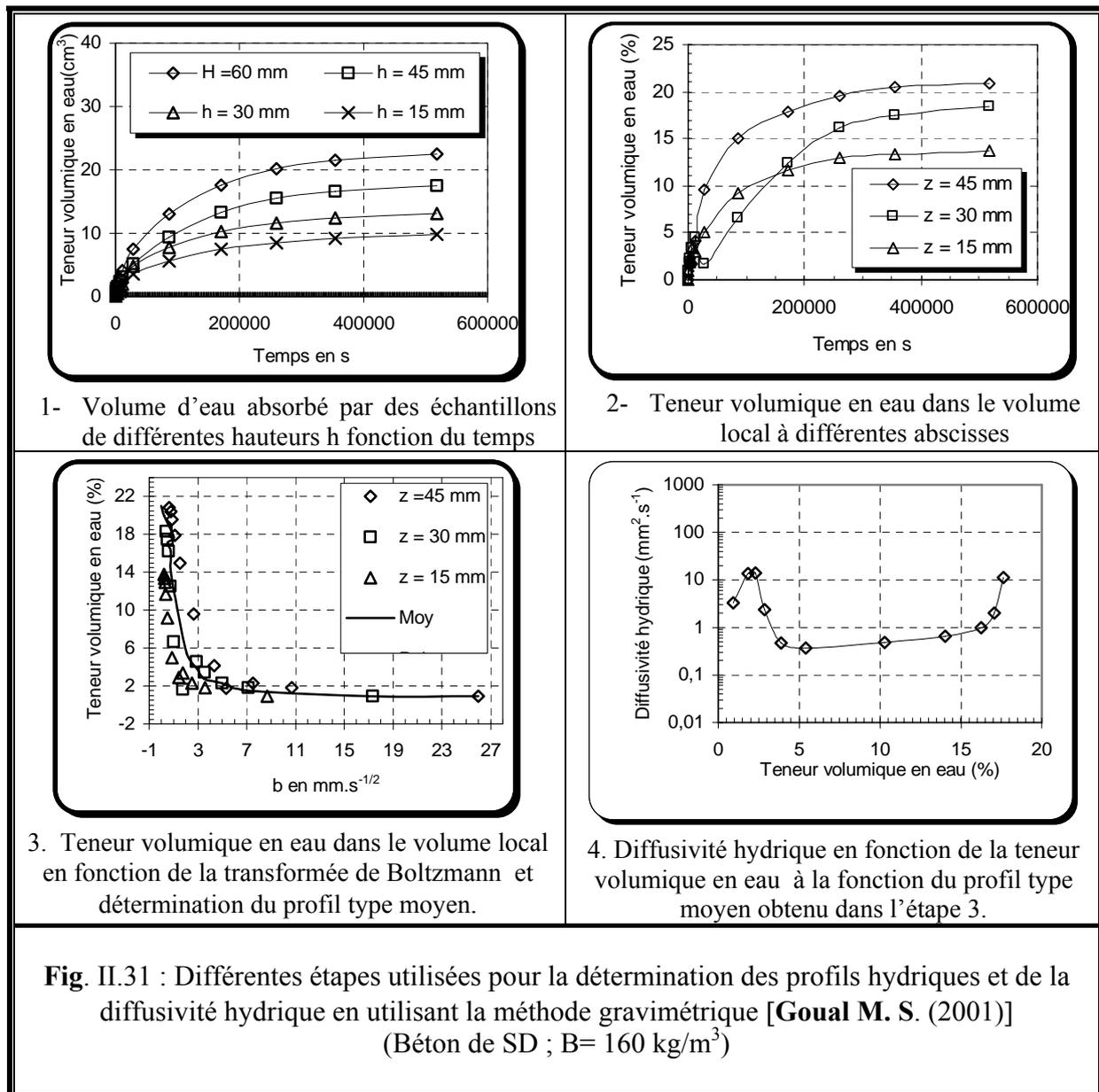
$$D_w = -\frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{d\theta}{db}\right)_\theta} \int_{\theta_0}^{\theta} b \cdot d\theta \quad (\text{II.27})$$

La pente  $\left(\frac{d\theta}{db}\right)_\theta$  et l'aire  $\left(\int_{\theta_0}^{\theta} b \cdot d\theta\right)$  peuvent être déterminées expérimentalement à partir du profil type  $\theta(b)$  (**figure II.30**).



A titre d'exemple, la **figure II.31** montre les étapes suivies pour la détermination des profils hydriques et la diffusivité hydrique en utilisant la méthode gravimétrique pour un béton de sable dunaire contenant  $160 \text{ kg/m}^3$  de copeaux de bois.

- **L'étape -1-** représente l'évolution du volume d'eau absorbé par des échantillons de différentes hauteurs  $h$  en fonction du temps  $t$  ;
- **L'étape -2-** représente la teneur volumique en eau contenue dans le volume local à différentes Abscisses (en utilisant l'étape (1) et la formule II.29 ;
- **L'étape -3-** représente la teneur volumique en eau dans le volume local en fonction de la transformée de Boltzmann ( $b$ ) appliquée aux résultats de l'étape 2. et la détermination du profil type moyen.
- **L'étape -4-** représente la diffusivité hydrique en fonction de la teneur volumique en eau en appliquant l'expression II.30 à la fonction du profil type moyen obtenu dans l'étape 3.



### II.3.5. ETUDE DE LA DURABILITE

Les essais de la durabilité sont des essais spécifiques qui ont pour objectif de vérifier la préservation, au cours du temps, des qualités des bétons. La dégradation du béton peut être due à plusieurs facteurs (attaques par des agents agressifs, corrosion des armatures dans le cas des bétons armés, éclatement du ou gonflement, fissuration due aux fortes variations dimensionnelles, etc.). Dans notre cas, nous avons essayé de soumettre, en laboratoire, les matériaux étudiés à des essais de vieillissement accélérés et d'apprécier leur tenue dans le temps vis à vis ces derniers. Pour cette étude, nous avons opté pour deux essais de durabilité : essai gel – dégel et essai mouillage - séchage.

#### II.3.5.1. ESSAI GEL – DEGEL

Il existe un certain nombre de protocoles d'essais pour tester la durabilité d'un béton au gel – dégel. Ces procédures varient d'un pays à l'autre selon la sévérité du climat. La définition exacte du nombre de cycles devant traduire la sévérité de la sollicitation thermique naturelle.

La norme française **AFNOR P18 205** considère trois types d'essais de gel – dégel selon les conditions suivantes :

- *Gel faible* : deux jours par an au maximum ayant atteint une température inférieure à  $-5\text{ °C}$ .
- *Gel sévère* : plus de dix jours par an ayant atteint une température inférieure à  $-10\text{ °C}$
- *Gel modéré* : entre gel faible et gel sévère.

Il existe deux procédures d'essais de gel sur le béton durci : La norme **NF P18 424** de gel et dégel dans l'eau et la norme **NF P18 425** de gel dans l'air et dégel dans l'eau inspirées de la norme américaine **ASTM 666** (Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing).

Dans tous les cas, les essais sont réalisés sur des éprouvettes de dimensions définies, disposées dans une enceinte climatique et testées régulièrement en contrôle non destructif : mesure de la fréquence de résonance, de la variation dimensionnelle (gonflement). Ainsi les bétons ne sont pas considérés comme durables si, au bout de 300 cycles, le module dynamique relatif est inférieur à 60 %. Le choix de la procédure de l'essai (gel dans l'eau ou dans l'air) dépend du milieu de gel.

Dans notre cas, et selon la classification citée ci-dessus, le type de gel qui caractérise les conditions climatiques locales est le « gel faible ». Pour ces raisons-là, nous avons opté pour l'essai recommandé par la norme **ASTM D 560**. Cet essai comprend douze cycles de vieillissement accélérés où chacun est caractérisé par quatre heures de gel suivies par une immersion totale dans l'eau jusqu'au dégel complet (quatre heures environ). Pour cet essai nous avons utilisé une enceinte à température réglable. Le gel a été effectué dans l'air à une température de  $-5\text{ °C}$  et le dégel dans l'eau à une température de  $23\text{ °C}$ . Les cycles gel – dégel, variant donc de  $-5\text{ °C}$  à  $23\text{ °C}$ , ont commencé, à 28 jours. Les éprouvettes utilisées sont des cubes  $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$ .

Notons que, dans notre cas et pour avoir des résultats plus significatifs, le nombre de cycles a été poussé un peu plus loin : les éprouvettes ont été soumises à 25 cycles de gel-dégel.

### **II.3.5.2. MOUILLAGE - SECHAGE**

Cet essai est réalisé selon la norme **ASTM D 559**. Il comprend douze cycles de vieillissement accélérés dont chacun consiste à immerger les éprouvettes cubiques  $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$  dans l'eau pendant cinq heures, suivi par un séchage à l'étuve pendant 42 heures à  $70\text{ °C}$ . Les cycles mouillage-séchage, ont aussi commencé, à 28 jours avec des éprouvettes cubiques de dimensions  $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$ .

Notons enfin que, comme pour l'essai de gel-dégel et pour les mêmes raisons, le nombre de cycles a été augmenté : les éprouvettes ont été soumises à 25 cycles de mouillage - séchage.

## **II.4. CONCLUSIONS**

Cette partie a compris deux grandes parties : une première partie consacrée à la caractérisation des matériaux de base (sable, ciment, filler, copeaux de bois et adjuvant) ainsi qu'à l'élaboration des composites qui font l'objet de cette étude et une deuxième partie consacrée à

la présentation des techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des composites bétons de sable – copeaux de bois.

Les caractéristiques mécaniques ont été déterminées par écrasement direct des matériaux, les caractéristiques thermiques par la méthode de la sonde « TPS » et les paramètres hydriques par imbibition capillaire.

Les caractéristiques mécaniques déterminées sont la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Les caractéristiques thermiques déterminées sont la conductivité thermique, la diffusivité thermique, l'effusivité thermique et la capacité calorifique, et les caractéristiques hydriques sont la sorptivité et le coefficient de transport hydrique.

Pour tous ces essais, nous avons présenté les procédures détaillées qui ont été utilisées notamment pour la méthode TPS utilisée pour la détermination des paramètres thermiques et la méthode gravimétrique utilisée pour la détermination des paramètres hydriques.

Afin d'avoir une idée sur la structure des composites étudiés qui va nous aider sûrement à interpréter les différents résultats obtenus, une analyse d'image a été menée en utilisant un Microscope Electronique à Balayage (MEB) et un vidéo – microscope.

Enfin nous avons présenté les essais de durabilité qui ont été utilisés dans notre étude: Essai gel-dégel et essai mouillage-séchage.

# *Chapitre III*

---

CARACTERISATION PHYSICO MECANIQUE  
ET ETUDE STRUCTURELLE  
DES BETONS DE SABLE  
A BASE DE COPEAUX DE BOIS

---

### III. CARACTERISATION PHYSICO MECANIQUE ET ETUDE STRUCTURELLE DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS

Les composites étudiés dans ce travail sont obtenus par adition de copeaux de bois aux bétons de sable. L'ajout de copeaux de bois a pour but, premièrement l'allègement des bétons de sable pour permettre une mise en œuvre facile, deuxièmement l'amélioration de leur pouvoir isolant pour leur permettre une utilisation dans des éléments isolants - porteurs.

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'étudier le comportement thermo-mécanique de ces matériaux afin de trouver un compromis entre leurs propriétés mécaniques et leurs propriétés thermiques.

De même, et afin d'approfondir la caractérisation de ces matériaux, d'autres propriétés, telles que les propriétés hydriques, la microstructure, les variations dimensionnelles, seront également étudiées.

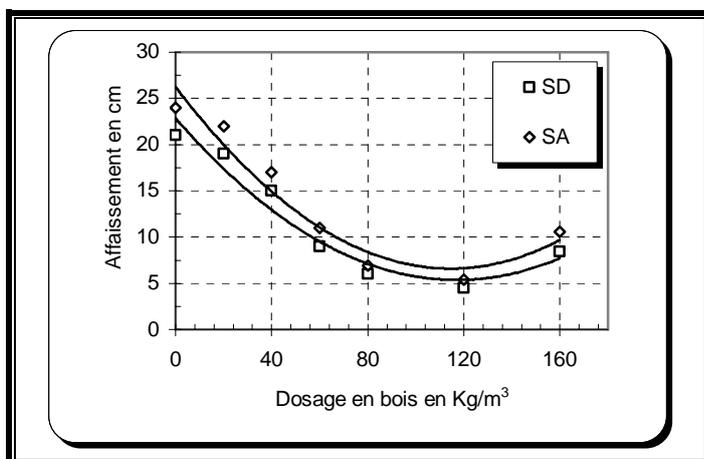
#### III.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS

##### III.1.1. ETUDE DE LA MANIABILITE

La maniabilité des bétons de sable (dunaire et alluvionnaire) sans copeaux de bois a été étudiée dans des travaux précédents [Bederina, (2000)]. Elle dépend du dosage de tous les constituants et essentiellement du dosage en eau. Elle s'améliore, comme pour tous les bétons, avec l'augmentation du rapport E/C. Cependant elle diminue avec l'augmentation du dosage en filler jusqu'à un certain optimum puis elle commence à s'améliorer.

Toutefois l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage améliore la maniabilité mais diminue la résistance. Notons qu'un excès d'eau peut être aussi un facteur d'allègement puisque c'est une eau non consommée par l'hydratation qui, en s'évaporant, laisse une microporosité dans la matrice.

Pour voir l'effet des copeaux de bois sur la maniabilité du béton de sable, différentes teneurs en bois ont été envisagées. Pour chaque composition nous avons mesuré l'affaissement au cône d'Abrams. Les résultats ainsi obtenus sont représentés à la **figure III.1**.



**Fig. III.1** : Evolution de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction de la teneur en copeaux de bois (E/C=1)

On constate que l'incorporation de copeaux de bois dans le béton de sable, avec des proportions allant de 0 à 120 kg/m<sup>3</sup> environ, diminue la maniabilité. Ceci est peut être dû au fait que les copeaux de bois jouent un rôle de fibre et augmentent la cohésion entre les différents grains du mélange. Au delà de 120 kg/m<sup>3</sup>, une légère amélioration est enregistrée.

### III.1.2. ETUDE DE LA MASSE VOLUMIQUE

Les masses volumiques apparentes du béton durci (composite) ont été déterminées par pesée et mesure de dimensions d'éprouvettes âgées de 28 jours et séchées à 60°C jusqu'à masse constante. Les masses volumiques du composite et de la matrice ont été calculées respectivement à l'aide des relations (III.1 et III.2).

$$M_{\text{sec}}(\text{composite}) = M_{\text{sec}}(\text{matrice}) + M_{\text{sec}}(\text{bois}) \quad (\text{III.1})$$

$$\rho_{\text{sec}}(\text{composite}) = \beta_m \cdot \rho_{\text{sec}}(\text{matrice}) + \beta_B \cdot \rho_{\text{sec}}(\text{bois}) \quad (\text{III.2})$$

Où

$M_{\text{sec}}$  : masse sèche,

$\rho_{\text{sec}}$  : densité sèche,

$\beta_m$  et  $\beta_B$  sont les proportions volumiques de la matrice et du bois dans le composite.

Les résultats obtenus, en fonction de la teneur en copeaux de bois, sont regroupés dans le **tableau III.1**

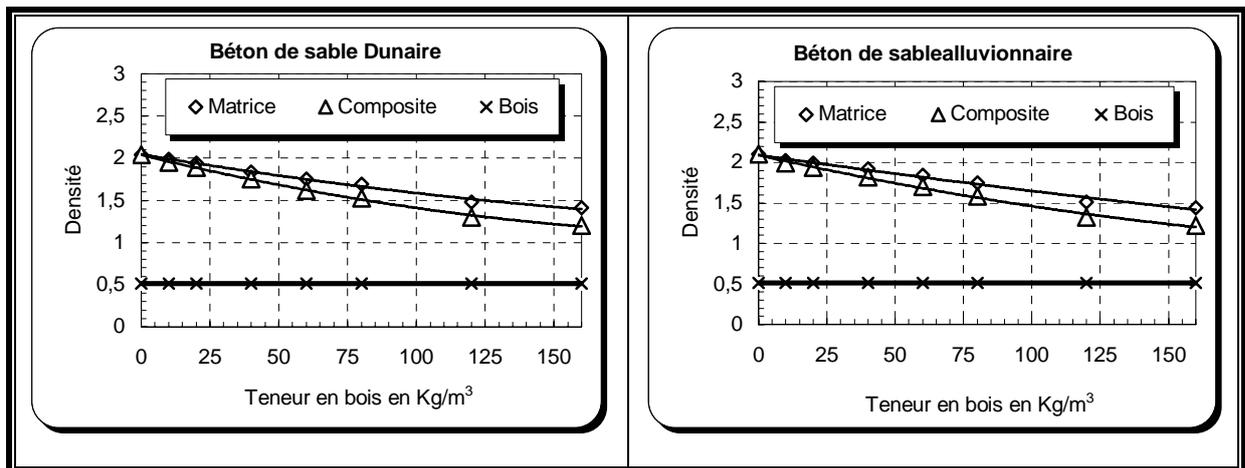
**Tableau III.1:** Variation de la masse volumique du composite et de la masse volumique de la matrice en fonction de la teneur en copeaux de bois

B (kg/m <sup>3</sup> )	Béton de SD				Béton de SA			
	$\beta_m$ (%)	$\beta_b$ (%)	Densité sèche du composite	Densité sèche de la matrice	$\beta_m$ (%)	$\beta_b$ (%)	Densité Sèche du composite	Densité sèche de la matrice
0	100	0	2.04	2.04	100	0	2.1	2.10
10	98.09	1.91	1.95	1.99	98.09	1.91	1.99	2.02
20	96.24	3.76	1.89	1.94	96.24	3.76	1.94	1.99
40	92.75	7.25	1.75	1.84	92.75	7.25	1.82	1.92
60	89.51	10.49	1.62	1.75	89.51	10.49	1.70	1.84
80	86.48	13.52	1.53	1.69	86.48	13.52	1.58	1.75
120	81.01	18.99	1.30	1.48	81.01	18.99	1.32	1.51
160	76.20	23.80	1.20	1.41	76.20	23.80	1.22	1.44
Variations max en %			<b>41.18</b>	<b>30.88</b>			<b>41.92</b>	<b>31.43</b>

Le béton de sable et grâce à sa petite granularité est plus léger que les bétons traditionnels. L'ajout de bois allège davantage les bétons de sable. Plus la proportion de copeaux de bois augmente, plus la masse volumique du composite diminue (**figure III.2**). Ceci est normal du fait qu'on a introduit des grains de bois de structure poreuse dans une matrice cimentaire plus dense et plus lourde. De plus, nous pouvons aussi remarquer que cette diminution est presque linéaire. Cette linéarité est due au fait que les copeaux de bois sont ajoutés au béton en plus et non pas par substitution avec d'autres constituants solides (comme le sable par exemple).

Notons que le bois est un matériau qui ne se transforme pas dans le composite, sa densité sèche reste donc constante. La visualisation des copeaux de bois dans le composite va nous montrer par la suite que la structure poreuse du bois reste presque intacte et aucune pénétration de matière solide n'est observée.

Toutefois, ce qui peut nous apparaître bizarre, en examinant les résultats obtenus, c'est bien la diminution de la masse volumique de la matrice. Les courbes de la **figure III.2** montrent bien la diminution de cette dernière en augmentant la proportion des copeaux de bois.



**Fig. III.2 :** Evolution de la densité sèche des copeaux de bois, de la matrice et du composite en fonction de la teneur en copeaux de bois dans les deux bétons de sable étudiés

En augmentant, donc, la teneur en copeaux de bois, non seulement la masse volumique du composite diminue, mais aussi celle de la matrice. Ce phénomène est probablement dû au fait, que lors du séchage, l'eau logée dans les copeaux de bois transite par la matrice et induit dans celle-ci une porosité qui est d'autant plus importante que la proportion de copeaux est élevée. De plus, il est à noter que la diminution maximale de la masse volumique de la matrice à base de sable de dune est légèrement plus faible que celle de la matrice à base de sable alluvionnaire. Ceci est dû au fait que, dans un sable alluvionnaire moins poreux qu'un sable dunaire, l'évaporation de l'eau absorbée par les copeaux de bois est plus difficile, ce qui oblige l'eau à créer une porosité supplémentaire dans la matrice.

#### • Conclusion

L'ajout de copeaux de bois allège considérablement les bétons de sable:

- en introduisant sa propre porosité,
- et en induisant une porosité supplémentaire dans la matrice.

### III.1.3. ETUDE MICROSTRUCTURELLE

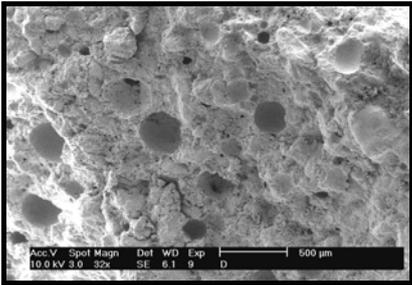
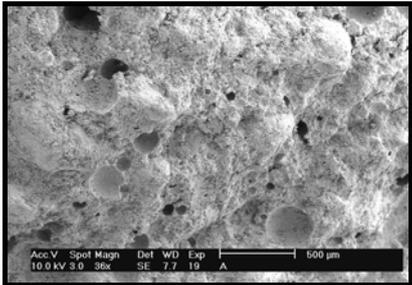
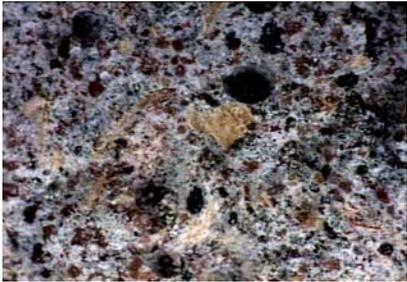
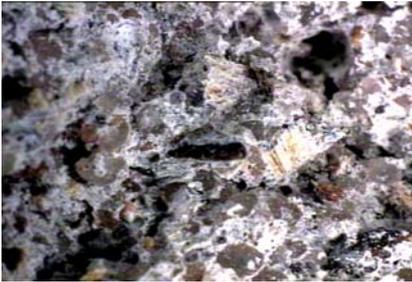
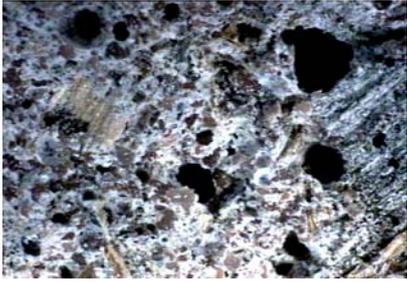
Pour un matériau à base de ciment, la plupart des propriétés sont liées à sa structure. Il est nécessaire, donc, de prévoir une caractérisation microscopique, à chaque fois qu'on étudie un matériau de ce genre. Pour se rapprocher le plus possible de la structure de nos matériaux, deux types de microscopes ont été utilisés :

- Un *microscope optique* permettant la visualisation à grandes échelles,
- Un *microscope électronique à balayage* permettant la visualisation à petites échelles.

La visualisation a été concentrée, surtout, sur l'aspect général des matériaux étudiés, sur la morphologie de la pâte de ciment durcie, sur l'adhérence matrice – copeaux de bois et sur la répartition des copeaux de bois dans la matrice.

### III.1.3.1. ASPECT GENERAL DU COMPOSITE

A des faibles grossissement ( $G < 100$ ), les deux bétons de sable, alluvionnaire et dunaire, présentent un aspect relativement homogène et compact en surface, quelle que soit la quantité de copeaux de bois présente dans le composite (images n°1 à 6, **figure III.3**).

Béton de sable dunaire	Béton de sable alluvionnaire
 <p data-bbox="359 913 608 981">Image n°1 ; G = 32 B = 0 (MEB)</p>	 <p data-bbox="978 913 1227 981">Image n°4 ; G = 36 B = 0 (MEB)</p>
 <p data-bbox="256 1305 711 1373">Image n°2 ; G = 50 B = 40 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>	 <p data-bbox="873 1305 1327 1373">Image n°5 ; G = 50 B = 40 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>
 <p data-bbox="256 1697 711 1765">Image n°3 ; G = 50 B = 80 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>	 <p data-bbox="873 1697 1327 1765">Image n°6 ; G = 50 B = 80 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>

**Fig. III.3** : Aspect général du béton de sable

Dans les deux bétons de sable, dunaire et alluvionnaire, l'aspect général de la matrice met en évidence l'augmentation de la porosité de la matrice avec l'augmentation du dosage en copeaux de bois, ce qui montre que le bois n'introduit pas seulement sa propre porosité dans

le composite, mais aussi une porosité supplémentaire la matrice. Ceci confirme la diminution de la densité de la matrice avec l'augmentation de la teneur en bois, déjà remarquée dans l'étude de la densité (§ III.1.2).

### III.1.3.2. PATE DE CIMENT DURCIE

Avec des grossissements très élevés ( $G > 2000$ ), l'analyse des images menée par MEB permet de noter que, dans le cas du sable alluvionnaire, on observe généralement, un mélange de plaquettes et d'aiguilles (images n°1, 2 et 3 de la **figure III.4**).

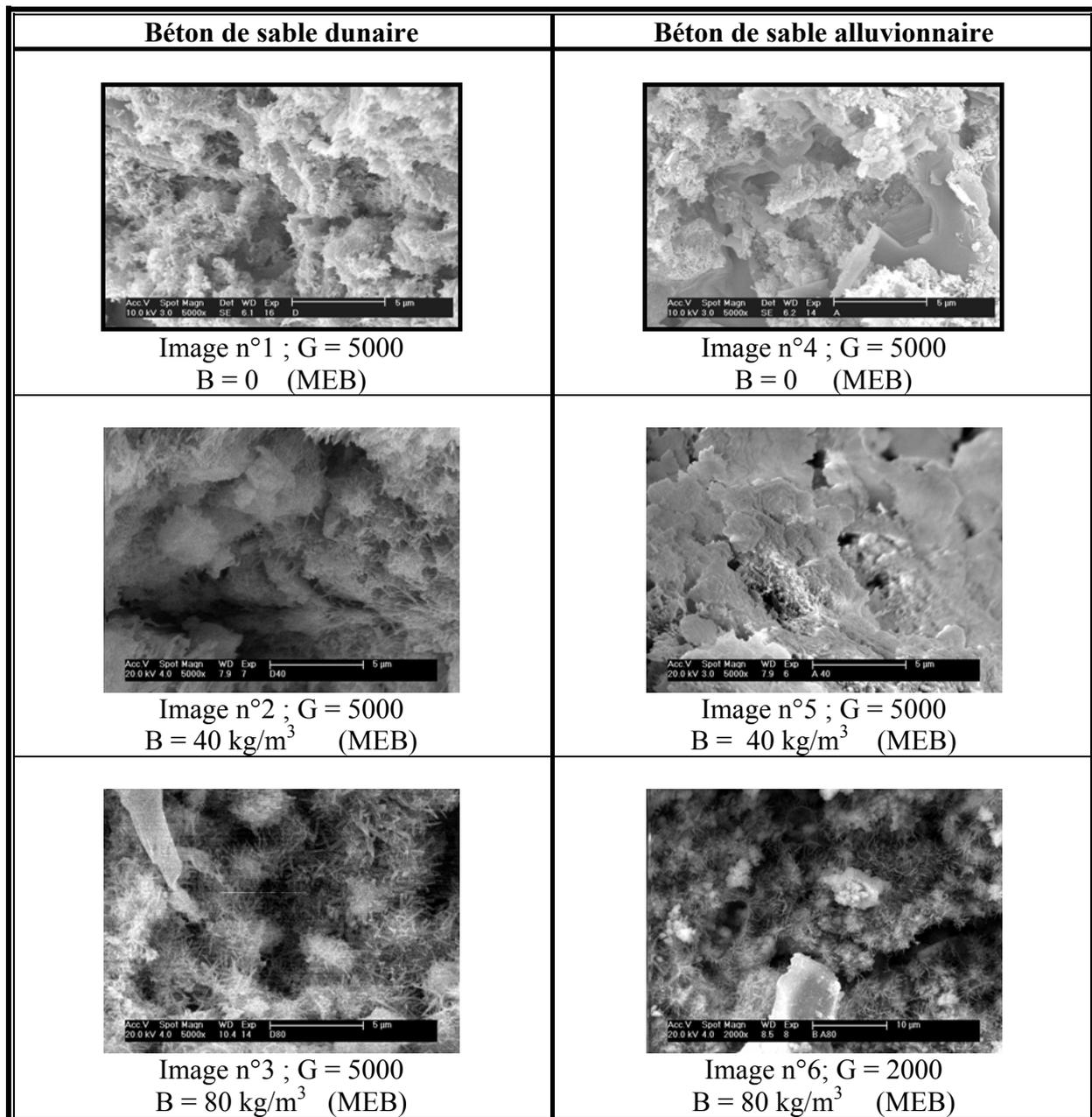


Fig. III.4 : La pâte de ciment durcie

Ces formes sont classiquement observées près des granulats lors de la prise d'un béton [**High strength concrete**, (1990)]. A des dosages en bois d'environ 40 kg/m<sup>3</sup>, les espèces qui se développent près des grains de sable se présentent sous forme de plaques et on n'observe

pratiquement pas ou que peu de développement d'aiguilles. La matrice, dans ce cas, est donc, constituée d'un agglomérat de plaques jointives, ce qui confère à la matrice un aspect beaucoup plus compact.

Dans le cas du sable dunaire, on remarque aussi que l'aspect de la matrice se présente principalement sous forme de touffes d'aiguilles (forme généralement attribuée aux CSH (images 4, 5 et 6 de la **figure III.4**). Toutefois dans le cas de dosages élevés en bois, ces aiguilles sont plus agglomérées entre elles, ce qui est probablement dû à une cristallisation des hydrates qui n'est pas complète.

### III.1.3.3. ADHERENCE BOIS-MATRICE

L'adhérence bois matrice est montrée par les images n° 1 à 6 présentées par la **figure III.5**.

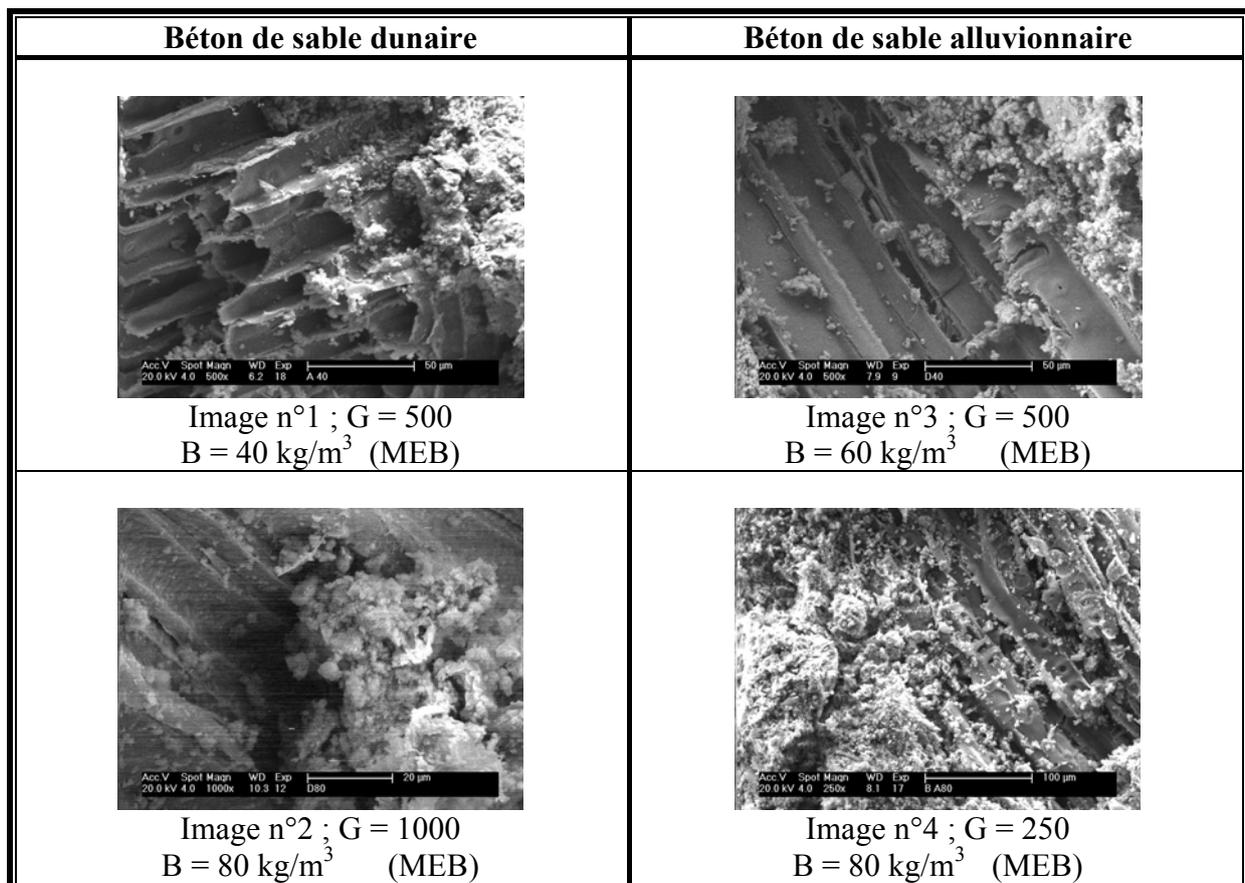
Béton de sable dunaire	Béton de sable alluvionnaire
 <p data-bbox="263 1016 707 1093">Image n°1 ; G = 25 B = 80 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>	 <p data-bbox="879 1016 1323 1093">Image n°4 ; G = 25 B = 80 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>
 <p data-bbox="263 1426 707 1503">Image n°2 ; G = 175 B = 20 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>	 <p data-bbox="879 1426 1323 1503">Image n°5 ; G = 150 B = 20 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>
 <p data-bbox="263 1836 707 1915">Image n°3 ; G = 175 B = 80 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>	 <p data-bbox="879 1836 1323 1915">Image n°6 ; G = 100 B = 80 kg/m<sup>3</sup> (Vidéo-microscope)</p>

**Fig. III.5 :** Observation de la répartition des copeaux de bois dans la matrice et de la liaison matrice-copeaux de bois au microscope optique

A part quelques petits défauts autour de quelques granulats de bois, on peut dire que l'adhérence *bois-matrice* est en général bonne. Ces petits défauts, déjà observés par d'autres auteurs [Aouadja F.Z. et al., (1995) ; Yun-long Yue et al., (2000)], sont peut être dus au dégonflement de grains de bois après évaporation de l'eau absorbée qui se traduit par un arrachement partiel des copeaux de bois de la matrice ou aux fortes variations dimensionnelles qui caractérisent généralement les bétons de bois [Ledhem A., (1997)].

Dans tous les cas, l'adhérence *granulat de bois - matrice* est bonne et les granulats de bois sont bien répartis dans la matrice (figure III.5). La quantité de bois n'influence pas l'adhésion de la matrice avec le granulat de bois. Si on essaie d'observer les espèces qui se développent près du granulat de bois, on remarque que le développement des espèces est très différent entre les échantillons. Avec de faibles teneurs en bois, les espèces se présentent surtout sous la forme d'aiguilles. On note juste la présence de quelques plaques. Par contre, pour les autres teneurs en bois, on remarque à la fois la présence de plaquettes et d'aiguilles. De plus, les aiguilles sont moins nombreuses et plus petites que celles observées dans le cas des faibles teneurs en bois. La proportion plus importante de granulats de bois modifie donc le développement des espèces au voisinage du granulat.

C'est également le cas pour les bétons de sable dunaire, mais le phénomène inverse est observé. En présence d'une faible quantité de bois, la matrice se présente sous forme d'un mélange de plaques et de petites aiguilles. Puis lorsque la quantité de bois augmente, on remarque que la quantité d'aiguilles croît également. De plus, elles sont de plus en plus regroupées en touffes. L'augmentation de la proportion de granulats de bois dans la matrice favorise donc le développement des CSH dans ce cas.

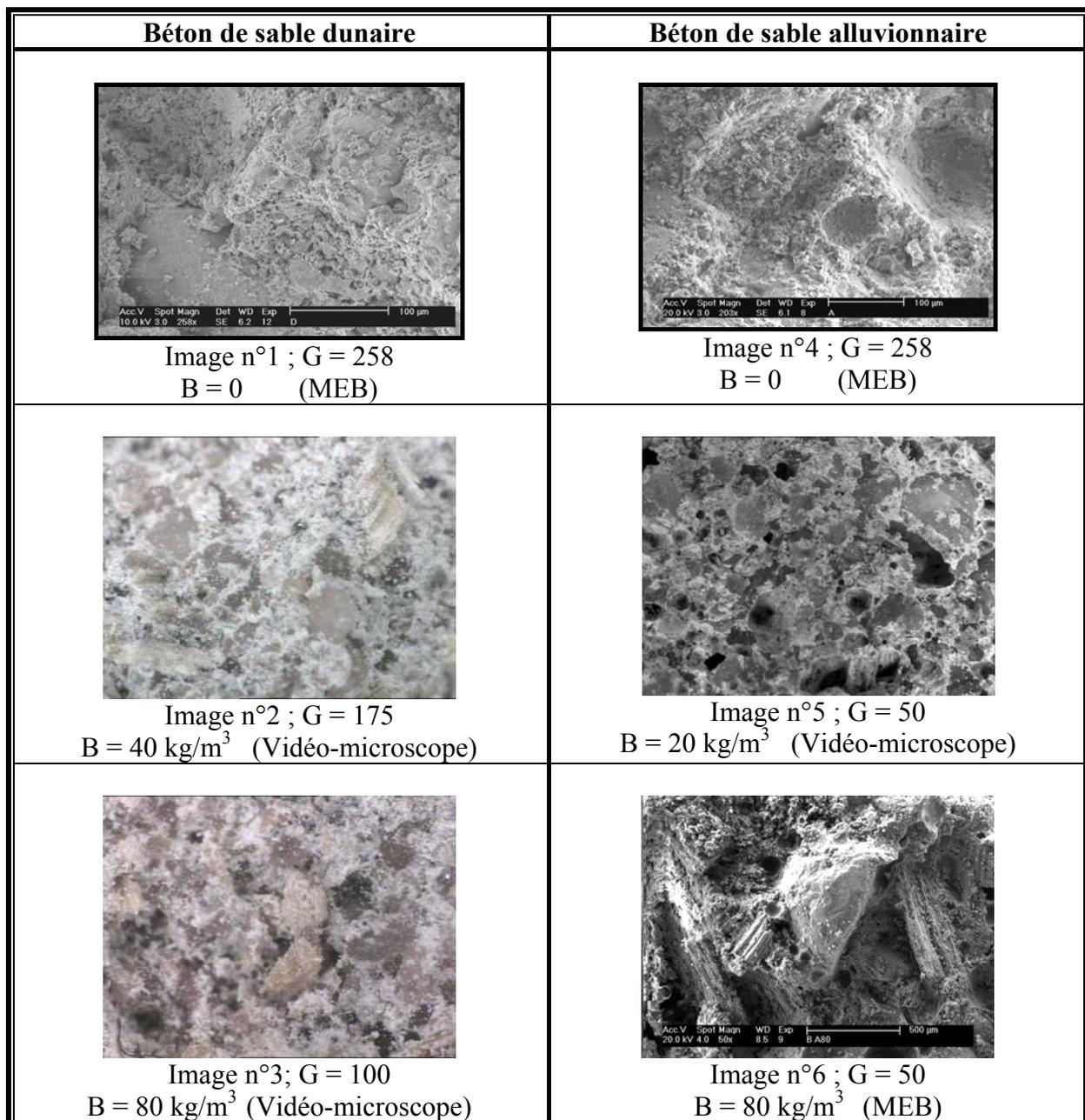


**Fig. III.6** : Mise en évidence de la non pénétration de la matrice dans les alvéoles des copeaux de bois - Espèces se développant près des granulats de bois -

Quels que soient le sable utilisé et la quantité de bois présente dans le composite, on remarque que la matrice ne pénètre pas dans les alvéoles du bois (**figure III.6**), ce qui confirme la diminution considérable de la densité des composites étudiés en augmentant le dosage en bois.

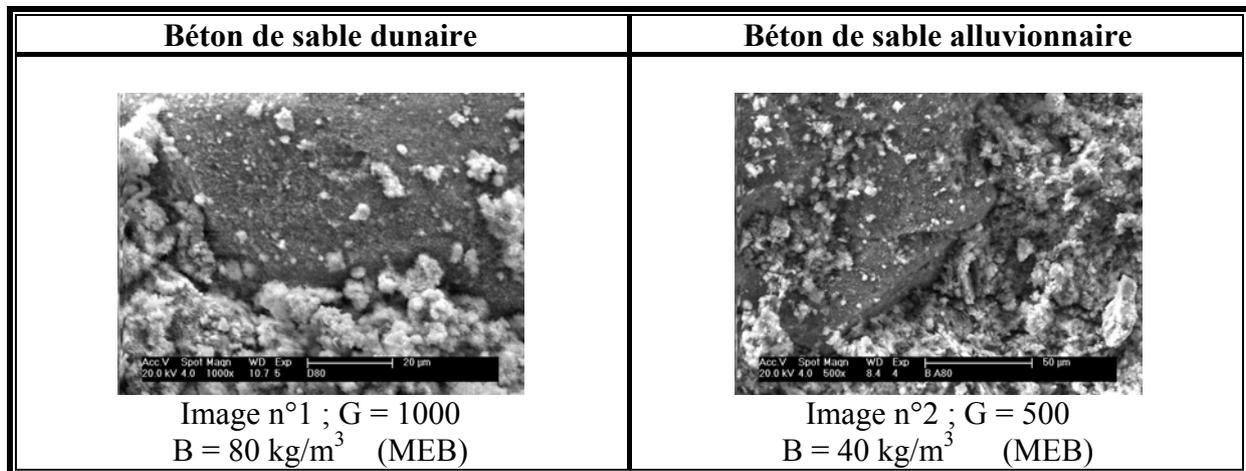
#### III.1.3.4. ADHERENCE GRAINS DE SABLE - PATE DE CIMENT

Avec des grossissements compris entre 50 et 300, et quelles que soient la nature du sable et la quantité de copeaux de bois, les échantillons présentent une bonne adhérence sable- matrice (images n°1 à 6, **figure III.7**). La présence de bois dans le béton n'influence donc pas cette adhérence.



**Fig. III.7** : Liaison matrice-grains de sable

La **figure III.8** montre l'aspect des espèces qui se sont développées près des grains de sable dans les deux composites.



**Fig. III.8** : Espèces se développant près des grains de sables

De même et afin d'étudier le développement de ces espèces, nous avons calculé les rapports **Ca/Si** à partir des spectres obtenus par RX pour chaque échantillon analysé par MEB. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau III.2**.

**Tableau III.2** : Rapports Ca / Si calculés à partir des spectres obtenus par RX (MEB)

Dosage en bois (kg/m <sup>3</sup> )	Béton de sable dunaire					Béton de sable alluvionnaire				
	0	40	80	120	160	0	40	80	120	160
Rapport Ca / Si	4.74	4.22	5.04	4.71	4.82	3.55	3.67	4.96	5.59	5.94

D'après ces résultats, on notera que :

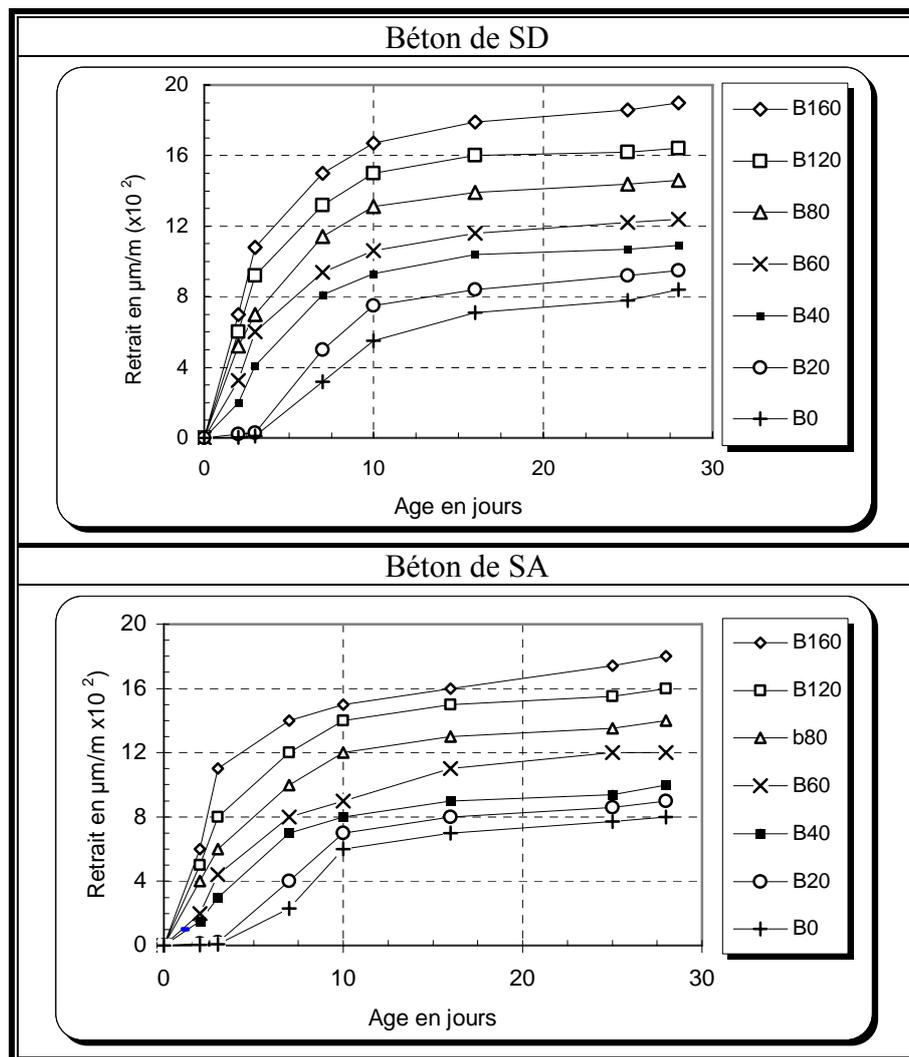
Dans le cas du sable alluvionnaire, on remarque que le développement des espèces présentes, près des grains de sable, est différent suivant la quantité des copeaux de bois présente dans le composite (**figure III.8**) et que le rapport **Ca/Si** varie aussi suivant cette quantité (**tableau III.2**).

Par contre, dans le cas du sable dunaire on remarque que le développement des espèces présentes près des grains de sable n'est pas très différent suivant la quantité des copeaux de bois présente dans la composite et même le rapport Ca/Si ne varie pratiquement pas (excepté peut être, pour l'échantillon de dosage en bois de 80 kg/m<sup>3</sup>).

### III.1.3. ETUDE DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES

Lors du séchage, et en absence de toute charge extérieure, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait. Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite. Le retrait a des conséquences très graves (des fissures dans la construction) s'il n'est pas limité.

Dans notre cas, et pour différents teneurs en copeaux de bois, les valeurs de retraits obtenues sont illustrées par les courbes de la **figure III.9**.



**Fig. III.9** : Evolution du retrait des deux bétons de sable dans le temps

Au début, le retrait évolue rapidement, mais, au delà du dixième jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation au delà de deux semaines. Il paraît que le retrait est proportionnel à la proportion de copeaux de bois. Pour les deux bétons de sable, il augmente avec l'augmentation de la quantité de bois. Notons que le béton de sable, lui-même, est caractérisé par un retrait plus élevé que celui d'un béton ordinaire [Benaïssa, A., (1992),

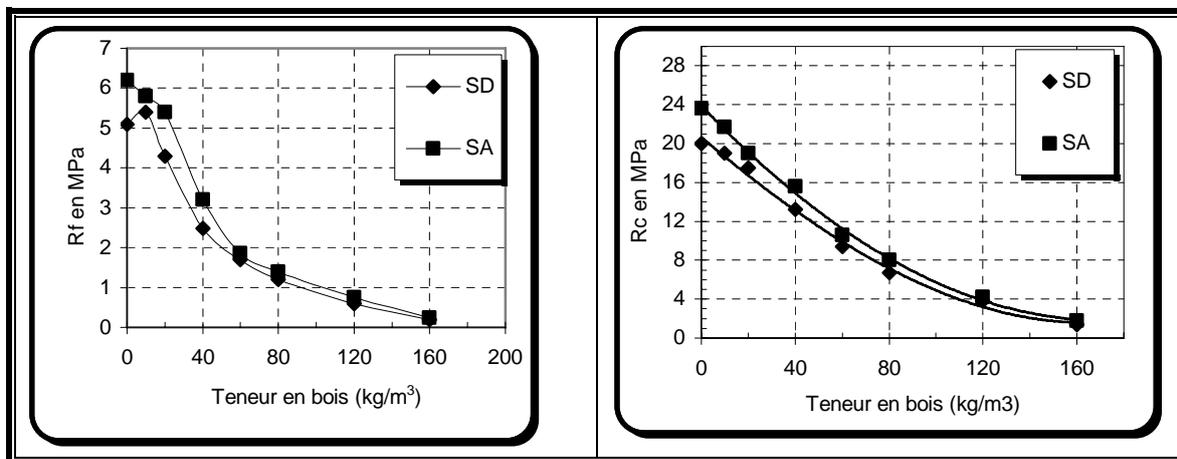
et que l'ajout de bois l'augmente davantage. Ceci constitue un inconvénient pour ces matériaux, ce qui rend, peut être, nécessaire le traitement des copeaux de bois [Ledhem A., (1997)]. En comparant les résultats obtenus aux valeurs limites préconisées pour les bétons de bois (tableau I.7 (Chap. I)) [Pimienta P. et al (1994)], nous constatons qu'ils sont nettement inférieurs, pour toutes les teneurs de bois envisagées,.

### III.2. CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Comme pour la plupart des autres matériaux, la résistance du béton est fondamentalement dépendante des vides qu'il comporte. Elle est très influencée par le volume des vides : air occlus, pores capillaires, pores de gel et air entraîné. Dans notre cas, l'ajout de bois confère au béton de sable une porosité considérable. Cette porosité est d'autant plus élevée que la teneur en bois est plus grande. C'est pour cette raison que nous nous sommes basés, dans l'étude de la résistance mécanique de nos composites, sur l'effet de la proportion des copeaux de bois. L'effet de la proportion des fillers, vu leur importance pour les bétons de sable, a été également étudié. Les résistances mesurées sont la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Elles sont déterminées, à 28 jours, selon les techniques présentées au paragraphe § II.3.1.2.

#### III.2.1. INFLUENCE DE LA PROPORTION DES COPEAUX DE BOIS

L'évolution de la **résistance à la compression** et de la **résistance à la flexion** en fonction de la teneur en copeaux de bois est montrée par la **figure III.10**. Cette dernière montre bien que la résistance, que ce soit en compression ou en flexion, diminue avec l'augmentation de la teneur en copeaux de bois.



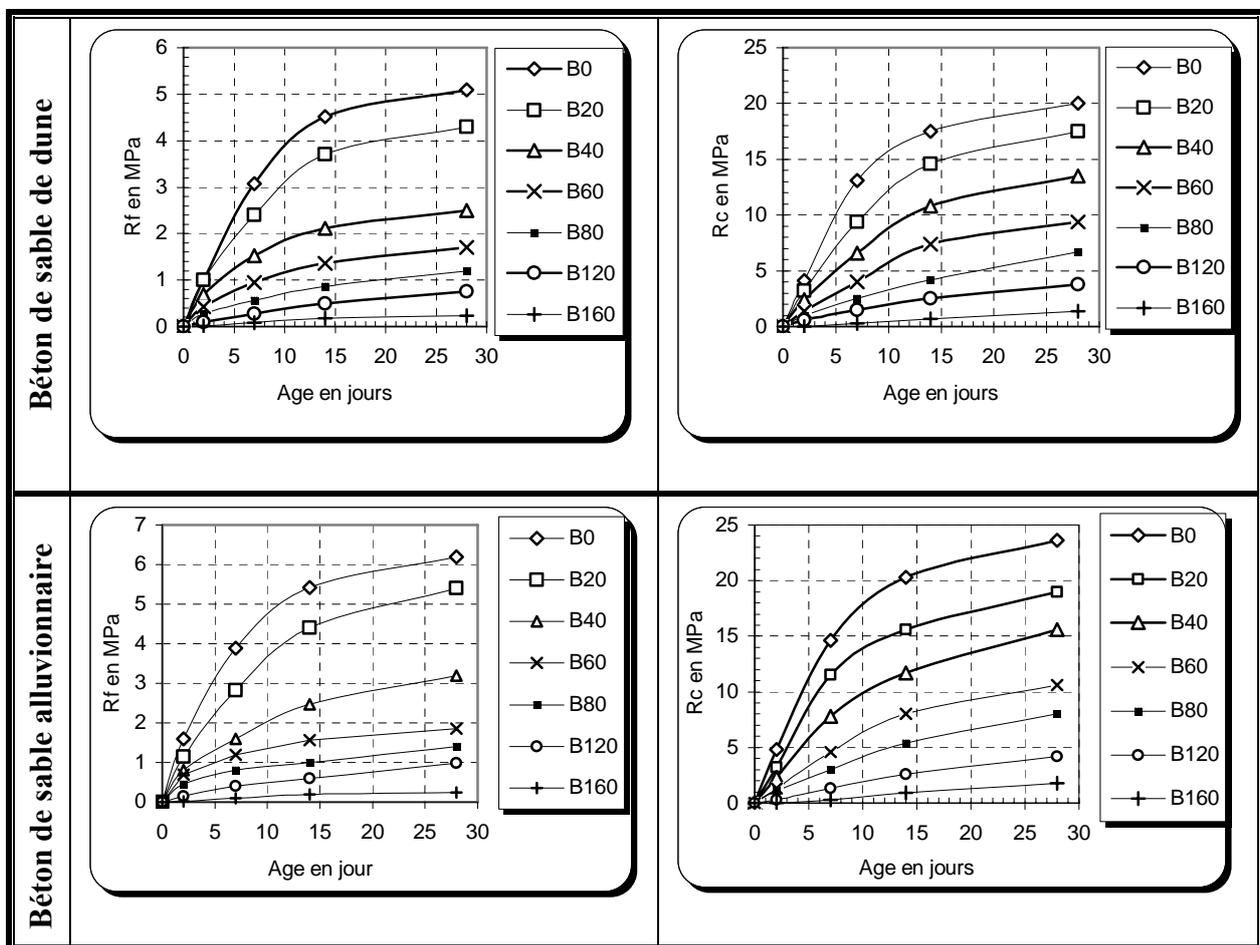
**Fig. III.10** : Evolution de la **résistance** mécanique en fonction de la teneur en copeaux de bois

Pour des dosage en copeaux de bois allant de 0 à 160 kg/m<sup>3</sup>, les résistances obtenues en compression diminuent de 20 à 1.40 MPa dans le cas du béton de SD et de 23.60 à 1.80 MPa dans le cas du béton de SA. En flexion, les résistances varient de 0.20 à 5.40 MPa pour le béton de SD et de 0.24 à 6.20 MPa pour le béton de SA. Les gammes de densité dans lesquelles varient ces résistances sont 1.2 à 2.04 pour le béton de SD et 1.22 à 2.10 pour le béton de SA.

Toutefois, dans le cas de la flexion, et pour une proportion de copeaux de bois d'environ  $10 \text{ kg/m}^3$ , on observe une tendance à la croissance. Cette croissance est beaucoup plus marquée dans le cas de béton de sable dunaire. Ceci peut être expliqué par l'effet de fibre. Les copeaux de bois, à petites quantités, jouent le rôle de fibres qui s'opposent à la propagation de la fissure lors de l'essai de flexion.

Ce qu'il faut noter aussi est, qu'au début, le béton de sable alluvionnaire présente des résistances légèrement meilleures, mais plus on augmente le dosage en bois plus les résistances des deux bétons de sable se rapprochent. Au delà d'un dosage en bois de  $60$  à  $80 \text{ kg/m}^3$ , les deux bétons de sables se comportent comme si c'est le même matériau. Ceci est évident, puisqu'on introduit des grains de bois, de même nature et de même granulométrie, qui vont prendre la place de grains de sable différents (dunaire et alluvionnaire).

Puisque, dans certains cas, il est important de connaître la résistance du béton au jeune âge, nous avons essayé de suivre l'évolution de la résistance des bétons étudiés dans le temps. Les résultats obtenus sont illustrés à la **figure III.11**.



**Fig. III.11** : Evolution de la **résistance** mécanique en fonction de l'âge pour différentes teneurs en copeaux de bois

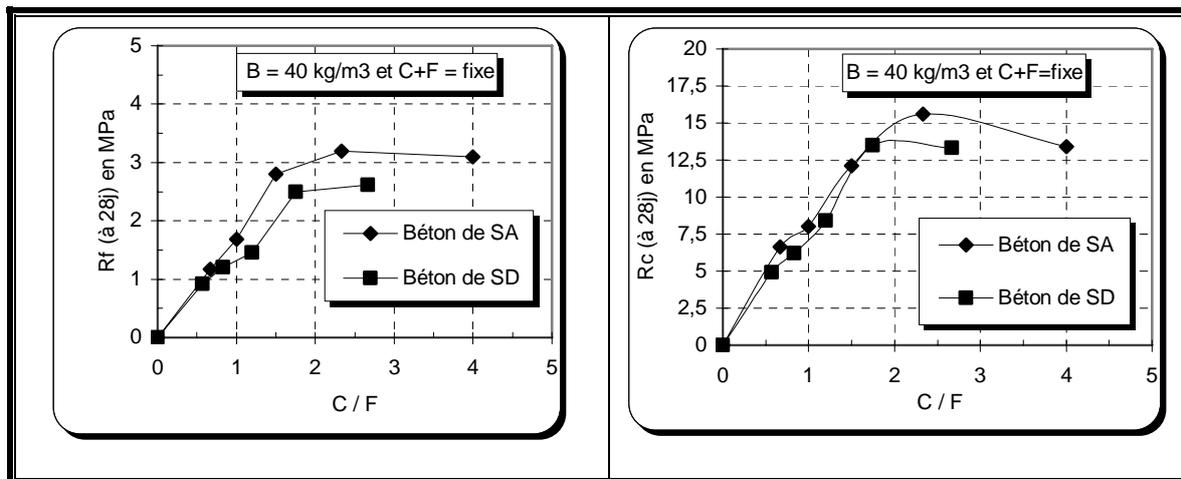
Il semble que la résistance du béton de sable à base de copeaux de bois atteint 90 % de sa valeur dans les deux premières semaines. Notons que ceci est peut être du au mode de séchage rapide qui caractérise les bétons de sable en général [Benaïssa, (1992)].

### III.2. 2. INFLUENCE DE LA PROPORTION DES FINES (CIMENT + FILLER)

La quantité du sable étant fixe (1305 kg pour SD et 1465 kg pour SA), la quantité des copeaux de bois étant fixe ( $B = 40$  kg), la proportion des fines (ciment +filler) étant également fixe ( $(C + F) = 550$  kg pour le béton de sable dunaire et 500 pour le béton de sable alluvionnaire), les proportions du ciment et du filler ont été variées l'une par rapport à l'autre. Les teneurs en ciment et en filler envisagées dans cette étude sont regroupées dans le **tableau III.3** et l'évolution de la résistance à la compression et la résistance à la flexion des composites étudiées en fonction du rapport massique *Ciment / Filler* est présentée à la **figure III.12**.

**Tableau III.3** : Dosages du ciment et du filler.

	Béton de SD (C+F=550 kg)					Béton de SA (C+F=500 kg)				
<b>C</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
<b>F</b> en (Kg/m <sup>3</sup> )	350	300	250	200	150	300	250	200	150	100
<b>C/F</b>	0.57	0.83	1.20	1.75	2.57	0.67	1.00	1.50	2.33	4.00



**Fig. III.12** : Evolution de la **résistance** mécanique en fonction du rapport *Ciment / Filler*

Les courbes « résistance - C/F » montrent bien que **la résistance** augmente avec l'augmentation du dosage en ciment jusqu'à un certain dosage optimal puis elle diminue. Cette constatation est plus nette en compression. Les valeurs optimales sont de l'ordre de :

$C/F \cong 1.75$  correspondant à  $C = 350 \text{ kg/m}^3$  et  $F = 200 \text{ kg/m}^3$  pour le béton de SD  
 $C/F \cong 2.35$  correspondant à  $C = 350 \text{ kg/m}^3$  et  $F = 150 \text{ kg/m}^3$  pour le béton de SA

Notons que ces valeurs sont exactement les valeurs optimales trouvées, dans des travaux antérieurs, pour ces deux bétons de sable sans copeaux de bois. [Bederina M., (2000) ;

**Bederina M. et al., (2005)].** Ceci laisse penser que l'introduction des copeaux de bois dans les bétons de sable ne change pas le squelette granulaire de la matrice, c'est à dire, que la pâte de ciment-chargeur ne pénètre pas dans les pores des copeaux de bois. L'analyse d'image a déjà confirmé la non pénétration de fines dans les pores des grains de bois (§III.1.3.3).

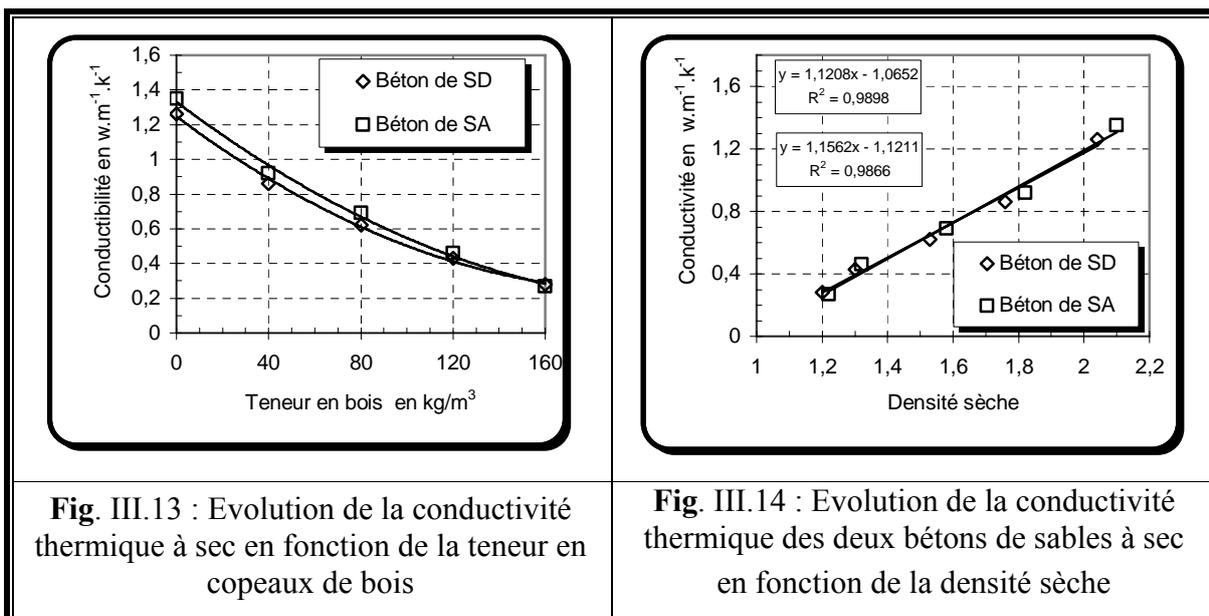
### III.3. TRANSFERT THERMIQUE

#### III.3.1. ETUDE DES PARAMETRES THERMIQUES A L'ETAT SEC

Les caractéristiques thermiques sont mesurées, pour chaque composition, sur deux demi-cubes de dimensions  $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$  entre lesquels est placée la sonde TPS. Ces derniers sont placés dans une enceinte isolée afin de limiter toute éventualité d'échanges avec le milieu extérieur. L'ensemble « demi cube (1) – sonde - demi cube (2) » est soumis à un serrage convenable afin d'éviter tout problème de contact entre la sonde et les deux demi-échantillons (§II.3.2.1). Les essais sont réalisés à des températures ambiantes soit  $20 \pm 5 \text{ °C}$ . Pour chaque composition, l'essai est répété trois fois afin de prendre la moyenne de trois mesures.

##### III.3.1.1. CONDUCTIVITE THERMIQUE

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques obtenues avec la méthode TPS, décrite et identifiée au paragraphe §II.3.2.1., sont reportées sur la **figure III.13**.

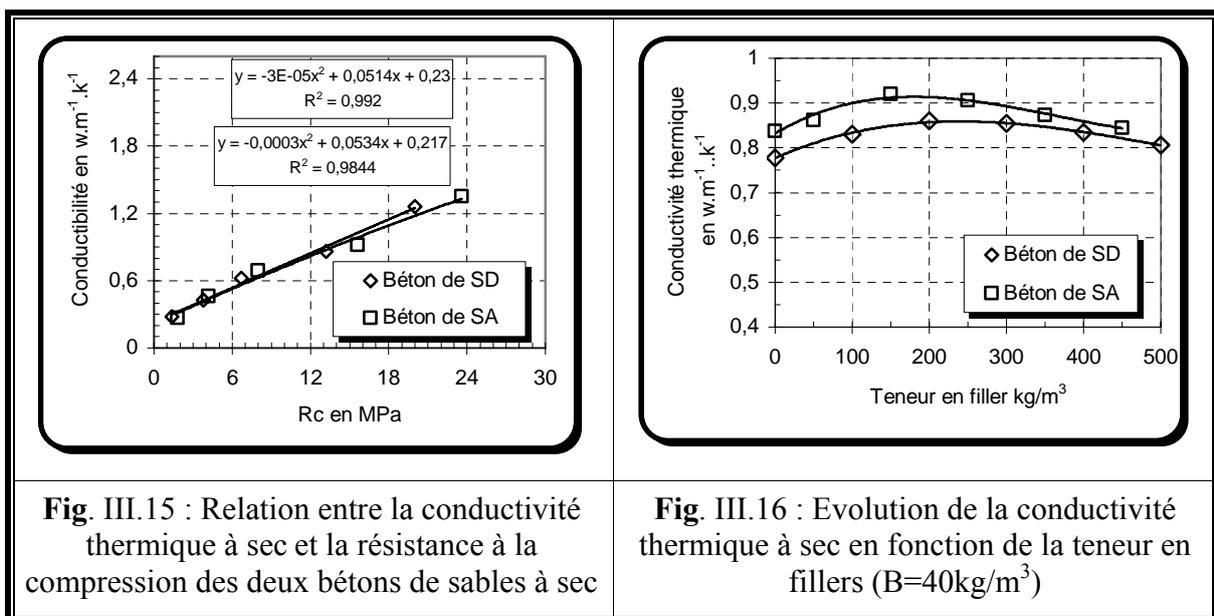


Cette figure présente, en fait, les conductivités thermiques des deux bétons de sable étudiés en fonction de la teneur en copeaux de bois. On peut observer que la tendance générale reste identique, quelle que soit la nature du sable utilisé. En fonction de la teneur en copeaux de bois, on constate une nette diminution de la conductivité thermique avec l'accroissement de la proportion des copeaux de bois dans le composite. A des teneurs en bois égales, le béton de sable dunaire présente des conductivités thermiques légèrement inférieures. Notons que les différences enregistrées entre les deux bétons de sable, sont, en général, très faibles. Ceci est du sûrement à la nature minéralogique identique des deux sables. La différence maximale est obtenue avec des bétons de sables sans bois et elle est de 7 %. En présence des copeaux bois, les conductivités des deux bétons se rapprochent d'autant plus que la proportion de bois augmente.

L'introduction, donc, des copeaux de bois, réduit nettement la conductivité thermique des bétons de sable. Avec des teneurs en bois de 80 et de 160 kg/m<sup>3</sup>, par exemple, elle est réduite respectivement de 50.7 % et de 77.77 % dans le cas d'un béton de sable dunaire et de 48.88 et de 80 % dans le cas de béton de sable alluvionnaire.

Le comportement thermique du composite « béton de sable – copeaux de bois » peut s'expliquer par l'influence de plusieurs facteurs. Tout d'abord, le bois lui-même a une conductivité plus faible que celle du béton, ce qui lui permet, donc, de constituer une barrière thermique qui améliore les performances d'isolation du béton. Il faut également prendre en compte l'interface bois-matrice. Cette dernière a été examinée dans l'analyse structurale et elle a été jugée bonne, quelle que soit la nature du sable utilisé (§III.1.3). Dans le cas des granulats à structure poreuse, tels que les copeaux de bois, les alvéoles de la surface sont remplies de pâte de ciment. Cette configuration tend certainement à augmenter la tortuosité et donc à ralentir le cheminement du signal thermique. Nous avons également porté sur la **figure III.14**, les courbes relatives aux conductivités thermiques pour l'ensemble des compositions, en fonction de leurs densités sèches. Les courbes ainsi obtenues suivent une relation linéaire. Cette allure a aussi été remarquée par **Bouguerra**, (1997) pour un béton argileux à base de copeaux de bois., par **Goual M.S.**, (2001) pour les bétons cellulaires argileux, ainsi que par **Laidoudi B.**, (2005) pour des béton à granulats de caoutchouc.

Les études physico-mécaniques effectuées sur différents composites, ont souvent montré la dépendance de leurs propriétés avec les caractéristiques des inclusions et les modifications apportées dans la matrice cimentaire. Afin d'apprécier la relation entre les caractéristiques mécaniques et les propriétés thermiques dans nos matériaux, nous avons étudié la variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression (**figure III.15**). Les courbes ainsi obtenues montrent une corrélation très intéressante entre la conductivité thermique et la résistance à la compression. La relation entre ces deux paramètres suit une loi de type polynomial et les coefficients de corrélation obtenus sont de l'ordre de 0,992 pour le béton de SD et 0,987 pour le béton de SA.

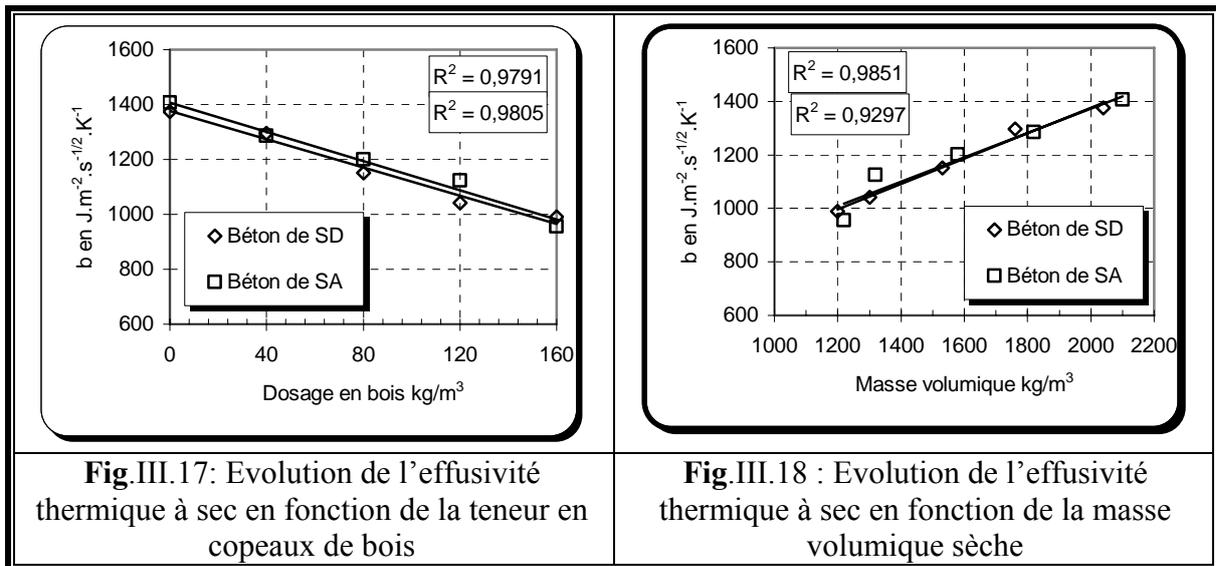


Vu l'importance des fillers dans les bétons de sables [**Chauvin J.J et al.**, 1988]), nous avons également étudié l'effet de la proportion des fillers sur la conductivité thermique à sec (**figure**

III.16). Les courbes obtenues mettent en évidence l'existence d'un dosage optimal de filler pour chaque béton de sable (environ de  $200 \text{ kg/m}^3$  pour le béton de SD et  $150 \text{ kg/m}^3$  pour le béton de SA). Ils sont du même ordre que ceux qui ont donné les densités et les résistances optimales lors de l'étude de ces mêmes bétons de sable sans ajout de bois [Bederina M., 2000]. Ceci montre, encore une fois, que l'ajout des copeaux bois dans les bétons de sable, et quel que soit leur dosage, ne modifie pas le dosage optimal des fillers.

### III.3.1.2. EFFUSIVITE THERMIQUE

L'effusivité thermique des composites étudiés a aussi été mesurée en utilisant la méthode TPS. Les résultats obtenus, en fonction de la teneur en copeaux de bois, sont représentés à la figure III.17.



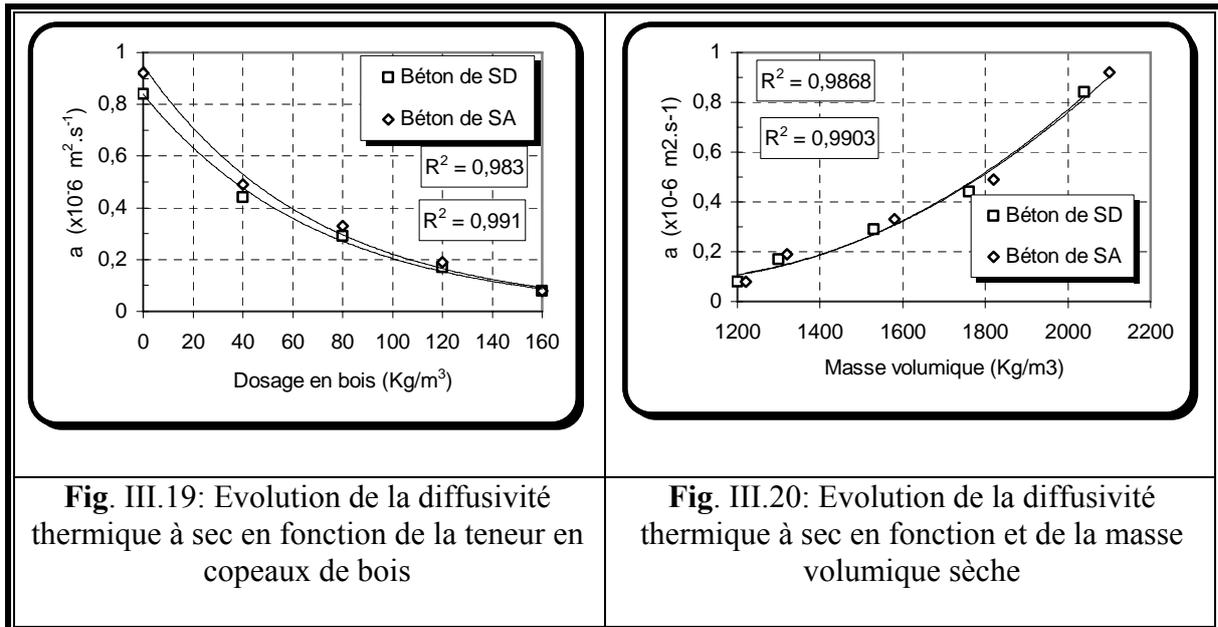
On observe, d'une manière générale, une diminution de l'effusivité avec l'accroissement de la teneur en bois, comme il a été prévisible. Les valeurs moyennes des effusivités thermiques obtenues évoluent de façon presque identique pour les deux types de bétons de sables. De plus, les deux matériaux présentent des effusivités thermiques très proches. En fonction de la densité, l'allure générale est aussi identique, quelle que soit la nature du sable utilisé (figure III.18). En effet, on note, dans l'ensemble, une bonne corrélation entre l'effusivité et la masse volumique. Les coefficients de corrélation obtenus sont 0,974 pour le béton de SD et 0,987 pour le béton de SA.

### III.3.1.3. DIFFUSIVITE THERMIQUE

Les diffusivités thermiques des deux bétons de sables sont présentées, pour les différentes proportions de copeaux de bois étudiées, aux figures III.19 et III.20.

Les courbes 'diffusivité – dosage en bois' présentent une tendance générale identique avec une diminution très nette de la diffusivité lorsque la teneur en copeaux de bois augmente, quelle que soit la nature du sable. En fonction de la densité, on constate, bien sûr, l'inverse. A  $80 \text{ kg/m}^3$  de bois par exemple ( $\rho_{SD} = 1.53$  ;  $\rho_{SA} = 1.58$ ), la diffusivité thermique des deux bétons de sable est réduite de plus de 60 %.

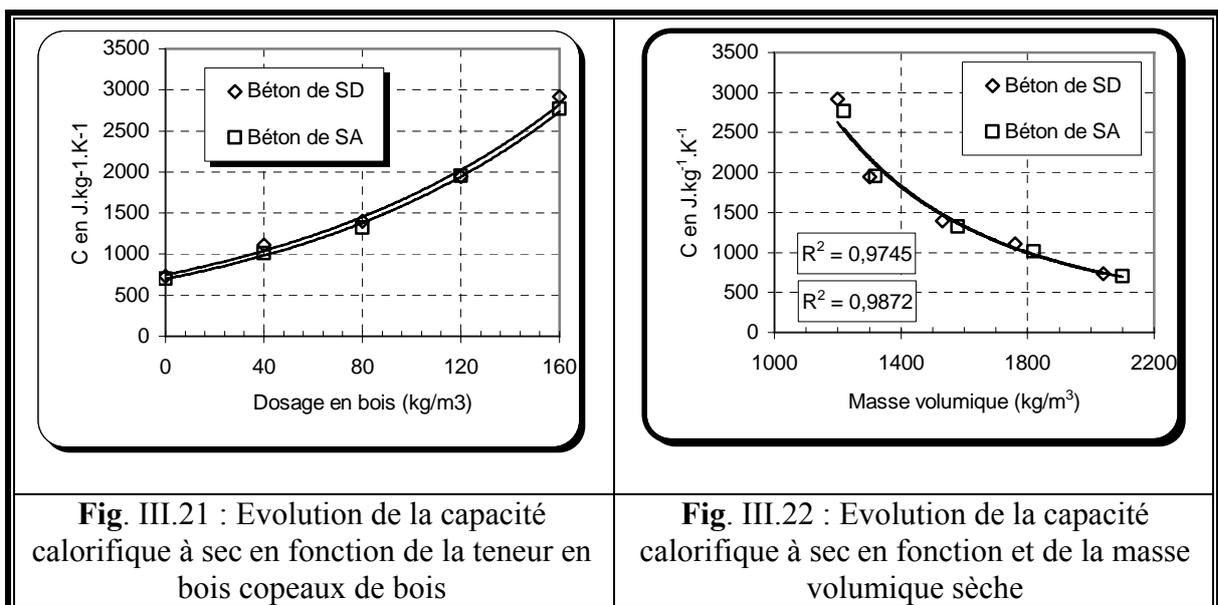
Notons qu'à des proportions très élevées (plus de  $120 \text{ kg/m}^3$ ), l'augmentation du dosage en bois ne fait diminuer que légèrement la diffusivité thermique des deux composites.



Il est à noter qu'à des proportions égales en bois, le béton de SA présente des diffusivités thermiques légèrement plus élevées. Toutefois, cette différence a tendance à disparaître en allant vers des teneurs en bois très élevées (au delà de 100 -120 kg/m<sup>3</sup>). Ce comportement peut être attribué à la texture des granulats ainsi qu'à l'entraînement d'air, qui favorisent l'augmentation de la tortuosité qui, elle-même, limite la diffusion de la chaleur dans la matrice.

### III.3.1.4. CAPACITE CALORIFIQUE (OU CHALEUR MASSIQUE)

Les capacités calorifiques des composites étudiés sont représentées, en fonction des teneurs en copeaux de bois et la masse volumique, aux **figures III.21 et III.22**.



Les courbes ainsi obtenues permettent de conclure que l'ajout de copeaux de bois dans les bétons de sable augmente leur capacité calorifique.

En effet, on constate que les capacités calorifiques sont d'autant plus importantes que la teneur en bois est grande. Ceci peut être expliqué par le fait que la chaleur massique du bois est plus grande ( $1700 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). A titre d'exemple, avec un ajout de  $80 \text{ kg/m}^3$  de copeaux de bois, la capacité calorifique des bétons de sable est augmentée d'environ 90 %.

D'autre part, et contrairement à la diffusivité, le béton de sable dunaire présente des chaleurs calorifiques légèrement plus élevées que celles du béton de sable alluvionnaire. La taille des grains de sable a donc aussi une influence sur ce paramètre thermique.

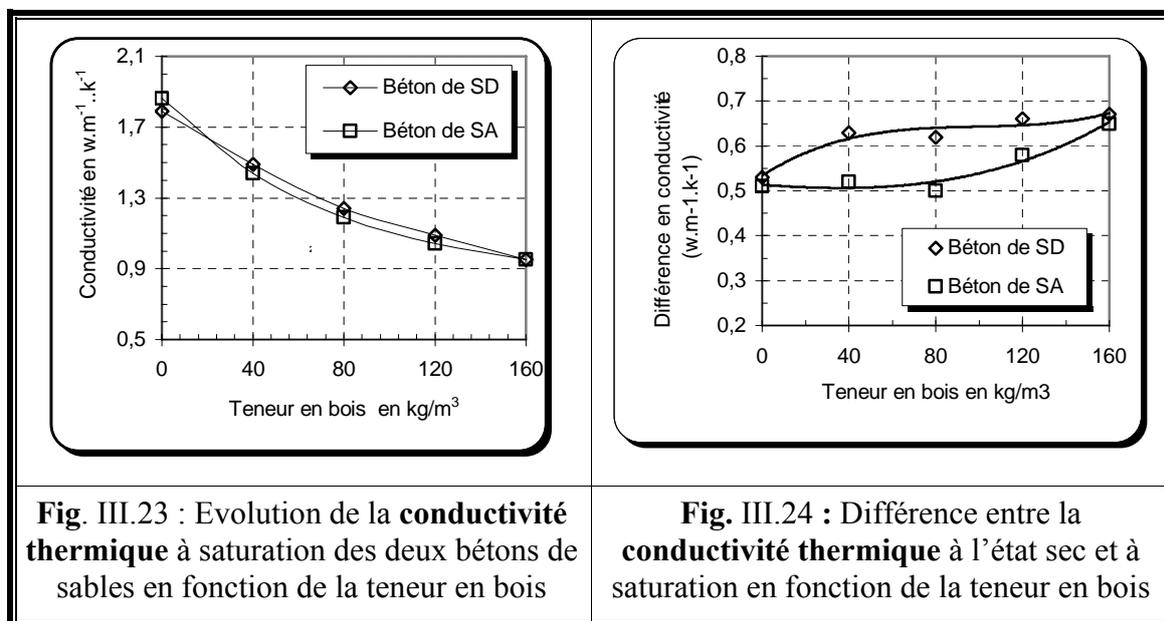
Il faut également prendre en compte la microporosité de la matrice liée à la formation des hydrates et à l'évaporation de l'eau résiduelle (chaleur massique de l'air =  $1004 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

Puisque, comme pour tous les bétons légers, les propriétés thermiques des bétons de bois sont liées à leurs masses volumiques, il était intéressant de tracer les courbes reliant la capacité calorifique des composites étudiés et leurs densités. La **figure III.22** montre bien que, comme pour la diffusivité thermique, la capacité calorifique diminue avec l'augmentation de la masse volumique du composite. L'ordre de grandeur des valeurs de la chaleur massique des composites étudiés montre l'intérêt tout particulier de l'ajout des copeaux de bois dans un béton de sable, puisque les inclusions de bois ont permis d'augmenter considérablement la capacité de stockage de la chaleur des matériaux obtenus. Ceci permet d'envisager l'utilisation de ce type de matériaux lorsqu'on a à assurer un bon confort thermique.

### III.3.2. ETUDE DES PARAMETRES THERMIQUES A L'ETAT SATURE

#### III.3.2.1. CONDUCTIVITE THERMIQUE

En examinant les résultats de la conductivité thermique à saturation, qui sont reportés sur la **figure III.23** et **tableau III.4**, nous pouvons faire le même constat que pour l'évolution de la conductivité thermique à l'état sec.



En effet, et malgré qu'on ait noté une augmentation remarquable par rapport à l'état sec, l'évolution de la conductivité thermique à saturation ( $\lambda_{\text{sat}}$ ) en fonction de la teneur en copeaux de bois reste la même. Il est clair que, plus la teneur des granulats de bois est élevée, plus la baisse de la conductivité thermique est importante. Les deux bétons de sable, dunaire et

alluvionnaire, se comportent de la même manière et leurs conductivités thermiques à saturation sont plus proches.

Afin de pouvoir comparer l'influence de la saturation sur le phénomène de transfert de chaleur dans le cas des composites « bétons de sable – copeaux de bois », nous avons étudié les différences entre les conductivités thermiques apparentes obtenues dans les deux cas , à saturation et à l'état sec (**tableau III.4**). La **figure III.24** présente l'évolution de ces différences en fonction de la teneur en bois.

**Tableau III.4** : Valeurs moyennes des conductivités thermiques des deux composites à l'état sec et à l'état saturé

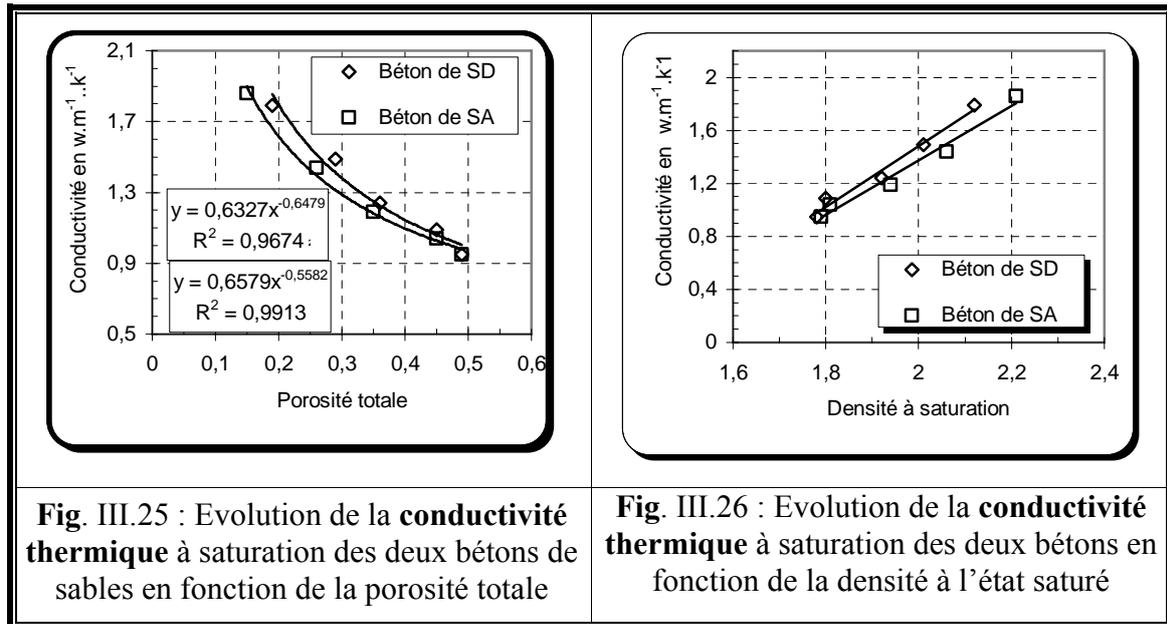
B (kg/m <sup>3</sup> )	Béton de sable de dune			Béton de sable alluvionnaire		
	$\lambda_{\text{sec}}$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\text{sat}}$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{sec}}$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\text{sec}}$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\text{sat}}$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{sec}}$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
0	1.26	1.79	0.53	1.35	1.86	0.51
40	0.86	1.49	0.63	0.92	1.44	0.52
80	0.62	1.24	0.62	0.69	1.19	0.50
120	0.43	1.09	0.66	0.46	1.04	0.58
160	0.28	0.95	0.67	0.27	.95	0.65

D'une manière générale, on note, pour les deux bétons de sable, une croissance de la différence de la conductivité thermique ( $\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{sec}}$ ) avec l'augmentation de la teneur en bois. Dans le cas du béton de sable dunaire, cette croissance prend une vitesse plus rapide pour des teneurs en bois allant de 0 à environ 70 kg/m<sup>3</sup> puis elle commence à ralentir. Par contre, dans le cas du béton sable alluvionnaire, on remarque l'inverse. La différence est presque similaire, pour les deux bétons aussi bien lorsqu'ils ne contiennent pas de bois ou lorsqu'ils contiennent des teneurs très élevées (160 kg/m<sup>3</sup>). Avec des teneurs en bois intermédiaires, la différence est plus élevée dans le cas du béton de sable dunaire. Ceci montre que ce dernier présente une porosité ouverte à l'eau plus grande.

Puisque la porosité a une relation avec la capacité d'absorption d'eau des composites, malgré qu'une partie de cette porosité reste inaccessible à l'eau, nous avons essayé d'étudier l'évolution des conductivités thermiques à saturation obtenues en fonction de la porosité des composites étudiés. La **figure III.25** montre que la conductivité thermique diminue lorsque la porosité augmente et que l'allure générale de l'évolution de la conductivité thermique apparente saturée en fonction de la porosité, est identique pour les deux types de bétons de sable. Les relations obtenues sont semblables à celles trouvées par **Laurent J. P.**, (1995) pour les matériaux de type terre, **Marmoret L.**, (1998) pour des matériaux composites ciment-argile cellulaires et **Laidoudi B.**, (2005) pour un béton de ciment à base de granulats de caoutchouc.

L'écart entre les valeurs de la conductivité thermique à l'état sec et à saturation peut ainsi s'expliquer par le fait qu'une partie de l'air (de faible conductivité (0.0243W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)) compris dans les matériaux, a été remplacée par de l'eau de conductivité plus élevée (0.569 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>). En effet l'eau a une conductivité thermique 25 fois plus élevée que celle de l'air [**Bashir M. Soleiman**, (2006)].

Dans les composites « béton – bois », on est confronté, premièrement, à la porosité accessible à l'eau qui est très importante, d'où une forte fixation de l'humidité, deuxièmement au caractère sorptif des granulats de bois, ce qui intervient également dans la croissance de la conductivité thermique à saturation.



**Fig. III.25 :** Evolution de la **conductivité thermique** à saturation des deux bétons de sables en fonction de la porosité totale

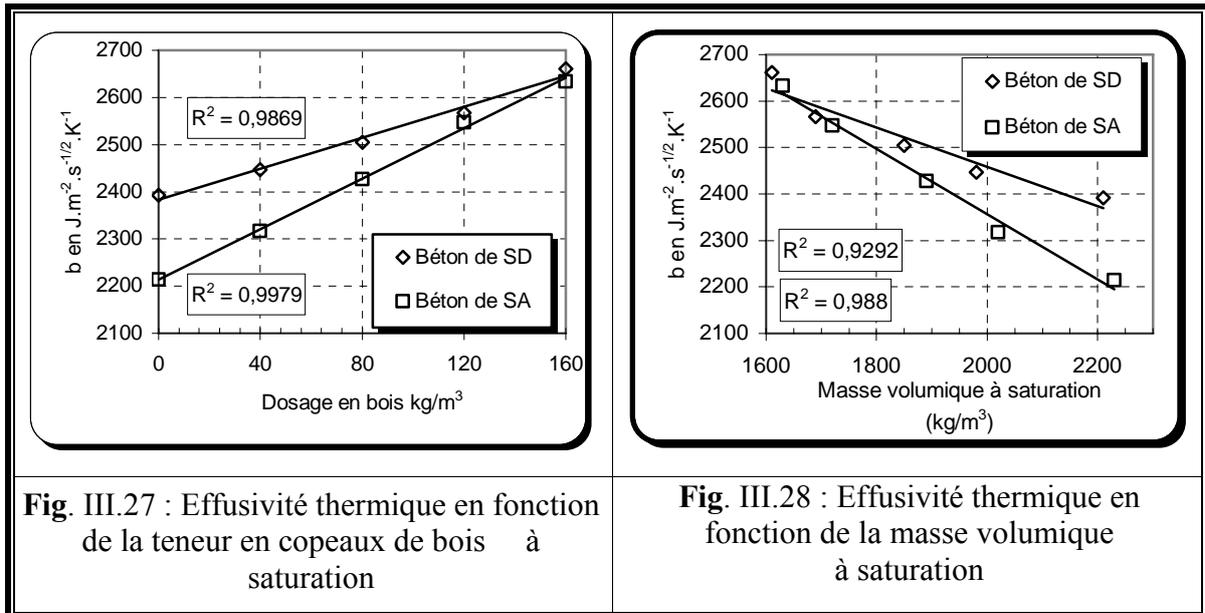
**Fig. III.26 :** Evolution de la **conductivité thermique** à saturation des deux bétons en fonction de la densité à l'état saturé

En fonction de la densité à saturation, l'évolution de la conductivité thermique présente la même allure remarquée dans le cas à sec, mais cette fois-ci, on note qu'à densité égale, le béton de sable dunaire présente des conductivités légèrement supérieures, surtout à des faibles teneurs en bois. Peut être ceci revient au fait que le béton de sable dunaire, et grâce à la surface spécifique et la finesse élevées du sable, présente plus de porosité ouverte à l'eau.

### III.3.2.1. EFFUSIVITE ET DIFFUSIVITE THERMIQUES

Si nous essayons de comparer les résultats de l'effusivité thermique à saturation à ceux obtenus à l'état sec, nous apercevrons tout de suite que l'évolution de ces deux paramètres, en fonction de l'augmentation du dosage en copeaux de bois et de la masse volumique, est similaire (**Fig. III.27** et **III.28**).

A petits dosages en bois, le béton de sable dunaire présente des effusivités thermiques plus élevées que celles obtenues par le béton de sable alluvionnaire. Par contre, la diffusivité thermique est plus élevée avec le béton de sable alluvionnaire. A des dosages en bois très élevés, les deux bétons de sables présentent des effusivités et des diffusivités thermiques du même ordre de grandeur. Ceci est dû à l'effet de la taille des grains de sable : plus le dosage en bois augmente, plus la proportion du sable dans le composite diminue et par conséquent, la proportion des gros grains, dans le cas du béton de sable alluvionnaire, diminue. On observe également, dans l'évolution de la diffusivité, en fonction de l'ajout de bois, une tendance à la stabilisation pour les fortes teneurs en bois. Ceci est dû au fait que la fraction de la matrice, à ces niveaux de proportion de bois, devient faible et constitue souvent des îlots entre les granulats de bois et peuvent rester en dehors de l'invasion hydrique. La perturbation thermique a, donc, du mal à se propager d'un îlot à l'autre. La conduction par les granulats de bois est de plus en plus prépondérante.



Les valeurs moyennes de ces deux paramètres thermiques examinées sont plus importantes à l'état saturé. Au **tableau III.5** sont donnés les pourcentages d'augmentation des paramètres thermiques lorsque le matériau passe de l'état sec à l'état saturé.

**Tableau III.5 : Augmentation, en pourcentage, des différents paramètres thermiques des composites lorsqu'on passe de l'état sec à l'état saturé**

		<b>B (kg/m<sup>3</sup>)</b>					
			0	40	80	120	160
<b>Augmentation (%)</b>	<b>Béton de SD</b>	a	74	89	118	146	169
		b	1.2	9.1	6.7	5.9	6.2
		c	89	83	96	84	59
	<b>Béton de SA</b>	a	57	80	102	127	176
		b	4.3	8.2	6.1	7.4	12.5
		c	69	83	98	87	62

On constate, à titre d'exemple, une augmentation de l'ordre de 74 % pour l'effusivité thermique du béton de sable dunaire sans ajouts de bois contre 57 % pour le béton de sable alluvionnaire. Avec un dosage en bois de 40 kg/m<sup>3</sup>, les augmentations sont respectivement de 89 et 80 %.

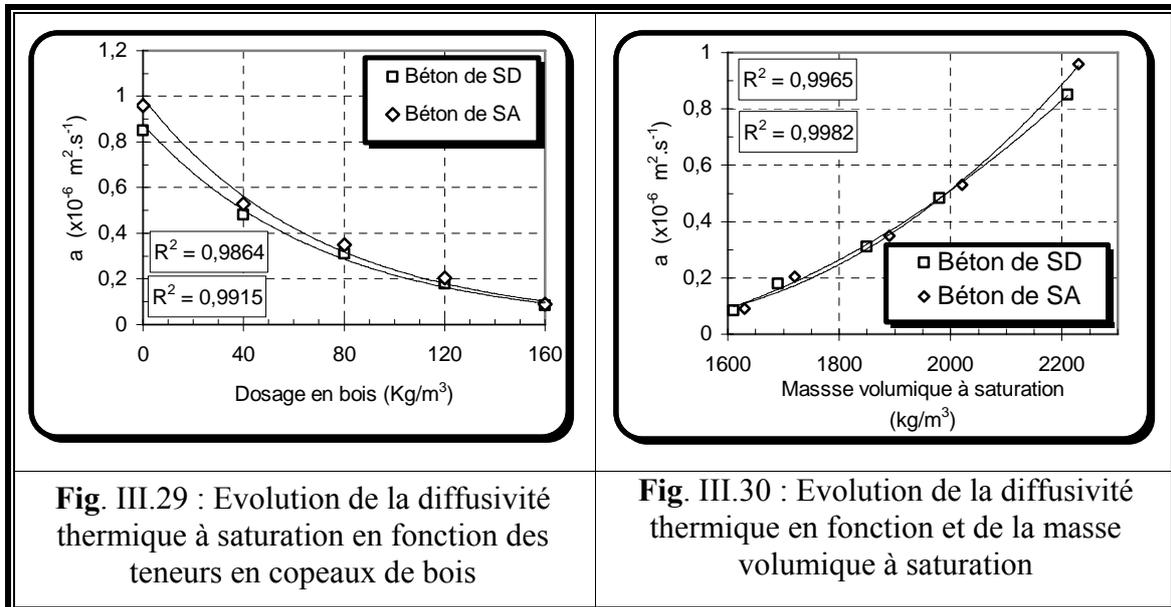
En ce qui concerne la diffusivité thermique, l'augmentation est beaucoup plus faible (**Fig. III.29** et **III.30**).

On constate, à titre d'exemple, une augmentation de l'ordre de 1.2 % dans le cas du béton de sable dunaire sans ajouts de bois contre 4.3 % dans le cas du béton de sable alluvionnaire. Avec un dosage en bois de 40 kg/m<sup>3</sup>, les augmentations sont respectivement de 9.1 et 8.2 %.

Il est clair, donc, que plus le dosage de copeaux de bois augmente plus le pourcentage d'augmentation de ces deux paramètres, en passant de l'état sec à l'état saturé, est plus élevé.

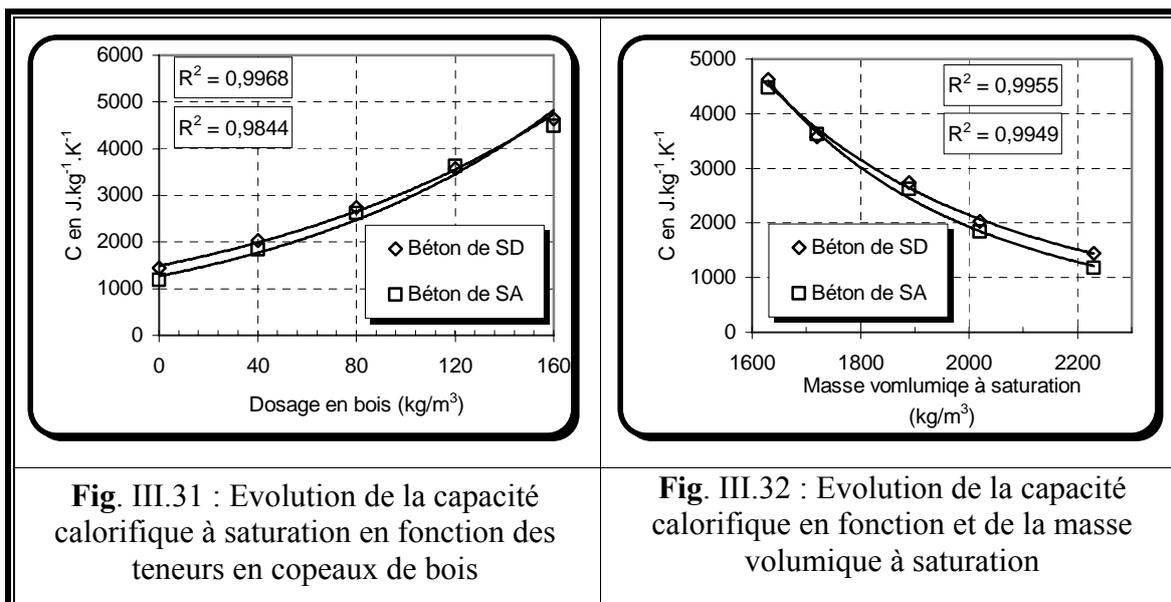
En ce qui concerne les diffusivités thermiques, des augmentations très faibles qui n'ont dépassé que rarement 10 % ont été enregistrées.

Il est à noter, enfin, que plus la proportion en bois augmente, plus les paramètres thermiques des deux bétons de sable, dunaire et alluvionnaire, se rapprochent entre eux.



### III.3.2.2. CAPACITE CALORIFIQUE

L'évolution de la chaleur massique à saturation, en fonction des teneurs en bois et fonction de la masse volumique du composite, est montrée sur les **figures III.31 et II.32**. On constate que cette évolution est, en général, semblable à celle qui a été observée à l'état sec. Les chaleurs massiques sont d'autant plus importantes que les teneurs en bois sont élevées.



A titre d'exemple, la chaleur massique à saturation est de l'ordre de 1446 et 1182 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> respectivement pour le béton de sable dunaire et le béton de sable alluvionnaire sans copeaux

de bois. Par contre, les valeurs obtenues, pour les mêmes bétons avec des teneur en copeaux de bois de  $80 \text{ kg/m}^3$ , sont respectivement  $2735$  et  $2619 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

La différence dans les chaleurs massiques entre l'état sec et l'état saturé est due au fait que l'eau, qui occupe lors de l'absorption une partie de l'air compris dans le composite, a une chaleur massique de  $4200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , tandis que celle de l'air est  $1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

En passant de l'état sec à l'état saturé, la chaleur massique augmente quelles que soient la nature du sable et la teneur en copeaux de bois. Le pourcentage de cette augmentation croît, au début, avec l'augmentation de la teneur en bois, mais après un dosage d'environ  $80 \text{ kg/m}^3$ , il diminue. La différence, passe donc, par un dosage en bois optimal (**Tableau III.5**). A ce dosage-là, et avec l'augmentation de la proportion de l'eau ( $C = 4200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), la proportion de la matrice diminue et la proportion du bois ( $C = 1700 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) augmente.

### III.3.3. CONCLUSION

La principale remarque à noter, concernant l'étude thermique, est que les caractéristiques thermiques des bétons de sable, sont fortement influencées par la proportion de copeaux de bois incorporées.

Les résultats ont montré une amélioration sensible de l'ensemble des propriétés thermiques lorsque la teneur en copeaux de bois augmente. Cette amélioration, constatée pour les deux bétons de sables, est due à la porosité importante des matériaux étudiés (porosité propre des granulats de bois et la porosité induite par ces derniers dans la matrice) qui joue un rôle considérable dans la réduction des ponts thermiques au sein du matériau.

Il ressort, donc, nettement que l'ajout des granulats de bois améliore le comportement thermique de ces matériaux, tout en permettant d'atteindre des résistances mécaniques intéressantes selon, bien sûr la proportion du bois. A titre d'exemple, à un dosage en bois de  $40 \text{ kg/m}^3$ , le béton de sable dunaire présente une résistance à la compression de  $13.2 \text{ MPa}$ , une masse volumique de  $1760 \text{ Kg./m}^3$ , une conductivité thermique de  $0.86 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , et une capacité calorifique de l'ordre de  $1110.5 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et le béton de sable alluvionnaire présente une résistance à la compression de  $15.6 \text{ MPa}$ , une masse volumique de  $1820 \text{ Kg/m}^3$ , une conductivité thermique de  $0.92 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et une capacité calorifique de l'ordre de  $1009.2 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . A l'état saturé, l'air compris dans les pores est remplacé par de l'eau. Ceci change considérablement les propriétés thermiques des matériaux étudiés mais l'évolution de ces paramètres en fonction de la teneur en bois ou de la masse volumique garde la même allure observée dans le cas sec.

Notons enfin, que les résultats obtenus permettent, donc à ces matériaux, selon la teneur en bois, une utilisation comme matériaux porteurs, isolants – porteurs ou isolants notamment dans des conditions sahariennes comme celles de la région de Laghouat où les charges ne sont pas trop élevées, le problème d'eau n'est pas toujours posé et le climat est très sévère que ce soit en été ou en hivers.

## III.4. TRANSFERT HYDRIQUE

### III.4.1. INTRODUCTION

Ces dernières années, de nombreux travaux ont été menés afin de bien comprendre la physique du transport de l'eau dans les matériaux poreux tels que la brique, la pierre de construction et le béton [**Christopher H. et al**, (1996)]. Le rôle de l'eau dans le mécanisme de la détérioration des matériaux de construction poreux a été identifié depuis longtemps. L'action conjuguée des dommages physiques et chimiques résultant, par exemple des cycles

de gel-dégel, de la fissuration due au retrait, de la cristallisation des sels, etc., [Addleson L., (1972)] peut mener à la dégradation rapide des propriétés mécaniques des matériaux de construction et réduire considérablement leur durée de vie. La pénétration de l'eau dans les matériaux de construction fournit un mécanisme et un chemin pour la pénétration des matériaux agressifs (comme, par exemple, les ions de chlorure et de sulfate qui peuvent causer la corrosion du renfort en acier dans les bétons [Thoft-Christensen P., (2001) et (2002); Mejlhede Jensen O. et al., (1999), Luping T., (1996); Mironova M. et al., (2002)]. Les principaux paramètres qui commandent le transport des matériaux délétères à l'intérieur du béton sont la *sorptivité* et la *diffusivité* [Crause P., (1983)].

- La *sorptivité* ( $S_w$  (m.s<sup>-1/2</sup>)), est la propriété qui caractérise la possibilité d'un matériau poreux d'absorber et transmettre l'eau par capillarité pour des conditions initiales et limites. Ce paramètre a été introduit pour la première fois par Philip J.R (1957) et adopté par la suite par d'autres chercheurs [Christopher H. (1977), (1981) et (1986)].

- La *diffusion* ( $D_w$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)), ou encore le *coefficient de transport capillaire*, correspond au mouvement de l'humidité sous l'action d'un gradient de concentration. Il est variable avec la température et la teneur en eau. Sa variation avec la température est due principalement à la variation de sa viscosité et la tension superficielle du liquide [Philip J.R (1957)]. Dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'influence de la teneur en eau dans des conditions ambiantes seulement.

En raison de ses implications économiques, le problème des mouvements de l'eau dans les matériaux de construction poreux a attiré, depuis longtemps, l'attention de beaucoup de chercheurs. Une meilleure compréhension du transfert de l'eau par absorption peut donc mener à des solutions qui peuvent réduire ou empêcher les dommages dans les matériaux de construction. C'est pour ces raisons là, que ce phénomène a fait l'objet de différents sujets de recherches aussi bien actuellement que dans le passé [Philip J.R (1957) ; Christopher H. (1987) et (1987) ; Ho D.W., (1987) ; Sabir B et al., (1998), Ohdaira E. et al., (2000) ; Goual M.S. et al., (2000) ; McCarter W. J., (2001)]. Différentes méthodes de mesures ont été utilisées afin d'étudier le comportement hydrique de ces matériaux (gravimétrie, méthode de micro-onde, conductivité électrique, humidité relative, méthode ultrasonique, résonance magnétique nucléaire, etc.).

#### III.4.2. DETERMINATION DE LA SORPTIVITE

Le processus de transport de l'eau dans le béton a été étudié par plusieurs chercheurs. Dans la plupart des cas et pour des éprouvettes sèches et sans aucune addition, il était possible d'expliquer le processus d'une façon satisfaisante au premier age. Il a fréquemment été montré que, pour un béton ou un mortier exposé au mouillage avec de l'eau, le taux d'absorption d'eau (i), dans les premiers moments de l'absorption, est proportionnel à la racine carrée du temps ( $t^{1/2}$ ) [Christopher H., (1989)]. La *sorptivité* est alors facilement déterminée à partir de la pente de la première partie droite de la courbe  $S_w = f(t^{1/2})$ , où  $S_w$  est la *sorptivité* du matériau.

Dans notre étude, la sorptivité  $S_w$  est mesurée expérimentalement par la méthode gravimétrique décrite dans le **chapitre II** (§II.3.3.2), en déterminant la pente de la droite de la courbe caractérisant l'évolution du volume d'eau, absorbée par capillarité dans les premiers moments de l'essai, en fonction de la racine carrée du temps  $t$  (**Fig.III.33, III.34, III.35 et III.36**).

Notons que les courbes ont été obtenues avec des taux d'absorption volumiques par unité de volume de l'échantillon (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) et ce n'est que dans les calculs de la *sorptivité* qu'on les a convertis en absorption volumique par unité de surface absorbante (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).

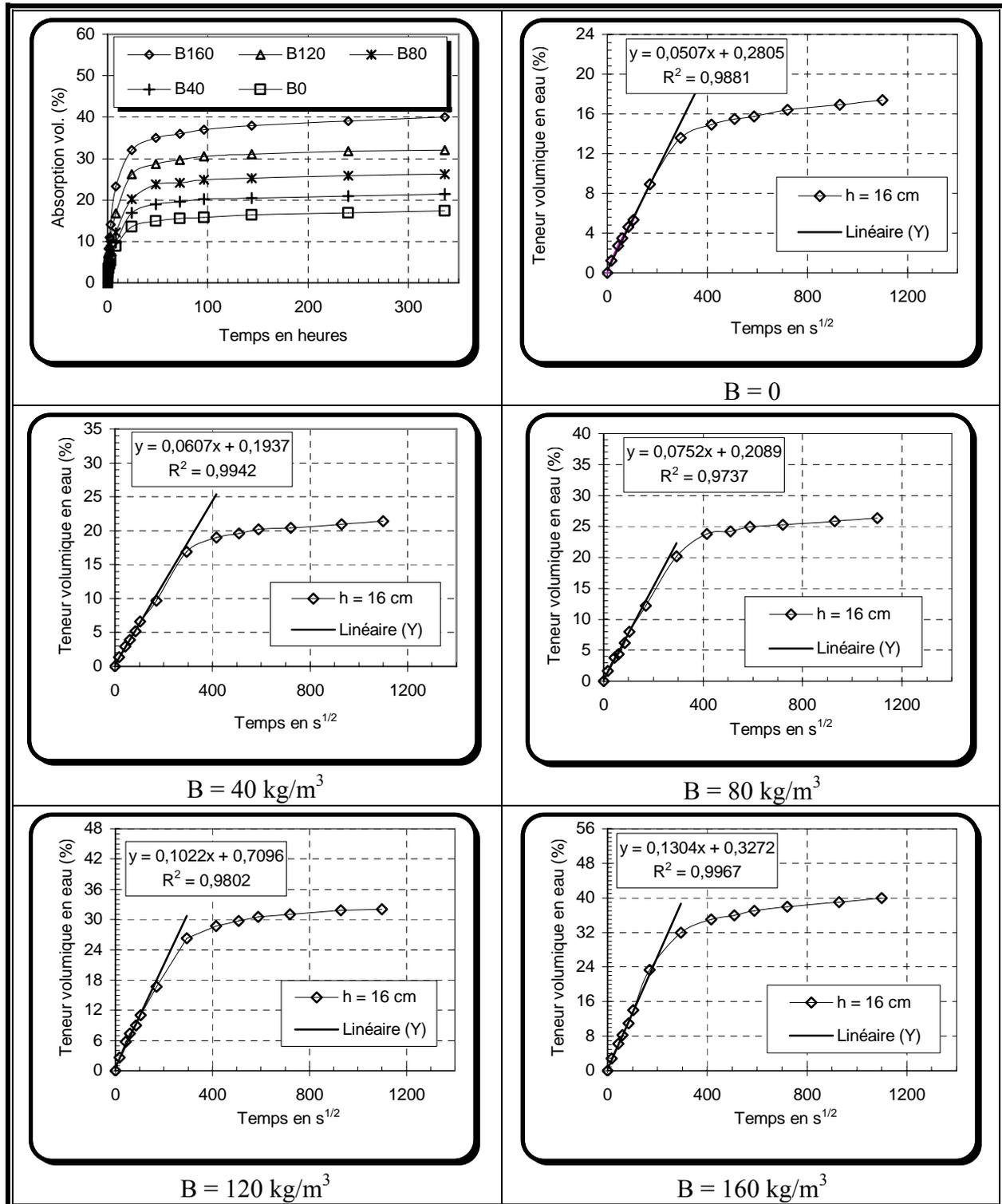
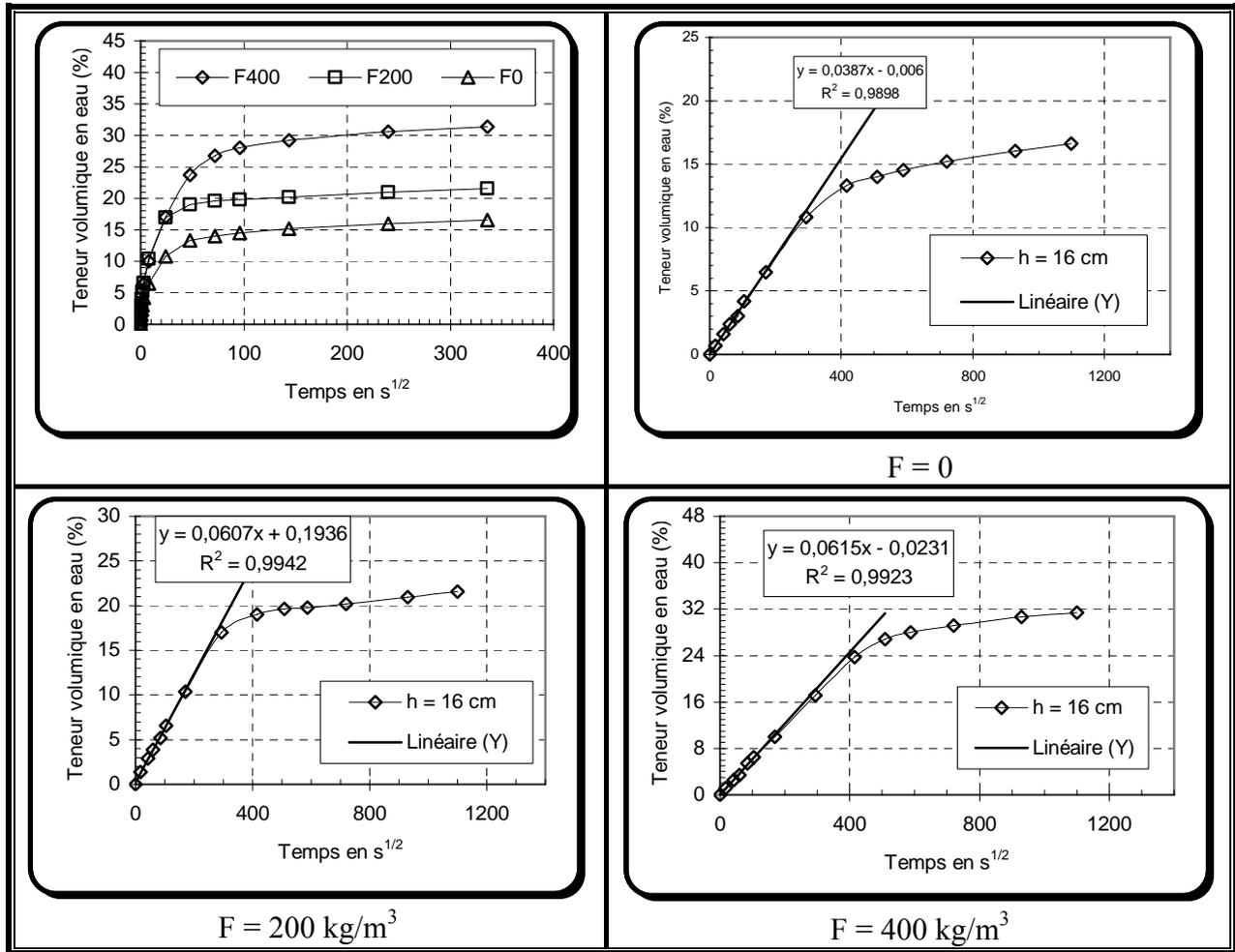
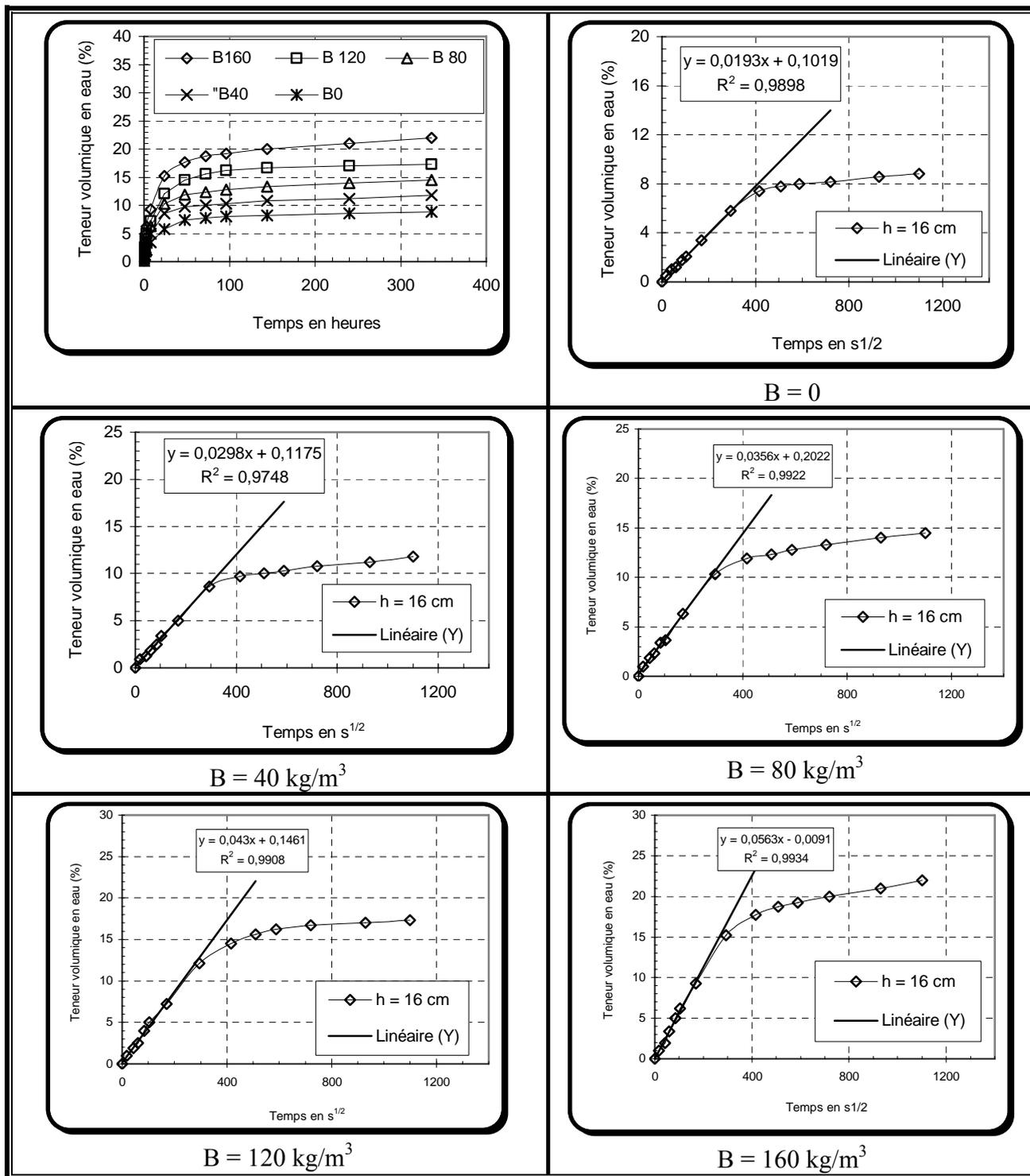


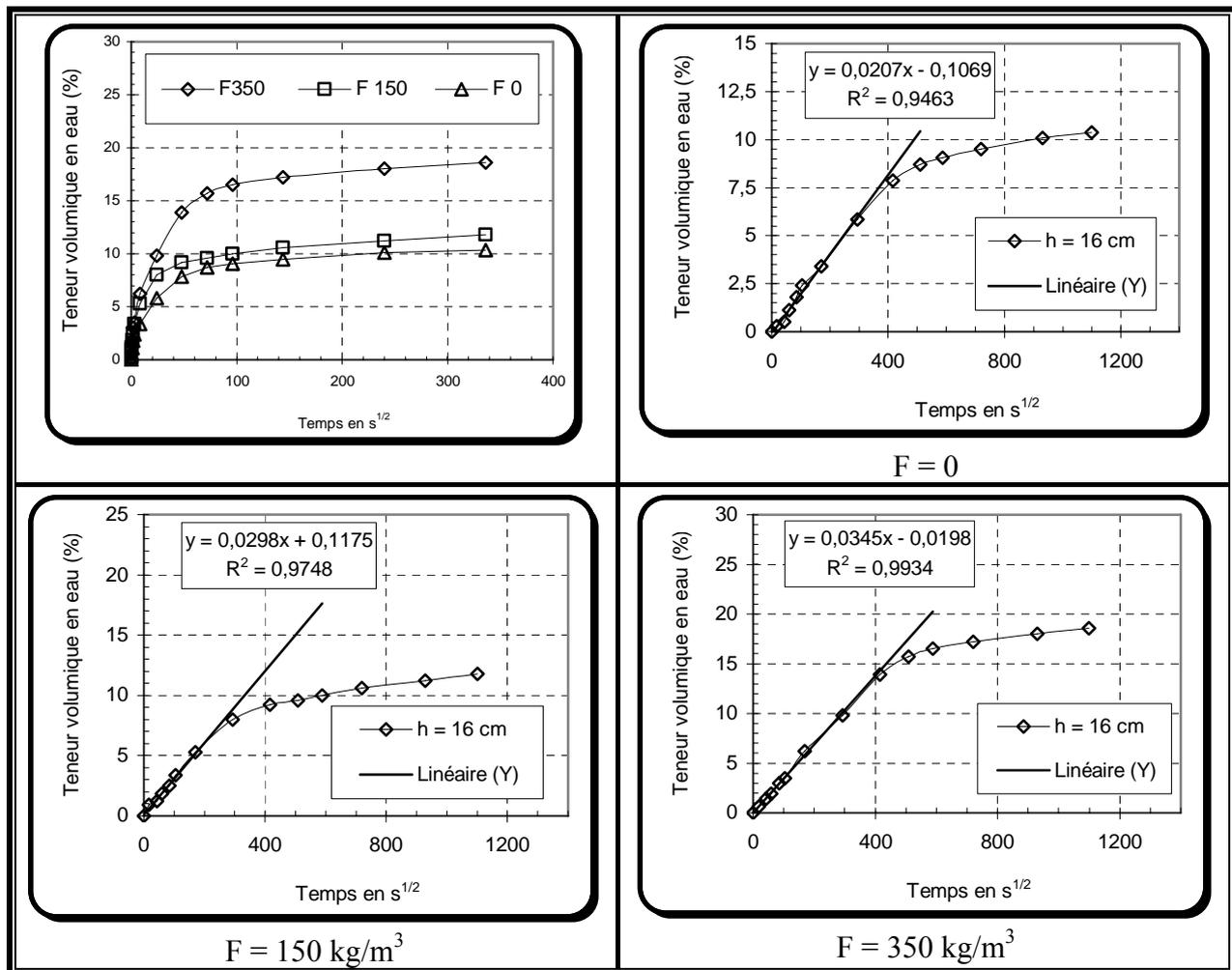
Fig. III.33 : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en bois (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> – Béton de SD)



**Fig. III.34 :** Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différents teneurs en filler (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> – B = 40 kg/m<sup>3</sup> - Béton de SD)



**Fig. III.35 :** Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en bois (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> – Béton de SA -)



**Fig. III.36** : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différentes teneurs en filler (éprouvettes 4x4x16 cm<sup>2</sup> – B = 40 kg/m<sup>3</sup> – Béton de SA)

En examinant l'évolution de l'absorption d'eau pendant les premières heures de l'essai (1<sup>er</sup> jour), ce qui correspond au premier tronçon de droite, nous remarquons que la quantité de l'eau absorbée, dans cette période, est proportionnelle à  $t^{-1/2}$ .

La **sorptivité** est déterminée par le lissage des premiers points expérimentaux par une fonction linéaire de type :

$$i = S_w \cdot t^{1/2} + i_0 \quad (\text{III.3})$$

où

$S_w$  est la sorptivité,

$i_0$  est le taux d'absorption initial ( $t=0$ ) c'est à dire le taux d'absorption au moment de contact de l'échantillon avec l'eau. D'après **Christopher H.**, (1986), c'est la proportion d'eau qui a été rapidement absorbée par les pores ouverts de la surface absorbante.

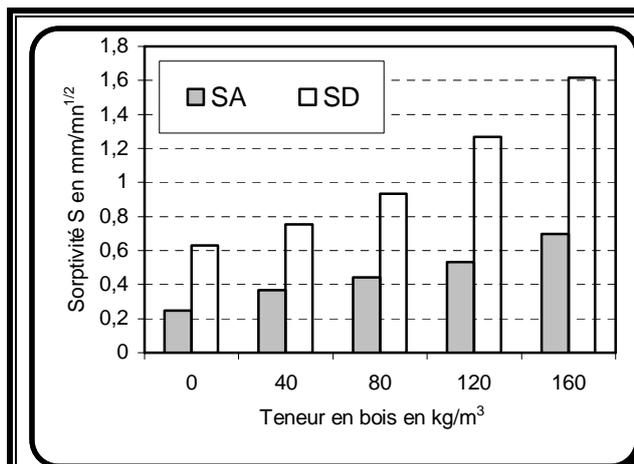
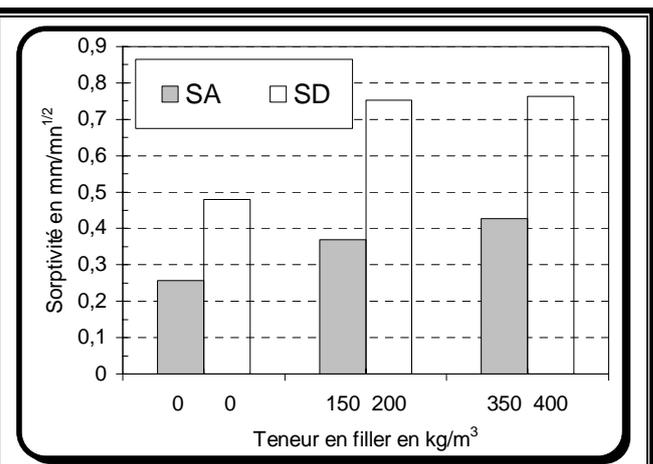
Les résultats, ainsi obtenus pour les deux bétons de sables étudiés, en fonction de la teneur en copeaux de bois et en fonction de la teneur en filler, sont regroupés dans le **tableau III.6** et illustrés par les **figures III.37** et **38**.

**Tableau III.6** : Valeurs expérimentales moyennes de la **sorptivité** des deux bétons de sables en fonction de la teneur en copeaux de bois et des fillers

Béton de SD		Béton de SA	
B (kg/m <sup>3</sup> )	S <sub>w</sub> (mm.mn <sup>-1/2</sup> )	B (kg/m <sup>3</sup> )	S <sub>w</sub> (mm.mn <sup>-1/2</sup> )
0	0.628	0	0.247
40	0.752	40	0.369
80	0.932	80	0.441
120	1.267	120	0.533
160	1.616	160	0.878

F (kg/m <sup>3</sup> )	S <sub>w</sub> (mm.mn <sup>-1/2</sup> )	F (kg/m <sup>3</sup> )	S <sub>w</sub> (mm.mn <sup>-1/2</sup> )
0	0.48	0	0.257
200	0,752	150	0,369
400	0,762	350	0,428

**Fig. III.37** : Evolution de la **sorptivité** des deux bétons de sables en fonction de la teneur en copeaux de bois**Fig. III.38** : Evolution de la **sorptivité** des deux bétons de sables en fonction de la teneur en filler

#### III.4.2.1. EFFET DE LA PROPORTION DES COPEAUX DE BOIS

Il est à noter, en général, que plus le matériau est poreux (proportion de copeaux de bois plus élevée), plus l'absorption est plus importante. La **sorptivité** augmente aussi avec l'augmentation de la proportion des copeaux de bois dans le béton de sable. L'augmentation dans le cas du béton de SD, où les grains sont plus fins, est plus élevée que dans le cas du béton de SA. Pour un dosage de 80 kg/m<sup>3</sup>, par exemple, on note une augmentation de la **sorptivité** de 277 % dans le cas du béton de SD contre 79 % dans le cas du béton de SA.

Ceci montre bien que le bois, sous forme de copeaux, se caractérise par une **sorptivité** plus élevée que celle du béton de sable. De plus, et comme cela a été déjà vu dans l'étude microstructurale (§III.1.3.1.), l'ajout de copeaux de bois induit dans la matrice une porosité supplémentaire qui, elle même, favorise l'absorption d'eau par capillarité.

En ce qui concerne l'augmentation de la sorptivité due à l'ajout de copeaux de bois, un traitement préalable de ces derniers pourra réduire considérablement le pouvoir absorbant du béton [Pel L, (1995)].

#### III.4.2.2. EFFET DE LA PROPORTION DES FILLERS

La même remarque peut être faite pour la proportion des fines dans le matériau, car les fillers, et grâce à leur forte microporosité, augmentent sensiblement la **sorptivité** des composites. Pour des dosages en filler allant de 350 à 400 kg/m<sup>3</sup>, par exemple, on note une augmentation de la **sorptivité** de 59 % dans le cas du béton de SD et de 66.7 % dans le cas du béton de SA.

Contrairement à l'évolution en fonction des copeaux de bois, on remarque ici l'inverse : l'augmentation de la **sorptivité** est plus grande dans le cas du béton de SA. Ceci peut être expliqué par le fait que le sable alluvionnaire est plus grossier et les fillers, qui se caractérisent par une forte microporosité, se regroupent en masse dans les macro-pores du sable et forment de grandes zones capillaires dans le matériau.

#### III.4.2.3. EFFET DE LA NATURE DU SABLE

Il est à noter aussi, qu'à des teneurs en copeaux de bois et en filler égales, le béton de sable dunaire est beaucoup plus sorptif que le béton de sable alluvionnaire. Ceci est dû à la finesse des grains du sable dunaire qui rend les pores très fins et par conséquent favorise la montée de l'eau par capillarité. Ainsi, plus le sable est grossier, plus la sorptivité du béton est réduite.

#### III.4.2.4. CONFRONTATION DES RESULTATS OBTENUS A CEUX DE LA LITTERATURE

Les valeurs de la **sorptivité** obtenues (**tableau III.6**) ont été confrontées aux résultats déjà obtenus pour d'autres matériaux semblables (**tableau III.7**).

La comparaison des résultats obtenus pour le béton de sable à base de copeaux de bois avec les résultats obtenus pour d'autres matériaux permet de tirer les remarques suivantes :

- Les valeurs obtenues dans notre cas entrent bien dans la gamme des valeurs trouvées pour ces matériaux (selon la proportion de copeaux de bois et de filler, la **sorptivité** varie de 0.48 à 1.62 mm.mn<sup>-1/2</sup> dans le cas du béton de sable dunaire et de 0.25 à 0.88 mm.mn<sup>-1/2</sup> dans le cas du béton de sable alluvionnaire).
- L'ajout de copeaux de bois augmente la **sorptivité** du béton de sable, par contre, dans le cas d'un béton argileux, les copeaux de bois diminuent la **sorptivité**. Peut être parce qu'une pâte argileuse (grains fins) est caractérisée par une forte **sorptivité** et l'incorporation de copeaux de bois dans le béton argileux ralentit, donc, le phénomène d'absorption par capillarité. De plus, les copeaux de bois utilisés dans ces bétons argileux sont des granulats de bois commercialisés et traités chimiquement et physiquement, par contre, dans notre cas, les copeaux de bois sont des déchets de menuiserie, utilisés sans aucun traitement. Notons, encore, que leur forme très fine les rend plus sorptifs qu'un béton de sable et leur introduction dans le béton de sable accélère l'absorption de l'eau par capillarité.

**Tableau III.7: Sorptivités** de quelques matériaux en fonction de la densité

Matériau	Densité	Sorptivité (mm.mn <sup>-1/2</sup> )
Béton cellulaire autoclavé <b>Purzak J et al., ((1992)</b>	0.390	0.287
	0.500	0.465
	0.650	0.503
Brique argileuse <b>Purzak J er al., (1992)</b>	1.700	1.239
Béton <b>Purzak J er al., (1992)</b>	2.300	0.929
Plâtre <b>Christopher et al., (1993)</b>	1.390	1.549
	1.430	1.510
Béton de ciment - 100% Clinker - 0% Calcaire - 80% Clinker - 20% Calcaire <b>Tsivilis S. et al., (2000)</b>	2.400	0.237
	2.394	0.220
Béton argileux cellulaire <b>Goual M.S, (2000)</b>	1.038	1.835
	0.953	1.673
	0.843	1.456
Béton argileux à base de copeaux de bois <b>Bouguerra A et al., (1997)</b>	1.28 (sans bois)	1.398
	0.82 (30% de bois)	0.918
Béton <b>Miniotaité R, (2004)</b>	2.18	1.66
Brique de céramique <b>Miniotaité R, (2004)</b>	1.91	0.62
Bois de pin <b>Miniotaité R, (2004)</b>	0.385	0.090

### III.4.3. ETUDE DE LA DIFFUSIVITE HYDRIQUE

Dans le cas d'un écoulement unidirectionnel dans un milieu poreux non saturé et homogène, l'équation de transfert isotherme d'humidité, exprimée en fonction de la teneur volumique en eau, s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (\text{III.4})$$

où :

t(s) est le temps et z est la coordonnée spatiale.

Condition aux limites : à z = 0 et pour t ≥ 0,      θ = θ<sub>s</sub>

Condition initiale :      à t = 0 et pour z > 0,      θ = θ<sub>0</sub>

Le tracé des profils hydriques θ(z,t) (évolution de la teneur en eau à travers l'échantillon dans l'espace et dans le temps) permet donc de déterminer ce paramètre en utilisant la transformée de **Boltzmann** (b = z.t<sup>1/2</sup>). Cette dernière permet de regrouper l'ensemble des profils hydriques en une courbe unique appelée profil type θ(b), solution de l'équation différentielle (III.4) après transformation :

$$-\frac{b}{2} \left( \frac{d\theta}{db} \right) = \frac{d}{\partial b} \left( D_w \frac{d\theta}{db} \right) \quad (\text{III.5})$$

avec :

$\theta = \theta_s$  pour  $b = 0$ ,

et  $\theta = \theta_0$  lorsque  $b \rightarrow \infty$

L'intégration de l'équation (III.5) donne le coefficient de transport capillaire à une teneur en eau  $\theta$  (**équation II.24, chap. II**).

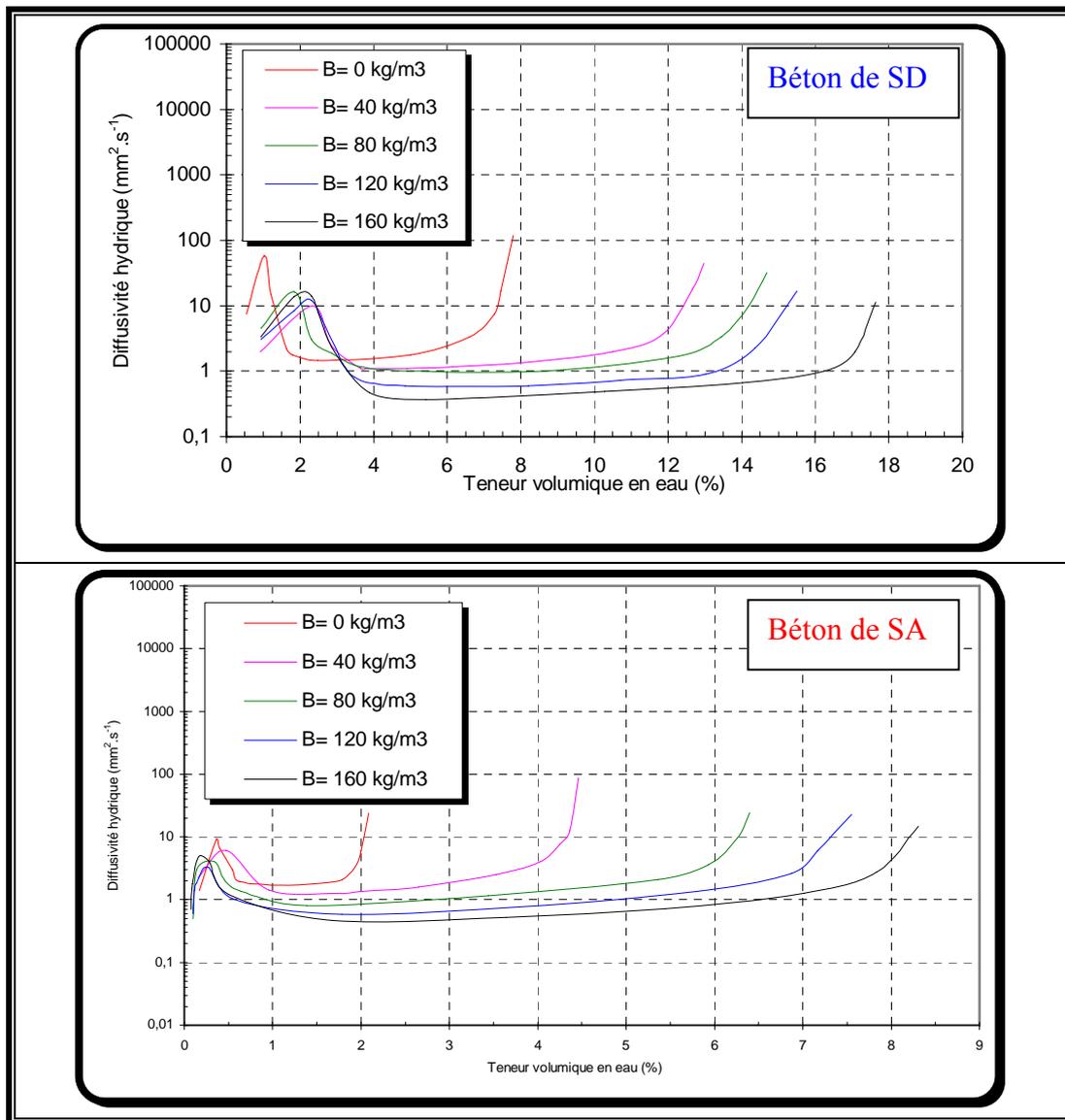
Dans cette étude nous avons utilisé la teneur en eau volumique  $\theta$  au lieu de la teneur pondérale  $\omega$ . Cela ne change rien, étant donné que  $\theta = \rho_0 \omega$ , où  $\rho_0$  est la densité sèche apparente du matériau.

Après avoir tracé les courbes de l'évolution de la teneur volumique en eau en fonction du temps pour différentes hauteurs d'échantillon, puis les courbes de l'évolution de la teneur volumique en eau dans le volume local en fonction du temps, et enfin les courbes de l'évolution de la teneur volumique en eau dans le volume local en fonction de la transformée de **Boltzmann**, nous avons tracé les profils types moyens (**figures II.29 et II.30**). La diffusivité hydrique a été déterminée, pour les deux bétons de sable et pour les différentes teneurs en copeaux de bois envisagées, en utilisant la relation donnée par l'**équation (II.24, chap. II)**.

La **figure III.39** montre son évolution en fonction de la teneur volumique en eau pour toutes les teneurs en copeaux de bois étudiées. Les valeurs moyennes de la diffusivité, calculées au niveau des points se trouvant sur le palier de chaque courbe, sont données dans le **tableau III.8**.

**Tableau III.8** : Valeurs moyennes de la diffusivité hydrique pour les différentes compositions étudiées

B (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>w</sub> moy (mm <sup>2</sup> /s)	
	Béton de SD	Béton de SA
0	0.95	1.26
40	0.84	1.10
80	0.74	1.00
120	0.53	0.87
160	0.45	0.54



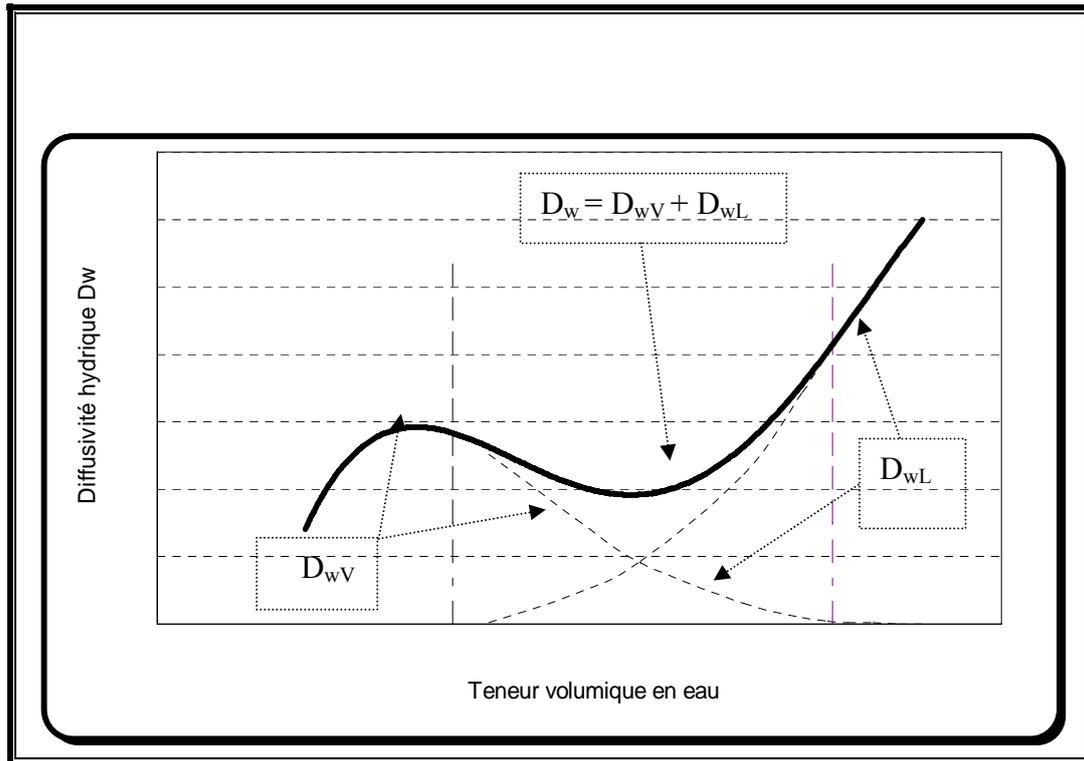
**Fig. III.39 :** Evolution de la **diffusivité hydrique** des deux bétons de sables en fonction de la teneur volumique en eau et la teneur en copeaux de bois

#### III.4.3.1. DIFFUSIVITE DU LIQUIDE ET DU VAPEUR

Notons que les valeurs de la diffusivité ainsi obtenues représentent en fait la diffusivité totale  $D_w = D_{wL} + D_{wV}$ , où  $D_{wL}$  est la diffusivité du liquide et  $D_{wV}$  diffusivité de la vapeur. D'après **Crause P** (1983), l'évolution des coefficients de transport avec la teneur en eau n'est que partiellement vérifiée dans la littérature. Par ailleurs, les méthodes expérimentales présentées dans la littérature ne permettent de déterminer que le coefficient de transport global  $D_w$  et ne permettent pas d'évaluer spécifiquement  $D_{wL}$  ou  $D_{wV}$ , ce dernier se trouve indissociable du transfert en phase liquide.

#### III.4.3.2. EVOLUTION DE $D_w$ EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU

D'une manière générale, l'évolution de  $D_w$  en fonction de la teneur en eau dans le cas d'un écoulement unidirectionnel correspond à la courbe présentée par **Daian** (1986) (**figure III.40**).



**Fig. III.40** : Evolution de la **diffusivité hydrique** en fonction de la teneur volumique en eau selon **Daian [Daian J.F, (1986) ]**

Dans notre cas, l'évolution de  $D_w$  en fonction de la teneur en eau présente la même allure pour toutes les compositions étudiées : une augmentation rapide est observée à des faibles teneurs en eau, puis une légère diminution à des teneurs intermédiaires et enfin une légère augmentation qui devient de plus en plus importante à des teneurs très élevées en eau. Au début et à très faibles teneurs en eau, la phase condensée se présente sous forme adsorbée ou dans des îlots capillaires isolés. Le transfert en phase vapeur est seul en jeu [Daian J.F, (1986) ; De Vries D.A (1958) ; Gotteicha M., (2005) et Pel L (1995)]. Au delà d'une certaine teneur volumique en eau, la diffusion mixte liquide-vapeur commence à avoir lieu. Le coefficient  $D_{wL}$  augmente, alors, au détriment de  $D_{wV}$ . Après on note une diminution de  $D_w$  avec l'augmentation de la teneur en eau.

#### III.4.3.3. EFFET DE LA PROPORTION DE COPEAUX DE BOIS

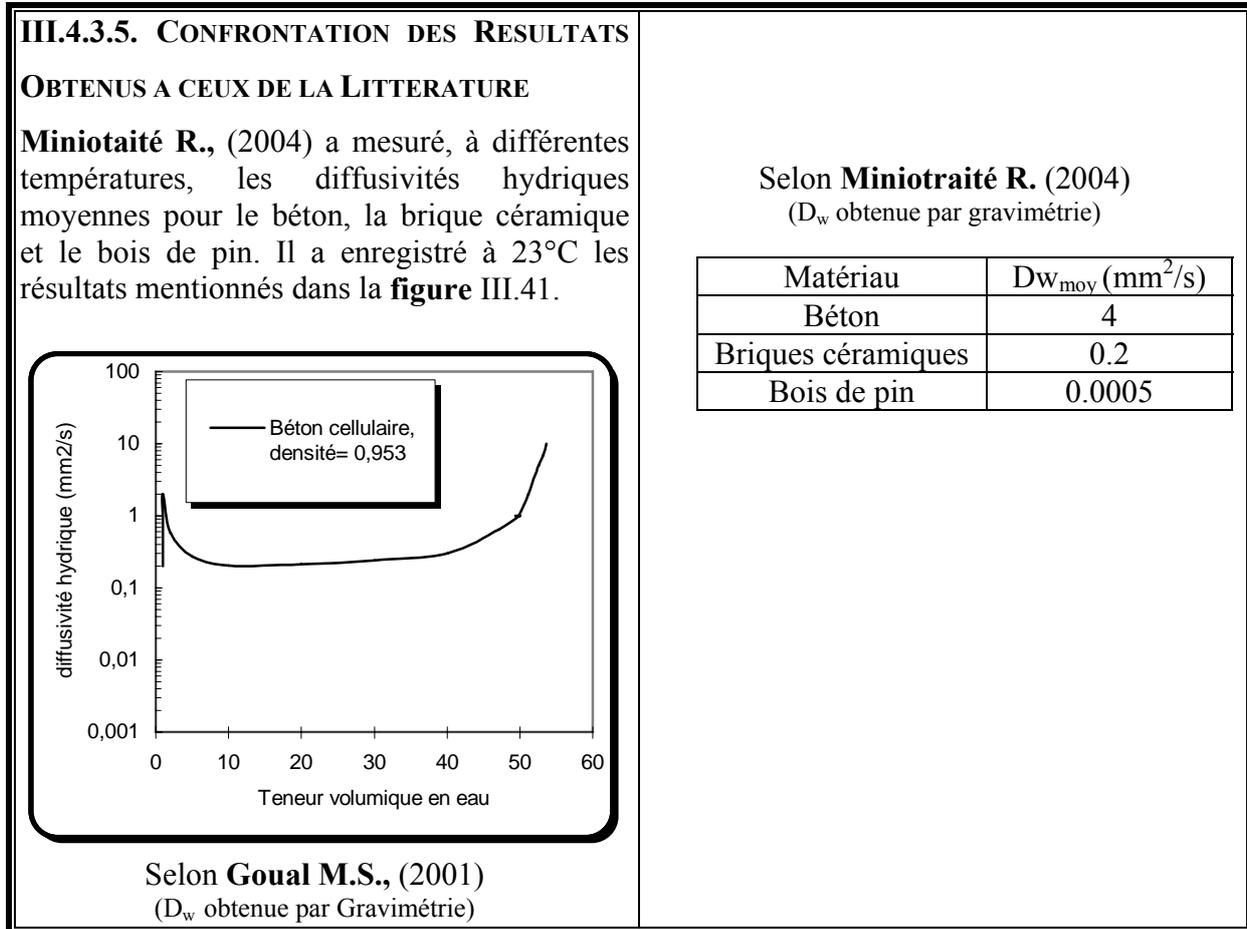
En fonction de la teneur en bois, l'évolution de la diffusivité garde la même allure, mais en terme de valeurs moyennes, la diffusivité diminue en augmentant la proportion des copeaux de bois.

#### III.4.3.4. EFFET DE LA NATURE DU SABLE

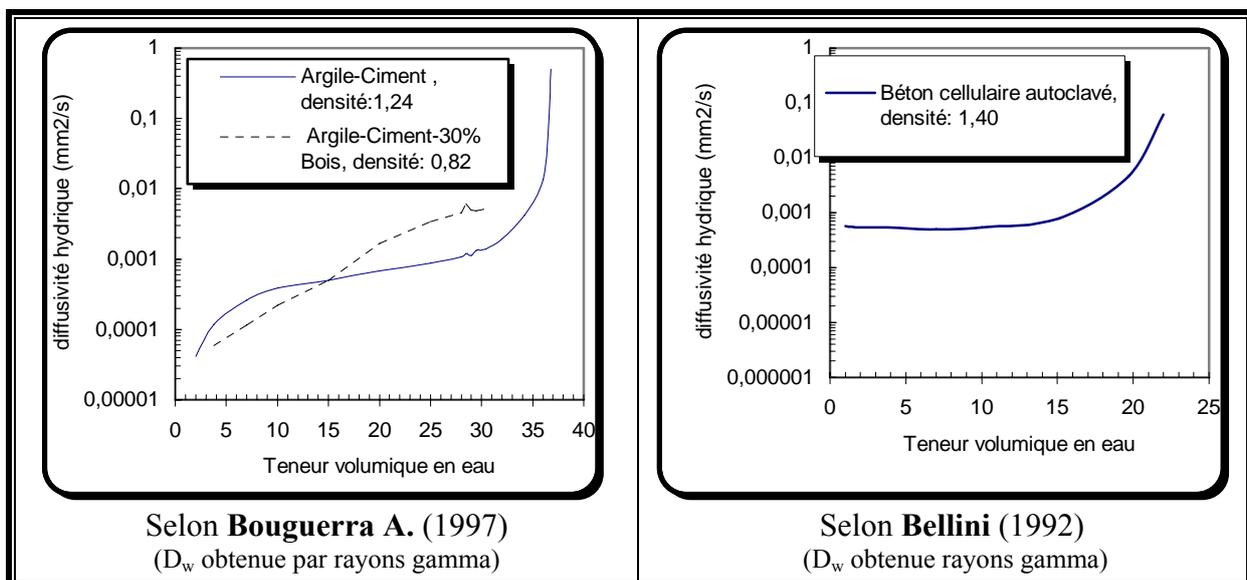
En comparant les deux bétons de sables étudiés, on remarque que le béton de sable alluvionnaire présente des diffusivités hydriques légèrement plus élevées que celles du béton de sable dunaire. Mais à des proportions en bois très élevées, leurs diffusivités sont très proches.

#### III.4.3.5. CONFRONTATION DES RESULTATS OBTENUS A CEUX DE LA LITTERATURE

**Miniotaité R.**, (2004) a mesuré, à différentes températures, les diffusivités hydriques moyennes pour le béton, la brique céramique et le bois de pin. Il a enregistré à 23°C les résultats mentionnés dans la **figure III.41**.



**Fig. III.41** : Evolution de la **diffusivité hydrique** par capillarité en fonction de la teneur en eau volumique selon **Goual M.S.**, et **Miniotraité R.**



**Fig. III.42** : Evolution de la **diffusivité hydrique** par capillarité en fonction de la teneur en eau volumique selon **Bouguerra A** et **Bellini**

D'autre part, **Bouguerra A.**, (1997), **Goual M.S.**, (2001) et **Bellini et al.**, (1992) ont également présenté, sous forme de courbes, l'évolution de la diffusivité hydrique pour, respectivement, une matrice Argile-Ciment avec et sans bois, pour un béton argileux cellulaire, et pour un béton cellulaire autoclavé (**figure III.41** et **III.42**).

L'allure de ces courbes paraît presque similaire que celle obtenue dans notre cas avec des petites différences qui peuvent être reliées au caractère spécifique des bétons étudiés, étant donné que ces derniers sont tout à fait différents, en matière et en granulométrie des granulats. En terme de valeurs moyennes, le béton de sable, et grâce sa granularité particulière, présente des diffusivités plus faibles que celles du béton (**Miniotaité R.**, (2004)). D'autre part, il présente des diffusivités supérieures à celles de la brique et des bétons argileux et beaucoup plus élevées que celle du bois.

#### **III.4.4. CONCLUSION**

Comme pour l'étude thermique, la principale remarque à noter concernant l'étude hydrique est que les caractéristiques hydriques des bétons de sable à base de copeaux de bois étudiés sont fortement influencées par la proportion des copeaux de bois incorporés. L'absorption par capillarité est d'autant plus forte que la proportion des copeaux de bois est élevée. En augmentant la teneur de copeaux de bois, les composites étudiés deviennent de plus en plus la sorptifs, par contre leurs diffusivités hydriques sont réduites. A des faibles teneurs en bois on note une légère différence entre le béton de sable dunaire et le béton de sable alluvionnaire. Mais, à des teneurs plus élevées, les deux composites se comportent presque de la même manière.

# *Chapitre IV*

---

ETUDE DE MODELISATION ET DE DURABILITE  
DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS  
- TRAITEMENT DES COPEAUX DE BOIS -

---

#### IV. ETUDE DE MODELISATION ET DURABILITE DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS - TRAITEMENT DES COPEAUX DE BOIS -

Afin de comparer les résultats expérimentaux, obtenus dans le cadre de cette étude, avec des résultats théoriques, nous avons consacré ce chapitre à une tentative d'applications de quelques modèles théoriques permettant la prédiction des caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux. Il est également consacré à une étude de durabilité basée essentiellement sur la tenue des composites étudiés vis à vis le gel-dégel et le mouillage-séchage. A la fin de ce chapitre, et dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des matériaux étudiés, un traitement, choisi de la littérature, est appliqué aux copeaux de bois avant de les introduire dans les bétons de sable.

##### IV.1. APPLICATION DES MODELES THEORIQUES

Puisque l'objectif principal de ce travail est la formulation d'un béton léger isolant porteur et vu le temps de cette étude limité, seules les caractéristiques thermo-mécaniques sont prises en compte : la résistance à la compression et la conductivité thermique.

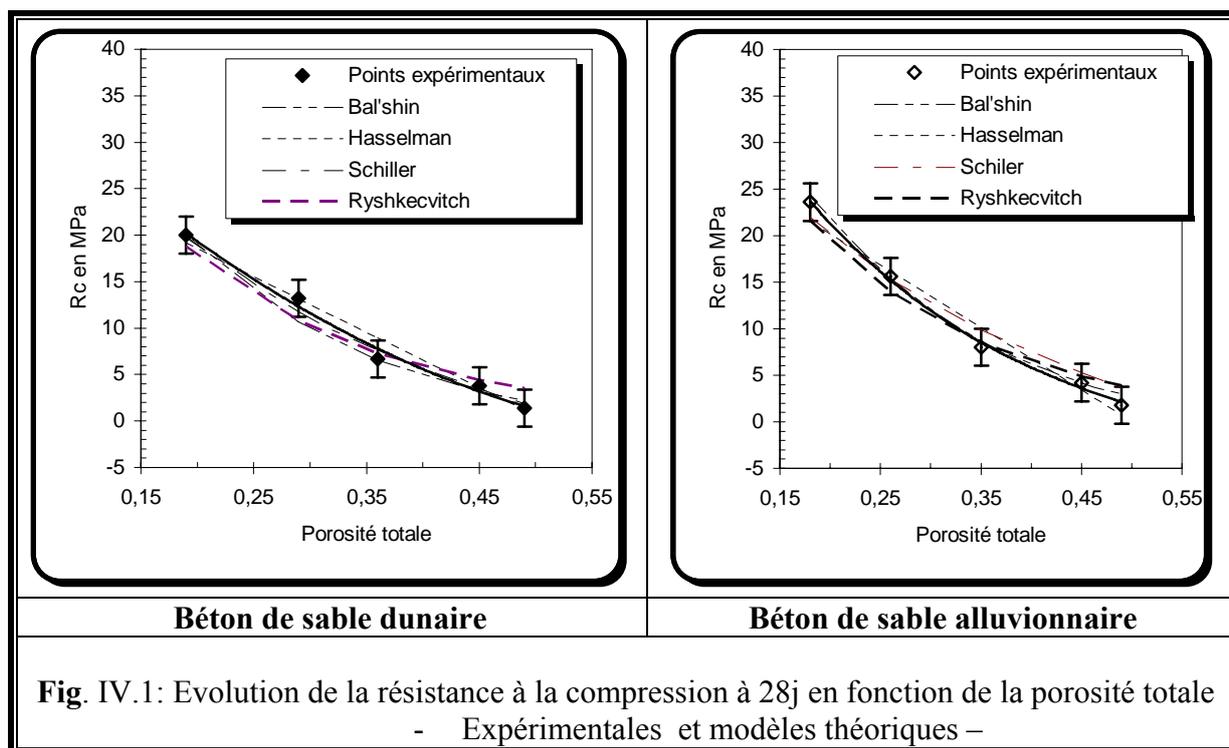
##### IV.1.1. RESISTANCE MECANIQUE

Pour la résistance à la compression, nous avons testé les quatre modèles les plus utilisés (chapitre I (§ 7.1)) et validés dans le cas des plâtres, de ciment et du béton cellulaire autoclavé [Laurent J.P., (1990)]. Il s'agit des modèles de **Bal'shin**, **Hasselman**, **Ryshkevitch** et **Schiller**. Les coefficients apparaissant dans ces modèles sont déterminés par régression sur les points expérimentaux ( $\sigma_c = f(\varepsilon)$ ) puis regroupés dans le **tableau IV.1**.

**Tableau IV.1:** Valeurs des coefficients utilisés dans les modèles théoriques et déterminés par régression sur les point expérimentaux

	Différents Modèles utilisés	Relations données par les Modèles	Coefficients			
			$\sigma_0$	$K_c$ ( $K_H$ )	$\varepsilon_0$	$\Psi$
Béton de SD	<b>Bal'shin</b> matériaux céramiques	$\sigma_c = \sigma_0 (1 - \varepsilon)^k$	54	4.73	-	-
	<b>Hasselman</b> matériaux réfractaires polycristallins	$\sigma_c = \Psi \cdot \sigma_0 - K_H \cdot \varepsilon$	54	60	-	0.566
	<b>Schiller</b> plâtres	$\sigma_c = \Psi \cdot \sigma_0 \cdot \ln(\varepsilon_0 / \varepsilon)$	54	-	0.54	0.35
	<b>Ryshkevitch</b> matériaux frittés	$\sigma_c = \sigma_0 \cdot e^{-k\varepsilon}$	54	5.56	-	-
Béton de SA	<b>Bal'shin</b> matériaux céramiques	$\sigma_c = \sigma_0 (1 - \varepsilon)^k$	58	5.4	-	-
	<b>Hasselman</b> matériaux réfractaires polycristallins	$\sigma_c = \Psi \cdot \sigma_0 - K_H \cdot \varepsilon$	58	67	-	0.579
	<b>Schiller</b> plâtres	$\sigma_c = \Psi \cdot \sigma_0 \cdot \ln(\varepsilon_0 / \varepsilon)$	58	-	0.60	0.318
	<b>Ryshkevitch</b> matériaux frittés	$\sigma_c = \sigma_0 \cdot e^{-k\varepsilon}$	58	5.50	-	-

La **figure IV.1.** permet de confronter les résultats expérimentaux aux résultats théoriques.



Il est à noter que, pour les deux bétons de sable étudiés, les valeurs obtenues expérimentalement sont très proches de celles obtenues avec les modèles théoriques et l'allure de l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité est la même. A part le dernier point ( $B = 160 \text{ kg/m}^3$ ), l'écart entre les deux résultats, expérimentaux et théoriques, ne dépasse pas 15 %. Cette différence est sûrement due au fait que ces modèles sont élaborés pour des matériaux différents. Notons, encore, que les deux modèles, **Hasselman** et **Schiller**, ont nécessité un autre coefficient de correction pour qu'ils soient adaptés aux bétons de sable à base de copeaux de bois.

## IV.1.2. CONDUCTIVITE THERMIQUE

### IV.1.2.1. INTRODUCTION

Le transfert de chaleur est particulièrement complexe et dépend de plusieurs paramètres tels que : la taille moyenne, la forme, la distribution spatiale des pores ou des particules, la qualité du contact entre les pores ou les particules voisines, la continuité (matériaux granulaires), etc... [Gori F., (1983) ; Princigallo A. et al., (2003)]. Plusieurs matériaux ont fait l'objet d'une étude de modélisation [Hamdami N. et al., (2003) ; Gori F. et al., (2003) ; etc.]. Aujourd'hui, de nombreux modèles de transfert de chaleur par conduction dans les matériaux poreux sont présents dans la littérature [Carsona J.K. et al., (2003) ; Weber et al.; (1999)]. Toutefois, il convient de noter que très peu d'entre eux peuvent fournir des prévisions précises pour tous les matériaux considérés [Carsona J.K. et al.; (2003)]. Une partie de la difficulté peut être due à une simplification de la structure pour beaucoup de modèles.

Dans cette étude, nous ne nous sommes pas engagés à développer de nouveaux modèles, mais nous nous sommes limités uniquement à la validation de quelques modèles théoriques basés

sur la combinaison des conductivités thermiques des différentes phases, solide et fluide (gaz et/ou eau). Des corrections théoriques pourront être apportées à ces modèles afin de les adapter à nos matériaux (bétons de sable à base de copeaux de bois).

#### IV.1.2.2. ECHELLE DE MODELISATION

Le béton est un matériau hétérogène constitué de particules dont la taille varie des plus gros grains jusqu'aux ultrafines et de vides de différentes tailles et de répartition géométrique complexe. Pour permettre, donc, l'application des lois de la physique des milieux continus aux milieux poreux (milieux discontinus), il est nécessaire de définir un niveau de description qui permet d'établir une équivalence entre le milieu réel dispersé et un milieu continu fictif [Le Neindre B]. En effet, cette hypothèse permet d'assimiler un milieu poreux hétérogène et discontinu à un milieu continu unique, caractérisé en chaque point par des grandeurs macroscopiques moyennes. Ceci est envisageable grâce au passage de l'échelle du pore à celle d'un milieu poreux homogène à l'aide du volume élémentaire représentatif (VER) (Chap.I, § I.7.2.1).

En général, l'établissement des équations, auxquelles obéissent les phénomènes à l'échelle macroscopique, est formellement obtenu à partir des équations microscopiques de la thermodynamique des milieux continus auxquelles sont appliquées des procédures spécifiques de changement d'échelle, telles que l'homogénéisation et les moyennes volumiques [Degiovanni A].

Dans notre cas, deux échelles ont été envisagées:

- la première (Echelle 1), le composite est considéré comme un matériau composé de deux phases : une phase solide et une phase fluide (air ou liquide).
- la deuxième (Echelle 2), on considère le composite constitué de trois phases : une phase solide représentant le béton de sable et une phase (fluide : air ou liquide) dans lesquelles on introduit des inclusions (granulats de bois).

#### IV.1.5.2.3. ESTIMATION DES PARAMETRES NECESSAIRES POUR LA MODELISATION

La détermination théorique de la conductivité thermique effective ( $\lambda_{\text{eff}}$ ) nécessite la connaissance de la porosité totale du composite ainsi que les fractions volumiques et la conductivité thermique de chaque phase.

##### IV.1.2.3.1. ESTIMATION DE LA POROSITE

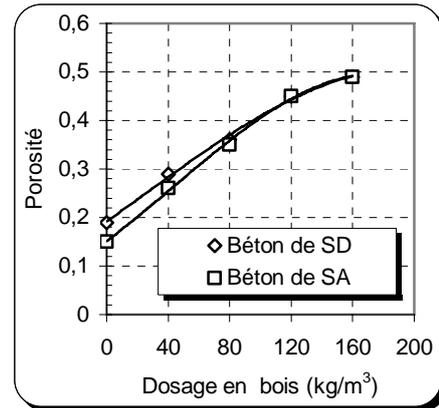
Les bétons de sables à base de copeaux de bois présentent une structure complexe dépendant à la fois, de la matrice et des copeaux de bois incorporés. Ces derniers présentent des morphologies différentes. Ils se caractérisent par une porosité très élevée et ouverte à l'eau. La matrice, elle-même, qui se caractérise par une porosité moins élevée, présente une double porosité : sa propre porosité et la porosité induite par l'ajout des copeaux de bois.

Vu la non disponibilité d'un matériel de mesure de très bonne précision, La porosité a été déterminée expérimentalement (par pycnométrie). Le **tableau IV.2** et la **figure IV.2** présentent la porosité en fonction de la teneur en copeaux de bois.

L'allure générale des courbes porosité-teneur en bois est similaire pour les deux bétons de sable. Sans copeaux de bois, le béton de sable dunaire, et grâce à la grande surface spécifique de son sable, présente une porosité légèrement plus élevée. Après l'introduction de copeaux de bois, et après un certain dosage (soit 80 kg/m<sup>3</sup>), les deux bétons de sable présentent des porosités très proches.

**Tableau IV.2 :** Porosité des deux bétons étudiés en fonction de la teneur en copeaux de bois

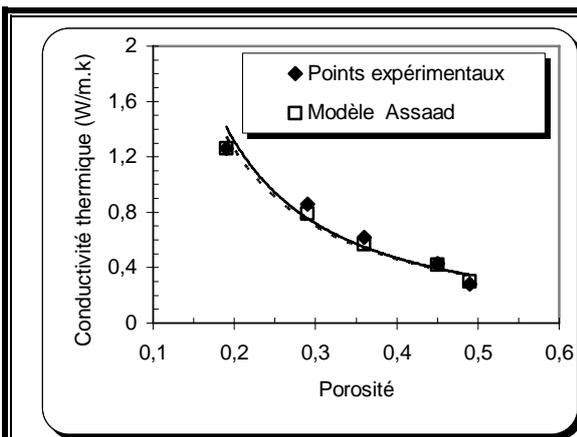
B (kg/m <sup>3</sup> )	Béton de SD			Béton de SA		
	$\rho_{app}$	$\rho_s$	$\epsilon$	$\rho_{app}$	$\rho_s$	$\epsilon$
0	2.04	2.52	0.19	2.10	2.49	0.15
40	1.76	2.47	0.29	1.82	2.46	0.26
80	1.53	2.39	0.36	1.58	2.43	0.35
120	1.30	2.36	0.45	1.32	2.40	0.45
160	1.20	2.34	0.49	1.22	2.38	0.49



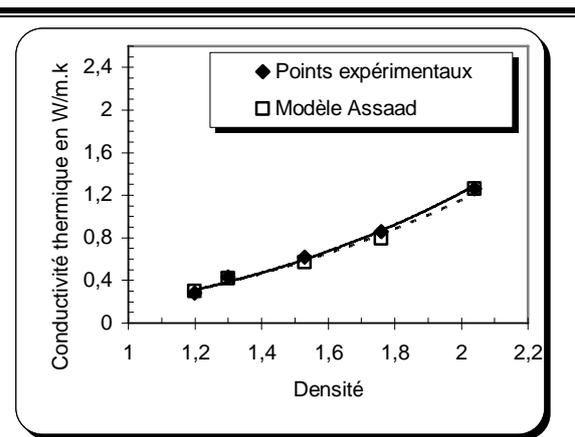
**Fig. IV.2:** Porosités des deux bétons en fonction de la teneur en copeaux de bois

On constate également, qu’au début et avec des teneurs en bois inférieures à 100 kg/m<sup>3</sup>, l’augmentation de la porosité est plus rapide (0.25 % (SA) à 0.27 (SD) par kg de bois), mais au delà de cette teneur, l’augmentation tend à prendre une cinétique plus ou moins faible (0.1 % par kg de bois). A teneurs modérées et égales, on constate que l’ajout de bois introduit dans le béton de SA plus de pores que dans le béton de SD, alors qu’avec des dosages plus élevés, les deux bétons de sables présentent des porosités similaires. Ce comportement à des teneurs en bois élevées, vient, donc, pour confirmer les constatations déjà faites sur le comportement physico-mécanique, thermique, hydrique et structural.

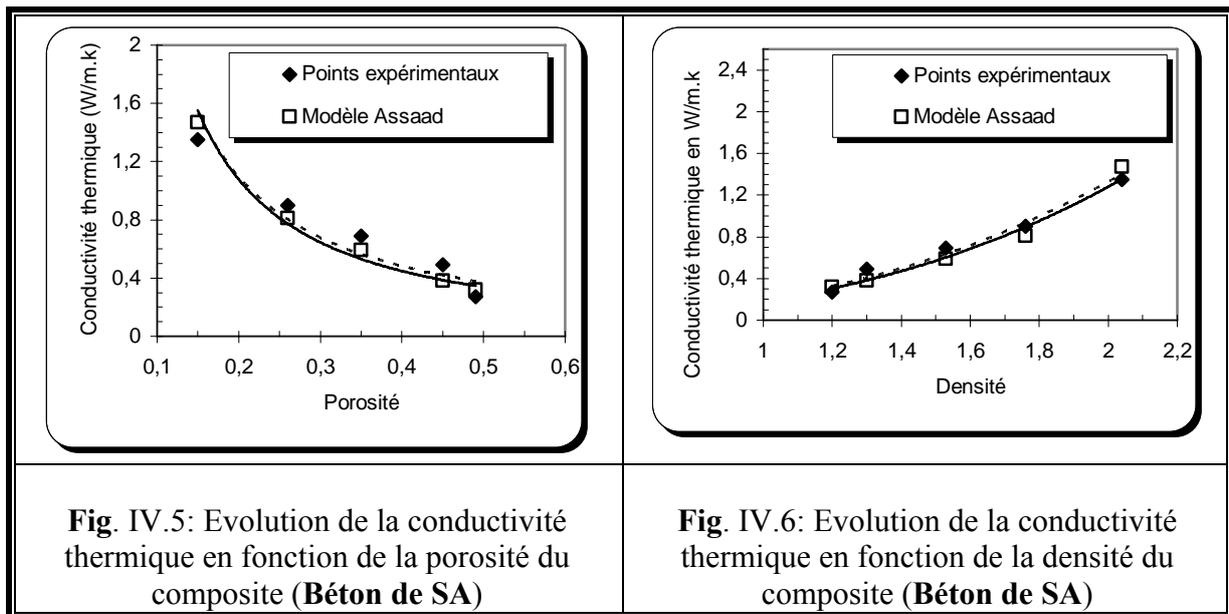
Afin de comparer les résultats obtenus avec les résultats théoriques (modèle d’Assaad (§IV.2.4.1)), nous avons tracé les courbes ‘conductivité thermique–porosité’ et ‘conductivité thermique – densité’ (figure IV.3, IV.4, IV.5, IV.6).



**Fig. IV.3:** Evolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité du composite (**Béton de SD**)



**Fig. IV.4:** Evolution de la conductivité thermique en fonction de la densité du composite (**Béton de SD**)



La confrontation des résultats expérimentaux à ceux donnés par le modèle d'Assaad [Marmoret L., (1998) et (1987), Laurent J.P et al., (1995)] montre, d'une manière générale, que la concordance est bonne avec des coefficients de corrélation satisfaisants.

#### IV.1.2.3.2. FRACTIONS VOLUMIQUES DES PHASES

Le **tableau IV.3** présente les proportions volumiques des différentes phases constituant les deux bétons étudiés :

**Tableau IV.3: Fractions volumiques des différentes phases**

B (Kg/m <sup>3</sup> )	Béton de SD			Béton de SA		
	$\theta_{mat}$	$\theta_b$	$\theta_v$	$\theta_{mat}$	$\theta_b$	$\theta_v$
0	0.81	0.00	0.19	0.85	0.00	0.15
40	0.60	0.09	0.31	0.63	0.09	0.28
80	0.48	0.16	0.36	0.49	0.16	0.35
120	0.33	0.22	0.45	0.33	0.22	0.45
160	0.21	0.28	0.51	0.23	0.28	0.49

$\theta_{mat}$  : la fraction volumique de la matrice solide dans le composite,

$\theta_b$  : la fraction volumique du bois dans le composite,

$\theta_v$  : la fraction volumique des pores dans le composite.

On constate que plus la proportion des copeaux de bois augmente, plus la porosité du composite augmente et par conséquent la fraction volumique de la matrice diminue.

#### IV.1.2.3.3. CONDUCTIVITES THERMIQUES DES DIFFERENTES PHASES

La conductivité thermique des grains solides  $\lambda_s$  a été déterminée en employant une méthode déjà utilisée par plusieurs auteurs [Bouguerra A., (1997), Goual M.S., (2001), Laidoudi B., (2005)], pour l'estimation des conductivités thermiques des phases solides.

Cette technique a été développée à l'origine par **Horai K. I.** (1972). Elle consiste à broyer finement les phases solides (<80µm). La poudre ainsi obtenue, est ensuite mélangée avec de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un mélange saturé et homogène, composé uniquement de deux phases (phase solide et eau). La conductivité thermique du mélange est déterminée en utilisant la technique de la source plane (TPS).

Après la mesure de la conductivité thermique du mélange saturé  $\lambda_m$ , la conductivité thermique des grains solides est identifiée avec la moyenne des bornes de **Hashin et Strickman** :

$$\lambda_m = \frac{(\lambda_{\text{sup}} + \lambda_{\text{inf}})}{2} \quad (\text{IV.1})$$

où :  $\lambda_{\text{sup}}$  et  $\lambda_{\text{inf}}$  : sont les bornes de **Hashin et Strickman** données par :

$$\lambda_{\text{sup}} = \lambda_s + \frac{\theta_L}{\frac{1}{\lambda_L - \lambda_s} + \frac{1 - \theta_L}{3\lambda_s}} \quad \text{et} \quad \lambda_{\text{inf}} = \lambda_L + \frac{1 - \theta_L}{\frac{1}{\lambda_s - \lambda_L} + \frac{\theta_L}{3\lambda_L}} \quad (\text{IV.2})$$

$\lambda_s$  et  $\lambda_L$  sont respectivement la conductivité thermique de la phase solide et liquide et  $\theta_L$  la teneur volumique du liquide.

Connaissant la conductivité thermique de l'eau immobile à une température d'environ 20°C ( $\lambda_L = 0.569 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), on peut estimer la conductivité thermique des grains solides à partir des **relations** (IV.1) et (IV.2). Les conductivités thermiques des grains solides de la matrice constituant le composé en fonction de la teneur en bois sont données par le **Tableau IV.4**.

**Tableau IV.4** : Conductivité des grains solides de la matrice

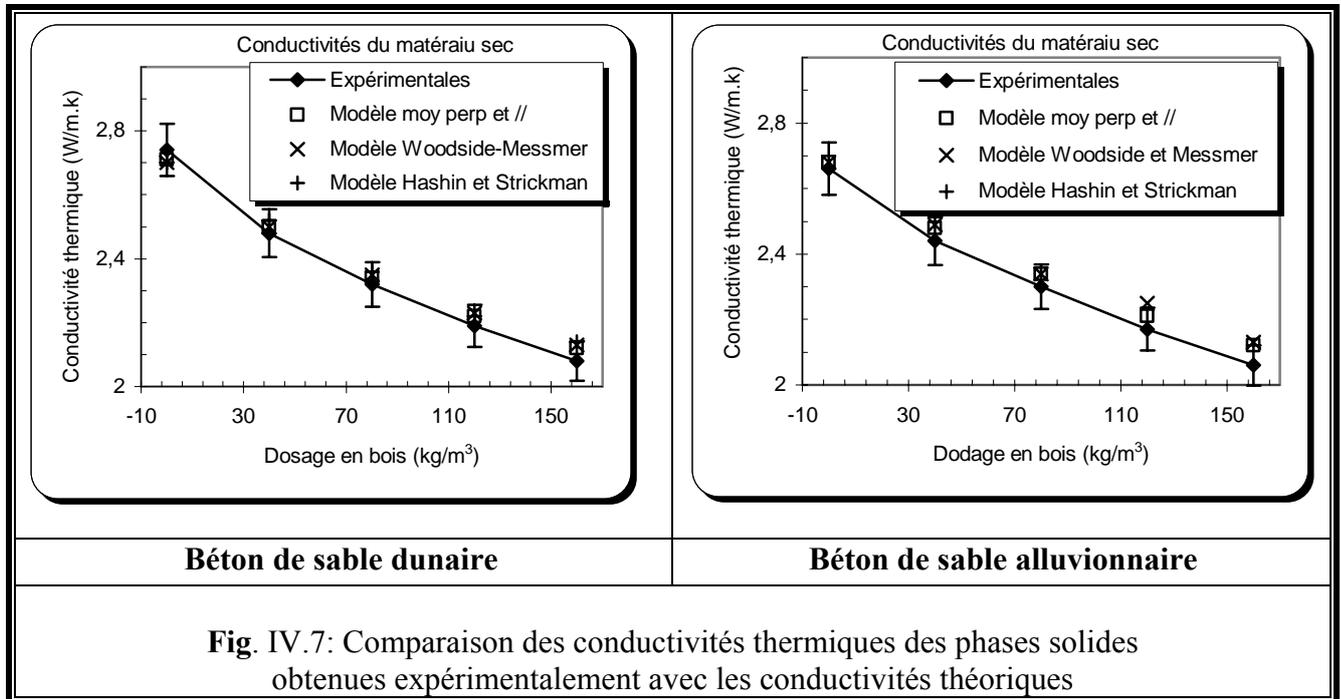
B (kg/m <sup>3</sup> )	Matrice (SD)	Matrice (SA)
	(W/m.k)	(W/m.k)
0	2.70	2.66
40	2.48	2.44
80	2.32	2.30
120	2.19	2.17
160	2.08	2.06

Pour valider ces valeurs, quelques modèles ont été appliqués et confrontés aux résultats expérimentaux obtenus. Pour cela, il était nécessaire de déterminer, par la même technique décrite ci-dessus, les conductivités thermiques des grains solides des constituants de la matrice (**tableau IV.5**).

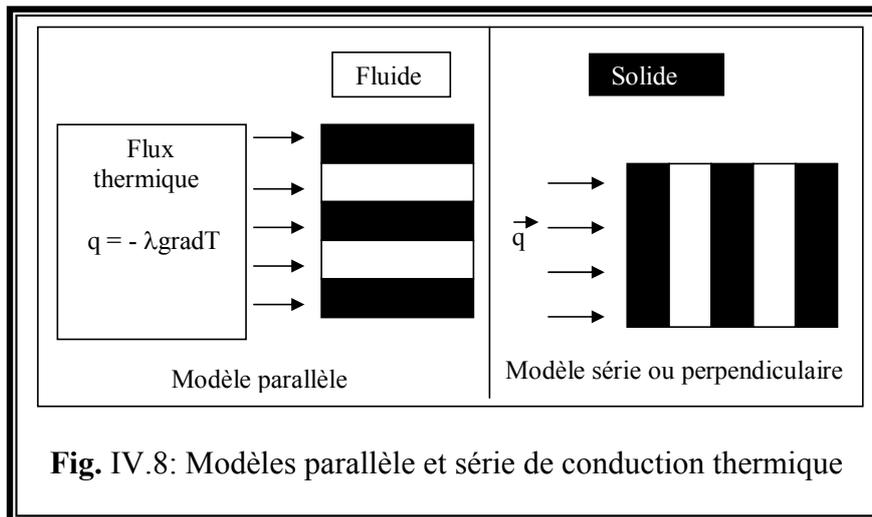
**Tableau IV.5** : Conductivité des grains solides des différents constituants de la matrice

Constituants	Pâte de ciment hydratée	Fillers	Sable de dune	Sable alluvionnaire	Bois
$\lambda_s$ (W/m.k)	2.85	2.60	2.65	2.62	1.15

Les courbes de la **figure IV.7** mettent bien en évidence la bonne concordance des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par les modèles : **parallèle**, **série**, **Woodside-Messmer** et **Hashinn-Strickman**.



♣ Le **modèle parallèle** et le **modèle série** (**figure IV.8**) sont donnés par les relations suivantes :



$$\lambda_s = \sum \theta_i \lambda_i \quad (\text{modèle parallèle}) \quad (\text{IV.3})$$

$$\lambda_s = \left[ \sum_{i=1}^n \theta_i / \lambda_i \right]^{-1} \quad (\text{modèle série}) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$\lambda_s$  : la conductivité thermique de la phase solide,

$\lambda_i$  : la conductivité thermique de la phase  $i$ ,

$\theta_i$  : la fraction volumique de la phase  $i$ .

♣ Le modèle géométrique proposé par **Woodside & Messmer** s'écrit :

$$\lambda_s = \prod_{i=1}^n \lambda_i^{\theta_i} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$\lambda_i$  : la conductivité thermique de la phase  $i$ ,

$\theta_i$  : la fraction volumique de la phase  $i$ .

♣ Le modèle proposé par **Hashin et Strickman** s'écrit ;

$$A_{\text{sup}} = \lambda_{\text{max}} + \frac{A_{\text{max}}}{1 - \alpha_{\text{max}}} \quad \text{et} \quad A_{\text{inf}} = \lambda_{\text{inf}} + \frac{A_{\text{inf}}}{1 - \alpha_{\text{inf}}} \quad (\text{IV.6})$$

Avec

$$\lambda_{\text{max}} = \max(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \quad \text{et} \quad \lambda_{\text{min}} = \min(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \quad (\text{IV.7})$$

où  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  : sont les conductivités thermiques des différentes phases  $i$  et  $A_{\text{max}}$ ,  $A_{\text{min}}$ ,  $\alpha_{\text{max}}$  et  $\alpha_{\text{min}}$  sont des constantes.

$$\alpha_{\text{max}} = (3\lambda_{\text{max}})^{-1} \quad \text{et} \quad \alpha_{\text{min}} = (3\lambda_{\text{min}})^{-1} \quad (\text{IV.8})$$

$$A_{\text{max}} = \sum_i \mathcal{G}_i \left[ (\lambda_i - \lambda_{\text{max}})^{-1} + \alpha_{\text{max}} \right]^{-1} \quad (\text{IV.9})$$

( $k_i \neq k_{\text{max}}$ )

$$A_{\text{min}} = \sum_i \mathcal{G}_i \left[ (\lambda_i - \lambda_{\text{min}})^{-1} + \alpha_{\text{min}} \right]^{-1} \quad (\text{IV.10})$$

( $k_i \neq k_{\text{min}}$ )

#### IV.1.2.4. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EFFECTIVE

Dans le **chapitre I** (§ I.7.2), nous avons évoqué les principaux modèles utilisés, dans les différents domaines, pour l'estimation des conductivités thermiques effectives des milieux poreux n'échangeant la chaleur que par conduction. Nous tenterons, dans ce chapitre, d'appliquer quelques modèles qui sont susceptibles de convenir aux composites béton de sable à base de copeaux de bois.

Vu que les échantillons sont fabriqués en Algérie avec des matériaux locaux et les mesures des paramètres thermiques sont faites au laboratoire « LT.I » d'Amiens (France) dans le cadre

des stages de courte durée, et vu le problème de transport des échantillons, nous n'avons considéré dans cette étude que les états extrêmes, sec et saturé, sans prendre en compte les cas de saturation partielle qui nécessitent un temps plus long. Les modèles sont, donc, choisis et appliqués pour ces deux cas seulement.

#### IV.2.4.1. CAS OU LE MATERIAU EST SUPPOSE BIPHASIQUE

##### A- MODELE DE ASSAAD (1955)

C'est un modèle similaire au modèle de la moyenne géométrique, semblable à celui proposé par *Woodside* et *Messmer*. La relation donnant la conductivité thermique effective est de la forme :

$$\lambda_{eff} = \lambda_s^{(1-m)} \lambda_f^m \quad (IV.11)$$

où

$m = c\varepsilon$  et  $\varepsilon$  est la porosité totale,

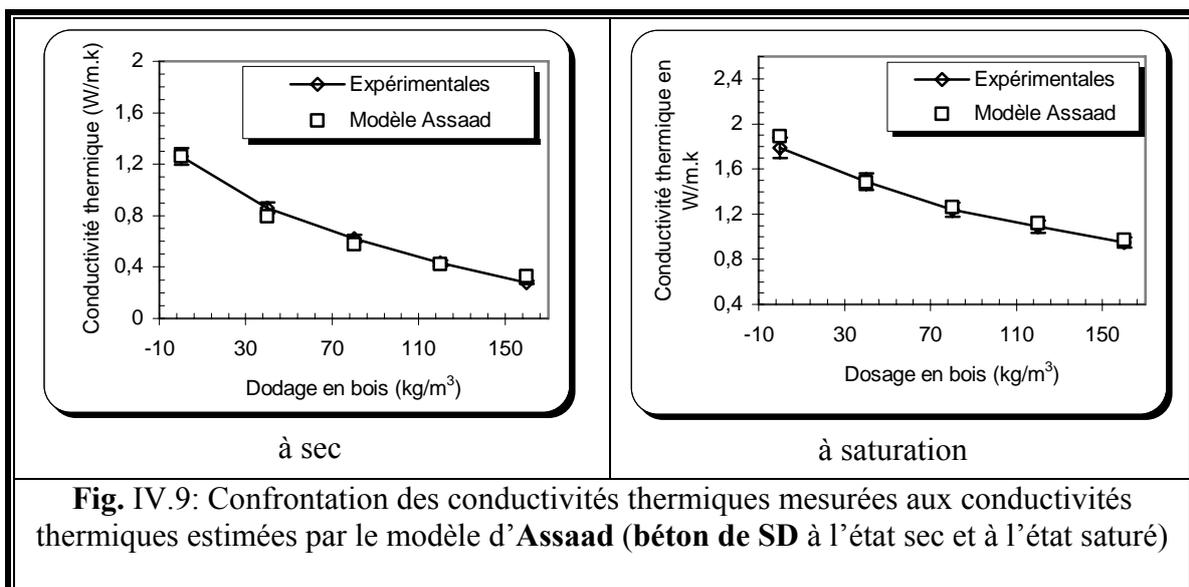
$c$  est un coefficient de correction proche de 1, et peut être obtenu par régression linéaire sur les valeurs expérimentales.

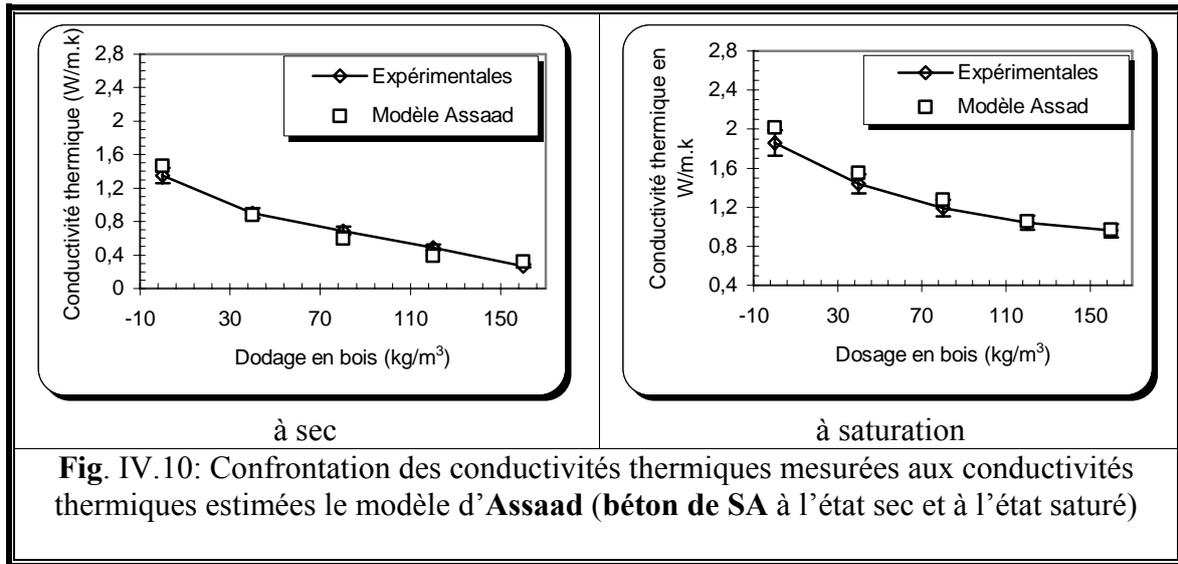
Ce modèle a été appliqué pour estimer les conductivités thermiques des deux composites étudiés, à l'état sec et l'état saturé et pour différentes proportions de copeaux de bois. Les valeurs obtenues ont été comparées à celles obtenues expérimentalement.

Les valeurs de  $c$  qui, pour notre composite, donnent une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et celles du modèle sont de l'ordre de 0.85 dans le cas du matériau sec et de 1.2 dans le cas du matériau saturé.

Les **figures** IV.9 et IV.10, présentant la confrontation des résultats expérimentaux aux résultats obtenus avec ce modèle, permettent de confirmer les résultats expérimentaux obtenus pour les deux bétons de sables étudiés. L'écart ne dépasse pas 5 % dans le cas du béton de sable dunaire et 7 % dans le cas du béton de sable alluvionnaire.

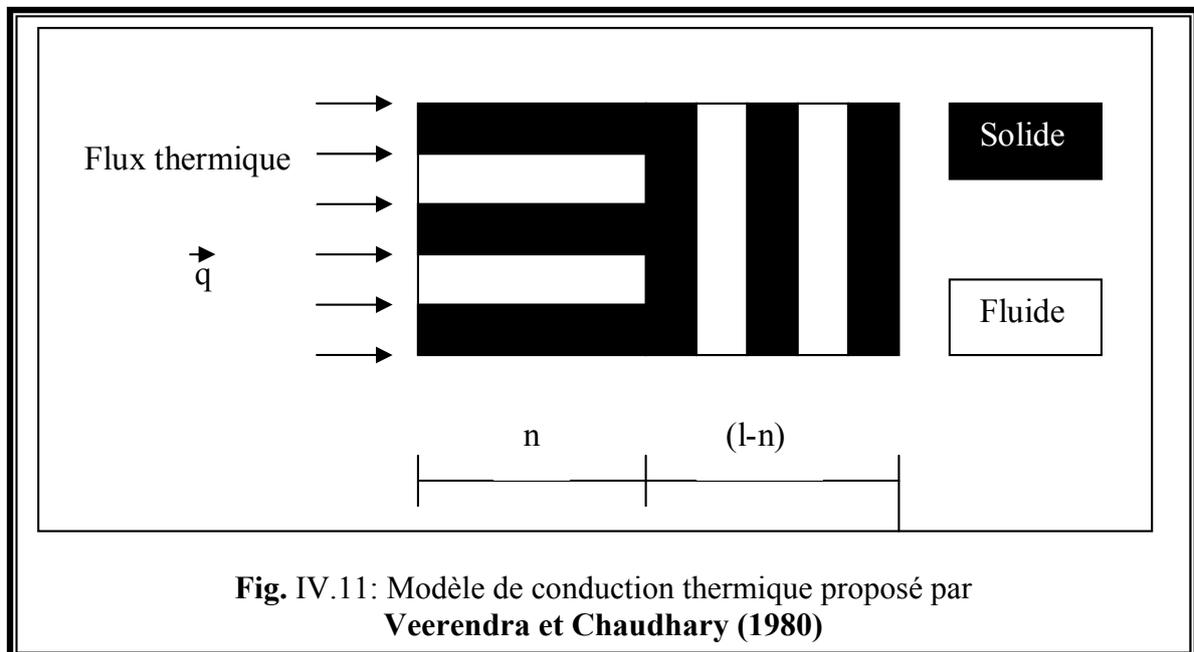
En fait, nous pouvons dire que le modèle d'**Asaad** a permis de donner une bonne approximation des conductivités thermiques effectives de nos deux composites.





**B- MODELE DE VEERENDRA ET CHAUDHARY (1980)**

Ces auteurs estiment que la moyenne géométrique ne permet pas une bonne prédiction de la conductivité thermique effective d'un milieu poreux bi-phasique. Cependant, ils ont essayé de généraliser ce modèle à une stratification des deux phases. En effet, dans un éléments de volume unitaire, on suppose qu'une fraction « n » du système stratifié est orientée parallèlement à la direction du flux thermique et la fraction « (1-n) » orientée perpendiculairement à la direction du flux (**figure IV.11**)



Les relations donnant la conductivité thermique effective proposées par **Veerendra et Chaudhary (1980)** sont :

♣ 1<sup>er</sup> Cas :  $\lambda_f > \lambda_s$

Limite inférieure  $\lambda_L = \lambda_S e^{\alpha \varepsilon_0}$  (IV.12)

Limite supérieure  $\lambda_H = \lambda_f e^{-\alpha (1 - \varepsilon_0)}$  (IV.13)

$$\alpha = 1 - \frac{\lambda_f}{\lambda_s}$$

♣ 2<sup>er</sup> Cas :  $\lambda_S > \lambda_f$  (cas de nos matériaux)

Limite inférieure  $\lambda_H = \lambda_S e^{\beta \varepsilon_0}$  (IV.14)

Limite supérieure  $\lambda_L = \lambda_f e^{-\beta (1 - \varepsilon_0)}$  (IV.15)

$$\beta = \frac{\lambda_f}{\lambda_s} - 1$$

$$\lambda_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon_0) \lambda_H + \varepsilon_0 \lambda_L \pm \varepsilon_0 (1 - \varepsilon_0) \sqrt{\lambda_L \lambda_H}$$
 (IV.16)

Ce modèle s'adapte bien aux milieux granulaires ou pulvérulents, mais, pour les matériaux consolidés, tels que les bétons, il donne des résultats non satisfaisants. Ceci a conduit **Goual** (2001) à introduire un terme correctif ( $\Psi(\lambda_S/\lambda_f)$ ) qui tient compte de l'état de consolidation

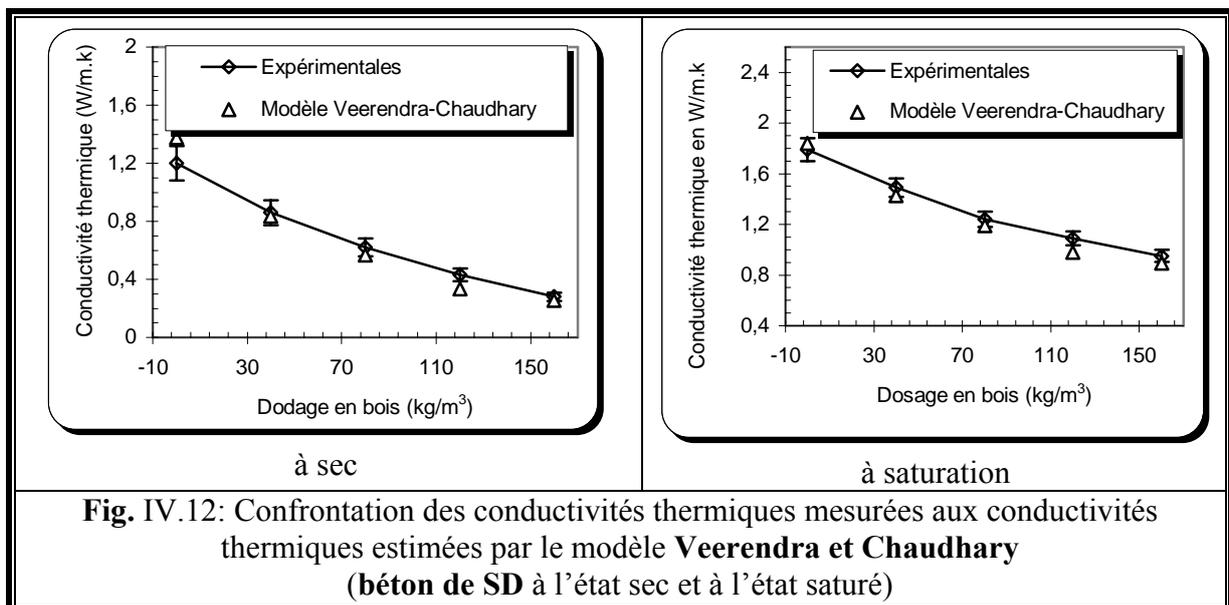
du matériau et du rapport ( $\frac{\lambda_S}{\lambda_f}$ ). La formule devient alors :

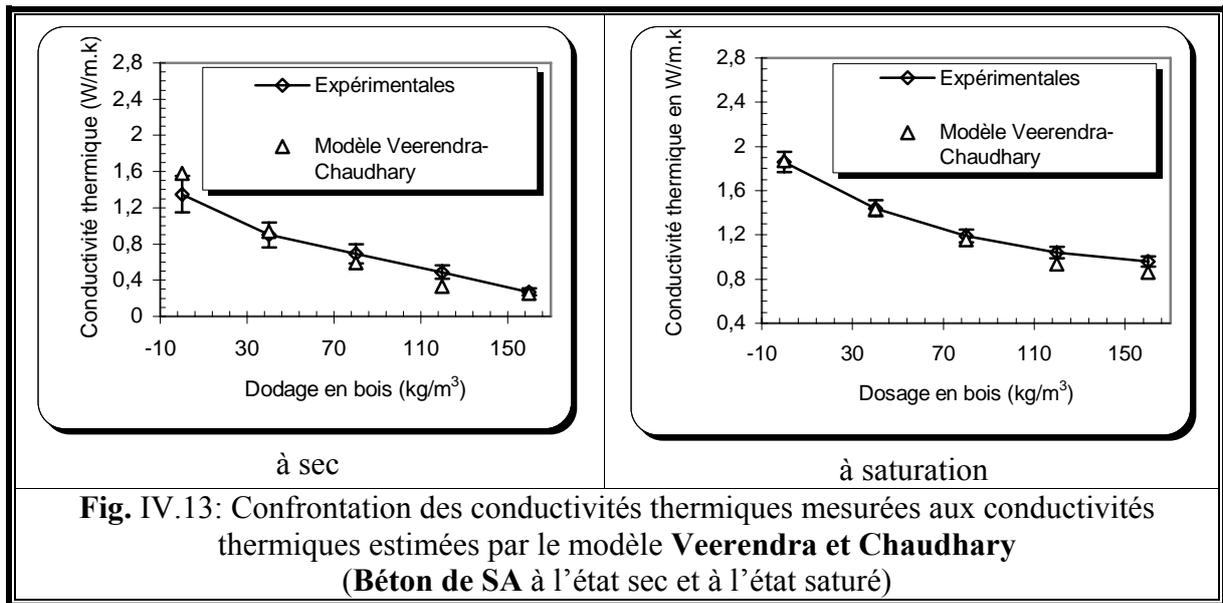
$$\lambda_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon_0) \lambda_H + \varepsilon_0 \lambda_L - \Psi(\lambda_S/\lambda_f) \varepsilon_0 (1 - \varepsilon_0) \sqrt{\lambda_L \lambda_H}$$
 (IV.17)

où  $\Psi$  est un facteur déterminé par régression sur les points expérimentaux. Pour les bétons cellulaires argileux, sa valeur est de l'ordre de 0.92 [**Goual** (2001)]. Dans notre cas, où les composites étudiés sont composés de deux solides de morphologies très différentes (le béton de sable et le bois), le terme correctif est légèrement différent et Il a été trouvé comme suit:

$$\Psi \cdot (\lambda_S / \lambda_f)^{1.45} \quad (\text{matériau sec}) \quad \text{et} \quad \Psi \cdot (\lambda_S / \lambda_f)^{1.01} \quad (\text{matériau saturé}) \quad \text{avec } \Psi = 1$$

La confrontation des résultats expérimentaux à ceux obtenus avec ce modèle est montrée sur les **figures** IV.12 et IV.13.





Il est clair, qu'à l'état saturé, et quelle que soit la teneur en bois, l'approximation est meilleure, pour les deux composites étudiés. Alors que, dans le cas sec, l'approximation n'est bonne que pour de faibles ou fortes teneurs en bois ( $B = 40$  à  $80 \text{ kg/m}^3$  ou  $B > 100 \text{ kg/m}^3$ ). A des teneurs intermédiaires, l'écart atteint parfois 15-20 %.

### C- MODELE DE PANDE ET CHAUDHARY (1984b)

Ce modèle est venu après un premier modèle (1984a) basé sur la théorie du milieu continu effectif qui a été proposé par **Pande et Chaudhary** (1984a) et qui ne permet d'estimer la conductivité thermique effective que pour des matériaux pulvérulents ayant des porosités variant entre (0 à 0.40) et (0.60 à 1). Ce deuxième modèle avait donc pour but d'estimer la conductivité thermique pour des matériaux pulvérulents et granulaires composés de deux phases et ayant des porosités comprises entre 0.30 et 0.70. Les expressions proposées sont :

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.6132(\lambda_s \lambda_f)^{1/2} (1 - 1.545 \xi_f^{2/3}) \quad \text{pour } \xi_f > 0 \quad (\text{IV.18})$$

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.6132(\lambda_s \lambda_f)^{1/2} (1 + 3.844 \xi_s^{2/3}) \quad \text{pour } \xi_s > 0 \quad (\text{IV.19})$$

où

$$\xi_s = 0.5 - \varepsilon_0 \quad \text{et} \quad \xi_f = \varepsilon_0 - 0.5$$

$\varepsilon_0$  : la porosité du matériau.

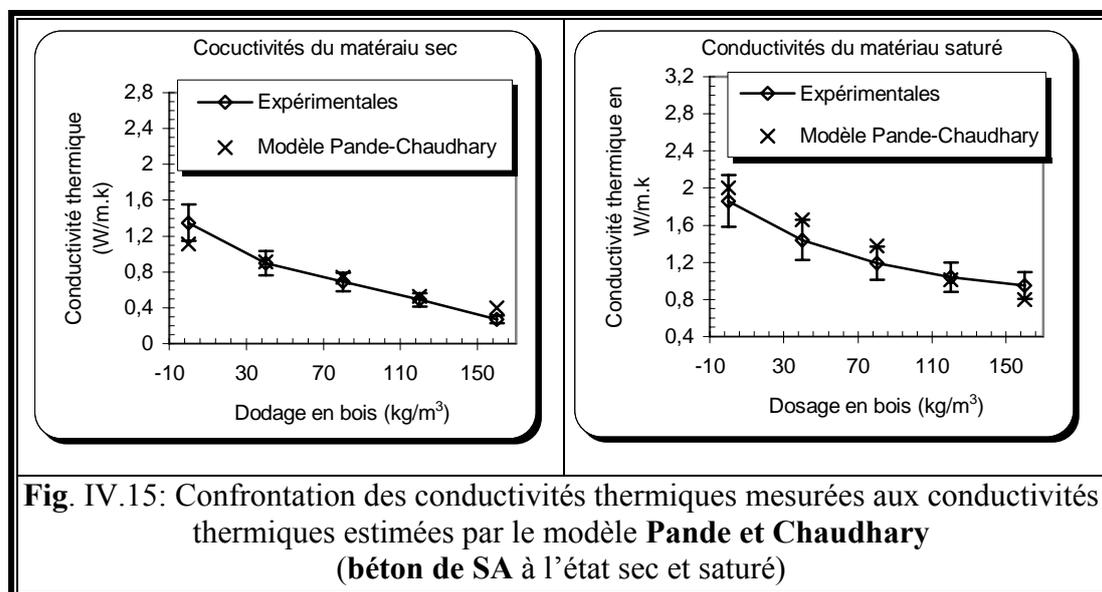
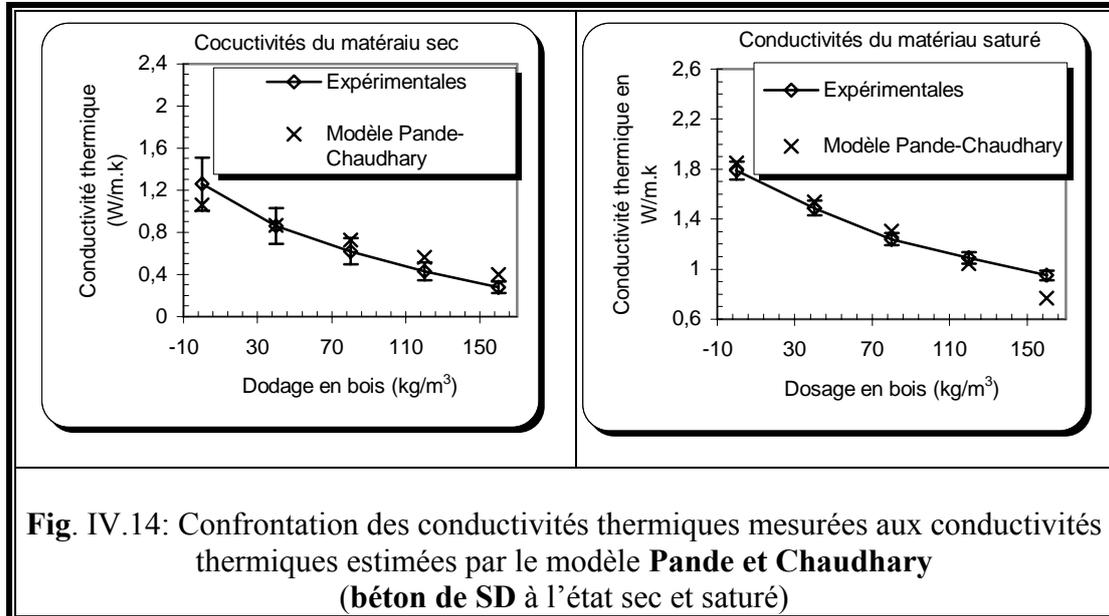
Pour étendre le modèle aux matériaux consolidés tels que les bétons, un facteur correctif «  $\psi$  », qui tient compte de la compacité de la matrice solide, est introduit dans les relations de ce modèle (bétons argileux) :

$$\lambda_{\text{eff}} = \psi \cdot 0.6132(\lambda_s \lambda_f)^{1/2} (1 - 1.545 \xi_f^{2/3}) \quad \text{pour } \xi_f > 0 \quad (\text{IV.20})$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \psi \cdot 0.6132(\lambda_s \lambda_f)^{1/2} (1 + 3.844 \xi_s^{2/3}) \quad \text{pour } \xi_s > 0 \quad (\text{IV.21})$$

Pour notre matériau, qui est constitué de béton de sable avec inclusions en bois, la valeur de  $\Psi$  a été estimée par régression sur les points expérimentaux et elle est de l'ordre de **2.45** pour le cas du matériau sec et de **1.01** pour le cas du matériau saturé.

Les résultats obtenus par ce modèle sont confrontés aux résultats expérimentaux à l'aide des **figures. IV.14 et IV.15**.



Pour le béton de SD, et à part le dosage le plus élevé ( $B = 160 \text{ kg/m}^3$ ), le modèle **Pande et Chaudhary** donne une très bonne approximation dans le cas du matériau saturé. Les écarts dans ce cas ne dépassent pas 4 %. Cependant dans le cas du matériau sec, l'approximation n'est bonne qu'à des teneurs en bois relativement faibles ou très élevées (l'écart est moins de 10 %). Pour des dosages allant de 70 à 130  $\text{kg/m}^3$  environ, l'écart atteint parfois 20 %. Pour le béton de SA, l'approximation est relativement bonne et l'écart est en général moins de 15 %.

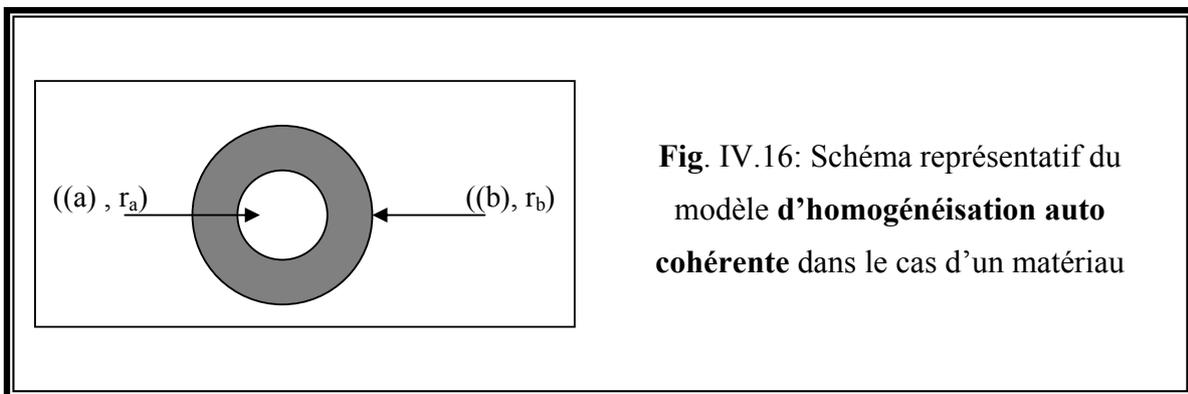
#### D- MODELE D'HOMOGENEISATION AUTO-COHERENTE

##### Approche théorique :

La modélisation par homogénéisation auto-cohérente permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance de la conductivité de chaque constituant et de leurs proportions. Cette méthode, initialement développée pour la caractérisation mécanique (élasticité et élastoplasticité) de milieux hétérogènes, a été utilisée par **Arnaud L.**, (2000) sur du chanvre en vrac, des bétons de chanvre et des laines de chanvre. Elle a été également utilisée par **Dupré B.** (2004) sur des bétons ligno-cellulosiques. Elle est basée sur une condition énergétique : l'énergie contenue dans le matériau hétérogène est égale à celle du milieu homogène équivalent soumis aux mêmes conditions aux limites. Le milieu homogène est assimilé à un assemblage d'inclusions composites sphériques de tailles variables. On considère une hétérogénéité au sein du milieu homogène recherché.

Le milieu hétérogène pourra être constitué soit de deux composants soit de trois composants.

Dans le cas d'un matériau hétérogène constitué de deux composants, on étudie le matériau homogène équivalent dont la conductivité thermique effective ' $\lambda_{\text{eff}}$ '. Le matériau est supposé constitué : d'une sphère de rayon  $r_a$  représentant le constituant 'a' de conductivité thermique ' $\lambda_a$ ', elle même entourée d'une coquille concentrique de rayon externe  $r_b$  représentant le constituant 'b' de conductivité thermique ' $\lambda_b$ ' (**Fig. IV.16**). Soit  $\omega$  la proportion volumique de la phase interne 'a' par rapport à la sphère complète (a+b) définie par  $\omega = (r_a/r_b)^3$ .



**Fig. IV.16:** Schéma représentatif du modèle d'homogénéisation auto-cohérente dans le cas d'un matériau

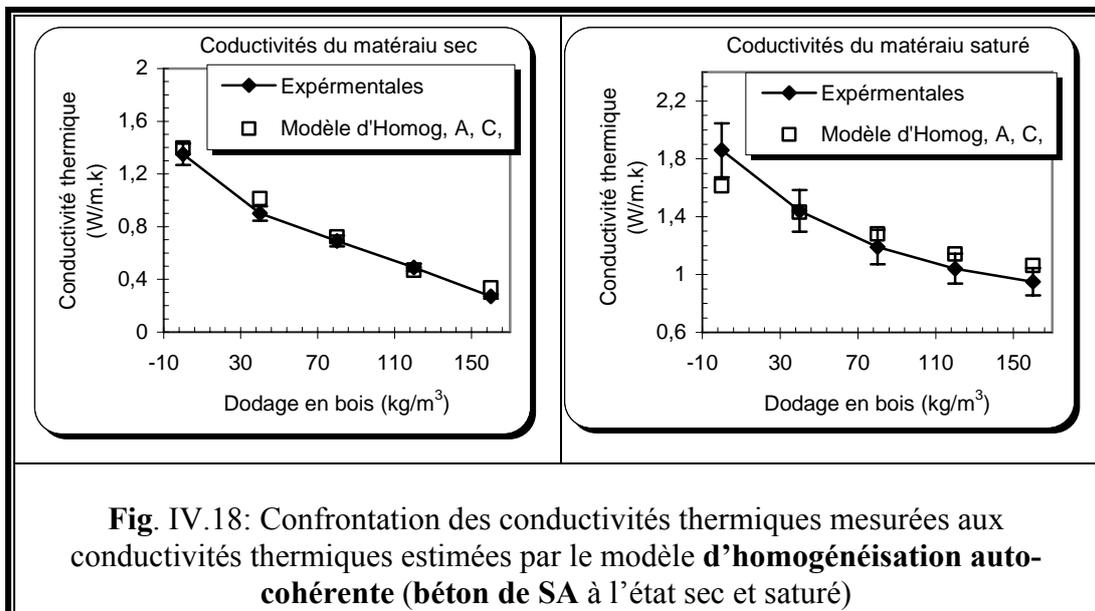
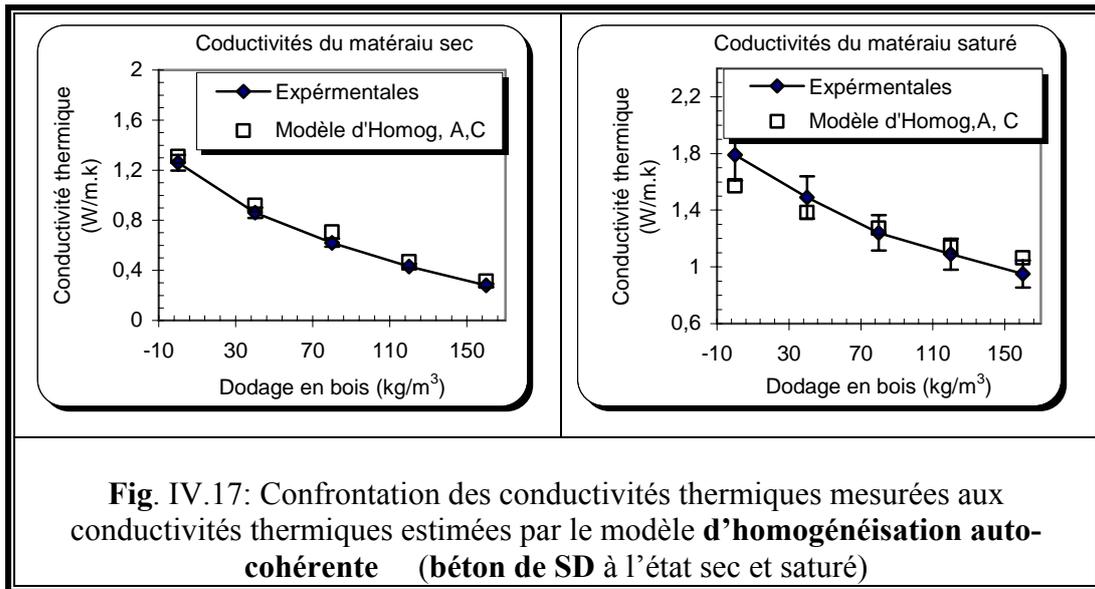
Pour l'estimation de la conductivité thermique, le modèle propose la relation suivante :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_s \left[ 1 + \frac{\omega}{\left( \frac{1-\omega}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{\lambda_b - 1}} \right)} \right] \quad (\text{IV.22})$$

Les rapports des rayons au cube sont calculés par les rapports volumiques des sphères. Un facteur correctif constant ( $\Psi$ ), déterminé par régression sur les points expérimentaux, a été introduit pour adapter le modèle à notre matériau. Sa valeur est  $\Psi = 0.65$ .

$$\lambda_{\text{eff}} = \Psi \cdot \lambda_s \left[ 1 + \frac{\omega}{\left( \frac{1-\omega}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{\lambda_b-1}} \right)} \right] \quad (\text{IV.23})$$

Les **figures** IV.17 et IV.18 permettent d'établir une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus avec ce modèle.

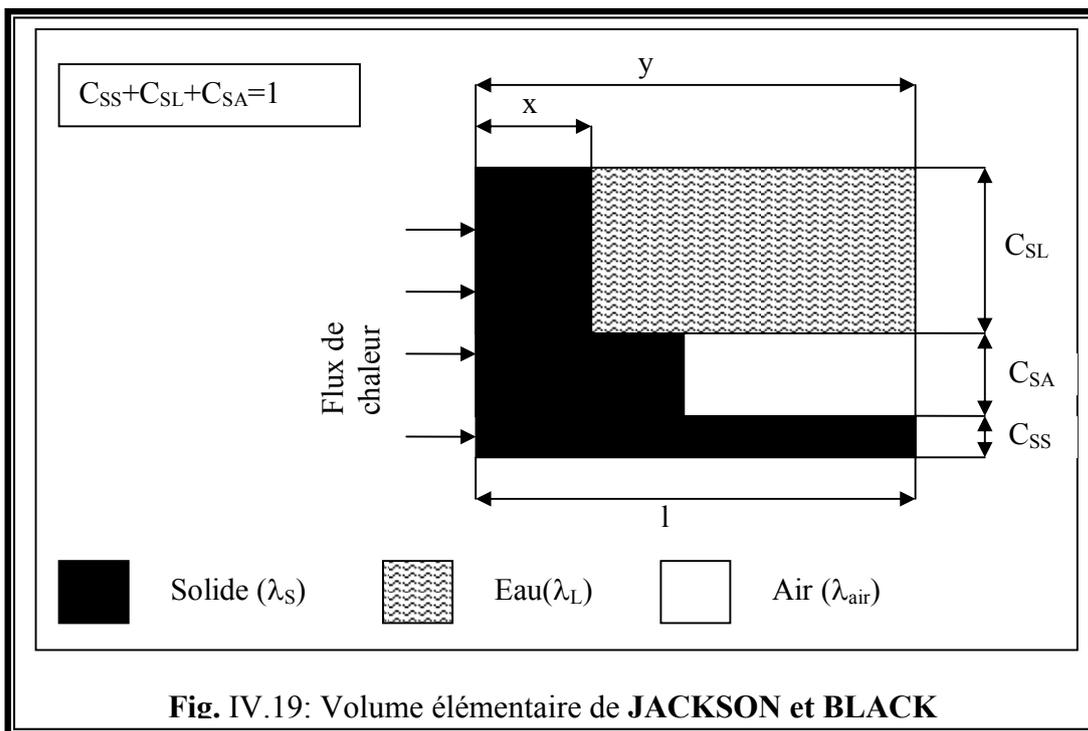


Il est à noter que les valeurs obtenues expérimentalement concordent bien avec les valeurs obtenues avec le modèle **d'homogénéisation auto-cohérente**. Pour les deux bétons de sables étudiés, quelque soit la teneur en copeaux de bois et dans les deux cas, sec ou saturé, l'écart n'excède pas 10 %. L'approximation est meilleure à l'état sec.

#### IV.1.2.4.2. CAS OU LE MATERIAU EST SUPPOSE TRIPHASIQUE

##### A- MODELE PROPOSE PAR JACKSON ET BLACK

Le modèle proposé par Jackson et Black [Bouguerra A., (1997) ; Laurent J.P. ; (1991), Jackson W.K. et al., (1983)] est aussi un modèle parallèle mais avec une approche différente de celui de *J.P.Laurent*. En effet, il est basé sur le concept topologique de la contiguïté. Il ne tient pas compte de la taille des pores (micro et macro porosité) et il privilégie la conduction dans la phase solide. Le paramètre topologique « contiguïté » est utilisé pour relier quantitativement la conductivité effective macroscopique à la surface de contact microscopique entre les différentes phases. Le volume élémentaire correspondant est schématisé sur la **figure IV.19**.



Il est constitué de trois conductances en parallèle : du solide en contact avec du solide, du solide en contact avec de l'eau et du solide en contact avec de l'air. Les fractions relatives de ces trois conductances sont appelées contiguïtés et sont respectivement notées  $C_{SS}$ ,  $C_{SL}$  et  $C_{SA}$ . La combinaison de la conductivité thermique individuelle de chaque phase, présentée sur la **figure IV.19**, permet d'avoir l'expression générale suivante :

$$C_{SS} + C_{SL} + C_{SA} = 1 \quad (IV.24)$$

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_S} = C_{SS} + \frac{C_{SL}^2}{C_{SL} - \theta_L + \frac{\lambda_S \theta_L}{\lambda_{eau} - \lambda_S}} + \frac{C_{SA}^2}{C_{SA} - \theta_{air} + \frac{\lambda_S \theta_{air}}{\lambda_{air}}} \quad (IV.25)$$

avec :

- $C_{SS}$  la contiguïté solide-solide
- $C_{SL}$  la contiguïté solide-liquide
- $C_{SA}$  la contiguïté solide-air.

$\lambda_{eff}$  la conductivité thermique effective

$\lambda_S$  la conductivité thermique de la phase solide

$\lambda_L$  : conductivité thermique de la phase liquide égale à  $0.569 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

$\lambda_{air}$  : conductivité thermique de l'air égale à  $0.0243 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

$\theta_L$  : proportion volumique de la phase liquide

$\theta_{air}$  : proportion volumique de la phase gazeuse (air).

Lorsque le matériau est sec, il est évident que  $C_{SL}$  est nulle et les expressions (IV.24) et (IV.25) se réduisent à :

$$C_{ss} + C_{sa} = 1 \tag{IV.26}$$

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_S} = C_{SS} + \frac{C_{SA}^2}{C_{SA} - \theta_{air} + \frac{\lambda_S \theta_{air}}{\lambda_{air}}} \tag{IV.27}$$

A l'état sec, la conduction se faisant prioritairement dans la phase solide, on peut négliger la contiguïté solide-air  $C_{SA}$ . L'expression de la contiguïté solide-solide  $C_{SS}$  peut être obtenue à partir de la **relation** (IV.27) :

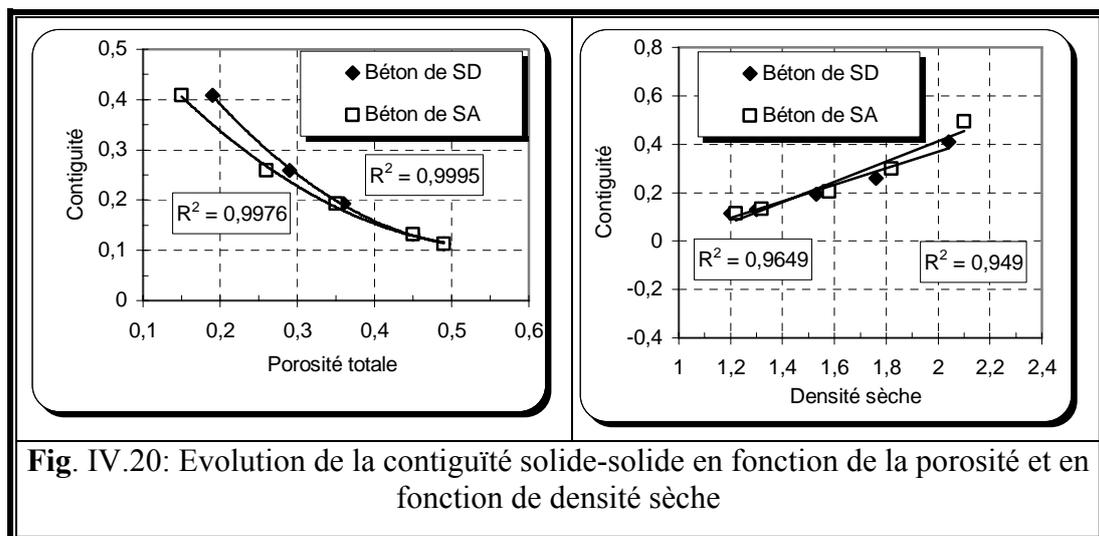
$$C_{SS} = \left[ \frac{\frac{\lambda_{air} - \lambda_{sec}}{\lambda_S} \left( \varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{\lambda_{air}}{\lambda_S} \right)}{\frac{\lambda_{sec}}{\lambda_S} \left( 1 + \varepsilon - \frac{\lambda_{sec}}{\lambda_S} \right) - \varepsilon} \right] \approx \frac{\lambda_{sec}}{\lambda_S} \tag{IV.28}$$

Avec :

$\varepsilon$  : la porosité totale

$\lambda_{sec}$  : la conductivité thermique du solide

La **figure** IV.20 montre l'évolution de la contiguïté solide/solide respectivement en fonction de la porosité et de la densité sèche.



**Fig. IV.20:** Evolution de la contiguïté solide-solide en fonction de la porosité et en fonction de densité sèche

En effet, la présentation de la contiguïté solide-solide en fonction de la porosité montre une bonne corrélation entre la proportion de contacts entre les grains solides et la porosité totale. La relation entre ces deux paramètres est de type exponentiel.

Cependant, pour l'évolution de la contiguïté solide-solide en fonction des densités sèches (**figure IV.20**), la relation qui donne la meilleure corrélation est de type linéaire. Cette loi, déjà mise en évidence sur différents types de matériaux par **Laurent J.** (1991 et 1995), **Bouguerra A.** (1997) et **Marmoret L.** (1998).

Lorsque le matériau est saturé, les expressions (IV.25) et (IV.26) se réduisent à :

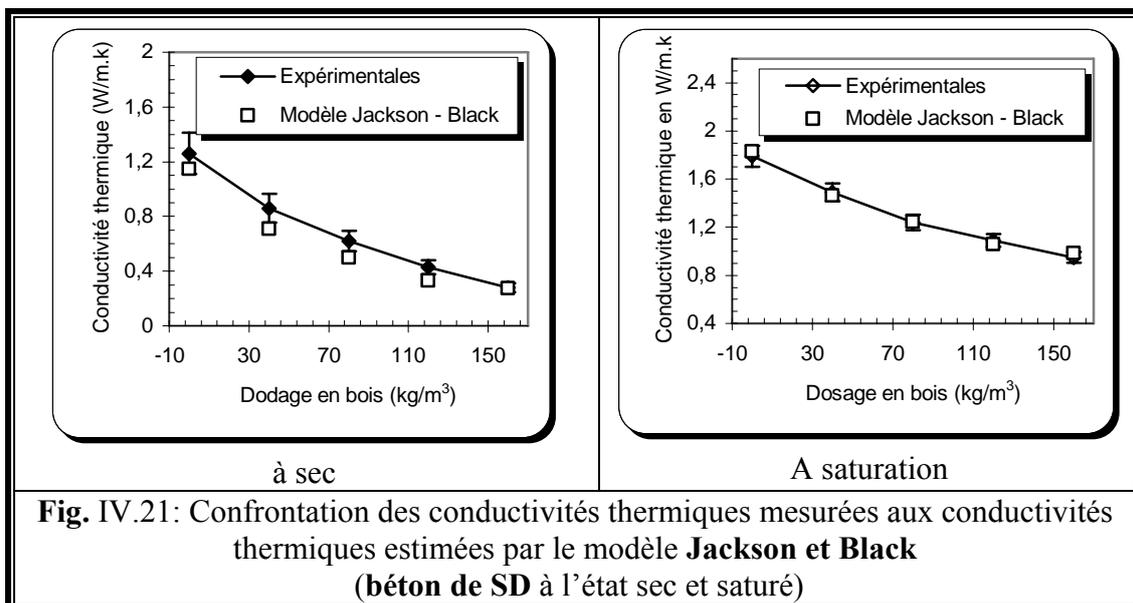
$$C_{SS} + C_{SL} = 1 \quad (IV.29)$$

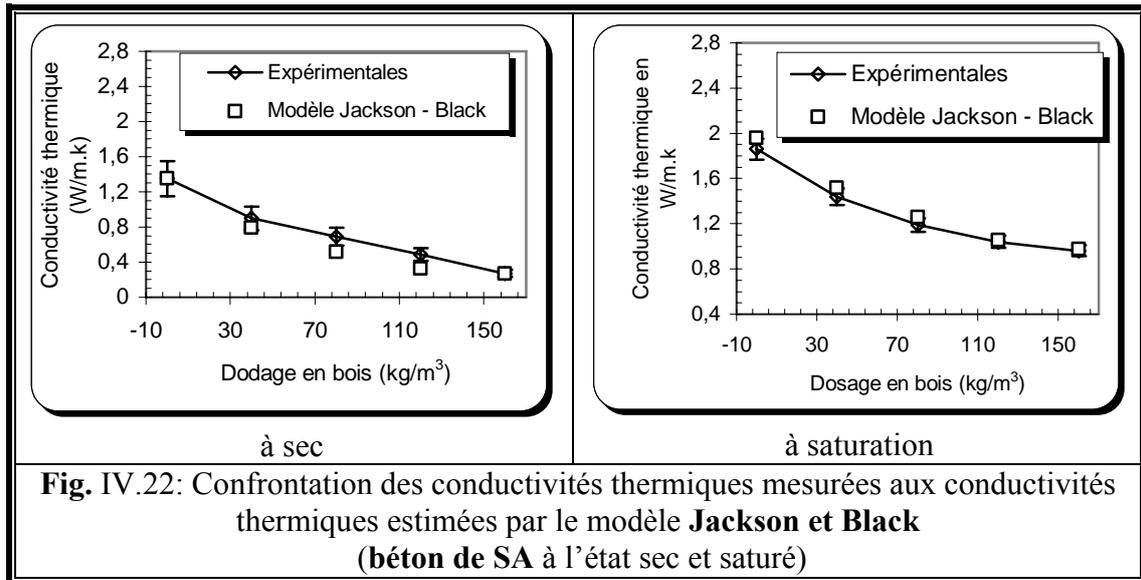
$$\frac{\lambda_{eff}(sat)}{\lambda_s} = C_{SS} + \frac{C_{SL}^2}{C_{SL} - \varepsilon_L + \frac{\lambda_s \varepsilon_L}{\lambda_s - \lambda_L}} \quad (IV.30)$$

Les conductivités thermiques effectives ont été calculées, pour les différentes compositions étudiées, en fonction des contiguïtés solide-solide et solide-fluide ou solide-air et comparées à celles obtenues expérimentalement. Les courbes présentées aux la **figures IV.21** et III.22 montrent la bonne concordance entre les deux résultats, expérimentaux et théoriques.

La comparaison des deux résultats (**figure IV.21** et IV.22), permet également de conclure que l'évolution des conductivités thermiques effectives en fonction de la teneur en copeaux de bois est similaire et les résultats présentent une bonne concordance. Dans le cas saturé, la concordance est légèrement meilleure. En général, les écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques ne dépassent pas 5 – 15 %).

En fait, le modèle de **Jackson et Black** présente un double intérêt. En plus de la détermination des conductivités thermiques du composite étudié, le modèle présente l'avantage de comprendre la relation structure-conductivité thermique du matériau. La détermination des contiguïtés permet, donc, d'avoir une idée sur la relation entre la structure macroscopique du matériau et sa conductivité thermique.





Enfin, nous devons signaler, qu'en réalité, le modèle **Jackson et Black** est conçu pour étudier surtout les matériaux à saturation partielle, en considérant les contiguïtés solide-air et solide-fluide. La relation est en fait :

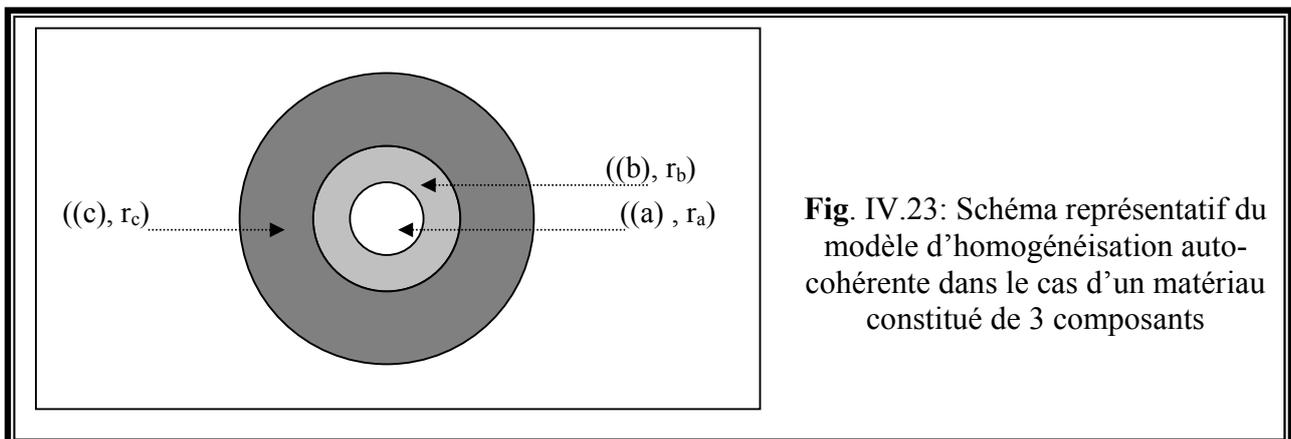
$$\frac{\lambda_{eff}(S)}{\lambda_s} = C_{ss}(\rho) + \frac{C_{SL}^2(S)}{C_{SL}(S) + S\varepsilon\left(\frac{\lambda_{SL}}{\lambda_s} - 1\right)} + \frac{C_{SA}^2(S)}{C_{SA}(S) + (1-S)\varepsilon\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{air}} - 1\right)} \quad (IV.31)$$

où S est le taux de saturation.

Comme il a été signalé auparavant, seuls les cas sec et saturés ont été envisagés dans le présent travail.

**B- MODELE D'HOMOGENEISATION AUTO-COHERENTE**

Le modèle d'**homogénéisation auto-cohérente** supposant le matériau composé de deux phases, appliqué précédemment, peut être étendu à un milieu constitué de trois composants a, b et c. Une coquille supplémentaire représentant la matrice solide 'c' de propriétés (r<sub>c</sub>, λ<sub>c</sub>) est ajoutée à la sphère de la **figure IV.23**.



La conductivité thermique équivalente est donnée par la relation :

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_s} = 1 + \frac{\omega}{\left[ \frac{1-\omega}{3} + \frac{1 + \delta \frac{(\lambda_a - 1)}{\lambda_b}}{\delta \frac{(\lambda_a - 1)}{\lambda_b} (\frac{2\lambda_a}{\lambda_b} + 1)} \right]} \quad (IV.32)$$

avec  $\omega = (r_b/r_c)^3$  ;  $\delta = 1 - (r_a/r_b)^3$  ;

On applique, donc, le modèle à inclusion composite à 3 composants, constitué d'une cavité sphérique d'air (vide inclus dans le composite, indice a,  $\lambda_a = 0.0243$  W/m.k), entourée par une coquille concentrique de bois solide (indice b,  $\lambda_b = 1.15$  W/m.K), elle même entourée par une coquille supplémentaire de béton solide (pâte de ciment hydraté +sable + filler) dont la conductivité thermique est :

- $\lambda_c = 2.70$  W/m.K pour le béton de sable dunaire
- et  $\lambda_c = 2.66$ W/m.K pour le béton de sable alluvionnaire.

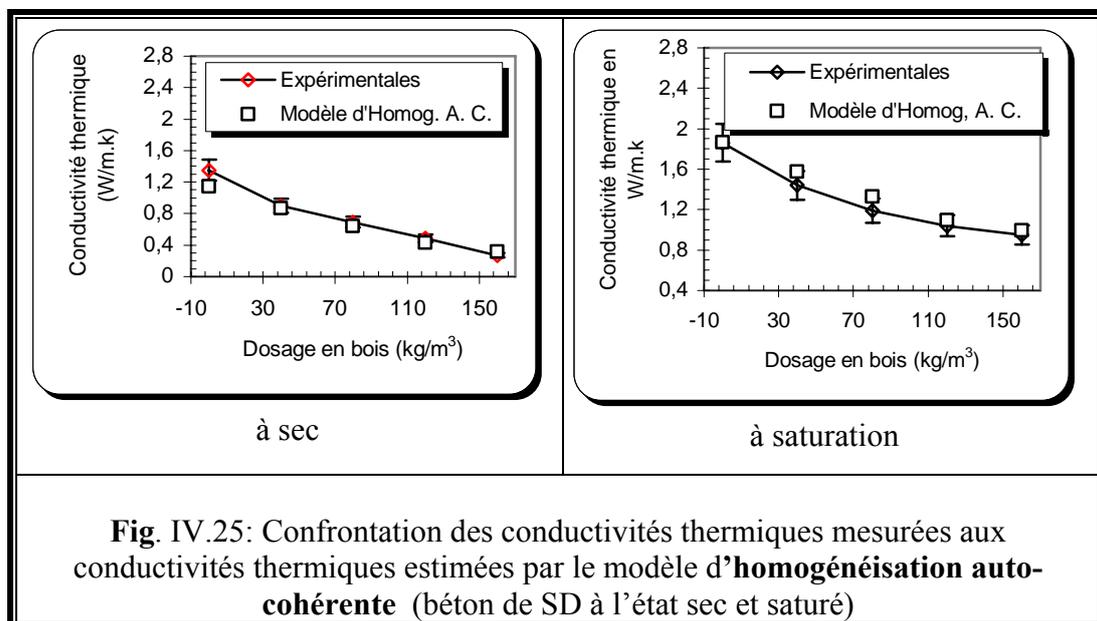
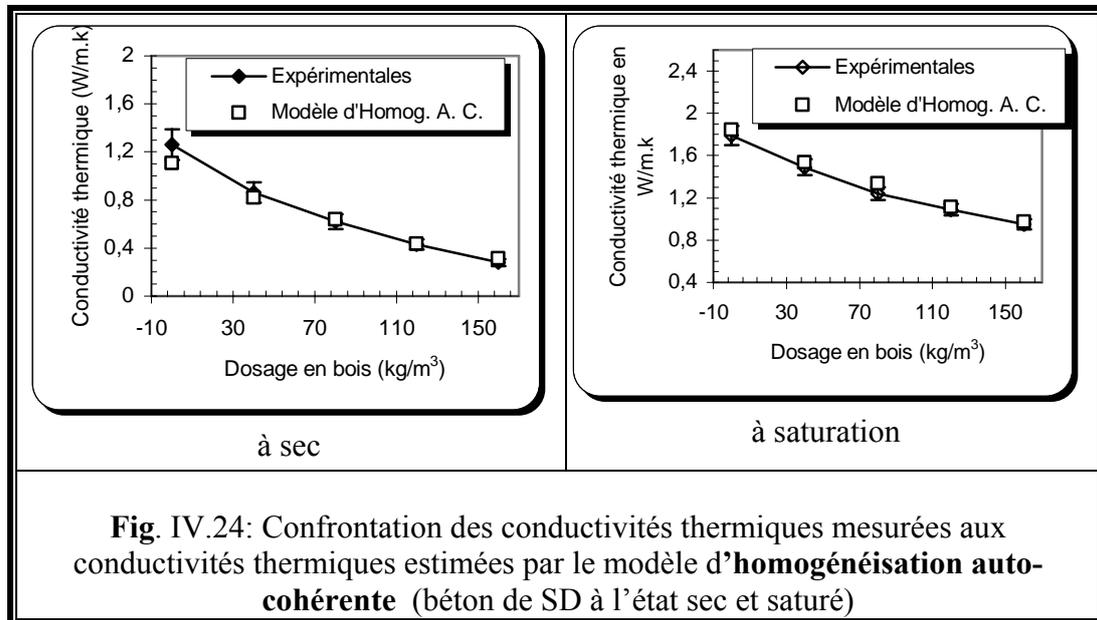
Pour adapter le modèle à notre composite qui se caractérise par une structure différente et une répartition aléatoire des différentes phases, un facteur correctif «  $\Psi$  » a été introduit dans la formule :

$$\lambda_{eff} = \psi \cdot \lambda_s \cdot \left[ 1 + \frac{\omega}{\left[ \frac{1-\omega}{3} + \frac{1 + \delta \frac{(\lambda_a - 1)}{\lambda_b}}{\delta \frac{(\lambda_a - 1)}{\lambda_b} (\frac{2\lambda_a}{\lambda_b} + 1)} \right]} \right] \quad (IV.33)$$

Le facteur  $\Psi$  est obtenu, comme pour tous les autres cas, par régression sur les points expérimentaux. Sa valeur est déterminée avec la relation suivante :

$$\Psi = (1 - \omega + \lambda_f)/2 \quad (IV.33)$$

Les résultats obtenus par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente [Bederina M., (2006)], pour les deux composites étudiés, sont donnés et confrontés aux résultats expérimentaux sur les **figures** IV.24 et IV.25.



Il est à noter que le modèle d'homogénéisation auto cohérente étendu à trois phases, donne presque les mêmes écarts obtenus dans le cas de deux phases. Les valeurs obtenues expérimentalement concordent avec les valeurs obtenues par le modèle. Pour toutes les compositions étudiées l'écart n'excède pas 10 %.

### IV.1.3. CONCLUSION

Dans cette partie d'étude, nous avons utilisé quelques modèles de différents types pour estimer, premièrement la résistance mécanique et deuxièmement la conductivité thermique des différentes compositions de béton de sable à base de copeaux bois. En ce qui concerne la résistance à la compression, la comparaison, des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques, a montré que les composites étudiés s'adaptent bien avec les relations données par chaque modèle. Le modèle le mieux adapté est bien le modèle **Bal'shin**.

Concernant la conductivité thermique, Il a été montré que les modèles choisis s'adaptent également avec les composites étudiés et l'erreur, dans la plupart des cas, n'atteint pas 10 % (et rarement 15-20 %). Le modèle qui s'adapte le mieux avec nos résultats expérimentaux est le modèle d'**Assaad** et le modèle **d'homogénéisation auto-cohérente** à trois composants.

Bien que les composites bétons de sable-bois aient une structure très complexe, l'application de ces modèles a ainsi permis de confirmer que les conductivités thermiques obtenues à partir de la technique TPS sont relativement représentatives et les écarts observés pourront être liés à l'idéalité de certains modèles d'une part, et aux spécificités du matériau étudié d'autre part. Cette concordance avec les résultats expérimentaux peut être améliorée en raffinant quelques paramètres dans les modèles proposés dans la littérature et qui ont fait l'objet de validation dans cette étude.

## IV.2. ETUDE DE LA DURABILITE

### IV.2.1. INTRODUCTION

La durabilité d'un béton, ç-à-d sa capacité de maintenir ses propriétés physiques, mécaniques et chimiques lorsqu'il est mis en service [**Bubani M.**, (2001)], est liée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. Aujourd'hui, la conception des bétons est basée, non seulement sur l'optimisation de leur résistance mécanique, mais aussi sur l'optimisation de leur durabilité [**Chao-Lung Hwang et al**, (2005)].

Les paramètres de premier ordre de la durabilité sont: la porosité, la perméabilité et l'organisation géométrique. Et puisque, d'une façon générale, les bétons légers sont plus poreux que les bétons ordinaires, l'étude de leur durabilité est indispensable. Notons que la porosité n'est pas toujours un inconvénient pour la durabilité, une distribution de pores particulière pourra contribuer positivement au bon comportement vis-à-vis des essais de durabilité [**Steopoe**, (1970); **Krenkler K.**, (1980) ; **Weigler H., Karl S.**, (1989)]. Mais, en général, un béton poreux ou fissuré, pose des problèmes de durabilité dans le cas où il est exposé à des attaques par des substances délétères environnantes.

Par ailleurs, la probabilité de la formation de fissures et de pores dans un béton est étroitement liée à la quantité de l'eau de gâchage, la quantité de ciment et le mode de conservation, ce qui rend nécessaire la limitation de la quantité de l'eau de gâchage et la réduction de la quantité de ciment afin d'assurer la bonne durabilité du matériau [**Mehta P.K.**, (1986 et 2001) ; **Neville A.** (2000) ; **Mather B.**, (2000); **Hwang C.L. et al**, (2002)].

En ce qui concerne les bétons de bois, cas particulier des bétons légers, des études ont été menées et ont montré que ces derniers présentent une bonne résistance au gel-dégel et une absorption d'eau par capillarité plus faible que les briques ou blocs de terre cuite [**Pimienta P et al**, (1994)]. Des études récentes ont été menées sur des composites à base de copeaux de bois [**Bouguerra A.**, (2002) ; **Pascales C. et al**, (2006)] et de différentes fibres naturelles

(chanvre [Siddique R., (2004)], cosses de riz [Jauberthie R. et al, (2003)] et d'autres fibres végétales [Savastano A., (2003)]) et ont montré la bonne durabilité de ces matériaux. Certains parmi eux sont actuellement utilisés dans des travaux d'isolation et d'enrobage.

Dans cette partie du présent travail, nous allons essayer de vérifier si c'est le même cas pour des bétons de sable à base de copeaux de bois. Pour cela, différentes compositions, pour chacun des deux bétons de sable, seront soumises à des essais de vieillissement accélérés pour voir le degré de dégradation qui en résulte. Les essais de durabilité envisagés sont la résistance au gel-dégel et la résistance au mouillage-séchage.

#### IV.2.2. ESSAI GEL - DEGEL

La cause principale des dégâts dus au gel dans le béton est l'effet d'éclatement provoqué par l'eau en train de geler dans les pores capillaires. En gelant, l'eau augmente de volume (plus de 9 %) et peut créer de fortes pressions et des tensions élevées dans le béton. Selon la résistance du béton, ces forces font l'objet d'une absorption élastique ou peuvent donner lieu à des affaiblissements dans la structure voire une destruction complète du béton. Plus le béton humide gèle rapidement et fréquemment, plus les effets dommageables sont importants, d'où la nécessité de l'étude du comportement des matériaux de construction vis à vis du gel-dégel.

Dans notre cas, cette étude a été faite selon la procédure décrite au **chapitre II** (§II.3.5.1). Afin de déterminer le taux de perte en résistance (**relation IV.34**) et le taux de perte en masse (**relation IV.35**), nous avons enregistré, pour toutes les compositions étudiées, les variations en masse et en résistance causées par les cycles gel-dégel.

$$\lambda_R^g = \frac{R_c^i - R_c^g}{R_c^i} \times 100 \quad (\text{IV.34})$$

Avec :

$R_c^i$  : la résistance initiale (avant l'essai gel – dégel),

$R_c^g$  : la résistance finale (après l'essai gel – dégel),

$\lambda_R^g$  : perte en résistance à la compression.

$$\tau_g = \frac{m_g^i - m_g^f}{m_g^i} \quad (\text{IV.35})$$

Avec :

$m_g^i$  : masse (initiale) de l'éprouvette avant l'essai gel – dégel,

$m_g^f$  : masse (finale) de l'éprouvette après l'essai gel – dégel,

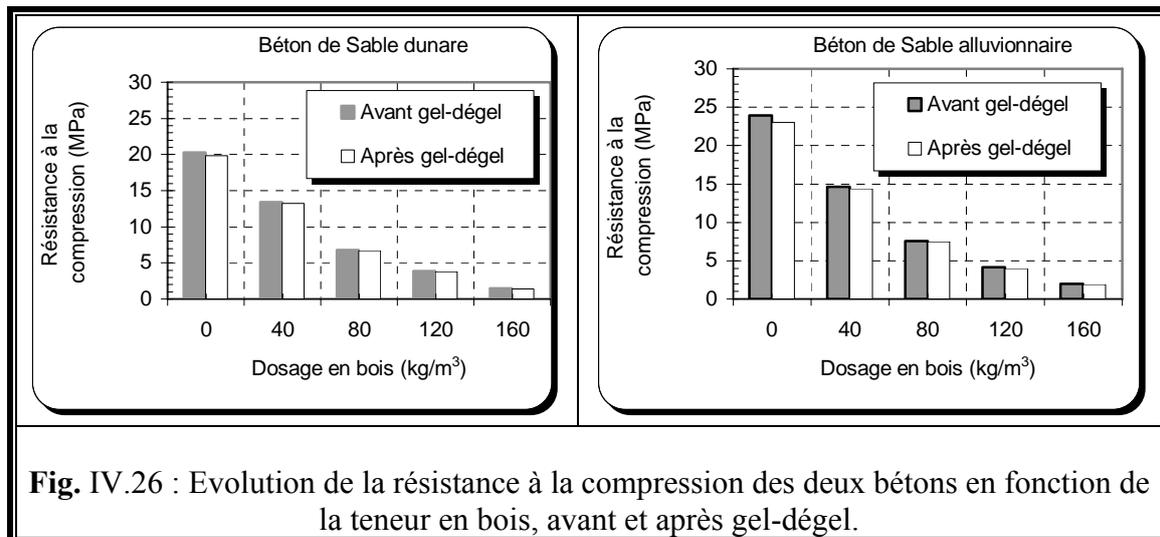
$\tau_g$  : perte en masse.

Notons que, dans ces essais, les résistances avant les cycles gel-dégel ne sont pas celles mesurées à 28 jours. Toutes les résistances de ces essais, que ce soit avant ou après les cycles gel-dégel, ont été mesurées aux mêmes âges.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau IV.6** et illustrés par les courbes présentées sur la **figure IV.26**.

**Tableau IV.6:** Pertes en résistance et en masse dues aux effet des cycles gel-dégel

	<b>B</b> en kg/m <sup>3</sup>	0	40	80	120	160
<b>Béton de SD</b>	<b>Rc</b> en MPa (avant Gel Dégel)	20.31	13.40	6.80	3.90	1.50
	<b>Rc</b> en MPa (après Gel-Dégel)	19.82	13.23	6.73	3.82	1.45
	$\lambda_R^g$ (%)	2.41	1.23	1.00	1.00	3.37
	$\tau_g$ (%)	5.00	3.50	3.67	4.68	5.63
<b>Béton de SA</b>	<b>Rc</b> en MPa (avant Gel Dégel)	23.90	14.62	7.58	4.13	1.97
	<b>Rc</b> en MPa (après Gel-Dégel)	23.06	14.34	7.47	4.03	1.90
	$\lambda_R^g$ (%)	3.52	1.90	1.48	2.45	3.62
	$\tau_g$ (%)	6.20	4.50	4.24	5.00	5.82

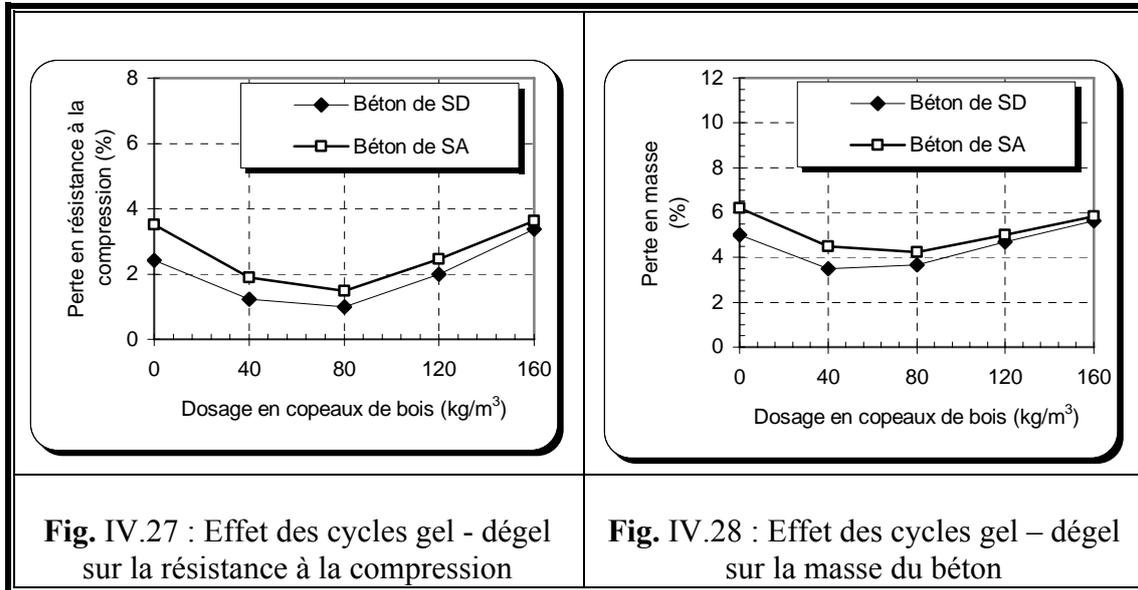


Pour les deux bétons de sable, et quelle que soit la proportion des copeaux de bois, les résultats obtenus montrent une légère diminution dans la résistance à la compression.

Le béton de sable alluvionnaire paraît légèrement plus influencé par le gel dégel. L'ajout de bois, à des proportions modérées (au dessous de 80 kg/m<sup>3</sup>), améliore la tenue du béton de sable vis à vis du gel-dégel (par rapport aux bétons de sable sans bois), mais pour des teneurs très faibles ou très élevées, l'effet du gel est un peu plus prononcé (**Tableau IV.6**).

Les faibles pertes en masse enregistrées, très faibles d'ailleurs par rapport aux limites recommandées par la norme **ASTM D 560**, confirment cette constatation et montrent bien que le gel-dégel n'a pas causé de fissurations considérables dans le matériau.

Notons enfin, qu'en général, la résistance des bétons de sables à base de copeaux de bois au gel-dégel est bonne et elle est meilleure pour des dosages allant de 40 à 120 kg/m<sup>3</sup> (Fig. IV.27 et IV.28).



### IV.2.3. ESSAI MOUILLAGE - SECHAGE

Cet essai a été fait selon la procédure décrite dans le **chapitre II** (§II.3.5.2). Afin d'examiner l'effet de cet essai sur le comportement des matériaux étudiés, nous avons déterminé la résistance à la compression, avant et après les cycles mouillage-séchage ainsi que les pertes en masse.

$$\lambda_R^m = \frac{R_{c28}^i - R_{c28}^m}{R_{c28}^i} \times 100 \quad (IV.36)$$

Avec :  $R_{c28}^i$  : la résistance initiale avant l'essai mouillage - séchage,

$R_{c28}^m$  : la résistance finale après l'essai mouillage - séchage.

$\lambda_R^m$  : perte en résistance.

$$\tau_g = \frac{m_g^i - m_g^f}{m_g^i} \quad (IV.37)$$

Avec :  $m_g^i$  : masse initiale de l'éprouvette avant mouillage - séchage,

$m_g^f$  : masse finale de l'éprouvette après l'essai mouillage - séchage,

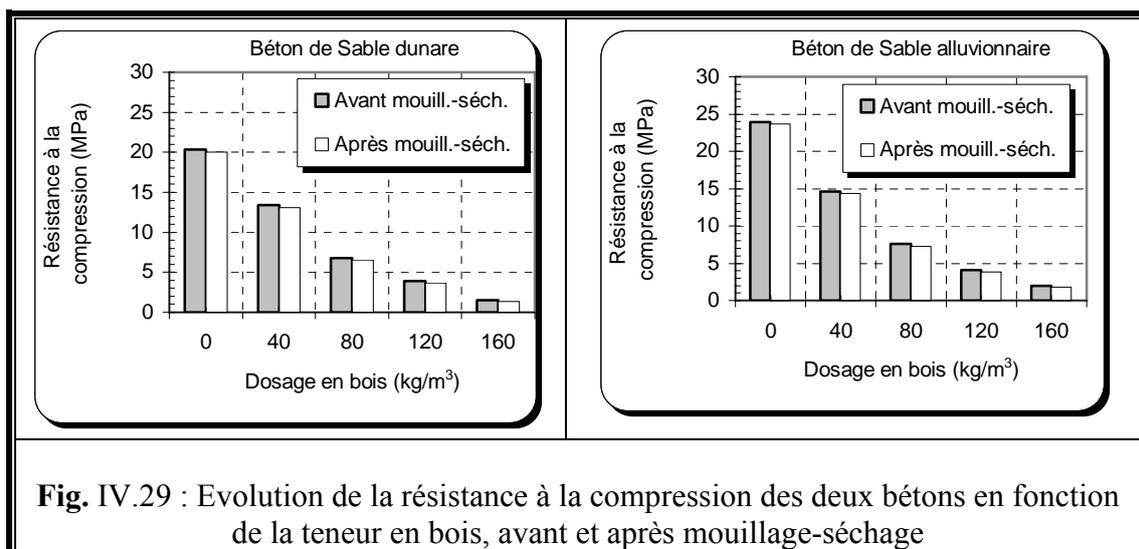
$\tau_g$  : perte en masse.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau IV.7** et schématisés sur la **figure IV.29**.

**Tableau IV.7:** Pertes en résistance et en masse dues aux effet des cycles mouillage-séchage

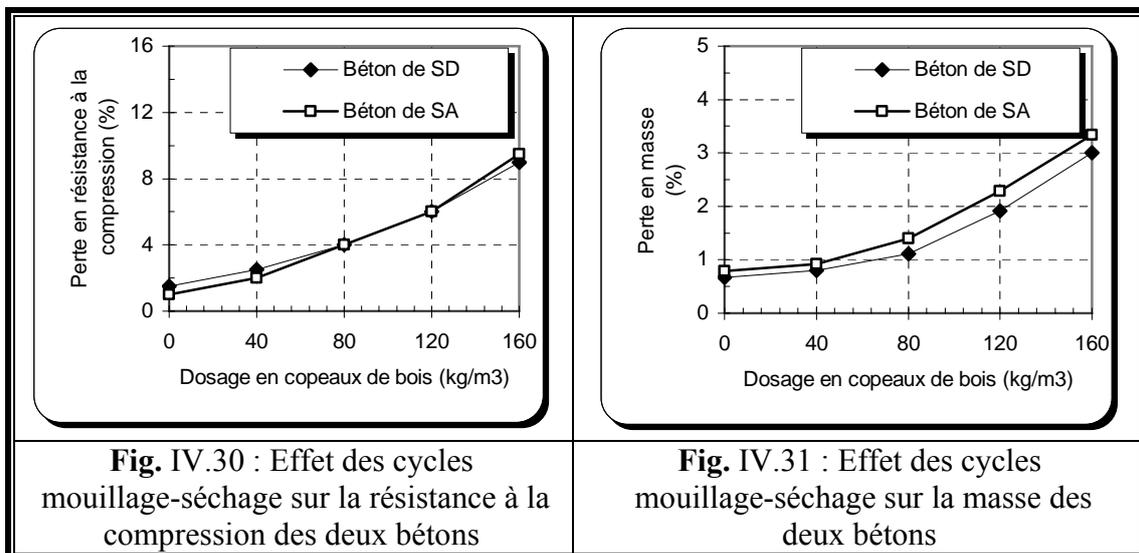
	<b>B en kg/m<sup>3</sup></b>	0	40	80	120	160
<b>Béton de SD</b>	<b>Rc en MPa</b> (avant mouillage-séchage)	20.31	13.40	6.80	3.90	1.50
	<b>Rc en MPa</b> (après mouillage-séchage)	20.00	13.06	6.53	3.66	1.36
	Perte en Résistance (%)	1.50	2.50	4.00	6.00	9.00
	<b>Taux de perte en masse (%)</b>	0.70	0.80	1.10	1.90	3.00
<b>Béton de SA</b>	<b>Rc en MPa</b> (avant mouillage-séchage)	23.90	14.62	7.58	4.13	1.97
	<b>Rc en MPa</b> (après mouillage-séchage)	23.66	14.33	7.27	3.88	1.78
	Perte en Résistance (%)	1.00	2.00	4.00	6.00	9.50
	<b>Taux de perte en masse (%)</b>	0.80	0.90	1.40	2.30	3.30

D'une manière générale, on remarque une légère diminution dans la résistance à la compression suite à l'essai mouillage-séchage, et ceci pour toutes les compositions envisagées. L'effet de cet essai est d'autant plus remarquable que le dosage en bois est plus élevé. Mais, il faut, cependant, noter que les pertes en résistance enregistrées restent dans les marges autorisées pour les matériaux de construction [ASTM D 560].



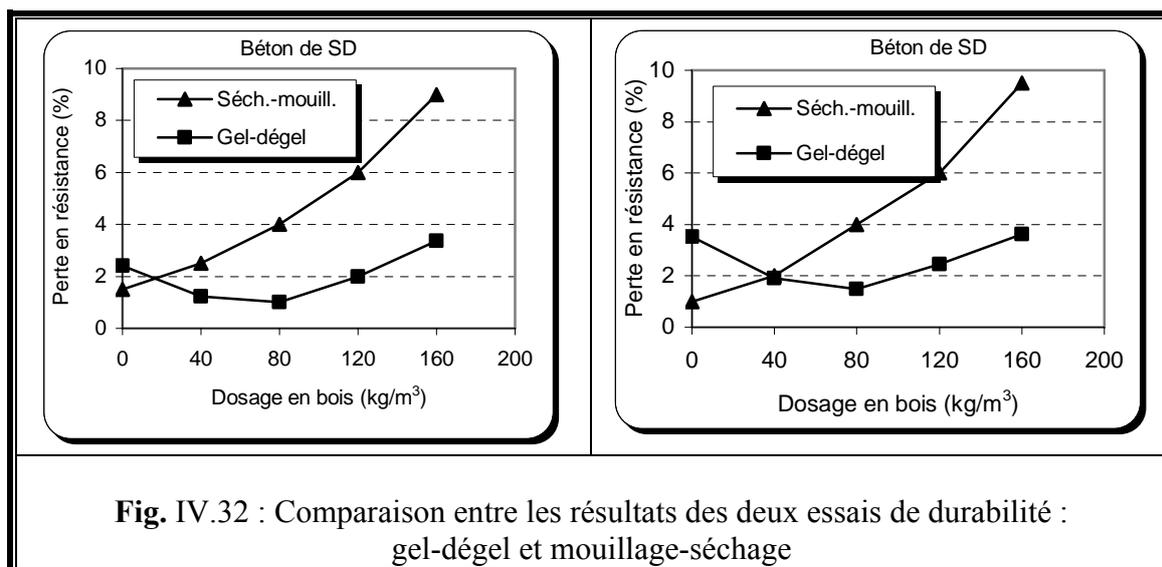
Contrairement au gel -dégel, la répétition des cycles mouillage-séchage influe négativement sur la résistance mécanique du matériau. La diminution en résistance ou en masse est d'autant

plus élevée que la proportion de bois est grande (Fig. IV.30 et IV.31). Ceci est dû au fait que le bois est plus sensible à l'eau qu'un béton.



#### IV.2.4. COMPARAISON ENTRE LES DEUX ESSAIS DE DURABILITE

La figure IV.32 montre que, sans bois ou avec des faibles dosages en bois, l'effet du gel-dégel est légèrement plus élevé que l'effet de mouillage-séchage. Aux environs de 20 kg/m<sup>3</sup>, dans le cas de SD et de 40 kg/m<sup>3</sup> dans le cas de SA, l'effet des deux essais est similaire. Par contre, au delà de ces teneurs, l'effet du séchage-mouillage est plus marqué et il est d'autant plus élevé que le dosage en bois est plus grand.



A partir de ceci on peut, peut être conclure, que c'est le bois qui conduit la dégradation du composite lorsque ce dernier est soumis à des cycles mouillage-séchage. Par contre, lors des cycles de gel-dégel et à des dosages relativement moyens, le bois s'oppose à la dégradation du composite.

L'effet du mouillage séchage, qui augmente avec la proportion du bois, est du, peut être, à la sensibilité du bois à ce type d'essai (gonflement-dégonflement répétés) et l'effet du gel-dégel, qui s'améliore avec l'augmentation de la proportion du bois, est du, peut être à la porosité qui devient de plus en plus interconnectée en augmentant la teneur en bois.

#### IV.2.5. CONCLUSION

Dans cette partie d'étude les composites étudiés ont été soumis à des séries de cycles gel-dégel et de mouillage-séchage pour voir l'évolution de leur résistance dans le temps et dans des conditions climatiques différentes selon les conditions locales.

Il a été noté:

- une légère diminution dans la résistance à la compression pour toutes les proportions des copeaux de bois étudiées ainsi que une légère perte en masse vis à vis les cycles gel-dégel.
- une diminution un peu plus élevée dans la résistance à la compression pour toutes les proportions des copeaux de bois étudiées ainsi que une perte en masse vis à vis les cycles mouillage séchage. Cet essai rend nécessaire la recherche d'un traitement convenable pour les copeaux de bois.

### IV.3. TRAITEMENT DES COPEAUX DE BOIS

#### IV.3.1. INTRODUCTION

A la fin de cette étude et dans le but de rechercher quelques améliorations sur certaines caractéristiques des composites étudiés, notamment la sensibilité à l'eau et les variations dimensionnelles élevées, nous avons pensé à traiter les copeaux de bois avant de les incorporer dans les bétons de sable. Pour des raisons de temps, seules la structure, la résistance mécanique, les variations dimensionnelles et la durabilité ont été étudiées. La conductivité thermique a été mesurée pour une seule composition seulement.

#### IV.3.2. CARACTERISATION DES BETONS DE SABLE A BASE DE COPEAUX DE BOIS TRAITES

D'après la littérature, différents traitements ont été appliqués aux granulats de bois avant de les incorporer dans différentes matrices: des traitements par enrobage avec un liant, des traitements chimiques et des traitements par imprégnation de certains produits liquides etc.[**Ledhem A.**, (1997) ; **Marius Eustafievici et al**, (2002) ; **Jennifer L et al**, (2004) ; **Goteicha M.**, (2005)].

Plusieurs auteurs ont pu montrer que le traitement le plus efficace est celui de l'enrobage avec du ciment [**Ledhem A.**, (1997) ; **Goteicha M.**, (2005)]. C'est pour cette raison, donc, que nous avons opté pour ce type de traitement.

Un lait préparé en mélangeant le ciment (**CPJ-CEM II/A**) avec de l'eau selon un rapport massique « ciment/bois » de l'ordre de 2.5, a été utilisé pour l'enrobage des copeaux de bois. Une durée d'au moins 14 jours était nécessaire pour atteindre le durcissement convenable des copeaux traités. Une fois ces derniers sont prêts à l'utilisation (**figure IV.33**), les deux composites sont préparés selon la même procédure utilisée dans le cas sans traitement.

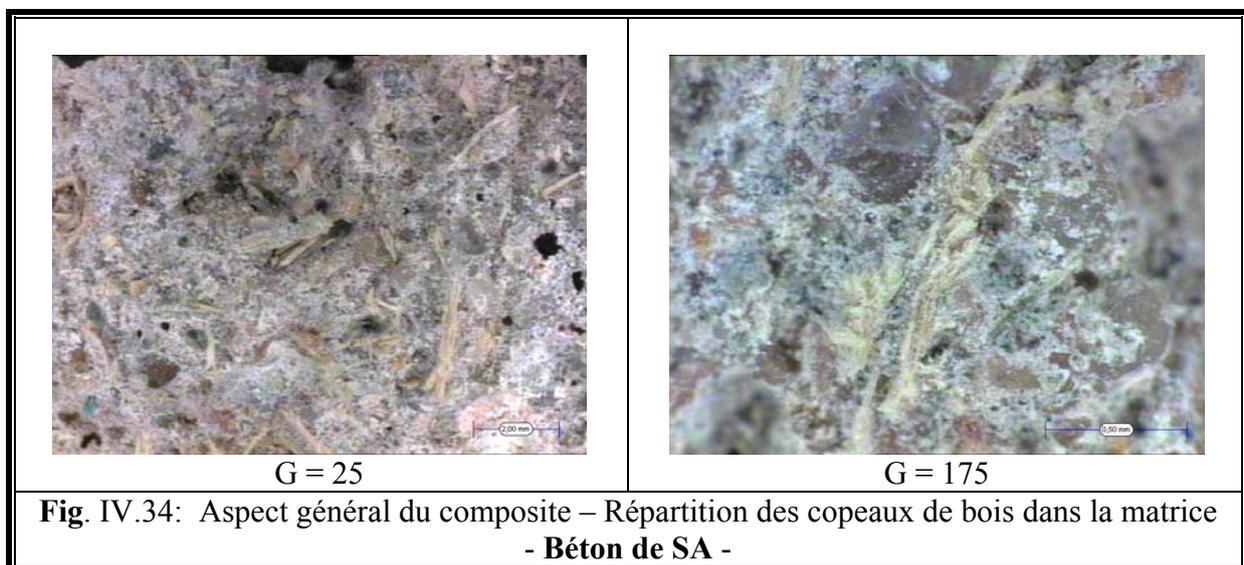


**Fig. IV.33** : Aspect général des copeaux de bois avant et après traitement au ciment

Les résultats obtenus ont mis en évidence les conclusions suivantes:

**a- STRUCTURE ET DENSITE**

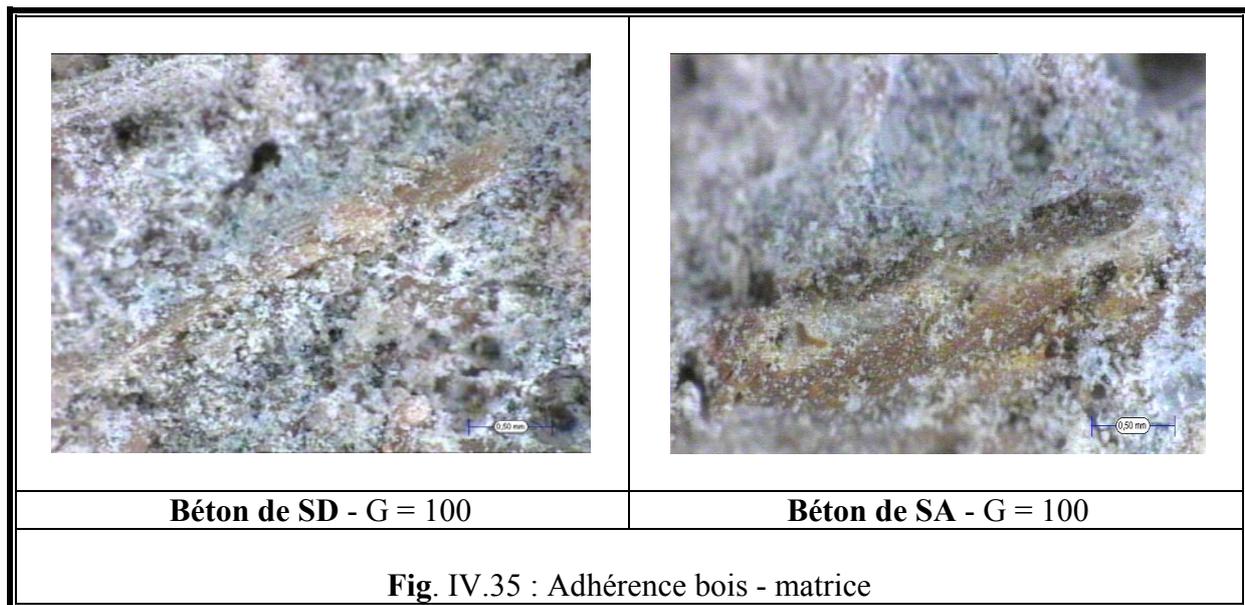
➤ L'aspect général du composite (**Fig. IV.34**) paraît plus homogène et plus compact et les copeaux de bois traités sont bien répartis et bien enchevêtrés dans la matrice. La porosité de la matrice est nettement réduite. Cette constatation, due au traitement des copeaux de bois, a été aussi faite par **LEDHEM A.**, (1997) pour un composite argile-ciment-bois.



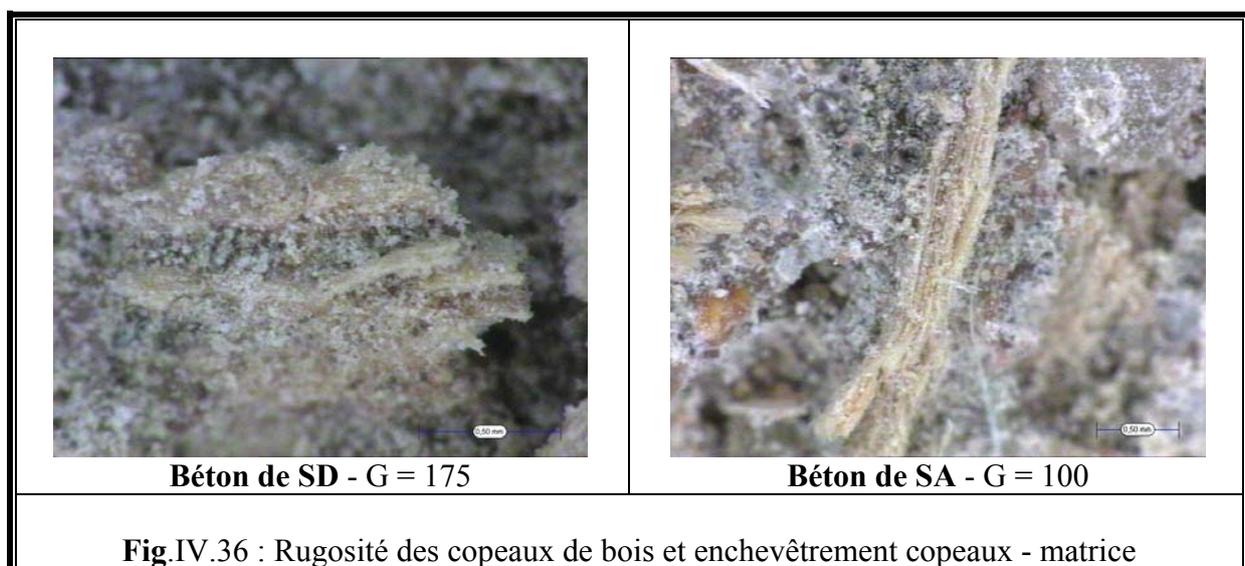
**Fig. IV.34**: Aspect général du composite – Répartition des copeaux de bois dans la matrice  
- Béton de SA -

➤ La **figure IV.35** montre que l'adhérence copeaux de bois – matrice est très bonne et paraît même mieux que celle remarquée dans le cas de bois sans traitement où on a constaté plus de défauts autour des granulats de bois (**Fig. III.5**).

Notons que l'adhérence bois – matrice peut être aussi améliorées par des traitements chimiques [**Mortreuil F. X.**, (2002) ; **Yun-long Yue** (2000)].



➤ La **figure** IV.36 montre que les grains de bois présentent des surfaces rugueuses et des formes irrégulières qui leur permettent de bien coller à la matrice. On constate également, qu'avec le traitement, les copeaux de bois conservent leur forme initiale, ce qui montre l'amélioration de leur rigidité. Par ailleurs, on observe des espèces qui se sont développées autour des copeaux de bois, non constatées dans le cas de bois sans traitement, qui sont sûrement dues à l'interaction entre le film de la pâte de ciment enrobant les grains de bois et la matrice. Un examen plus approfondi au MEB pourra certainement donner plus de détails sur la nature de ces espèces.

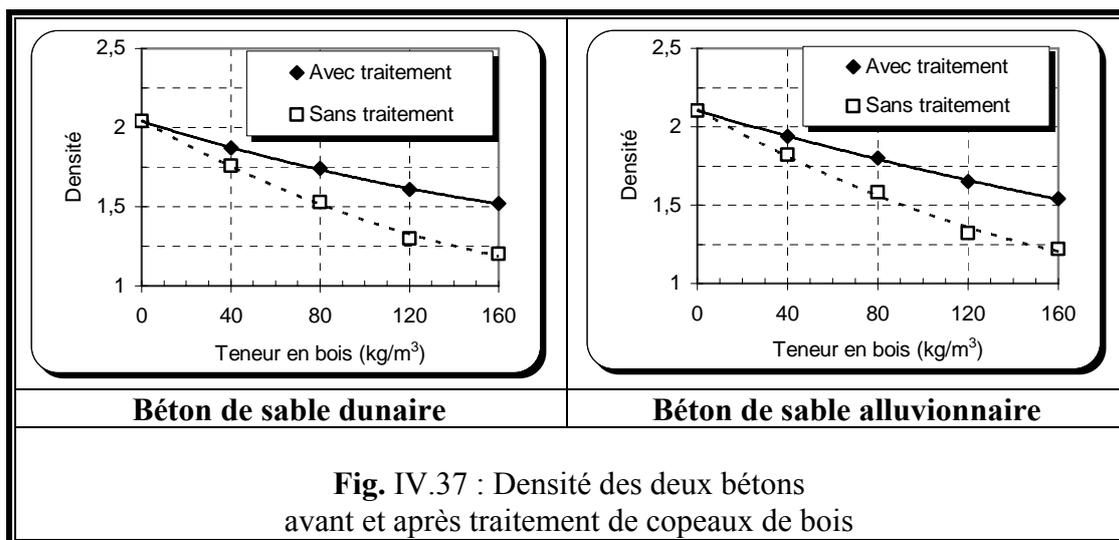


➤ En ce qui concerne la masse volumique, le **Tableau** IV.8 montre bien que cette dernière a légèrement augmenté après le traitement des copeaux de bois. Cette

augmentation est d'autant plus élevée que la teneur en bois est plus grande (Fig. IV.37). Soit une augmentation moyenne d'environ  $\sim 0.18$  % par kilogramme de bois.

**Tableau IV.8 : Masses volumiques des deux bétons de sable à base de copeaux de bois, avant et après traitement**

	<b>B en kg/m<sup>3</sup></b>	0	40	80	120	160
<b>Béton de SD</b>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) (sans traitement)	2040	1760	1530	1300	1200
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) (avec traitement)	2040	1870	1740	1610	1520
	Gain de résistance (%)	0	6.25	13.72	23.84	26.67
<b>Béton de SA</b>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) (sans traitement)	2100	1820	1580	1320	1220
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) (avec traitement)	2100	1940	1800	1650	1540
	Augmentation (%)	0	6.59	13.92	25.00	26.23



En conclusion, il convient de noter que les améliorations constatées au niveau de la structure et de la densité des composites étudiés après traitement des copeaux de bois auront sans doute des effets positifs sur d'autres propriétés, notamment sur leurs propriétés mécaniques, leurs propriétés hydriques et leurs variations dimensionnelles.

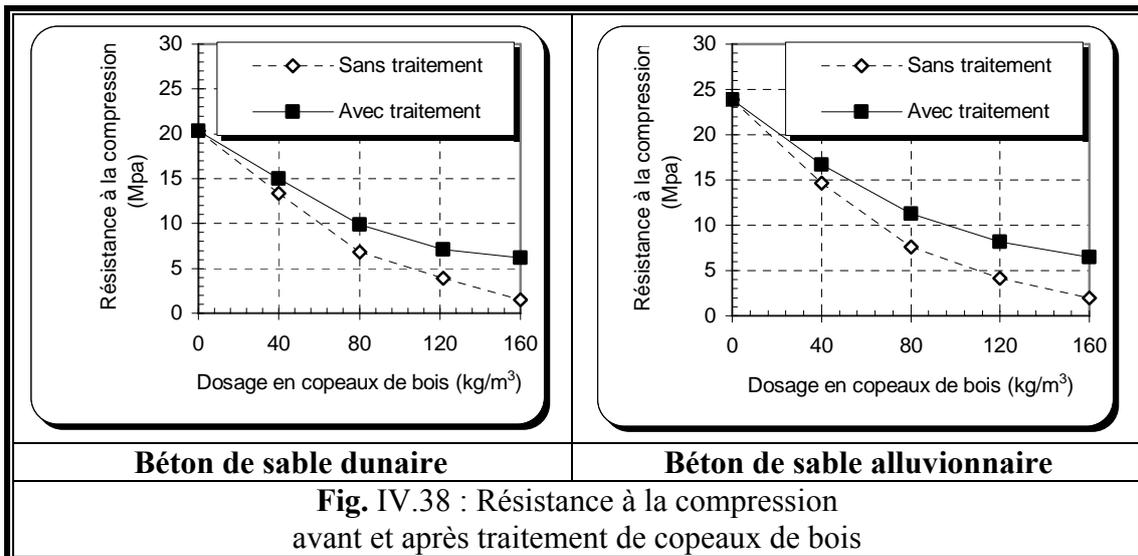
#### **b- CARACTERISTIQUES THERMO-MECANIQUES**

Le traitement des copeaux de bois améliore considérablement la résistance à la compression des deux composites (Fig. IV.38). Cette augmentation est d'autant plus élevée que la teneur en bois est plus grande : un gain de résistance allant de 20 à 45 % est obtenu à une teneur en bois de 80 kg/m<sup>3</sup> et 230 à 313 % à une teneur de 160 kg/m<sup>3</sup>. On peut dire que ce gain en

résistance est très important surtout dans le cas où la conductivité thermique n'est que peu affectée par le traitement des copeaux (Tableaux IV.9 et IV.10).

**Tableau IV.9 : Résistances à la compression des deux bétons de sable à base de copeaux de bois, avant et après traitement**

	<b>B en kg/m<sup>3</sup></b>	0	40	80	120	160
<b>Béton de SD</b>	Rc (MPa) (sans traitement)	20.30	13.40	6.80	3.90	1.50
	Rc (MPa) (avec traitement)	20.30	15.00	9.90	7.10	6.20
	Gain de résistance (%)	0	11.94	45.59	82.05	313
<b>Béton de SA</b>	Rc (MPa) (sans traitement)	23.90	14.62	7.58	4.13	1.97
	Rc (MPa) (avec traitement)	23.90	16.70	11.30	8.20	6.50
	Gain de résistance (%)	0	14.24	19.07	98.54	230



**Tableau IV.10 : Conductivité thermique avant et après traitement des copeaux de bois**

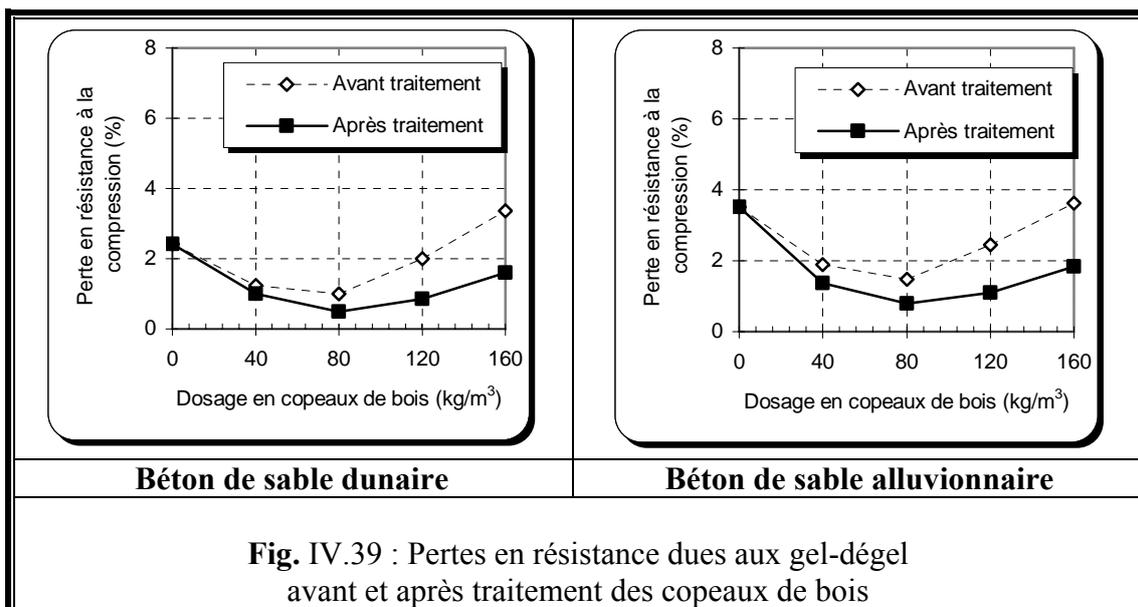
<b>B (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Conductivité thermique (W/m.K)</b>		
	<b>80</b>		
	Avant traitement	Après traitement	Augmentation
<b>Béton de SD</b>	0.62	0.67	8.1 %
<b>Béton de SA</b>	0.69	0.75	8.6 %

### c- DURABILITE

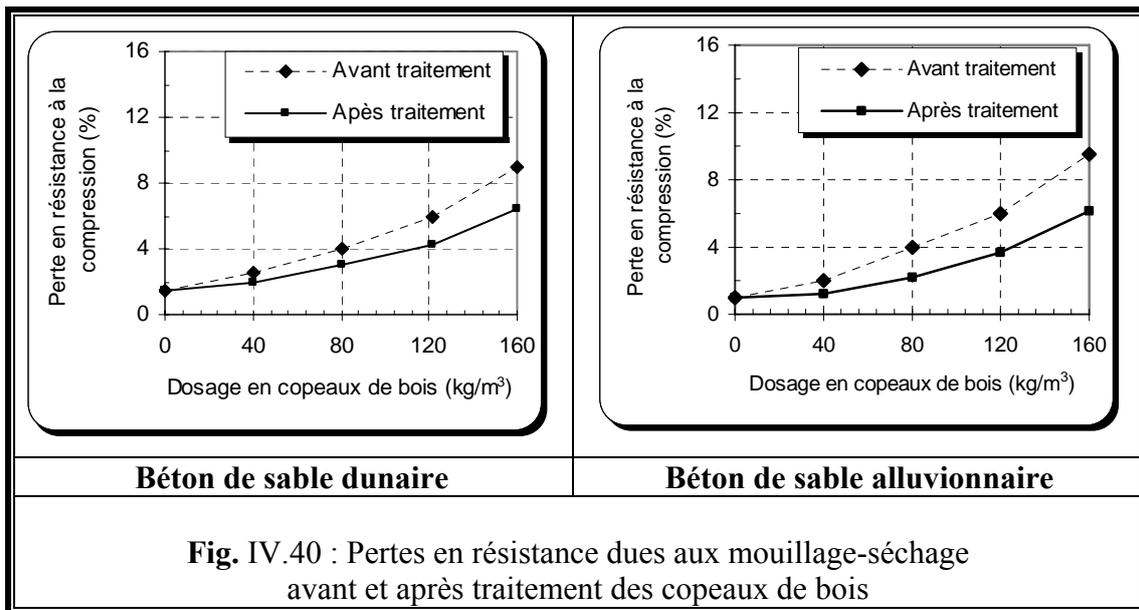
➤ bien que les résultats obtenus (**Tableau IV.11**) dans les deux essais de durabilité effectués sont acceptables, le traitement des copeaux de bois améliore davantage et considérablement la résistance vis à vis des cycles gel-dégel et mouillage-séchage (**Fig. IV.39** et **IV.40**).

**Tableau IV.11** : Résistances à la compression des deux bétons de sable à base de copeaux de bois traités, avant et après les cycle gel-dégel et mouillage séchage

<b>Béton de SD</b>	Gel- Dégel	Rc (MPa) (avec traitement)	19.82	14.85	9.85	7.04	6.10
		Perte en résistance (%)	2.41	1.00	0.50	0.85	1.60
	Mouill.- séchage	Rc (MPa) (avec traitement)	20.00	14.70	9.60	6.80	5.80
		Perte en résistance (%)	1.50	2.00	3.03	4.22	6.45
<b>Béton de SA</b>	Gel- Dégel	Rc (MPa) (avec traitement)	23.06	16.47	11.21	8.11	6.38
		Perte en résistance (%)	3.52	1.37	0.80	1.10	1.84
	Mouill.- séchage	Rc (MPa) (avec traitement)	23.66	16.50	11.05	7.90	6.10
		Perte en résistance (%)	1.00	1.20	2.21	3.66	6.15



**Fig. IV.39** : Pertes en résistance dues aux gel-dégel avant et après traitement des copeaux de bois



**Fig. IV.40** : Pertes en résistance dues aux mouillages-séchages avant et après traitement des copeaux de bois

Il est clair que les pertes en résistance dues aux cycles gel-dégel et aux cycles mouillage-séchage sont fortement diminuées en traitant les copeaux de bois (**Fig. IV.39** et **IV.40**).

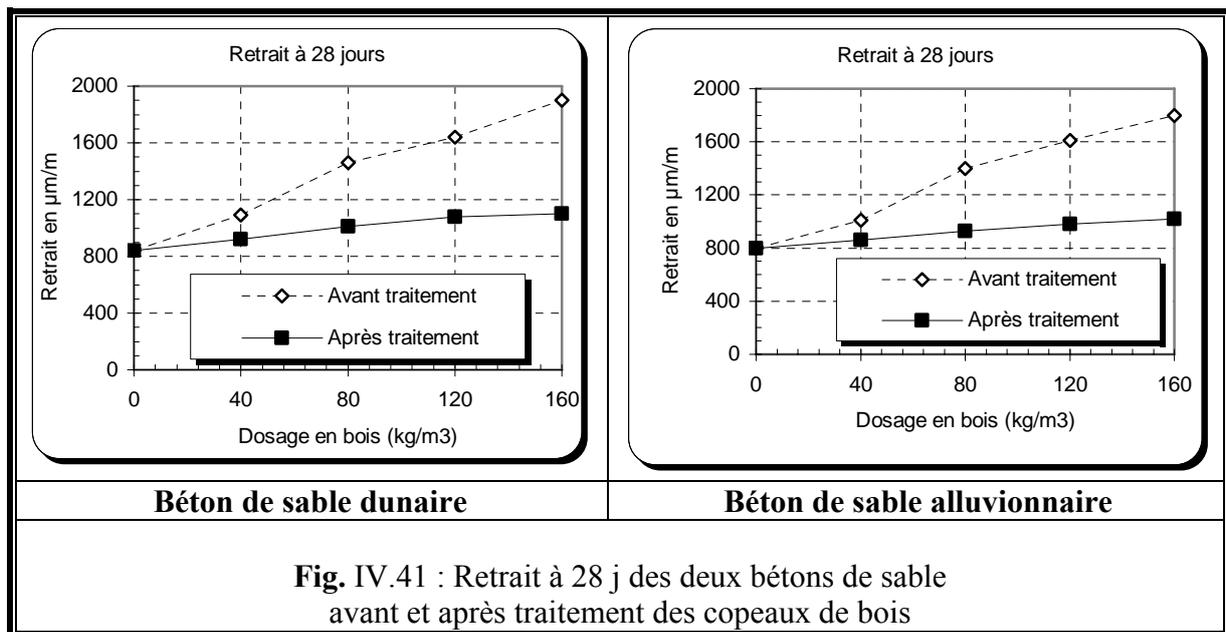
#### d- VARIATIONS DIMENSIONNELLES

En ce qui concerne les variations dimensionnelles, problème souvent soulevé par les auteurs lors des études menées sur les bétons de bois [**Bouguerra A. (1997)** ; **Ledhem A. (1997)**], le **tableau IV.12** et la **figure IV.41** mettent bien en évidence l'efficacité du traitement au ciment sur la réduction des variations dimensionnelles des bétons de sable à base de copeaux de bois. Une amélioration considérable, qui rend le retrait des deux bétons de sable acceptable ( $<1000 \mu\text{m/m}$ ) à des teneurs en bois au dessous de  $100 \text{ kg/m}^3$ , a été enregistrée.

Notons, qu'un traitement à l'huile est beaucoup plus efficace que le traitement au ciment [**Goteicha M., (2005)**]. Peut être que le retrait aurait diminué un peu plus si les copeaux de bois ont été traités à l'huile avant l'enrobage au ciment.

**Tableau IV.12**: Valeurs moyennes du retrait avant et après traitement des copeaux de bois

B en $\text{kg/m}^3$	Béton de SD Retrait en $\mu\text{m/m}$		Béton SA Retrait en $\mu\text{m/m}$	
	Av. Traitement	Ap. Traitement	Av. Traitement	Ap. Traitement
0	840	840	800	800
40	1090	900	1010	860
80	1460	1010	1400	930
120	1640	1040	1610	980
160	1900	1100	1800	1020



### IV.3.3. CONCLUSION

Cette partie d'étude a mis en évidence l'efficacité du traitement des copeaux de bois sur la plupart des caractéristiques des bétons de sable. On note qu'avec un traitement au ciment :

- Les composites étudiés sont plus compacts, et l'adhérence bois matrice est meilleure.
- Le gain de conductivité thermique obtenu par l'ajout de copeaux de bois n'est que légèrement affecté.
- la résistance à la compression et la résistance vis à vis les effets du gel-dégel et du mouillage-séchage sont considérablement améliorées.
- Les variations dimensionnelles, qui peuvent constituer un grand inconvénient pour les bétons de sable à base de copeaux de bois, sont nettement réduites.

## SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS OBTENUS

		B (kg/m <sup>3</sup> )	0	40	80	120	160
Densité	B (kg/m <sup>3</sup> )		2040	1750	1530	1300	1200
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		2100	1820	1580	1320	1220
Résistance	Rc (MPa)		20.00	13.20	6.70	3.80	1.40
	Rf (MPa)		5.10	2.49	1.20	0.60	0.20
Thermique	$\lambda$ W/m.K		1.26	0.86	0.62	0.43	0.28
	b (J/ m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> .K)		1375	2696	1151	1041	990
	a (mm <sup>2</sup> /s)		0.84	0.44	0.29	0.17	0.08
	C ( J/ kg.K)		735	1110	1397	1946	1200
Hydrique	S (mm/mn <sup>1/2</sup> )		0.628	0.752	0.932	1.267	1.616
	D <sub>w moy</sub> (mm <sup>2</sup> /s)		0.95	0.84	0.74	0.53	0.45
Var. Dim	Retrait à 28 j (µm/m)		840	1090	1460	1640	1900
			800	1010	1400	1610	1800
Microstructure			Homogène et compact Moins poreux Bonne adhérence Pas de fissures notables		homogène et compact plus poreux Bonne adhérence Pas de fissures notables		Homog-comp. plus poreux Bonne adhérence Pas de fissures
Durabilité	Rc au Gel-dégel		Bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne
	Rc Mouill.-séch.		Excellente	Très bonne	Bonne	acceptable	acceptable
Traitement des copeaux	Gain en Rc (%)		0	11.94	45.59	82.05	313
	Augmentation en $\lambda$ (W/m.K)		-	-	8.1	-	-
	Réduction en Retrait (%)		0	17.00	35.00	37.00	33.00
	Rc au (gel-dég)		Amélioration de 0 à 50 %		Amélioration de 50 à 55 %		Amélioration de 52%
	Rc au (mouill – séch)		Amélioration de 0 à 20 %		Amélioration de 25 à 30 %		Amélioration de 52%
			Amélioration de 0 à 40 %		Amélioration de 40 à 45 %		Amélioration de 35%

le tableau ci-dessus regroupe les principaux résultats obtenus lors de cette étude :

Ces résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

♣ Pour les deux bétons de sable, la conductivité thermique diminue considérablement en augmentant la teneur en copeaux de bois, par contre on note une chute très nette dans la résistance mécanique. La perte en résistance est d'autant plus importante que la quantité de bois dans le béton est plus élevée. Toutefois un compromis convenable entre les deux caractéristiques reste toujours possible.

♣ Selon **Kass J.L. et Compbel D., (1972)**, un béton de construction et d'isolation doit avoir une résistance comprise entre 3,5 et 15 MPa et une conductivité thermique inférieure à 0.75 W/m.K. Sur cette base, donc, nous remarquons qu'une quantité de copeaux de bois, ajoutée en plus au béton de sable et allant de 80 à 120 kg/m<sup>3</sup> environ, peut nous donner un béton de sable de construction et d'isolation avec des densités inférieures à 1530 kg/m<sup>3</sup> dans le cas du béton de sable dunaire et inférieures à 1580 kg/m<sup>3</sup> dans le cas du béton de sable alluvionnaire. Les autres caractéristiques, autres que la résistance et la conductivité, sont presque toutes acceptables, sauf peut être le caractère absorbant du matériau. En fait, ce caractère ne pose pas de problème pour les constructions locales, ou au moins, pour des éléments isolés ou non exposés à l'humidité. Si le problème est posé, il peut être facilement remédié en prévoyant des traitements bien appropriés qui auront pour rôle la minimisation de l'absorption d'eau.

♣ Au dessous de 80 kg/m<sup>3</sup> de copeaux de bois (40 kg/m<sup>3</sup> par exemple), il est possible d'obtenir un béton de construction plus résistant et présentant des conductivités thermiques nettement inférieures à celles des bétons usuels.

♣ Au delà d'un dosage de 120 kg/m<sup>3</sup>, les bétons obtenus peuvent être utilisés dans des murs de remplissage et de répartition où un bon confort thermique est exigé.

En ce qui concerne les autres propriétés étudiées, il convient de noter que les bétons de sable à base de copeaux de bois présentent une structure homogène avec une bonne adhérence béton-bois et une bonne durabilité vis à vis le gel-dégel et le mouillage-séchage. Un simple traitement, appliqué aux copeaux de bois, avant de les introduire dans le béton de sable, a pu sensiblement augmenter la résistance mécanique, améliorer davantage la résistance au gel-dégel et au mouillage séchage et limiter les variations dimensionnelles du matériau.

Notons enfin, que, vu leur importance dans les bétons de sable, l'effet de la proportion des fillers sur certaines caractéristiques, (résistance et paramètres thermiques) a aussi été étudié. Cette étude a confirmé l'existence des dosages optimaux en filler, déjà montrés lors des études antérieures [**Bederina M., (2000)**].

---

*CONCLUSION GENERALE  
ET  
PERSPECTIVES*

---

Ce travail, qui entre dans le cadre de la valorisation des différents matériaux locaux et de la réutilisation des déchets d'origines diverses (minéraux, industriels, agricoles etc.), avait pour but l'élaboration de nouveaux bétons capables de supporter les charges d'une structure tout en assurant une bonne isolation thermique. Ceci peut, d'une part, répondre aux besoins économiques dans de nombreuses régions et, d'autre part, participer à la protection de l'environnement. Pour atteindre ce but, une étude approfondie du comportement mécanique et du comportement thermique était, donc, nécessaire pour évaluer les caractéristiques spécifiques de ces matériaux et de les classer parmi les différents bétons légers.

Les matériaux étudiés sont des bétons de sable, dunaire et alluvionnaire, à base de copeaux de bois. Les matériaux valorisés sont le sable de dune et le sable alluvionnaire qui se trouvent en très grandes quantités dans la région de Laghouat ainsi que dans d'autres régions du pays, notamment dans le sud algérien, et les déchets réutilisés sont les fillers calcaires, déchets de concassage, et les copeaux de bois, déchets de menuiserie.

L'étude bibliographique a montré la possibilité d'utilisation des bétons de bois dans plusieurs domaines malgré la diminution de leur résistance mécanique. En effet, les propriétés fort intéressantes des bétons de bois, telles que la légèreté, la bonne capacité d'isolation phonique et thermique, etc., ne peuvent qu'élargir le domaine d'applications de ce type de composites. Il faut noter encore, que dans ce travail, la matrice du composite, souvent constituée d'un béton ordinaire dans les bétons de bois, est constituée d'un béton de sable qui, lui aussi, est considéré comme un nouveau matériau faisant l'objet de plusieurs recherches actuelles et possède aussi des propriétés spécifiques importantes.

Le présent travail se situe dans la continuité d'un travail antérieur qui a été mené sur les mêmes bétons de sable étudiés, mais sans ajout de copeaux de bois. En effet, La synthèse, à laquelle a abouti ce travail, a montré que ces matériaux offrent des perspectives très intéressantes. Les résistances en compression et en flexion sont améliorées pour une teneur optimale en filler calcaire comprise entre 140 et 200 kg/m<sup>3</sup> selon la nature du sable.

L'objectif fixé pour le présent travail est basé essentiellement sur l'étude du comportement mécanique et thermique des composites « béton de sable - bois » afin de rechercher un matériau isolant - porteur qui s'adapte avec la construction locale. Pour élargir la caractérisation de ce matériau, d'autres propriétés ont été parallèlement étudiées, telles que la microstructure, le comportement hydrique, les variations dimensionnelles ainsi que la durabilité.

Lors de la caractérisation mécanique, il a été remarqué que, la présence des copeaux de bois dans le béton de sable permet une déformation légèrement plus importante à la rupture, sans qu'il y ait ruine brusque de la structure. En terme de valeurs, la résistance est réduite, mais il est tout à fait possible d'obtenir des résistances acceptables à des proportions bien déterminées de copeaux de bois. Pour des teneurs en bois modérés, la résistance en compression varie de 12 à 20 MPa dans le cas de SD et de 14 à 24 MPa environ dans le cas de SA. En flexion, il a été remarqué qu'avec une faible teneur en bois la résistance est légèrement plus élevée de celle du béton de sable sans bois. Cette remarque est beaucoup plus nette dans le cas de SD.

Il convient de noter dans cette partie que la perte en résistance causée par l'ajout des copeaux de bois a été remplacée par d'autres propriétés intéressantes :

- Une légèreté considérable est obtenue en augmentant la proportion des copeaux de bois dans le béton. Cette légèreté permet d'amortir sensiblement l'énergie de la mise en place de ce type de béton.
- La petite granularité et l'absence de ségrégation permettent au béton d'être utilisé dans des travaux de pompage à des grandes distances et dans des travaux d'injection et offrent de bels aspects de surface.

Une autre propriété plus importante, qui va peut être nous faire oublier les pertes en résistance, est améliorée en introduisant des copeaux de bois dans ces bétons de sable. Il s'agit du bon pouvoir isolant que présentent ces matériaux. La conductivité thermique a nettement diminué avec l'ajout de copeaux de bois; Plus la proportion des copeaux de bois est élevée, plus la conductivité thermique est meilleure. Cette amélioration a été confirmée par les valeurs des autres paramètres thermiques déterminés : l'effusivité thermique, diffusivité thermique et la chaleur massique.

En combinant les deux comportements, mécanique et thermique, nous pouvons conclure, qu'à des proportions en bois bien déterminées, il est possible d'obtenir de bons bétons qui peuvent servir comme matériaux isolants - porteurs dans la construction locale, où le climat est très chaud en été et très froid en hivers et les constructions sont peu étagées dans la plupart des cas. A des teneurs en bois très élevées, la résistance est faible, mais la conductivité thermique est très bonne, ce qui permet peut être à ce matériau une utilisation comme éléments de remplissage assurant un très bon confort thermique.

Dans le cas de la saturation, les caractéristiques thermiques ont augmenté, puisque tous l'air contenu dans les pores est remplacé avec de l'eau qui se caractérise par une conductivité thermique supérieure. Ceci, peut être, ne pose pas de problèmes pour les conditions climatiques locales, mais on note, quand même, qu'avec un traitement approprié appliqué aux copeaux de bois, il est possible de limiter le caractère absorbant du matériau et résoudre le problème.

Bien que, les composites Bétons-bois aient une structure très complexe, l'application de quelques modèles a permis de confirmer que les conductivités thermiques obtenues à partir de la technique TPS sont relativement représentatives et les écarts observés dans certains cas pourront être liée à l'**idéalité** de certains modèles. Une étude similaire a été effectuée pour estimer la résistance mécanique et a montré une bonne concordance entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux.

Afin d'approfondir la caractérisation de ces matériaux, d'autres propriétés ont été étudiées :

- Une technique d'image a été utilisée pour l'étude de la microstructure. Cette étude a montré que les copeaux de bois sont bien répartis, et bien adhérents au béton de sable. Elle a mis en évidence la porosité propre aux copeaux de bois ainsi que la porosité induite par ces derniers dans la matrice. Dans l'ensemble et à grande échelle, le composite paraît relativement homogène.

- L'essai de retrait a été utilisé pour l'étude des variations dimensionnelles. Cette étude a montré que l'ajout de bois augmente le retrait. Celui-ci, comme pour tous les bétons de bois, dépassent, parfois, les normes autorisées pour les bétons usuels, mais par la suite, il a été montré qu'un traitement approprié appliqué aux copeaux de bois pourra réduire considérablement les variations dimensionnelles.

➤ L'essai d'imbibition capillaire a été utilisé pour l'étude du comportement hydrique. Cette étude a mis en évidence l'augmentation de la sensibilité à l'eau en ajoutant des granulats de bois dans les bétons de sable. En effet, les composites étudiés sont plus sorptifs et leur sorptivité augmente lorsque la proportion de bois augmente. La présence du bois tend donc à accélérer la progression du front d'imbibition capillaire et à augmenter la quantité d'eau absorbée. De plus, la porosité ouverte à l'eau augmente lorsqu'on augmente le pourcentage de bois. Ce problème est facilement résolu en traitant les copeaux de bois avant de les incorporer dans le béton. De plus, les éléments de construction locaux ne sont que rarement exposés à des grandes quantités d'eau. Notons qu'en plus de la sorptivité, un autre paramètre hydrique a été déterminé. Il s'agit de la diffusivité hydrique ou coefficient de transport hydrique. Les valeurs de ce dernier restent bien dans la gamme trouvées pour des matériaux semblables et son évolution en fonction de la teneur en eau présente la même allure.

➤ Les essais gel - dégel et mouillage - séchage ont été utilisés pour étudier la durabilité. Après différents cycles de gel-dégel et de mouillage séchage, il a été remarqué que les pertes en résistance et en poids, ne dépassent pas les valeurs autorisées pour un béton usuel.

A la fin de cette étude un traitement a été choisi, à partir de la littérature, afin d'améliorer certaines propriétés des composites étudiés. Un traitement par enrobage avec un lait au ciment a été appliqué aux copeaux de bois avant de les introduire dans les bétons de sable étudiés. Un gain sensible en résistance a été obtenu. Ce gain est d'autant plus important que la quantité de bois est plus grande. De même, la sensibilité au gel-dégel et au mouillage-séchage a considérablement diminuée et les variations dimensionnelles sont fortement réduites.

La principale remarque qu'on peut faire, en comparant les comportements des deux bétons de sable, est qu'avec des teneurs en bois plus ou moins faibles, le béton de sable alluvionnaire est légèrement plus résistant, moins poreux, moins isolant, mais à des teneurs plus élevées, les deux bétons se comportent comme s'ils sont le même matériau.

Enfin et même si l'intérêt de ce type de matériaux est déjà mis en évidence, des études complémentaires sont souhaitables pour aller vers un développement industriel de ces produits. Il s'agit notamment de l'étude du comportement du matériau sous des charges constantes (fluage) ainsi que l'étude de ses performances thermiques et mécaniques en milieu agressif (ions chlorure, ions sulfate, eaux acides, ...) ou dans des conditions climatiques variables. D'autre part, et afin de comprendre mieux le phénomène de diffusion de chaleur et de masse dans ces matériaux et de bien modéliser leur structure, une étude approfondie sur la répartition des pores et de leurs taille est indispensable.

Pour augmenter les performances mécaniques tout en conservant les qualités thermiques de ces matériaux dans le cas des proportions très élevées en bois, la recherche de nouveaux traitements pour les copeaux de bois et l'utilisation de différents ajouts peuvent ouvrir une autre voie de recherche pour ces matériaux. De même, l'ajout d'une proportion de gros granulats (béton de sable chargé) pourra améliorer davantage certaines propriétés du matériau.

Nous espérons que ce modeste travail contribuera à une large diffusion de ce type matériaux dans le domaine de la construction, notamment dans les régions sud de notre pays.

---

*REFERENCES*

*BIBLIOGRAPHIQUES*

---

- [1] **Abd El-Ghany El Abd and Jacek J Milczarek**, (2004): Neutron radiography study of water absorption in porous building materials: anomalous diffusion analysis, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37 (2004) 2305–2313.
- [2] **Addleson L.**, (1972): *Materials for Buildings*, vol. 2 (London: Iliffe Books) p 168.
- [3] **AFNOR**, : "Bétons- Bétons de sable"; *Projet P 18-500*
- [4] **Aho**, (1988): Ecocem The raute system for the manufacture of cement bounded particle board, proceeding of the International Conference on fiber and particle boards bonded with Inorganic Binders, University of Idaho.
- [5] **American Concrete Institute** (1970) : Gide pour le béton de structure à base de granulats légers, Traduction du CATED, SDT BTP.
- [6] **Amrani, Y.** (15-17 oct. 1991) : "Béton de sable : expérience marocaine"; *Actes du colloque Franco-Maghrébin 'Construire en matériaux locaux'*; Marseille, pp. 133-152 .
- [7] **Aouadja F.Z., M. Mimoune, M. Laquerbe**, (1995) : Etude expérimental sur les bétons à base de résidu de bois, *Revue Algérie-EQUIPEMENT* , N°18, mars-avril, pp.24-27.
- [7] **Arnaud L., Monnet H., Cordier C., Sallet F.**, (2000) : « Modélisation par homogénéisation autocohérente de la conductivité thermique de béton et laine de chanvre », congrès français de thermique SFT 2000, Lyon 15-17 mai 2000.
- [8] **Asghari Maqsood, Kashif Kamran, Iftikhar Hussain Gull**, (2004): Prediction of thermal conductivity of granite rocks from porosity and density data at normal temperature and pressure: in situ thermal conductivity measurements, *Journal of. Physics. D: Applied Physics.* 37 (2004) 3396–3401.
- [9] **ASTM D 559**: Wetting-and-Drying Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures.
- [10] **ASTM D 560**: Freezing-and-Thawing Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures.
- [11] **Ballester J.M.**, (1992) : *Traitement et Valorisation des Déchets Solides*, Centre de Prospectives et d'Etudes, Ministère de la Recherche et de l'Espace, Innovation 128 –Jui.1992 – pp.7-15, 200p. France.
- [12] **Bal'shin M. YU.**, (1949): Relation if Mechanical Properties of powder Metals and their Porosity and the Ultimate Properties of Porous Metal-Ceramic Materials. *Doklady Akad Nauk S.S.R.*, vol. 67, n°5, PP. 931-834.
- [13] **Barea R., Belmonte M., Osendi M.I., Miranzoa P.**, (2003): Thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC platelet composites, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 23, pp.1773–1778;
- [14] **Barthelemy, M.** (1980.) : "Notions pratiques de la mécanique de la rupture"; *Ed EYROILLES*,
- [16] **Bashir M. Soleiman**, (2006): Moisture effect on thermal conductivity of some major elements of a typical Libyan house envelope, *Journal of. Physics. D: Applied Physics.* 39 (2006) 547–551.
- [17] **Bastian G.** 1989: Détermination dynamique des paramètres des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein d'un mortier en régime hygroscopique, Thèse de Docteur es-Sciences, Université de Nantes, ENSM. 241p.
- [18] **Bastian G.** (1982) : Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction par une méthode transitoire et asymptotique. *Revue de Physique Appliquée*, Vol. 17, pp. 217-225.
- [19] **Batata, A. ; Zerouni, M.** (*Séminaire du 3-4 déc. 1991*) : "Le béton de sable de dune : sa performance et ses propriétés" ; *MATLOC 91; Biskra (CNERIB)* : [17] **Bederina M.**, (2000), Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux : effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau, Thèse de Magister, 110 p., Université de A.Tledji de Laghouat, Algérie, Oct.2000.
- [20] **Bederina M., Khenfer M.M., Dheilly R.M., Queneudec M.** (2005): Reuse of local sand: effect of lime stone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different concrete sand , *Cement and Concrete Research*, Vol. n°35, July 2005, pp.1170-1179.

- [21] **Bederina M., Marmoret L., K. Mezreb, Khenfer M.M., Bali A., Queneudec M.**, (2006): Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of the sand concretes - experimental study and modelling –, article In press , *Construction and Building Materials* (2006).
- [22] **Bellini Da Cunha Neto J.A** (1992), : Transport d'humidité en matériaux poreux en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire. Thèse de Doctorat de l'Université de Joseph Fourier – Grenoble I.
- [23] **Benaissa, A.** ( nov. 1992) : "Déformations différées d'un béton de sable" – *Thèse de doctorat, Université de bordeaux; Laboratoire régional des ponts et chaussées.*
- [24] **Benaissa, A. ; Morlier, P. ; Viguier, C. ; Cauvin, J.J.**, (juin 1992) : "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable" ; *Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics (ITBTP) N°504.*
- [25] **Benaissa, A. ; MORLIER, P. ; TRAM, V.**, (oct. 1992) : "Le béton de sable, un matériau non fissurant"; *Algérie-équipement, N°6, pp7-11.*
- [26] **Benazouk A, Mezreb K., Doyen G., Gouilleux A., Quéneudec M.** (2003): Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites- influence of the alveol texture of rubber aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 25, pp 711-720.
- [27] **Benmalek, M. ; Bali A.** (01-03 juin 1997): "Le béton de sable de dune, un matériau de construction performant pour le monde arabe"; *C.A.M, à Damas, Syrie.*
- [28] **Benmalek, M. ; Bali A.** (1997) : "Comportement du béton de sable dunaire sur des éléments d'ossature armés" *Séminaire national en génie civil ; M'sila,, Le 16-17 nov.*
- [29] **Bonneau P.** (1991) : Modélisation du séchage d'un matériau hétérogène : application à un bois résineux, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 245 pages.
- [30] **Bouguerra A.**, (1997) : Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux : Comportement hygrothermique des matériaux élaborés. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, , 212 p.
- [31] **Bouguerra A., Salee H., De Barquin F., Dkeilly R., Queneudec M.** (1999) : Isothermal moisture properties of wood-cement composites, *Cement and Concrete research*, vol. 29, n°3, p.339 347.
- [32] **Bouguerra A., Amiri O, Aý't-Mokhtar A, Diop MB.** (2002): Water sorptivity and pore structure of wood cementitious composites. *Mag Concrete Res* 2002;54(2):103–12.
- [33] **Bourgeat A., Goncharenko M., Panfilov M., Pankratov L.** (1999): A general double porosity model, *C.R. Acad. Sci. Paris, Série IIb*, 327, pp. 1245-1250.
- [34] **Bransier J.** (1972) : Contribution à l'étude de l'effusivité thermique. Thèse de Doctorat 3e Cycle, Paris 6, 110 p.
- [35] **Brigaud F., Vasseur G.**, (1989): Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophysical Journal*, Vol. 98, pp. 525-542.
- [36] **Campbell A. G.**, (1990): Wood ash disposal and recycling source book, *TAAPI Journal*, September 1990, p. 144-145.
- [37] **Carrel P., Louvigne M., Malaval R** (Avril 1982) : Le polystyrène expansé. *Le bâtiment bâtir*, pp28-34.
- [38] **Carslaw H.S., Jaeger J.C** (1959): *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford.
- [39] **Carsona J.K., Lovatta S.J., Tanner B D.J., Cleland A.C.**, (2003): An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations, *International Journal of Refrigeration*, Vol.26, pp. 873–880.
- [40] **C.E.B.T.P.**, (1985): "Béton de sable" ; *Rapport Interne.*
- [41] **C.E.B.T.P.**, Dec. (1986) : "Synthèse de connaissance sur le béton de sable" ; *Opération 52 G 119; LRPC de bordeaux.*
- [42] **Cernuschia F., Ahmaniemi S., Vuoristoc P., Mantyla T.**, (2004): Modelling of thermal conductivity of porous materials: application to thick thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2657–2667

- [43] **Chao-Lung Hwang, Meng-Feng Hung**, (2005): Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 19 (2005) 619-626.
- [44] **Chaouche, A.A. ; Bali A.** (1993) : "Etude caractéristique des bétons de sable de dune", *Thèse de magister; ENP Alger*.
- [46] **Chauvillard, G. ; BASSUYAUX, O.**, (Sept. - Oct.1996) : "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance Fixées"; *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)*, N°205.
- [47] **Chauvin, J.J. ; Grimaldi, G.**, (Sept. 1988) : "Les bétons de sable"; *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)* ; N°157, pp.9-15.
- [48] **Christopher H.** (1977): Water movement in porous building materials-I. Unsaturated flow theory and its applications. *Build. Environ*, pp 117-125.
- [49] **Christopher H.** (1981): Water movement in porous building materials-IV. The initial surface absorption and the sorptivity. *Build. Environ* 16 (3), pp 201-207.
- [50] **Christopher H., Thomas K.T** (1986): Water movement in porous building materials – VII - The sorptivity of mortars, *Bldg. Env.* 21 (1986) 113-118.
- [51] **Christopher. H, T. Kam Min Tse**, (1986): Water movement in porous building materials - VII: The sorptivity of mortars, *Bldg. Env.* 21 (1986) 113-118.
- [52] **Christopher H, M.H. Yau**, (1987): Water movement in porous building materials - IX: The water absorption and sorptivity of concretes, *Ibid* 22 (1987) 77-82.
- [53] **Christopher H**: Water sorptivity of mortars and concrete: a review, *Mag.Concrete.Res.* 41 (1989) 51-61.
- [54] **Christopher. H, Hoff W.D, Moira A.W** (1993): Effect of non sorptive inclusions on capillary absorption by a porous material, *J.Phys.D: Appl.Phys.*26, p.31.
- [55] **Christopher H., Kim G., William D. H. and Moira A. W.**, (1996): A sharp wet front analysis of capillary absorption into n-layer composite, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29** (1996) 2947–2950. Printed in the UK.
- [56] **Coquillat, G.**, (juin 1992) : "Béton de sable de haute-performance"; *Rapport CEBTP*.
- [57] **Cormon P** (1973) : *Bétons légers d'aujourd'hui*, ed. Eyrolles.
- [58] **COURET, B.** (1982) : "Utilisation du béton de sable en technique routière" ; *Projet de fin d'étude d'ingénieur ; I.U.T Bordeaux*.,
- [59] **Coussins W.J., Armstrong R.W., Robinson W.H.** (1975): Young's modulus of lignin from continuous indentation test, *J. Mater Sci*, vol. 10, n°10, p. 1655-1658.
- [60] **Cowdrey D.R, Preston R.D.** (1966): Elasticity and microfibrillar angle in xylem tissue of Sitka spruce, *Proc . R Soc, Lond B*, 166, p. 245-271.
- [61] **Crause P** (1983) : *Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieux poreux non saturé*, thèse de Doctorat d'état, I.N.P.Toulouse, p.210.
- [62] **Küntz M. and Lavallée P.** (2001): Experimental evidence and theoretical analysis of anomalous diffusion during water infiltration in porous building materials *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 2547–54.
- [63] **Daian J.F**, (1986) : *Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux. Etude expérimentale du mortier de ciment*, Thèse de docteur-Es Sciences Physiques Université scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble p.319.
- [64] **De Freitas V.P, Krus M, Kunzel H, Quenard D** (1991): Determination of the water diffusivity of porous materials by gamma-ray attenuation and NMR, *Moisture Problems in Building Walls, Science Projectt-2, CT91-0737*.
- [65] **Degiovanni A.** : *Conductivité et diffusivité thermique des solides, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R 2 850-15p*.

- [66] **Degiovanni A.**, : Transmission de l'énergie thermique : Conduction, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, BE 8 200, 25p.
- [67] **Deshpande S., Kulkarni A., Sampath S., Herman H.**, (2004): Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering, *Surface & Coatings Technology* 187; pp. 6–16.
- [68] **Devisme J.M.**, (1980) : Contribution à l'étude du comportement thermique des parois multicouches de bâtiment et à la mesure des caractéristiques thermophysiques des matériaux constitutifs, 214 p.
- [69] **De Vries, D.A** (1958): Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, *Transaction American Geophysical Union*, vol.39, n°5, pp. 909-916.
- [70] **Dil-Langer G., Aicher S.** (1997): Damage modelling of glulam in tension perpendicular to grain in variable climate, *Proc. CIB-W18/ 30-9-2*.
- [71] **Dinwoodie J.M.** (1981): *Timber, its nature and behaviour*, Van Nostrand Reinhold, New York, Macmillon,410 p.
- [72] **Dullein F. A. L.**, (1979) : *Porous media, fluid transport and pore structure*, Academic Press, London, 1979.
- [73] **Dupre B., Marmoret L., Quéneudec M.**, (2004) : Application de la modélisation par homogénéisation autocohérente à la détermination de la conductivité thermique de bétons ligno-cellulosiques, Congrès Français de Thermique, SFT 2004, Presqu'île de Giens, 25-28 mai 2004, pp.607-612.
- [74] **Estafieci M., Muntean O., Munrean M.** (2002)] : Influence of the wood waste characteristics and its chemical treatment on the composites properties, NOCMAT/3 – Vietnam International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies, 12-13 Mars 2002- Hanoi – Vietnam.
- [75] **Eustafieci M., Stoleriu St., Volceanov A.**, (2002): Concrete with vegetable aggregates, NOCMAT/3 – Vietnam International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies, 12-13 Mars 2002- Hanoi – Vietnam.
- [76] **Fehrs J. E.**, (1996): Ash from the combustion of treated wood: Characterisation and management option, National Bioash Utilisation of treated wood Conference, Portland.
- [77] **Feret R.** (1892) : Sur la compacité des mortiers hydrauliques, *Annales de pont et Chaussée*, pp. 151-161.
- [78] **Ferrer M.**, (1985) : Bétons légers isolants à base de billes de polystyrène. Thèse de doct. Ing. Université de Clermont Ferrand, 62p.
- [79] **Fricke H.**, (1924): A mathematical treatment of the electric conductivity of disperse systems: the electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids. *Phys. Rev.* **24**, p. 575.
- [80] **Glaztmaier G.C., Ramirez W.F.**, (1988): Use of volume averaging for the modelling of thermal properties of porous materials, *Chem. Eng. Sci.* Vol. 43, N°12, pp. 3157–3169
- [81] **Gori F.**, (1983): A theoretical model for predicting the effective thermal conductivity of unsaturated frozen soils. The Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, USA, pp. 363–368.
- [82] **Gori F., Corasaniti S.**, (2003): Theoretical prediction of the thermal conductivity and temperature variation inside mars soil analogues, *Planetary and space Science*, In press, (Corrected Proof).
- [83] **Gotteicha M.**, (2005) : Caractérisation des bétons de sable a base de copeaux de bois traités, thèse de Magister soutenue en Juin 2005, Université Amar thelidji de Laghouat, Algérie.
- [84] **Goual M.S.**, (2001) : Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : Caractérisation et comportement thermohydrrique. Thèse Doctorat d'état soutenue le 28 fev. à l'ENP d'Alger, 150 p.
- [85] **Goual M.S., de Barqun F., Benmalek M., Bali A, Quneudec M.**, (2000): Estimation of the capillary transport coefficient of Clayed Aerated Concrete using a gravimetric technique, *Cem.Concr.Res.* 30 (2000) 1559-1563.11.
- [86] **Gunderson D.E.** (1989): Method of measuring mechanosorptive properties, *Mechanics of Cellulosic and Polymeric materials*, AMD, 99, p. 157-166.
- [87] **Guoxue Z.**, (2006), **Jianxia Song, Jiansen Yang, Xiyuan Liu**, (2006): Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand, *Building and Environment*, 41 (006) 1478-1481.

- [88] **Gustafsson S.E.**, (1991): Transient plane source techniques for thermal diffusivity measurement of solid materials, *Review Scientific Instruments*, vol. 62, N° 3, pp. 777-804.
- [89] **Gustafsson S.E.**, (1987): Transient hot strip techniques for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity, *The Rig. Journal* Vol. 4, N° 1, pp.16-28.
- [90] **Hamdami N., Monteau J.Y., Le bail A.**, (2003): Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures, *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 26, Issue 7, pp. 809-816.
- [91] **Hanhijärvi A. Ranta-Maunus A.**, (1990): A three-dimensional analysis of wooden beams in bending under changing humidity conditions, *Proc, UIFRO/ S5.02*.
- [92] **Hasselmann D. P. H.** (1963): Relation between effect of porosity on strength and on Young's modulus of elasticity of poly crystalline materials, *Journal of the American Ceramic Society*, vol.46, n°11, pp.564-565.
- [93] **Hashin Z., Shtrikman S.**, (1962): Variational approach of the theory of the effective permeability of multiphase materials, *Journal of Applied physics*, Vol. 33, n° 10, pp. 3125-3131.
- [94] **Hay B., Filtz, J., R., batsale J.C.**, : Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash, *Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle*, R 2 955, 12p.
- [95] **Hladik J.**, (1990) : *Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux*, Masson
- [96] **Ho D.W., Lewis R.K.**, (1987): The water sorptivity of concrete: the influence of constituents under conditions curing, *Durab.Buildg.Mater.*, 4 (1987) 241-252.
- [97] **Horai K.I., Baldrige S.**, (1972): Thermal conductivity of nineteen igneous rocks, II, estimation of the thermal conductivity of rocks from the mineral and chemical compositions, *Phys. Earth Planet. Interiors*, Vol. 5, pp 157-166.
- [98] **Hwang C.L., Hung M.F.**, (2002): Durability consideration of self-consolidating concrete. In *Proceedings of first North American conference on the design and use of self consolidating concrete*, ACBM, Northwestern University, USA; 2002. p. 385–90.
- [99] **High strength concrete**, (1990): State of the Art Report, FIP/CEB Bulletin d'Information, N°197, 1990.
- [100] **Jackson W.K., Black W.Z.**, (1983): A unit model for predicting the thermal conductivity of a granular medium containing an adhesive binder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, 1401 pp. 87-99.
- [101] **Jaggiwanram Singh R.**, (2004): Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2727–2735.
- [102] **Jambor J.** (1973): In *Proceedings of the International Conference on Pore Structure and Properties of materials (RILEM/UPAC, Prague, vol. II,p.75*.
- [103] **Jannot Y.** (2003) : Isothermes de sorption : modèles et détermination, 15p. <http://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf>
- [104] **Jauberthie R., Rendell F., Tamba S., Cisse' I.K.**, (2003): Properties of cement–rice husk mixture. *Constr Build Mater* 2003;17(4):239–43
- [105] **Jennifer L., Pehanich, Blankenhorn P. R., Silsbee M. R.** (2004): Wood fiber surface treatment level effects on select mechanical properties of wood fiber-cement composite, *Cement and concrete research*, vol. n° 34, p.59-65.
- [106] **Jiickel M.**, (1995): Thermal properties of polymer/particle composites at low temperatures, *Cryogenics*, Vol. 35, N°11, pp. 713-716.
- [107] **Kass J.L and Campbell D** (1972): Functional classification of lightweight concrete, *Matériaux et Constructions*, Vol.5 N°27, pp171-172.
- [108] **Kaufmann J, Studer W, Link J, and Schenker K** (1997): Study of water suction of concrete with magnetic resonance imaging method, *Magazine of Concrete Research*, n°180, pp 157 – 165.
- [109] **Krenkler K.**, (1980): "Chemie des Bauwesens", Band 1, Springer, Berlin.
- [110] **Kubicar L., Bohac V.**, (1999): Review of several dynamic methods for measuring thermophysical parameters, in *Proc. of the 24th Int. Thermal conductivity conference/12th Int. Thermal expansion symposium*, Eds.: P.S. Gaal, D.E. Apostolescu, Technomic, Lancaster, PA, p. 135-149.
- [111] **Lassere B.** (2000) : Modélisation thermo-hygro-mécanique du comportement différé de poutre de structure en bois, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, France, 187 pages.

- [112] **Laidoudi B.**, (2005) : Contribution à la valorisation de déchets de caoutchouc dans une matrice cimentaire : caractérisation physico thermique et évaluation des performances à différents degrés d'humidité. - étude expérimentale et modélisation- Thèse de doctorat, soutenue à l'IUT d'Amiens, Juin 2005, pp.213.
- [113] **Laurent J.P et Guerre-Chaley, C.**, (1995) : Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé. *Matériaux de construction*, vol.28, pp.464-472.
- [114] **Laurent J. P.**, (1987): Propriétés du matériau terre. *Cahiers du CSTB-279*, mai 1987, Cahier 2156.
- [115] **Laurent J.P.**, (1991) : La conductivité thermique à sec des bétons autoclavés : un modèle conceptuel. *Matériaux et Constructions*, Vol. 24, N°141, pp. 221-226.
- [116] **Ledhem A.**, (1997) : Contribution à l'étude d'un béton de bois. Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 161 p.
- [117] **Le Neindre B.**, : Mesure de la conductivité thermique des liquides et des gaz, *Techniques de l'Ingénieur*, traité Mesures et Contrôle, R 2 920, 21p.
- [118] **Long Yue et al**, (2000): Properties and microstructures of plant – fiber – reinforced cement composites, *Cement and Concrete research*, vol. 30, n° 6, p.1983-1986.
- [119] **Luping T**, (1996): "Chloride Transport in Concrete - measurements and prediction", Diss. Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Publication P-96: 6.
- [120] **Madjoudj N.** (2004) : Valorisation de fines argileuses d'exploitation par moussage protéinique et optimisation des performances du matériau élaboré, Thèse de Doctorat soutenue en juin, Univ. de Picardie Jules Verne, Amiens, France, p 171.
- [121] **Mangal R., Saxena N.S., Sreekala M.S., Thomas S., Singh K.**, (2003): Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites, *Materials Science and Engineering A339*, pp.281-285.
- [122] **Manning D. G. et Hope B. B.** (1971): The effect of porosity on the compressive strength and elastic modulus of polymer impregnated concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 1, pp.631-644.
- [123] **Margat J., Janvier** (2000) : Porosité *Etymologie, Histoire et Typologie*, <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICPOROS.HTML>.
- [124] **Marius Eustafievici, Ovidiu Muntean, Marcela Muntean**, (2002): Influence of the waste characteristics and its chemical treatment on the composites properties, NOCMAT/3- Vietnam, International Conférence on Non-Conventionnal Materials and Technologies, 12-13 mars 2002, pp. 107-112, Hanoi , Vietnam.
- [125] **Marmoret L.**, (1998) : Utilisation d'un matériau poreux dans une paroi régulatrice. Modélisation et étude expérimentale des transferts de masse et de chaleur en modes chauffage et rafraîchissement. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 253 p.
- [126] **Martys N, Ferraris C**, (1997): Capillary transport in mortars and concretes, *Cem.Concr.Res* 27, 747-760.
- [127] **Mather B.**, (2000): Use less cement. *Concr Int* 2000; 22(11):55–6.
- [128] **Maxwell J.C.**, (1881): *A Treatise on Electricity and Magnetism*. (2nd ed., Vol. 1), Clarendon Press, Oxford.
- [129] **McCarter W. J, Watson D. W, Chrisp T.M**, (2001): Surface zone concrete: Drying, Absorption and Moisture Distribution, *J. of Mater. in Civ.Engin*, January.
- [130] **McCarter W. J, Chrisp T.M, Butler A, Basheer P.A.M**, (2001): Near-surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete, *Const.Bldg.Mater.* 15.
- [131] **Mehta P.K.**, (1986): *Concrete-structure properties, and materials*. New York: Prentice-Hall, Englewood-Cliffs; 1986.
- [132] **Mehta P.K.**, (2001): Burrows RW. Building durable structures in the 21<sup>st</sup> century. *Concr Int* 2001; 23(3):57–63.
- [133] **Mejlhede Jensen O, Freiesleben Hansen P, Coats A. M, Glasser F.P**, (1999): Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol.29, N.9, pp.1497-1504.
- [134] **Melka S.**, (1996) : Etude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans les milieux poreux granulaires pour l'isolation thermique, Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Paris, 127p.
- [135] **Meredith R.E., Tobias C.W.**, (1962): Conduction in heterogeneous systems. In: C.W. Tobias, Editor, *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*, Vol. 2, Interscience, New York, 15p.

- [136] **Mimoune F. Z., Mimoune M., and Laquerbe M.,** (1999): The use of fly ash in the compound wood-cement, *Proceeding of Creating with Concrete, Exploiting Waste in Concrete*, Dundee, p.227-232.
- [137] **Mindess S.** (1970): The relationship between the strength and microstructure of autoclaved calcium silicate materials, *Stansford University, Ph.D. Thesis*, p.180.
- [138] **Miniotraité R.** (2004): Influence of surface temperature on the water absorption of building materials, *ISSN 1392-1320 Material Science (Medziagotyra)*, vol. 10, n° 1.
- [139] **Mironova M, Gospodinov P, Kazandjiev R,** (2002): The effect of liquid push out of the materials capillaries under sulfate ion diffusion in cement composite, *Cem.Concr.Res* 32 (2002) 9-15.
- [140] **Morog D,** (1989) : Chronique technologique : du béton à partir de granulats de bois minéralisés : Procédés Agresta, comportement mécanique et principales utilisations. CII, Paris, *Bull. Bétons* 89, N°16, Janvier 1989, pp4-5.
- [141] **Mortreuil F.X., Lanos C., Jauberthie R., Associate-professors** (2002): Wood shavings lightweight concrete: Benefit of chemical treatments, *NOCMAT/3 – Vietnam International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies*, 12-13 Mars 2002- Hanoi – Vietnam.
- [142] **Naik T. R., Kraus R.N.,** (1999): Use of industrial products in cement-based materials, *Proceeding of Creating with Concrete, Exploiting Waste in Concrete*, Dundee, p. 23-35.
- [143] **Nenitescu C.D,** (1988): *Chimie Organica, Editura Tehnica, BBucuresti, Vol.2, pp. 287-308.*
- [144] **Neville A.,** (2000): Water and concrete: a love-hate relationship. *Concr Int* 2000;22(12):34-8.
- [145] **NFP 18-407:** Bétons, essai de flexion.
- [146] **NF P 15 433,** (Fev. 1994) : Méthodes d'essais des ciments – Détermination du retrait et du gonflement.
- [147] **NF P 18 425,** (Oct. 1994) : Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air et dégel dans l'eau.
- [148] **NF P 18 560,** (Sept. 1990) : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.
- [149] **NF P 18 598,** (Oct. 1991) : Granulats – Equivalent de sable.
- [150] **Ohdaira E, Mazuzawa N,** (2000): Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete - the possibility of NDE, *Ultrasonics* 38 (2000) 546-552. deLyon, 194p.
- [151] **Ouadi R,** (1991) : Conception d'un panneau sandwich isolant-porteur. Thèse de Doctorat de l'INSA.
- [152] **Pande R.N., Chaudhary D.R.,** (1984): Thermal conduction through loose and granular two-phase materials at normal pressure. *Pramana, Vol.23, pp. 599-605.*
- [153] **Pascale Coatanlem, Raoul Jauberthie, Frank Rendell,** (2006): Lightweight wood chipping concrete durability *Construction and Building Materials*, 20 (2006), 779-781.
- [154] **Pasnzr, Klemarevski,** (1988): New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement, *Proceeding of the International Conference on fiber and particle boards bonded with Inorganic Binders, University of Idaho, October 24-26.*
- [155] **Pel L,** (1995): Moisture transport in porous building materials, *Ph.D Thesis, Eindhoven University of technology, the Netherlands*, p.127.
- [156] **Perrin B.,** (1985) : Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en Génie Civil. Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse. 267p.
- [157] **Perrin B, Javelas R** (1987) : Transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux consolidés utilisés en génie civil. *Int. J. Heat mass Transfert*, vol.30, n°2, pp 297 – 309.
- [158] **Philip J.R (1957) :** The theory of infiltration:4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci* 84, pp257-264.

- [159] **Philippi I., Batsale J.C., Maillet D., Degiovanni A.**, (1994) : Traitement d'images infrarouges par transformation intégrale : Application à la mesure de diffusivité thermique de matériaux anisotropes par méthode flash, Rev. Gén. Thermique, pp. 486-496.
- [160] **Pimienta P., Chaudzllier J., Rubaud M., Dutruel F., Nicole H.**, (1994) : « Etude de la faisabilité des procédés de construction à base de béton légers d'aujourd'hui », Cahier ce CSTB, Janv. - Fev. 1994.
- [161] **Powers T. C.** (1960): Physical properties of cement paste, Chemistry of cement, Proceedings of the Fourth International Symposium, Washington, National Bureau of Standards Monograph 43, vol. II, pp. 577-643.
- [162] Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1994) : "Béton de sable, Caractéristiques et pratique d'utilisation" ; *Projet " SABLOCRETE "*.
- [163] **Princigallo A., Van Breugel K., Levita G.**, (2003): Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes, Cement and Concrete Research, Vol. 33, Issue 11, pp. 1755-1763.
- [164] **Purzak J, Lunk P** (1992): Capillary suction of AA , advances in Autoclaved Aerated Concrete, Wittmann edition, Bakema, Rotterdam, pp. 119.
- [165] **Quenard D.**, (1989) : Adsorption et transfert d'humidité dans les matériaux hygroscopiques: approche du type percolation et expérimentation, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [166] **Rapport- SABLOCRETE** (1987-1991) : Dossier de propositions ; Centre d'études techniques de l'équipement du sud-ouest ; Laboratoire régional de Bordeaux (Coopération FRANCO-SOVIETIQUE). N°205, Sept. - oct. 1996.
- [167] **Recueil de Communication** (1991) : Séminaire franco- soviétique tenu le 6 et 7 nov. à Bordeaux
- [168] **RILEM** (1970) : Commission des bétons légers ; Terminologie et définitions. Matériaux et Construction, N°13, pp60-69.
- [169] **Rilem CPC 11.1** (1974): Absorption of water by immersion, **CPC 11.2**: Absorption of water by capillarity, Mater. Struct, 7, pp 291-297.
- [170] **Rodríguez-Pérez M.A., Reglero J.A., Lehmus D., Wichmann M., DE Saja J.A., Fernández A.**, (2003), the transient plane source technique (TPS) to measure thermal conductivity and its potential as a tool to detect in homogeneities in metal foams. International Conference "advanced metallic materials" 5-7 november, smolenice, slovakia.
- [171] **Ruzicka m.**, (1998) : Optimisation d'un procédé de moussage protéinique de pâtes argile-ciment. Conséquences sur le comportement physico-mécanique du matériau durci. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 187 p.
- [172] **Ryshkevitch E.** (1953): Compressive strength of porous sintered alumina and zirconia, 9<sup>th</sup> Communication to ceramography, Journal of th American Ceramic Society, vol. 36, n°2, pp.65-68.
- [173] **Sabir B, Wild S, O'Farrell M, A.** Water sorptivity for mortar and concrete, Materials and Structures 31 (1998) 568-574.
- [174] **Saleh A. Al-Ajlan**, (2006): Measurement of properties of insulation materials by transient plane source technique, Applied Thermal Engineering 26 (20069) 2184-2191.
- [175] **Salmen L.** (1986): Paper Structure and properties, Eds J.A. Bristow and P. Kolseth, Marcel Dekker, inc, NY, p.51.
- [176] **Savastano A., Wardenb P.G., Coutts R.S.P.**,(2003): Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. Cement Concrete Compos 2003; 25(6):585-92.
- [177] **Saxena N.S., Mousa M., Imran A., Singh K.**, (2002): Simultaneous measurements of thermal conductivity and diffusivity of Se80Te20, chalcogenide glasses at room temperature, Bull. Mater. Sci., Vol. 25, No. 3, June 2002, pp. 241-245.
- [178] **Schiller K. K.**, (1960): Skeleton strength and critical porosity in set sulphate plasters, British Journal of Applied Physics, vol. 11, n° 8, pp.338-342.
- [179] **Schwartz, Simatupang**, (1983): Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Portlandzement auf die Druck festigkeit von Versuchkörpern aus Zement und Fichten-oder Buchenspänen, Holz als Roh-und Werkstoff, vol.41, pp. 338-342.

- [180] **Sereda P.J., Feldman R. F., Ramachandran V. S.,** (1980): Structure formation and development in hardened cement pastes, Conseil National de Recherche du Canada OTTAWA-CANADA.
- [181] **Siddique R.,** (2004): Properties of concrete incorporating high volume of class F fly ash and san fibers. *Cement Concrete Research* 2004; 34(1):37–42.
- [182] **Sionneau P., Perrier F., Queneudec M., T'Kint de roodenbeke A** (1994) : Etude des propriétés d'un matériau composite à base d'isichanvre. *Revue Internationale d'héliotechnique*, N°9, pp.12-25.
- [183] **Steopoe,** (1970) : « Durabilité du béton » éd. Eyrolles, Paris.
- [184] **Tamba S, Jauberthie R, Lanos C, Rendell F,** (2001): Lightweight wood fibre concrete. *Concrete Sci Eng* 2001; 3:53–7.
- [185] **Tasserie M.** (1991): Optimisation physico-chimique d'un verre expansé. Thèse de Doctorat, Université de Rennes ; Juin 1991, 149p.
- [186] **Teoreanu I., Stoleriu St.Volveanov A.,** (2002): Concrete with vegetable aggregates, NOCMAT/3-Vietnam International Conference On Non-Conventional Materials and Technologies, 12-13 mars 2002- Hanoi – Vietnam, pp..237-242.
- [187] **Thoft-Christensen P.,** (2001): "What Happens with Reinforced Concrete Structures when the Reinforcement Corrodes", Proc. I. Workshop on "Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems", Ube, Yamaguchi, Japan, September.
- [188] **Thoft-Christensen P.,** (2002): Deterioration of Concrete Structures, First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, LABMAS.
- [189] **Torrati T.** (1992): Creep of timber beams in a variable environment, Phd thesis, Helsinki University of technology, Finland.
- [190] **Tsivilisa S., Batisa G., Chaniotakis E., Grigoriadis Gr., Theodossisa D.,** (2000): Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar, *Cement and Concrete research*, 30 (2000), 1679-1683.
- [191] **Tsoumis** (1991): Science and Technology of wood: Structure, Proprieties, Utilization, Van Nostrand Reinhold New York, 494 p.
- [192] **Van Elten G. J.,** (1995: Innovation in the production of cement bonded particleboard and wood-wool cement board, 5<sup>th</sup> International Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Spokane, Washington, USA.
- [193] **Venuat, M.,** : "La pratique ciments, mortiers et bétons", (tome II) ; Ed du moniteur.
- [194] **Walker J.C.F., Butterfield B.G.** (1996): The importance of microfibril angle for the processing industries, *New Zealand Forestry*, 40, p. 34-40.
- [195] **Watson K.L.,** (1980): Autoclaved aerated concrete from slate waste, Part 2 : some property/porosity relationship, *International Journal of lightweight Concrete*, vol. 2, p.12.
- [196] **Weber, L., Dorn, J., Mortensen, A.,** (1999): On the electrical conductivity of metal matrix composites containing high volume fractions of non-conducting inclusions, *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 3199–3211.
- [197] **Weigler H., Karl S.,** (1989): "Beton / Arten-Herstellung-Eigenschaften", Ernst, Berlin.
- [198] **Wischers G.,** (1961): Béton, vol.11, p.481.
- [199] **Wood L. W.** (1947): Behaviour of wood under continued loading, *Eng. New-Record*, 139, p. 108-111.
- [200] **Woodside., Messmer,** (1961): Thermal conductivity of porous media, 1 Unconsolidated sands & 2 consolidated rocks, *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, N°9, pp. 420-427.
- [201] **Wyllie M.R.J., Soltthwick P.F.,** (1954): *Journal of Petrol. Technol*, pp.6-44.
- [202] **Ye G., Van Breugel K., Fraaij A.L.A.,** (2003): Three-dimensional microstructure analysis of numerically simulated cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 pp.215–222.
- [203] **Zhang X., Degiovanni A., Maillet D.,** (1993): Hot wire measurement of thermal conductivity of solids: a new approach High Temperatures-High Pressures, vol. 25, pp 577-584,

- 
- [204] **Yun-long Yue, Guo-zhong Li, Xin-sheng Xu, Zhong-jian Zhao**, (2000): Properties and microstructures of plant-fibber-reinforced cement-based composites, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000), 1983 – 1986.
- [205] **Zhang X. X.**, (1993): Métrologie thermique par méthode quasi-stationnaire: modélisation, identification et application à la caractérisation de solides, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 230 p.
- [206] **ZHANG X. X., DEGIOVANNI A.**, 1993, Mesure de l'effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de sonde plane, *Phys. III France* 3, pp. 1243-1265.