



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie civil

**INFLUENCE DES AJOUTS MINÉRAUX, DES GRANULATS
FINS, DE LA TEMPÉRATURE ET DU RAPPORT EAU/LIANT
SUR LE DÉVELOPPEMENT ET LE CONTRÔLE DU
RETRAIT ENDOGÈNE DES MATRICES CIMENTAIRES**

Thèse de doctorat ès sciences appliquées
Spécialité : Génie civil

Jury :
Richard Gagné (directeur)
Pierre-Claude Aïtcin
Jean-Philippe Charron
Ammar Yahia

Aleksandra POPIC

Sherbrooke (Québec), Canada

Septembre 2010

IV - 2079



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-70614-5
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-70614-5

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la problématique de la réduction des gaz à effet de serre, les producteurs de ciment et de béton utilisent de plus en plus d'ajouts minéraux. Cette approche permet de diminuer le contenu en ciment des bétons et, par conséquent, les émissions totales de CO₂ associées à la fabrication du ciment et du béton. Dans ce contexte, il est important de mieux comprendre l'influence des ajouts minéraux sur le développement du retrait endogène des matrices cimentaires. Les ajouts minéraux choisis pour cette étude sont : une cendre volante de classe F, un laitier de haut fourneau et une fumée de silice. Le rôle des ajouts minéraux sur le développement du retrait endogène a été étudié en mesurant, pour différents taux de remplacement du ciment, pour différents rapports eau/liant (E/L) et pour différentes températures, l'évolution des variations volumiques endogènes en fonction du temps (0 – 14 jours). Ces variations volumiques ont été ensuite analysées en prenant en compte le degré d'hydratation du liant, le retrait chimique et la structure de la porosité capillaire mesurée à la fin de l'essai de retrait endogène. L'influence de la teneur en sable et du rapport E/L sur l'évolution des variations volumiques endogènes des mortiers en fonction du temps (0 – 7 jours) a été également étudié en prenant en compte le degré d'hydratation du liant.

Une technique expérimentale développée au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke permettant de mesurer le retrait endogène volumique des pâtes de ciment et des mortiers a été employée. Elle permet de mesurer simultanément les retraits endogènes externe et interne. La mesure du retrait endogène volumique des pâtes de ciment et des mortiers est réalisée en milieu scellé et sous une température contrôlée. En milieu scellé et avant la prise du ciment, la variation de volume est causée par le retrait chimique qui n'engendre qu'un retrait endogène externe relativement inoffensif du point de vue de la fissuration. Après la prise, la variation de volume comprend un retrait endogène externe et un retrait endogène interne. Le retrait endogène externe est causé par l'effet simultané du retrait chimique et de la dépression capillaire. Le retrait endogène interne correspond au volume total des vides gazeux formés dans la phase liquide contenue dans la porosité capillaire.

Cette recherche a aussi permis d'étudier l'influence de la structure de la porosité capillaire sur le développement du retrait endogène externe. Selon la loi de Laplace, la dépression capillaire

augmente avec la diminution du rayon de pore. On a tenté donc de vérifier expérimentalement la relation entre le retrait endogène externe après prise et le rayon des ménisques. Le rayon des ménisques a été déterminé à partir du retrait endogène interne et de la courbe de porosité cumulative. Il correspond au rayon maximal des pores dans lesquels se trouvent les ménisques à la fin de l'essai de retrait endogène.

Cette recherche a permis, pour la première fois, de quantifier précisément la composante interne du retrait endogène de matrices cimentaires. L'approche expérimentale a permis de mesurer, en cours d'hydratation, le volume des vides gazeux dans la porosité capillaire. Cette information permet ensuite de déterminer le rayon des ménisques à l'interface des phases gazeuse et liquide dans la porosité capillaire.

Selon les résultats de cette recherche le rapport E/L a un effet majeur sur le développement du retrait endogène en raison de son influence sur la structure de la porosité capillaire. La fumée de silice diminue le retrait chimique de la pâte de ciment, alors qu'elle augmente le retrait endogène externe en diminuant le rayon critique des pores. Ce raffinement de la porosité capillaire diminue le rayon des ménisques, augmente la dépression capillaire et, par conséquent, le retrait endogène. Les liants avec laitier produisent un retrait chimique plus important que le ciment Portland. Ils raffinent la porosité capillaire, ce qui augmente le retrait endogène. Les liants avec cendres volantes ont un retrait chimique plus faible que celle du ciment Portland pur car la cendre volante s'hydrate très peu au jeune âge. Les liants avec cendres volantes produisent, au jeune âge, un réseau de pores capillaire plus grossier, ce qui cause un retrait endogène moins important.

Une relation unique et linéaire a été établie entre le retrait endogène externe après la prise et l'inverse du rayon du ménisque. Cette relation peut être utilisée pour comprendre l'influence des paramètres de formulation (E/L, type et dosage du liant) sur l'intensité du retrait endogène externe.

Les mots clés : Ajouts minéraux; Cendre volante; Laitier; Fumée de silice; Matrices cimentaires; Retrait endogène; Retrait chimique; Porosité capillaire.

REMERCIEMENTS

Cette thèse de doctorat a été effectuée sous la direction de Monsieur Richard Gagné, professeur titulaire au Département de génie civil à l'Université de Sherbrooke. L'auteur tient à lui présenter ses plus sincères remerciements pour ses nombreux conseils, son encouragement constant et sa grande disponibilité.

Des remerciements sincères s'adressent également aux membres du jury de thèse, Messieurs Pierre-Claude Aïtcin, Jean-Philippe Charron et Ammar Yahia. Par une lecture attentive et des remarques appropriées, ceux-ci ont participé à l'amélioration de la qualité de ce document.

L'auteur tient à remercier le concepteur de la cellule de mesure du retrait endogène Monsieur Claude Poulin ainsi que les techniciens du Groupe Béton de l'Université de Sherbrooke qui ont participé à la réalisation du programme expérimental : Madame Ghislaine Luc et Messieurs Claude Faucher, Denis Bolduc, Sylvain Roy et Rajko Vojnovic.

L'auteur remercie également le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies et la section de Québec de l'American Concrete Institute de l'avoir soutenu financièrement durant ses travaux de recherche. Des remerciements s'adressent aussi aux membres du Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB).

Enfin, l'auteur tient à remercier son époux Ratko et ses enfants Boris et Ivana pour leur amour et leur soutien moral durant la réalisation de cette thèse de doctorat. Merci du fond du cœur.

À Ivana, Boris et Ratko

TABLE DES MATIÈRES

1	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	1
1.1	INTRODUCTION	1
1.2	PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX	1
1.2.1	<i>Ciment Portland</i>	<i>1</i>
1.2.2	<i>Fumée de silice</i>	<i>3</i>
1.2.3	<i>Cendres volantes.....</i>	<i>4</i>
1.2.4	<i>Laitier de haut fourneau.....</i>	<i>6</i>
1.3	HYDRATATION	9
1.3.2	<i>Cinétique de l'hydratation du ciment Portland</i>	<i>11</i>
1.3.3	<i>Hydratation du ciment en présence de la fumée de silice.....</i>	<i>16</i>
1.3.4	<i>Hydratation du ciment en présence des cendres volantes</i>	<i>17</i>
1.3.5	<i>Hydratation du ciment en présence du laitier.....</i>	<i>18</i>
1.4	MÉCANISMES À L'ORIGINE DU RETRAIT DE DESSICCATION ET DE L'AUTODESSICCATION	20
1.4.1	<i>Porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment</i>	<i>20</i>
1.4.2	<i>Variation de la dépression capillaire</i>	<i>21</i>
1.4.3	<i>Variation de la tension superficielle des particules colloïdales</i>	<i>23</i>
1.4.4	<i>Variation de la pression de disjonction.....</i>	<i>24</i>
1.5	DEGRÉ D'HYDRATATION	25
1.6	RETRAIT ENDOGÈNE.....	27
1.6.1	<i>Retrait endogène d'origine chimique ou la contraction Le Chatelier</i>	<i>28</i>
1.6.2	<i>Équations de Powers</i>	<i>30</i>
1.6.3	<i>Retrait endogène d'origine physique ou le retrait d'autodessiccation.....</i>	<i>33</i>
1.7	INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LE RETRAIT ENDOGÈNE.....	34
1.8	GONFLEMENT AU JEUNE ÂGE	36
1.9	MESURE DE LA CONTRACTION LE CHATELIER	37
1.9.1	<i>Mesures dilatométriques.....</i>	<i>37</i>
1.9.2	<i>Mesures gravimétriques</i>	<i>40</i>
1.10	MESURES DU RETRAIT ENDOGÈNE	42
1.10.1	<i>Mesures linéiques du retrait endogène</i>	<i>43</i>
1.10.2	<i>Mesures volumétriques du retrait endogène.....</i>	<i>52</i>
1.11	INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LA CONTRACTION LE CHATELIER ET SUR LE RETRAIT ENDOGÈNE	56
1.11.1	<i>Contraction Le Chatelier</i>	<i>56</i>
1.11.2	<i>Méthodes linéiques</i>	<i>61</i>
1.11.3	<i>Méthodes volumétriques</i>	<i>67</i>

1.12	MÛRISSEMENT DU BÉTON.....	72
2	BUT DE LA RECHERCHE, PROGRAMME ET PROCÉDURE DES ESSAIS	75
2.1	INTRODUCTION	75
2.2	BUT DE LA RECHERCHE	75
2.3	PROGRAMME DES ESSAIS.....	77
2.4	PROCÉDURE DES ESSAIS.....	79
2.4.1	<i>Caractérisation des poudres.....</i>	<i>79</i>
2.4.2.1	Fabrication des coulis.....	82
2.4.2.2	Point de saturation.....	83
2.4.2.3	Maniabilité des coulis.....	84
2.4.2.4	Conductivité électrique	85
2.4.2.5	Mesure de retrait endogène	86
2.4.2.6	Contraction Le Chatelier (retrait chimique)	101
2.4.2.7	Détermination de la quantité d'eau liée chimiquement et du degré d'hydratation	106
2.4.2.8	Porosité au mercure.....	108
2.4.3	<i>Caractérisation des mortiers</i>	<i>109</i>
2.4.3.1	Fabrication des mortiers.....	109
2.4.3.2	Maniabilité des mortiers.....	110
2.4.3.3	Masse volumique des mortiers.....	110
2.4.3.4	Conductivité électrique	111
2.4.3.5	Mesure du retrait endogène	111
2.4.3.6	L'eau liée chimiquement et le degré d'hydratation	111
2.4.3.7	Résistance à la compression.....	112
3	MATERIAUX ET MÉLANGES.....	113
3.1	INTRODUCTION	113
3.2	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	113
3.2.1	<i>Ciment</i>	<i>113</i>
3.2.2	<i>Fumée de silice</i>	<i>116</i>
3.2.3	<i>Laitier</i>	<i>117</i>
3.2.4	<i>Cendre volante.....</i>	<i>119</i>
3.2.5	<i>Sable.....</i>	<i>120</i>
3.2.6	<i>Superplastifiant.....</i>	<i>121</i>
3.2.7	<i>Eau.....</i>	<i>122</i>
3.3	MÉLANGES.....	122
3.3.1	<i>Coulis.....</i>	<i>122</i>
3.3.2	<i>Mortiers.....</i>	<i>124</i>

4	CARACTÉRISATION DES COULIS ET DES MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS	126
4.1	INTRODUCTION	126
4.2	CARACTÉRISATION DES COULIS À L'ÉTAT FRAIS.....	126
4.2.1	<i>Maniabilité des coulis</i>	126
4.2.2	<i>Point de saturation des coulis</i>	129
4.2.3	<i>Conductivité électrique des coulis</i>	135
4.2.3.1	Effet du rapport E/L sur la conductivité électrique des coulis.....	136
4.2.3.2	Effet du type de liant sur la conductivité électrique des coulis.....	141
4.2.3.3	Effet de la température sur la conductivité électrique des coulis.....	146
4.3	CARACTÉRISATION DES MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS.....	149
4.3.1	<i>Maniabilité, masse volumique et teneur en air des mortier</i>	149
4.3.2	<i>Conductivité électrique des mortiers</i>	151
4.3.2.1	Effet du rapport E/C sur la conductivité électrique des mortiers.....	151
4.3.2.2	Effet du sable sur la conductivité électrique des mortiers	153
5	EAU LIÉE CHIMIQUEMENT ET DEGRÉ D'HYDRATATION	154
5.1	INTRODUCTION	154
5.2	EAU LIÉE CHIMIQUEMENT DES COULIS SOUMIS AUX ESSAIS DE RETRAIT ENDOGÈNE.....	154
5.2.1	<i>Effet du rapport E/L et de l'âge du coulis sur la quantité d'eau liée chimiquement</i>	154
5.2.2	<i>Effet de la température sur la quantité d'eau liée chimiquement</i>	162
5.2.3	<i>Effet du type de liant sur la quantité d'eau liée chimiquement</i>	164
5.3	EAU LIÉE CHIMIQUEMENT DES MORTIERS SOUMIS AUX ESSAIS DE RETRAIT ENDOGÈNE.....	166
5.4	DEGRÉ D'HYDRATATION DES COULIS SOUMIS AUX ESSAIS DE RETRAIT ENDOGÈNE	167
5.4.1	<i>Effet du rapport E/L et de l'âge du coulis sur le degré d'hydratation</i>	168
5.4.2	<i>Effet de la température du coulis sur le degré d'hydratation</i>	178
5.4.3	<i>Effet du type de liant sur le degré d'hydratation des coulis</i>	178
5.5	DEGRÉ D'HYDRATATION DES MORTIERS SOUMIS AUX ESSAIS DE RETRAIT ENDOGÈNE	181
5.6	EAU LIÉE CHIMIQUEMENT ET DEGRÉ D'HYDRATATION DES COULIS SOUMIS AUX ESSAIS DE RETRAIT CHIMIQUE.....	182
5.6.1	<i>Effet de l'âge du coulis et du type de liant sur la quantité d'eau liée chimiquement</i>	183
5.6.2	<i>Effet de l'âge du coulis et du type de liant sur le degré d'hydratation</i>	184
5.7	COMPARAISON ENTRE LE DEGRÉ D'HYDRATATION DES COULIS SOUMIS AUX ESSAIS DE RETRAIT ENDOGÈNE ET DE RETRAIT CHIMIQUE	185
6	POROSITÉ AU MERCURE DES COULIS.....	189
6.1	INTRODUCTION	189
6.2	POROSITÉ VOLUMIQUE TOTALE DES COULIS.....	189
6.2.1	<i>Effet du rapport E/L sur la porosité volumique totale</i>	189
6.2.2	<i>Effet de la température sur la porosité volumique totale</i>	192

6.2.3	<i>Effet du type de liant sur la porosité volumique totale</i>	193
6.3	DISTRIBUTION DES PORES DANS LES COULIS	193
6.3.1	<i>Effet du rapport E/L sur la distribution des pores</i>	193
6.3.2	<i>Effet de la température sur la distribution des pores</i>	196
6.3.3	<i>Effet du type de liant sur la distribution des pores</i>	198
6.4	RAYON CRITIQUE DES PORES DANS LES COULIS	203
6.4.1	<i>Effet du rapport E/L sur le rayon critique des pores</i>	203
6.4.2	<i>Effet de la température sur le rayon critique des pores</i>	208
6.4.3	<i>Effet du type de liant sur le rayon critique des pores</i>	210
6.5	VOLUME RELATIF DES PORES DANS LES COULIS	212
7	RETRAIT ENDOGÈNE DES COULIS	236
7.1	INTRODUCTION	236
7.2	BILAN VOLUMÉTRIQUE DES DIVERSES PHASES MINÉRALES	236
7.3	ANALYSE ET TRAITEMENT DES MESURES BRUTES DE CHANGEMENT DE VOLUME	242
7.3.1	<i>Retrait endogène interne</i>	242
7.3.2	<i>Retrait endogène externe</i>	244
7.3.3	<i>Retrait endogène total</i>	246
7.4	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DE RETRAIT ENDOGÈNE INTERNE MESURÉ PENDANT SEPT JOURS	247
7.4.1	<i>Influence du rapport E/L</i>	247
7.4.2	<i>Influence de la température</i>	250
7.4.3	<i>Influence du type de liant</i>	254
7.5	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DE RETRAIT ENDOGÈNE INTERNE MESURÉ PENDANT QUATORZE JOURS	260
7.5.1	<i>Influence du rapport E/L et de l'âge du coulis</i>	260
7.5.2	<i>Influence du type de liant</i>	261
7.6	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DU RETRAIT ENDOGÈNE EXTERNE MESURÉ PENDANT SEPT JOURS	263
7.6.1	<i>Influence du rapport E/L</i>	263
7.6.2	<i>Influence de la température</i>	264
7.6.3	<i>Influence du type de liant</i>	267
7.7	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DE RETRAIT ENDOGÈNE EXTERNE MESURÉ PENDANT QUATORZE JOURS	272
7.7.1	<i>Influence du rapport E/L et de l'âge du coulis</i>	272
7.7.2	<i>Influence du type de liant</i>	273
7.8	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DU RETRAIT ENDOGÈNE TOTAL MESURÉ PENDANT SEPT JOURS	275

7.8.1	<i>Influence du rapport E/L</i>	275
7.8.2	<i>Influence de la température</i>	276
7.8.3	<i>Influence du type de liant</i>	279
7.9	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DE RETRAIT ENDOGÈNE TOTAL MESURÉ PENDANT QUATORZE JOURS	284
7.9.1	<i>Influence du rapport E/L et de l'âge du coulis</i>	284
7.9.2	<i>Influence du type de liant</i>	285
7.10	RETRAIT ENDOGÈNE INTERNE À 7 JOURS	287
7.10.1	<i>Effet du rapport E/L sur le retrait endogène interne à 7 jours</i>	287
7.10.2	<i>Effet de la température sur le retrait endogène interne à 7 jours</i>	296
7.10.3	<i>Effet du type de liant sur le retrait endogène interne à 7 jours</i>	297
7.10.4	<i>Effet de l'âge du coulis sur le retrait endogène interne</i>	307
7.10.5	<i>Effet du type de liant sur le retrait interne à 14 jours</i>	315
7.11	RELATION ENTRE LE RETRAIT ENDOGÈNE INTERNE ET LE DEGRÉ D'HYDRATATION DES COULIS	318
7.12	RETRAIT ENDOGÈNE EXTERNE À 7 JOURS	325
7.12.1	<i>Effet du rapport E/L sur le retrait endogène externe à 7 jours</i>	325
7.12.2	<i>Effet de la température sur le retrait endogène externe à 7 jours</i>	328
7.12.3	<i>Effet du type de liant sur le retrait endogène externe à 7 jours</i>	343
7.12.4	<i>Effet de l'âge du coulis sur le retrait endogène externe</i>	350
7.12.5	<i>Effet du type de liant sur le retrait endogène externe à 14 jours</i>	350
7.13	RELATION ENTRE LE RETRAIT ENDOGÈNE EXTERNE ET LE RAYON CRITIQUE DES PORES	369
8	RETRAIT ENDOGÈNE DES MORTIERS	373
8.1	INTRODUCTION	373
8.2	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DU RETRAIT ENDOGÈNE INTERNE DES MORTIERS	373
8.2.1	<i>Influence du rapport E/L</i>	373
8.2.2	<i>Influence de la teneur en sable</i>	375
8.3	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DU RETRAIT ENDOGÈNE EXTERNE DES MORTIERS	377
8.3.1	<i>Influence du rapport E/L</i>	377
8.3.2	<i>Influence de la teneur en sable</i>	377
8.4	INTERPRÉTATION ET COMPARAISON DES COURBES DU RETRAIT ENDOGÈNE TOTAL DES MORTIERS	381
8.4.1	<i>Influence du rapport E/L et de la teneur en sable</i>	381
8.5	RETRAIT INTERNE DES MORTIERS À 7 JOURS	384
8.5.1	<i>Effet du rapport E/L sur le retrait endogène interne</i>	384
8.5.2	<i>Effet de la teneur en sable sur le retrait endogène interne</i>	385

8.6	RETRAIT EXTERNE DES MORTIERS À 7 JOURS.....	386
8.6.1	<i>Influence du rapport E/L sur le retrait endogène externe</i>	<i>386</i>
8.6.2	<i>Influence de la teneur en sable sur le retrait endogène externe</i>	<i>388</i>
8.7	RELATION ENTRE LE RETRAIT ENDOGÈNE INTERNE ET LE DEGRÉ D'HYDRATATION DES MORTIERS.....	390
8.8	RELATION ENTRE LES RETRAITS ENDOGÈNES ET LA TENEUR EN SABLE DU MORTIER.....	391
8.9	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES MORTIERS	395
9	RETRAIT CHIMIQUE (CONTRACTION LE CHATELIER).....	398
9.1	INTRODUCTION	398
9.2	RETRAIT CHIMIQUE DES COULIS	398
10	SYNTHÈSE.....	404
10.1	EFFET DU TYPE DE LIANT	404
10.1.1	<i>Coulis à 100 % ciment Portland.....</i>	<i>404</i>
10.1.2	<i>Coulis avec 8% de fumée de silice.....</i>	<i>405</i>
10.1.3	<i>Coulis avec 25% et 50% de laitier.....</i>	<i>406</i>
10.1.4	<i>Coulis avec 15% et 30% de cendre volante.....</i>	<i>407</i>
10.1.5	<i>Synthèse sur l'effet des ajouts cimentaires.....</i>	<i>408</i>
10.2	EFFET DE LA TEMPÉRATURE	408
10.3	EFFET DU SQUELETTE GRANULAIRE	410
10.3.1	<i>Retrait interne</i>	<i>410</i>
10.3.2	<i>Retrait externe</i>	<i>410</i>
10.4	ANALYSE DE LA RELATION ENTRE LA STRUCTURE DE LA POROSITÉ CAPILLAIRE ET LE DÉVELOPPEMENT DU RETRAIT ENDOGÈNE	411
11	CONCLUSION.....	415
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	419
	ANNEXE A	426
	ANNEXE B.....	444
	ANNEXE C	455
	ANNEXE D	469
	ANNEXE E.....	483

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 - Flux thermique et la conductivité électrique lors de l'hydratation [adapté de Vernet et Cadoret, 1992]	11
Figure 1. 2 - Période de gâchage [Vernet et Cadoret, 1992]	13
Figure 1. 3 - Période dormante [Vernet et Cadoret, 1992]	14
Figure 1. 4 - Période de prise ou d'accélération [Vernet et Cadoret, 1992]	14
Figure 1. 5 - Période de durcissement [Vernet et Cadoret, 1992]	15
Figure 1. 6 - Période de ralentissement [Vernet et Cadoret, 1992]	15
Figure 1. 7 - Évolution de la quantité d'eau non évaporable en fonction du temps [Xu, 1992]	18
Figure 1. 8 - Principe de l'hydratation du laitier [Aïtcin, 2001 (b)]	19
Figure 1. 9 - Illustration de la loi de Laplace [Baroghel-Bouny, 1994]	22
Figure 1. 10 - Expérience de Le Chatelier [Aïtcin, 2001 (b)]	29
Figure 1. 11 - Bilan volumique de l'hydratation des pâtes de ciment ayant les rapports E/C de 0,50, 0,42 et 0,30 pour les différents degrés d'hydratation	32
Figure 1. 12 - Retrait endogène d'une pâte de ciment avec 20 % de fumée de silice, E/L = 0,30, pour les températures de mûrissement variant de 15°C à 40°C. Le temps est mesuré à partir de l'addition de l'eau. [Jensen, 1998]	35
Figure 1. 13 – Retrait endogène d'une pâte de ciment avec 20% de fumée de silice, E/L = 0,30. Temps est en âge équivalent à 20°C [Jensen, 1998]	36
Figure 1. 14 – Dispositif de mesure de la contraction Le Chatelier des pâtes et des mortier [Geiker, 1983]	38
Figure 1. 15 – Dispositif utilisé pour les mesures dilatométriques de la contraction Le Chatelier [Garcia Boivin, 1999]	40
Figure 1. 16 – Dispositif utilisé pour les mesures gravimétriques de la contraction Le Chatelier [Garcia Boivin, 1999]	41
Figure 1. 17 – Appareillage pour les mesures linéiques du retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b)]	44
Figure 1. 18 – Dilatomètre pour les mesures du retrait endogène [Jensen et Hansen, 1995]	45
Figure 1. 19 – Dispositif de mise en rotation des éprouvettes [Duval et coll., 1998]	46
Figure 1. 20 – Schéma des moules utilisés pour la mesure linéique du retrait endogène [Garcia Boivin, 1999]	47
Figure 1. 21 – Schéma du dispositif utilisé pour mesurer les déformations endogènes horizontales et verticales [Holt, 2001]	48

Figure 1. 22 – Schéma général de l'appareil de retrait restreint [Charron, 2003]	49
Figure 1. 23 – Schéma du système de conditionnement [Charron, 2003].....	50
Figure 1. 24 – Appareil de Del Campo [Buil, 1979].....	52
Figure 1. 25 – Dispositif de Setter et Roy [Setter et Roy, 1978].....	53
Figure 1. 26 - Schéma général du montage de retrait volumétrique [Charron, 2003].....	55
Figure 1. 27 – Influence de la fumée de silice et de la cendre volante sur le retrait chimique et externe des coulis [Justnes et coll., 1998 (b)]	58
Figure 1. 28 – Influence de 8% de fumée de silice sur le retrait chimique d'un coulis, $E/L = 0,45$ [Charron, 2003].....	59
Figure 1. 29 – Influence d'un superplastifiant et d'un réducteur de retrait sur le retrait chimique d'un coulis, $E/C = 0,30$ [Holt, 2001].....	60
Figure 1. 30 - Retrait chimique de la pâte et du mortier, $E/C = 0,35$ [Holt, 2001]	61
Figure 1. 31 - Influence du laitier sur le retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1997].....	64
Figure 1. 32 – Influence de la teneur en cendre volante sur le retrait endogène du béton [Schiebl et coll., 2000]	65
Figure 1. 33 – Influence du volume de granulat sur le retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b)].....	66
Figure 1. 34 - Retrait endogène externe à 7 jours des pâtes de ciment [Aouad, 1999].....	68
Figure 1. 35 - Retrait endogène interne à 7 jours des pâtes de ciment [Aouad, 1999].....	68
Figure 1. 36 – Influence de 8% de fumée de silice sur le retrait endogène externe d'un coulis, $E/L = 0,27$ [Charron, 2003].....	70
Figure 1. 37 – Influence de 8% de fumée de silice sur le retrait endogène externe d'un coulis, $E/L = 0,45$ [Charron, 2003].....	70
Figure 1. 38 – Effet de l'agent réducteur de retrait sur le retrait endogène externe [Aouad, 1999].....	71
Figure 1. 39 – Régimes de mûrissement les plus appropriés durant le développement de la réaction d'hydratation [Aïtcin, 2001 (a)].....	74
Figure 1. 40 – Début de mûrissement à l'eau destiné à la diminution du retrait endogène d'un BHP [Aïtcin, 2002].....	74
Figure 2. 1 - Composants du retrait endogène.....	76
Figure 2. 2 - Organigramme du choix des paramètres de composition des coulis et des mortiers	77
Figure 2. 3 - Organigramme du choix des essais de caractérisation	79
Figure 2. 4 - Diffraction par des plans réticulaires [Lea, 1970]	81
Figure 2. 5 - Cône Marsh [Aïtcin, 2001 (a)]	83

Figure 2. 6 - Point de saturation d'un coulis [Aïtcin, 2001 (a)]	84
Figure 2. 7 - Essai d'affaissement par la méthode du mini cône [Aïtcin, 2001 (a)].....	85
Figure 2. 8 - Cellule de mesure de la conductivité électrique	86
Figure 2. 9 - Schéma de la cellule de mesure du retrait endogène	89
Figure 2. 10 - Base, chapeau et la membrane en latex	90
Figure 2. 11 - Enceinte interne	90
Figure 2. 12 - Enceinte externe	91
Figure 2. 13 - Schéma du montage.....	92
Figure 2. 14 - Préparation de l'essai du retrait endogène [Aouad, 1999].....	95
Figure 2. 15 - Système de mesure par volume de contrôle	96
Figure 2. 16 – Évolution des lectures de changement volumique externe et interne [Aouad, 1999].....	99
Figure 2. 17 - Échantillon destiné aux mesures du retrait chimique	102
Figure 2. 18 - Essai de retrait chimique	103
Figure 3. 1 - Spectre de diffraction aux rayons X du ciment de Type 10 après traitement à l'acide salicylique, tube de cuivre	115
Figure 3. 2 - Courbes granulométriques du ciment, du laitier et de la cendre volante.....	115
Figure 3. 3 - Spectre de diffraction aux rayons X de la fumée de silice, tube de cuivre.....	117
Figure 3. 4 - Spectre de diffraction aux rayons X du laitier, tube de cuivre	118
Figure 3. 5 - Spectre de diffraction aux rayons X de la cendre volante de classe F, tube de cuivre	120
Figure 3. 6 - Granulométrie du sable normalisé.....	121
Figure 3. 7 - Clé pour identifier les coulis.....	122
Figure 3. 8 - Clé pour identifier les mortiers.....	124
Figure 4. 1 - Étalement des coulis sans ajouts minéraux.....	127
Figure 4. 2 - Étalement des coulis avec fumée de silice.....	128
Figure 4. 3 - Étalement des coulis avec laitier	128
Figure 4. 4 - Étalement des coulis avec cendre volante	129
Figure 4. 5 - Temps d'écoulement des coulis sans ajouts minéraux, E/C = 0,40 et 0,45	130
Figure 4. 6 - Temps d'écoulement des coulis sans ajouts minéraux, E/C = 0,30 et 0,35	130
Figure 4. 7 - Temps d'écoulement des coulis avec fumée de silice, E/L = 0,30 et 0,35	131
Figure 4. 8 - Temps d'écoulement des coulis avec 25 % de laitier, E/L = 0,30 et 0,35	132
Figure 4. 9 - Temps d'écoulement des coulis avec 50 % de laitier, E/L = 0,30 et 0,35	133
Figure 4. 10 - Temps d'écoulement des coulis avec 15 % de cendre volante, E/L = 0,30 et 0,35	134

Figure 4. 11 - Temps d'écoulement des coulis avec 30 % de cendre volante, E/L = 0,30 et 0,35.....	134
Figure 4. 12 - Conductivité électrique des coulis sans ajout minéraux (T = 20°C)	136
Figure 4. 13 - Conductivité électrique des coulis avec fumée de silice (T = 20°C).....	137
Figure 4. 14 - Conductivité électrique des coulis avec 25 % de laitier (T = 20°C).....	137
Figure 4. 15 - Conductivité électrique des coulis avec 50 % de laitier (T = 20°C).....	138
Figure 4. 16 - Conductivité électrique des coulis avec 15 % de cendre volante (T = 20°C).....	138
Figure 4. 17 - Conductivité électrique des coulis avec 30 % de cendre volante (T = 20°C).....	139
Figure 4. 18 - Conductivité électrique des coulis avec et sans fumée de silice (T = 20°C)	142
Figure 4. 19 - Conductivité électrique des coulis avec et sans laitier (T = 20°C).....	144
Figure 4. 20 - Conductivité électrique des coulis avec et sans cendre volante (T = 20°C).....	145
Figure 4. 21 - Conductivité électrique des coulis de référence à 10, 20 et 30°C (E/C = 0,35)	146
Figure 4. 22 – Conductivité électrique des coulis avec 8% de fumée de silice à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35).....	147
Figure 4. 23 – Conductivité électrique des coulis avec 25% de laitier à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35).....	147
Figure 4. 24 – Conductivité électrique des coulis avec 50% de laitier à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35).....	148
Figure 4. 25 – Conductivité électrique des coulis avec 15% de cendre volante à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35).....	148
Figure 4. 26 - Conductivité électrique des coulis avec 30% de cendre volante à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35).....	149
Figure 4. 27 - Conductivité électrique des mortiers (p/s = 1,6).....	152
Figure 4. 28 - Conductivité électrique des mortiers (p/s = 0,8).....	152
Figure 4. 29 - Conductivité électrique du coulis et des mortiers de rapport E/C = 0,35	153
Figure 5. 1 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis de référence	155
Figure 5. 2 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 8 % de fumée de silice	156
Figure 5. 3 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 25 % de laitier	156
Figure 5. 4 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 50 % de laitier	157
Figure 5. 5 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 15 % de cendre volante	157
Figure 5. 6 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 30 % de cendre volante	158
Figure 5. 7 - Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis de référence (T = 20°C).....	159
Figure 5. 8 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec fumée de silice (T = 20°C).....	159
Figure 5. 9 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 25% de laitier (T = 20°C).....	160

Figure 5. 10 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 50% de laitier (T = 20°C).....	160
Figure 5. 11 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 15% de cendre volante (T = 20°C)	161
Figure 5. 12 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 30% de cendre volante (T = 20°C)	161
Figure 5. 13 - Eau liée chimiquement des coulis de rapport E/L = 0,30.....	162
Figure 5. 14 - Eau liée chimiquement des coulis de rapport E/L = 0,35.....	163
Figure 5. 15 - Eau liée chimiquement des coulis de rapport E/L = 0,45.....	163
Figure 5. 16 - Eau liée chimiquement à 14 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45 ; T = 20°C).....	165
Figure 5. 17 - Eau liée chimiquement des coulis et des mortiers à 7 jours (T = 20°C).....	166
Figure 5. 18 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis de référence.....	169
Figure 5. 19 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice.....	170
Figure 5. 20 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 25% de laitier.....	170
Figure 5. 21 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 50% de laitier.....	171
Figure 5. 22 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante.....	171
Figure 5. 23 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante.....	172
Figure 5. 24 – Augmentation moyenne du degré d'hydratation due à l'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,45 après 7 jours.....	173
Figure 5. 25 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis de référence.....	174
Figure 5. 26 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 8% de fumée de silice.....	174
Figure 5. 27 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 25% de laitier.....	175
Figure 5. 28 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 50% de laitier.....	175
Figure 5. 29 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 15% de cendre volante.....	176
Figure 5. 30 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 30% de cendre volante.....	176
Figure 5. 31 - Augmentation moyenne du degré d'hydratation entre 7 et 14 jours.....	177
Figure 5. 32 – Augmentation du degré d'hydratation due à l'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,45 après 14 jours (T = 20°C)	177
Figure 5. 33 - Degré d'hydratation à 7 jours pour les différentes températures (E/L = 0,30).....	179
Figure 5. 34 - Degré d'hydratation à 7 jours pour les différentes températures (E/L = 0,35).....	180
Figure 5. 35 - Degré d'hydratation à 7 jours pour les différentes températures (E/L = 0,45).....	180
Figure 5. 36 - Degré d'hydratation des coulis à 14 jours (E/L = 0,30 à 0,45 ; T = 20°C).....	181
Figure 5. 37 - Degré d'hydratation des coulis et des mortiers à 7 jours (T = 20°C).....	182
Figure 5. 38 - Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis soumis aux essais de retrait chimique (E/L = 0,45 et T = 20°C).....	183

Figure 5. 39 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis soumis aux essais de retrait chimique (E/L = 0,45 et T = 20°C)	184
Figure 5. 40 - Degré d'hydratation à 7 jours suite aux essais de retrait chimique et de retrait endogène (E/L = 0,45 et T = 20°C).....	186
Figure 5. 41 - Degré d'hydratation à 14 jours suite aux essais de retrait chimique et de retrait endogène (E/L = 0,45 et T = 20°C).....	187
Figure 5. 42 - Augmentation du degré d'hydratation entre le retrait chimique et le retrait endogène après 7 et 14 jours d'hydratation.....	188
Figure 6. 1 – Porosité volumique totale des coulis à 7 jours, T = 10°C	190
Figure 6. 2 – Porosité volumique totale des coulis à 7 jours, T = 20°C	191
Figure 6. 3 – Porosité volumique totale des coulis à 7 jours, T = 30°C	191
Figure 6. 4 – Distribution des pores dans les coulis de référence (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	195
Figure 6. 5 – Distribution des pores dans les coulis de référence (T = 10, 20 et 30°C).....	197
Figure 6. 6 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 10°C	199
Figure 6. 7 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 20°C	199
Figure 6. 8 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 30°C	200
Figure 6. 9 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 10°C	200
Figure 6. 10 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 20°C	201
Figure 6. 11 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 30°C	201
Figure 6. 12 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 10°C	202
Figure 6. 13 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 20°C	202
Figure 6. 14 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 30°C	203
Figure 6. 15 – Rayon critique des pores dans les coulis de référence	204
Figure 6. 16 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice	205
Figure 6. 17 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 25% de laitier	205
Figure 6. 18 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 50% de laitier	206
Figure 6. 19 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante	206
Figure 6. 20 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante	207
Figure 6. 21 – Rayon critique des pores dans les coulis de rapport 0,30 (T = 10, 20 et 30°C).....	208
Figure 6. 22 – Rayon critique des pores dans les coulis de rapport 0,35 (T = 10, 20 et 30°C).....	209
Figure 6. 23 – Rayon critique des pores dans les coulis de rapport 0,45 (T = 10, 20 et 30°C).....	209
Figure 6. 24 – Rayon critique des pores dans les coulis testés à 10°C.....	211
Figure 6. 25 – Rayon critique des pores dans les coulis testés à 20°C.....	211

Figure 6. 26 – Rayon critique des pores dans les coulis testés à 30°C.....	212
Figure 6. 27 - Volume relatif des pores dans les coulis de référence à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	213
Figure 6. 28 - Volume relatif des pores dans les coulis de référence à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	214
Figure 6. 29 - Volume relatif des pores dans les coulis de référence à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	214
Figure 6. 30 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	216
Figure 6. 31 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	216
Figure 6. 32 – Volume cumulatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	217
Figure 6. 33 – Volume cumulatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	217
Figure 6. 34 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	218
Figure 6. 35 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	218
Figure 6. 36 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	219
Figure 6. 37 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	220
Figure 6. 38 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	221
Figure 6. 39 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	221
Figure 6. 40 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	222
Figure 6. 41 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	222
Figure 6. 42 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	223

Figure 6. 43 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	223
Figure 6. 44 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	224
Figure 6. 45 – Volume relatif des pores dans les coulis de référence, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C	226
Figure 6. 46 – Volume relatif des pores dans les coulis de référence, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C	226
Figure 6. 47 – Volume relatif des pores dans les coulis de référence, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C	227
Figure 6. 48 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C	227
Figure 6. 49 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C	228
Figure 6. 50 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C	228
Figure 6. 51 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C	229
Figure 6. 52 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C	229
Figure 6. 53 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C	230
Figure 6. 54 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C	230
Figure 6. 55 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C	231
Figure 6. 56 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C	231
Figure 6. 57 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C	232
Figure 6. 58 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C	233
Figure 6. 59 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C	233

Figure 6. 60 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C	234
Figure 6. 61 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C	234
Figure 6. 62 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C	235
Figure 7. 1 – Comparaison entre le début du retrait interne et le début de la rigidification de la matrice cimentaire.....	243
Figure 7. 2 – Courbes des retraits externe et interne et la courbe de la température de l'échantillon..	244
Figure 7. 3 – Courbes des retraits externe et interne et la courbe de la conductivité électrique de l'échantillon	245
Figure 7. 4 – Évolution des retraits externe, interne et total après traitement de donnés.....	247
Figure 7. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	249
Figure 7. 6 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	253
Figure 7. 7 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 10°	256
Figure 7. 8 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 20°C.....	256
Figure 7. 9 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 30°C.....	257
Figure 7. 10 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à 10°C.....	257
Figure 7. 11 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à 20°C.....	258
Figure 7. 12 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à 30°	258
Figure 7. 13 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,45 testés à 10°C.....	259
Figure 7. 14 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,45 testés à 20°C.....	259

Figure 7. 15 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,45 testés à 30°C.....	260
Figure 7. 16 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 14 jours	261
Figure 7. 17 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L = 0,30	262
Figure 7. 18 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L = 0,35	262
Figure 7. 19 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L = 0,45	263
Figure 7. 20 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	265
Figure 7. 21 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	266
Figure 7. 22 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 10°C.....	268
Figure 7. 23 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 20°C.....	268
Figure 7. 24 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 30°C.....	269
Figure 7. 25 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 10°C.....	269
Figure 7. 26 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 20°C.....	270
Figure 7. 27 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 30°C.....	270
Figure 7. 28 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 10°C.....	271
Figure 7. 29 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 20°C.....	271
Figure 7. 30 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 30°C.....	272
Figure 7. 31 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant 14 jours	273

Figure 7. 32 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré pendant 14 jours	274
Figure 7. 33 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré pendant 14 jours	274
Figure 7. 34 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré pendant 14 jours	275
Figure 7. 35 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°).....	277
Figure 7. 36 – Effet de la température sur les courbes de retrait total des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)	278
Figure 7. 37 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 10°C	279
Figure 7. 38 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 20°C	280
Figure 7. 39 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 30°C	280
Figure 7. 40 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 10°C	281
Figure 7. 41 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 20°C	281
Figure 7. 42 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 30°C	282
Figure 7. 43 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 10°C	282
Figure 7. 44 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 20°C	283
Figure 7. 45 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 30°C	283
Figure 7. 46 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis de référence mesuré pendant 14 jours	284
Figure 7. 47 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré pendant 14 jours	285

Figure 7. 48 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait total des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré pendant 14 jours	286
Figure 7. 49 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré pendant 14 jours	286
Figure 7. 50 – Retrait interne à 7 jours des coulis de référence	290
Figure 7. 51 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice	291
Figure 7. 52 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 25% de laitier	292
Figure 7. 53 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 50% de laitier	293
Figure 7. 54 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante	294
Figure 7. 55 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante	295
Figure 7. 56 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L = 0,30 exprimé en pourcentage du volume initial	300
Figure 7. 57 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L = 0,30 exprimé en ml/100 g de liant.....	300
Figure 7. 58 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L = 0,30 exprimé en ml/100 g de liant hydraté (retrait intrinsèque interne).....	301
Figure 7. 59 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 exprimé en pourcentage du volume initial.....	303
Figure 7. 60 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 exprimé en ml/100 g de liant.....	303
Figure 7. 61 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 exprimé en ml/100 g de liant hydraté (retrait intrinsèque interne).....	304
Figure 7. 62 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal 0,45 exprimé en pourcentage du volume initial	305
Figure 7. 63 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal 0,45 exprimé en ml/100 g de liant.....	306
Figure 7. 64 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal 0,45 exprimé en ml/100 g de liant hydraté (retrait intrinsèque interne).....	306
Figure 7. 65 – Retrait interne des coulis de référence après 7 et 14 jours d'hydratation	309
Figure 7. 66 – Retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice après 7 et 14 jours.....	310
Figure 7. 67 – Retrait interne des coulis avec 25% de laitier après 7 et 14 jours.....	311
Figure 7. 68 – Retrait interne des coulis avec 50% de laitier après 7 et 14 jours.....	312
Figure 7. 69 – Retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante après 7 et 14 jours.....	313
Figure 7. 70 – Retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante après 7 et 14 jours.....	314

Figure 7. 71 – Retrait endogène interne des coulis à 14 jours exprimé en pourcentage du volume initial	315
Figure 7. 72 – Retrait endogène interne des coulis à 14 jours exprimé en ml/100 g de liant.....	317
Figure 7. 73 – Retrait endogène interne des coulis à 14 jours exprimé en ml/100 g de liant hydraté..	317
Figure 7. 74 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 7 jours des coulis de référence (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C).....	318
Figure 7. 75 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)	319
Figure 7. 76 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation des coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C).....	319
Figure 7. 77 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation des coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C).....	320
Figure 7. 78 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation des coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C).....	320
Figure 7. 79 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation des coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C).....	321
Figure 7. 80 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 14 jours des coulis de référence (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C)	322
Figure 7. 81 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 14 jours des coulis avec 8% de fumée de silice (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C)	322
Figure 7. 82 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 14 jours des coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C).....	323
Figure 7. 83 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 14 jours des coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C).....	323
Figure 7. 84 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 14 jours des coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C)	324
Figure 7. 85 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 14 jours des coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C)	324
Figure 7. 86 – Retrait externe à partir du début de l’essai jusqu’à l’âge de 7 et 14 jours pour les coulis ayant des rapports E/L de 0,30, 0,35 et 0,45.....	326
Figure 7. 87 – Retrait externe à partir de la prise jusqu’à l’âge de 7 et 14 jours pour les coulis ayant des rapports E/L de 0,30, 0,35 et 0,45	328
Figure 7. 88 – Retrait externe à 7 jours des coulis de référence mesuré à partir du début de l’essai ...	331

Figure 7. 89 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré à partir du début de l’essai.....	332
Figure 7. 90 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 25% de laitier mesuré à partir du début de l’essai	333
Figure 7. 91 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 50% de laitier mesuré à partir du début de l’essai	334
Figure 7. 92 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante mesuré à partir du début de l’essai.....	335
Figure 7. 93 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante mesuré à partir du début de l’essai.....	336
Figure 7. 94 – Retrait externe à 7 jours des coulis de référence mesuré à partir du début de prise	337
Figure 7. 95 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré à partir du début de prise.....	338
Figure 7. 96 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 25% de laitier mesuré à partir du début de prise.....	339
Figure 7. 97 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 50% de laitier mesuré à partir du début de prise.....	340
Figure 7. 98 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante mesuré à partir du début de prise.....	341
Figure 7. 99 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante mesuré à partir du début de prise.....	342
Figure 7. 100 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré à partir du début de l’essai.....	344
Figure 7. 101 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré à partir du début de l’essai.....	345
Figure 7. 102 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré à partir du début de l’essai.....	346
Figure 7. 103 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré à partir du début de prise.....	347
Figure 7. 104 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré à partir du début de prise.....	348
Figure 7. 105 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré à partir du début de prise.....	349

Figure 7. 106 – Retrait externe des coulis de référence après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai.....	351
Figure 7. 107 – Retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai.....	352
Figure 7. 108 – Retrait externe des coulis avec 25% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai	353
Figure 7. 109 – Retrait externe des coulis avec 50% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai	354
Figure 7. 110 – Retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai.....	355
Figure 7. 111 – Retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai.....	356
Figure 7. 112 – Retrait externe des coulis de référence après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise	357
Figure 7. 113 – Retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise	358
Figure 7. 114 – Retrait externe des coulis avec 25% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise.....	359
Figure 7. 115 – Retrait externe des coulis avec 50% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise.....	360
Figure 7. 116 – Retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise	361
Figure 7. 117 – Retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise	362
Figure 7. 118 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de l’essai.....	363
Figure 7. 119 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de l’essai.....	364
Figure 7. 120 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de l’essai.....	365
Figure 7. 121 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de prise	366
Figure 7. 122 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de prise	367

Figure 7. 123 – Retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,45$ après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de prise	368
Figure 7. 124 – Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis de référence ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)	369
Figure 7. 125 – Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 8% de fumée de silice ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)	370
Figure 7. 126 – Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 15% de cendre volante ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)	370
Figure 7. 127 - Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 30% de cendre volante ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)	371
Figure 7. 128 - Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 25% de laitier ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)	371
Figure 7. 129 - Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 50% de laitier ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)	372
Figure 8. 1 – Courbes de retrait interne des mortiers ($V_p/V_s = 1,6$).....	374
Figure 8. 2 - Courbes de retrait interne des mortiers ($V_p/V_s = 0,8$)	374
Figure 8. 3 – Courbes de retrait interne des mortiers de rapport $E/L = 0,30$ ayant différents dosages de sable.....	375
Figure 8. 4 - Courbes de retrait interne des mortiers de rapport $E/L = 0,35$ ayant différents dosages de sable.....	376
Figure 8. 5 - Courbes de retrait interne des mortiers de rapport $E/L = 0,40$ ayant différents dosages de sable.....	376
Figure 8. 6 - Courbes de retrait interne des mortiers de rapport $E/L = 0,45$ ayant différents dosages de sable.....	377
Figure 8. 7 - Courbes de retrait externe des mortiers ($V_p/V_s = 1,6$).....	378
Figure 8. 8 - Courbes de retrait externe des mortiers ($V_p/V_s = 0,8$).....	378
Figure 8. 9 – Courbes de retrait externe des mortiers de rapport $E/L = 0,30$ ayant différents dosages de sable.....	379

Figure 8. 10 - Courbes de retrait externe des mortiers de rapport $E/L = 0,35$ ayant différents dosages de sable	379
Figure 8. 11 - Courbes de retrait externe des mortiers de rapport $E/L = 0,40$ ayant différents dosages de sable	380
Figure 8. 12 - Courbes du retrait externe des mortiers de rapport $E/L = 0,45$ ayant différents dosages de sable	380
Figure 8. 13 - Courbes de retrait total des mortiers ($V_p/V_s = 1,6$).....	381
Figure 8. 14 - Courbes de retrait total des mortiers ($V_p/V_s = 0,8$).....	382
Figure 8. 15 - Courbes de retrait total des mortiers de rapport $E/L = 0,30$ ayant différents dosages de sable	382
Figure 8. 16 - Courbes de retrait total des mortiers de rapport $E/L = 0,35$ ayant différents dosages de sable	383
Figure 8. 17 - Courbes de retrait total des mortiers de rapport $E/L = 0,40$ ayant différents dosages de sable	383
Figure 8. 18 - Courbes du retrait total des mortiers de rapport $E/L = 0,45$ ayant différents dosages de sable	384
Figure 8. 19 – Retrait intrinsèque total des mortiers après 7 jours d’hydratation	385
Figure 8. 20 – Retrait interne des mortiers après 7 jours d’hydratation	386
Figure 8. 21 – Retrait externe des mortiers mesuré à partir du début d’essai et jusqu’à 7 jours.....	387
Figure 8. 22 - Retrait intrinsèque externe des mortiers après 7 jours d’hydratation	388
Figure 8. 23 – Retrait externe des mortiers mesuré à partir du début de la prise et jusqu’à 7 jours.....	389
Figure 8. 24 – Retrait intrinsèque externe des mortiers mesuré à partir du début de la prise et jusqu’à 7 jours d’hydratation.....	390
Figure 8. 25 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation à 7 jours des mortiers et des coulis ($E/L = 0,30, 0,35, 0,40$ et $0,45$)	391
Figure 8. 26 – Relation entre les retraits du mortier et du coulis	392
Figure 8. 27 – Échantillon de mortier ayant $V_p/V_s = 1,6$ ou $V_p/V_t = 62\%$	394
Figure 8. 28 - Échantillon de mortier ayant $V_p/V_s = 0,8$ ou $V_p/V_t = 44\%$	394
Figure 8. 29 - Résistance à la compression des mortiers ($p/s = 1,6$).....	396
Figure 8. 30 - Résistance à la compression des mortiers ($p/s = 0,8$).....	396
Figure 9. 1 – Courbes du retrait chimique des coulis	399
Figure 9. 2 – Retrait chimique des coulis après 7 et 14 jours d’hydratation	400

Figure 9. 3 – Comparaison entre le retrait chimique et le retrait endogène après 7 jours d'hydratation.....	402
Figure 9. 4 – Comparaison entre le retrait chimique et le retrait endogène après 14 jours d'hydratation.....	403
Figure 10. 1 – Courbes de retrait externe obtenues à 10°C et 30°C.....	409
Figure 10. 2 – Relation entre le retrait endogène externe après la prise et le rayon critique des pores après 7 jours d'hydratation	412
Figure 10. 3 – Détermination du rayon des ménisques à partir des résultats de la porosité au mercure.....	413
Figure 10. 4 – Relation entre le retrait endogène externe après la prise et le rayon des ménisques après 7 jours d'hydratation	414
Figure A. 1 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis de références (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	427
Figure A. 2 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	428
Figure A. 3 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	429
Figure A. 4 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	430
Figure A. 5 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	431
Figure A. 6 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	432
Figure A. 7 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis de références (T = 10, 20 et 30°C).....	433
Figure A. 8 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (T = 10, 20 et 30°C).....	434
Figure A. 9 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°C).....	435
Figure A. 10 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°C).....	436

Figure A. 11 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 25% de laitier (T = 10, 20 et 30°C).....	437
Figure A. 12 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 50% de laitier (T = 10, 20 et 30°C).....	438
Figure A. 13 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 10°C	439
Figure A. 14 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 20°C	439
Figure A. 15 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 30°C	440
Figure A. 16 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 10°C	440
Figure A. 17 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 20°C	441
Figure A. 18 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 30°C	441
Figure A. 19 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 10°C	442
Figure A. 20 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 20°C	442
Figure A. 21 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 30°C	443
Figure B. 1 – Distribution des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	445
Figure B. 2 – Distribution des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	446
Figure B. 3 – Distribution des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	447
Figure B. 4 – Distribution des pores dans les coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)...	448
Figure B. 5 – Distribution des pores dans les coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)...	449
Figure B. 6 – Distribution des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (T = 10, 20 et 30°C).....	450
Figure B. 7 – Distribution des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°)	451
Figure B. 8 – Distribution des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°)	452
Figure B. 9 – Distribution des pores dans les coulis avec 25% de laitier (T = 10, 20 et 30°C)	453
Figure B. 10 – Distribution des pores dans les coulis avec 50% de laitier (T = 10, 20 et 30°C)	454
Figure C. 1 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C).....	456
Figure C. 2 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	457

Figure C. 3 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	458
Figure C. 4 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	459
Figure C. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	460
Figure C. 6 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	461
Figure C. 7 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	462
Figure C. 8 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	463
Figure C. 9 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)	464
Figure C. 10 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	465
Figure C. 11 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 14 jours.....	466
Figure C. 12 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 14 jours	466
Figure C. 13 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 14 jours	467
Figure C. 14 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 14 jours.....	467
Figure C. 15 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait interne des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 14 jours.....	468
Figure D. 1 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C).....	470
Figure D. 2 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	471
Figure D. 3 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	472

Figure D. 4 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	473
Figure D. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	474
Figure D. 6 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	475
Figure D. 7 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	476
Figure D. 8 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	477
Figure D. 9 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)	478
Figure D. 10 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	479
Figure D. 11 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 14 jours.....	480
Figure D. 12 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 14 jours.....	480
Figure D. 13 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 14 jours.....	481
Figure D. 14 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 14 jours	481
Figure D. 15 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 14 jours	482
Figure E. 1 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C).....	484
Figure E. 2 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	485
Figure E. 3 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	486
Figure E. 4 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	487

Figure E. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)	488
Figure E. 6 – Effet de la température sur les courbes de retrait total des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	489
Figure E. 7 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	490
Figure E. 8 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	491
Figure E. 9 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)	492
Figure E. 10 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45).....	493
Figure E. 11 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 14 jours.....	494
Figure E. 12 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 14 jours.....	494
Figure E. 13 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 14 jours.....	495
Figure E. 14 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 14 jours	495
Figure E. 15 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 14 jours	496

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 - Principales phases du clinker de ciment Portland	2
Tableau 1. 2 - Valeurs de l'humidité relative et de la dépression capillaire pour différents rayons des pores capillaires [Baron, 1982]	23
Tableau 1. 3 - Eau totale chimiquement liée aux phases minérales du ciment (g/g).....	27
Tableau 1. 4 - Eau consommée lors d'hydratation des phases minérales du ciment.....	27
Tableau 3. 1 - Composition chimique du ciment	114
Tableau 3. 2 - Composition de Bogue du ciment.....	114
Tableau 3. 3 - Composition chimique de la fumée de silice	116
Tableau 3. 4 - Composition chimique du laitier.....	118
Tableau 3. 5 - Composition chimique de la cendre volante de classe F.....	119
Tableau 3. 6 - Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant	121
Tableau 3. 7 - Composition des coulis sans ajouts minéraux.....	123
Tableau 3. 8 - Composition des coulis avec fumée de silice.....	123
Tableau 3. 9 - Composition des coulis avec laitier.....	123
Tableau 3. 10 - Composition des coulis avec cendre volante.....	124
Tableau 3. 11 - Composition des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 1,6.....	125
Tableau 3. 12 - Composition des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 0,8.....	125
Tableau 5. 1 - Quantités totales d'eau liée chimiquement dans les coulis	167
Tableau 7. 1 – Notations chimiques abrégées	237
Tableau 7. 2 – Déficit volumétrique du ciment de cette étude.....	242
Tableau 8. 1 – Rapport entre le retrait interne du mortier et le retrait interne du coulis	392
Tableau 8. 2 – Rapport entre le retrait externe du mortier et le retrait externe du coulis avant la prise.....	393
Tableau 8. 3 – Rapport entre le retrait externe du mortier et le retrait externe du coulis après la prise.....	393
Tableau 8. 4 - Résistance à la compression des mortiers (p/s = 1,6).....	395
Tableau 8. 5 - Résistance à la compression des mortiers (p/s = 0,8).....	395

1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Avant d'entreprendre l'étude sur le retrait endogène des matériaux cimentaires, il est important de posséder une connaissance appropriée de tous les paramètres reliés à ce phénomène. Dans ses deux premières parties, ce chapitre traite des propriétés principales des liants ainsi que la réaction d'hydratation. Dans sa troisième partie, il présente des mécanismes qui sont à l'origine du retrait. La dernière partie du chapitre est consacré au retrait endogène et au retrait chimique. On présente des méthodes de mesure du retrait chimique et du retrait endogène ainsi que l'influence des paramètres de formulation et de la température sur ces retraits. L'influence du mûrissement sur le contrôle de la fissuration au jeune âge du béton a été aussi discutée.

1.2 Propriétés des matériaux

1.2.1 Ciment Portland

Le ciment Portland est fabriqué à partir de matières calcaires comme le calcaire ou la craie et à partir de silice et d'alumine présentent dans le schiste et dans l'argile.

La fabrication du ciment Portland commence avec le broyage des matières premières mélangées dans certaines proportions. Le cru ainsi obtenu est cuit dans un grand four rotatif à une température d'environ 1450°C. Une telle température provoque la fusion partielle des matériaux et transforme les matières premières en clinker de ciment. Le clinker est refroidi et broyé en poudre fine. Lors du broyage une faible quantité de sulfate de calcium est ajoutée pour contrôler la prise du ciment.

Les principaux oxydes qui constituent le ciment Portland sont : la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). On trouve aussi dans l'analyse chimique d'autres oxydes en plus faible quantité tels que l'oxyde de sodium (Na₂O), l'oxyde de potassium (K₂O), l'anhydride sulfurique (SO₃) et la magnésie (MgO).

Ces oxydes réagissent les uns avec les autres dans le four pour former quatre phases minérales qui représentent plus de 90 % de masse du ciment Portland. Le tableau 1.1 montre les formules chimiques et les abréviations de ces phases minérales [Neville, 2000].

Tableau 1. 1 - Principales phases du clinker de ciment Portland

Phase minérale	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicate bicalcique	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrite tétracalcique	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Le silicate tricalcique est en général le plus important composant car il constitue 50 % à 70 % du clinker de ciment Portland. On le retrouve sous la forme des cristaux polygonaux. Le C₃S contient aussi une certaine quantité d'oxydes sous forme d'impuretés. À cause de ses impuretés, il porte le nom d'*alite*.

Le silicate bicalcique est moins abondant (15 % à 25 %) à l'exception du ciment type 20M où on le trouve presque dans la même proportion que le C₃S (environ 40 %). Le C₂S se présente sous la forme des cristaux arrondis. À cause de ses impuretés, il porte le nom de *bélite*.

Le pourcentage de l'aluminate tricalcique est assez faible. Ce pourcentage varie de 0 % dans un ciment 20M jusqu'au 12 % dans un ciment blanc [Aïtcin, 2001 (b)]. L'aluminoferrite tétracalcique varie en général de 1 % à 15 %. Dans la majorité des ciments, la somme de C₃A et de C₄AF est d'environ 15 à 16 %, donc, plus il y a de C₃A moins il y a de C₄AF et vice versa. Le C₃A et le C₄AF se retrouvent sous la forme des cristaux rectangulaires mais ils sont aussi partiellement vitreux en raison du refroidissement rapide du clinker [Baroghel-Bouny,1994]. Dans les grains de clinker, les aluminates forment la phase interstitielle qui lie les cristaux de C₃S et de C₂S.

La détermination de la composition potentielle des différentes phases minérales d'un ciment peut se faire à l'aide des équations de Bogue en utilisant les résultats de l'analyse chimique.

Ce calcul fait l'hypothèse que les réactions dans le four de ciment sont complétées à 100 %. Il ne prend pas en considération la présence potentielle de solutions solides entre les phases ou la présence d'oxydes mineurs.

1.2. 2 Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium et du ferrosilicium. Le silicium et le ferrosilicium sont produits dans un four à arc électrique à partir de quartz, de charbon et de fer (dans le cas de ferrosilicium). Lors de cette production il se forme des vapeurs de SiO qui sont ensuite aspirées par la cheminée surmontant le four à arc. Les vapeurs de SiO s'oxydent en se refroidissant et se condensent sous forme de particules de silice amorphe (SiO₂) sphériques et très fines qui sont ensuite collectés dans le système de dépoussiérage de l'usine.

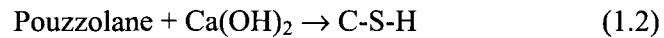
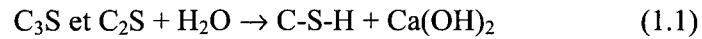
Les particules de la fumée de silice possèdent un diamètre moyen inférieur à 0,1 µm. Elles ont, donc, un diamètre moyen 100 fois plus petit que les particules de ciment [Neville, 2000]. La densité de la fumée de silice est de l'ordre de 2,20. Sa surface spécifique mesurée par l'adsorption d'azote peut varier de 15 000 à 25 000 m²/kg. La surface spécifique d'un ciment Portland ordinaire, mesuré avec la même technique est d'environ 1500 m²/kg [Aïtcin, 2001 (a)]. La fumée de silice est caractérisée par sa structure amorphe, permettant une grande réactivité et une haute teneur en silice, supérieure à 85 %.

La fumée de silice peut réagir de trois façons suivantes :

- Effet pouzzolanique

La fumée de silice, amorphe et très fine, réagit avec la portlandite (Ca(OH)₂) libérée par l'hydratation du C₃S et du C₂S pour former du silicate de calcium hydraté secondaire (C-S-H).

Cette réaction, possible à la température ambiante et en présence d'eau, peut être représentée de la façon suivante [Lea, 1970] :



Le C-S-H produit par la fumée de silice possède un rapport C/S plus faible que le C-S-H produit par l'hydratation du ciment Portland seul [Regourd, 1983]. La réaction pouzzolanique entraîne à la longue une diminution graduelle de la portlandite [Neville, 2000].

- Effet filler

À cause de leur faible diamètre, les particules de la fumée de silice remplissent des vides entre les particules de classes granulaires supérieures (grains de ciment, granulats fin et gros granulats). La pâte de ciment devient plus dense et la zone de transition pâte-grulats est considérablement diminuée [Khayat et Aïtcin, 1992 ; Neville, 2000 ; Aïtcin 2001(b)].

- Sites de germination

Les particules de la fumée de silice, étant très fines, jouent le rôle de sites de germination pour la portlandite. Les cristaux de portlandite se développent sous forme de petits cristaux que l'on ne peut pas voir au microscope électronique [Aïtcin, 2001 (a)]. Les conséquences de ce phénomène sont une accélération de la réaction d'hydratation et un développement plus important de la chaleur d'hydratation [Neville, 2000].

1.2. 3 Cendres volantes

Les cendres volantes sont les pouzzolanes artificielles couramment utilisées dans l'industrie du béton. Ce sont des poudres fines récupérées dans des précipitateurs électrostatiques lors de la combustion du charbon dans des centrales thermiques. Les particules de charbon, généralement inférieures à 75 µm, sont injectées dans une fournaise dont la température est

d'environ 1500 °C. Les composés organiques sont rapidement brûlés tandis que les impuretés (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) atteignent leur point de fusion. La plus grande partie de ces résidus est entraînée avec les gaz de combustion, puis refroidie rapidement. Les fines particules, amorphes et sphériques, ainsi formées sont récupérées dans les précipitateurs électrostatiques [Desrosiers, 1999 ; Aïtcin, 2001 (b)].

Les caractéristiques des cendres volantes sont très variables. Elles dépendent des caractéristiques du charbon, du processus de combustion, du système de collection des cendres et des conditions d'opération de la centrale thermique. Les principales différences se retrouvent au niveau de la taille des particules, de la composition chimique et de la composition minéralogique [Desrosiers, 1999]. Les cendres volantes contiennent toujours une certaine quantité de carbone imbrûlé dépendant de l'allure de marche de la centrale thermique. En général, le pourcentage du carbone imbrûlé est inférieur à 6 % de la masse de cendre volante. Plus la teneur en carbone est élevée, plus la couleur des cendres est foncée [Aïtcin, 2001 (b)].

Les particules de cendres volantes sont généralement sphériques et lisses. Elles peuvent être pleines ou creuses. Il existe aussi des cendres volantes dont les particules sont angulaires en totalité ou en partie. La plupart des particules possèdent un diamètre compris entre 1 et 100 μm . La finesse Blaine varie généralement entre 250 et 600 m^2/kg . La densité des cendres volantes est de l'ordre de 2,35 [Neville, 2000]. Les cendres volantes contiennent approximativement 60 % à 85 % de verre et de 10 % à 30 % de phase cristalline [Tagnit-Hamou, 1997].

La norme ASTM C 618 classe les cendres volantes selon leur composition chimique en 2 classes :

- Classe F

Les cendres volantes de classe F possèdent une teneur en $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ et une teneur en $\text{CaO} < 10\%$. Ce sont des aluminosilicates partiellement vitreux, d'où leurs propriétés pouzzolaniques. Les principales phases cristallines que l'on peut trouver sont le quartz, la mullite, l'hématite et la magnétite [Malhotra et Metha, 1996 ; Tagnit-Hamou, 1997].

Les cendres volantes de classe F sont produites lors de la combustion d'anthracite ou de charbons bitumineux.

- Classe C

Les cendres volantes de classe C possèdent une teneur en $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ et une teneur en CaO comprise entre 15 % et 35 %. Étant donné que la teneur en CaO est élevée, ces cendres possèdent des propriétés pouzzolaniques et des propriétés liantes. Les principales phases cristallines que l'on peut retrouver dans ces cendres sont le quartz, l'aluminate tricalcique, l'aluminosulfate de calcium, l'anhydrite, la chaux libre, le périclase et les sulfates alcalins. Toutes ces formes cristallines, à l'exception du quartz et du périclase, réagissent avec l'eau à la température ambiante [Malhotra et Metha, 1996]. Les cendres volantes de classe C sont produites lors de la combustion du lignite ou de charbons sous-bitumineux.

Les cendres volantes réagissent lentement et dégagent peu de chaleur, ce qui diminue la température du béton frais. L'hydratation du ciment est ralentie par les composés solubles présents à la surface des grains de cendres volantes. Lorsqu'une cendre volante est mélangée avec de l'eau et de l'hydroxyde de calcium, les hydrates formés sont semblables à ceux formés avec du ciment portland. Dans le mortier et dans le béton, les cendres volantes de classe F réagissent de la même façon que la fumée de silice mais avec un effet limité (effet pouzzolanique, effet filler et sites de germination). Les cendres volantes de classe C ont aussi les propriétés liantes car le calcium peut se présenter sous forme de phases cristallines réactives. La phase amorphe contient également suffisamment de calcium pour accélérer la réactivité des aluminosilicates [Tagnit-Hamou, 1997].

1.2. 4 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il rassemble toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke métallurgique. La densité du laitier fondu est beaucoup plus faible que celle de la fonte, de

telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue et peut être facilement séparé d'elle [Malhotra, 1987 ; Aïtcin, 2001 (a)].

Le laitier fondu peut être refroidi lentement à l'air de telle façon qu'il cristallise principalement sous forme de melilite, un mélange d'akermanite et de gehlenite. Le laitier cristallisé n'a aucune propriété hydraulique et ne peut pas être utilisé comme ajout cimentaire. Il est utilisé entre autre comme granulats à béton [Malhotra, 1987 ; Aïtcin, 2001 (a)].

Le laitier fondu peut aussi être trempé à la sortie du haut fourneau. Dans ce cas le laitier se retrouve sous forme vitreuse et peut développer des propriétés liantes s'il est suffisamment broyé et activé. Le refroidissement brusque peut être fait selon trois méthodes [Aïtcin, 2001 (a)] :

- Le laitier est versé dans un bassin d'eau où il se désintègre sous forme d'un sable grossier que l'on appelle le laitier granulé;
- Le laitier est refroidi par un jet d'eau lorsqu'il sort des hauts fourneaux. Il est ainsi transformé en sable grossier que l'on appelle le laitier granulé;
- Le laitier est projeté dans l'air de telle sorte que la trempe se fait en combinant l'action de l'eau et de l'air. Dans ce cas, le laitier a forme de boulettes sphériques plus ou moins poreuses que l'on appelle le laitier bouleté.

Les laitiers qui ont une température plus élevée au moment de leur trempe sont en général plus réactifs et possèdent une couleur plus claire. Les laitiers dont la couleur est plus foncée avaient une température plus faible lors de la trempe et ils sont, par conséquent, moins réactifs.

La composition chimique du laitier est relativement constante pour un procédé donné. Elle est située dans une zone bien définie du diagramme $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ où la température de fusion de ces trois oxydes est la plus basse [Malhotra, 1987 ; Moranville-Regourd, 1998].

La réactivité des laitiers de haut fourneau dépend des facteurs suivants :

- Degré de vitrification

Le degré de vitrification obtenu au cours de la trempe dépend de la température du matériau en fusion à la sortie du haut fourneau, de sa composition chimique et de la viscosité du laitier ainsi que du taux de refroidissement obtenu par la méthode de trempe. Étant donné qu'il est difficile de déterminer la quantité minimale de verre dans un laitier pour assurer une bonne réactivité, les normes canadienne et américaines [CSA A3004-C7 et ASTM C 989] prévoient les essais de rendement des résistances en compression. Selon Taylor [1990] les meilleures résistances sont données par les laitiers contenant environ 5 % de matières cristallines. Les cristaux forment des tensions dans la structure et représentent des sites de nucléation pour les produits d'hydratation.

- Composition chimique

La composition chimique du laitier influence le degré de vitrification obtenu au moment de sa trempe mais aussi sa solubilité, donc, la réactivité du verre lors de l'hydratation. La réactivité hydraulique du laitier augmente en augmentant la teneur en CaO et en Al_2O_3 et en diminuant la teneur en SiO_2 et en MgO [Malhotra, 1987].

- Composition minéralogique

Le laitier cristallisé est le plus souvent composé de mélilite, un mélange d'akermanite (C_2MS_2) et de gehlenite (C_2AS). Il peut aussi contenir de la merwinite (C_3MS_2), de la monticellite (CMS) et du diopside (CMS_2) [Saric-Coric, 2001].

- Finesse de broyage

La réactivité du laitier augmente avec sa finesse. Selon Malhotra et Mehta [1996], les particules inférieures à 10 μm contribuent au développement des résistances en compression jusqu'à 28 jours, celles situées entre 10 et 45 μm aux résistances après 28 jours et les particules supérieures à 45 μm sont inertes.

- Activation des verres du laitier

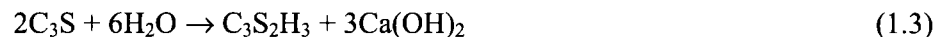
Le laitier seul ne possède pas des propriétés hydrauliques. Il a donc besoin d'un activateur pour développer ses propriétés liantes. Les activateurs chimiques typiques de l'hydratation du laitier sont : $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH et CaSO_4 . Selon Daimon [1980], le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le CaSO_4 sont des activateurs et des réactifs dans les réactions, tandis que le NaOH est seulement un activateur. Le ciment Portland représente lui aussi un activateur du laitier. Cette activation est, en majeure partie, attribuable à l'hydroxyde de calcium libéré au cours de l'hydratation des silicates [Malhotra, 1987].

1.3 Hydratation

1.3.1 Hydratation du ciment Portland

- Hydratation des silicates

La réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S peut être écrite de la façon suivante [Neville, 2000] :

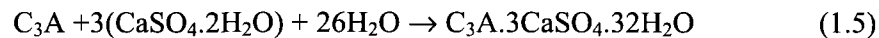


Les équations (1.3) et (1.4) montrent qu'il existe deux produits d'hydratation des silicates. Le premier est le silicate de calcium hydraté ou C-S-H. Sa formule chimique approximative est $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$. Cette formule est approximative car la composition chimique du C-S-H est très variable. Le C-S-H est mal cristallisé. Il possède une structure poreuse et une surface spécifique très élevée. Selon le modèle de Feldmann et Sereda [1968], le C-S-H est formé des feuilles organisées de façon irrégulière. Il occupe, en moyenne, 50 % à 70 % du volume de solides dans une pâte de ciment complètement hydratée [Baroghel-Bouny, 1994]. Il est la principale source de la résistance mécanique du béton.

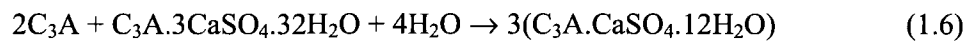
Le deuxième produit d'hydratation des silicates est l'hydroxyde de calcium ou *portlandite*. La portlandite se présente en forme de larges cristaux hexagonaux. Elle représente de 25 % à 27 % du volume de solide dans une pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite ne contribue pas beaucoup à la résistance mécanique du béton mais, elle a un rôle important dans de nombreux mécanismes associés à la durabilité des bétons [Baroghel-Bouny, 1994].

- Hydratation des aluminates

L'hydratation du C_3A est étroitement liée à la présence des ions sulfates provenant de la dissolution du sulfate de calcium. En présence d'eau, ces ions réagissent avec le C_3A pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté ou *ettringite*. Cette réaction est exothermique et survient lors du premier contact entre l'eau et le ciment. Cette réaction peut être présentée de la façon suivante [Baroghel-Bouny, 1994] :



Les cristaux d'ettringite, en forme des petites aiguilles, recouvrent les zones de C_3A . Étant donné que la quantité d'ions sulfates est limitée dans la solution, l'ettringite commence à réagir avec le C_3A excédentaire pour former du monosulfoaluminate de calcium hydraté dont la réaction peut être écrite de la façon suivante [Aïtcin, 2001(b)] :



La quantité de sulfates provenant du gypse peut influencer sérieusement la rhéologie du béton frais. L'absence ou une faible quantité de SO_3 , peut causer une prise éclair. La prise éclair est une réaction très rapide entre le C_3A et l'eau, ce qui provoque un raidissement irréversible du béton frais. Un autre phénomène relié à la présence inadéquate de sulfates est la fausse prise. Elle est due à la transformation partielle du gypse en hémihydrate ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$) lors du broyage. Pendant le gâchage, l'hémihydrate se transforme en gypse causant un raidissement

instantané. Si l'on continue à malaxer le béton, on peut cependant le fluidifier à nouveau [Aïtcin, 2001 (b)].

La réaction d'hydratation du C_4AF est encore mal connue. Dans le cas du C_4AF , on obtient les mêmes produits qu'avec le C_3A , en substituant aux aluminates des alumino-ferrites. Cette réaction est lente et dégage peu de chaleur. Les aluminates représentent environ 15 % à 20 % du volume de solide dans une pâte de ciment complètement hydraté [Baroghel-Bouny, 1994].

1.3. 2 Cinétique de l'hydratation du ciment Portland

La réaction d'hydratation du ciment Portland est une réaction exothermique qui peut être suivie à l'aide des courbes de flux thermique. Les mesures de la conductivité électrique permettent aussi d'étudier l'hydratation en mesurant la vitesse avec laquelle des ions se dissolvent dans la solution interstitielle (Figure 1.1).

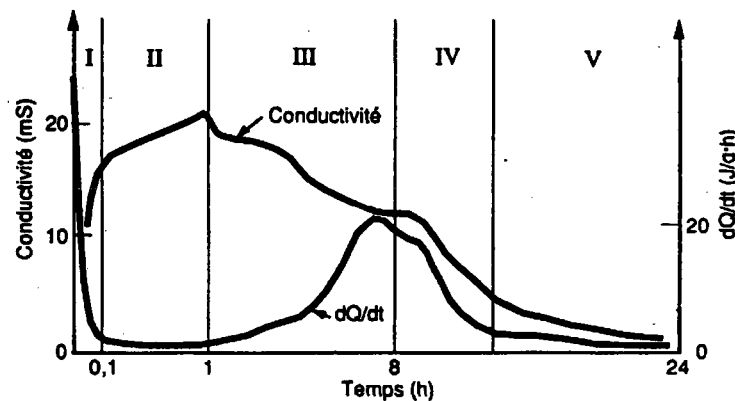


Figure 1. 1 - Flux thermique et la conductivité électrique lors de l'hydratation [adapté de Vernet et Cadoret, 1992]

À la figure 1.1 on peut distinguer cinq étapes du processus d'hydratation :

- Étape I : Période de gâchage

Pendant la période de gâchage, des ions provenant des constituants du ciment passent en solution. La dissolution initiale est très rapide et exothermique ce qui provoque une

augmentation rapide de la conductivité électrique et un pic de flux thermique. Pendant cette période, qui dure seulement quelques minutes, il y a une précipitation de C-S-H et la formation d'ettringite finement cristallisée. Les hydrates formés entourent les grains de ciment [Vernet et Cadoret, 1992].

- Étape II : Période dormante

Pendant la période dormante, qui peut durer quelques heures, l'élévation rapide du pH et de la teneur en calcium de l'eau de gâchage ralentit la dissolution des constituants du ciment. La formation de C-S-H et d'ettringite se poursuit lentement et la phase aqueuse se sursature en chaux. Pendant cette période, le flux thermique diminue considérablement et la conductivité électrique augmente lentement [Vernet et Cadoret, 1992].

- Étape III : Période de prise ou d'accélération

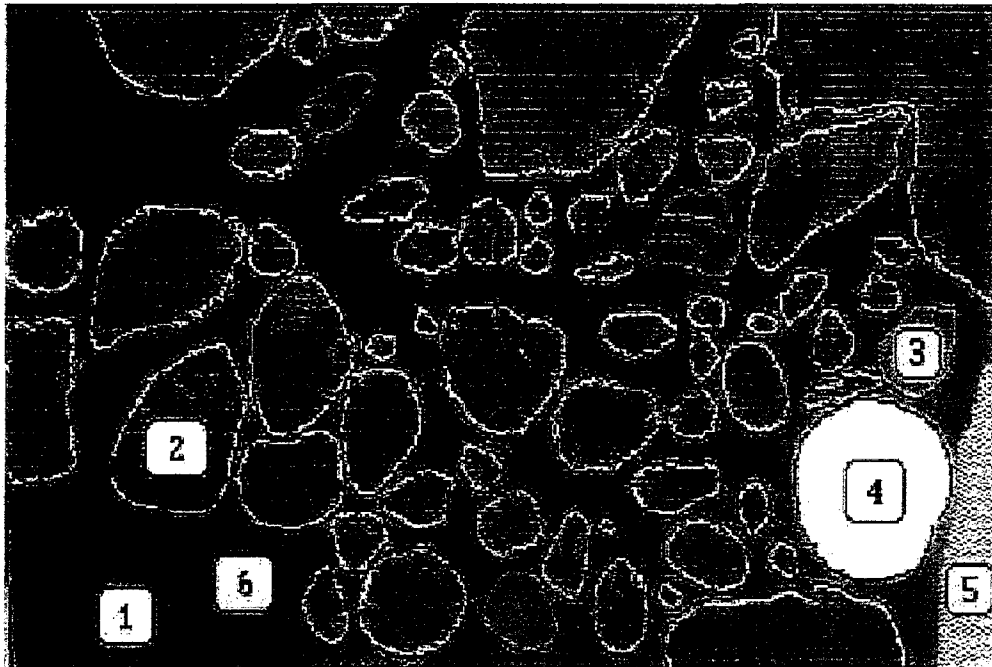
La prise est déclenchée par la précipitation de la portlandite. La réaction entre des ions Ca^{2+} et OH^- accélère la dissolution de tous les constituants du ciment ce qui est marqué par une petite chute sur la courbe de conductivité. Le changement de pente de la courbe de conductivité représente le temps de la structuration (seuil de percolation) de la pâte de ciment [Aïtcin, 2001 (b)]. Au début de cette période, le flux thermique augmente lentement car la formation de la portlandite est une réaction endothermique pour ensuite monter progressivement. Donc, durant cette période, le matériau passe de l'état de suspension à l'état de solide [Vernet et Cadoret, 1992].

- Étape IV : Période de durcissement

La quantité de régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) est limitée dans le ciment Portland. La formation rapide d'ettringite à la fin de la période de prise aboutit à l'épuisement du gypse. À partir de ce moment là, l'ettringite devient la source de sulfates qui réagiront avec les aluminates excédentaires pour former le monosulfoaluminate de calcium hydraté. Cette réaction est marquée par un pic thermique surtout prononcé pour les ciments riches en C_3A . La chaleur ainsi produite accélère l'hydratation des silicates [Vernet et Cadoret, 1992 ; Baroghel-Bouny, 1994].

- Étape V : Période de ralentissement

La coquille des hydrates qui entoure les grains de ciment devient de plus en plus épaisse ce qui ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. La matrice cimentaire devient plus dense et les espaces entre les grains de ciment diminuent. La conductivité électrique et le flux thermique deviennent très faibles [Vernet et Cadoret, 1992]. Les figures 1.2 à 1.6 montrent l'évolution de la microstructure d'un mortier à faible rapport E/C en fonction du temps [Vernet et Cadoret, 1992].



1 - eau	2 - clinker	3 - gypse
4 - bulle d'air	5 - grain de sable	6 - hydrates (C-S-H)

Figure 1. 2 - Période de gâchage [Vernet et Cadoret, 1992]

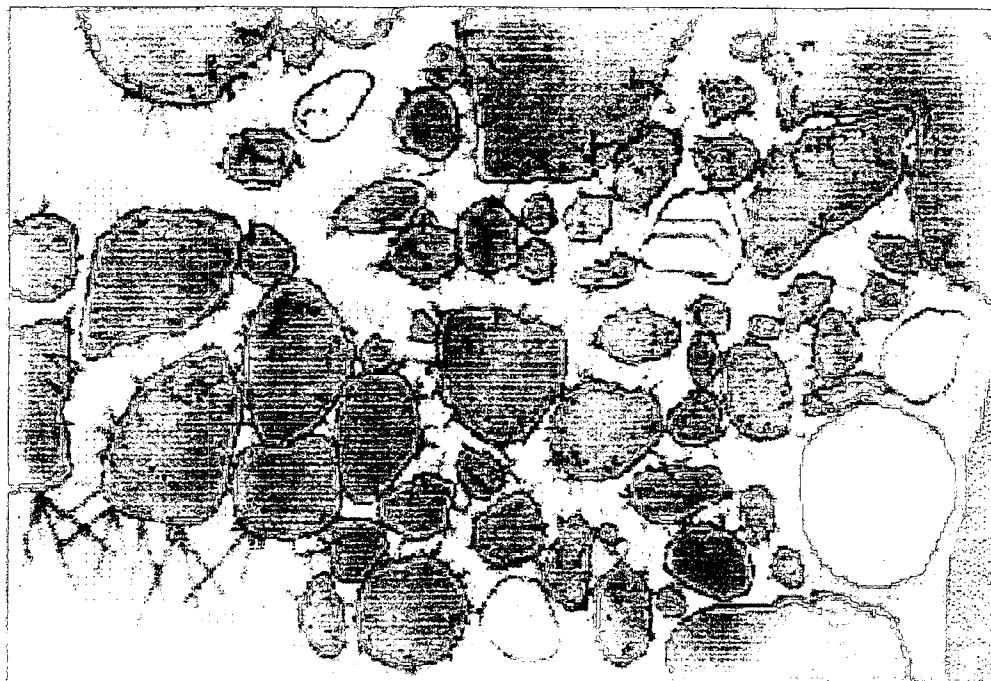


Figure 1. 3 - Période dormante [Vernet et Cadoret, 1992]

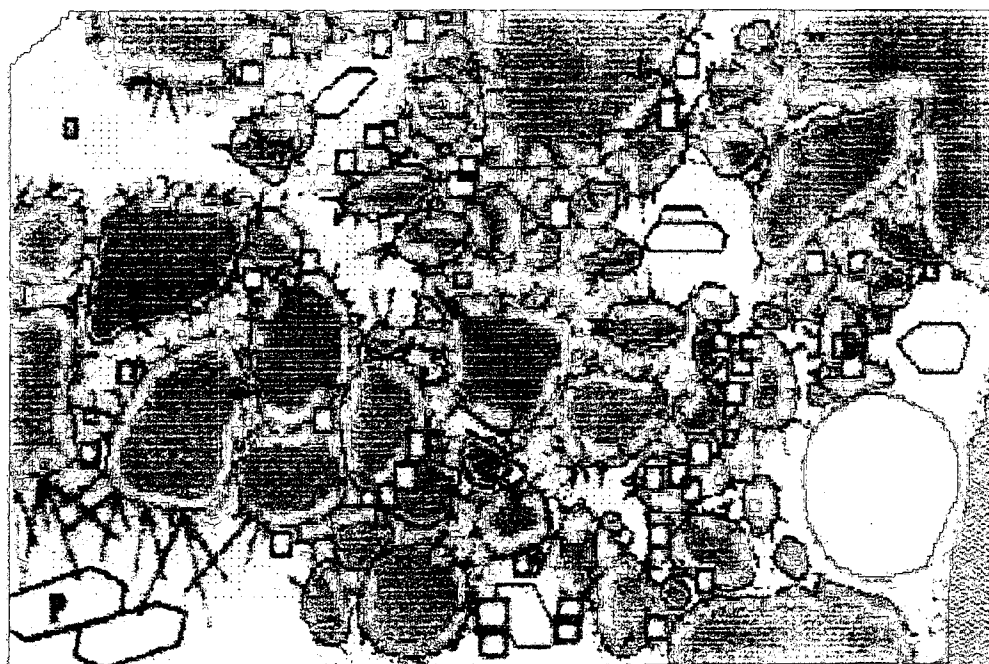


Figure 1. 4 - Période de prise ou d'accélération [Vernet et Cadoret, 1992]

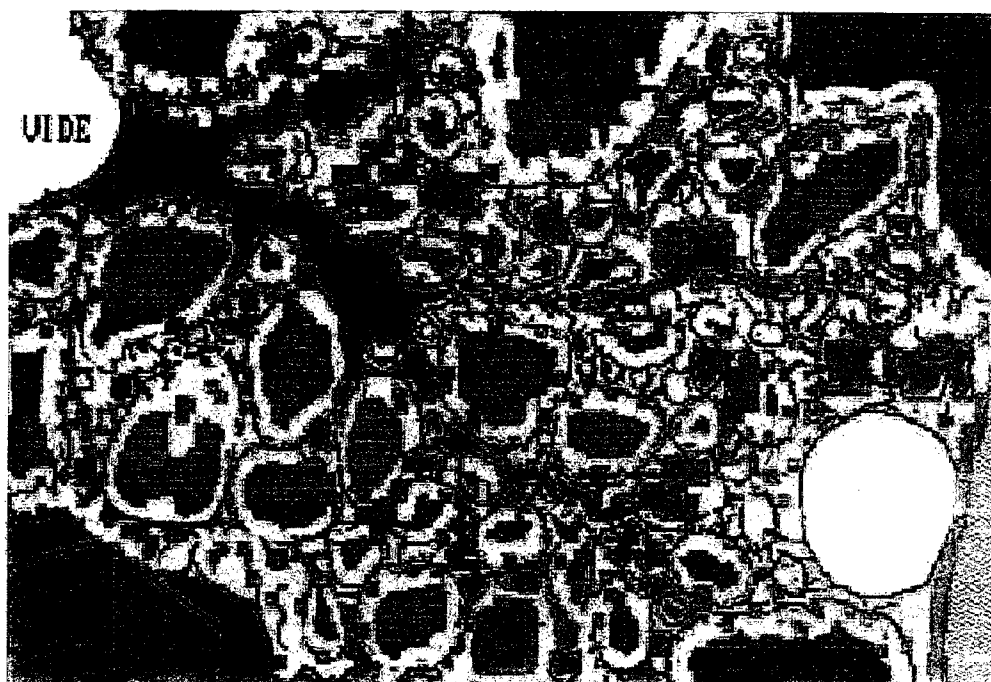


Figure 1. 5 - Période de durcissement [Vernet et Cadoret, 1992]

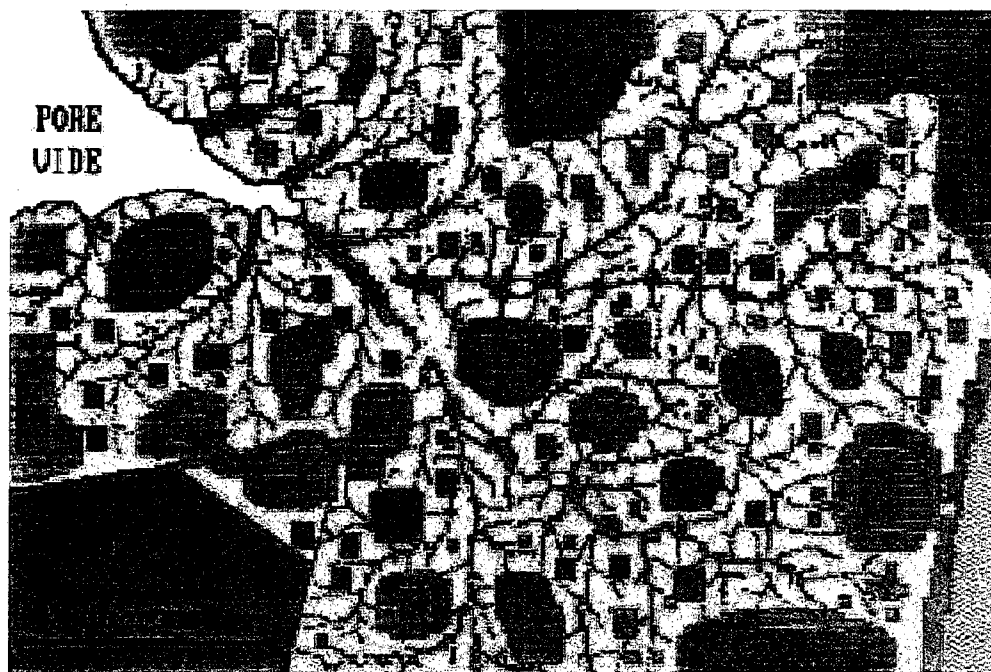


Figure 1. 6 - Période de ralentissement [Vernet et Cadoret, 1992]

1.3. 3 Hydratation du ciment en présence de la fumée de silice

La fumée de silice réagit avec la portlandite libérée lors de la réaction du C_3S et du C_2S avec de l'eau (réaction pouzzolanique) pour former le C-S-H. Dès qu'il y a suffisamment de ciment hydraté pour saturer la solution interstitielle en portlandite, le C-S-H se forme sur la surface des grains de la fumée de silice. Neville [2000] a observé que la moitié de la fumée de silice réagit durant les 24 premières heures et les deux tiers en trois jours lorsque la masse de fumée de silice correspond à 10 % de la masse totale du liant. La rapidité de la réaction est reliée à la finesse très élevée de la fumée de silice qui joue le rôle de sites de germination pour la portlandite.

Le C-S-H produit par la fumée de silice possède un rapport CaO/SiO_2 plus faible que le C-S-H obtenu par l'hydratation du ciment Portland seul. De plus, ce rapport diminue avec l'augmentation du dosage de la fumée de silice. La teneur en alcalis du C-S-H produit par la fumée de silice est plus élevée que celle mesurée dans le C-S-H produit par le ciment [Regourd, 1983].

Selon Sellevold et Justness [1992], la réaction pouzzolanique de la fumée de silice n'utilise que l'eau contenue dans la chaux hydratée. Donc, le degré d'hydratation des pâtes avec fumée de silice pourrait être obtenu considérant que seul le ciment Portland influence la quantité d'eau non évaporable. Cette approche a été utilisée par Aouad [1999] dont les résultats sur le degré d'hydratation en fonction du rapport E/L, semblent confirmer que la fumée de silice ne consomme pas d'eau lors de l'hydratation. Cependant, son calcul du degré d'hydratation a été basé sur la mesure de la quantité d'eau évaporable et ne pas sur la quantité d'eau liée chimiquement aux hydrates.

La fumée de silice diminue la taille des pores capillaires sans nécessairement diminuer la porosité totale. La pâte de ciment devient plus dense et moins perméable. Tout cela cause une augmentation de l'autodessiccation de la pâte de ciment et une évolution plus lente de la résistance en compression [Neville, 2000].

1.3. 4 Hydratation du ciment en présence des cendres volantes

L'effet des cendres volantes sur l'hydratation du ciment est moins bien compris que l'effet de la fumée de silice car les cendres volantes sont beaucoup plus hétérogènes. Selon Takemoto et Uchikawa [1980], les cendres volantes accélèrent l'hydratation du ciment Portland. Les ions Ca^{2+} sont adsorbés par la pouzzolane contenue dans les cendres. Cette adsorption cause un déséquilibre dans la solution interstitielle et une dissolution plus rapide des ions Ca^{2+} provenant du C_3S . Donc, il se produit une précipitation plus rapide de C-S-H. Selon ces auteurs, les cendres volantes réagissent comme des sites de germination pour les produits d'hydratation. Takemoto et Uchikawa [1980] ont également étudié, par calorimétrie, la cinétique d'hydratation des pâtes de ciment avec et sans cendres volantes. D'après leurs résultats, la quantité totale de chaleur dégagée après 24 heures d'hydratation est plus importante dans la pâte de ciment avec cendres volantes, ce qui explique encore une fois, l'accélération de l'hydratation du ciment en présence des cendres volantes.

Les cendres volantes réagissent aussi avec la portlandite libérée lors de l'hydratation du C_3S et du C_2S pour former le C-S-H (réaction pouzzolanique). Cette réaction est très lente. Dans le cas des cendres volantes de classe F, il peut s'écouler plus qu'une semaine avant que cette réaction ne débute. Le degré d'hydratation des cendres volantes pourrait être inférieur à 50 % après une année de mûrissement. La partie amorphe des cendres volantes commence à réagir lorsque la valeur du pH du liquide interstitiel atteint d'au moins 13,2 [Fraay et coll., 1989]. Donc, une partie de l'hydratation du ciment doit se faire avant que les cendres volantes ne réagissent, ce qui explique le retard de la réaction pouzzolanique. La réactivité des cendres volantes augmente avec l'augmentation de la température.

Selon les travaux de Xu [1992], les cendres volantes consomment, en plus de la portlandite, une certaine quantité d'eau afin de former des hydrates. Cette situation a donc une influence directe sur la quantité d'eau liée chimiquement dans la pâte de ciment. La figure 1.7 montre l'augmentation de la quantité d'eau non évaporable W_n en fonction du temps de mûrissement.

Les cendres volantes retardent la prise du béton à cause de la libération des ions SO_4^{2-} présents à la surface des grains de cendres volantes. Elles diminuent la résistance en compression du béton, surtout au jeune âge [Neville, 2000].

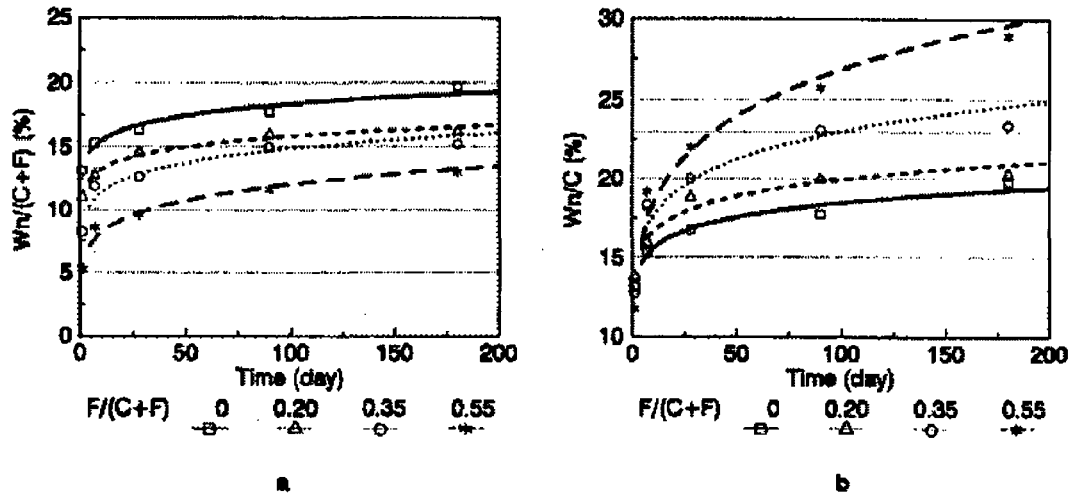


Figure 1. 7 - Évolution de la quantité d'eau non évaporable en fonction du temps [Xu, 1992]
 $Wn(t)$ est exprimé en fonction de la quantité de liant

1.3. 5 Hydratation du ciment en présence du laitier

Le ciment Portland contient les trois principaux activateurs du laitier : le gypse, la chaux libérée lors de l'hydratation des silicates et les alcalis provenant des sulfates alcalins. Quand le laitier entre en contact avec de l'eau il se forme un gel imperméable autour de ses grains qui bloque la dissolution du laitier. Les ions sulfates (provenant du gypse et des sulfates alcalins) dissolvent ce gel pour former une couche extérieure d'hydrates avec une structure plus grossière qui ne s'oppose plus à la pénétration de l'eau. Quand la solution interstitielle devient saturée en ions Ca^{2+} (provenant de la chaux libérée par l'hydratation du C_3S et du C_2S et par la dissolution du gypse) et en ions alcalins (provenant des sulfates alcalins) l'hydratation du laitier s'accélère. L'eau passe au travers de la première couche d'hydrates et il se forme des nouveaux hydrates à l'intérieur des grains de laitier (Figure 1.8) [Aïtcin, 2001 (b)].

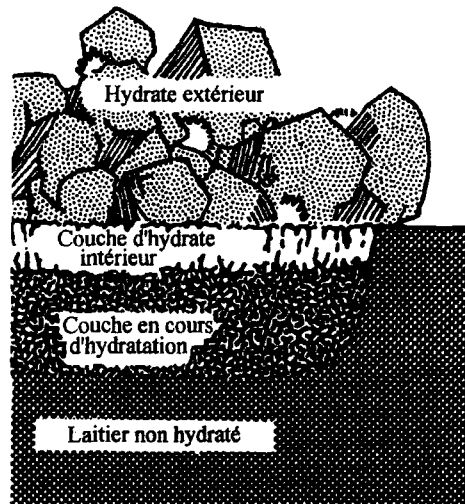


Figure 1. 8 - Principe de l'hydratation du laitier [Aïtcin, 2001 (b)]

Dans le cas de l'activation alcaline (activation par la chaux ou par la soude), les principaux produits de l'hydratation du laitier sont le C-S-H et C_4AH_13 . Dans le cas de l'activation sulfatique (provenant du gypse), les principaux produits de l'hydratation du laitier sont le C-S-H et l'ettringite. L'ettringite ainsi formé possède les aiguilles courtes et fines. Le C-S-H obtenu par l'hydratation du laitier est mal cristallisé [Regourd, 1980].

Le laitier retarde l'hydratation du C_3S en allongeant la période dormante et la période de prise mais, il accélère la réaction pendant la période de ralentissement car le laitier devient le site de dépôt du C-S-H produit par l'hydratation du C_3S . L'hydratation du C_3A et du C_4AF est aussi retardée en présence du laitier durant la période dormante et la période de prise [Uchikawa, 1986].

En présence du laitier la pâte de ciment est plus dense. Il y a aussi une diminution du pic de température. Le laitier retarde le temps de prise du béton et augmente sa résistance en compression à partir de 28 jours [Neville, 2000].

1.4 Mécanismes à l'origine du retrait de dessiccation et de l'autodessiccation

Avant d'aborder le phénomène du retrait endogène, il est important de décrire la porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment. Il faut également présenter les mécanismes pouvant engendrer un retrait de dessiccation ou d'autodessiccation de la pâte qui sont étroitement liés aux différents états de l'eau contenue dans cette pâte. Il s'agit des mécanismes suivants : la variation de la dépression capillaire, la variation de la tension superficielle et la variation de la pression de disjonction.

1.4.1 Porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment

La porosité de la pâte comprend plusieurs familles de vides. La dimension des ces vides est comprise entre quelques millimètres et quelques dizaines de nanomètres.

Les plus grands vides sont les vides d'air piégés et les défauts de compactage (diamètre > 1 mm). Ensuite on retrouve les bulles d'air entraîné, dont le diamètre peut varier de 10 μm à 1 mm. Viennent ensuite les pores capillaires ayant des diamètres compris entre 0,01 μm et 5 μm . Les plus petits sont les pores de gel possédant des diamètres inférieurs à 40 nanomètres [Mehta, 1986].

L'eau dans la pâte de ciment hydraté se retrouve sous différentes formes. On retrouve, tout d'abord, l'eau des pores capillaires. L'eau contenue dans les plus gros pores capillaires (0,05 μm à 5 mm) est libre car les forces de surface n'affectent qu'une proportion faible du volume total des pores. Par contre, l'eau contenue dans les pores capillaires plus petits (0,01 à 0,05 μm) n'est plus libre. Elle est soumise à des forces de surface qui deviennent de plus en plus importantes à mesure que le diamètre diminue. On retrouve aussi de l'eau adsorbée qui est physiquement liée sur les surfaces des hydrates, surtout sur les parois des pores capillaires ou des pores de gel [Gagné, 1997].

Dans la structure même de C-S-H on retrouve de l'eau interfeuillet et de l'eau liée chimiquement. La première est retenue entre les feuillettes de C-S-H par des liens hydrogène. Comme son nom l'indique, la deuxième est liée chimiquement avec le ciment et fait partie intégrante du C-S-H.

1.4. 2 Variation de la dépression capillaire

Le mécanisme de dépression capillaire est basé sur l'équilibre thermodynamique des phases liquide et gazeuse dans la porosité capillaire. Ce mécanisme résulte des lois de Kelvin et de Laplace.

- Loi de Laplace

En supposant que les pores capillaires dans la pâte de ciment sont cylindriques et que les interfaces liquide/gaz sont des ménisques sphériques (Figure 1.9), l'équilibre hydrostatique de l'eau liquide (non écoulement de l'eau) dans un pore peut être exprimé par l'équation de Laplace [Baroghel-Bouny, 1994] :

$$P_g - P_l = \frac{2\sigma_{l/g}}{r_{ms}} \quad (1.7)$$

$P_g = P_a + P_v$:	Pression de la phase gazeuse;
P_a :	Pression partielle d'air sec;
P_v :	Pression partielle de vapeur d'eau;
P_l :	Pression de l'eau liquide;
$\sigma_{l/g}$:	Tension d'interface eau liquide/phase gazeuse;
$r_{ms} = r/\cos\alpha$:	Rayon du ménisque sphérique;
r :	Rayon du pore cylindrique;
α :	Angle de mouillage.

Selon l'équation de Laplace, l'eau liquide est en dépression par rapport à la phase gazeuse (dans un tube capillaire on suppose que la pression de la phase gazeuse est égale à la pression atmosphérique). Cette dépression capillaire augmente avec la diminution du rayon de pore.

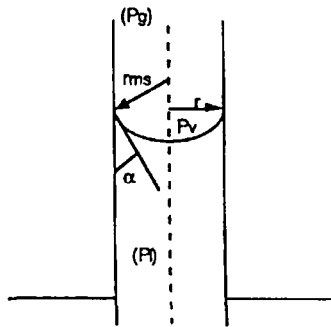


Figure 1. 9 - Illustration de la loi de Laplace [Baroghel–Bouny, 1994]

- Loi de Kelvin

L'équilibre thermodynamique entre l'eau liquide et la vapeur d'eau (non évaporation de l'eau) contenus dans un pore capillaire, à la température T peut être exprimé par l'équation de Kelvin [Baroghel–Bouny, 1994] :

$$P_l - P_g = \frac{R \cdot T \cdot \rho_l}{M} \ln h \quad (1.8)$$

R :	Constante des gaz parfaits;
T :	Température absolue du système;
ρ_l :	Masse volumique de l'eau liquide;
M :	Masse molaire de l'eau;
$h = P_v / P_{vs}$:	Humidité relative de la phase gazeuse;
P_v :	Pression partielle de vapeur d'eau;
P_{vs} :	Pression de vapeur saturante de l'eau à la température T.

L'équation de Kelvin donne une relation entre la dépression capillaire ($P_l - P_g$) et l'humidité relative h qui règnent dans un pore capillaire. Pour un pore capillaire, en utilisant l'équation de Laplace, on peut calculer la dépression de la phase liquide et ensuite en utilisant l'équation de Kelvin calculer l'humidité relative de la phase gazeuse. Le tableau 1.2 présente les valeurs de l'humidité relative et de la dépression capillaire pour les différents rayons des pores capillaires.

Tableau 1. 2 - Valeurs de l'humidité relative et de la dépression capillaire pour différents rayons des pores capillaires [Baron, 1982]

r (nm)	50	25	10	5
h (%)	98	95	90	80
$(P_l - P_g)$ (MPa)	3	6	15	31

Au cours de l'hydratation, les hydrates remplissent les espaces entre les grains de ciment. Ainsi, le rayon moyen des pores capillaires diminue, ce qui conduit à une diminution de l'humidité relative interne, donc une autodessiccation de la pâte de ciment et une augmentation de la dépression capillaire. Cette dépression capillaire est accompagnée par une compression de la phase solide de la pâte, ce qui engendre le retrait. Pour une humidité relative de 80 %, la dépression capillaire peut atteindre environ 30 MPa, donc le squelette solide peut subir une compression assez importante. La variation de la dépression capillaire est la cause principale du retrait d'autodessiccation (Paragraphe 1.6.3).

1.4. 3 Variation de la tension superficielle des particules colloïdales

Au voisinage d'une surface solide, il existe des atomes ou des molécules qui subissent des forces d'attraction. À cause de la dissymétrie de ces forces, il se produit des petites variations dans les distances interatomiques ou intermoléculaires, ce qui engendre des forces de tension parallèles à la surface solide. Ces forces de tension tangentes représentent la tension superficielle [Baron, 1982 ; Hua, 1992]. La tension superficielle joue un rôle important dans

les matériaux dont la surface spécifique est très élevée ce qui est le cas de la pâte de ciment. Dans la pâte, l'adsorption des molécules d'eau sur les surfaces solides provoque une relaxation des tensions superficielles. Par contre, la désorption entraîne une augmentation des tensions superficielles du squelette solide, ce qui cause un retrait.

Selon Hua [1992], pour une humidité relative interne située entre 100 % et 80 %, la tension superficielle des particules colloïdales est pratiquement constante. Dans la pâte de ciment l'humidité relative varie dans les mêmes limites car l'hydratation du ciment s'arrête à environ 80 % d'humidité relative. Donc ce mécanisme n'a pas d'effet sur le retrait d'autodessiccation.

1.4. 4 Variation de la pression de disjonction

Ce mécanisme concerne l'interaction entre deux surfaces solides recouvertes des molécules d'eau adsorbées. À une température donnée, l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée dépend de l'humidité relative. Il existe une certaine humidité relative à partir de laquelle la couche d'eau adsorbée ne peut plus se développer librement. Si on augmente l'humidité relative au-dessus de cette valeur limite, l'adsorption a tendance à séparer ces deux surfaces solides pour augmenter l'épaisseur de la couche adsorbée. Donc, les deux surfaces solides subiront une pression appelée la pression de disjonction [Baron, 1982 ; Hua, 1992].

La pression de disjonction entre les surfaces solides d'une pâte de ciment atteint sa valeur maximale quand la pâte est saturée. Si l'humidité relative de la pâte diminue, la pression de disjonction diminue aussi et les surfaces solides s'approchent en développant le retrait.

Des mesures effectuées par Ferraris [1986] (tiré de Hua [1992]), montre que la pression disjonctive est pratiquement constante quand l'humidité relative varie entre 100 % et 80 %. Donc, ce mécanisme comme le mécanisme précédent n'a pas d'effet sur le retrait d'autodessiccation.

1.5 Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation d'un matériau cimentaire est une mesure qui permet de caractériser, de façon globale, l'avancement des réactions d'hydratation. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de mesurer le degré d'hydratation d'un matériau cimentaire. Les méthodes basées sur la mesure de la chaleur d'hydratation et sur la mesure de l'eau liée chimiquement sont les plus souvent utilisées.

- Mesure de la chaleur d'hydratation

La mesure de la chaleur d'hydratation est un paramètre important pour décrire l'évolution du degré d'hydratation. Cette mesure peut se faire par un essai de calorimétrie isotherme. Ainsi, le degré d'hydratation $\alpha(t)$ est défini de la façon suivante :

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q(t \rightarrow \infty)} \quad (1.9)$$

$Q(t)$: Quantité de chaleur dégagée au temps t ;

$Q(t \rightarrow \infty)$: Quantité totale de chaleur dégagée.

La quantité de chaleur dégagée au temps t est obtenue par intégration de la courbe de flux thermique en fonction du temps. La quantité totale de chaleur dégagée est généralement évaluée sur la base des enthalpies des réactions d'hydratation de chaque phase minérale du ciment. Les données de la littérature sur ce sujet sont relativement variables [Breugel, 1991].

- Mesure de l'eau liée chimiquement

La quantité d'eau liée chimiquement aux hydrates (eau non évaporable) est proportionnelle à l'avancement de l'hydratation des matériaux cimentaires. Elle permet de définir le degré d'hydratation $\alpha(t)$ à la façon suivante :

$$\alpha(t) = \frac{W_n(t)}{W_n(t \rightarrow \infty)} \quad (1.10)$$

$W_n(t)$: Quantité d'eau liée chimiquement au temps t ;

$W_n(t \rightarrow \infty)$: Quantité totale d'eau liée chimiquement à $t = \infty$.

La quantité d'eau liée chimiquement aux hydrates est habituellement déterminée à partir de la différence de masse d'une éprouvette soumise à un séchage à 105°C et un chauffage à 1000°C. Le séchage à 105°C permet d'évaporer l'eau libre et l'eau adsorbée. Le traitement thermique à 1000°C détruit les hydrates et permet ainsi de libérer l'eau chimiquement liée à ces derniers. Dans le cas d'une pâte de ciment la quantité d'eau liée chimiquement au temps t $W_n(t)$ peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [Charron, 2003] :

$$W_n(t) = \frac{M_{105} - M_{1000} - PF_{\text{ciment}} \cdot M_{105}}{M_{1000}} \quad [\text{g} / \text{g ciment}] \quad (1.11)$$

M_{105} : Masse de l'échantillon séché à $T = 105^\circ\text{C}$;

M_{1000} : Masse de l'échantillon chauffé à $T = 1000^\circ\text{C}$;

PF_{ciment} : Perte au feu du ciment.

Dans le cas d'un mortier il faut prendre en considération la masse du sable lors du calcul de la quantité d'eau liée chimiquement. Ballander [1974] (tiré de Maltais [1996]) a donc proposé l'équation suivante :

$$W_n(t) = \frac{M_{105} - M_{1000} - PF_{\text{sable}} \cdot M_{105} \cdot g / (1+g) - PF_{\text{ciment}} \cdot M_{105} \cdot 1 / (1+g)}{M_{1000} - M_{105} \cdot g / (1+g) + PF_{\text{sable}} \cdot M_{105} \cdot g / (1+g)} \quad [\text{g} / \text{g ciment}] \quad (1.12)$$

PF_{sable} : Perte au feu du sable;

g : Rapport massique sable/ciment.

Chaque phase minérale du ciment réagit différemment avec l'eau pour former des hydrates. Par conséquent, la quantité totale d'eau chimiquement liée à chaque phase minérale est différente. Breugel [1992] a proposé une équation simple permettant de calculer $W_n(t \rightarrow \infty)$:

$$W_n (t \rightarrow \infty) = a * (C_3S) + b * (C_2S) + c * (C_3A) + d * (C_4AF) \quad (1.13)$$

Le tableau 1.3 présente les valeurs des coefficients a, b, c et d à plusieurs échéances. Molina [1993] a fait un résumé de la littérature sur la quantité d'eau consommée dans les réactions d'hydratation de quatre principales phases minérales du ciment (Tableau 1.4). Selon cet auteur les quantités d'eau consommées sont basées sur la stœchiométrie des réactions d'hydratation.

Tableau 1. 3 - Eau totale chimiquement liée aux phases minérales du ciment (g/g)
[Breugel, 1991]

Auteur	a C ₃ S	b C ₂ S	c C ₃ A	d C ₄ AF	Age de la pâte
Powers et Brownyard [1946]	0,187	0,158	0,665	0,213	0,5 an
Copeland et coll. [1960]	0,228	0,180	0,429	0,132	1 an
	0,234	0,178	0,514	0,158	6,5 ans
	0,230	0,196	0,522	0,109	13 ans

Tableau 1. 4 - Eau consommée lors d'hydratation des phases minérales du ciment
[Molina, 1993]

Phase mineral	Masse	Eau combinée	Produit d'hydratation
C ₃ S	w ₁	0,24 w ₁	CH + C-S-H
C ₂ S	w ₂	0,21 w ₂	CH + C-S-H
C ₃ A	w ₃	0,40 w ₃	C-S-H + ettringite + C-A-H
C ₄ AF	w ₄	0,37 w ₄	AFm + AFt + hydrogrenat

1. 6 Retrait endogène

Le retrait endogène du béton est le retrait qui se développe en l'absence de tout apport d'eau extérieure, de toute évaporation et de tout changement de température. Ce retrait peut avoir une origine chimique et une origine physique.

1.6. 1 Retrait endogène d'origine chimique ou la contraction Le Chatelier

Le retrait endogène d'origine chimique a été découvert pour la première fois par Le Chatelier en 1900 à partir de 2 expériences présentées à la figure 1.10. Lors de la première expérience, le flacon a été rempli avec une pâte de ciment qui s'hydratait en absence d'évaporation et de l'eau extérieure. Le Chatelier a remarqué que le volume apparent de la pâte de ciment durcie était plus faible que le volume initial à l'état frais. Lors de la deuxième expérience, le col du flacon a été rempli par l'eau. Dans ce cas, Le Chatelier a remarqué que, en s'hydratant, la pâte de ciment a pompé de l'eau qui se trouvait dans le col du flacon. À la fin de l'expérience le flacon éclatait suite au gonflement de la pâte de ciment qu'il contenait. Donc, dans ces conditions, la pâte de ciment a augmenté en volume apparent (éclatement du flacon) et en même temps, a diminué en volume absolu (baisse du niveau de l'eau dans le col du flacon) [Aïtcin, 2001 (b)].

À partir de ces 2 expériences, Le Chatelier a conclu que le volume absolu de la pâte de ciment hydraté est inférieur à la somme du volume absolu du ciment anhydre qui s'est hydraté et de l'eau utilisée pour l'hydratation du ciment. Il s'agit en effet d'une contraction chimique qui est souvent appelé « contraction Le Chatelier ».

Le Chatelier était conscient que les valeurs obtenues dans ces expériences ne représentaient pas les valeurs réelles de la diminution du volume de la pâte de ciment hydraté car, d'une part, l'hydratation du ciment a commencé avant la mise en flacon des ingrédients et, d'autre part, l'hydratation du ciment n'est pas complète.

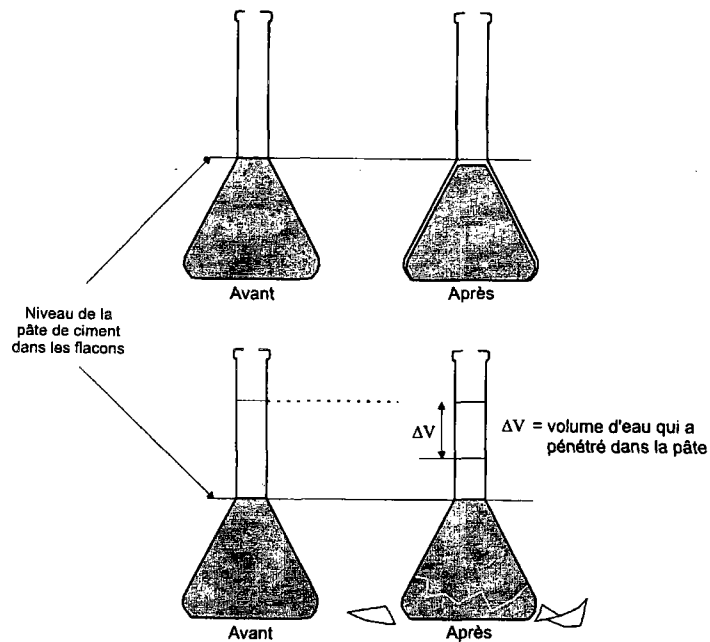


Figure 1. 10 - Expérience de Le Chatelier [Aïtcin, 2001 (b)]

La contraction Le Chatelier peut être évaluée à l'aide des équations stœchiométriques qui décrivent l'hydratation des différentes phases minérales du ciment. À partir de l'équilibre stœchiométrique de la masse des réactifs et des produits, en connaissant leurs masses volumiques, on peut évaluer le volume total des réactifs et des produits, puis calculer la réduction de volume de chaque phase minérale [Tazawa et coll., 1995 (a) ; Justnes et coll., 1998 (b)]. En se basant sur les équations publiées par Tazawa et coll. [1995 (a)] et Justnes et coll. [1998 (b)], Charron [2003] a calculé la contraction Le Chatelier d'une pâte fabriquée avec un ciment type 10 ayant une composition Bogue standard. Selon cet auteur, la contraction Le Chatelier s'élève à environ 8 % de volume initial du ciment réagit ou approximativement à 6 ml/100 g de ciment hydraté.

1.6. 2 Équations de Powers

Pendant l'hydratation, à cause de la contraction Le Chatelier, il y a une formation des vides gazeux dans la porosité capillaire du béton (en système scellé). Le volume de ces vides, comme les volumes des autres constituants de la pâte de ciment, peuvent être calculés à l'aide des équations dites « de Powers ». Ce calcul est basé sur les suppositions suivantes [Neville, 2000] :

- La porosité de l'ensemble des hydrates est approximativement de 28 % et ces pores sont nécessairement remplis d'eau lors de la formation des hydrates;
- L'eau combinée chimiquement représente environ 23 % de masse du ciment qui s'hydrate;
- Le volume des produits solides d'hydratation est égal au volume de ciment hydraté plus 0,746 fois le volume d'eau combinée chimiquement ;
- L'hydratation se produit en milieu scellé.

La figure 1.11 montre les proportions volumiques de l'hydratation dans les pâtes de ciment ayant les différents rapports E/C pour les différents degrés d'hydratation (on suppose l'utilisation de 100 g de ciment). Les constituants de la pâte de ciment sont représentés par différentes couleurs. Après un certain degré d'hydratation, on peut donc distinguer les produits solides d'hydratation et l'eau des pores de gel dont la somme représente le volume des hydrates formés et les pores capillaires qui sont soit vides, soit partiellement remplis d'eau.

Pour un rapport E/C = 0,42, il y a juste assez d'eau pour hydrater tous les grains de ciment. Pour un degré d'hydratation de 100 %, il ne reste plus d'eau dans la porosité capillaire mais, en système scellé, il existe une porosité capillaire remplie de vapeur d'eau. Le volume de ces vides (5,8 ml) représente environ 9 % de volume des hydrates formés (49,0 ml + 19,1 ml = 68,1 ml).

Pour un rapport E/C = 0,50, après l'hydratation complète du ciment, il reste un surplus d'eau dans la porosité capillaire. On peut vérifier que le volume des vides capillaires représente environ 9 % de volume des hydrates formés.

Dans le cas d'un rapport $E/C = 0,30$, un manque d'eau dans le système arrête l'hydratation avant que tout le ciment ne se soit hydraté. Le degré théorique maximal d'hydratation est de l'ordre de 70 %. Le volume des vides dans la porosité capillaires (4,2 ml) représente, encore une fois, environ 9 % du volume des hydrates formés (34,8 ml + 13,5 ml = 48,3 ml).

Ces exemples sont issus de calculs théoriques. Dans la réalité, l'hydratation n'est jamais complète à cause des gros grains de ciment qui ne s'hydratent jamais complètement. En effet, lors de l'hydratation, ces grains sont recouverts d'une épaisse coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante [Gagné, 1997]. De plus, l'hydratation s'arrête lorsque l'humidité relative interne devient inférieure à environ 80 %.

Quel que soit le rapport E/C , on remarque que, dans un système scellé, il existe toujours une certaine proportion de la porosité capillaire qui demeure vide et cette proportion augmente avec le degré d'hydratation. Le volume de la porosité capillaire vide représente le retrait chimique ou la contraction Le Chatelier. Cette contraction ne dépend pas du rapport E/C , de la quantité d'eau ou la quantité de ciment initial. Elle dépend uniquement de la quantité d'hydrates formés. Cependant, pour un degré d'hydratation donné, le rapport entre le volume des vides capillaires et le volume total de la pâte augmente avec la diminution du rapport E/C .

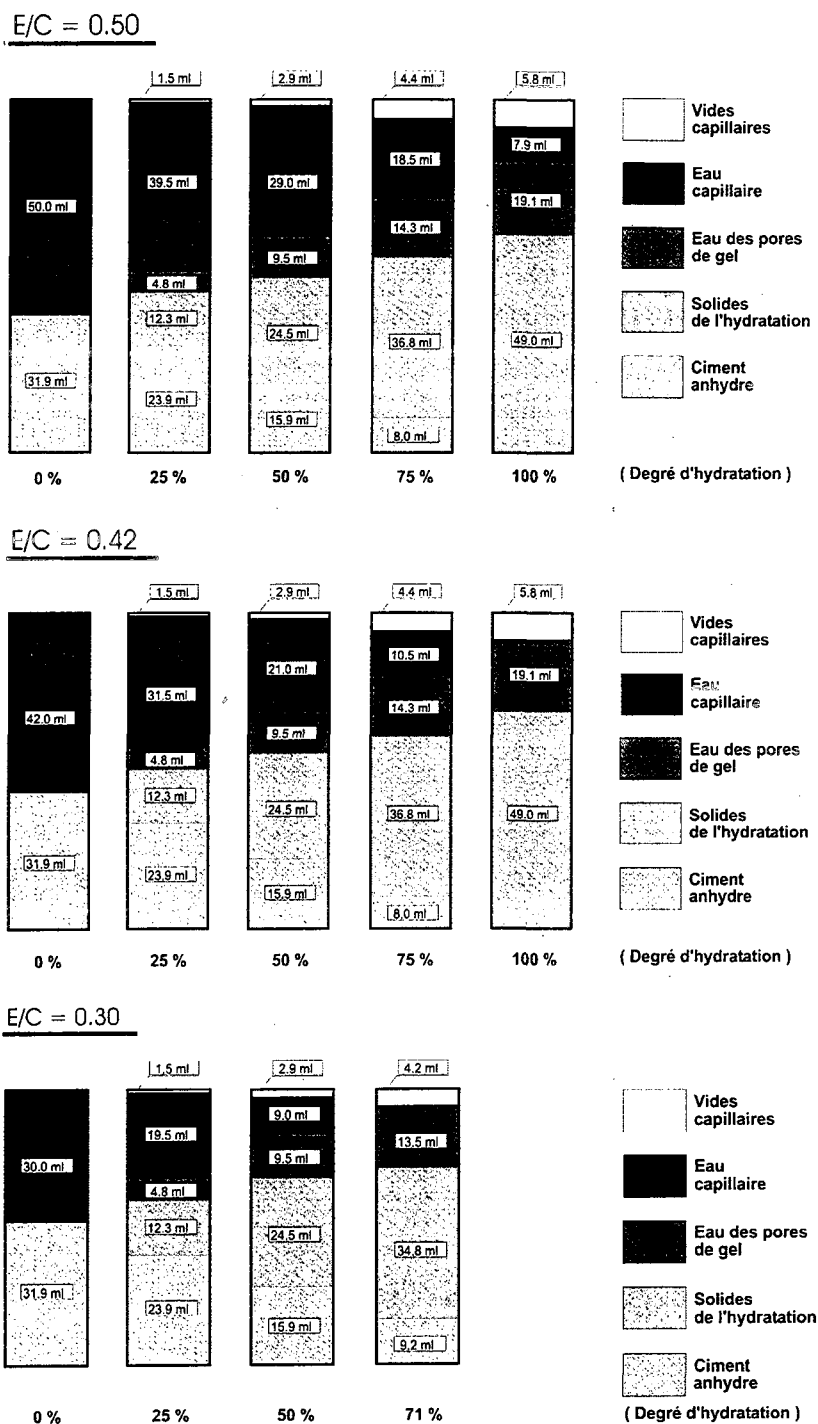


Figure 1. 11 - Bilan volumique de l'hydratation des pâtes de ciment ayant les rapports E/C de 0,50, 0,42 et 0,30 pour les différents degrés d'hydratation

1.6. 3 Retrait endogène d'origine physique ou le retrait d'autodessiccation

Le retrait d'autodessiccation est une conséquence de la contraction Le Chatelier. Il ne peut se produire que si le matériau est scellé (aucun échange hydrique avec l'environnement). Lorsque (en milieu scellé) le ciment commence à faire sa prise, il se forme un squelette rigide qui empêche les déformations de la pâte. La diminution du volume par la contraction Le Chatelier ne se présente plus comme une diminution du volume externe. Il se forme plutôt une certaine porosité capillaire à l'intérieur de la pâte où la contraction Le Chatelier est représentée par le volume des vides gazeux créés dans ces pores. Ces vides gazeux sont en équilibre avec l'eau capillaire par les ménisques de l'interface. Les lois de Kelvin et de Laplace expliquent cet équilibre et démontrent que l'eau capillaire se trouve en dépression par rapport à la phase gazeuse. Les ménisques se forment premièrement dans les plus gros pores tandis que les pores plus fins sont remplis d'eau. Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, les pores plus fins pompent l'eau contenue dans les plus gros pores, le volume des vides gazeux augmente, les ménisques d'interface se courbent et se forment dans les pores de plus en plus petits. Tous ces changements au cours de l'hydratation engendrent une diminution de l'humidité relative dans les pores capillaires et une augmentation de la dépression capillaire, c'est à dire une augmentation des forces qui s'exercent sur les parois des capillaires au niveau des ménisques d'interface.

Le phénomène de la diminution d'humidité relative dans la porosité capillaire est appelé l'autodessiccation. Il s'agit en effet, d'une dessiccation du matériau de l'intérieur. Dans les pâtes de ciment, l'humidité relative dû à l'autodessiccation est limitée approximativement à 80 % car à ce moment, l'hydratation s'arrête et le système devient thermodynamiquement stable [Jensen, 1995].

La dépression capillaire provoquée par la contraction Le Chatelier engendre une compression de la phase solide de la pâte de ciment donc, une diminution du volume externe. Dans ce cas, la diminution du volume externe est appelée le retrait d'autodessiccation. Alors, en milieu scellé, avant la prise du ciment, le retrait endogène est un retrait chimique relié directement à la réaction d'hydratation. Après la prise le retrait endogène représente une somme du retrait chimique et du retrait d'autodessiccation.

S'il y a une source d'eau extérieure le retrait chimique se développe de la même manière mais il n'y a plus du retrait d'autodessiccation. Le départ de l'eau dans les capillaires causé par la contraction Le Chatelier est compensé par un apport d'eau extérieure. Donc, les ménisques d'interface ne se forment pas dans la porosité capillaire d'où l'absence de dépression capillaire. Ce mécanisme est limité parce qu'avec l'hydratation, la pâte de ciment devient de plus en plus imperméable ce qui diminue la migration de l'eau de l'extérieur vers les pores capillaires.

1.7 Influence de la température sur le retrait endogène

La température influence la cinétique d'hydratation du ciment en accélérant les réactions chimiques entre l'eau et ses constituants. Le retrait d'origine chimique peut être accéléré par une température élevée. Cependant, la valeur de ce retrait, pour un degré d'hydratation donné, est indépendante de la température.

Le retrait d'autodessiccation s'explique par le mécanisme de dépression capillaire, plus précisément, par les lois de Kelvin et de Laplace. L'équation de Laplace (Paragraphe 1.4.2) met en relation la dépression capillaire, la tension d'interface phase liquide/phase gazeuse et le rayon du ménisque d'interface. La température influence la viscosité de la phase liquide et, par conséquent, sa tension de surface. Selon Scott et col. [1963] (tiré de Roussel, 2000), la tension de surface entre l'eau pure et l'air diminue de 15 % en passant de 20°C à 60°C. On observe le même phénomène dans la porosité capillaire de la pâte de ciment. Quand la température baisse, la tension de surface de la phase liquide augmente en augmentant la dépression capillaire. Donc, pour un même degré d'hydratation, le retrait d'autodessiccation augmente quand la température diminue.

Il faut donc, séparer l'effet de la température sur la cinétique d'hydratation et l'effet de la température sur le retrait d'autodessiccation. Ainsi, le retrait d'autodessiccation d'un béton peut s'exprimer en fonction de son âge équivalent au lieu de son âge réel. L'âge équivalent correspond au temps qu'aurait mis un béton mûri à une température de référence, pour avoir le même degré d'hydratation que le même béton ayant subi une histoire de mûrissement

quelconque. Pour un âge équivalent donné, un béton possède le même degré d'hydratation donc, la même maturité [Roussel, 2000].

Jensen [1998] a étudié l'influence de la température sur le retrait endogène du béton à maturité égale. Ces résultats montrent que le retrait endogène du béton au jeune âge augmente lorsque la température baisse. Par contre, le retrait endogène à partir de 5 jours est plus élevé pour la plus haute température, ce qui est, selon Jensen, non explicable pour le moment (Figures 1.12 et 1.13).

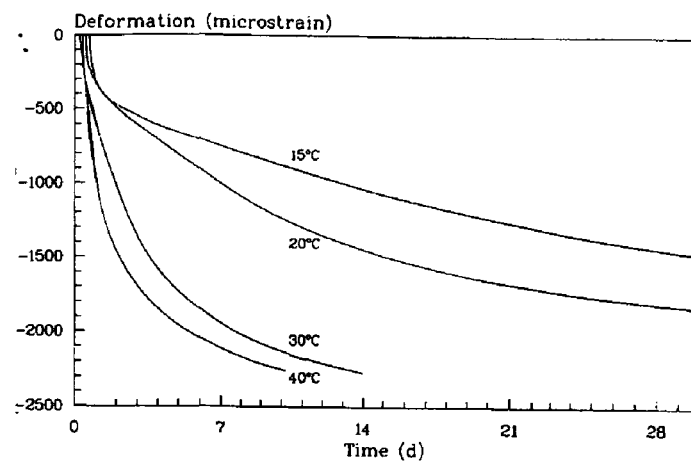


Figure 1. 12 - Retrait endogène d'une pâte de ciment avec 20 % de fumée de silice, E/L = 0,30, pour les températures de mûrissement variant de 15°C à 40°C. Le temps est mesuré à partir de l'addition de l'eau. [Jensen, 1998]

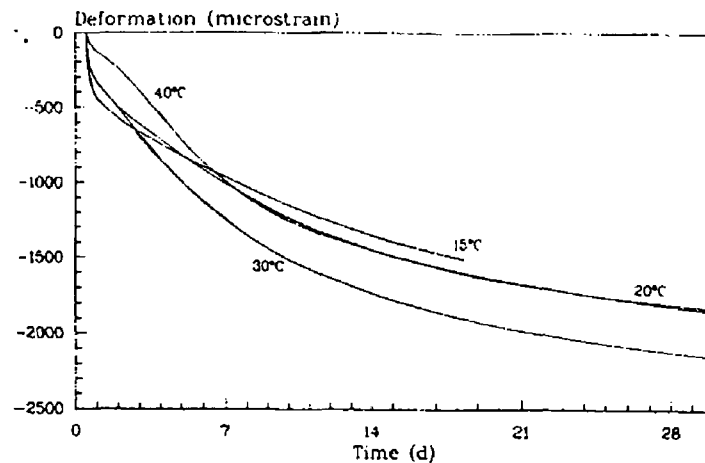


Figure 1. 13 – Retrait endogène d’une pâte de ciment avec 20% de fumée de silice, E/L = 0,30. Temps est en âge équivalent à 20°C [Jensen, 1998]

1.8 Gonflement au jeune âge

Quand on parle du gonflement au jeune âge, il faut distinguer deux cas. Le premier cas a été observé, pour la première fois, par Le Chatelier. Il a remarqué qu’une pâte de ciment qui s’hydrate en présence d’une source d’eau extérieure voit son volume apparent augmenter. Ce gonflement peut s’expliquer par l’expansion de la phase solide due à l’hydratation du ciment avec l’eau externe.

Le deuxième cas du gonflement au jeune âge a été observé par plusieurs chercheurs. Il comprend un gonflement de la pâte de ciment qui s’hydrate en l’absence d’une source d’eau extérieure. L’explication la plus courante de ce gonflement a été proposée par Vernet et Cadoret [1992]. Selon ces chercheurs, l’expansion est provoquée par les pressions de cristallisation lors de la croissance des aiguilles d’ettringite. La formation des cristaux de portlandite cause aussi une expansion mais cette expansion est moins importante que celle causée par la formation de l’ettringite.

Odler et coll., [1972] proposent une explication basée sur le fait que les hydrates formés occupent un volume plus important que les grains de ciment anhydre. À un moment donné les hydrates commencent se former dans un espace limité ce qui pourrait engendrer des contraintes dans le matériau et ensuite son expansion. Ce raisonnement ne prend pas en

compte le volume occupé initialement par l'eau. Si l'on prend en compte ce volume la réaction d'hydratation va plutôt engendrer une compression.

La dernière explication du gonflement de la pâte de ciment mûrie dans les conditions isothermes a été formulée par Barcelo [1997] (tiré de Garcia Boivin, 1999). Il a distingué la formation de deux types de C-S-H : le C-S-H externe qui se forme au début d'hydratation dans l'espace disponible entre les grains de ciment et le C-S-H interne qui se forme plus tard dans l'espace initialement occupé par les grains de ciment anhydre. Dans le cas de la formation du C-S-H externe, le bilan volumique de la réaction d'hydratation se traduit par une contraction. Dans le cas de la formation du C-S-H interne, l'eau nécessaire à l'hydratation passe au travers des couches du C-S-H externe qui entourent les grains de ciment. Quand les couches du C-S-H externe entrent en contact entre elles, la formation du C-S-H interne qui occupe un plus grand volume que les grains de ciment qu'il remplace, peut causer soit une densification du C-S-H externe, soit un écartement des grains de ciment.

1.9 Mesure de la contraction Le Chatelier

Dans la littérature on trouve deux types de méthodes pour mesurer la contraction Le Chatelier ou le retrait endogène d'origine chimique : les mesures par suivi du niveau de liquide d'immersion (mesures dilatométriques) et les mesures par pesée hydrostatique (mesures gravimétriques).

1.9.1 Mesures dilatométriques

Les mesures dilatométriques sont basées sur le dispositif utilisé par Le Chatelier (voir le paragraphe 1.6.1). La procédure consiste à introduire la pâte de ciment dans un flacon surmonté d'un tube capillaire. De l'eau est ensuite ajoutée au-dessus de la pâte jusqu'à mi-hauteur du tube. Pendant l'hydratation, le volume de la pâte diminue et on mesure une baisse du niveau de l'eau dans le capillaire.

Plusieurs auteurs ont développé des essais basés sur le dispositif utilisé par Le Chatelier, on peut citer :

- Buil [1979] a utilisé une petite cuve en acier inoxydable contenant environ 1 cm^3 de pâte et surmontée d'un tube capillaire. La cuve est plongée dans un bain thermostaté. Les variations du niveau d'eau dans le capillaire sont mesurées en continu à l'aide des cellules photoélectriques. L'évaporation de l'eau du capillaire est empêchée par une goutte de mercure. Le montage est utilisé pour évaluer la pente de la courbe de contraction Le Chatelier en fonction du rapport E/C qui variait de 0,27 à 0,55.
- Geiker [1983] a étudié la contraction Le Chatelier des pâtes et des mortiers en utilisant le montage présenté à la figure 1.14. Il a utilisé les tubes en verre dont le diamètre interne variait de 17 mm à 40 mm. La hauteur des tubes était aussi variable pour étudier des échantillons de différentes épaisseurs (entre 20 mm et 180 mm). Les échantillons de mortier ont été légèrement vibrés avant l'ajout de l'eau afin de faire sortir les bulles d'air retenues dans le mélange. Les essais ont été réalisés à des températures situées entre 10°C et 50°C à l'aide d'un bain thermostaté. Le rapport E/C variait de 0,30 à 0,50.

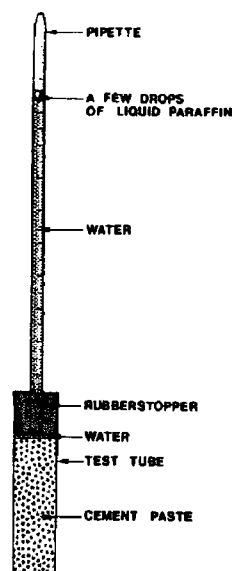


Figure 1. 14 – Dispositif de mesure de la contraction Le Chatelier des pâtes et des mortier [Geiker, 1983]

- Tazawa et Miyazawa [1992, 1995 (a)] ont utilisé les flacons de 300 ml pour augmenter la surface de contact entre l'échantillon et l'eau. Le flacon est rempli avec la pâte de ciment dont l'épaisseur variait de 3 mm à 12 mm en fonction du rapport E/C. Le restant du flacon et la burette sont ensuite remplis d'eau pure. Les déformations sont mesurées par suivi du niveau d'eau dans la burette.
- Justnes et coll. [1996, 1998 (a), 1998 (b)] ont utilisé les échantillons de pâte désaérée par une légère vibration lors de la mise en place dans un flacon de 50 ml. L'eau distillée est ajoutée par-dessus l'échantillon sur 1 cm d'épaisseur environ puis le flacon est fermé de façon étanche avec un bouchon. Une pipette graduée est installée dans le bouchon et remplie d'eau. Finalement une goutte d'huile est ajoutée dans la pipette pour empêcher l'évaporation de l'eau. Le flacon est conservé dans un bain thermostaté à 20°C lors d'essai. La contraction Le Chatelier est mesurée ponctuellement en suivant le niveau de l'eau dans la pipette. Les essais sont réalisés sur des pâtes de ciment de rapport E/C égale à 0,30 et à 0,40.
- Garcia Boivin [1999] a utilisé un montage semblable à celui de Justnes et coll., [1998]. Des flacons de géométries différentes ont été utilisés afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur de pâte et de la surface de contact pâte-eau sur le retrait chimique. L'échantillon de pâte a été désaéré par vibration. Pendant l'essai, le flacon est conservé dans un bain thermostaté à 20°C. Les déformations sont mesurées ponctuellement par suivi du niveau de l'eau dans la burette (Figure 1.15). Les pâtes de ciment de rapport E/C égal à 0,30 et à 0,50 ont été utilisées.

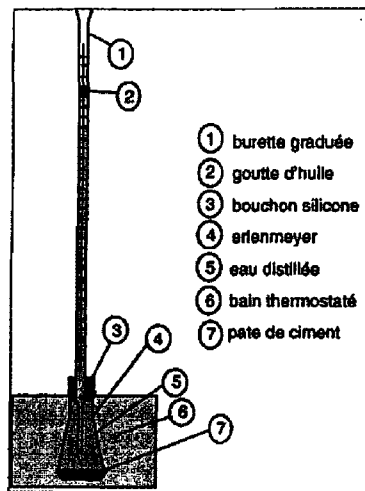


Figure 1. 15 – Dispositif utilisé pour les mesures dilatométriques de la contraction Le Chatelier [Garcia Boivin, 1999]

1.9. 2 Mesures gravimétriques

La méthode gravimétrique est basée sur la mesure indirecte du changement de volume par l'évaluation de la variation du poids d'un flacon placé sous l'eau dont le fond est rempli par la pâte et le restant par de l'eau. Pendant l'hydratation on observe une augmentation du poids correspondant à la quantité d'eau qui pénètre dans les vides formés par la contraction Le Chatelier. On peut citer les travaux des auteurs suivants :

- Rey [1950] (tiré de Buil, 1979) a développé un montage pour mesurer la contraction Le Chatelier par pesée. L'essai comporte un récipient, contenant environ 20 grammes de pâte, suspendu à une balance. L'augmentation du poids est égale à la contraction Le Chatelier exprimée en poids d'eau. Le récipient ne communique avec le liquide d'immersion que par un fin capillaire pour réduire la diffusion de l'eau interstitielle de la pâte vers le liquide environnant. Ce capillaire peut communiquer aussi avec l'huile qui arrête les diffusions ou avec du mercure afin d'augmenter la sensibilité de l'appareil. L'essai a été réalisé thermostaté.

- Garcia Boivin [1999] a appliqué les mesures gravimétriques sur les mêmes échantillons de pâte décrits dans les mesures dilatométriques. La formulation, la fabrication et la mise en place des échantillons de même que les fournitures (flacon, bouchon etc.) sont identiques. Une fois le flacon rempli avec la pâte de ciment, de l'eau est ajoutée à sa surface et le bouchon, contenant un petit trou, est installé sous l'eau. Le flacon est placé dans un bassin d'eau préalablement installé dans le bain thermostaté à 20°C et suspendu à une balance. L'augmentation du poids de flacon durant hydratation est mesurée en continu à l'aide d'un système d'acquisition de données (Figure 1.16).

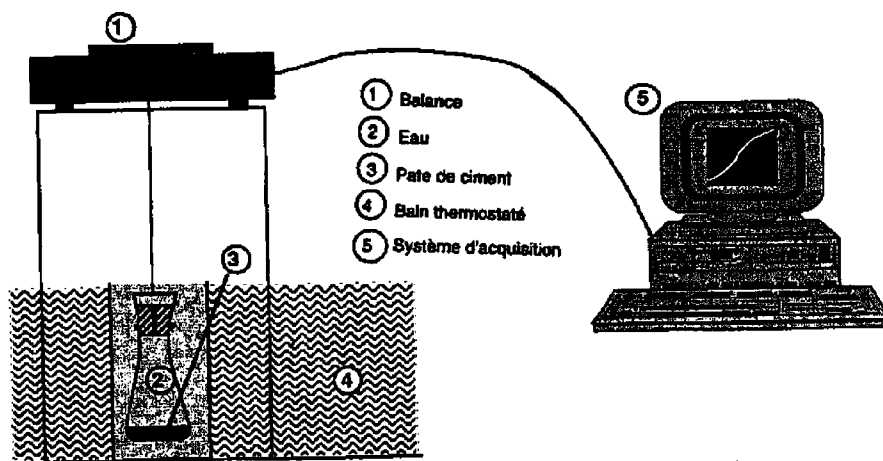


Figure 1. 16 – Dispositif utilisé pour les mesures gravimétriques de la contraction Le Chatelier [Garcia Boivin, 1999]

- Holt [2001] a utilisé un dispositif similaire à celui de Garcia Boivin [1999] pour mesurer le retrait chimique (contraction Le Chatelier) des pâtes de ciment et des mortiers. L'échantillon de pâte ou de mortier d'environ 20 mm d'épaisseur a été premièrement vibré pour faire sortir de l'air, puis le restant du flacon a été rempli avec de l'eau distillée. Une fois le flacon fermé, il est suspendu à une balance qui mesurait le poids de l'échantillon en continu. Les essais ont été réalisés à 20°C.

Les méthodes de mesure de la contraction Le Chatelier ont deux désavantages majeurs. L'eau qui est rajoutée s'infiltré dans la pâte de ciment et réagit avec elle. Par conséquent, le changement de volume qu'on mesure n'est plus représentatif du mélange initialement préparé. Le deuxième désavantage est relié à la perméabilité de pâte. Pendant l'hydratation, l'échantillon devient plus imperméable créant des zones où l'eau ne peut plus accéder, ce qui

sous estime la contraction mesurée. L'influence de l'imperméabilisation de l'échantillon sur la mesure pourrait être diminuée en diminuant ses dimensions (par exemple, son épaisseur) et en augmentant la surface du contact eau-pâte. Justnes et coll., [1996] et Garcia Boivin, [1999] ont remarqué que les mesures de la contraction Le Chatelier sont répétables et indépendantes de l'épaisseur de l'échantillon si le rapport E/C est supérieur à 0,40. L'épaisseur de l'échantillon devient le paramètre critique pour les rapports E/C plus faibles (Tazawa et coll., 1995 (a) ; Garcia Boivin, 1999). Pour cette raison Tazawa et coll., [1995 (a)] proposent une augmentation de la surface de contact entre l'échantillon et l'eau et une diminution de l'épaisseur de l'échantillon en fonction du rapport E/C. Garcia Boivin, [1999] a observé un effet d'échelle pour les pâtes dont le rapport E/C est égal à 0,30. La contraction mesurée a été d'autant plus faible que l'épaisseur de pâte introduite dans le flacon était grande. Cet effet est aussi remarqué lors de mesures dilatométriques et lors de mesures gravimétriques.

1. 10 Mesures du retrait endogène

Quand on mesure le retrait endogène, on doit respecter les conditions suivantes :

- Éviter tout échange hydrique entre le matériau et l'environnement. Donc, la masse du matériau doit rester constante pendant l'essai.
- Le matériau doit être maintenu dans les conditions isothermes. Si cette condition est difficile à respecter, il faut prendre en compte les déformations thermiques. On peut calculer les déformations thermiques en multipliant la température du mûrissement par le coefficient de dilatation thermique du matériau qui est le plus élevé immédiatement après le contact eau – liant et diminue avec la structuration des hydrates. Le retrait endogène est ensuite obtenu en soustrayant les déformations thermiques des déformations totales mesurées.
- Les mesures du retrait endogène doivent commencer le plus tôt possible après le malaxage du matériau frais car les déformations se développent dès que l'eau et le ciment entrent en contact.

Il existe deux types de mesures du retrait endogène : mesures volumétriques et mesures linéiques. Les mesures volumétriques consistent à mesurer les variations du volume d'un échantillon tandis que les mesures linéiques consistent à mesurer les variations dimensionnelles dans une seule direction.

1.10.1 Mesures linéiques du retrait endogène

Les mesures linéiques du retrait endogène consistent à évaluer les variations dimensionnelles dans une seule direction. Les résultats sont exprimés en microdéformation ($\mu\text{m/m}$) et calculés à l'aide de l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (1.14)$$

où L est la distance entre les deux points de mesure et L_0 est la distance initiale.

Dans la littérature on peut trouver de nombreux montages développés par les différents auteurs et basés sur les mesures linéiques du retrait endogène d'où l'on cite :

- Tazawa et Miyazawa [1998 (b)] ont utilisé les échantillons de pâte et de béton de 100 x 100 x 400 mm. Pendant les 24 premières heures, l'échantillon de béton enveloppé dans un film de polyester est conservé dans un moule en acier. Une feuille de téflon placée au fond et sur les côtés du moule permet de diminuer le frottement entre l'échantillon et le moule. Une plaque de polystyrène est placée entre les bouts du moule et l'échantillon pour mieux suivre ses déformations. Les déformations sont mesurées à l'aide de dilatomètres reliés à des plots installés aux deux extrémités de l'échantillon (Figure 1.17). Après 24 heures, l'échantillon est démoulé et enveloppé dans un papier d'aluminium autocollant. Les déformations sont ensuite mesurées à des échéances fixées. Les échantillons de pâte sont coulés dans des moules en polystyrène pour éliminer un effet de confinement par le moule. La température de l'échantillon est

suivie pendant l'hydratation. Les déformations thermiques sont ensuite calculées et soustraites des déformations mesurées pour obtenir les déformations endogènes.

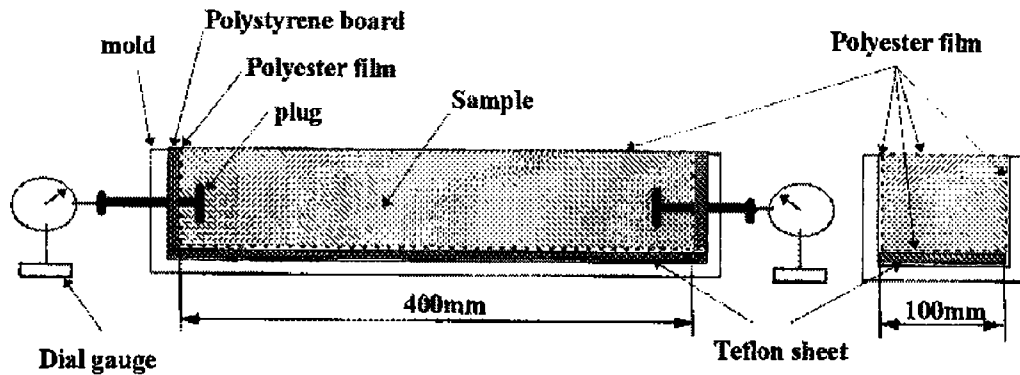


Figure 1. 17 – Appareillage pour les mesures linéiques du retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b)]

Ce montage permet de mesurer le retrait endogène à partir du début de la prise. L'essai est réalisé sur des pâtes de ciment dont le rapport E/C a été de 0,20, 0,30 et 0,50 et sur un grand nombre de bétons dont le rapport E/C variait de 0,20 à 0,65.

- Jensen et Hansen [1995] ont développé un dispositif appelé dilatomètre. Cet appareil consiste en deux plaques d'acier reliées de façon rigide par 4 barres à faible coefficient de dilatation thermique afin d'assurer une bonne stabilité dimensionnelle du système. L'échantillon de pâte est coulé dans un moule en polyéthylène qui est souple et plissé en accordéon pour assurer les libres déformations horizontales de l'échantillon. Un bout du moule est fixé à une plaque d'acier alors que l'autre est relié à la seconde plaque par un transducteur permettant la mesure de la longueur de l'échantillon (Figure 1.18). Lors d'essai le dilatomètre est placé dans un bain thermostaté. De plus la mesure se fait en continu. Selon les auteurs, ce dilatomètre permet de mesurer les déformations de l'échantillon avant sa prise.

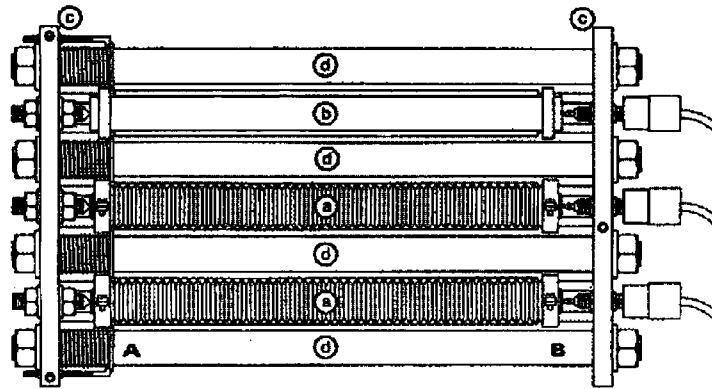


Figure 1. 18 – Dilatomètre pour les mesures du retrait endogène [Jensen et Hansen, 1995]
 a-deux échantillons à tester
 b-échantillon de référence de longueur approximative de 300 mm

- Roussel [2000] a mesuré le retrait endogène à l'aide d'un capteur de déplacement noyé dans le béton. Ce capteur est basé sur la variation de fréquence propre d'une corde vibrante subissant un allongement ou un rétrécissement. Le capteur est relié à un système d'acquisition permettant la mesure des déformations thermiques et endogènes en continu et dès la mise en place de l'échantillon dans le moule.
- Duval, Kheirbek et Baroghel-Bouny [1998] ont développé un dispositif dont l'objectif consistait à mesurer le retrait endogène de la pâte de ciment dès le début de prise. Ils ont utilisé les moules de 20 mm de diamètre et d'une longueur de 160 mm qui étaient en polyéthylène de très faible absorptivité. La paroi intérieure de chaque moule a été lubrifiée par de l'huile pour minimiser les frottements. Afin de permettre le démoulage, le moule est préalablement fendu sur sa longueur, puis refermé à l'aide d'un ruban adhésif. Les plots cylindriques en acier inoxydable sont installés aux extrémités du moule. Un petit trou situé dans le plot supérieur permet l'évacuation de l'excès de pâte lors de la fermeture du moule. Après avoir remplis six moules de pâte de ciment, ceux-ci sont insérés dans une planche en bois qui est introduite dans un cylindre reposant lui-même sur deux autres cylindres tournant à 2,5 tours par minute (Figure 1.19). La rotation est arrêtée quand la prise commence, le temps de début de prise ayant déterminé

au préalable. La première mesure est réalisée immédiatement après la récupération des éprouvettes de la planche. Les éprouvettes sont conservées dans les moules pendant 24 heures. Après démoulage, elles sont enveloppées dans le papier aluminium adhésif et conservées à 20°C et 50 % d'humidité relative. Les mesures de la longueur sont réalisées à l'aide d'un rétractomètre.

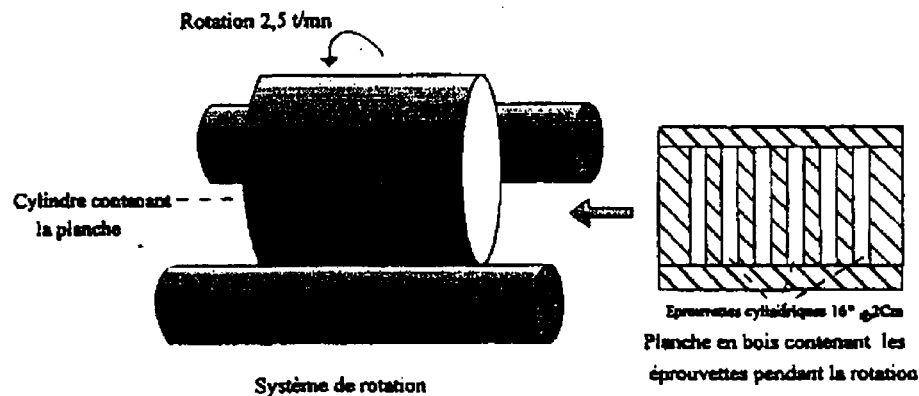


Figure 1. 19 – Dispositif de mise en rotation des éprouvettes [Duval et coll., 1998]

- Garcia Boivin [1999] a utilisé un dispositif inspiré de celui développé par Duval et coll., [1998]. Les moules utilisés sont des moules cylindriques en téflon (PTFE), matériau choisi pour sa grande étanchéité à la vapeur d'eau, sa faible rigidité et sa faible rugosité de surface. Les moules ont un diamètre de 20 mm et une longueur de 160 mm. Les casques métalliques munis des vis d'ancrage sont installés à leurs extrémités. Les casques ont une empreinte sur leur face supérieure permettant de positionner par la suite l'éprouvette dans un rétractomètre (Figure 1.20). Le moule est rempli de pâte coulée sous vibration, verticalement. Une fois l'éprouvette assemblée, elle est mise en rotation à une vitesse de 4 tours par minute jusqu'à la prise. Dès que la pâte est suffisamment rigide, l'éprouvette est démoulée et emballée avec du papier aluminium adhésif, puis positionnée sous le rétractomètre. Les mesures de la longueur des éprouvettes sont réalisées en continu. L'essai est utilisé pour les pâtes de ciment dont le rapport E/C a été de 0,30 et 0,50.

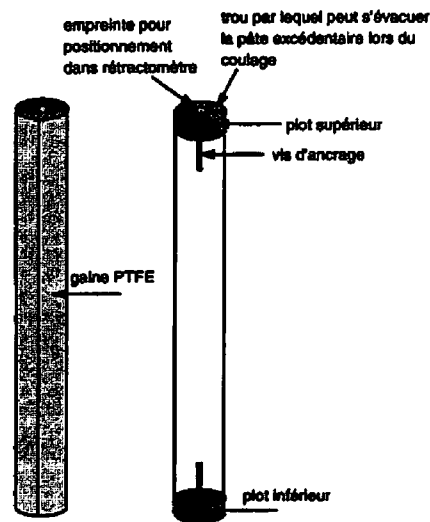


Figure 1. 20 – Schéma des moules utilisés pour la mesure linéique du retrait endogène [Garcia Boivin, 1999]

- Holt [2001] a utilisé un dispositif qui mesurait simultanément les déformations endogènes horizontales et verticales de mini dalles de 270 x 270 x 100 mm (Figure 1.21). Le dispositif permettait d'étudier des pâtes de ciment, des mortiers et des bétons dont le rapport E/C variait de 0,30 à 0,45. Les essais ont débuté environ 30 minutes après l'ajout de l'eau au ciment. Le mélange frais a été placé dans un moule en acier inoxydable par vibration. Une feuille en plastique a été installée entre le mélange et l'intérieur du moule pour diminuer les frottements. Des serviettes humides et un capuchon en plastique ont été utilisés pour recouvrir l'échantillon et l'équipement afin de créer un environnement humide et prévenir l'évaporation. Les déformations endogènes ont été mesurées pendant les premiers 24 heures. Le temps de prise des mélanges étudiés a été mesuré séparément. L'ensemble de l'essai a été instrumenté.

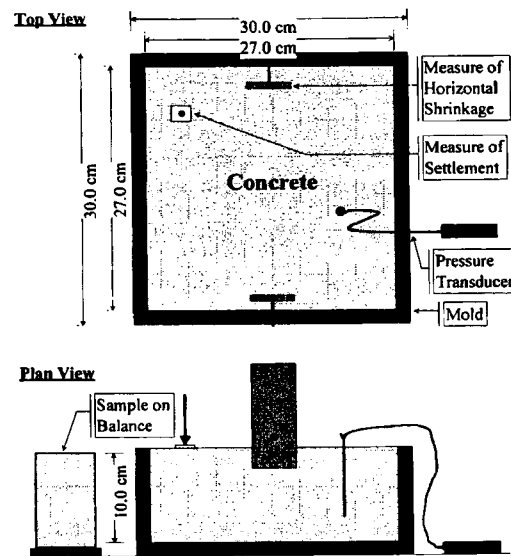


Figure 1. 21 – Schéma du dispositif utilisé pour mesurer les déformations endogènes horizontales et verticales [Holt, 2001]

- Charron [2003] a mesuré le retrait endogène linéique à l'aide de l'appareil de retrait restreint. L'essai de retrait restreint vise à contrôler la déformation libre d'une éprouvette de béton au cours de son hydratation. Pour y parvenir, un système automatisé applique une contrainte de traction à l'éprouvette, pour qu'elle conserve sa longueur initiale tout au long de l'essai. Le niveau de contrainte imposé évolue dans le temps, car la contraction du béton augmente avec l'hydratation. L'appareil de retrait restreint est composé de deux dispositifs : le dispositif de retrait libre et le dispositif de retrait restreint (Figure 1.22). Le premier dispositif évalue la déformation libre du béton, tandis que le second dispositif estime l'accroissement de la contrainte induit à l'intérieur du béton en conditions de déformations empêchées.

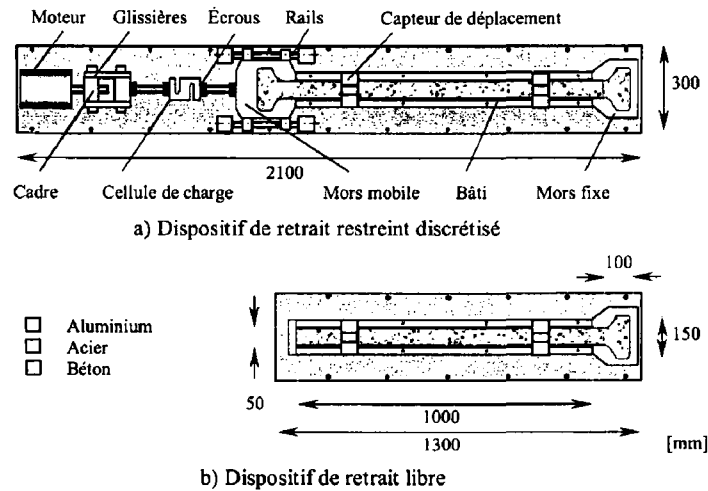


Figure 1. 22 – Schéma général de l'appareil de retrait restreint [Charron, 2003]

Suite à sa fabrication, le béton frais est placé dans le dispositif de l'appareil et scellé pour éviter tout échange d'humidité avec le milieu ambiant. Peu de temps après la mise en place du béton, le retrait commence à se manifester et l'éprouvette tend à se contracter. Quand le retrait atteint le seuil de déformation défini par l'utilisateur, l'éprouvette est ramenée à sa longueur initiale par le déplacement de l'extrémité mobile du dispositif. La force ainsi exercée est maintenue tout au long du cycle de déformation subséquent. Sous un chargement soutenu, les déformations du béton sont le résultat d'une combinaison du retrait et du fluage. Lorsque l'éprouvette atteint à nouveau le seuil de déformation limite, un second incrément de charge est appliqué pour la ramener à sa longueur initiale. L'incrément de charge appliqué est, encore une fois, maintenu tout au long du cycle de déformation subséquent. Ces cycles se succèdent pendant toute la durée de l'essai. Dans le dispositif de retrait libre, aucune contrainte n'est appliquée sur l'éprouvette au cours de l'essai. L'appareil de retrait restreint permet d'évaluer la déformation élastique, le fluage ainsi que la relaxation du béton en combinant les résultats des dispositifs de retrait libre et de retrait restreint.

L'appareil de retrait restreint présenté à la Figure 1.22 a été développé par Toma [1999], puis modifié par Charron [2003] afin de contrôler efficacement la température du béton. Ces modifications ont permis d'effectuer des essais en conditions isothermes et de reproduire des conditions thermiques variables. Une coupe transversale de la section linéaire des dispositifs illustre le système de conditionnement de l'appareil qui a été mis au point par Charron [2003] (Figure 1.23). L'eau qui circule dans les dispositifs contrôle la température du béton par contact avec les parois de moule en aluminium tapissées d'une mince couche de plastique de type UHMW. Le plastique utilisé diminue les frottements entre l'éprouvette et les parois de moule et permet un bon échange thermique entre l'aluminium et le béton.

L'appareil de retrait restreint est instrumenté avec des capteurs électroniques. L'essai est piloté par un ordinateur qui contrôle les déformations, l'application de la contrainte de traction à l'éprouvette et la température du matériau.

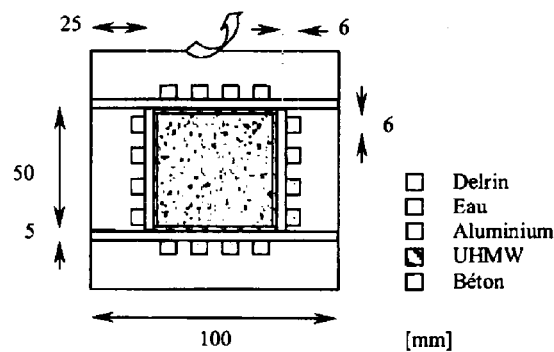


Figure 1. 23 – Schéma du système de conditionnement [Charron, 2003]

L'avantage des mesures linéiques est que l'on peut les utiliser sur la pâte de ciment, sur le mortier ou sur le béton. Cependant, la plupart des mesures linéiques ne peuvent commencer qu'à la prise du matériau. Le matériau doit avoir une rigidité satisfaisante soit pour être démoulé [Roussel, 2000 ; Garcia Boivin, 1999] soit pour ancrer suffisamment les plots qui permettront de prendre les mesures [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b)]. Cependant le dilatomètre développé par Jensen et Hansen [1995] semble permettre la mesure des déformations avant la prise du matériau (la mesure commence une heure après le contact eau-ciment).

Les déformations mesurées par les méthodes linéiques peuvent être sous-estimées par le frottement entre le moule et l'échantillon. Pour accéder aux déformations libres du matériau la plupart des chercheurs utilisent un traitement de la surface de contact entre le moule et l'échantillon. La façon la plus simple consiste à lubrifier des parois intérieures du moule [Baroghel-Bouny et Kheirbek, 2000] ou à installer un film de polyester entre le moule et l'échantillon [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b)]. Tazawa et Miyazawa [1998 (b)] ont également utilisé une feuille de téflon placée au fond du moule pour diminuer davantage le frottement. Charron [2003] a utilisé une mince couche de plastique de type UHMW autour de l'éprouvette. Garcia Boivin [1999] a utilisé des moules en téflon dont la rugosité de surface a été contrôlée lors d'usinage, ce qui a réduit très largement les frottements. Laplante et Boulay [1994] et Jensen et Hansen [1995] ont utilisé les moules plissés très souples qui n'entravaient pas les déformations libres du matériau. Il est également important d'utiliser des moules suffisamment étanches fabriqués avec un matériau peu absorbant pour éviter une perte d'eau du mélange. Dans le cas des dispositifs où le démoulage est inclus lors d'essai [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b) ; Duval et coll., 1998 ; Garcia Boivin, 1999 ; Roussel, 2000], le papier d'aluminium autocollant doit garantir une bonne étanchéité afin d'éviter l'évaporation de l'eau dans le temps.

Le ressuage et la sédimentation peuvent influencer les mesures linéiques. Ces deux phénomènes, plus importants dans les matériaux de fort rapport E/C, engendrent des gradients de densité dans l'épaisseur de l'échantillon. Ainsi, la symétrie du système est perturbée et la composition du matériau étudié est modifiée localement. Le ressuage et la sédimentation peuvent être évités dans une large mesure par la mise en rotation des échantillons jusqu'à la prise [Garcia Boivin, 1999]. Il est également possible d'éviter les problèmes de sédimentation et de ressuage en utilisant des agents de viscosité. Cependant, la chimie du système étudié est modifiée, ce qui n'est pas idéal.

1.10. 2 Mesures volumétriques du retrait endogène

Les mesures volumétriques du retrait endogène consistent à évaluer les variations dimensionnelles d'un échantillon isolé du milieu extérieur dès sa mise en place par une membrane souple et étanche. Les déformations sont mesurées soit par suivi de niveau du liquide d'immersion (mesures dilatométriques), soit par pesée hydrostatique (mesures gravimétriques).

Dans la littérature on peut trouver les différents dispositifs de mesures volumétriques du retrait endogène soit par dilatométrie soit par gravimétrie d'où on peut citer :

- Del Campo [1959] (tiré de Buil, 1979) a utilisé un échantillon d'environ 200 grammes de pâte qui était enveloppé dans deux fines membranes de latex et plongé dans une cuve de mercure. La variation de volume est mesurée par suivi du niveau de mercure dans un capillaire qui surmonte la cuve (Figure 1.24).

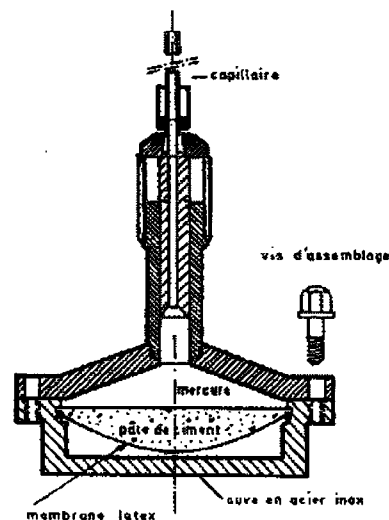


Figure 1. 24 – Appareil de Del Campo [Buil, 1979]

- Setter et Roy [1978] ont utilisé de l'eau comme liquide d'immersion. La pâte de ciment a été enfermée dans une membrane souple. La variation du volume est mesurée par pesée d'un vase rempli d'eau qui est relié avec l'eau d'immersion à l'aide d'un tube flexible. L'ensemble de l'essai a été thermostaté (Figure 1.25).
- Justnes et coll. [1996, 1998 (a), 1998 (b)] ont coulé des échantillons de pâte dans les fines membranes élastiques qui étaient ensuite fermées de la façon étanche et placées dans les tubes en plastique rigide d'une longueur de 100 mm et de 50 mm de diamètre. Les échantillons sont mis en rotation avant la prise afin de permettre aux bulles d'air de s'échapper et pour éviter les problèmes de sédimentation et de ressuage. À des échéances fixées, la rotation est arrêtée et la variation du volume est mesurée par pesée hydrostatique. Lors de l'essai les échantillons ont été conservés dans un bain thermostaté à 20°C.

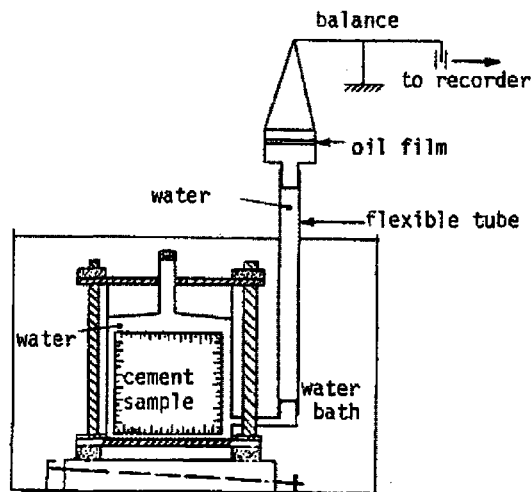


Figure 1. 25 – Dispositif de Setter et Roy [Setter et Roy, 1978]

- Barcelo [1997, 2001] a développé une technique de mesure du retrait volumique externe également utilisée dans les travaux de Garcia Boivin [1999]. Les échantillons de pâte ont été coulés dans les fines membranes élastiques qui étaient ensuite fermées de

façon étanche et placées dans le dispositif de mesure. Le dispositif de mesure permet de mesurer les déformations en continu par un système dilatométrique. Pendant l'essai, les échantillons ont été mis en rotation pour éviter les problèmes de ressuage. L'ensemble de l'essai a été thermostaté.

- Aouad [1999] a utilisé une cellule constituée d'une enceinte interne dans laquelle on place la pâte de ciment et d'une enceinte externe surmontée d'une burette. L'échantillon de pâte est scellé dans une membrane en latex et fermé par un bloc de base et un chapeau, ce qui constitue la cellule interne. La cellule interne est ensuite reliée à un système de mesure par un tuyau en communication avec le couvercle de l'enceinte externe et placée dans la cellule externe remplie d'eau. Le montage permet de mesurer d'une part les déformations externes par suivi du niveau d'eau dans la burette et d'autre part les déformations internes par le système de mesure. Ce montage légèrement modifié sera utilisé dans le programme expérimental de doctorat et sera présenté en détail au paragraphe 2.4.2.
- Charron [2003] a développé un appareil permettant de mesurer simultanément le retrait volumique externe et le retrait chimique. Cet appareil est composé de deux dispositifs. Le premier dispositif évalue le retrait chimique de la pâte de ciment selon la méthode dilatométrique. Le second dispositif mesure parallèlement le retrait externe de la pâte de ciment au moyen de la technique gravimétrique (Figure 1.26). L'appareil est constitué de deux bassins remplis d'eau situés d'un part et d'autre d'un moteur central. Les dispositifs de mesure du retrait chimique sont installés sur un plateau à l'intérieure des bassins. Le plateau est localisé de manière à ce que les erlenmeyers soient immergés sous l'eau, mais que les tubes gradués permettant la lecture de la déformation soient à l'extérieur de l'eau. Les éprouvettes de retrait externe sont insérées dans des pots pour éviter leur endommagement lors de la manipulation. Les pots sont conservés sous l'eau au cours de l'essai au moyen d'un système d'ancrage. Les éprouvettes de retrait externe sont mises en rotation pour prévenir le phénomène de ressuage. Les mesures des déformations et des masses ont été effectuées périodiquement. L'ensemble de l'essai a été thermostaté.

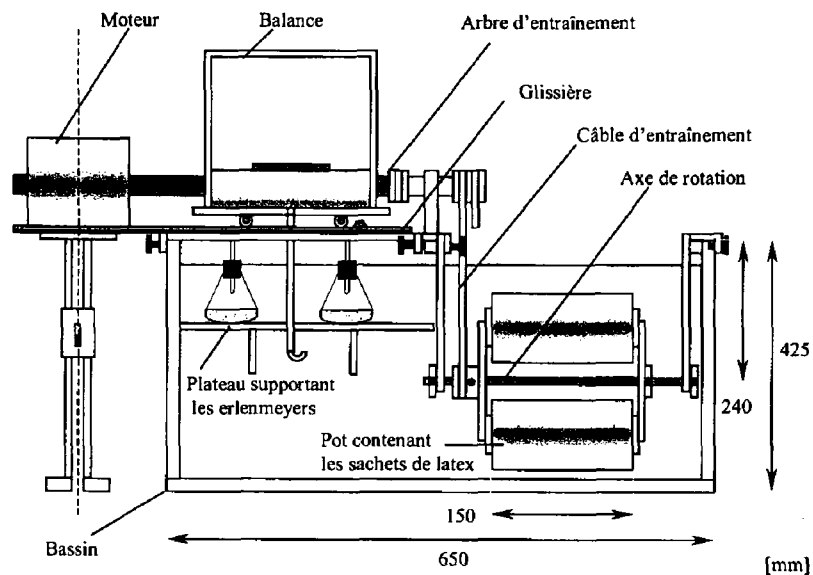


Figure 1. 26 - Schéma général du montage de retrait volumétrique [Charron, 2003]

L'avantage des mesures volumétriques est que l'on peut suivre les déformations endogènes de l'échantillon dès les premières minutes.

Un des désavantages de ce type de mesures est que l'eau de ressuage présente à la surface de l'échantillon peut fausser la mesure. Lors de l'essai l'eau de ressuage est réabsorbée jusqu'à ce que la membrane se mette en contact avec l'échantillon. Pendant cette période l'échantillon se retrouve plutôt dans les conditions de l'essai de la contraction Le Chatelier et pas dans les conditions de l'essai du retrait endogène. Après la prise la contraction Le Chatelier est plus importante que le retrait endogène externe [Jensen et Hansen, 2001]. Donc en présence de ressuage les déformations mesurées sont surestimées par rapport aux déformations réelles.

La présence d'air emprisonné entre la membrane et l'échantillon peut surestimer le retrait endogène externe ce qui a déjà été remarqué par Justnes et coll., [1996, 1998 (a), 1998 (b)].

Pour éviter l'effet de ressuage sur la mesure, Setter et Roy [1978] enlevaient manuellement l'eau de ressuage de la surface de l'échantillon. Lors des essais de Justnes et coll., [1996,

1998 (a), 1998 (b)], les échantillons ont été mis en rotation pour éviter le ressuage mais aussi l'emprisonnement de l'air entre la membrane et l'échantillon. La mise en rotation des échantillons a été également utilisé par Charron [2003], Barcelo [1997, 2001] et Garcia Boivin [1999].

Selon Buil [1979], le retrait endogène pourrait être surestimé à cause d'un écrasement de la structure solide sous l'effet de la pression exercée par le liquide d'immersion ou par la tension de la membrane. Ce phénomène est possible avant la fin de prise quand la structure solide est faiblement cohérente.

1. 11 Influence des paramètres de formulation sur la contraction Le Chatelier et sur le retrait endogène

1.11. 1 Contraction Le Chatelier

- Influence du rapport E/C

L'influence du rapport E/C sur la contraction Le Chatelier a été étudiée par plusieurs chercheurs. Cependant les résultats de ces études peuvent apparaître contradictoires. Selon Geiker [1983], à partir d'environ 20 heures, la contraction Le Chatelier est d'autant plus forte que le rapport E/C est élevé. Les résultats de Justnes et coll. [1996] ont démontré que la contraction est indépendante du rapport E/C pour les mesures allant jusqu'à 48 heures.

Selon les études de Holt [2001] le retrait d'origine chimique, après trois jours, est indépendant du rapport E/C si ce rapport est supérieur ou égal à 0,30. L'auteur explique ce comportement par le fait que la quantité de ciment par volume du mélange de rapport E/C = 0,30 est plus importante que celle du mélange de rapport E/C = 0,40. Par conséquent, la quantité de ciment hydraté après trois jours est plus élevée dans le mélange de rapport 0,30, ce qui produit des retraits chimiques égaux (exprimés en mm^3/g de ciment) pour les deux mélanges. Dans le cas des rapports E/C inférieurs à 0,30 Holt a observé une diminution du retrait chimique.

Garcia Boivin [1999] a étudié le retrait chimique des pâtes de ciment ayant des rapports E/C égaux à 0,30 et 0,50. Les mesures ont duré 7 jours. Elle a remarqué que la pente de la contraction pour le rapport E/C = 0,30 est plus forte que celle obtenue pour le rapport E/C =

0,50 pendant les premiers 4 jours. Les valeurs de contraction se rejoignent ensuite pour atteindre un même plateau. Afin d'expliquer ses résultats l'auteur a conclu que le rapport E/C intervient avant tout dans la mesure de la contraction Le Chatelier sur la cinétique de l'hydratation.

- Influence des caractéristiques du ciment

Contrairement aux effets du rapport E/C, les observations de plusieurs chercheurs concernant l'effet des caractéristiques du ciment sur le retrait chimique sont semblables. Justnes et coll. [1998 (a)] ont étudié le retrait chimique des pâtes de ciment ayant un rapport E/C égal à 0,40. Ils ont utilisé 10 ciments ayant des compositions minéralogiques et des finesses différentes. Cette étude a démontré que la contraction au jeune âge (0-48 heures) augmente avec l'augmentation de la finesse du ciment et de la teneur en C_3A et en C_3S .

Les travaux de Barcelo [2001] ont également démontré que l'augmentation de la finesse du ciment fait augmenter la contraction Le Chatelier pendant les premières dix heures. Cet effet de la finesse est le plus important pour les ciments de forte teneur en C_3A . L'augmentation du C_3A du ciment, pour une finesse donnée, intensifie aussi le retrait chimique. Cette augmentation se fait remarquer à partir de 10 heures d'hydratation et se maintient jusqu'à 4 jours.

Holt [2001] a étudié le retrait chimique de 3 ciments européens et de 3 ciments américains ayant différentes teneurs en C_3A . Le retrait chimique des ciments européens a été influencé par la teneur en C_3A (8 %, 4 % et 1 %) et augmentait avec le dosage de ce dernier. Après 3 jours de mesures, la contraction mesurée a été d'environ 40, 36 et 32 mm^3/g de ciment respectivement. Cependant le retrait chimique des ciments américains ne dépendait pas autant de la teneur en C_3A . Ces trois ciments avaient des retraits similaires pendant les premiers 12 heures. Après 3 jours, le ciment avec 11,5 % de C_3A a développé une contraction d'environ 36 mm^3/g de ciment et les deux autres ciments, avec 6,3 % et 4,2 % de C_3A , ont développé un retrait d'environ 32 mm^3/g de ciment.

- Influence des ajouts minéraux

Justnes et coll. [1998 (b)] ont étudié le retrait chimique des coulis avec la fumée de silice et avec une cendre volante. Dans le premier cas, 2,6 %, 5,3 %, 11 %, 20 % et 25 % de ciment

Portland a été remplacé par de la fumée de silice. Dans le cas des coulis avec cendre volante, il s'agissait d'une addition de 20 % de la cendre broyée. Tous les coulis avaient un rapport $E/L = 0,40$. Selon les résultats de cette étude, la fumée de silice augmente le retrait chimique. Le taux d'augmentation est de 15, 20 et 40 % pour les dosages de la fumée de silice de 5,3, 11 et 20 % respectivement (la contraction exprimée en ml/100g de ciment). La cendre volante, utilisée en addition de 20 %, augmente aussi le retrait chimique mais son effet est plus faible que celui obtenu avec 20 % de la fumée de silice en substitution du ciment. La figure 1.27 présente le retrait chimique et le retrait volumique externe des coulis avec deux ajouts minéraux. Le mélange 4, présenté à la Figure 1.27 contient 20 % de fumée de silice tandis que le mélange 9 contient 20 % de cendre volante.

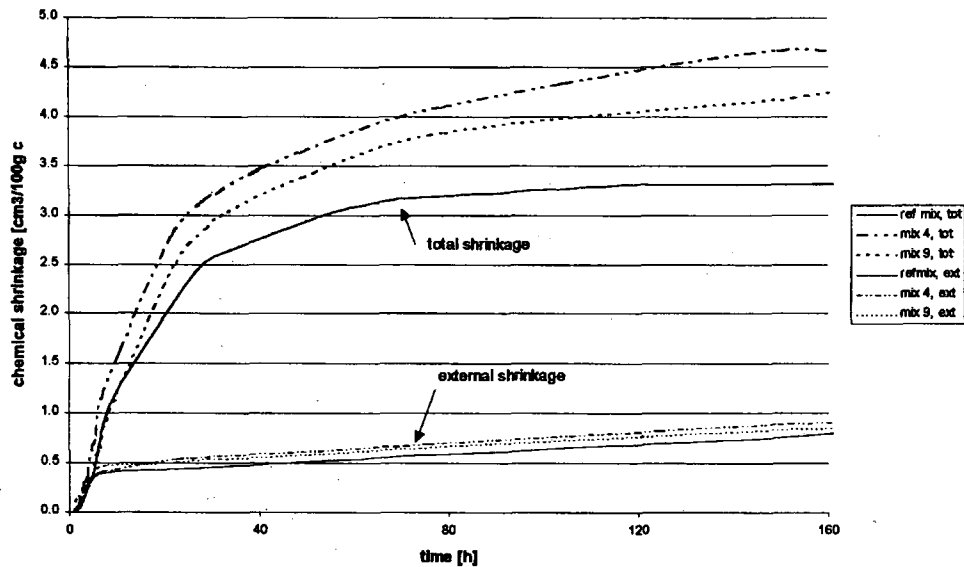


Figure 1. 27 – Influence de la fumée de silice et de la cendre volante sur le retrait chimique et externe des coulis [Justnes et coll., 1998 (b)]

Dans une autre étude réalisée par Justnes et coll. [1999], 10 % de ciment a été remplacé par la fumée de silice dans les coulis de rapport E/L égal à 0,40 et à 0,50. Cinq ciments ont été utilisés ayant différentes compositions minéralogiques et différentes finesses. Cette étude a démontré que l'effet de la fumée de silice sur le retrait chimique varie en fonction du ciment

utilisé. Cependant, la fumée de silice a augmenté légèrement le retrait chimique pour la majorité des mélanges.

Charron [2003] a étudié le retrait chimique des coulis avec 8 % de fumée de silice qui avaient des rapports E/L de 0,27 et 0,45. Les résultats démontrent que la fumée de silice augmente légèrement le retrait chimique. La figure 1.28 présente les courbes de retrait pour les coulis avec le rapport E/L = 0,45.

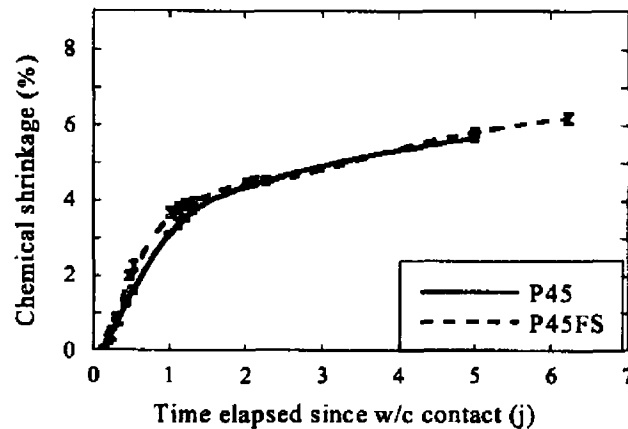


Figure 1. 28 – Influence de 8% de fumée de silice sur le retrait chimique d'un coulis, E/L = 0,45 [Charron, 2003]

- Influence des adjuvants

Holt [2001] a étudié l'influence des superplastifiants et d'un adjuvant réducteur du retrait sur le retrait chimique des coulis fabriqués avec différents types de ciments. Les résultats ont démontré que l'influence des superplastifiants sur le retrait chimique est variable et dépend de la composition minéralogique du ciment. Holt a également démontré qu'un superplastifiant à base de polycarboxylate cause moins de retrait après 3 jours que celui à base de polynaphtalène (pour les mêmes dosages de superplastifiant). La figure 1.29 présente la contraction de 3 coulis ayant un rapport E/C = 0,30 et fabriqués avec un ciment dont la composition minéralogique est relativement semblable à celle d'un ciment de Type 10. Le coulis de référence a été fabriqué sans ajouts chimiques. Les deux autres coulis contenaient

soit 1 % de superplastifiant à base de poly-naphtalène (SP), soit 1 % de réducteur du retrait (SRA). Selon les résultats de la figure 1.29, le superplastifiant SP fait augmenter le retrait chimique d'environ 17 % par rapport au celui de la référence. Le réducteur de retrait SRA ne permet pas de réduire le retrait chimique au jeune âge.

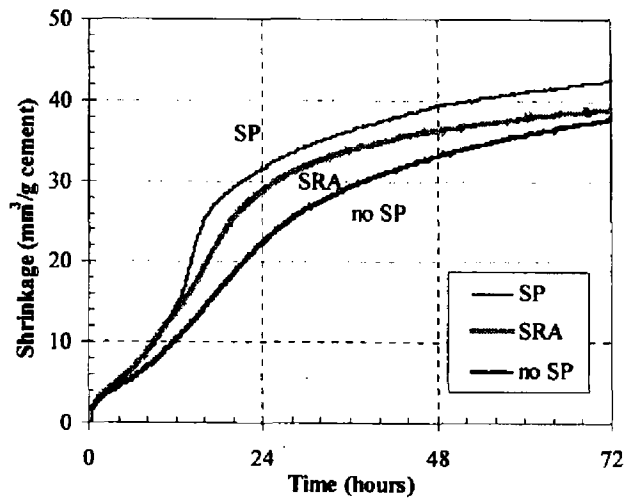


Figure 1. 29 – Influence d'un superplastifiant et d'un réducteur de retrait sur le retrait chimique d'un coulis, E/C = 0,30 [Holt, 2001]

- Influence des granulats

Une des premières études publiées sur la contraction Le Chatelier des mortiers a été celle de Geiker [1983]. Malheureusement les résultats de cette étude ne permettent pas de tirer les conclusions concernant l'effet du sable sur le retrait chimique parce que les épaisseurs des échantillons de pâte et de mortier étaient différentes.

Justnes et coll. [1998 (b)] ont essayé de comparer les retraits chimiques des pâtes de ciment et des mortiers fabriqués avec les granulats de différentes granulométries. Dans le cas des mélanges fabriqués avec les granulats très fins (filler siliceux avec $D_{max} = 0,25$ mm), Justnes a observé une légère augmentation de la contraction après 7 jours par rapport à celle de la pâte. Dans le cas des mélanges fabriqués avec les granulats plus grossiers (sable siliceux avec $D_{max} = 2$ mm), l'auteur n'a pas été en mesure de comparer les contractions avec celles des

pâtes. En effet, il a observé une grande variabilité des résultats obtenus sur les mortiers qui était due aux difficultés rencontrées lors de la réalisation des essais en laboratoire.

Holt [2001] a comparé les retraits chimiques d'une pâte de ciment et d'un mortier avec $E/C = 0,35$. Un sable avec $D_{max} = 2$ mm a été utilisé. Le volume de sable, dans le mortier, a été de 45 %. Les résultats de cette étude, présentés à la figure 1.30 démontrent une augmentation du retrait chimique du mortier d'environ 7 % par rapport à celui de la pâte après 3 jours de mesures. Selon Holt, le retrait plus important du mortier est dû à la présence de la zone de transition pâte-granulat qui permet à l'eau d'accéder à une plus grande quantité de ciment. Donc, une plus grande quantité de ciment hydraté dans le mortier se traduit par une plus grande contraction comparativement à celle de la pâte.

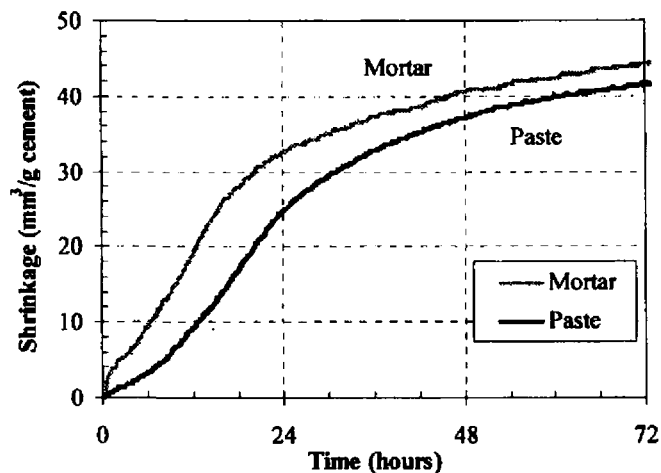


Figure 1. 30 - Retrait chimique de la pâte et du mortier, $E/C = 0,35$ [Holt, 2001]

1.11. 2 Méthodes linéiques

- Influence du rapport E/C

La diminution du rapport E/C augmente considérablement le retrait endogène linéique. Ce phénomène a été observé par plusieurs chercheurs, entre autres par Tazawa et Miyazawa, [1995 (b), 1997] qui étudiaient le retrait endogène des pâtes de ciment dont le rapport E/C variait de 0,23 à 0,40. Les auteurs ont mesuré, 7 jours après la prise, une déformation

d'environ 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un rapport $E/C = 0,30$ et une déformation d'environ 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un rapport $E/C = 0,23$. Ils ont également remarqué que le retrait endogène débute plus tôt quand le rapport E/C est plus faible.

Baroghel-Bouny et Kheirbek, [2000] ont étudié l'effet du rapport E/C sur le retrait endogène linéique des pâtes de ciment. Ce rapport a varié de 0,25 à 0,60. Ces auteurs ont remarqué que le retrait endogène commence plus tôt et possède une valeur plus élevée quand le rapport E/C est plus faible. Par exemple, à 28 jours, ils ont mesuré un retrait de 950 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la pâte d'un rapport $E/C = 0,25$, le retrait de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le rapport $E/C = 0,50$ et un gonflement de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le rapport $E/C = 0,60$. En utilisant un dispositif semblable, Garcia Boivin [1999] a observé, pour un même type de ciment et une même échéance, que l'amplitude du retrait endogène linéique est d'autant plus grande que le rapport E/C est faible.

Holt [2001] a étudié l'effet du rapport E/C sur le retrait endogène de minidalles de mortiers (Paragraphe 1.10.1). Comme les autres chercheurs elle a trouvé que le retrait endogène linéique mesuré pendant 24 heures augmente avec la diminution du rapport E/C . Par exemple, elle a obtenu une déformation endogène de 950 $\mu\text{m}/\text{m}$ quand le rapport E/C est égal à 0,30, une déformation de 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ quand ce rapport est de 0,35 et une déformation de 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour $E/C = 0,45$.

Généralement, quand le rapport E/C diminue, il y a moins d'eau dans le mélange et les pores capillaires sont plus fins. Donc, la dépression capillaire est plus élevée et commence se manifester plus tôt.

- Influence des caractéristiques du ciment

Le retrait endogène dépend du type de ciment. Tazawa et Miyazawa [1997] ont trouvé qu'un ciment à haute résistance initiale et un ciment alumineux, ayant des teneurs élevées en C_3S et en C_3A , développent un retrait endogène plus grand qu'un ciment normal. Par contre, un ciment à chaleur d'hydratation modéré ayant une faible teneur en C_3A et un ciment à basse chaleur d'hydratation ayant une forte teneur en C_2S engendrent moins de retrait que le ciment de référence.

Tazawa et Miyazawa [1997, 1998 (a)] ont développé une équation qui permet d'estimer le retrait endogène d'un coulis à partir de la composition phasique du ciment. Puisque la

déformation de coulis est influencée par la prise du ciment et par le gonflement dû à l'augmentation de température, la déformation à 24 heures est choisie comme la valeur initiale dans le calcul.

$$\varepsilon(t) = -0,012\alpha_{C_3S}(t) (\% C_3S) - 0,070\alpha_{C_2S}(t) (\% C_2S) + 2,256\alpha_{C_3A}(t) (\% C_3A) \quad (1.15) \\ + 0,859\alpha_{C_4AF}(t) (\% C_4AF)$$

$\varepsilon(t)$: retrait endogène à l'âge t d'un coulis;

$\alpha_{C_3S}(t)$: degré d'hydratation du C_3S ;

(% C_3S) : teneur en C_3S du ciment.

L'équation 1.15 démontre que les coefficients multiplicateurs du C_3A et du C_4AF sont nettement supérieurs à ceux du C_3S et du C_2S . De plus, les coefficients de silicates ont un signe négatif. Cela indique, selon les auteurs, que le retrait endogène dépend du degré d'hydratation du C_3A et du C_4AF et augmente avec la quantité de ces deux phases.

Le retrait endogène augmente avec l'augmentation de la finesse du ciment. Un ciment plus fin est plus réactif. Les hydrates se forment donc plus rapidement et le retrait débute plus vite. Selon Tazawa et Miyazawa [1995 (b)], un ciment ayant une finesse Blaine de $340 \text{ m}^2/\text{kg}$ développe, après 7 jours, un retrait endogène d'environ $700 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ et celui avec une finesse de $740 \text{ m}^2/\text{kg}$ développe un retrait d'environ $1700 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$.

Les travaux de Barcelo [2001] ont démontré que l'influence de la finesse sur le retrait linéique dépend de la teneur en C_3A du ciment. Pour les ciments de faible teneur en C_3A , l'influence de la variation de finesse est négligeable. Cependant, pour les ciments à forte teneur en C_3A le retrait est plus important quand la finesse du ciment est élevée.

- Influence des ajouts minéraux

La fumée de silice formée de particules très fines raffine la porosité capillaire et augmente ainsi le retrait endogène. Pour une pâte de rapport $E/L = 0,40$ le retrait endogène à 7 jours a augmenté de $250 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ à $750 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ après un remplacement du ciment par 10 % de fumée de

silice [Tazawa et Miyazawa, 1995 (b)]. Pour une pâte de rapport E/L = 0,35 Jensen et Hansen, [1996] ont mesuré un retrait endogène d'environ 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ sans fumée de silice et d'environ 1250 $\mu\text{m}/\text{m}$ avec 10 % de fumée de silice en remplacement du ciment. Baroghel-Bouny et Kheirbek, [2000] ont mesuré une augmentation du retrait endogène à 28 jours de 950 $\mu\text{m}/\text{m}$ à environ 1800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour une pâte dont le rapport E/C est égal à 0,25 et le rapport FS/C est de 0 et de 0,10 respectivement.

Le laitier de haut fourneau peut également augmenter le retrait endogène linéique si sa finesse est suffisamment élevée. Tazawa et Miyazawa, [1995 (b), 1997] ont étudié l'effet des laitiers de différentes finesses sur le retrait endogène des coulis du rapport E/L = 0,40. Le taux de remplacement variait de 25 % à 90 %. Selon ces chercheurs, le laitier dont la finesse est supérieure à celle du ciment augmente le retrait endogène et la substitution de 70 % semble être la plus critique (Figure 1.31). Hanehara et coll., [1998] ont également observé une augmentation du retrait endogène dans des coulis fabriqués avec un ciment au laitier par rapport au retrait d'un coulis fabriqué avec un ciment normal ou avec un ciment normal contenant 10 % de fumée de silice.

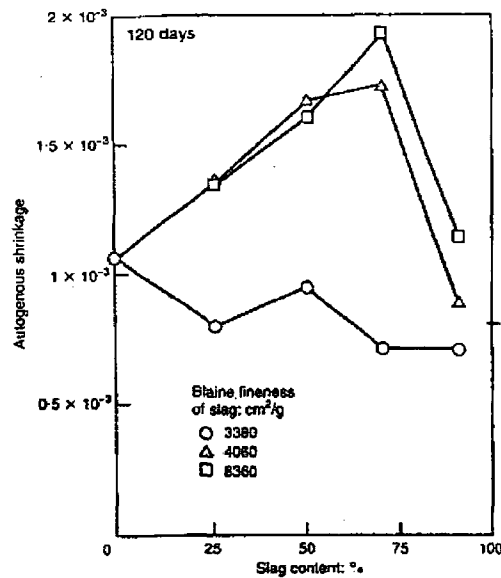


Figure 1. 31 - Influence du laitier sur le retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1997]

Contrairement à la fumée de silice et au laitier, les cendres volantes diminuent légèrement le retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1997]. Schiebl et coll., [2000] ont étudié l'effet des cendres volantes sur le retrait endogène des bétons d'un rapport E/L = 0,35 contenant 15 % et 30 % de cendres volantes et 8 % de fumée de silice. Les résultats démontrent que la substitution d'un ciment normal par 30 % de cendres volantes permet de diminuer le retrait endogène d'environ 50 % après 7 jours (Figure 1.32).

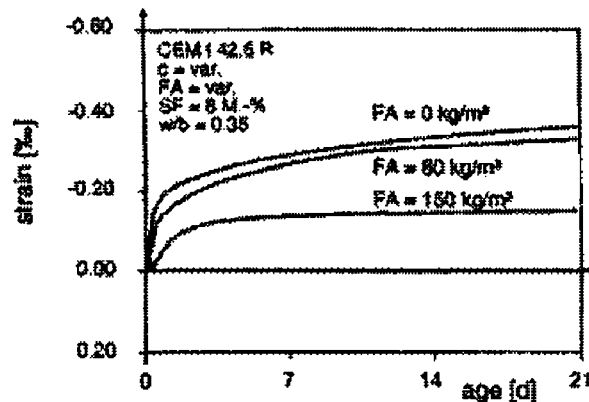


Figure 1. 32 – Influence de la teneur en cendre volante sur le retrait endogène du béton [Schiebl et coll., 2000]

- Influence des adjuvants

Les résultats des études de l'influence des superplastifiants sur le retrait endogène linéique sont contradictoires. Selon Tazawa et Miyazawa, [1995 (b)] les superplastifiants à base de naphthalène, de polycarboxylate et d'aminosulfonate diminuent légèrement le retrait endogène. Cependant les différences entre les taux de diminution dus au type et au dosage de superplastifiant sont faibles. Selon ces auteurs, la réduction du retrait est causée par l'effet du superplastifiant sur le taux d'hydratation du ciment. Les travaux de Holt [2001] ont démontré que le mortier fabriqué avec un superplastifiant à base de naphthalène possède un retrait endogène linéique plus élevé d'environ 50 % par rapport au celui du mortier sans superplastifiant.

- Influence des granulats

Le retrait endogène se développe dans la pâte de ciment. Quand on ajoute des granulats, la quantité de pâte diminue diminuant ainsi le retrait endogène. Selon Tazawa et Miyazawa [1998 (b)], il est possible d'estimer l'effet des granulats sur le retrait endogène à l'aide du modèle de Hobbs :

$$\varepsilon_c / \varepsilon_p = \frac{(1 - V_a)(K_a / K_p + 1)}{1 + K_a / K_p + V_a(K_a / K_p - 1)} \quad (1.16)$$

ε_c : retrait endogène du béton;

ε_p : retrait endogène de la pâte de ciment;

V_a : volume de granulat;

K_p : module d'élasticité de la pâte de ciment;

K_a : module d'élasticité des granulats;

$K = E / 3(1-2\nu)$, ν est le coefficient de Poisson, E est le module d'élasticité.

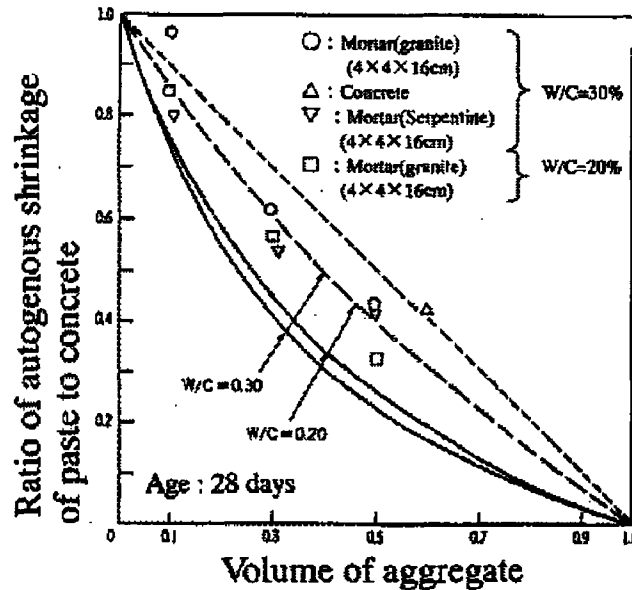


Figure 1. 33 – Influence du volume de granulat sur le retrait endogène [Tazawa et Miyazawa, 1998 (b)]

1.11. 3 Méthodes volumétriques

- Influence du rapport E/C

Selon les hypothèses théoriques la diminution du rapport E/C devrait augmenter le retrait endogène quelle que soit la méthode de mesure utilisée. Setter et Roy [1978] ont remarqué que la diminution du rapport E/C de 0,38 à 0,30 engendre une augmentation du retrait endogène externe d'environ 40 % après 20 heures de mesure. Justnes et coll. [1996] ont observé un pourcentage d'augmentation semblable du retrait, après 48 heures, pour un passage du rapport E/C de 0,50 à 0,30. Dans les deux études précédentes le retrait endogène externe a été exprimé en pourcentage de volume initial. Charon [2003] a mesuré une diminution du volume initial de 1,45 % après 6 jours pour une pâte de ciment ayant $E/C = 0,27$. Pour la pâte avec $E/C = 0,35$ cette contraction a été de 1,25 % et de 1,0 % pour la pâte avec $E/C = 0,45$.

Aouad [1999] a étudié l'effet du rapport E/L sur le retrait endogène des pâtes de ciment. Il a mesuré à 7 jours une augmentation du retrait endogène externe et une diminution du retrait endogène interne avec la diminution du rapport E/L. La figure 1.34 démontre que la contraction externe diminue graduellement quand le rapport E/L augmente. Par exemple, pour la pâte de type C, fabriquée avec le ciment Portland de Type 10, la contraction est d'environ 1,0 % si E/L est égal à 0,45 et d'environ 1,6 % si ce rapport est de 0,25. En même temps, la contraction interne est égale à environ 3,0 % pour $E/L = 0,25$ et augmente à 5,1 % pour $E/L = 0,45$ (Figure 1.35). Selon Aouad, le raffinement de la porosité dû à la réduction du rapport E/L augmente la dépression capillaire et fait augmenter ainsi le retrait externe. Le comportement inverse observé avec le retrait interne est causé par une augmentation du degré d'hydratation des pâtes ayant E/L plus élevé.

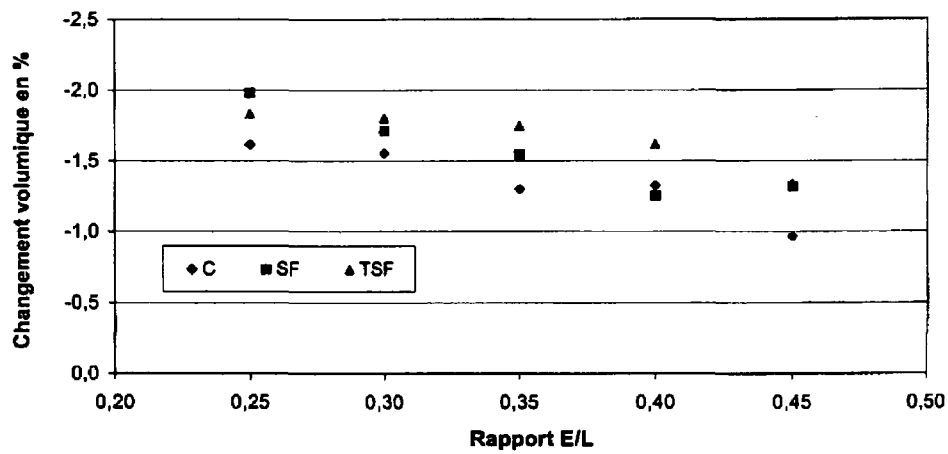


Figure 1. 34 - Retrait endogène externe à 7 jours des pâtes de ciment [Aouad, 1999]

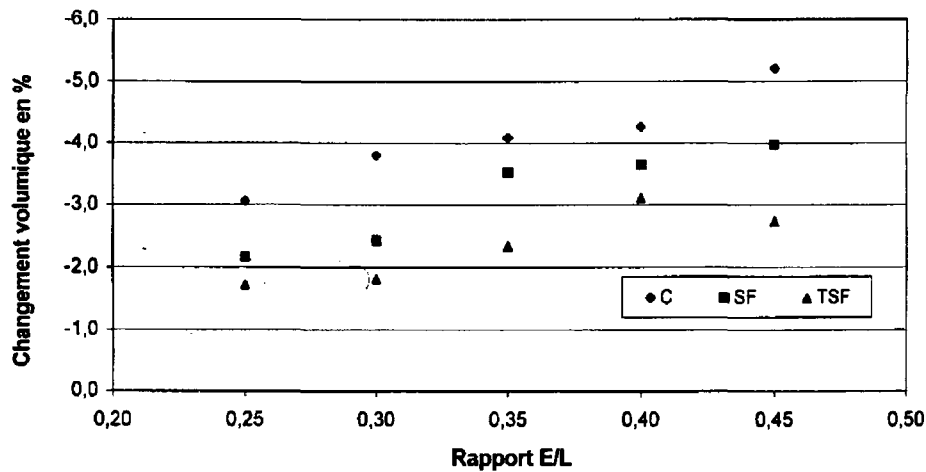


Figure 1. 35 - Retrait endogène interne à 7 jours des pâtes de ciment [Aouad, 1999]

- Influence des caractéristiques du ciment

Selon Justnes et coll., [1998 (a)] le retrait endogène externe dépend d'une part de la composition phasique du ciment et d'autre part de sa finesse. Ces auteurs ont mesuré le retrait endogène des pâtes fabriquées avec 10 ciments Portland différents pendant 48 heures. Ils ont

conclu que les déformations endogènes au jeune âge augmentent avec l'augmentation de la finesse du ciment et avec l'augmentation de la quantité de C_3A et de C_3S . Une autre étude réalisée par Justnes et coll. [1996] a démontré que l'effet de la composition minéralogique du ciment sur le retrait endogène externe est plus important que l'effet de sa finesse. Après 48 heures, un ciment riche en C_2S ayant la finesse plus élevée a développé moins de retrait externe que le ciment plus grossier contenant plus de C_3A et de C_3S .

- Influence des ajouts minéraux

Justnes et coll. [1998 (b)] ont étudié le retrait endogène externe des coulis fabriqués avec de la fumée de silice et des cendres volantes. Dans le cas de la fumée de silice, le remplacement du ciment Portland a été de 2,6 %, 5,3 %, 11 %, 20 % et 25 %. Dans le cas de coulis avec cendres volantes il s'agissait d'une addition de 20 % de cendre broyée. Tous les coulis avaient un rapport E/L = 0,40. Tous les mélanges fabriqués avec la fumée de silice avaient un retrait externe supérieur au celui de la référence après 7 jours de mesure. Cependant, l'augmentation du retrait est relativement faible à l'exception des mélanges contenant 20 % et 25 % de fumée de silice. Les retraits externes de ces mélanges ont été plus élevés que celui de la référence par environ 20 % et 65 % respectivement. La cendre volante, utilisée en addition de 20 %, a aussi augmenté le retrait externe mais son effet est plus faible que celui obtenu avec 20 % de la fumée de silice en substitution du ciment. La figure 1.27 (Paragraphe 1.11.1) présente le retrait externe et le retrait chimique des coulis avec deux ajouts minéraux. Le mélange 4 présenté à la figure 1.27 contient 20 % de fumée de silice tandis que le mélange 9 contient 20 % de cendre volante (addition).

Dans une autre étude réalisée par Justnes et coll. [1999], 10 % du ciment a été remplacé par la fumée de silice dans des coulis de rapport E/L égal à 0,40 et à 0,50. Cinq ciments, ayant différentes compositions minéralogiques et différentes finesses, ont été étudiés. Cette étude a démontré que la fumée de silice augmente le retrait endogène externe. Le taux d'augmentation dépend du type de ciment utilisé.

Les résultats de Charron [2003] démontrent que l'effet de la fumée de silice sur le retrait endogène externe dépend du rapport E/L. Dans le cas des pâtes avec 8 % de fumée de silice, il a observé une augmentation du retrait lorsque E/L a été égal à 0,27 et une légère diminution

du retrait lorsque ce rapport a été égal à 0,45 comparativement au celui de la référence (Figures 1.36 et 1.37).

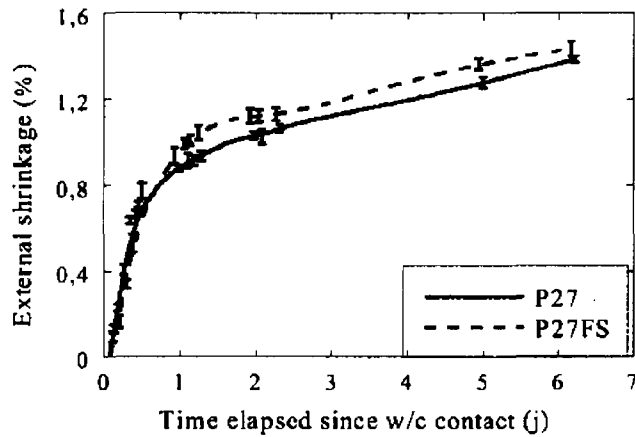


Figure 1. 36 – Influence de 8% de fumée de silice sur le retrait endogène externe d'un coulis, E/L = 0,27 [Charron, 2003]

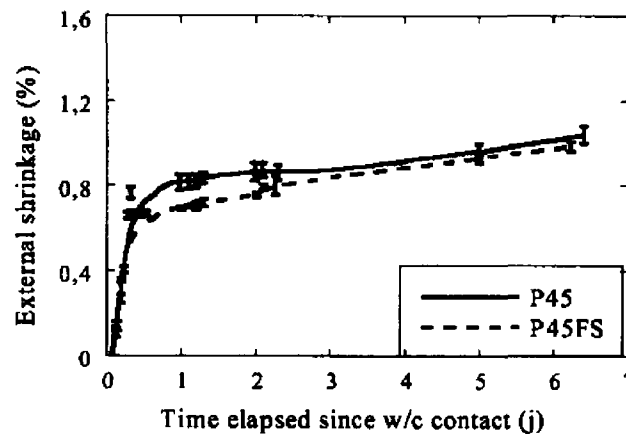


Figure 1. 37 – Influence de 8% de fumée de silice sur le retrait endogène externe d'un coulis, E/L = 0,45 [Charron, 2003]

Aouad [1999] a étudié l'effet de 8 % et de 16 % de la fumée de silice sur le retrait endogène externe et interne des coulis. Les résultats de cette étude sont présentés aux figures 1.34 et 1.35 où la lettre C présente les mélanges fabriqués avec un ciment Portland type 10. Les mélanges nommés SF contiennent 8 % de fumée de silice en substitution du ciment et les mélanges nommés TSF en contiennent 16 %. La figure 1.34 démontre que le retrait externe

des coulis avec fumée de silice est supérieur à celui de la référence dans la majorité des mélanges. Le retrait interne diminue lorsque le dosage en fumée de silice augmente, ce qui est selon Aouad, causé par une diminution de la perméabilité à l'air du coulis en présence de la fumée de silice (Figure 1.35).

- Influence des adjuvants

Les réducteurs du retrait sont des ajouts chimiques qui peuvent réduire le retrait endogène. Ces produits diminuent en effet le retrait d'autodessiccation en diminuant la tension de surface de l'eau donc en diminuant la dépression capillaire.

Aouad, [1999] a étudié l'effet d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène externe des pâtes dont le rapport E/L était de 0,35. Il a utilisé un ciment de Type 10 et un ciment de Type 10SF (8 % de ciment est substitué par la fumée de silice). L'étude a démontré que l'adjuvant permet de diminuer le retrait endogène externe à 7 jours dans le cas de deux types de ciment. Après avoir atteint le dosage optimal de l'adjuvant (environ 8 ml/kg de ciment), un effet de seuil a été observé (Figure 1.38).

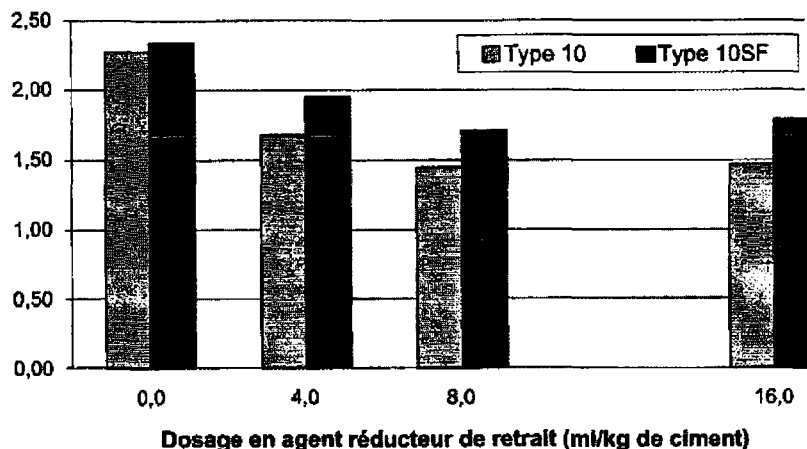


Figure 1. 38 – Effet de l'agent réducteur de retrait sur le retrait endogène externe [Aouad, 1999]

- Influence des granulats

Les données de la littérature concernant l'effet des granulats sur le retrait endogène volumique sont rares et ne permettent pas de dégager des conclusions générales sur ce sujet. Justnes et coll. [1998 (b)] ont comparé les retraits externes des pâtes de ciment et des mortiers fabriqués avec les granulats de différentes granulométries. Dans le cas des mélanges fabriqués avec un granulat très fins (filler siliceux avec $D_{max} = 0,125$ mm), Justnes a observé une légère augmentation du retrait externe (exprimé en $\text{cm}^3/100\text{g}$ de ciment). Dans le cas des mélanges fabriqués avec un granulat un peu plus grossiers (filler siliceux avec $D_{max} = 0,250$ mm), le retrait externe a été plus faible que celui de la pâte. L'auteur a finalement conclu que l'effet des fillers siliceux sur le retrait endogène externe n'est pas clair.

1. 12 Mûrissement du béton

Pour construire des structures durables en béton, il est nécessaire que le béton soit exempt de fissuration. Il faut donc surveiller la qualité du béton livré et utiliser un mûrissement adéquat. Le choix du type de mûrissement dépendra de la formulation du béton, surtout du rapport E/L et des conditions d'utilisation. La fissuration se développe dans un béton dont le retrait est mal contrôlé. Le retrait global du béton correspond à la combinaison de plusieurs retraits élémentaires [Aïtcin, 2001 (a)] :

- Le retrait plastique qui se développe à la surface d'un béton frais si la quantité d'eau évaporée est supérieure à la quantité d'eau ressuée;
- Le retrait endogène qui peut se développer lors de l'hydratation du ciment;
- Le retrait de séchage qui se développe quand l'eau s'évapore d'un béton exposé à l'air sec;
- Le retrait thermique causé par le refroidissement du béton;
- Le retrait de carbonatation dû à l'évaporation de l'eau libérée par la réaction de carbonatation.

Le retrait plastique peut se développer aussi bien dans les bétons usuels et dans les BHP. Pour les mêmes conditions climatiques, les BHP risquent plus d'être fissurés à cause du retrait plastique parce que leur taux de ressuage est faible. Pour éliminer le retrait plastique, il faut empêcher l'eau de s'évaporer en appliquant une membrane de mûrissement ou en prévoyant une brumisation.

Le retrait thermique se développe lorsque les pertes de chaleur à travers les coffrages deviennent supérieures à l'apport de chaleur dû à la réaction d'hydratation. Pour diminuer le retrait thermique, il est important d'essayer de diminuer et de retarder le plus possible la température maximale atteinte par le béton. Il faut aussi éviter un choc thermique en retardant le décoffrage. La température maximale du béton pourrait être diminuée en abaissant sa température initiale (utilisation de la glace ou du liant composé) [Morin et coll., 2002]. Donc, le retrait thermique ne sera pas directement contrôlé par le mûrissement. Cependant, un mûrissement adéquat éliminera d'autres types de retrait qui pourront s'ajouter au retrait thermique.

Dans les bétons usuels qui ne sont pas mûris, le retrait de séchage constitue le retrait le plus important. Pour éliminer le retrait de séchage, il faut éviter l'évaporation de l'eau en recouvrant le béton d'un film imperméable.

Les BHP exempts de mûrissement développent très peu de retrait de séchage et beaucoup de retrait endogène. Le retrait endogène est bien contrôlé par un mûrissement à l'eau. L'eau de mûrissement remplit les pores capillaires durant l'hydratation. Ainsi, il n'y a pas de formation de ménisques dans le réseau de capillaires ni des forces de traction pouvant faire fissurer le béton. La figure 1.39 présente la meilleure façon de protéger un BHP contre le retrait et la fissuration qui peut en découler. Pendant l'état plastique, il faut utiliser soit la brumisation, soit noyer le béton sous l'eau, soit utiliser une membrane de mûrissement temporaire. Dès que le BHP commence à durcir, il faut utiliser un mûrissement à l'eau. Ce mûrissement doit commencer au plus tard à la fin de la période dormante ce qui est détectable par une montée de la température ou par la conductivité électrique du béton (Figure 1.40) [Aïtcin, 2002; Morin et coll., 2002]. Selon Aïtcin [2001 (a)], un mûrissement de 7 jours est suffisamment long pour réduire considérablement le retrait des BHP. En aucun cas, le mûrissement à l'eau ne devrait être plus court que 3 jours. On peut ensuite utiliser un film imperméable pour

éviter le retrait de séchage. Le retrait endogène se poursuivra jusqu'à ce que l'hydratation s'arrête.

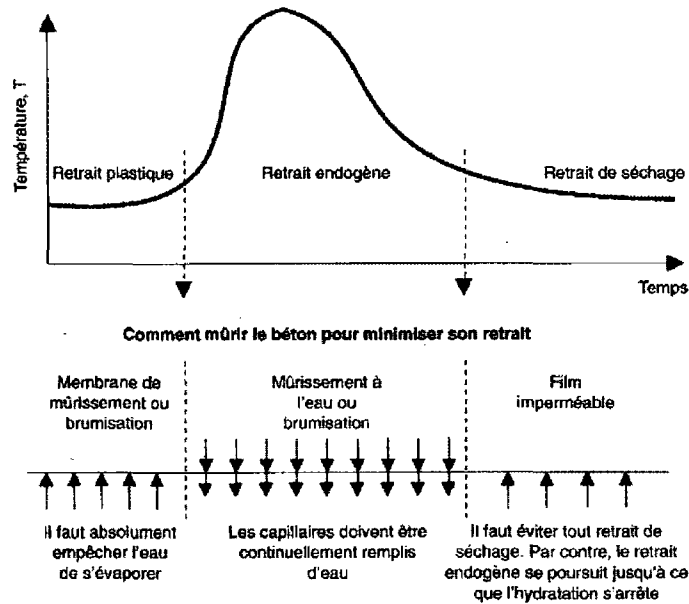


Figure 1. 39 – Régimes de mûrissement les plus appropriés durant le développement de la réaction d'hydratation [Aïtcin, 2001 (a)]

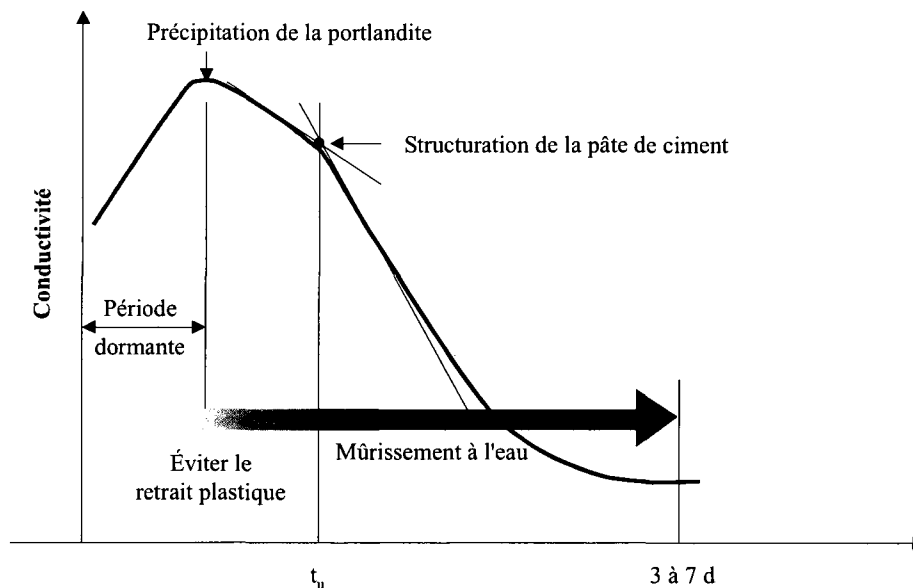


Figure 1. 40 – Début de mûrissement à l'eau destiné à la diminution du retrait endogène d'un BHP [Aïtcin, 2002]

2 BUT DE LA RECHERCHE, PROGRAMME ET PROCÉDURE DES ESSAIS

2.1 Introduction

Cette recherche a pour objectif de mieux comprendre l'influence des paramètres de formulation, des ajouts minéraux et de la température sur le développement et l'évolution du retrait endogène des coulis et des mortiers. Comme telle, elle pourrait s'inscrire parmi les efforts visant à améliorer la durabilité des bétons face à la fissuration due à un retrait endogène trop important ou mal contrôlé.

2.2 But de la recherche

Dans le cadre de la problématique de la réduction des gaz à effet de serre, les producteurs de ciment et de béton utilisent de plus en plus de sous-produits industriels et d'ajouts minéraux tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice [Aïtcin, 2000]. Cette approche permet de diminuer le contenu en ciment des bétons et, par conséquent, les émissions totales de CO₂ associées à la fabrication du béton et du ciment. Dans ce contexte, il est important de mieux comprendre l'influence des ajouts minéraux sur le développement du retrait endogène des bétons.

Le retrait endogène caractérise la diminution du volume d'un béton en absence de tout échange hydrique avec le milieu environnant. Le retrait endogène découle du bilan volumique négatif des réactions d'hydratation des principaux composants du ciment Portland. La partie du retrait endogène la plus dommageable face à la fissuration du béton est celle qui survient juste après la prise du ciment. Cette recherche vise à mesurer son évolution en fonction du temps et de la température d'hydratation. Une attention particulière a été consacrée à la compréhension de l'influence du type et du dosage des ajouts minéraux (cendres volantes, laitier, fumée de silice).

La méthodologie de l'étude a été principalement centrée sur l'utilisation de la cellule de mesure de retrait endogène mise au point à l'Université de Sherbrooke [Gagné et coll., 1999].

Cette cellule a été utilisée pour étudier le retrait endogène de coulis et de mortiers. Elle permet de caractériser complètement le retrait endogène volumique en mesurant simultanément les retraits endogènes externe et interne avant et après la prise. La somme de deux retraits donne le retrait endogène total [Popic et Gagné, 2007].

Selon la figure 2.1, le retrait endogène des matrices cimentaires avec ajouts minéraux est le résultat d'un retrait chimique et d'un retrait d'autodessiccation. Pour pouvoir le caractériser complètement, il a fallu étudier ces deux composantes. C'est pourquoi les mesures de retrait endogène réalisées avec la cellule ont été complétées par des mesures de la contraction Le Chatelier.

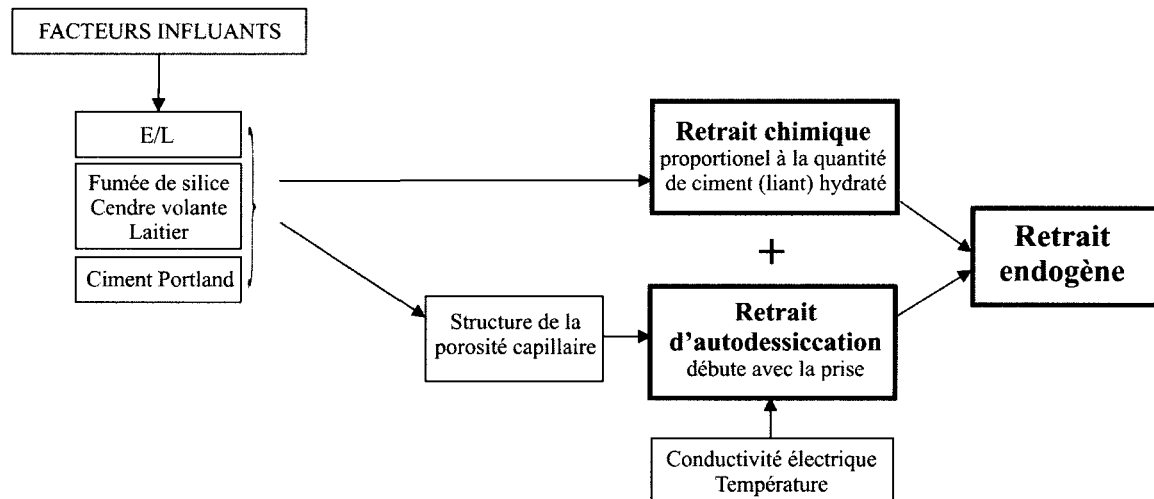


Figure 2. 1 - Composants du retrait endogène

Cette recherche vise d'une part, à quantifier l'influence de la température d'hydratation et des ajouts minéraux sur le retrait endogène des matrices cimentaires et, d'autre part, de préciser les mécanismes fondamentaux qui gouvernent le développement du retrait endogène des bétons, tels que la porosité, le degré d'hydratation de liant et la stœchiométrie des réactions d'hydratation.

2.3 Programme des essais

L'étude du retrait endogène volumique à l'aide de la cellule développée à l'Université de Sherbrooke a été déjà entreprise par Aouad [1999]. Son étude a été principalement concentrée sur le développement de la cellule. Elle comprend également un programme d'essais limité à l'étude des effets du rapport E/L et du remplacement du ciment par la fumée de silice.

Notre étude comporte un plus grand nombre de paramètres. Les paramètres de formulation étudiés sont : le type de liant, le rapport eau/liant et la teneur en sable. La figure 2.2 présente un organigramme du choix des paramètres de composition des coulis et des mortiers.

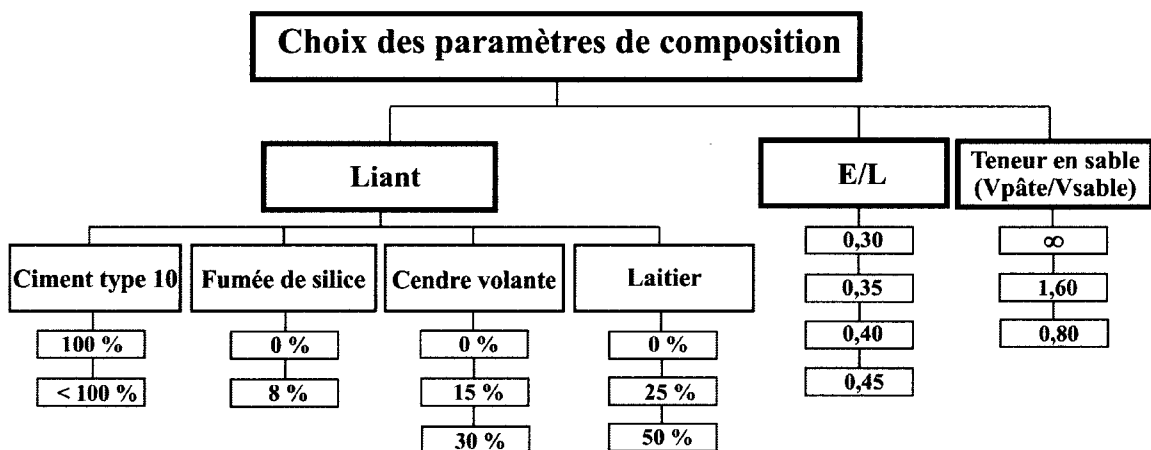


Figure 2. 2 - Organigramme du choix des paramètres de composition des coulis et des mortiers

Dans tous les coulis nous avons utilisé un ciment Portland de Type 10 (Type GU) auquel on a substitué des ajouts minéraux. Il s'agissait d'une substitution massique. Les taux de substitution pour les ajouts minéraux ainsi que les rapports E/L utilisés sont présentés au tableau 2.1. Dans les mélanges de mortier, un sable normalisé (sable d'Ottawa) a été utilisé. Les rapports volumiques entre la pâte et le sable ainsi que les rapports E/L utilisés sont présentés au tableau 2.2.

Tableau 2.1 – Composition des coulis

Mélange	E/L	Liant					
Coulis	0,30	100% C	92% C, 8% FS	75% C, 25% L	50% C, 50% L	85% C, 15% CV	70% C, 30% CV
	0,35	100% C	92% C, 8% FS	75% C, 25% L	50% C, 50% L	85% C, 15% CV	70% C, 30% CV
	0,40	100% C					
	0,45	100% C	92% C, 8% FS	75% C, 25% L	50% C, 50% L	85% C, 15% CV	70% C, 30% CV

Tableau 2.2 – Composition des mortiers

Mélange	E/L	Liant	$V_{\text{pâte}} / V_{\text{sable}}$		$V_{\text{pâte}} / V_{\text{mortier}}$	
Mortier	0,30	100% C	0,8	1,6	62%	44%
	0,35	100% C	0,8	1,6	62%	44%
	0,40	100% C	0,8	1,6	62%	44%
	0,45	100% C	0,8	1,6	62%	44%

Les coulis et les mortiers ont été fabriqués avec un même type de superplastifiant (polynaphtalène sulfonate) qui était dosé afin d'obtenir des mélanges de même maniabilité.

Les mesures du retrait endogène des coulis ont été réalisées à 10°C, 20°C et 30°C. Dans le cas des mortiers, nous nous sommes limités à une seule température de 20°C. Les mesures de la contraction le Chatelier ont aussi été réalisées à 20°C. La contraction Le Chatelier a été mesurée sur les coulis de rapport E/L = 0,45 fabriqués avec et sans ajouts minéraux.

Les mesures de retrait endogène ont été complétées avec d'autres essais. La conductivité électrique des mélanges a été mesurée en parallèle avec les mesures de retrait. La quantité d'eau chimiquement liée a été déterminée à la fin des mesures de retrait. Une partie importante du programme expérimental a porté sur la porosité capillaire des coulis. La résistance à la compression des mortiers a été également déterminée.

2.4 Procédure des essais

La procédure expérimentale comporte trois étapes de caractérisation : la caractérisation du ciment et des ajouts minéraux, la caractérisation des coulis à l'état frais et durci et la caractérisation des mortiers à l'état frais et durci (Figure 2.3).

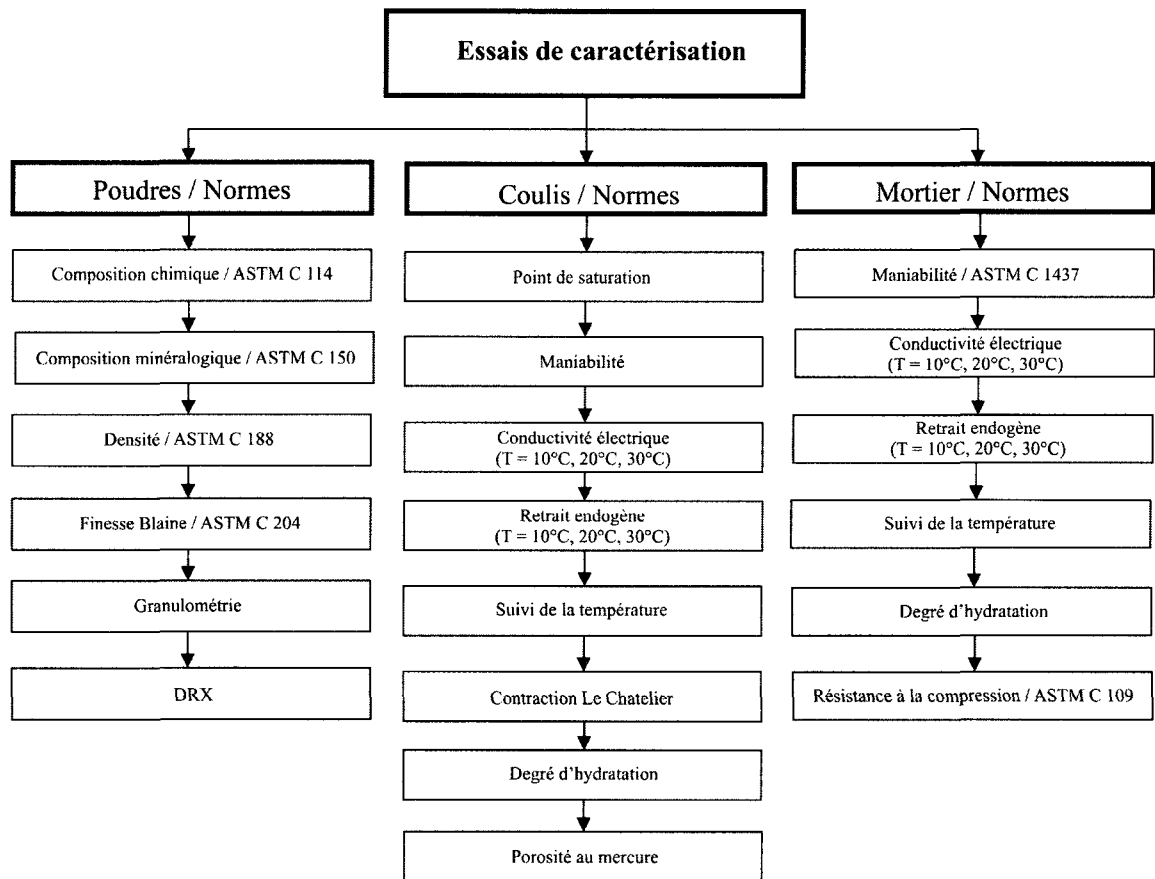


Figure 2.3 - Organigramme du choix des essais de caractérisation

2.4.1 Caractérisation des poudres

Le ciment et les ajouts minéraux ont été caractérisés au début du projet. Cette caractérisation a compris la détermination des paramètres suivants : la composition chimique et minéralogique, la densité, la finesse Blaine, la granulométrie au laser et la diffraction aux rayons X.

- Finesse Blaine

La mesure de la finesse Blaine des poudres a été réalisée conformément à la norme ASTM C 204. Cet essai consiste à mesurer le temps de passage d'un certain volume d'air à travers un certain volume de ciment (ou d'une autre poudre) placé et compacté de façon normalisée dans une cellule. Le temps de passage de l'air à travers l'échantillon est comparé avec le temps de passage à travers un échantillon de référence dont la surface spécifique est connue. En connaissant la densité et la porosité de l'échantillon et de la référence, on calcule la surface spécifique de l'échantillon testé.

- Granulométrie au laser

La distribution granulométrique des poudres a été déterminée à l'aide d'un granulomètre au laser de marque Analysette 22 produit par la compagnie Fritsch. Cet appareil permet de déterminer les pourcentages de grains ayant les diamètres compris entre 300 μm et 0,3 μm . L'essai consiste à diriger un rayon laser sur les particules de ciment préalablement dispersées à l'aide d'ultrasons, en suspension dans une solution. Quand une particule est frappée par un rayon laser, ce dernier se diffracte. Le rayon diffracté est ensuite comparé avec des modèles connus de diffraction qui dépendent de la grosseur des particules.

- Diffraction aux rayons X

Le ciment et les ajouts minéraux ont été analysés par diffraction des rayons X. Cet essai permet de faire une analyse qualitative des phases cristallines et de caractériser des solides non-cristallins ou amorphes. Les mesures sont basées sur la loi de Bragg qui définit les conditions de diffraction d'un rayon X par une famille de plans réticulaires. Les plans réticulaires sont des plans identiques et parallèles formés par des ions d'un cristal. La loi de Bragg est présentée par l'équation suivante [Carles-Gibergues, 1990] :

$$2d \sin\theta = k\lambda \quad (2.1)$$

- d : distance entre les plans réticulaires;
 θ : angle de diffraction;
k : nombre entier désignant l'ordre de la réflexion;
 λ : longueur d'onde du rayon X.

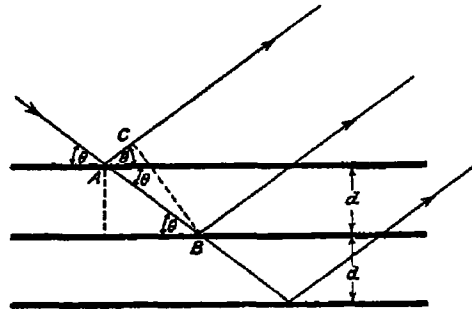


Figure 2. 4 - Diffraction par des plans réticulaires [Lea, 1970]

Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique. Il existe des banques de données pour des diffractions correspondantes aux différentes espèces cristallines pures. Ainsi, on est capable d'identifier des composants d'une poudre formée de plusieurs espèces minérales.

Sur les diagrammes de diffraction aux rayons X du ciment, les pics des silicates (C_3S et C_2S) sont les plus intenses. Les pics des autres phases, comme les aluminates (C_3A et C_4AF), sont plus faibles et pratiquement cachés par ceux des silicates. Pour avoir plus d'information sur la présence des aluminates, on traite un échantillon de ciment dans une solution d'acide salicylique qui dissout les silicates. La partie non dissoute du ciment est ensuite analysée aux rayons X.

2.4. 2 Caractérisation des coulis

Les coulis ont été caractérisés à l'état frais, à l'état durci et pendant le passage d'un état à l'autre (Figure 2.3). Une quantité trop élevée de superplastifiant peut retarder la prise du ciment et, par conséquent, influencer les mesures de retrait endogène. Pour chaque rapport E/L, nous avons donc déterminé le point de saturation en superplastifiant à l'aide du temps d'écoulement au cône Marsh. Tous les coulis devaient avoir une maniabilité semblable lors de la mise en place dans l'enceinte interne de la cellule. La maniabilité visée a été obtenue en dosant correctement le superplastifiant. La maniabilité a été mesurée avant et après la mise en place de l'échantillon à l'aide de la méthode du mini cône d'étalement. Le passage du coulis de l'état liquide à l'état solide a été mesuré à l'aide de mesure de la conductivité électrique.

2.4.2. 1 Fabrication des coulis

Tous les coulis ont été fabriqués dans un mélangeur à grande vitesse de cisaillement ayant une capacité de 1,2 litres selon la procédure suivante :

- Peser l'eau dans le récipient du mélangeur électrique, puis ajouter le superplastifiant si nécessaire. La température de l'eau doit être ajustée pour obtenir des coulis de 10, 20 ou 30°C après le malaxage avec une variation de $\pm 2^\circ\text{C}$.
- Démarrer le mélangeur et ajouter graduellement le ciment, et éventuellement les ajouts minéraux, pendant une période de 2 minutes. Dans le cas des essais à 10°C, le ciment et les ajouts minéraux sont refroidis pendant 24 heures avant confection des mélanges.
- Poursuivre le malaxage pendant 30 secondes.
- Arrêter le malaxage pendant 15 secondes pour racler les côtés du récipient du mélangeur à l'aide d'une spatule et vérifier l'absence des grumeaux.
- Recommencer le malaxage pour une période de malaxage de 45 secondes.
- Arrêter le mélangeur.

2.4.2.2 Point de saturation

Le point de saturation du liant par le superplastifiant a été déterminé par la méthode du cône Marsh. Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement de 1,2 litres de coulis à travers l'ouverture inférieure du cône Marsh afin de remplir un vase gradué de 1 litre (Figure 2.5).

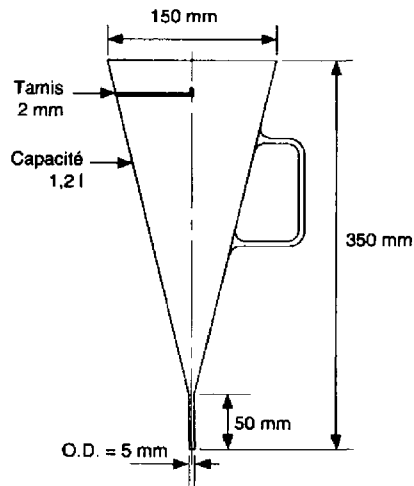


Figure 2. 5 - Cône Marsh [Aïtcin, 2001 (a)]

Le temps d'écoulement est mesuré après 5 et 60 minutes suivant le contact de l'eau et du liant afin d'évaluer l'évolution de fluidité du coulis dans le temps. Le point de saturation d'un liant correspond au dosage en superplastifiant au-dessus duquel toute augmentation du dosage de superplastifiant n'augmente plus la fluidité du coulis (Figure 2.6).

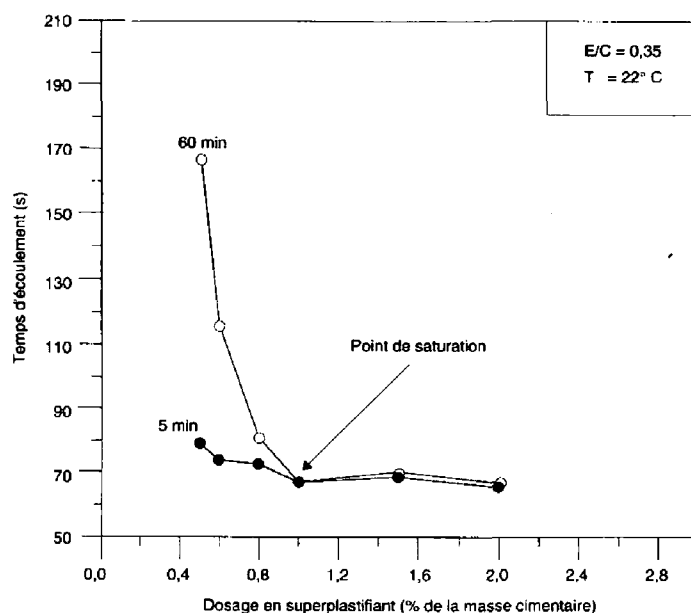


Figure 2. 6 - Point de saturation d'un coulis [Aïtcin, 2001 (a)]

Pendant l'écoulement, le cisaillement n'est pas constant parce que le volume du coulis dans le cône diminue. Les expériences ont démontré que le temps d'écoulement des coulis est linéaire jusqu'à 700 ml [Aïtcin, 2001 (a)]. Il est donc recommandé de prendre le temps d'écoulement correspondant à ce volume pour la détermination du point de saturation.

2.4.2. 3 Maniabilité des coulis

La maniabilité des coulis a été évaluée par la méthode du mini cône d'étalement. Cette méthode consiste à faire un essai d'affaissement sur une petite quantité de coulis en utilisant un mini cône (Figure 2.7). L'essai permet de déterminer la fluidité initiale du coulis et de suivre la perte de fluidité dans le temps. La maniabilité des coulis a été mesurée avant et après la mise en place du coulis dans l'enceinte interne de la cellule de mesure du retrait endogène.



Figure 2. 7 - Essai d'affaissement par la méthode du mini cône [Aïtcin, 2001 (a)]

2.4.2. 4 Conductivité électrique

La conductivité électrique a été mesurée sur les échantillons soumis aux essais de retrait endogène. La cellule de conductivité électrique a été installée dans l'enceinte interne de la cellule de mesure du retrait endogène (Figure 2.9). La cellule de conductivité électrique est formée de deux électrodes en laiton écartées d'environ 6 mm (Figure 2.8). Les mesures de conductivité électrique ont pratiquement débutés en même temps que les mesures du retrait c'est à dire entre 25 et 35 minutes après le contact eau - liant. Elles ont durées 24 heures. Ces mesures nous ont permis d'identifier l'instant correspondant au début de la rigidification du squelette minéral et de le comparer avec le début du retrait endogène interne. La cellule de la conductivité électrique a été régulièrement calibrée dans une solution de chlorure de potassium maintenue à la même température que celle de l'échantillon lors de l'essai de retrait endogène (10°C, 20°C ou 30°C).

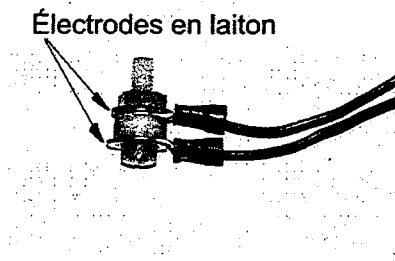


Figure 2. 8 - Cellule de mesure de la conductivité électrique

2.4.2. 5 Mesure de retrait endogène

L'approche expérimentale vise à mesurer le retrait endogène volumique des coulis en milieu scellé et sous une température contrôlée. La technique de mesure a été basée sur une cellule qui permet de mesurer simultanément les retraits endogènes externe et interne (Figure 2.9). La mesure de retrait endogène débute entre 25 et 35 minutes après le contact eau-liant. Le retrait endogène externe a été obtenu en mesurant la variation du volume apparent externe du coulis. Le retrait endogène interne a été obtenu en mesurant le volume d'air aspiré par l'éprouvette lors de la formation des ménisques dans la porosité capillaire. Ce volume correspond au volume des vides gazeux créés dans la phase liquide de la porosité capillaire [Gagné et coll., 1999].

2.4.2.5. 1 Construction de la cellule

La cellule de mesure est constituée d'une enceinte interne et d'une enceinte externe (Figures 2.9, 2.11 et 2.12). L'enceinte interne peut contenir environ 800 ml de coulis. Elle est formée d'une base cylindrique et d'un chapeau reliés par une membrane en latex (Figure 2.10). La membrane en latex a un diamètre de 76 mm, une longueur de 305 mm et une épaisseur de 0,64 mm. Elle est serrée sur le bloc de base et sur le chapeau par des bandes en caoutchouc. La membrane est soutenue par un cylindre en métal perforé dont l'assemblage permet à l'éprouvette de se déformer librement longitudinalement et radialement.

L'enceinte interne comporte la cellule de conductivité électrique (Figure 2.8, 2.9 et 2.10). Un thermocouple est intégré à la cellule de conductivité. La cellule de conductivité et le thermocouple sont reliés à des systèmes informatisés d'acquisition de données. Les fils pour la mesure de conductivité électrique et les fils des thermocouples sont introduits dans un tube en *Nalgène* ayant un diamètre externe de 5 mm et une épaisseur de paroi de 0,7 mm. Ce tube passe par la burette externe de la cellule.

Un bloc poreux est installé dans le chapeau de l'enceinte interne. Il constitue un ancrage pour cinq tiges poreuses en plastique rigide et perméable ayant une coupe transversale carrée de 6,4 mm de côté. Les quatre tiges ont une longueur de 185 mm et la cinquième, ancrée au centre du bloc, a la longueur de 125 mm. Le plastique rigide est constitué de billes de polyéthylène à haute densité collées de telle sorte que l'on obtient un matériau poreux permettant le passage de l'air et de l'eau. Ce plastique a un diamètre moyen des pores de 70 μm et un volume de vides de 45 %. Un papier filtre d'une épaisseur de 0,7 mm est installé entre le bloc poreux et l'éprouvette. Ce papier empêche la pénétration du coulis frais dans le bloc poreux. Sa capacité de rétention des particules supérieures à 8 μm est de 98 %. Le chapeau de l'enceinte interne contient aussi trois vis afin de l'ancrer dans le coulis après son durcissement (Figures 2.9 et 2.10).

L'enceinte interne baigne dans l'eau de l'enceinte externe. L'enceinte externe est fabriquée d'un tube rigide en cuivre de 100 mm de diamètre, de 355 mm de longueur et de 2 mm d'épaisseur. Le fond du tube est soudé sur une plaque en métal. Sa partie supérieure est fermée par un couvercle muni d'une burette et fixée sur l'enceinte externe avec six vis. Le couvercle contient aussi un thermocouple et la sonde externe du bain thermostaté qui permet de contrôler la température de l'eau contenue dans la cellule externe (Figures 2.9 et 2.12).

L'essai est effectué en plaçant l'échantillon de coulis dans l'enceinte interne dont la paroi latérale est en latex. L'enceinte interne est ensuite placée dans l'enceinte externe qui représente un volume de référence. Le retrait endogène externe est mesuré en faisant la lecture de la variation du niveau d'eau dans la burette. Étant donné que le tube qui contient les fils de conductivité électrique et le thermocouple passe par la burette, les lectures du niveau d'eau ne correspondent pas aux variations volumiques réelles de l'échantillon. Un calibrage de la burette a été nécessaire afin de calculer les variations réelles du volume à partir

des lectures. Ce calibrage a été réalisé en comparant les lectures obtenues après l'introduction de 5 ml d'eau dans la burette avec et sans tube. La correction ainsi établie est utilisée pour toutes les mesures de retrait externe.

Le retrait endogène interne est mesuré à l'aide du système de mesure par volume de contrôle. L'air transite par les tiges poreuses, passe par le tuyau flexible relié au couvercle, arrive aux robinets pour ensuite rejoindre le système de mesure du volume gazeux (Figure 2.13). Ce système mesure le volume d'air nécessaire pour équilibrer la pression du gaz dans la porosité capillaire avec la pression atmosphérique. Les lectures sont prises à des instants prédéfinies. Les robinets du système de mesure sont fermés entre les lectures afin de permettre la succion d'air par l'échantillon uniquement pendant les lectures.

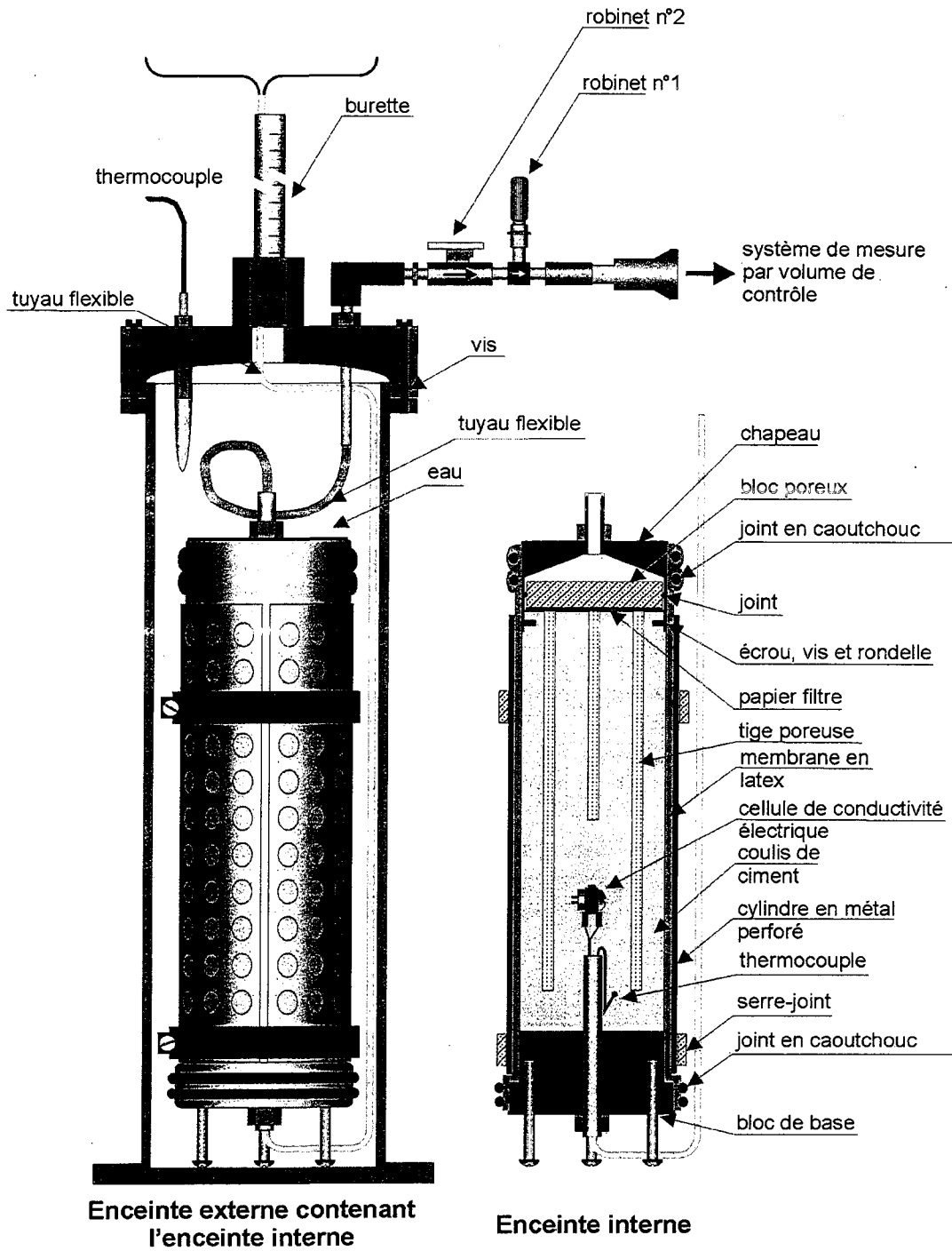


Figure 2. 9 - Schéma de la cellule de mesure du retrait endogène

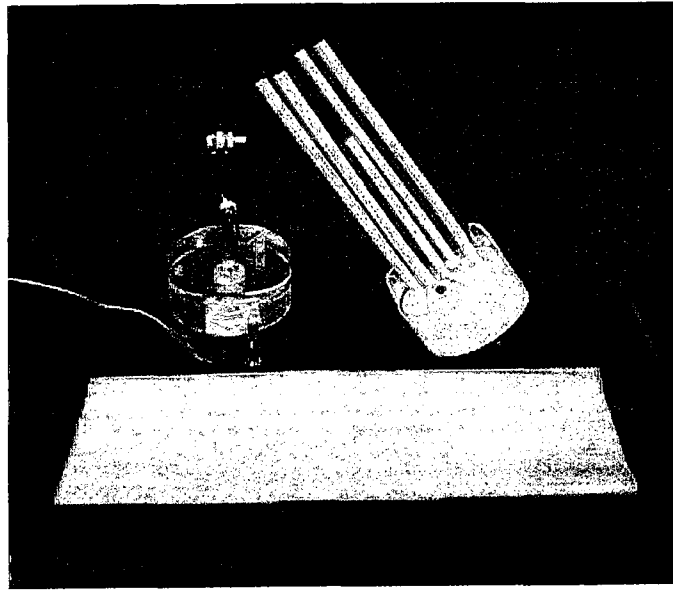


Figure 2. 10 - Base, chapeau et la membrane en latex

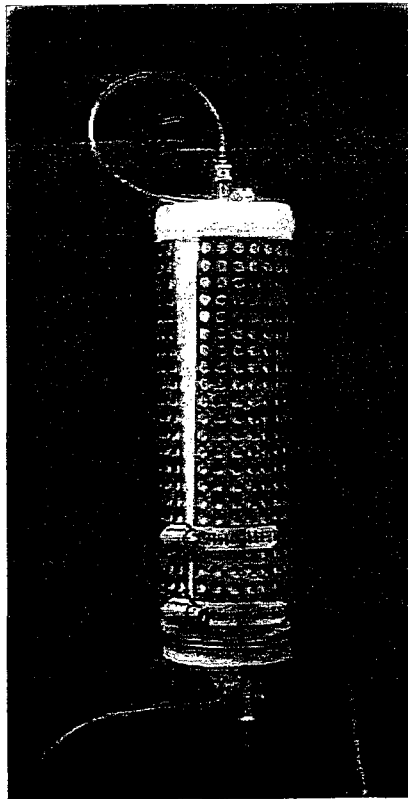


Figure 2. 11 - Enceinte interne

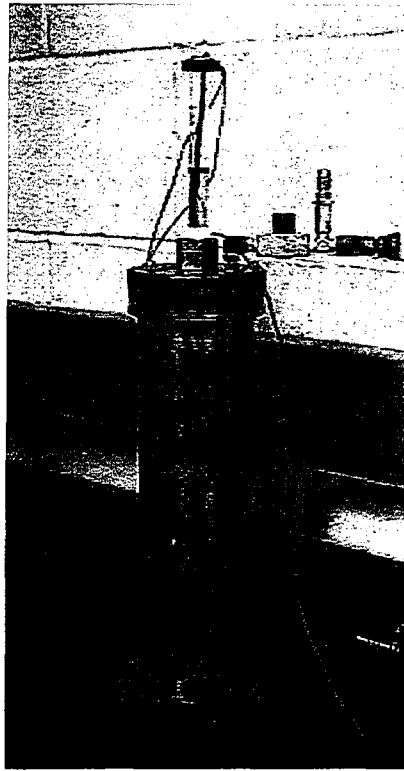
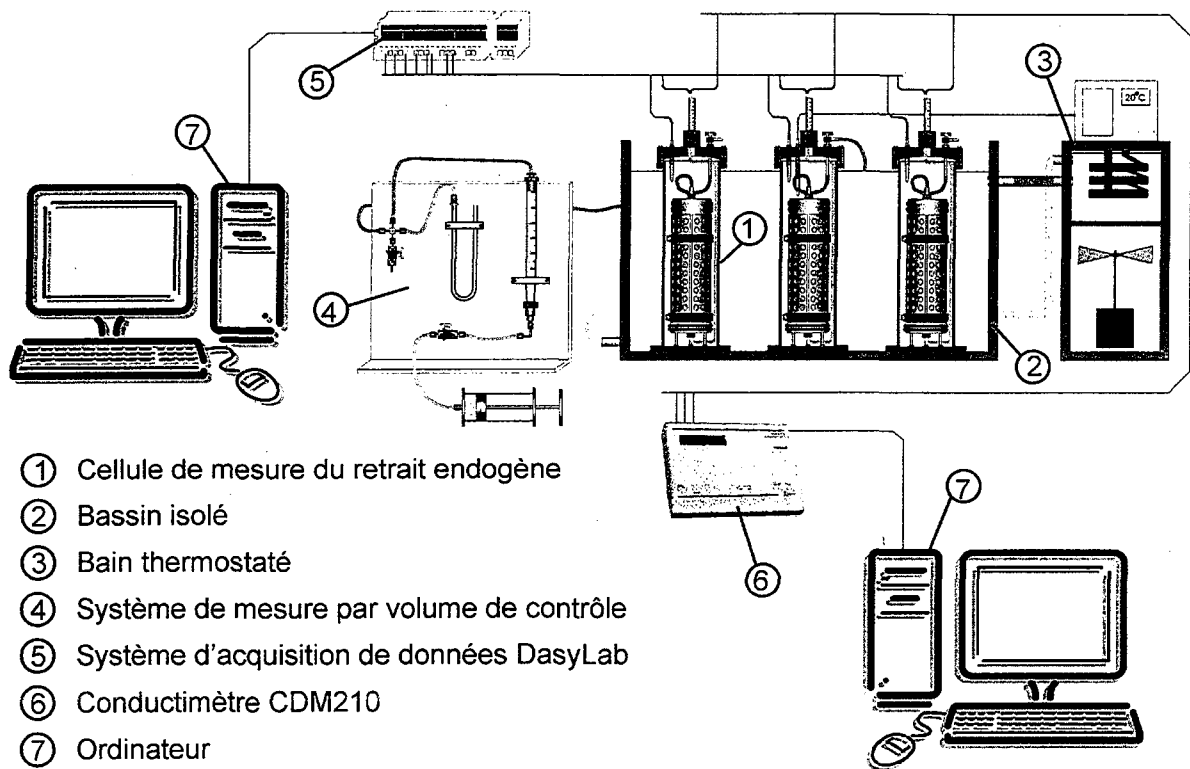


Figure 2. 12 - Enceinte externe

Les trois cellules de mesure du retrait endogène sont placées dans un bassin rempli d'eau maintenue à température constante à l'aide d'un bain thermostaté (Figure 2.13). Les thermocouples, installés dans l'échantillon et dans l'enceinte externe, sont reliés au système d'acquisition de données DasyLab qui enregistre la température de l'échantillon et de l'eau qui l'entoure. L'échantillon contient aussi la cellule de conductivité électrique qui est reliée au conductimètre de marque CDM 210.

Les essais de retrait endogène des coulis ont été réalisés à 10°C, 20°C et 30°C. Dans le cas des essais à 20°C, les mesures ont duré 7 et 14 jours. Dans le cas de deux autres températures, les mesures ont été limitées à 7 jours. Chaque essai est répété à deux reprises afin d'améliorer la précision des mesures.



- ① Cellule de mesure du retrait endogène
- ② Bassin isolé
- ③ Bain thermostaté
- ④ Système de mesure par volume de contrôle
- ⑤ Système d'acquisition de données DasyLab
- ⑥ Conductimètre CDM210
- ⑦ Ordinateur

Figure 2. 13 - Schéma du montage

2.4.2.5. 2 Mode opératoire

a) Préparation de l'enceinte interne

Cette étape consiste à assembler l'enceinte interne en respectant la procédure suivante :

- Passer les fils de conductivité et le thermocouple par le tube en cuivre installé au centre du bloc de base, assembler la cellule de conductivité, colmater avec du silicone résistant à l'eau les deux extrémités du tube, laisser sécher.
- Coller le papier filtre sur le bloc poreux avec du silicone, laisser sécher.
- Enrouler le ruban de téflon autour du bloc poreux.

- Percer le papier filtre et placer les cinq tiges poreuses, colmater avec du silicone autour des perçages, laisser sécher.
- Graisser le bloc de base, placer la membrane en latex autour du bloc de base, puis la retenir avec deux joints en caoutchouc.
- Placer le cylindre en métal perforé, l'insérer dans la rainure du bloc de base, puis le serrer avec un serre-joint.
- Serrer la partie supérieure du cylindre perforé avec un deuxième serre-joint en laissant un peu de jeu.
- Après le séchage du silicone, insérer le bloc poreux dans le chapeau.
- Fixer les trois vis, leur écrou et rondelle sur le chapeau.
- Graisser la surface du chapeau qui sera en contact avec la membrane en latex.
- Appliquer un savon de démoulage sur la surface intérieure de la membrane en latex.

b) Préparation de l'essai

La préparation de l'essai consiste à mettre en place le coulis dans l'enceinte interne qui est ensuite installée dans l'enceinte externe préalablement remplie d'eau. Les différentes étapes à suivre sont les suivantes :

- Peser ensemble l'enceinte interne, le chapeau et les deux bandes en caoutchouc et noter la masse.
- Fixer le chapeau en le vissant sur la potence, s'assurer de sa verticalité (Figure 2.14-a).
- Introduire le coulis dans l'enceinte interne, en donnant de petits coups, afin d'évacuer les bulles d'air piégées.
- Placer l'enceinte interne sous la potence (Figure 2.14-b), insérer le chapeau avec les tiges poreuses dans la membrane et les retenir ensemble avec deux bandes en caoutchouc. Replier deux fois la membrane sur les bandes.

- Désolidariser le chapeau et la potence, peser le dispositif et noter la masse.
- Visser le tuyau flexible sur l'extrémité du chapeau.
- Placer l'enceinte interne dans l'eau désaérée de l'enceinte externe tout en remuant pour s'assurer de l'évacuation de tout l'air qui pourrait être piégé (Figure 2.14-c).
- Passer le tuyau contenant les fils de conductivité et le thermocouple par la burette du couvercle de l'enceinte externe.
- Ouvrir les robinets de la cellule.
- Visser l'autre extrémité du tuyau flexible sur le couvercle de l'enceinte externe.
- Fixer le couvercle avec six vis.
- Rajouter de l'eau désaérée par le haut de la burette externe jusqu'à la remplir à moitié.
- Remuer la cellule pour assurer le départ de l'air piégé.
- Fermer les robinets de la cellule et prendre la première lecture externe sur la burette en relevant le temps qui sera l'origine.
- Après quelques premières lectures ajouter du kérosène coloré dans la burette afin de limiter l'évaporation de l'eau.

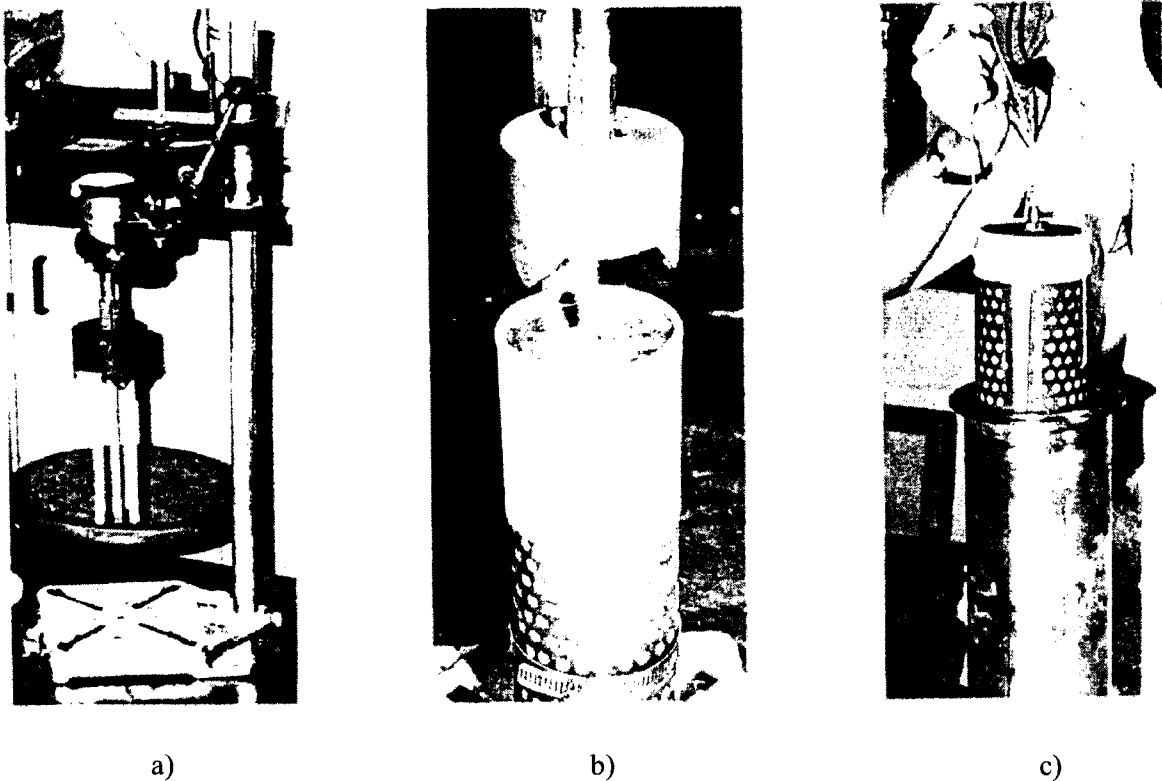


Figure 2. 14 - Préparation de l'essai du retrait endogène [Aouad, 1999]

c) Lecture des valeurs

Une fois le coulis mis en place dans la cellule, les lectures interne et externe doivent être prises à des instants prédéfinis pour permettre la répétitivité des essais. De plus, les séquences suivantes doivent être respectées :

- Pendant la première heure, prendre les lectures toutes les 20 minutes, puis toutes les heures pendant 7 heures, le second jour, prendre 2 lectures et une lecture par jour pendant les jours suivants. Au bout de 7 jours (14 jours) ouvrir la cellule et enlever l'échantillon.
- La lecture interne est effectuée en initialisant l'appareil de mesure par volume de contrôle (Figure 2.15). Premièrement, il faut ouvrir le robinet de gauche de l'appareil de mesure, puis régler le niveau du ménisque sur la burette à une origine

arbitraire en tournant le piston. Insérer ensuite l'extrémité du tuyau dans la valve de la cellule et fermer le robinet. La mesure est faite en ouvrant complètement le robinet n°2 de la cellule, son robinet n°1 est ouvert lentement (Figure 2.9). Une dénivellation se crée dans le tube en U. Après la stabilisation, fermer le robinet n°2 de la cellule, puis le robinet n°1. Tourner le piston pour rétablir le même niveau dans les deux compartiments du tube en U. La nouvelle valeur indiquée par le ménisque sur la burette permet d'avoir, à partir de l'origine arbitraire, la valeur de la lecture interne.

- La lecture externe est faite en relevant le niveau du ménisque sur la burette externe de la cellule. La lecture externe est effectuée après la lecture interne.

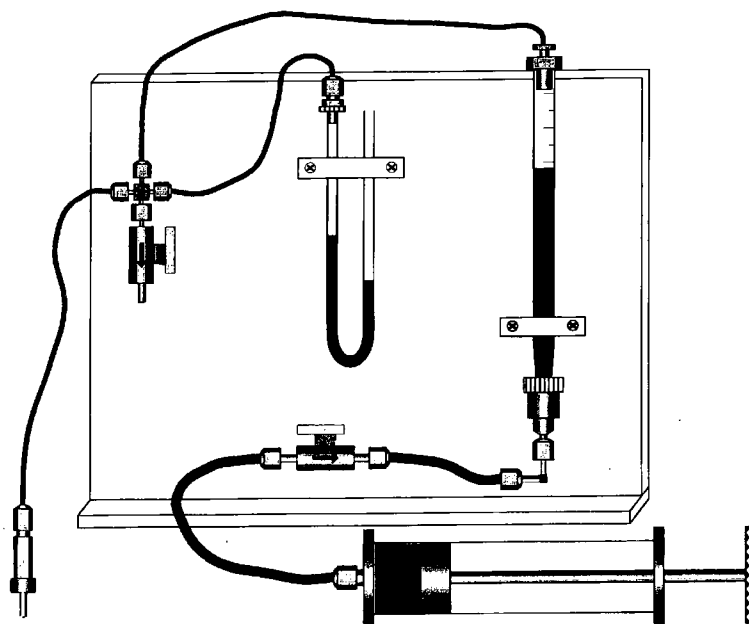


Figure 2. 15 - Système de mesure par volume de contrôle

Quantité de coulis dans l'enceinte interne

$$M_{\text{coulis}} = M_{\text{enc.int+coulis}} - M_{\text{enc.int}} \quad [\text{g}] \quad (2.2)$$

$$V_{\text{coulis } t_0} = \frac{M_{\text{coulis}}}{M V_{\text{coulis}}} \quad [\text{ml}] \quad (2.3)$$

$$M_{\text{liant}} = M_{\text{coulis}} \frac{1}{E/L+1} \quad [\text{g}] \quad (2.4)$$

Diminution de volume du coulis (retrait interne et retrait externe)

$$\Delta V = V_t - V_{t_0} \quad [\text{ml}] \quad (2.5)$$

$$\text{Retraits interne et externe } [\%] = \frac{\Delta V}{V_{\text{coulis } t_0}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

$$\text{Retraits interne et externe } [\text{ml}/100\text{g liant}] = \frac{100\Delta V}{M_{\text{liant}}} \quad (2.7)$$

$$\text{Retraits interne et externe } [\text{ml}/100\text{g liant hydraté}] = \frac{100\Delta V}{M_{\text{liant hydraté}}} \quad (2.8)$$

L'utilisation de l'équation 2.8 nécessite la connaissance du degré d'hydratation du liant à l'instant t.

Un exemple du traitement de données est présenté à la page suivante. Ce traitement des données permet de calculer les différences de volumes à partir desquelles on calcule les retraits externe et interne. Les retraits externe, interne et total, exprimés en pourcentage de volume initial, sont également présentés.

ESSAI DE CHANGEMENT DE VOLUME

Nombre de tiges : 4,5 Composition : 100 % Ciment type 10
 E/C : 0,30 Volume : 828,30 ml Densité : 2,119
 Température : 20°C Début de l'essai (j/m/a h.m) : 6-1-03 10:25 Masse : 1755,40 g

Date/Heure (j/m/a h.m)	Temps (h)	Changement de volume externe						Changement de volume interne						Changement de volume total (%)	
		Lectures externes		Changement de vol. (ml)		Delta V (%)	Lectures internes		Changement de vol. (ml)		Delta V (%)				
		Avant	Après	Ind.	Corr.		Add.	Avant	Après	Ind.		Add.			
6-1-03 10:00	Contact E-C														
6-1-03 10:25	0,00					0,00									0,00
6-1-03 10:45	0,33	39,3	43,4	-4,1	-3,6	-1,4	-0,17	7,00	4,85	2,15	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,17
6-1-03 11:05	0,67	43,4	46,4	-3,0	-2,6	-2,8	-0,34	7,00	5,70	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,34
6-1-03 11:25	1,00	46,4	48,6	-2,2	-1,9	-3,6	-0,43	6,00	4,85	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,43
6-1-03 12:25	2,00	48,6	53,4	-4,8	-4,2	-5,4	-0,65	5,00	2,61	2,39	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,65
6-1-03 13:25	3,00	52,9	54,0	-1,1	-1,0	-6,0	-0,73	4,00	3,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,73
6-1-03 14:00	3,58	54,6	54,8	-0,2	-0,2	-6,2	-0,75	3,00	3,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,01	-0,01	-0,76
6-1-03 15:01	4,60	55,1	55,2	-0,1	-0,1	-6,3	-0,76	0,00	1,25	-1,25	-1,30	-1,30	-0,16	-0,16	-0,92
6-1-03 15:59	5,57	55,3	54,8	0,5	0,4	-5,9	-0,71	0,00	2,75	-2,75	-4,05	-4,05	-0,49	-0,49	-1,20
6-1-03 17:00	6,58	54,8	54,2	0,6	0,5	-5,3	-0,64	0,00	3,60	-3,60	-7,65	-7,65	-0,92	-0,92	-1,57
6-1-03 18:00	7,58	54,2	54,8	-0,6	-0,5	-5,9	-0,71	0,00	4,00	-4,00	-11,65	-11,65	-1,41	-1,41	-2,11
6-1-03 19:25	9,00	54,8	55,3	-0,5	-0,4	-6,3	-0,76	0,00	3,05	-3,05	-14,70	-14,70	-1,77	-1,77	-2,54
7-1-03 8:08	21,72	55,3	56,2	-0,9	-0,8	-7,1	-0,86	0,00	4,40	-4,40	-19,10	-19,10	-2,31	-2,31	-3,16
7-1-03 17:35	31,17	56,2	56,7	-0,5	-0,4	-7,5	-0,91	0,00	1,70	-1,70	-20,80	-20,80	-2,51	-2,51	-3,42
8-1-03 9:03	46,63	56,5	57,0	-0,5	-0,4	-8,0	-0,96	0,00	2,33	-2,33	-23,13	-23,13	-2,79	-2,79	-3,76
9-1-03 9:11	70,77	57,1	58,0	-0,9	-0,8	-8,8	-1,06	0,00	1,89	-1,89	-25,02	-25,02	-3,02	-3,02	-4,08
10-1-03 9:13	94,80	57,8	58,4	-0,6	-0,5	-9,3	-1,12	0,00	1,63	-1,63	-26,65	-26,65	-3,22	-3,22	-4,34
11-1-03 9:15	118,83	58,4	59,0	-0,6	-0,5	-9,8	-1,18	0,00	1,13	-1,13	-27,78	-27,78	-3,35	-3,35	-4,54
12-1-03 9:10	142,75	59,1	59,5	-0,4	-0,4	-10,2	-1,23	0,00	0,45	-0,45	-28,23	-28,23	-3,41	-3,41	-4,64
13-1-03 10:32	168,12	59,5	59,8	-0,3	-0,3	-10,4	-1,26	0,00	0,15	-0,15	-28,38	-28,38	-3,43	-3,43	-4,69

2.4.2.5. 3 Interprétation des courbes de changement volumique

Les lectures effectuées à l'aide de la cellule de mesure du retrait endogène permettent de tracer les courbes de changement volumique interne et externe de l'échantillon. Il s'agit de données brutes. Le traitement des données brutes, expliqué au chapitre 7, permet de tracer les courbes des retraits interne et externe (Figure 7.1). Pour mieux comprendre les lectures données par la cellule interne et la cellule externe, nous avons divisé les courbes de changement volumique en 6 parties (Figure 2.16). Le texte qui suit, explique les différentes phases du développement des mesures de changement volumique.

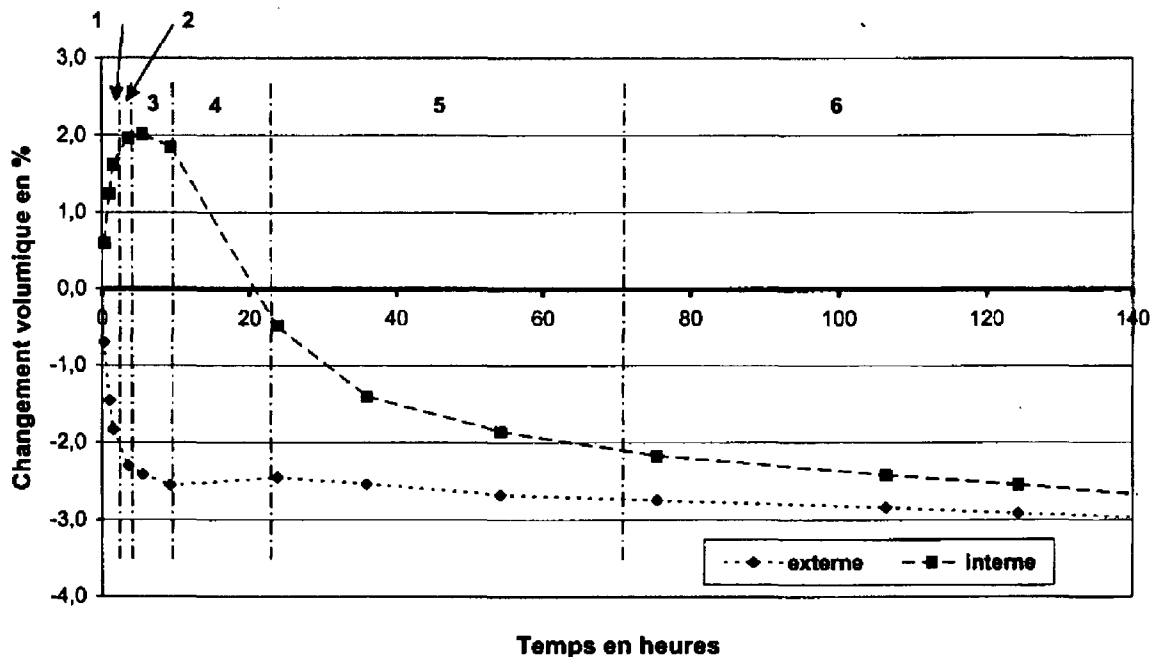


Figure 2. 16 – Évolution des lectures de changement volumique externe et interne [Aouad, 1999]

Étape 1 :

Le niveau d'eau dans la burette, qui correspond au changement volumique externe, diminue rapidement. Cela indique une contraction du volume externe de l'échantillon qui est encore fluide et très déformable. Cette contraction est principalement due à la pénétration d'une petite quantité d'eau de coulis dans la porosité des tiges poreuses (Figure 2.9). Une partie de cette contraction découle du retrait chimique (contraction Le Chatelier).

La lecture qui correspond au changement volumique interne démontre une augmentation du volume. L'eau dans laquelle baigne l'enceinte interne exerce une contrainte de confinement sur le coulis qui est encore très déformable. Cette faible pression hydrostatique contribue à la pénétration d'une petite quantité d'eau dans les tiges poreuses. Cette eau expulse l'air qui s'y trouve, ce qui donne une lecture présentant une augmentation de volume de l'échantillon.

Étape 2 :

La courbe de changement volumique externe baisse toujours, mais ce changement paraît moins accentué. La courbe de changement volumique interne démontre encore une augmentation du volume due à la pénétration d'eau de coulis dans les tiges poreuses. Comme dans le cas de changement volumique externe, cette augmentation semble être moins accentuée.

Étape 3 :

La courbe de changement volumique externe continue à diminuer pour atteindre un palier. La courbe de changement volumique interne change la pente dans cette étape. Le point du changement de pente correspond au moment où l'échantillon commence à aspirer de l'air plutôt que d'en expulser. Ce phénomène est dû au fait que l'échantillon commence à se rigidifier. Il se forme un squelette rigide qui empêche les déformations libres du coulis. La diminution du volume par la contraction Le Chatelier ne se présente plus uniquement comme une diminution du volume externe. Des vides gazeux commencent à se former dans la porosité capillaire. Un déséquilibre entre la pression des gaz dans la porosité capillaire et la pression atmosphérique fait en sorte que l'échantillon commence à aspirer de l'air par les tiges poreuses. Le volume d'air aspiré est mesuré à l'aide du système de mesure par volume de contrôle. L'allure des courbes de conductivité électrique démontre aussi que la rigidification du coulis se produit pendant cette étape.

Étape 4 :

La courbe de changement volumique externe montre un léger gonflement de l'échantillon. Les causes de ce gonflement seront discutées dans le chapitre 7.

La courbe de changement volumique interne démontre une importante diminution de volume, ce qui indique un taux élevé de la contraction Le Chatelier pendant cette étape.

Étape 5 :

La courbe de changement volumique externe recommence à diminuer lentement, ce qui est la conséquence de la dépression capillaire (Paragraphe 1.6.3). La courbe de changement volumique interne continue à diminuer mais plus lentement par rapport à l'étape 4.

Étape 6 :

Les courbes de changement volumique externe et interne continuent à décroître mais de façon plus faible car l'hydratation se poursuit plus lentement.

En résumé, avant la rigidification de la matrice cimentaires (prise), il n'existe que le retrait endogène externe qui est proportionnel à la quantité de ciment qui réagit (retrait chimique). Après la prise, la variation de volume comprend un retrait endogène externe et un retrait endogène interne. Le retrait endogène externe est causé par l'effet simultané du retrait chimique et de la dépression capillaire. Le retrait endogène interne correspond au volume total des vides gazeux formés dans la porosité capillaire. Le retrait endogène total est la somme du retrait endogène externe et du retrait endogène interne, avant et après la prise.

2.4.2. 6 Contraction Le Chatelier (retrait chimique)

Les mesures de la contraction Le Chatelier ont été réalisées afin d'estimer l'influence des ajouts minéraux sur le retrait chimique mais aussi pour faciliter l'interprétation des mesures du retrait endogène réalisées avec la cellule. Les mesures ont été uniquement réalisées sur les coulis de rapport E/L = 0,45 pendant une période de 7 et de 14 jours à une température de 20°C. À la fin des essais, la quantité d'eau liée chimiquement a été déterminée.

Les mesures de la contraction Le Chatelier ont été obtenues à l'aide d'erlenmeyers de 125 ml (6 par essai) surmontés d'une pipette graduée de 10 ml. Les pipettes passent au travers des bouchons en caoutchouc qui servent à fermer les erlenmeyers. Du silicone résistant à l'eau est utilisé pour empêcher la perte d'eau par le bouchon. La figure 2.17 présente un échantillon conçu pour les mesures de retrait chimique. Lors des mesures, les échantillons sont placés dans le bassin rempli d'eau. La température de l'eau est contrôlée à l'aide du bain thermostaté (Figure 2.18). Les premières lectures de volume ont été prises 1 heure et 30 minutes après le contact eau-liant.

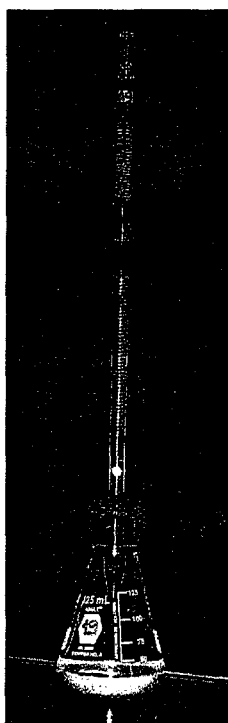


Figure 2. 17 - Échantillon destiné aux mesures du retrait chimique

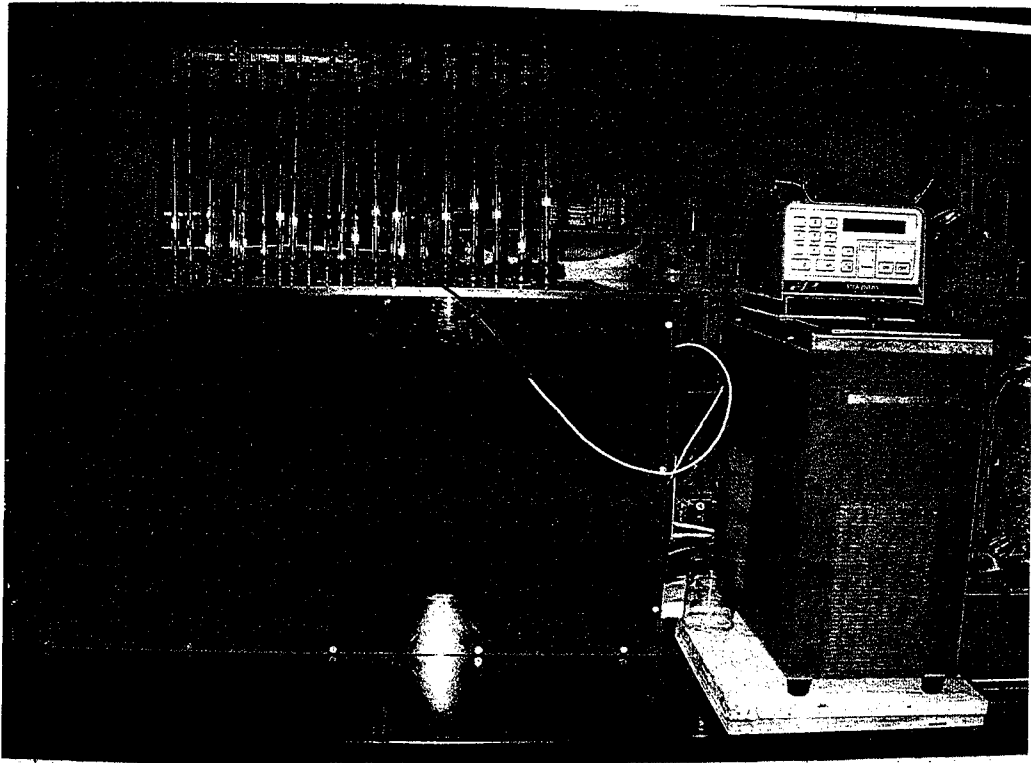


Figure 2. 18 - Essai de retrait chimique

L'épaisseur optimale du coulis dans l'erenmeyer a été déterminée lors d'essais préliminaires. Pour cette étude, nous avons utilisé un coulis avec 8 % de la fumée de silice. L'épaisseur du coulis a été variée de 7 mm à 20 mm. L'étude a démontré qu'il n'y a pas d'effet d'échelle sur le retrait chimique des coulis dont l'épaisseur est égale ou inférieure à 10 mm. Nous avons donc décidé de fabriquer des éprouvettes de 10 mm d'épaisseur.

La variation de volume observée sur la pipette graduée d'un erlenmeyer correspond à la diminution de volume absolue du coulis causée par son hydratation. Lors de la mesure du retrait chimique, on considère que la perte de volume engendrée par l'hydratation du coulis est entièrement remplacée par l'eau contenue dans l'erenmeyer. Les pores du coulis sont pleins d'eau lors d'essai donc, il n'y a pas d'effet de dépression capillaire.

Les équations qui suivent permettent de calculer la contraction Le Chatelier final (retrait chimique) exprimé en pourcentage de volume initial de l'éprouvette, en ml par 100 g de liant et en ml par 100 g de liant hydraté.

Quantité de coulis dans l'erenmeyer

$$M_{\text{coulis}} = M_{\text{erl+coulis}} - M_{\text{erl}} \quad [\text{g}] \quad (2.9)$$

$$V_{\text{coulis } t_0} = \frac{M_{\text{coulis}}}{M V_{\text{coulis}}} \quad [\text{ml}] \quad (2.10)$$

$$M_{\text{liant}} = M_{\text{coulis}} \frac{1}{E/L+1} \quad [\text{g}] \quad (2.11)$$

Diminution de volume du coulis (retrait chimique)

$$\Delta V = V_t - V_{t_0} \quad [\text{ml}] \quad (2.12)$$

$$\text{Retrait chimique}[\%] = \frac{\Delta V}{V_{\text{coulis } t_0}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

$$\text{Retrait chimique}[\text{ml}/100\text{g liant}] = \frac{100 \Delta V}{M_{\text{liant}}} \quad (2.14)$$

$$\text{Retrait chimique}[\text{ml}/100\text{g liant hydraté}] = \frac{100 \Delta V}{M_{\text{liant hydraté}}} \quad (2.15)$$

L'utilisation de l'équation 2.15 nécessite la connaissance du degré d'hydratation du liant à l'instant t.

2.4.2.6. 1 Mode opératoire

La préparation et le démarrage de l'essai de retrait chimique sont effectués selon la procédure suivante :

- Préparer un ensemble pipette-bouchon en passant la pipette graduée au travers du bouchon en caoutchouc.
- Sceller l'interface entre la pipette et le bouchon avec du silicone pour éviter une fuite d'eau, laisser sécher.
- Peser l'erenmeyer et noter sa masse.
- Préparer le coulis en suivant la procédure présentée au début de ce paragraphe.
- Placer un cône de remplissage sur l'erenmeyer, puis verser une petite quantité de coulis afin d'obtenir un échantillon de 10 mm d'épaisseur.
- Enlever le cône et essuyer tout surplus de coulis sur l'erenmeyer.
- Peser l'erenmeyer avec le coulis et noter le poids.
- Introduire délicatement de l'eau distillée désaérée à la surface de l'échantillon à l'aide d'un autre cône de remplissage.
- Installer l'ensemble pipette-bouchon sur l'erenmeyer.
- Assécher le surplus d'eau sur le dispositif, puis sceller l'interface entre le bouchon et l'erenmeyer avec du silicone.
- Ajuster le niveau d'eau dans la pipette graduée, puis ajouter du kérosène coloré afin de limiter l'évaporation de l'eau.
- Mettre l'erenmeyer dans le bassin d'eau dont la température est contrôlée par le bain thermostaté.
- Noter l'heure et prendre la lecture initiale de volume.

2.4.2. 7 Détermination de la quantité d'eau liée chimiquement et du degré d'hydratation

La quantité d'eau liée chimiquement aux hydrates est proportionnelle à l'avancement de l'hydratation des matériaux cimentaires. Elle a été déterminée à partir de la différence de masse d'une éprouvette soumise à un séchage à 105°C et un chauffage à 1000°C. Le séchage à 105°C permet d'évaporer l'eau libre et l'eau adsorbée. Le traitement thermique à 1000°C détruit les hydrates et permet ainsi de libérer l'eau chimiquement liée à ces derniers. La procédure utilisée pour le traitement thermique des éprouvettes est la suivante :

- À la fin des mesures du retrait endogène ou du retrait chimique, démouler l'échantillon, puis le fractionner en petits morceaux d'environ 5 à 20 grammes.
- Plonger des fragments de coulis dans de l'alcool isopropylique pour une période de 24 heures afin d'arrêter l'hydratation du liant.
- Sortir des fragments de l'alcool et les placer dans une étuve à 35°C pour environ 2 heures afin de permettre à l'alcool de s'évaporer.
- Réduire les fragments en poudre passant le tamis de 1,25 mm à l'aide d'un dispositif de laboratoire.
- Peser 9 petits creusets de porcelaine sur une balance analytique et noter leur masse.
- Remplir les creusets avec 6 à 7 grammes de poudre, puis les placer dans une étuve à 105°C pendant 24 heures.
- Après le séchage, placer les échantillons dans le dessiccateur pour les refroidir, puis les peser et noter leur masse.
- Transférer les échantillons dans un four où la température augmente graduellement de 23°C à 1000°C. Une fois la température maximale atteinte, garder les éprouvettes dans le four pendant 1 heure.
- Sortir les éprouvettes du four quand la température baisse à 200°C, puis les conserver dans le dessiccateur afin de les refroidir à la température ambiante. Peser ensuite les éprouvettes et noter leur masse.

Dans le cas des coulis sans ajouts minéraux, la quantité d'eau liée chimiquement a été calculée à l'aide de l'équation 1.11 présentée au paragraphe 1.5. Dans le cas des coulis avec ajouts minéraux, la quantité d'eau liée chimiquement $W_n(t)$ a été calculée en utilisant l'équation 2.16. Cette équation prend en considération les proportions massiques du ciment et des ajouts minéraux ainsi que leur perte au feu à l'état anhydre.

$$W_n(t) = \frac{M_{105} - M_{1000} - PF_{\text{ciment}} \cdot X \cdot M_{105} - PF_{\text{ajout minéral}} \cdot Y \cdot M_{105}}{M_{1000}} \quad [\text{g} / \text{g liant}] \quad (2.16)$$

- M_{105} : Masse de l'échantillon séché;
 M_{1000} : Masse de l'échantillon chauffé;
 PF_{ciment} : Perte au feu du ciment;
 $PF_{\text{ajout minéral}}$: Perte au feu de l'ajout minéral;
 X : Proportion massique du ciment dans le liant;
 Y : Proportion massique de l'ajout minéral dans le liant.

La quantité totale d'eau liée chimiquement $W_n(\infty)$ a été obtenue en utilisant une approche expérimentale développée par Bentz [1995]. Cette méthode a été appliquée aux coulis avec et sans ajouts minéraux ayant un rapport E/L de 3,0. Des bouteilles en plastique rigide de 500 ml ont été remplies avec 200 ml de coulis. Des billes en acier inoxydable ont été ajoutées dans chaque bouteille. Les bouteilles ont ensuite été continuellement maintenues en rotation sur des rouleaux. Après 30 et 60 jours d'hydratation, la quantité d'eau chimiquement liée a été déterminée utilisant les équations 1.11 et 2.16. La quantité d'eau liée ainsi obtenue est considérée comme la quantité d'eau correspondant à 100 % d'hydratation du liant, $W_n(\infty)$. Cette valeur est ensuite utilisée pour calculer le degré d'hydratation des coulis après 7 et 14 jours d'hydratation en utilisant l'équation 1.10.

2.4.2. 8 Porosité au mercure

La porosimétrie au mercure consiste à mesurer la quantité de mercure qui pénètre, par pression, dans un solide sous vide. Le volume cumulé de mercure qui pénètre dans les pores de l'échantillon V_p et la pression appliquée P_{Hg} sont mesurés lors d'essai, ce qui permet d'établir la relation entre ces deux paramètres $V_p = V_p(P_{Hg})$.

D'autre par, en utilisant l'équation 2.11 établie par Washburn [Baroghel-Bouny, 1994], on peut calculer le rayon de pores remplis de mercure r_p en fonction de la pression appliquée P_{Hg} .

$$r_p = - \frac{2 \sigma_{Hg} \cos \theta}{P_{Hg}} \quad (2.11)$$

r_p : Rayon du pore supposé cylindrique;

σ_{Hg} : Tension superficielle du mercure (0,480 N/m);

θ : Angle de contact entre la surface solide et le mercure (140°);

P_{Hg} : Pression de mercure.

À partir de ces deux relations, on obtient la courbe d'intrusion de mercure qui représente le volume cumulé de mercure introduit en fonction du rayon de pores comblés $V_p = V_p(r_p)$. En différentiant cette courbe, on obtient la distribution des volumes poreux en fonction des rayons de pores $\Delta V_p / \Delta \log(r_p)$.

La taille minimale des pores accessibles est limitée par la pression maximale de mercure pouvant être développée par le porosimètre. Notre appareil, de marque Pascal 240 (CE Instrument) peut appliquer une pression maximale de 200 MPa. Les rayons de pores accessibles sont donc compris entre 0,004 et 10 μm .

Les essais de la porosité au mercure ont été effectués sur des fragments de coulis de forme cubique ayant les côtés d'environ 20 mm. Les fragments de coulis ont été prélevés après le démoulage de la cellule du retrait endogène (3 échantillons par mélange). Tout de suite après le

prélèvement, on a immergé les échantillons dans l'alcool isopropylique pour arrêter l'hydratation, puis on les a conservés dans l'étuve à $50 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'au jour de l'essai.

2.4. 3 Caractérisation des mortiers

Tout comme les coulis, les mortiers ont été caractérisés à l'état frais, à l'état durci et pendant le passage d'un état à l'autre (Figure 2.3). Tous les mortiers ont été fabriqués de manière à obtenir une maniabilité constante lors de la mise en place dans la cellule. La maniabilité a été ajustée à l'aide de superplastifiant et vérifiée à l'aide d'une table à choc. La masse volumique des mortiers frais a aussi été mesurée. Comme dans le cas des coulis, les mesures du retrait endogène ont été réalisées en parallèle avec des mesures de la conductivité électrique. Finalement, la résistance à la compression des mortiers a été déterminée.

2.4.3. 1 Fabrication des mortiers

Tous les mortiers de cette étude ont été fabriqués dans un malaxeur de marque Hobart ayant une capacité de 4,7 litres et conforme à la norme ASTM C 305. La procédure de malaxage était la suivante :

- Peser l'eau dans le bol de malaxeur (prendre en considération l'absorption du sable), puis ajouter le superplastifiant si nécessaire. La température de l'eau a été ajustée afin d'obtenir des mortiers dont la température était de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ après le malaxage.
- Ajouter le ciment, et éventuellement des ajouts minéraux, dans le bol, puis commencer le malaxage à une faible vitesse. Malaxer pendant 30 secondes.
- Ajouter graduellement le sable pendant une période de 30 secondes tout en malaxant à une faible vitesse.
- Arrêter le malaxeur, régler le malaxage à vitesse moyenne, puis malaxer pendant 30 secondes.

- Arrêter le malaxeur et laisser le mortier au repos pendant 1 minute et 30 secondes. Pendant les premières 15 secondes, racler les côtés du bol avec une spatule, puis couvrir le bol avec un linge humide.
- Recommencer le malaxage du mortier pour une période de 1 minute à une moyenne vitesse.
- Arrêter le malaxeur.

2.4.3. 2 Maniabilité des mortiers

La maniabilité des mortiers a été déterminée conformément à la norme ASTM C 1437. L'essai débute avec un essai d'affaissement sur le mortier en utilisant un mini cône normalisé. Le mortier est installé sur un plateau lors d'essai. Suite à l'essai d'affaissement, on laisse tomber le plateau 25 fois en 15 secondes d'une hauteur de 12,5 mm. L'étalement ainsi obtenu représente une mesure de la maniabilité du mortier. L'essai permet de suivre la perte d'étalement dans le temps. Dans le cadre de cette étude, la maniabilité des mortiers a été mesurée avant et après la mise en place de l'échantillon dans la cellule interne.

2.4.3. 3 Masse volumique des mortiers

La masse volumique des mortiers a été mesurée suivant la procédure de la norme ASTM C 185. Cet essai consiste à déterminer la masse d'un échantillon de mortier frais placé dans un contenant cylindrique dont le volume est connu. Les dimensions de ce contenant sont définies par la norme et son volume est de 400 ± 1 ml. Le mortier est placé en trois couches et chaque couche est pilonnée. La surface supérieure de mortier est ensuite arasée, puis l'ensemble est pesé. On calcule finalement la masse volumique du mortier en divisant sa masse par son volume. Cet essai a été réalisé immédiatement après l'essai d'étalement. La masse volumique a été également utilisée pour calculer la teneur en air des mortiers. Ce calcul a été basé sur la formulation de chaque mélange.

2.4.3. 4 Conductivité électrique

La conductivité électrique a été mesurée sur des échantillons de mortier soumis aux essais de retrait endogène. Les mesures ont été réalisées en utilisant la même procédure et le même équipement que ceux utilisés pour les coulis (Paragraphe 2.4.2).

2.4.3. 5 Mesure du retrait endogène

Les mesures du retrait endogène des mortiers ont été réalisées en utilisant une procédure similaire à celle utilisée dans le cas des coulis (Paragraphe 2.4.2). Les changements sont les suivants :

- Une attention particulière a été accordée à la mise en place des mortiers dans l'enceinte interne de la cellule. Les mortiers ont été placés en plusieurs couches (3 à 6) et chaque couche a été légèrement vibrée sur la table vibrante pendant 15 à 30 secondes pour éliminer les bulles d'air entrappées.
- Les mesures du retrait endogène ainsi que les mesures de la conductivité électrique et de la température ont débuté 5 à 10 minutes plus tard que celles des coulis. Ce retard est causé par une prolongation de la mise en place du mortier dans l'enceinte interne.

Les essais du retrait endogène des mortiers ont été réalisés à 20°C et pour une période de 7 jours. Chaque essai est répété à trois reprises afin d'améliorer la précision des mesures. À la fin des mesures du retrait endogène, la quantité d'eau chimiquement liée et le degré d'hydratation des mortiers ont été déterminés.

2.4.3. 6 L'eau liée chimiquement et le degré d'hydratation

La quantité d'eau liée chimiquement a été déterminée en suivant la même procédure expérimentale que celle utilisée pour les coulis. Le calcul de la quantité d'eau liée a été obtenu à l'aide de l'équation 1.12 qui prend en considération la présence du sable dans le mélange. Le degré d'hydratation a été calculé à l'aide de l'équation 1.10.

2.4.3. 7 Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers a été déterminée conformément à la norme ASTM C 109 sur des cubes de 50 mm de côté. La résistance a été mesurée après 1, 7 et 28 jours de mûrissement dans la chambre à 100 % d'humidité relative. Chaque résultat de la résistance à la compression correspond à la moyenne de trois mesures.

3 MATERIAUX ET MÉLANGES

3.1 Introduction

La première partie de ce chapitre présente les résultats de la caractérisation des matériaux utilisés lors de la réalisation du programme expérimental. Les liants utilisés étaient un ciment de Type 10, de la fumée de silice, un laitier et une cendre volante. Dans ce chapitre nous présentons, entre autre, la composition chimique, la granulométrie et les spectres de diffraction aux rayons X de ces liants.

La deuxième partie de ce chapitre présente la composition des mélanges de coulis et de mortiers. Des codes permettant l'identification des mélanges sont également présentées.

3.2 Caractérisation des matériaux

3.2.1 Ciment

Un ciment d'usage général (Type 10) a été utilisé. La composition chimique est présentée au tableau 3.1. Le tableau 3.2 présente la composition phasique (composition potentielle de Bogue). Sa finesse Blaine est de 410 m²/kg et sa densité est de 3,14.

Le spectre de diffraction aux rayons X du ciment après le traitement à l'acide salicylique est présenté à la figure 3.1. Ce spectre met en évidence la présence de C₄AF, de C₃A, de gypse et d'hémihydrate ainsi que des traces d'anhydrite, de calcite et de quartz.

La figure 3.2 présente la distribution granulométrique du ciment, du laitier et de la cendre volante. Selon les courbes granulométriques, le ciment de Type 10 est plus grossier que la cendre volante dans la zone des particules situées entre 2 µm et 25 µm environ. Le laitier est largement plus fin que deux autres poudres quelque soit le diamètre des grains.

Tableau 3. 1 - Composition chimique du ciment

Oxydes	Teneur massique (%)
SiO ₂	20,0
Al ₂ O ₃	4,4
Fe ₂ O ₃	3,4
CaO	62,2
MgO	2,0
SO ₃	3,3
K ₂ O	0,9
Na ₂ O	0,2
TiO ₂	0,2
P ₂ O ₅	0,1
SrO	0,1
Na ₂ O équivalent	0,8
Perte au feu	3,0

Tableau 3. 2 - Composition de Bogue du ciment

Phases minérales	Teneur massique (%)
C ₃ S	57
C ₂ S	15
C ₃ A	6
C ₄ AF	10

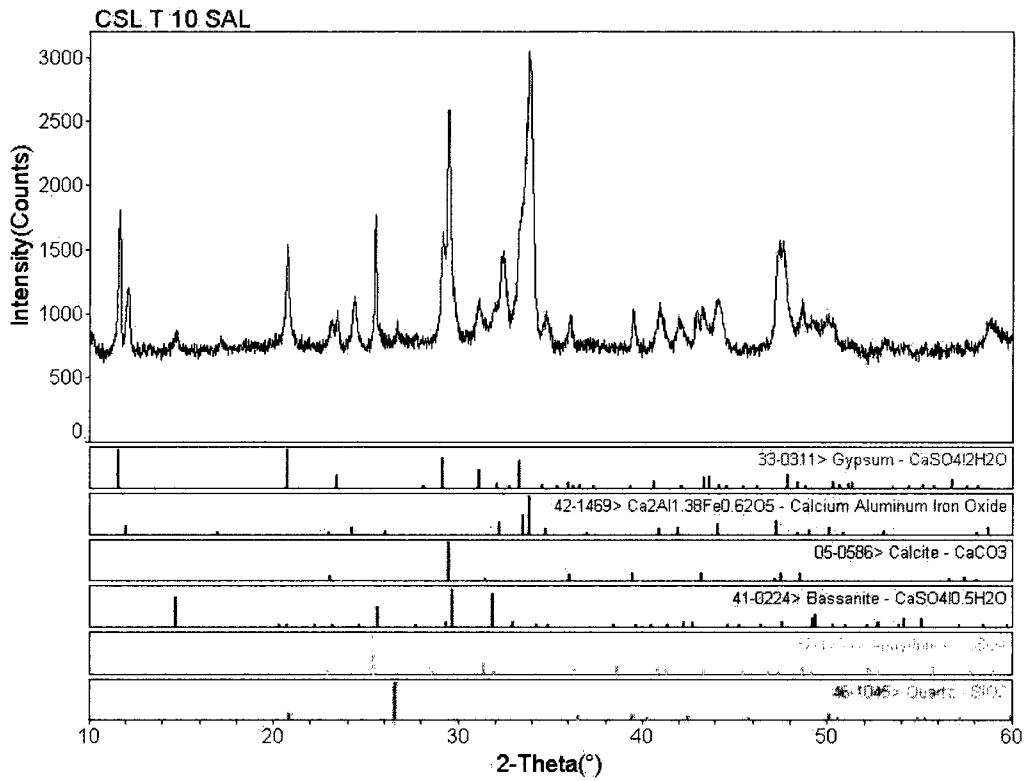


Figure 3. 1 – Spectre de diffraction aux rayons X du ciment de Type 10 après le traitement à l’acide salicylique, tube de cuivre

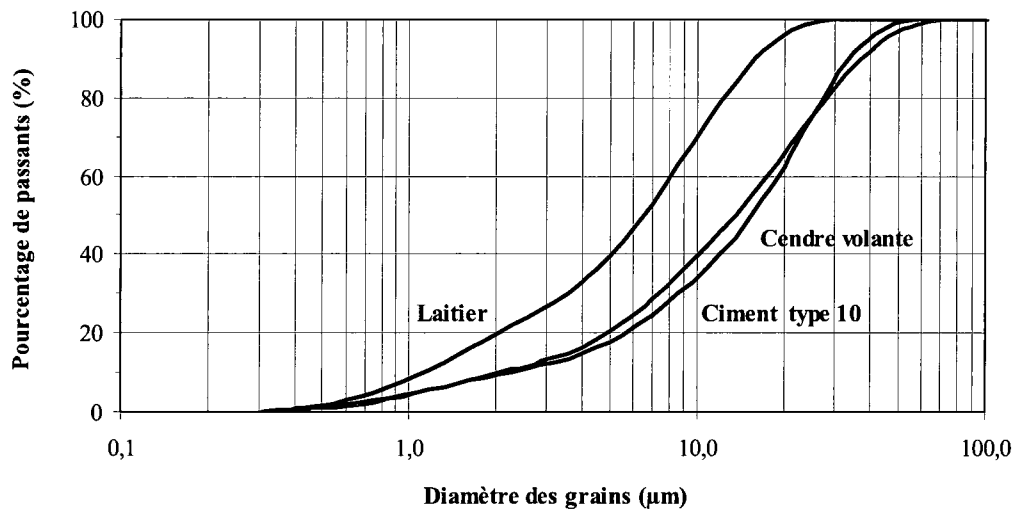


Figure 3. 2 - Courbes granulométriques du ciment, du laitier et de la cendre volante

3.2. 2 Fumée de silice

La fumée de silice a été fournie par la compagnie SKW Canada inc. située à Bécancour. La composition chimique de la fumée de silice est présentée au tableau 3.3. Sa densité est de 2,22 et sa surface spécifique, déterminée par la méthode d'adsorption d'azote, est de 20 000 m²/kg [Kosmatka et coll., 2008].

Le spectre de diffraction aux rayons X de la fumée de silice est présenté à la figure 3.3. Ce spectre démontre que la fumée de silice est très bien vitrifiée. Elle présente un très fort halo de diffraction centré sur la raie principale de la cristobalite. Il y a aussi des traces de quartz, de moissanite et de carbone.

Tableau 3. 3 - Composition chimique de la fumée de silice

Oxydes	Teneur massique (%)
SiO ₂	95,4
Al ₂ O ₃	0,2
Fe ₂ O ₃	0,1
CaO	0,3
MgO	0,3
K ₂ O	0,7
Na ₂ O	0,1
C	2,3
S	0,1
Perte au feu	2,1

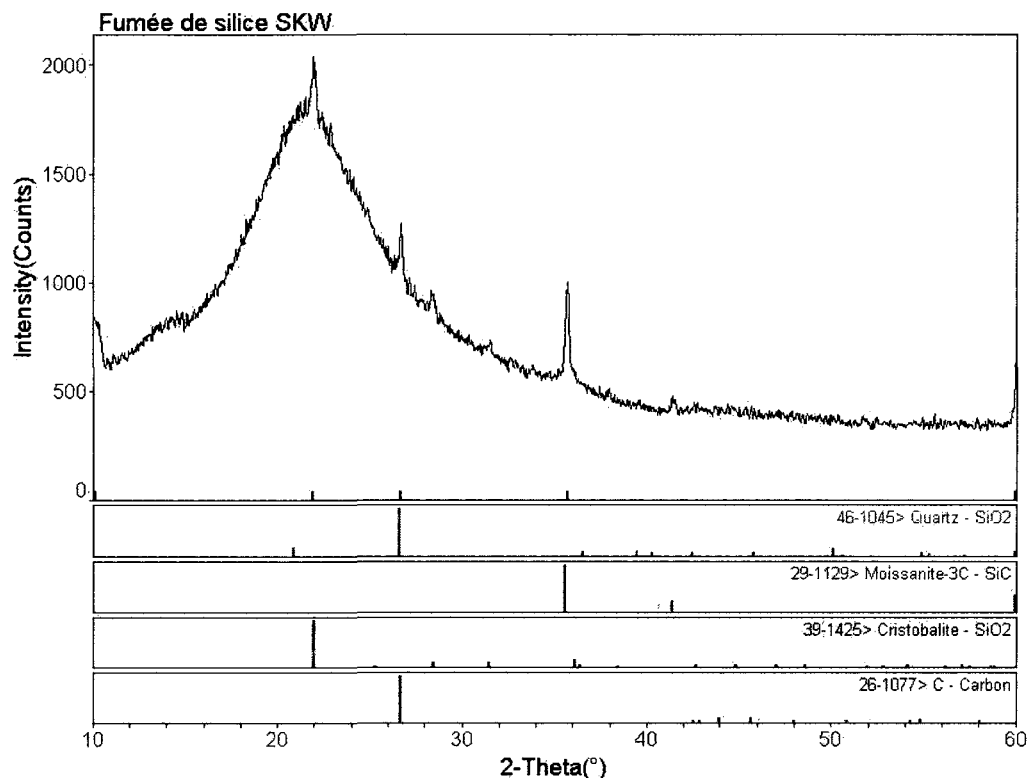


Figure 3. 3 - Spectre de diffraction aux rayons X de la fumée de silice, tube de cuivre

3.2. 3 Laitier

Le laitier broyé a été fourni par la compagnie Lafarge. Sa composition chimique est présentée au tableau 3.4. La finesse Blaine est de 610 m²/kg et la densité est de 3,00.

La figure 3.4 présente le spectre de diffraction aux rayons X du laitier. Ce spectre démontre que le laitier est bien vitrifié. Il présente un halo de diffraction centré sur la raie principale de l'akermanite. Il y a aussi des cristallites d'akermanite et de merwinite.

Tableau 3. 4 - Composition chimique du laitier

Oxydes	Teneur massique (%)
SiO ₂	34,5
Al ₂ O ₃	10,8
Fe ₂ O ₃	0,6
CaO	39,7
MgO	8,7
SO ₃	0,1
K ₂ O	0,5
Na ₂ O	0,4
TiO ₂	0,6
SrO	0,1
Mn ₂ O ₃	0,9
Perte au feu	3,1

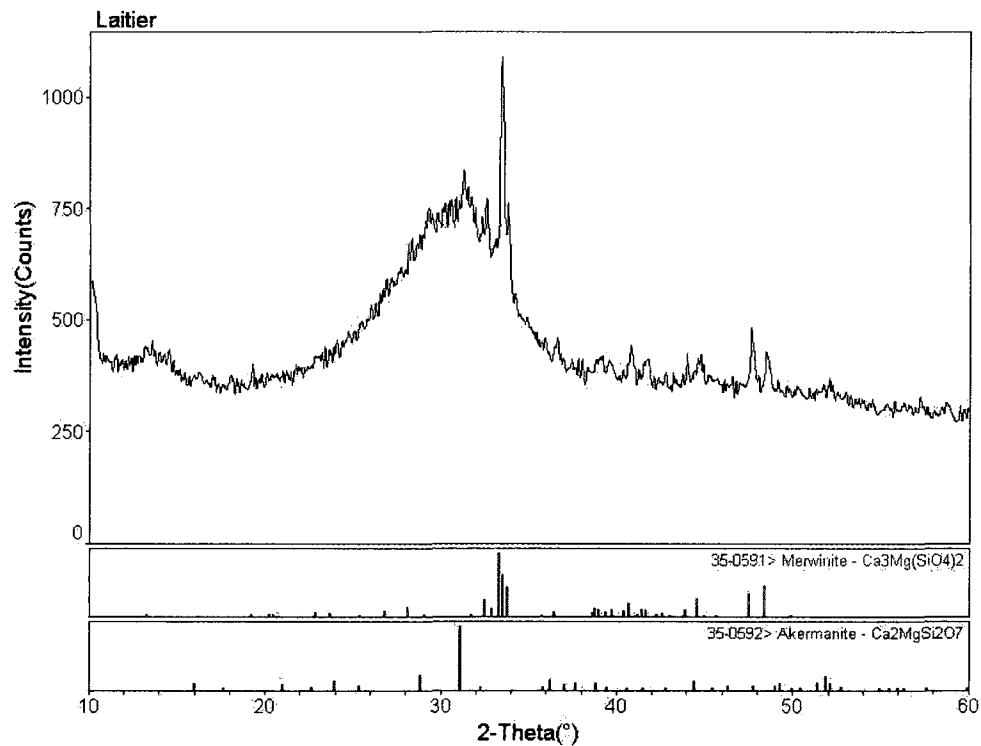


Figure 3. 4 - Spectre de diffraction aux rayons X du laitier, tube de cuivre

3.2. 4 Cendre volante

La cendre volante utilisée a été fournie par Ciment St-Laurent. Il s'agit d'une cendre volante de classe F caractérisée par une faible teneur en CaO. Sa composition chimique est présentée au tableau 3.5. Sa finesse Blaine est de 450 m²/kg et sa densité est de 2,45.

Le spectre de diffraction aux rayons X de la cendre volante de classe F est présenté à la figure 3.5. On constate que la cendre volante est partiellement cristallisée. Le spectre démontre la présence des cristallites de mullite, de quartz, d'hématite et de magnétite.

Tableau 3. 5 - Composition chimique de la cendre volante de classe F

Oxydes	Teneur massique (%)
SiO ₂	49,6
Al ₂ O ₃	23,8
Fe ₂ O ₃	17,0
CaO	3,0
MgO	1,3
SO ₃	0,1
K ₂ O	2,8
Na ₂ O	0,6
TiO ₂	0,6
P ₂ O ₅	0,2
Mn ₂ O ₃	0,1
Perte au feu	0,9

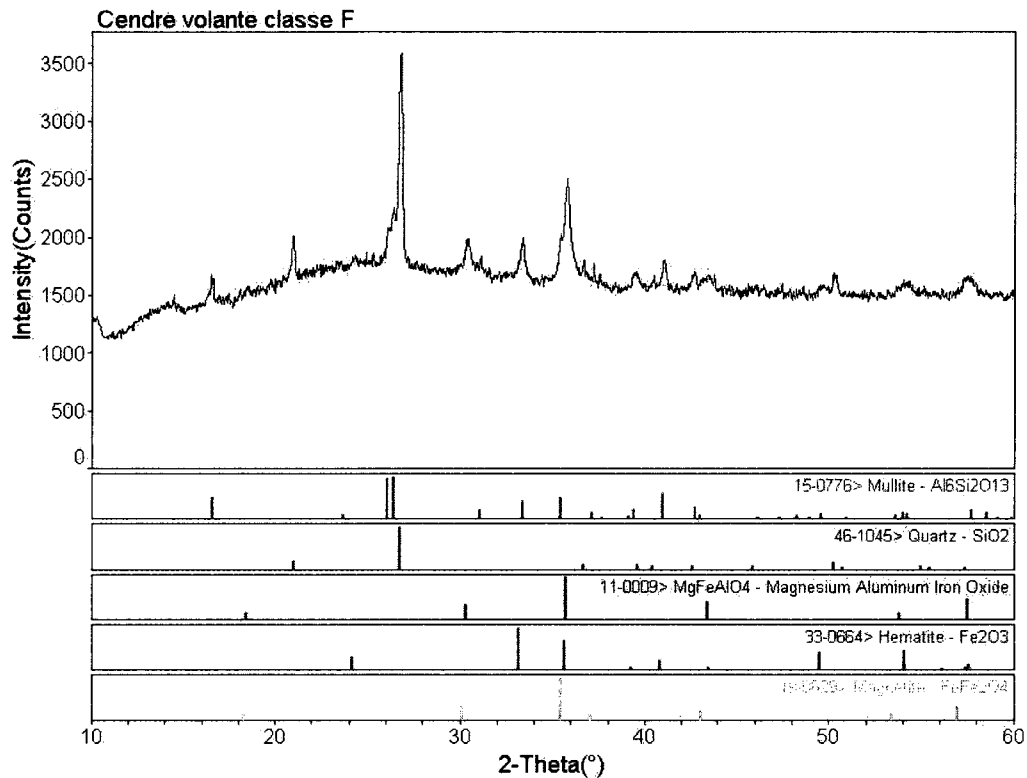


Figure 3. 5 – Spectre de diffraction aux rayons X de la cendre volante de classe F, tube de cuivre

3.2. 5 Sable

Pour la fabrication des mortiers, nous avons utilisé un sable à granulométrie contrôlée conforme à la norme ASTM C 778. Il s'agit d'un sable siliceux provenant d'Ottawa, Illinois. Son absorption est de 0,15 % et sa densité à l'état saturé superficiellement sec est de 2,65. La courbe granulométrique du sable est présentée à la figure 3.6.

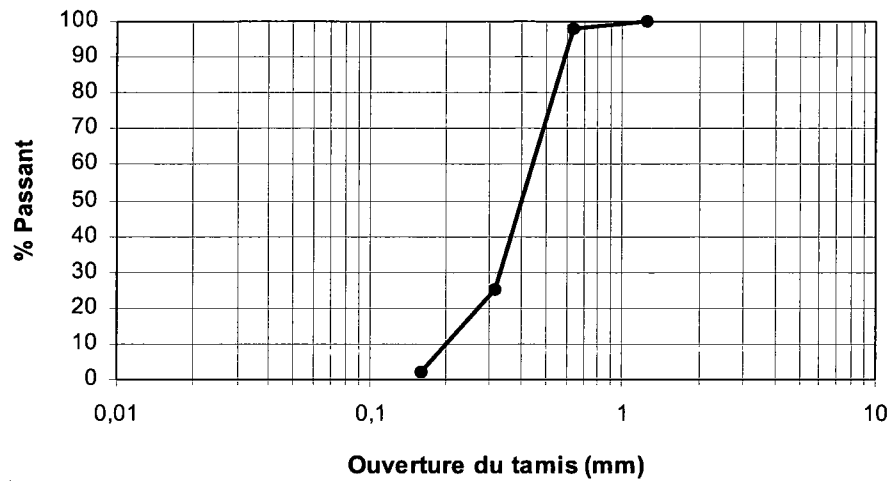


Figure 3. 6 - Granulométrie du sable normalisé

3.2. 6 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé a été du Disal, produit par la compagnie Handy Chemicals. C'est un polynaphtalène sulfonate. Ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées au tableau 3.6.

Tableau 3. 6 - Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant

Classification chimique	Sel de sodium d'acide naphtalène sulfonique polymérisé
Teneur en solide	41 %
Sulfates	1,2 %
pH de la solution à 41 %	8,0
Densité à 25°C	1,21 g/ml
Chlorures	< 500 ppm
Nature ionique	anionique
Solubilité dans l'eau	Totale dans l'eau dure ou douce
Apparence	Liquide brun

3.2. 7 Eau

Tous les coulis et les mortiers ont été fabriqués avec de l'eau provenant du système de distribution d'eau potable de la ville de Sherbrooke.

3.3 Mélanges

3.3. 1 Coulis

Pour faciliter l'analyse des résultats, nous avons inclus dans l'identification des coulis certaines caractéristiques de leur formulation et la température à laquelle l'essai a été effectué. Un exemple d'interprétation des noms des coulis est présenté à la figure 3.7. Les deux premiers chiffres indiquent d'abord la température à laquelle l'essai est réalisé. Les trois chiffres suivants indiquent la valeur du rapport eau/liant. La lettre majuscule qui suit démontre qu'il s'agit d'un coulis. La lettre suivante et le chiffre qui la suit indiquent la présence du ciment de Type 10 et son pourcentage massique dans le liant. La dernière lettre et le chiffre qui la suit indiquent la présence d'un ajout minéral et son pourcentage massique dans le liant.

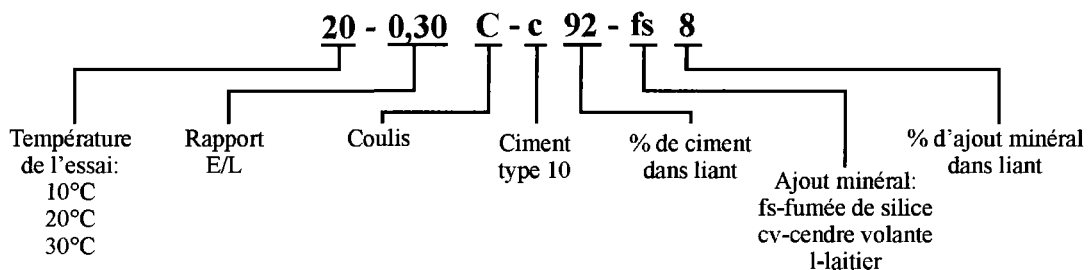


Figure 3. 7 - Clé pour identifier les coulis

Tous les coulis ont été fabriqués dans un mélangeur électrique ayant une capacité de 1,2 litres. La procédure de malaxage est présentée dans le paragraphe 2.4.2. Les tableaux 3.7 à 3.10 présentent la composition des coulis. Toutes les compositions produisent un litre de coulis. Le dosage en superplastifiant a été ajusté pour obtenir une maniabilité constante pour tous les coulis.

Tableau 3. 7 - Composition des coulis sans ajouts minéraux

Coulis	Rapport E/L	Ciment (%)	Ciment (g)	Eau (g)	SP (g)	SP (%)
0,30C-c100	0,30	100	1604,9	463,0	31,3	0,8
0,35C-c100	0,35	100	1488,3	508,0	21,8	0,6
0,40C-c100	0,40	100	1386,8	545,8	15,2	0,4
0,45C-c100	0,45	100	1299,3	580,9	6,3	0,2

Tableau 3. 8 - Composition des coulis avec fumée de silice

Coulis	Rapport E/L	Ciment (%)	Fumée de silice (%)	Ciment (g)	Fumée de silice (g)	Eau (g)	SP (g)	SP (%)
0,30C-c92-fs8	0,30	92	8	1449,3	126,0	449,9	38,4	1,0
0,35C-c92-fs8	0,35	92	8	1344,6	116,9	492,6	32,1	0,9
0,45C-c92-fs8	0,45	92	8	1176,6	102,3	566,3	15,6	0,5

Tableau 3. 9 - Composition des coulis avec laitier

Coulis	Rapport E/L	Ciment (%)	Laitier (%)	Ciment (g)	Laitier (g)	Eau (g)	SP (g)	SP (%)
0,30C-c75-125	0,30	75	25	1196,6	398,9	460,3	31,1	0,8
0,35C-c75-125	0,35	75	25	1110,1	370,0	505,2	21,7	0,6
0,45C-c75-125	0,45	75	25	970,5	323,5	580,5	3,2	0,1
0,30C-c50-150	0,30	50	50	793,7	793,7	460,3	27,1	0,7
0,35C-c50-150	0,35	50	50	736,0	736,0	502,5	21,5	0,6
0,45C-c50-150	0,45	50	50	643,5	643,5	575,4	6,3	0,2

Tableau 3. 10 - Composition des coulis avec cendre volante

Coulis	Rapport E/L	Ciment (%)	Cendre volante (%)	Ciment (g)	Cendre volante (g)	Eau (g)	SP (g)	SP (%)
0,30C-c85-cv15	0,30	85	15	1335,4	235,7	453,2	30,7	0,8
0,35C-c85-cv15	0,35	85	15	1240,2	218,9	498,1	21,4	0,6
0,45C-c85-cv15	0,45	85	15	1087,1	191,8	575,5	0,0	0,0
0,30C-c70-cv30	0,30	70	30	1077,9	462,0	446,4	26,3	0,7
0,35C-c70-cv30	0,35	70	30	1001,7	429,3	488,5	20,9	0,6
0,45C-c70-cv30	0,45	70	30	880,1	377,2	565,8	0,0	0,0

3.3. 2 Mortiers

Comme pour les coulis, l'identification des mortiers contient des informations sur leur formulation et la température d'essais. Un exemple d'interprétation des noms des mortiers est présenté à la figure 3.8. Les deux premiers chiffres indiquent la température à laquelle l'essai est réalisé. Les trois chiffres suivants indiquent la valeur du rapport eau/ciment. La lettre majuscule qui suit démontre qu'il s'agit d'un mortier. La lettre suivante et le chiffre qui la suit indiquent la présence du ciment de Type 10 et son pourcentage massique dans le liant. Les deux dernières lettres indiquent le rapport volumique pâte/sable du mortier. Les deux derniers chiffres indiquent la valeur de ce rapport.

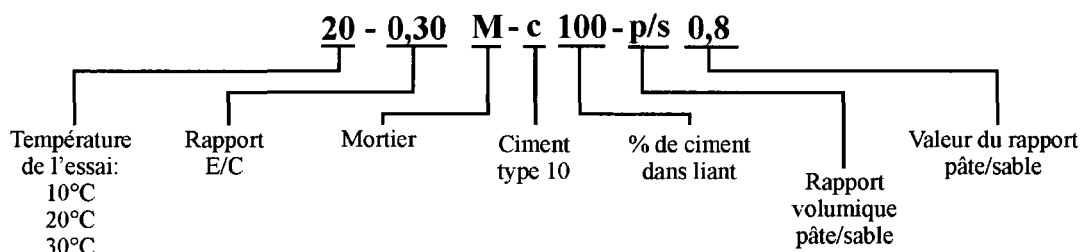


Figure 3. 8 - Clé pour identifier les mortiers

Tous les mortiers ont été fabriqués dans un malaxeur de marque Hobart ayant une capacité de 4,73 litres. La procédure de malaxage des mortiers a été présentée dans le paragraphe 2.4.3. La composition des mélanges de mortiers est présentée aux tableaux 3.11 et 3.12. Ces compositions produisent un volume de coulis de 1 litre au quel on ajoute un volume de sable permettant d'obtenir un rapport volumique pâte/sable de 0,8 ou de 1,6.

Pour les mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 1,6, nous avons utilisé les mêmes dosages de superplastifiant que ceux utilisés dans les coulis ayant le même rapport E/C et le même liant. Pour les mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 0,8, nous avons augmenté le dosage en superplastifiant afin d'assurer une bonne mise en place du mortier dans l'enceinte interne de la cellule du retrait endogène.

Tableau 3. 11 - Composition des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 1,6

Mortier	Rapport E/L	Ciment (%)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	SP (g)	SP (%)
0,30M-c100-p/s1,6	0,30	100	1604,9	1656,3	463,0	31,3	0,8
0,35M-c100-p/s1,6	0,35	100	1488,3	1656,3	508,0	21,8	0,6
0,40M-c100-p/s1,6	0,40	100	1386,8	1656,3	545,8	15,2	0,4
0,45M-c100-p/s1,6	0,45	100	1299,3	1656,3	580,9	6,3	0,2

Tableau 3. 12 - Composition des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 0,8

Mortier	Rapport E/L	Ciment (%)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	SP (g)	SP (%)
0,30M-c100-p/s0,8	0,30	100	1604,9	3312,5	458,3	39,1	1,0
0,35M-c100-p/s0,8	0,35	100	1488,3	3312,5	505,9	25,4	0,7
0,40M-c100-p/s0,8	0,40	100	1386,8	3312,5	542,7	20,3	0,6
0,45M-c100-p/s0,8	0,45	100	1299,3	3312,5	577,2	12,7	0,4

4 CARACTÉRISATION DES COULIS ET DES MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS

4.1 Introduction

La première partie de ce chapitre présente les caractéristiques des coulis à l'état frais telles que la maniabilité, le point de saturation et la conductivité électrique. La deuxième partie de chapitre présente les caractéristiques des mortiers à l'état frais soient la maniabilité, la masse volumique, la teneur en air et la conductivité électrique.

4.2 Caractérisation des coulis à l'état frais

4.2.1 Maniabilité des coulis

Des essais d'étalement ont été effectués pour produire des coulis ayant une maniabilité constante lors de la mise en place dans l'enceinte interne de la cellule. Ces essais ont été réalisés par la méthode du mini cône présentée au paragraphe 2.4.2. L'étalement des coulis a été déterminé après 10 et 30 minutes suivant le contact eau-liant. Cet intervalle de temps a été choisi parce que c'est durant cette période que s'effectue, en moyenne, la mise en place des coulis dans la cellule. La température des coulis après le premier essai d'étalement (10 minutes) est comprise entre 19°C et 22°C. Après le deuxième essai d'étalement (30 minutes), elle est comprise entre 21°C et 25°C. Les figures 4.1 à 4.4 présentent l'étalement des coulis avec et sans ajouts minéraux.

Pour les besoins de cette étude, nous avons choisi des limites minimale et maximale d'étalement jugées acceptables pour une bonne mise en place des coulis. Après 10 minutes, l'étalement devait être compris entre 90 mm et 120 mm. Après 30 minutes, la plage permise était de 70 mm à 110 mm. Les dosages de superplastifiant ont été choisis afin de respecter ces limites d'étalement. De plus, les dosages de superplastifiant ne devaient pas dépasser le point de saturation.

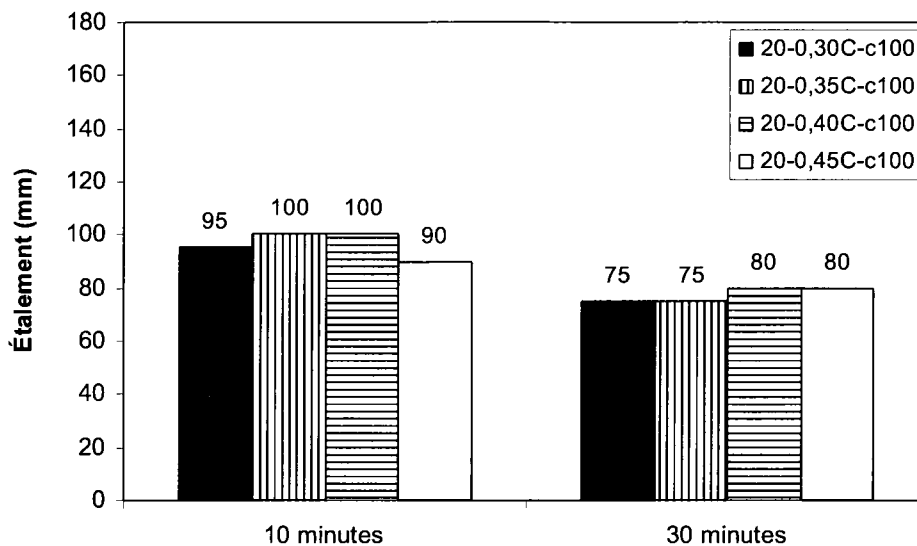


Figure 4.1 - Étalement des coulis sans ajouts minéraux

La figure 4.1 démontre qu'à 10 minutes l'étalement des coulis sans ajouts minéraux est compris entre 90 mm et 100 mm. L'étalement mesuré après 30 minutes est plus faible (75 mm à 80 mm) parce que le ciment et l'eau ont commencé à réagir, la dissolution initiale du ciment et l'augmentation de la température font alors diminuer la maniabilité des coulis. La diminution de l'étalement est de 13 % à 33 %.

L'étalement des coulis avec 8 % de fumée de silice est compris entre 110 mm et 120 mm après 10 minutes. Après 30 minutes, on a mesuré des étalements de 90 mm à 110 mm (Figure 4.2). On a observé donc, une diminution d'étalement de 5 % à 28 %.

L'étalement des coulis avec 25 % et 50 % de laitier (Figure 4.3) est aussi plus élevé à 10 minutes (90 mm à 115 mm) par rapport à celui mesuré à 30 minutes (80 mm à 105 mm) qui est donc plus faible pour 6 % à 25 %.

Finalement, la figure 4.4 montre que les coulis avec 15 % et 30 % de cendre volante possède un étalement de 90 mm à 120 mm après 10 minutes et de 90 mm à 115 mm après 30 minutes. La diminution d'étalement est de 0 % à 22 %.

Le raidissement des coulis avec ajouts minéraux observé après 30 minutes est du à l'hydratation du liant et à l'augmentation de la température du mélange.

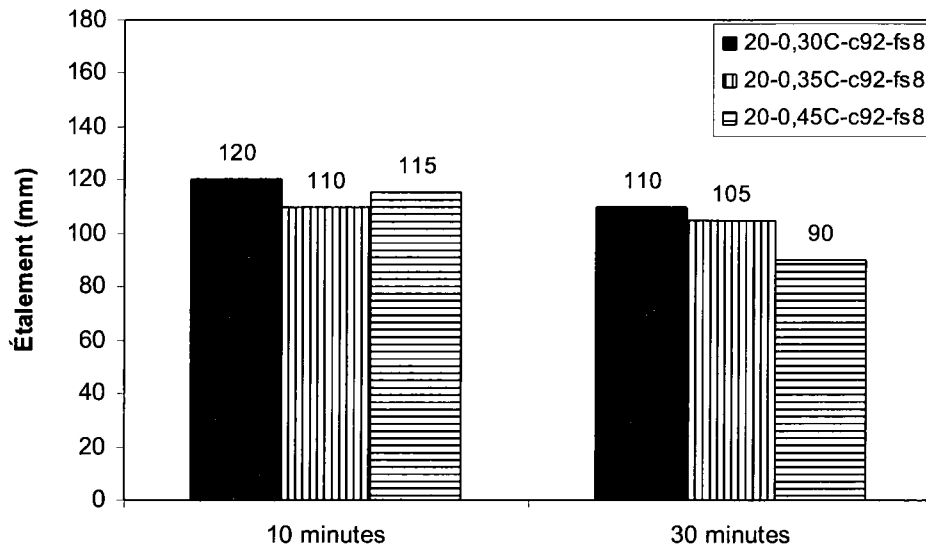


Figure 4. 2 - Étalement des coulis avec fumée de silice

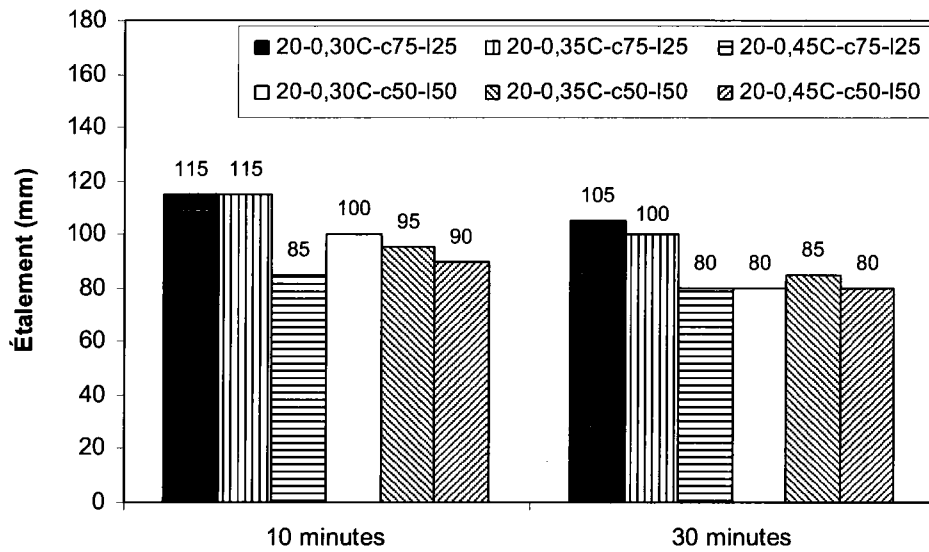


Figure 4. 3 - Étalement des coulis avec laitier

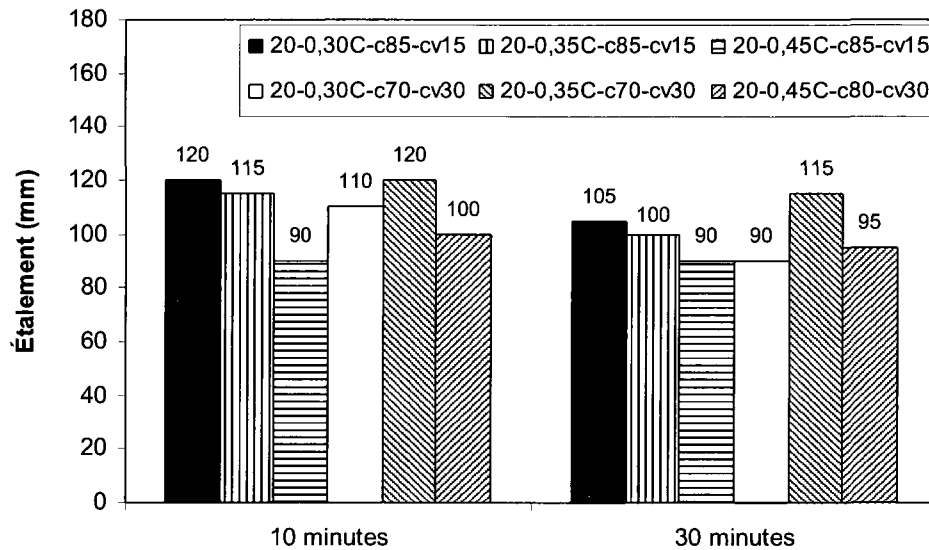


Figure 4. 4 - Étalement des coulis avec cendre volante

4.2. 2 Point de saturation des coulis

Dans le cadre de cette étude, nous avons déterminé les points de saturation de tous les coulis sans ajouts minéraux (coulis de référence). Dans le cas des coulis avec ajouts minéraux, seuls les rapports E/L de 0,35 et de 0,30 ont été utilisés pour déterminer le point de saturation. Les points de saturation ont été déterminés en mesurant le temps d'écoulement au travers du cône Marsh, 5 et 60 minutes après le contact eau-liant. Cet essai est présenté au paragraphe 2.4.2. Le temps d'écoulement de 700 ml de coulis a été utilisé comme temps de comparaison. La température des coulis a varié de 20°C à 24°C lors des essais. La figure 4.5 présente les temps d'écoulement des coulis sans ajout minéraux fabriqués avec un rapport E/C de 0,40 et de 0,45. Les temps d'écoulement pour les rapports E/C de 0,30 et de 0,35 sont présentés à la figure 4.6. Les dosages de superplastifiant (polynaphtalène sulfonate) sont exprimés sous forme de pourcentage de solides contenus dans le superplastifiant par rapport à la masse de liant.

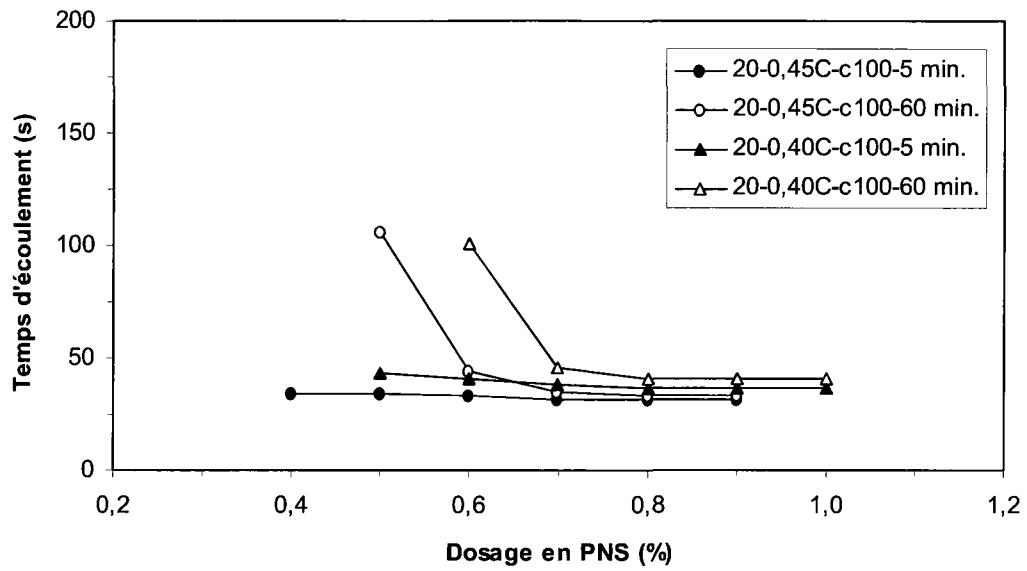


Figure 4. 5 - Temps d'écoulement des coulis sans ajouts minéraux, E/C = 0,40 et 0,45

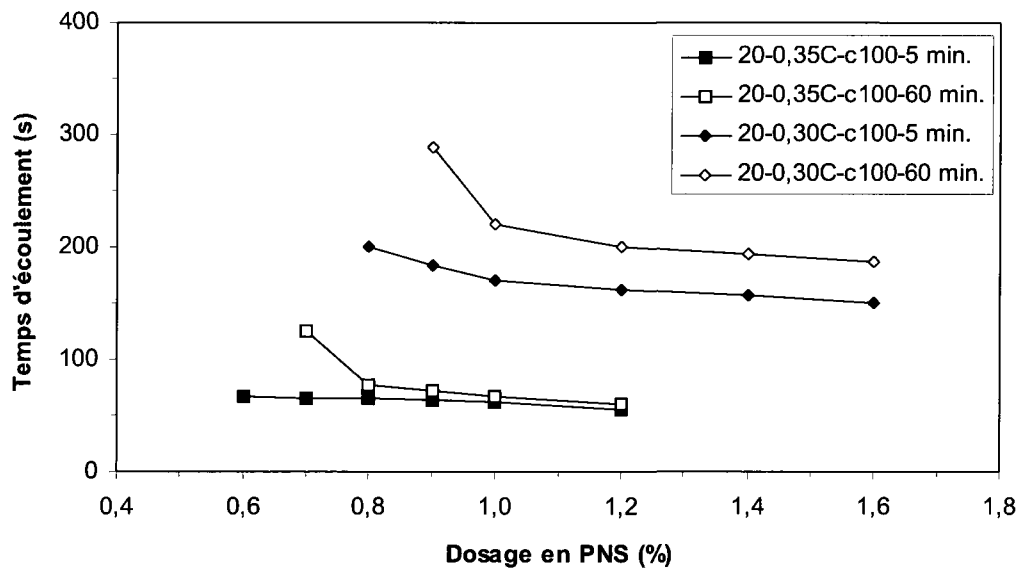


Figure 4. 6 - Temps d'écoulement des coulis sans ajouts minéraux, E/C = 0,30 et 0,35

Les figures 4.5 et 4.6 montrent que les temps d'écoulement à 5 et à 60 minutes augmentent avec la diminution du rapport E/C. Les points de saturation des coulis augmentent aussi avec la diminution du rapport E/C. Les points de saturation sont les suivants : 0,6 % pour E/C = 0,45, 0,7 % pour E/C = 0,40, 0,8 % pour E/C = 0,35 et 1,0 % pour E/C = 0,30.

Les temps d'écoulement des coulis avec 8 % de fumée de silice sont présentés à la figure 4.7. On constate que la fumée de silice augmente le point de saturation sans nécessairement augmenter le temps d'écoulement. En comparant avec les coulis de référence, les points de saturation augmentent à 1,0 % pour E/L = 0,35 et à 1,3 % pour E/L = 0,30. L'augmentation des points de saturation est principalement due à la finesse très élevée de la fumée de silice.

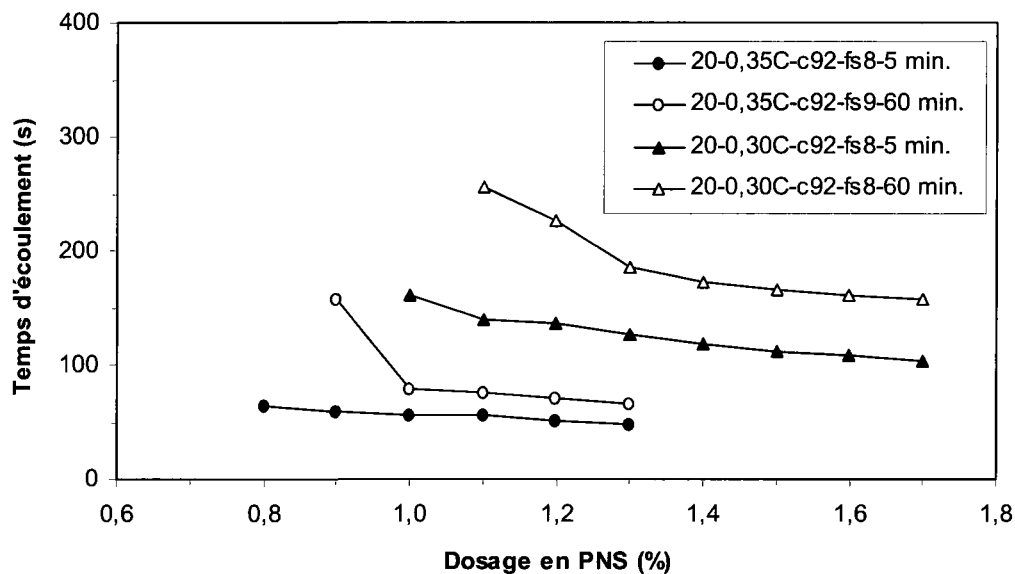


Figure 4. 7 - Temps d'écoulement des coulis avec fumée de silice, E/L = 0,30 et 0,35

Les figures 4.8 et 4.9 présentent les temps d'écoulement des coulis fabriqués avec 25 % et avec 50 % de laitier. Ces figures démontrent que plus le pourcentage de substitution du ciment par le laitier augmente, plus le temps d'écoulement augmente quel que soit l'échéance de mesure ou le rapport E/L. Le taux de substitution de 25 % permet de diminuer le point de saturation par rapport à celui de la référence. Les points de saturation descendent à 0,7 % pour E/L = 0,35 et à 0,9 % pour E/L = 0,30.

En augmentant le taux de substitution à 50 % on obtient les mêmes points de saturation que ceux de la référence : 0,8 % pour $E/L = 0,35$ et 1,0 % pour $E/L = 0,30$. La raison principale d'un tel comportement est probablement la finesse élevée du laitier par rapport à celle du ciment. La finesse Blaine du laitier est de $610 \text{ m}^2/\text{kg}$, ce qui est pratiquement 1,5 fois plus élevé que la finesse du ciment. La substitution de 50 % de ciment par un laitier si fin a donc fait augmenter le point de saturation par rapport à celui obtenu avec 25 % de laitier.

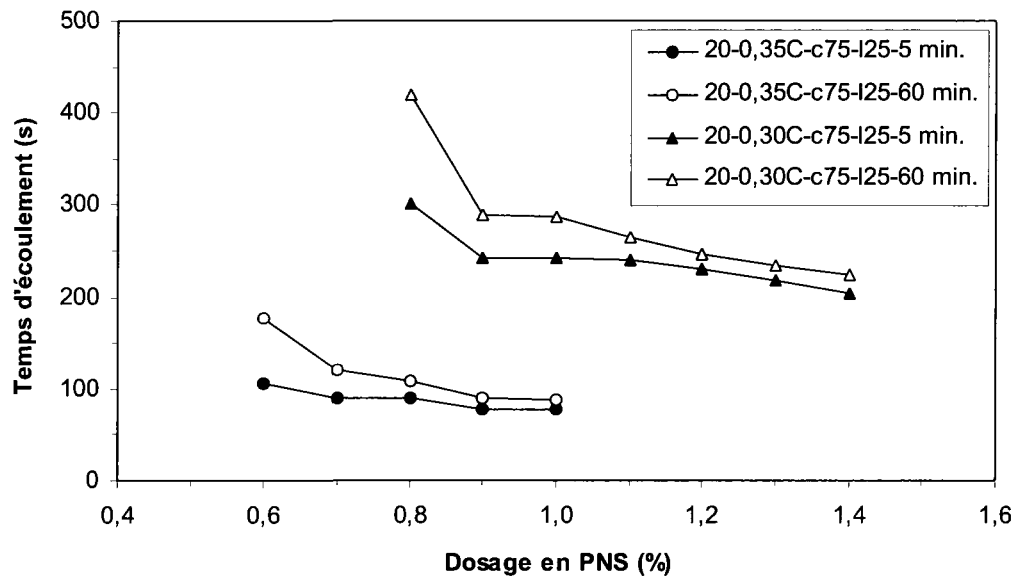


Figure 4. 8 - Temps d'écoulement des coulis avec 25 % de laitier, $E/L = 0,30$ et $0,35$

L'influence de la cendre volante sur le point de saturation semble dépendre du rapport E/L (Figure 4.10). Dans le cas de 15 % de substitution, la cendre volante n'influence pas le point de saturation du coulis de rapport $E/L = 0,35$. Il est égal à celui de la référence (0,8 %). Quand le taux de substitution augmente à 30 %, la cendre volante permet de diminuer le point de saturation. Dans ce cas, pour le même rapport E/L , le point de saturation est de 0,7 %.

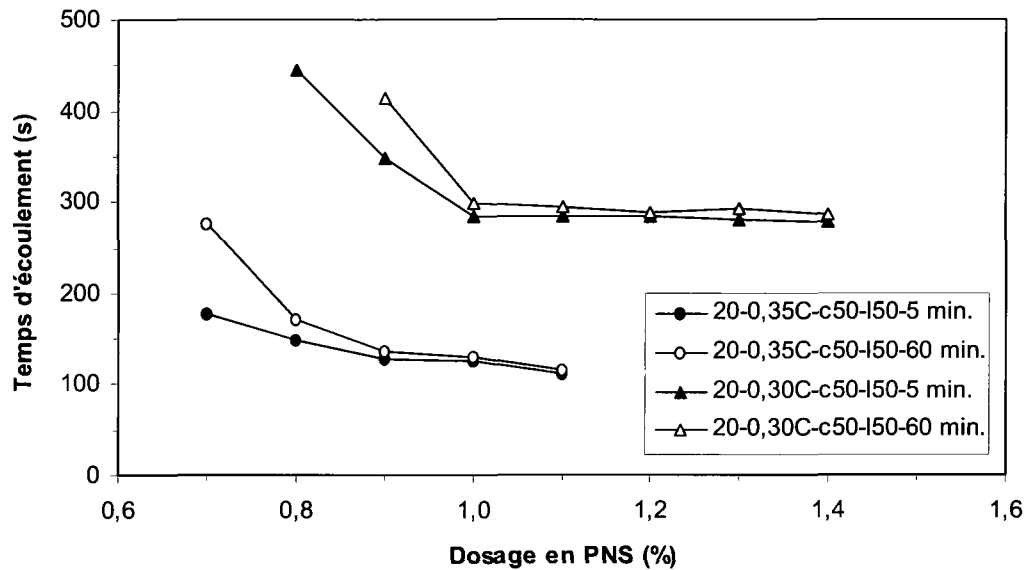


Figure 4. 9 - Temps d'écoulement des coulis avec 50 % de laitier, E/L = 0,30 et 0,35

Dans les coulis de rapport 0,30, la cendre volante diminue le point de saturation quel que soit le taux de substitution (Figure 4.11). En comparant avec les coulis de référence, le point de saturation descend à 0,9 % pour 15 % de substitution du ciment par la cendre volante et à 0,8 % pour 30 % de substitution.

Les courbes des figures 4.10 et 4.11 démontrent aussi que la cendre volante permet de diminuer les temps d'écoulement surtout dans les coulis de rapport E/L = 0,30.

Si on compare les temps d'écoulement des coulis avec et sans ajouts minéraux (Figures 4.5 à 4.11), on peut constater que la fumée de silice et la cendre volante diminuent les temps d'écoulement pour un dosage en superplastifiant donné. Cet effet est relié à la forme sphérique de leurs particules. Par contre, le laitier broyé, possède des particules de forme anguleuse. Une telle forme de particules a pour effet d'augmenter les temps d'écoulement.

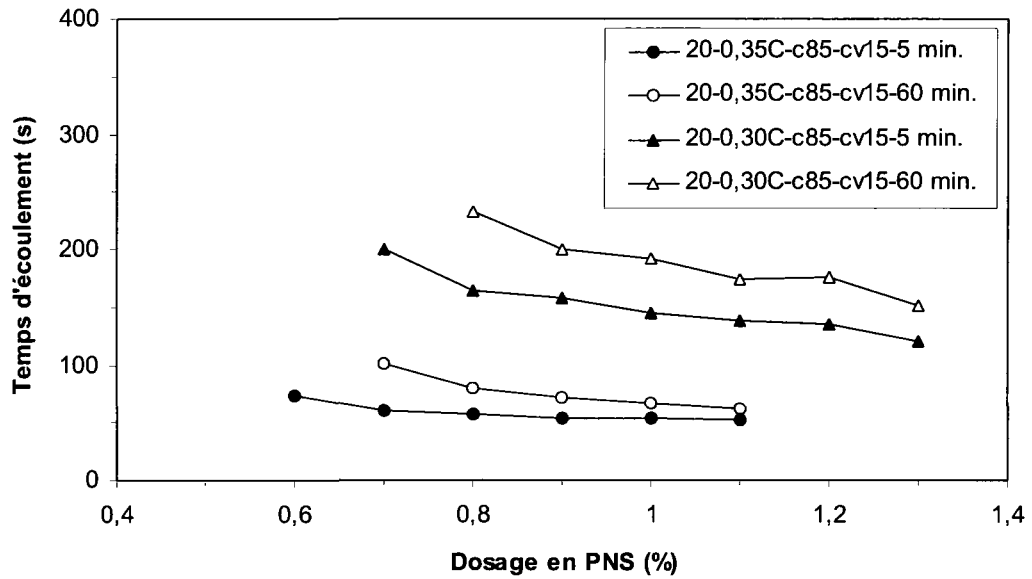


Figure 4. 10 - Temps d'écoulement des coulis avec 15 % de cendre volante, E/L = 0,30 et 0,35

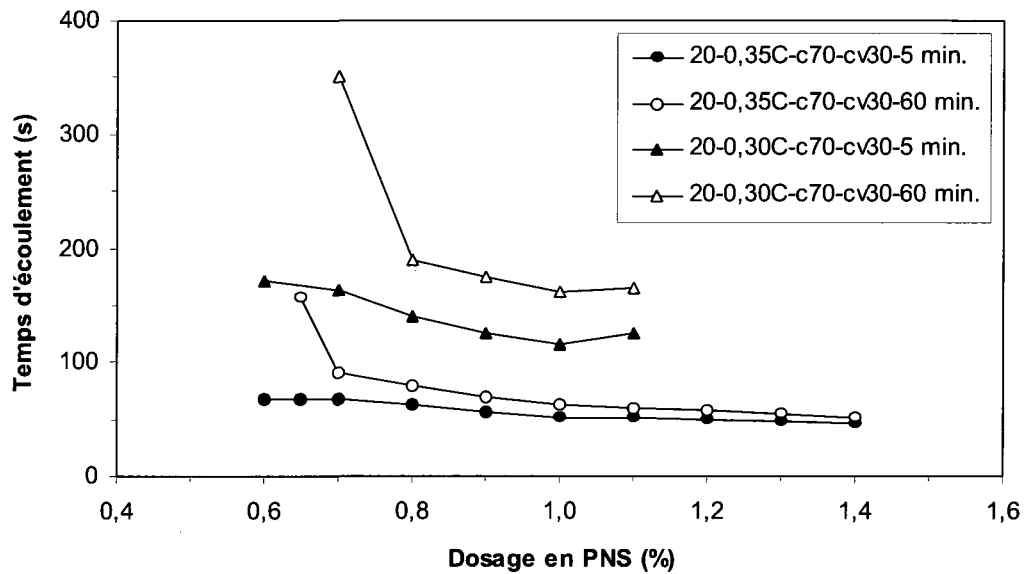


Figure 4. 11 - Temps d'écoulement des coulis avec 30 % de cendre volante, E/L = 0,30 et 0,35

4.2. 3 Conductivité électrique des coulis

La conductivité électrique des coulis a été principalement étudiée pour les raisons suivantes :

1. Mieux comprendre la cinétique d'hydratation des coulis (effet du rapport E/L, des ajouts minéraux et de la température).
2. Identifier la fin de période dormante et la connexion des hydrates à partir de la courbe de conductivité et de la courbe du développement du retrait interne.

Dans ce chapitre, nous analyserons uniquement la cinétique d'hydratation sans établir de corrélation entre le début du retrait interne et les courbes de conductivité.

Le changement de conductivité électrique dans le temps peut être relié à l'évolution des modifications chimiques et microstructurales lorsque le coulis passe de l'état liquide à l'état solide. La conductivité électrique dépend notamment de la concentration des ions présents dans le coulis. Plus cette concentration (ou la mise en solution des ions) est élevée, plus la conductivité est élevée. Par contre, la précipitation des produits d'hydratation diminue la conductivité en diminuant la connectivité de la phase liquide.

La conductivité électrique permet de repérer le début de la précipitation de la portlandite qui survient à la fin de la période dormante. Ce moment correspond au maximum de la courbe de conductivité électrique. Il est également possible de détecter le temps correspondant à la connexion des hydrates ou le début de formation d'un squelette rigide. Ce phénomène se produit après la fin de période dormante. Le maximum de conductivité est suivi d'un palier où la conductivité baisse lentement, puis d'une chute plus marquée. On peut donc observer un changement de pente entre le palier et la chute de conductivité qui correspond au début de la connexion des hydrates. La figure 1.40, présentée dans la revue bibliographique, démontre ces deux points caractéristiques de la courbe de conductivité électrique. Le début de la connexion des hydrates a été obtenu en mesurant, en parallèle, la température du coulis en milieu adiabatique et la conductivité électrique du coulis. Cette approche a été validée dans les travaux de Roussel [2000]. La conductivité électrique permet aussi de détecter le temps d'épuisement du gypse qui correspond au second maximum de la courbe ou au second changement de la pente.

4.2.3. 1 Effet du rapport E/L sur la conductivité électrique des coulis

L'effet du rapport E/L sur la conductivité électrique des coulis a été uniquement discuté à partir des résultats d'essais réalisés à 20°C. En effet, les conclusions concernant l'effet du rapport E/L basées sur les résultats des essais réalisés à 10°C et à 30°C sont très similaires à celles obtenues à 20°C. Les figures 4.12 à 4.17 présentent les courbes de conductivité des coulis sans et avec ajouts minéraux.

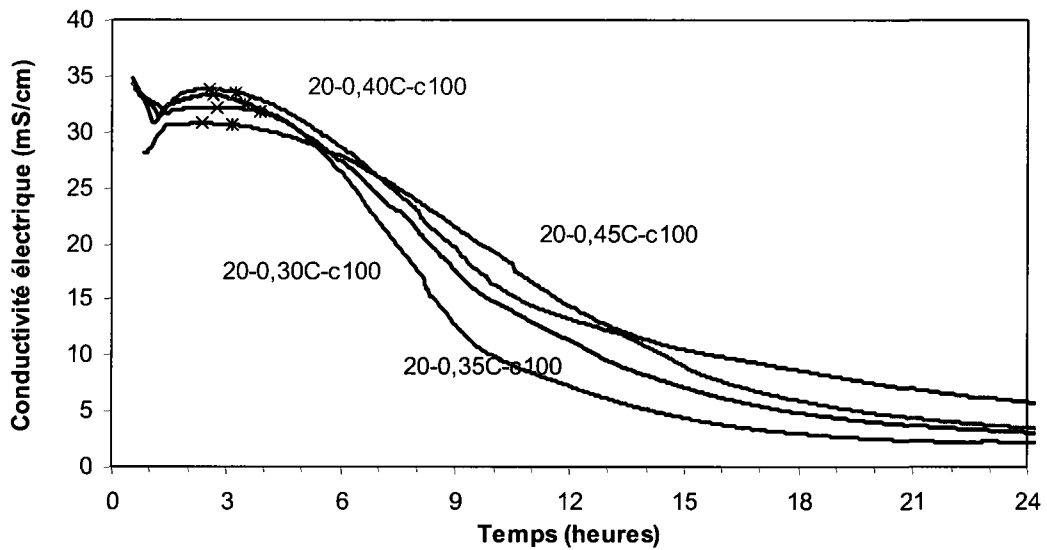


Figure 4. 12 - Conductivité électrique des coulis sans ajout minéraux (T = 20°C)

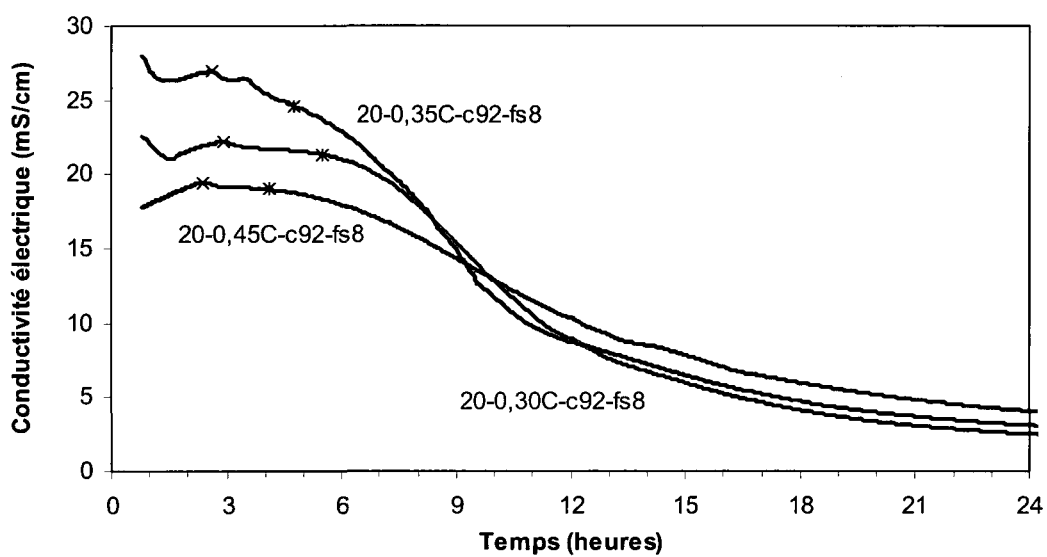


Figure 4. 13 - Conductivité électrique des coulis avec fumée de silice (T = 20°C)

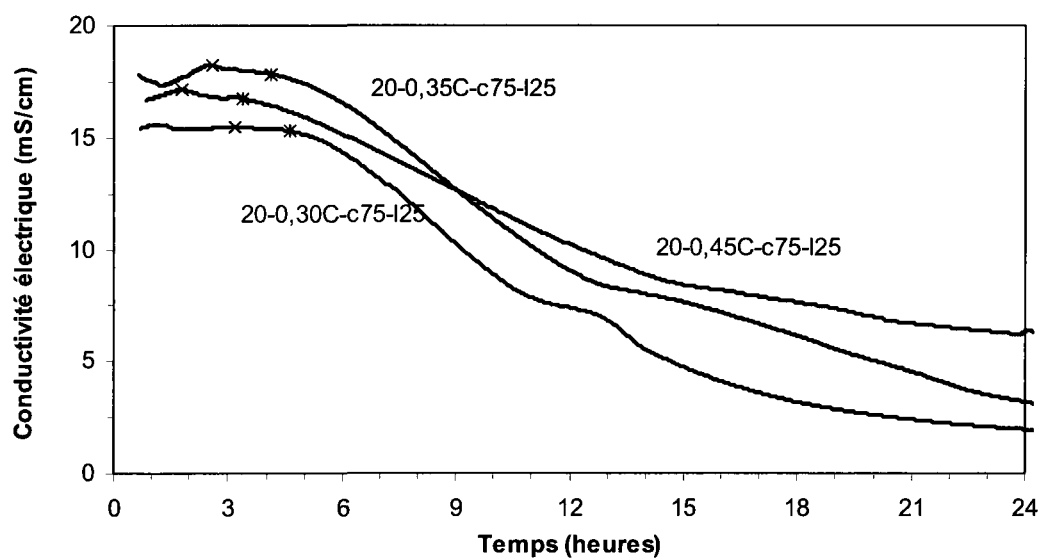


Figure 4. 14 - Conductivité électrique des coulis avec 25 % de laitier (T = 20°C)

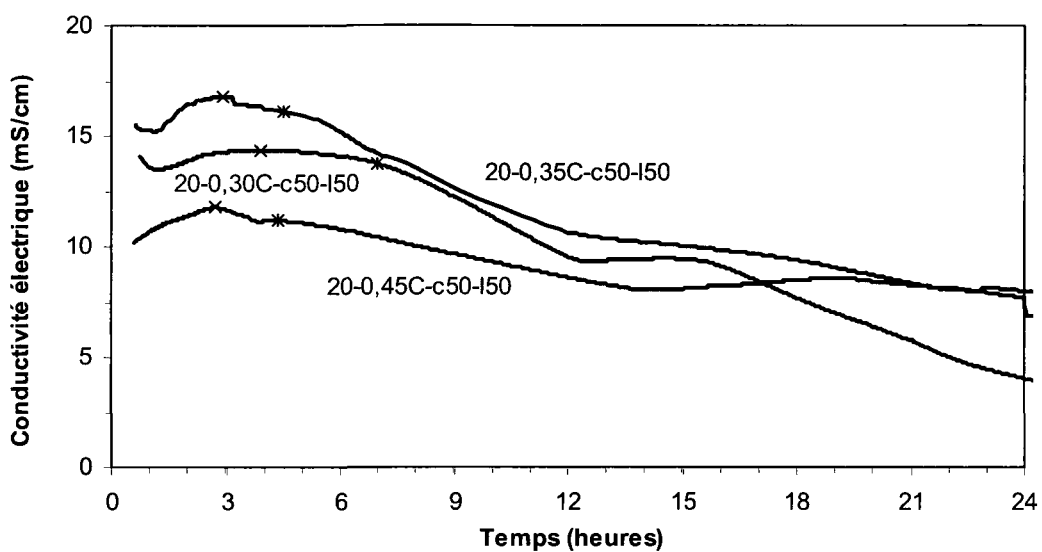


Figure 4. 15 - Conductivité électrique des coulis avec 50 % de laitier (T = 20°C)

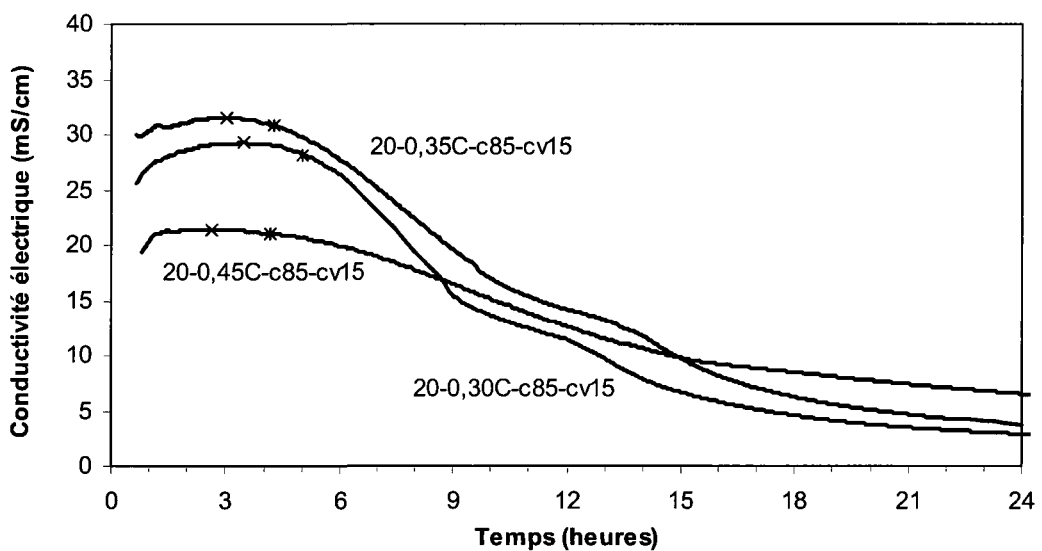


Figure 4. 16 - Conductivité électrique des coulis avec 15 % de cendre volante (T = 20°C)

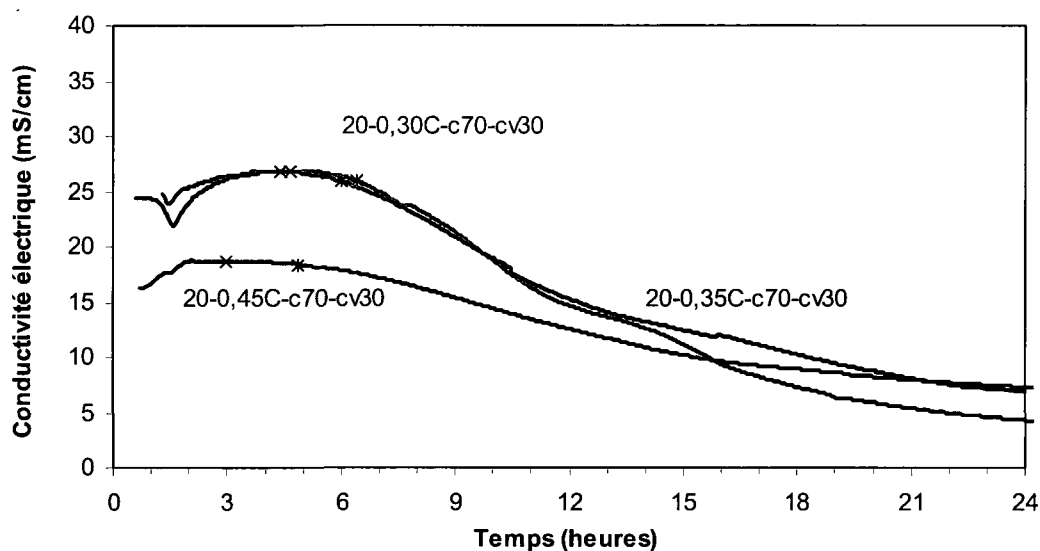


Figure 4. 17 - Conductivité électrique des coulis avec 30 % de cendre volante ($T = 20^{\circ}\text{C}$)

Théoriquement, le temps de la fin de période dormante augmente avec le rapport E/L. Cette relation n'est plus nécessairement valable lorsque le coulis contient des adjuvants pouvant modifier la cinétique de l'hydratation. Dans les coulis de cette étude, un superplastifiant est utilisé afin d'assurer une bonne maniabilité lors de leur mise en place dans la cellule interne. Le dosage de superplastifiant a varié d'un mélange à l'autre de manière à obtenir une plage de maniabilité constante pour tous les coulis. Pour un même type de liant, le dosage de superplastifiant est plus élevé dans les coulis ayant un rapport E/L plus faible (Tableaux 3.7 à 3.10).

Le superplastifiant utilisé retarde la prise du ciment. Nous avons donc observé un retard de la prise dans les coulis contenant un fort dosage en superplastifiant (E/L faible). Alors, dans la majorité des cas, la fin de période dormante a débuté plus tôt dans les coulis ayant un rapport E/L plus élevé et contenant peu de superplastifiant (Figures 4.12 à 4.17). De plus, on observe que la durée de la période dormante dépend du dosage en superplastifiant. Par exemple, la fin de la période dormante du coulis 0,30C-c100 survient 25 minutes plus tard que celle du coulis 0,45C-c100 (Figure 4.12) car le dosage en superplastifiant du coulis 0,30C-c100 est 4 fois plus important que celui du coulis 0,45C-c100 (Tableau 3.7). De même, la fin de la période

dormante du coulis 0,30C-c92-fs8 commence 10 minutes plus tard que celle du coulis 0,45C-c92-fs8 (Figure 4.13) car ce dernier possède un dosage en superplastifiant 2 fois plus faible (Tableau 3.8). C'est dans les coulis avec cendre volante que le superplastifiant retarde le plus la fin de la période dormante. Par exemple, la fin de période dormante du coulis 0,30C-c85-cv15 commence 50 minutes plus tard que celle du coulis 0,45C-c85-cv15 (Figure 4.16). Le coulis de rapport 0,30 contient 0,8 % de superplastifiant alors que celui de rapport 0,45 ne contient pas de superplastifiant (Tableau 3.10).

Le temps de connexion des hydrates (ou le début de formation d'un squelette rigide) correspond au changement de pente entre le palier qui suit la fin de période dormante et la chute de conductivité (Figure 1.40). Ce temps est plus difficile à détecter que celui de la fin de période dormante. Cependant, nos observations sur l'effet du rapport E/L et de superplastifiant sont encore valables. Théoriquement, la connexion des hydrates devrait commencer plutôt dans les coulis de faible rapport E/L. Étant donné que ces coulis contiennent moins d'eau les grains de ciment sont plus rapprochés au départ. Il faut donc moins de temps et moins d'hydrates formés pour atteindre la connexion des hydrates. Dans le cas de notre étude, des résultats inverses ont été observés à cause de la présence de superplastifiant. La rigidification commence donc plutôt dans les coulis ayant un E/L élevé parce qu'ils contiennent moins de superplastifiant que les coulis de faible rapport E/L (Figures 4.12 à 4.17).

Lorsque la rigidification du squelette minéral s'amorce, le superplastifiant n'a plus d'effet sur la cinétique d'hydratation. Dans la majorité des cas, la chute de conductivité électrique est plus importante dans les coulis de faible rapport E/L (Figures 4.12 à 4.17), ce qui indique que la vitesse de la rigidification du squelette minéral est plus élevée quand la quantité d'eau dans le mélange est plus faible.

Les courbes de conductivité électrique permettent également de détecter le temps d'épuisement du gypse. Cet événement correspond à une bosse qui suit la chute de conductivité. Cette bosse est plus importante pour les coulis avec laitier ou avec cendre volante (Figures 4.14 à 4.17). Dans la majorité des cas, le temps d'épuisement du gypse survient plus tôt dans les coulis de faible rapport E/L.

4.2.3. 2 Effet du type de liant sur la conductivité électrique des coulis

L'effet du type de liant sur la conductivité électrique est analysé à partir des résultats obtenus à 20°C, car des conclusions similaires peuvent être tirées à partir des résultats obtenus à 10°C et à 30°C.

La figure 4.18 présente les courbes de conductivité des coulis avec 8 % de fumée de silice et des coulis de référence. On constate que la fin de la période dormante des coulis avec fumée de silice est légèrement retardée par rapport à celle des coulis de référence, quel que soit le rapport E/L. Ce retard est attribué à une quantité de superplastifiant plus importante dans les coulis avec fumée de silice par rapport au coulis de référence (Tableaux 3.7 et 3.8). On a déjà indiqué que le superplastifiant retarde la fin de la période dormante et le début de la rigidification du squelette minéral. On constate aussi (Figure 4.18), que le changement de pente, correspondant au début de la rigidification, est retardé dans les coulis avec fumée de silice.

Une fois la rigidification amorcée, la chute de conductivité est plus intense dans les coulis de référence. Il semble que le superplastifiant dans les coulis avec fumée de silice diminue légèrement la vitesse de formation des hydrates pendant les 12 premières heures. À partir de 12 heures, les courbes sont soit parallèles soit superposées, ce qui indique que le taux d'avancement de l'hydratation de deux liants est le même.

La figure 4.19 présente les courbes de conductivité des coulis avec laitier et des coulis de référence ayant un rapport E/L de 0,30, 0,35 et 0,45. Au très jeune âge (moins que 6 heures), la conductivité des coulis avec laitier est beaucoup plus faible que celle des coulis de référence. Ces résultats indiquent que le laitier provoque une diminution de l'activité ionique.

L'analyse de l'influence du laitier sur la cinétique d'hydratation a été effectuée à partir des courbes de conductivité des coulis de rapport E/L = 0,35 qui contiennent tous le même pourcentage de superplastifiant (0,6 %). Le maximum de conductivité, qui caractérise la fin de période dormante, se produit en même temps dans le coulis de référence (0,35C-c100) et dans le coulis et dans le coulis avec 25 % de laitier (0,35C-c75-l25). Le changement de pente, correspondant au début de rigidification survient aussi en même temps.

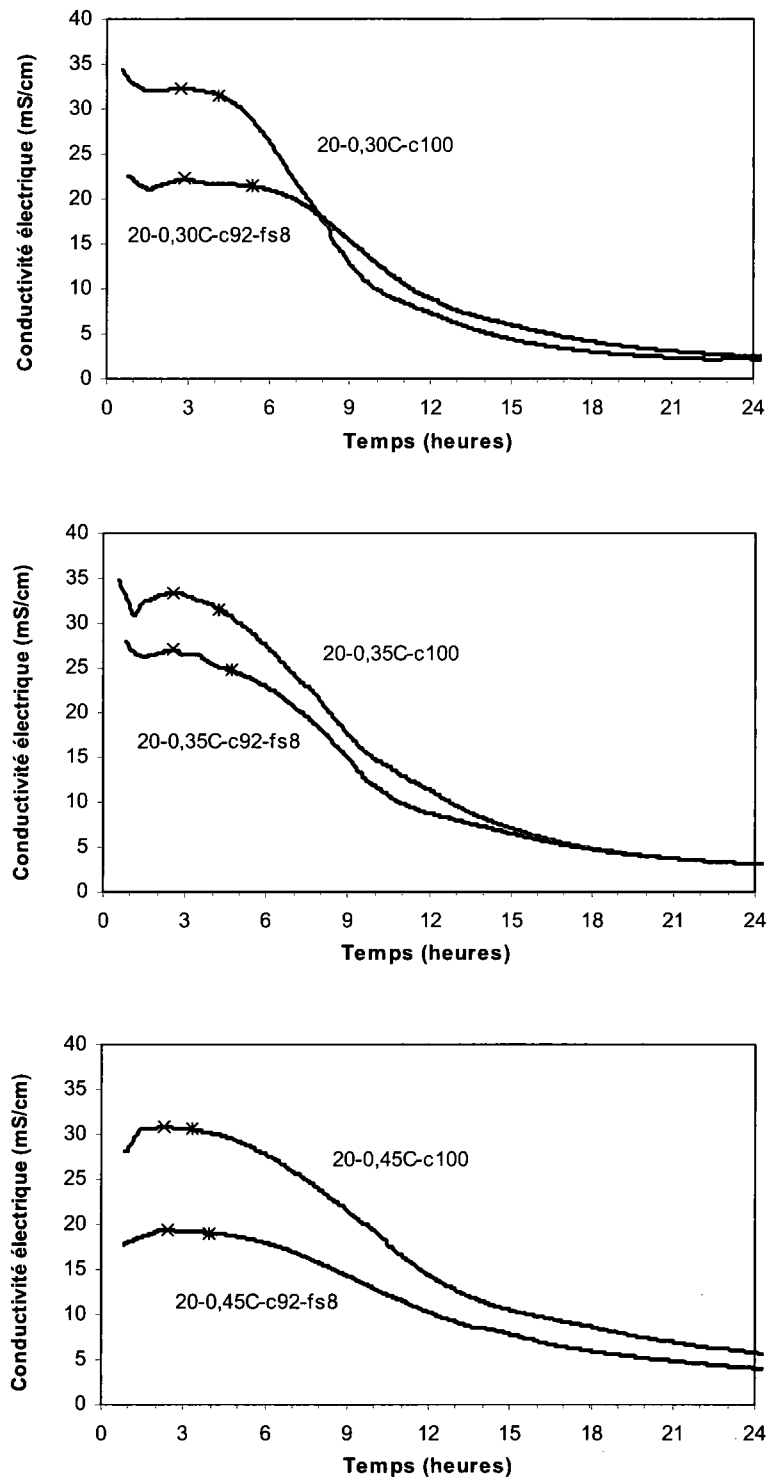


Figure 4. 18 - Conductivité électrique des coulis avec et sans fumée de silice (T = 20°C)

Par contre, la vitesse de durcissement, caractérisée par la chute de conductivité, est beaucoup plus faible dans le coulis avec 25 % de laitier, comparativement au coulis de référence. À partir de 14 heures suivant le contact eau-liant, les courbes sont relativement similaires. Ces résultats permettent de conclure que le remplacement de 25 % de ciment Portland de Type 10 par du laitier a principalement pour effet de ralentir la rigidification du squelette minéral.

La fin de période dormante du coulis 0,35C-c50-150 commence 20 minutes plus tard que celle du coulis de référence. Le début de la rigidification semble aussi être retardé dans le coulis avec 50 % de laitier. La vitesse de rigidification de ce coulis est beaucoup plus lente que celle de la référence et continue de progresser plus lentement jusqu'au 24 heures. On peut donc conclure que le remplacement de 50 % de ciment Portland de Type 10 par du laitier cause un ralentissement de tous les paramètres de la cinétique d'hydratation (période dormante, vitesse de rigidification du squelette minérale).

Les courbes de la figure 4.20 démontrent que la cendre volante retarde la fin de période dormante et le début de la rigidification, quel que soit le rapport E/L. Ce retard augmente avec le dosage en cendre volante. Par exemple, la fin de la période dormante du coulis 0,35C-c70-cv30 commence 1h50 minutes plus tard que celle de la référence 0,35C-c100. Dans le cas du coulis 0,35C-c85-cv15 ce retard, par rapport à la référence, est de 25 minutes. Étant donné que tous ces coulis contiennent le même dosage en superplastifiant (0,6 %), le retard d'hydratation est peut être entièrement attribué à la présence de la cendre volante. Suite au début de la rigidification, la pente de la courbe de conductivité est la plus importante dans le coulis de référence, puis diminue graduellement avec le dosage de la cendre volante (Figure 4.20). Cependant, la différence entre les pentes obtenues avec et sans cendre volante est moins marquée que celle obtenues avec et sans laitier (Figure 4.19). Ces résultats permettent de conclure que la cendre volante ralentit la cinétique d'hydratation des coulis et que cet effet augmente avec le dosage en cendre volante.

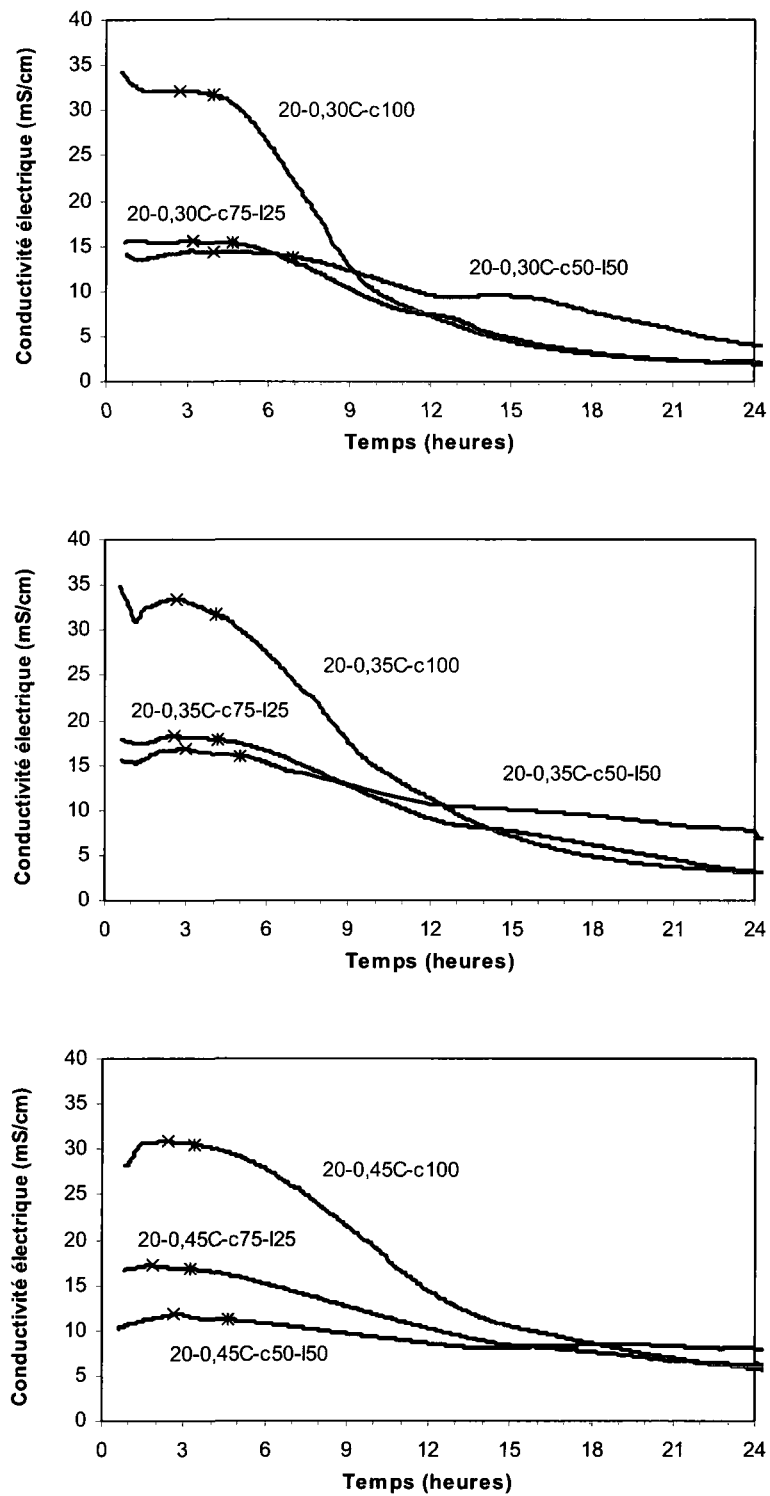


Figure 4. 19 - Conductivité électrique des coulis avec et sans laitier (T = 20°C)

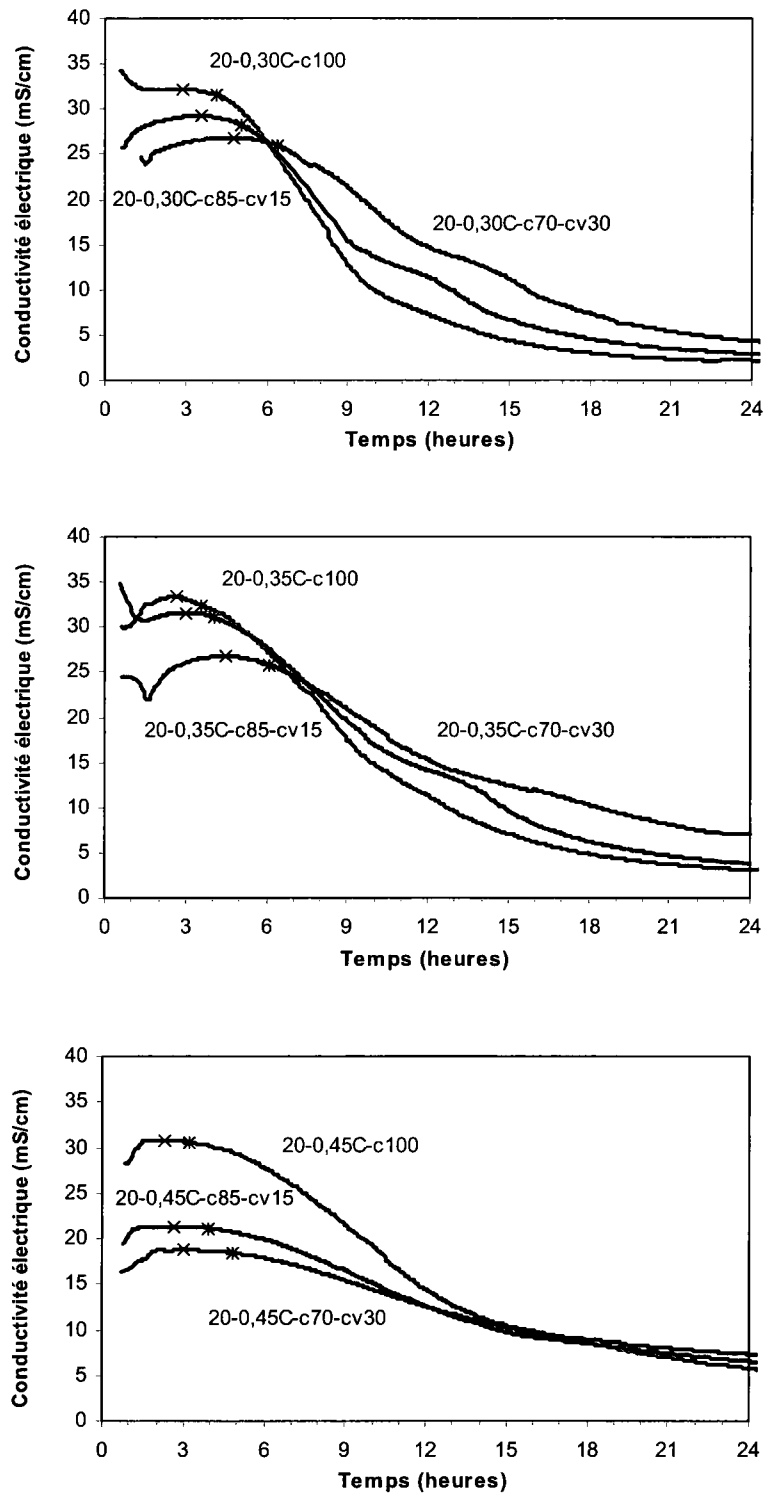


Figure 4. 20 - Conductivité électrique des coulis avec et sans cendre volante (T = 20°C)

4.2.3. 3 Effet de la température sur la conductivité électrique des coulis

L'influence de la température sur la conductivité électrique est analysée à l'aide des résultats des coulis avec et sans ajouts minéraux fabriqués avec un rapport $E/L = 0,35$. Les figures 4.21 à 4.26 montrent que la température influence fortement la conductivité électrique. Dans le cas des essais à 30°C , la fin de période dormante et le début de rigidification commencent plus tôt par rapport à ceux obtenus à 20°C et à 10°C . La conductivité baisse ensuite rapidement pour atteindre les valeurs les plus faibles. Une température élevée accélère donc l'hydratation et le durcissement des coulis quel que soit le type de liant.

Dans le cas des essais à 10°C , l'hydratation et le durcissement sont ralentis. La fin de période dormante et le début de la rigidification sont fortement retardés comparativement aux autres températures (20°C et 30°C). Dans la majorité des cas, la vitesse de rigidification du squelette minéral est beaucoup plus lente que celle des coulis à 20°C et à 30°C . Ce ralentissement de la cinétique d'hydratation est indépendant du type de liant.

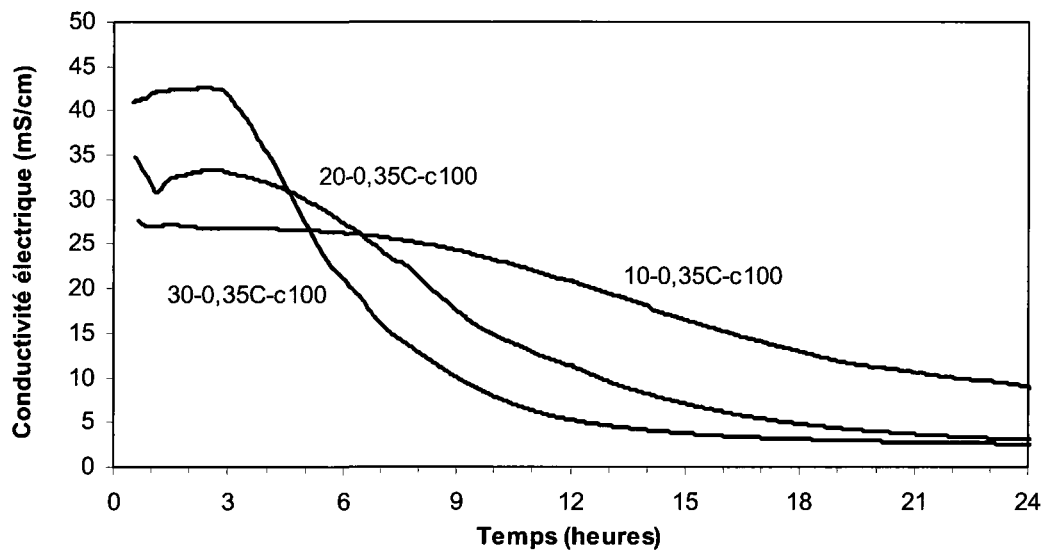


Figure 4. 21 - Conductivité électrique des coulis de référence à 10, 20 et 30°C ($E/C = 0,35$)

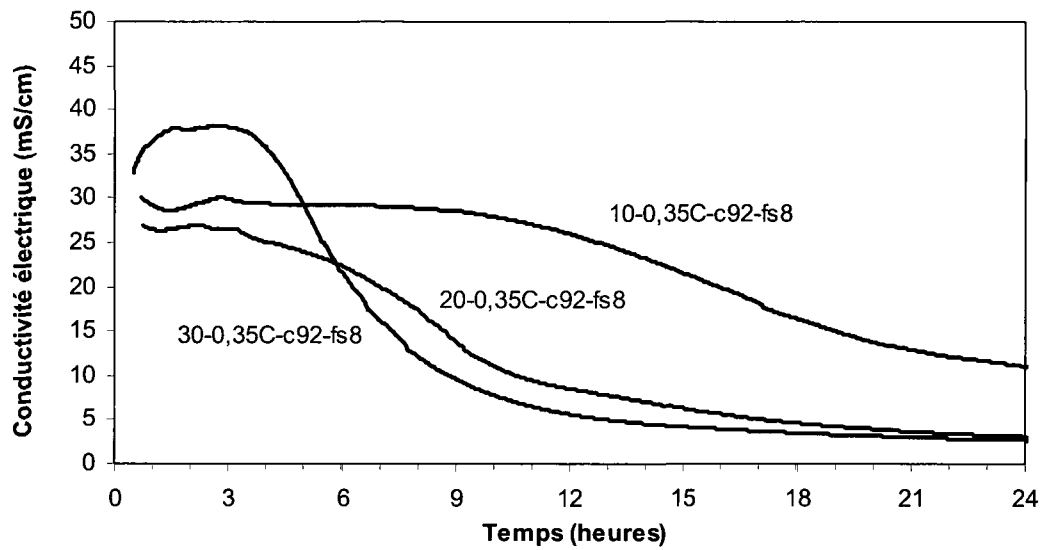


Figure 4. 22 – Conductivité électrique des coulis avec 8% de fumée de silice à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35)

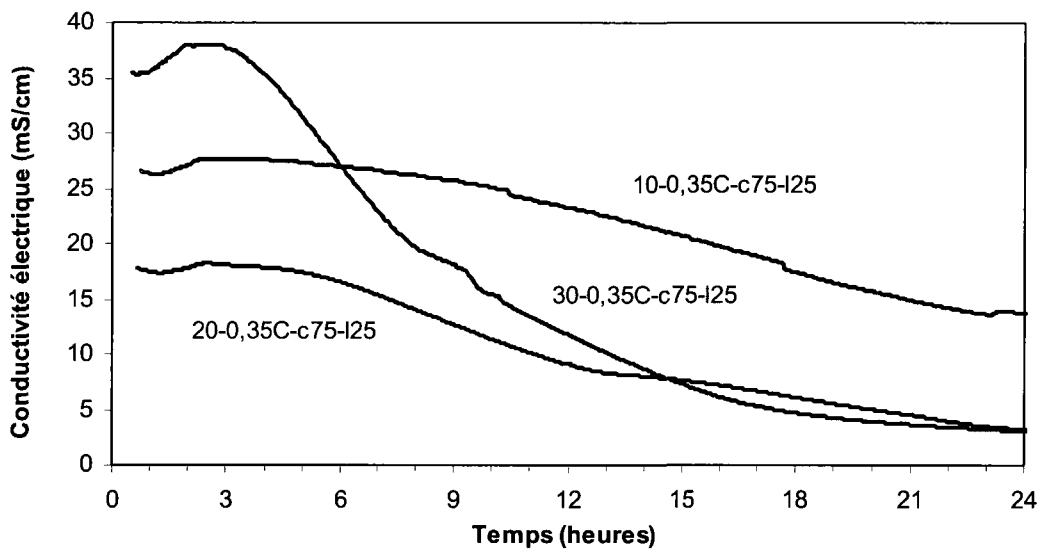


Figure 4. 23 – Conductivité électrique des coulis avec 25% de laitier à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35)

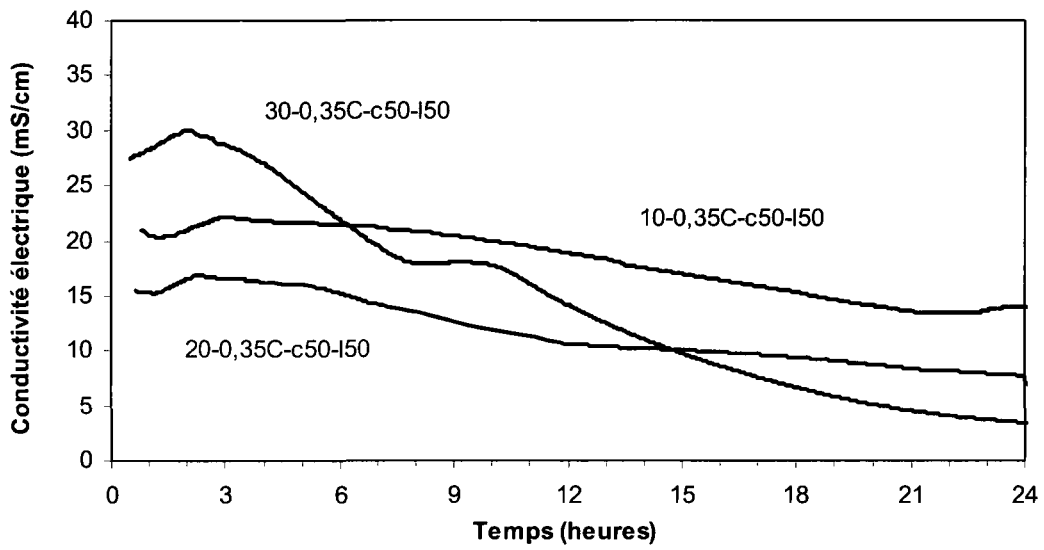


Figure 4. 24 – Conductivité électrique des coulis avec 50% de laitier à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35)

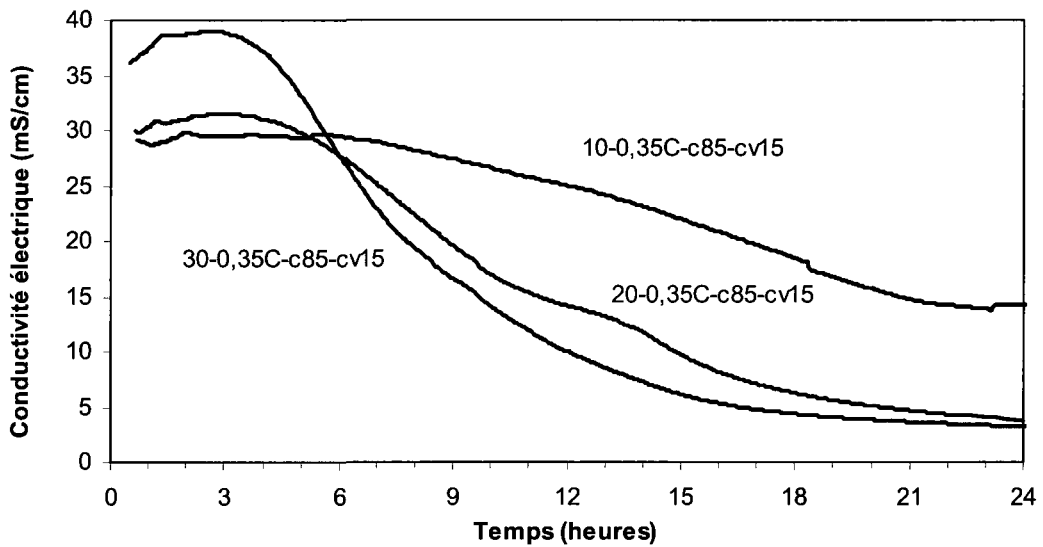


Figure 4. 25 – Conductivité électrique des coulis avec 15% de cendre volante à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35)

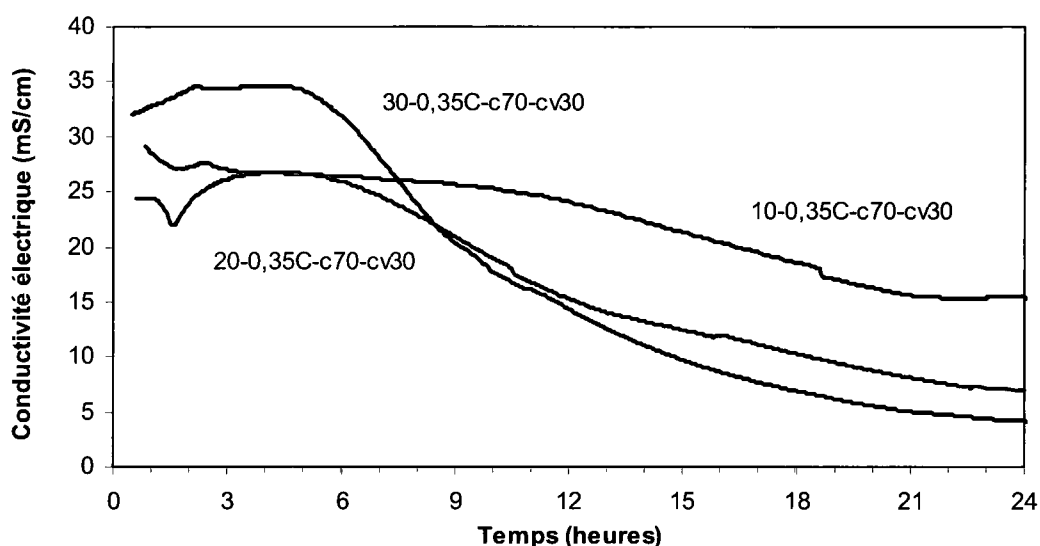


Figure 4. 26 - Conductivité électrique des coulis avec 30% de cendre volante à 10, 20 et 30°C (E/L = 0,35)

4. 3 Caractérisation des mortiers à l'état frais

4.3. 1 Maniabilité, masse volumique et teneur en air des mortier

La caractérisation des mortiers à l'état frais a été effectuée à l'aide de mesures de la maniabilité selon la norme ASTM C 1437 et des mesures de masse volumique selon la norme ASTM C 185 (voir le paragraphe 2.4.3). L'étalement des mortiers frais a été mesuré après 10 et 30 minutes suivant le contact eau-liant. Tous les mortiers avaient une température comprise entre 18°C et 21°C après les essais d'étalement. La masse volumique a été mesurée immédiatement après le premier essai d'étalement. La teneur en air des mortiers a été ensuite calculée à partir de la masse volumique et de la formulation de chaque mélange. Les tableaux 4.1 et 4.2 présentent les caractéristiques des mortiers à l'état frais pour les deux dosages de sable.

La formulation des mortiers a été conçue en tentant d'utiliser les mêmes dosages en superplastifiant que ceux utilisés dans les coulis de même rapport E/L. De plus, les mortiers devaient posséder une maniabilité permettant une bonne mise en place dans la cellule interne. Finalement, comme dans le cas des coulis, le dosage en superplastifiant ne devait pas dépasser le point de saturation du liant.

Dans le cas des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 1,6, nous avons facilement obtenu un étalement suffisamment élevé pour éviter de vibrer le mortier lors du remplissage de la cellule. Les étalements étaient tous compris entre 157 % et 170 % après 10 minutes et entre 142 % et 160 % après 30 minutes (Tableau 4.1). Dans le cas des mortiers dont le rapport pâte/sable est de 0,8, il a été nécessaire d'augmenter le dosage en superplastifiant de 17 % à 100 % pour obtenir un étalement acceptable pour la mise en place dans la cellule interne. De plus, ces mortiers ont été mis en place en plusieurs couches et à l'aide d'une légère vibration (table vibrante). Après 10 minutes, l'étalement était compris entre 69 % et 113 %, puis entre 61 % et 98 % après 30 minutes (Tableau 4.2).

Tableau 4. 1 - Caractéristiques à l'état frais des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 1,6

Mortier	Rapport E/L	Ciment (%)	Étalement (%)		Masse volumique (kg/m ³)	Air (%)
			10 min.	30 min.		
20-0,30M-c100-p/s1,6	0,30	100	160	151	2134	7,7
20-0,35M-c100-p/s1,6	0,35	100	157	143	2139	5,4
20-0,40M-c100-p/s1,6	0,40	100	165	142	2118	4,5
20-0,45M-c100-p/s1,6	0,45	100	170	160	2135	2,1

Tableau 4. 2 - Caractéristiques à l'état frais des mortiers ayant un rapport volumique pâte/sable de 0,8

Mortier	Rapport E/L	Ciment (%)	Étalement (%)		Masse volumique (kg/m ³)	Air (%)
			10 min.	30 min.		
20-0,30M-c100-p/s0,8	0,30	100	69	61	2165	10,0
20-0,35M-c100-p/s0,8	0,35	100	95	84	2112	10,8
20-0,40M-c100-p/s0,8	0,40	100	113	96	2119	9,4
20-0,45M-c100-p/s0,8	0,45	100	110	98	2102	9,0

Les mortiers ne contiennent pas d'agent entraîneur d'air. Les teneurs en air indiquées aux tableaux 4.1 et 4.2 ont été naturellement piégées lors du malaxage. Dans le cas des mortiers contenant plus de pâte ($p/s = 1,6$) la teneur en air est comprise entre 2,1 % et 7,7 %. Les mortiers dont le rapport p/s est de 0,8 ont piégés plus d'air lors du malaxage (9,0 % à 10,8 %).

4.3.2 Conductivité électrique des mortiers

La conductivité électrique des mortiers a été mesurée à 20°C pour les raisons suivantes :

1. Mieux comprendre la cinétique d'hydratation des mortiers (l'effet du rapport E/C et l'effet de la teneur en sable).
2. Identifier la fin de période dormante et la connexion des hydrates à partir de la courbe de conductivité et de la courbe du développement du retrait interne.

Dans ce chapitre, seule la cinétique d'hydratation sera analysée. La comparaison entre le début du retrait interne et l'allure des courbes de conductivité sera étudiée au chapitre 7.

4.3.2.1 Effet du rapport E/C sur la conductivité électrique des mortiers

Les courbes de conductivité électrique des mortiers sont présentées aux figures 4.27 et 4.28. Dans le cas des mortiers avec plus de pâte (Figure 4.27), la fin de période dormante et le début de la rigidification sont retardés, dans la majorité des cas, par la présence de superplastifiant. Cependant les différences entre ces temps, pour les 4 rapports E/C, sont plus faibles comparativement aux coulis. Par exemple, la fin de période dormante du mortier 0,30M-c100-p/s1,6 survient 15 minutes plus tard que celle du mortier 0,45M-c100-p/s1,6. Ce retard est probablement dû au fait que le mortier 0,30M-c100-p/s1,6 contient un dosage en superplastifiant plus important que celui du mortier 0,45M-c100-p/s1,6. Après l'atteinte du seuil de rigidification, la cinétique d'hydratation n'est plus significativement influencée par le superplastifiant. La rigidification du squelette minéral des mortiers de faible rapport E/C est plus rapide.

Dans le cas des mortiers contenant plus de sable ($p/s = 0,8$), on observe un comportement inverse (Figure 4.28). La cinétique d'hydratation ralentit avec l'augmentation du rapport E/C. Il semble que l'effet du superplastifiant devient négligeable quand le volume de pâte devient inférieur à 44 % du volume total.

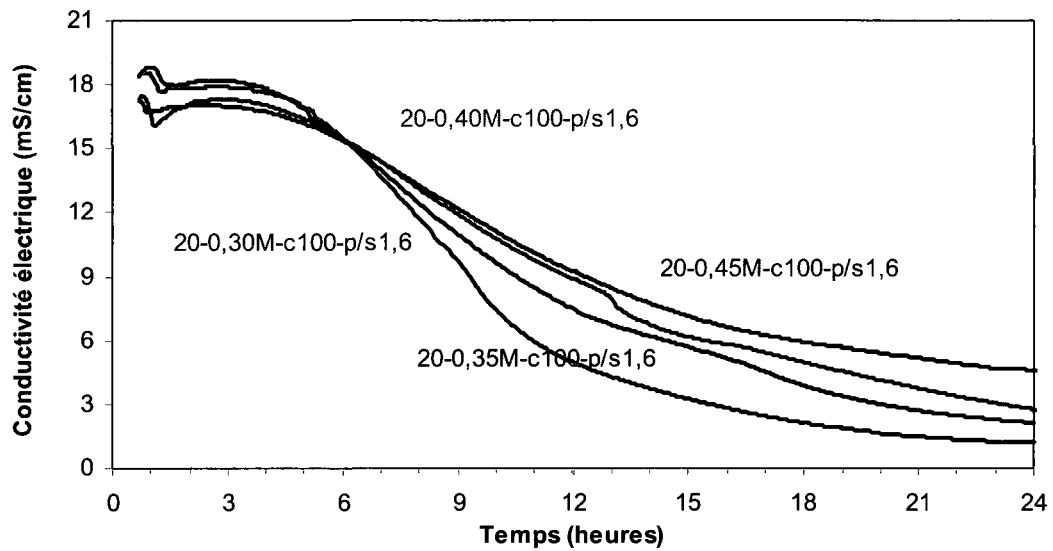


Figure 4. 27 - Conductivité électrique des mortiers ($p/s = 1,6$)

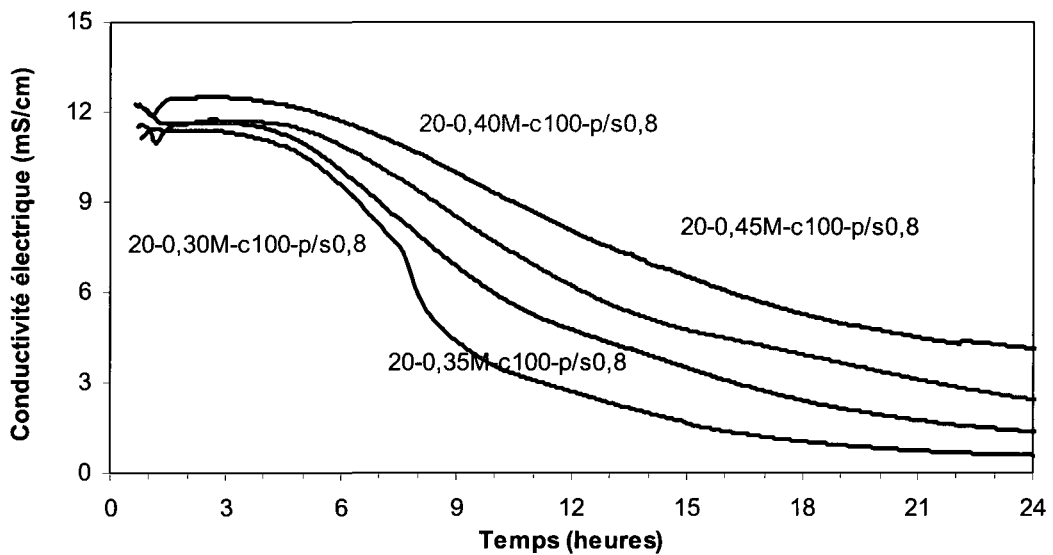


Figure 4. 28 - Conductivité électrique des mortiers ($p/s = 0,8$)

4.3.2. 2 Effet du sable sur la conductivité électrique des mortiers

L'influence de la teneur en sable sur la conductivité électrique des mortiers de rapport $E/C = 0,35$ est présentée à la figure 4.29. À cause d'une similitude des conclusions, les résultats obtenus pour les autres rapports E/C ne sont pas présentés. Les courbes de la figure 4.29 montrent que l'intensité de la conductivité électrique diminue avec le dosage de sable. Dans le cas du mortier contenant le plus de pâte (0,35M-c100-p/s1,6), la présence de sable diminue uniquement l'intensité de la conductivité. En effet, la fin de période dormante et le début de la rigidification du mortier 0,35M-c100-p/s1,6 et du coulis 0,35C-c100 surviennent pratiquement en même temps. Par contre, pour le mortier contenant le plus de sable (0,35M-c100-p/s0,8), la fin de période dormante et le début de la rigidification débutent un peu plutôt (environ 10 minutes). La comparaison des trois courbes permet aussi de conclure que le coulis possède une plus grande vitesse de rigidification qui diminue ensuite en fonction du dosage de sable.

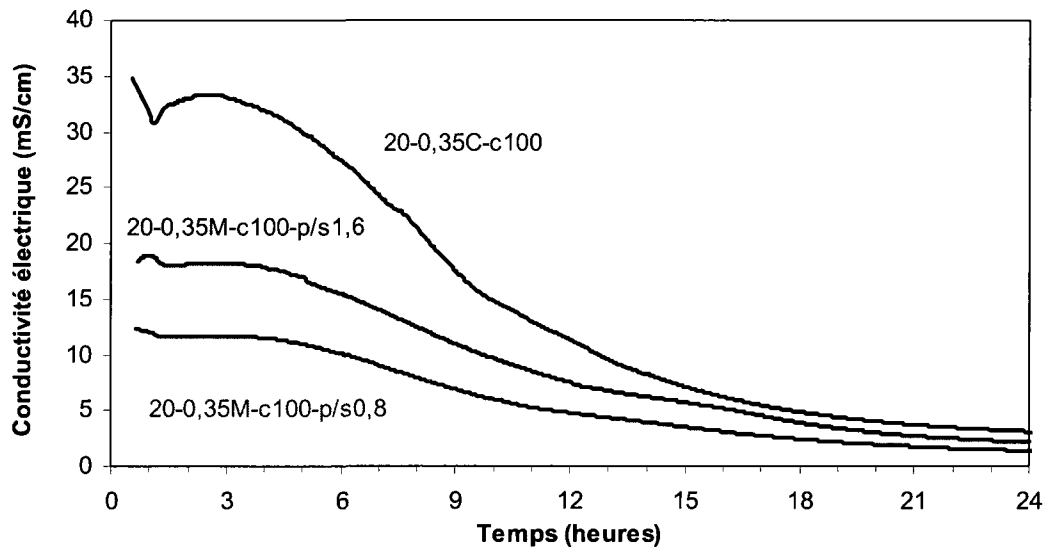


Figure 4. 29 - Conductivité électrique du coulis et des mortiers de rapport $E/C = 0,35$

5 EAU LIÉE CHIMIQUEMENT ET DEGRÉ D'HYDRATATION

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des mesures de la quantité d'eau liée chimiquement et du degré d'hydratation des coulis et des mortiers. Les cinq premières parties de ce chapitre traitent des quantités d'eau liée et des degrés d'hydratation des coulis et des mortiers soumis aux essais de retrait endogène. La sixième partie de ce chapitre présente des résultats obtenus après l'essai de retrait chimique (contraction Le Chatelier). À la fin, une comparaison entre les résultats obtenus après l'essai de retrait endogène et après l'essai de retrait chimique est présentée.

5.2 Eau liée chimiquement des coulis soumis aux essais de retrait endogène

La quantité d'eau liée chimiquement aux hydrates a été déterminée à partir de la différence de masse des éprouvettes soumises au séchage à 105°C et au chauffage à 1000°C. Le séchage permet d'évaporer l'eau libre et l'eau adsorbée. Le traitement thermique à 1000°C détruit les hydrates et permet de libérer l'eau chimiquement liée à ces derniers. La préparation des éprouvettes et la procédure de traitement thermique ont été présentées au paragraphe 2.4.2 qui traite de la caractérisation des coulis. Les quantités d'eau liée dans les coulis sans ajouts minéraux (coulis de référence) sont calculées à l'aide de l'équation 1.11 et celles des coulis avec ajouts minéraux à l'aide de l'équation 2.10.

5.2.1 Effet du rapport E/L et de l'âge du coulis sur la quantité d'eau liée chimiquement

Les figures 5.1 à 5.6 présentent les quantités d'eau liée chimiquement dans les coulis de référence et les coulis avec ajouts minéraux ayant un rapport eau/liant de 0,30, 0,35 et 0,45. Les quantités d'eau liée ont été déterminées à 7 jours à partir d'échantillons soumis aux essais de retrait endogène à 10, 20 et 30°C. La quantité d'eau liée chimiquement est exprimée en g d'eau ayant réagi par g de liant après 7 jours d'hydratation. Les résultats des figures 5.1 à 5.6 montrent que la quantité d'eau liée chimiquement à 7 jours augmente systématiquement avec

l'augmentation du rapport E/L quel que soit le type de liant ou la température de l'essai de retrait endogène. Cela veut dire qu'une plus grande quantité de liant a réagi à 7 jours pour former des hydrates dans les coulis dont le rapport E/L est plus élevé. La quantité d'eau liée chimiquement à 7 jours augmente aussi avec la température, quel que soit le rapport E/L ou le type de liant. Ces résultats confirment que l'augmentation de la température augmente la cinétique d'hydratation de tous les types de liants étudiés. L'effet de la température sera analysé plus en détail au paragraphe 5.2.2.

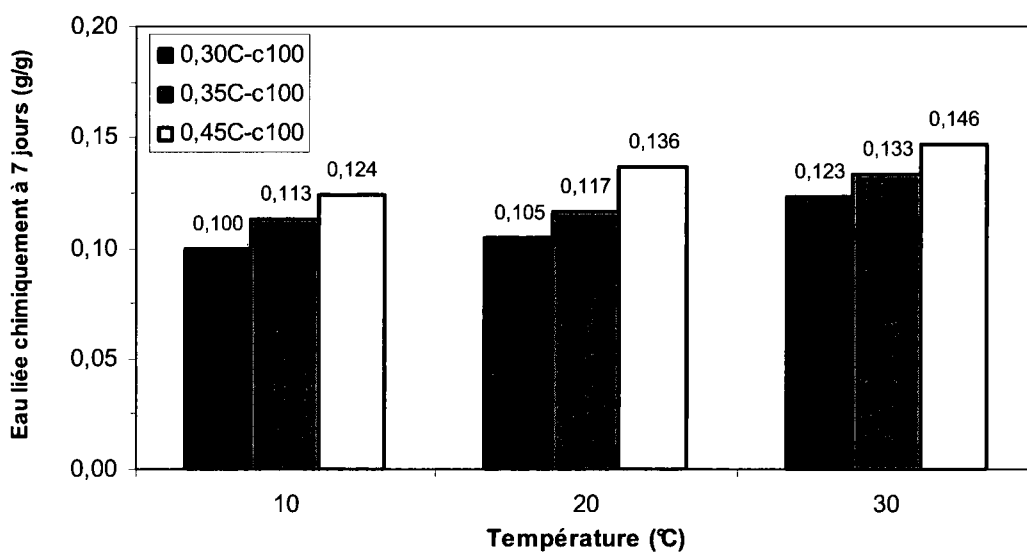


Figure 5. 1 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis de référence

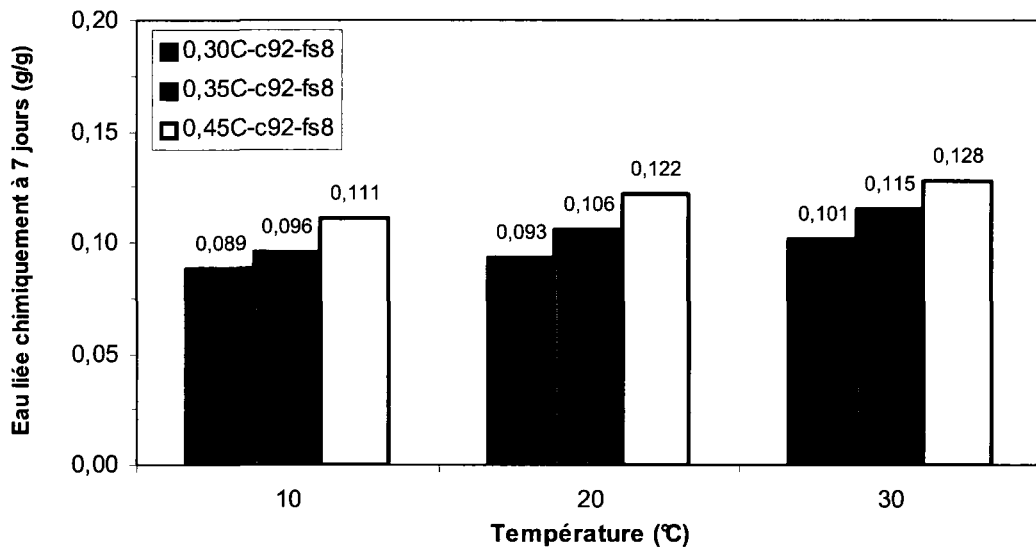


Figure 5. 2 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 8 % de fumée de silice

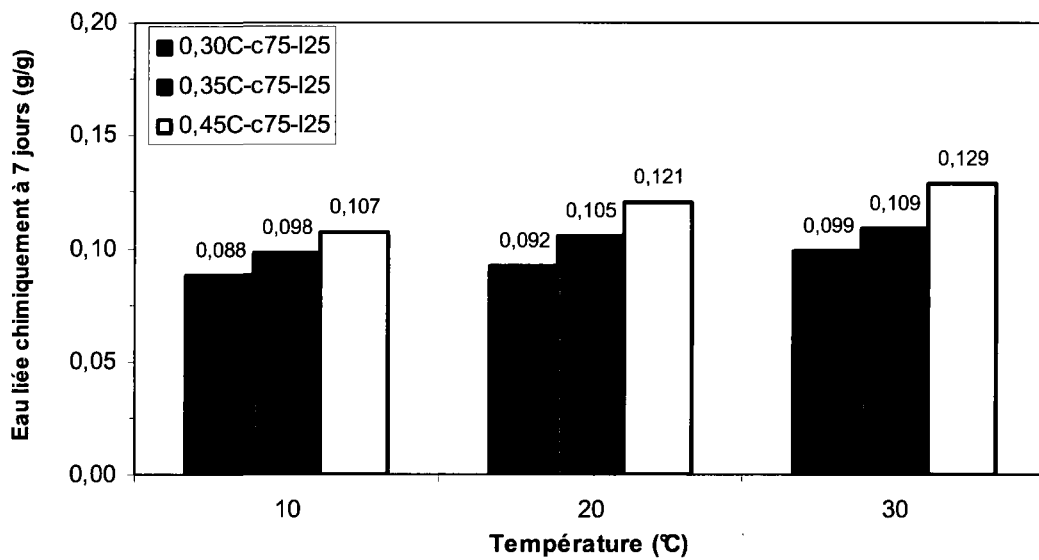


Figure 5. 3 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 25 % de laitier

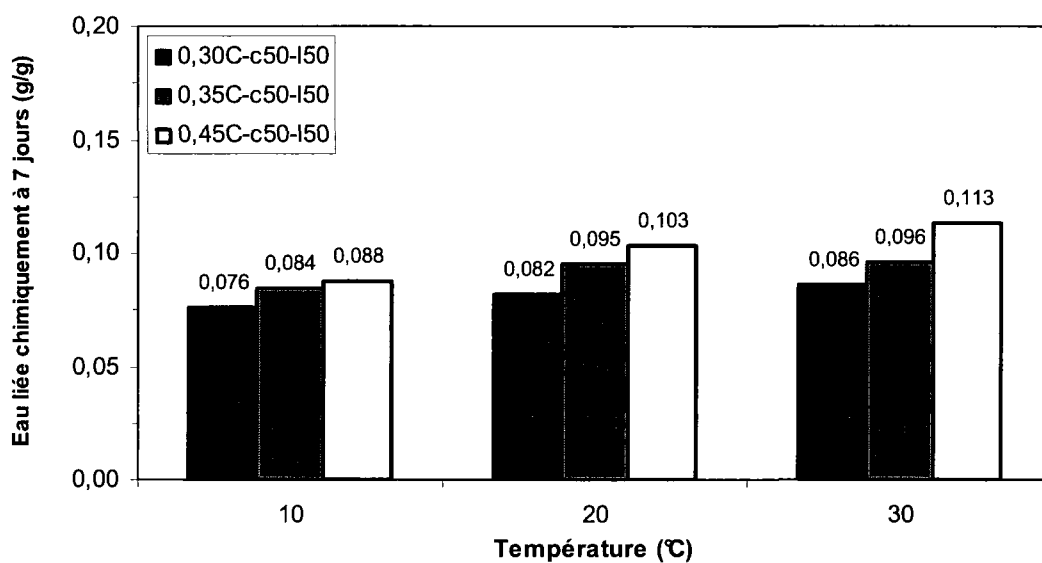


Figure 5. 4 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 50 % de laitier

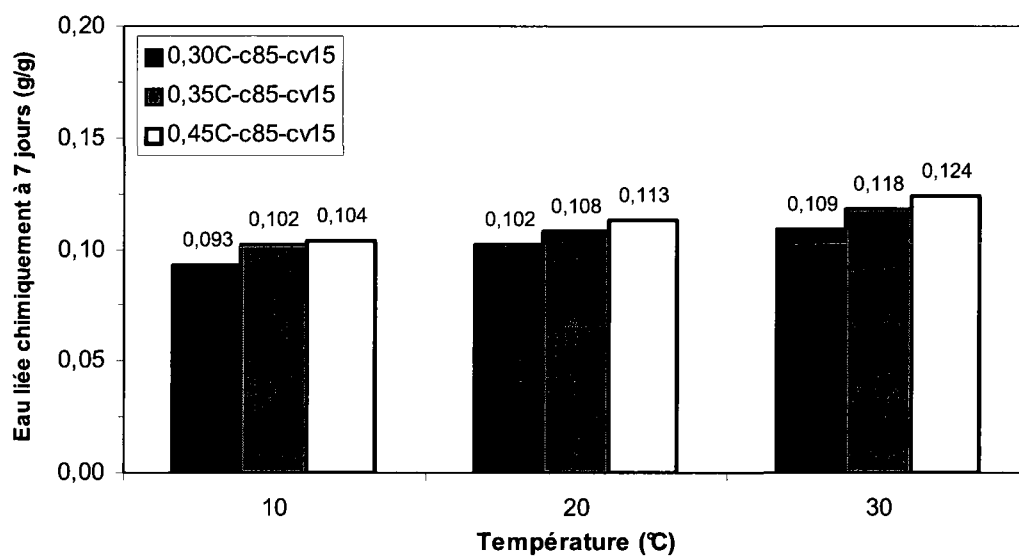


Figure 5. 5 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 15 % de cendre volante

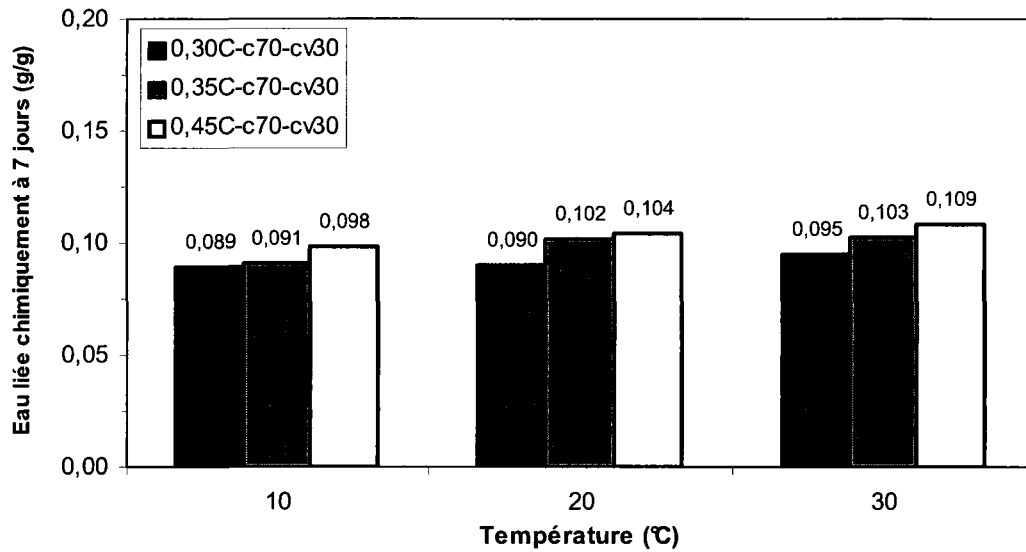


Figure 5. 6 - Eau liée chimiquement à 7 jours des coulis avec 30 % de cendre volante

L'influence de l'âge du coulis sur la quantité d'eau liée est présentée aux figures 5.7 à 5.12. Les résultats démontrent que la quantité d'eau liée augmente avec l'âge du coulis quel que soit le type de liant ou le rapport E/L. Une prolongation de l'hydratation de 7 jours permet aux liants de s'hydrater davantage, ce qui augmente la quantité d'eau chimiquement liée aux hydrates.

Les résultats de la figure 5.7 indiquent que les résultats obtenus pour le ciment Portland pur à 14 jours (0,110-0,143) sont considérablement inférieurs aux valeurs (0,230-0,240) couramment citées dans la littérature [Copeland, 1960; Molina, 1993]. Cette différence s'explique par la maturité relativement faible des coulis après 14 jours. Ce point sera discuté plus en détail au paragraphe 5.4.

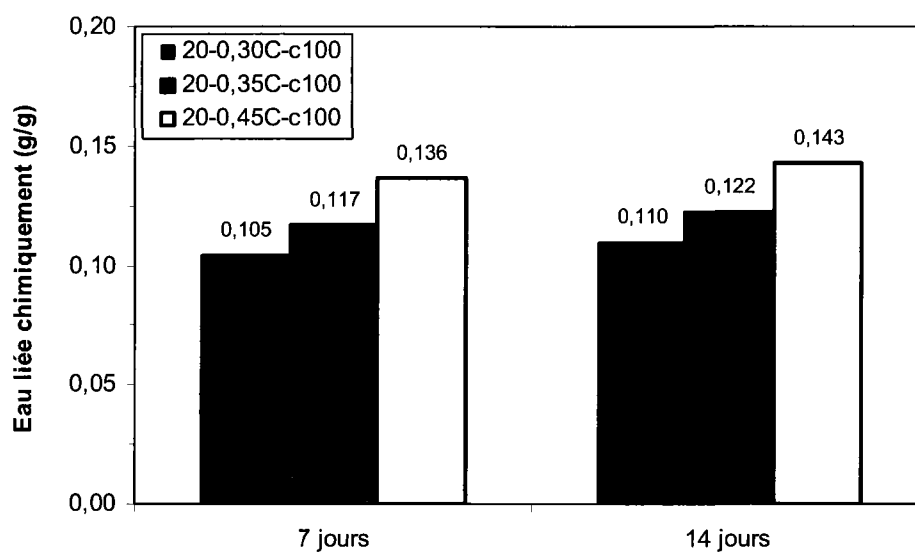


Figure 5. 7 - Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis de référence (T = 20°C)

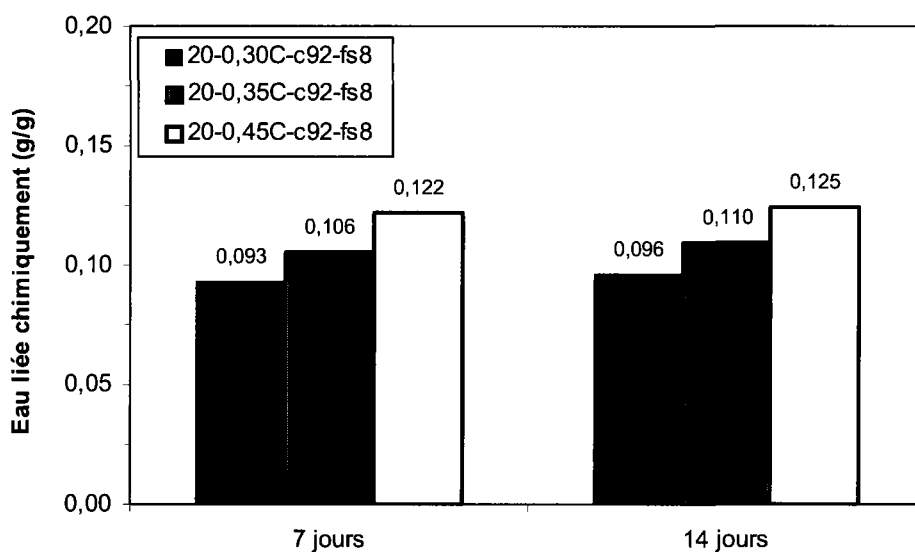


Figure 5. 8 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec fumée de silice (T = 20°C)

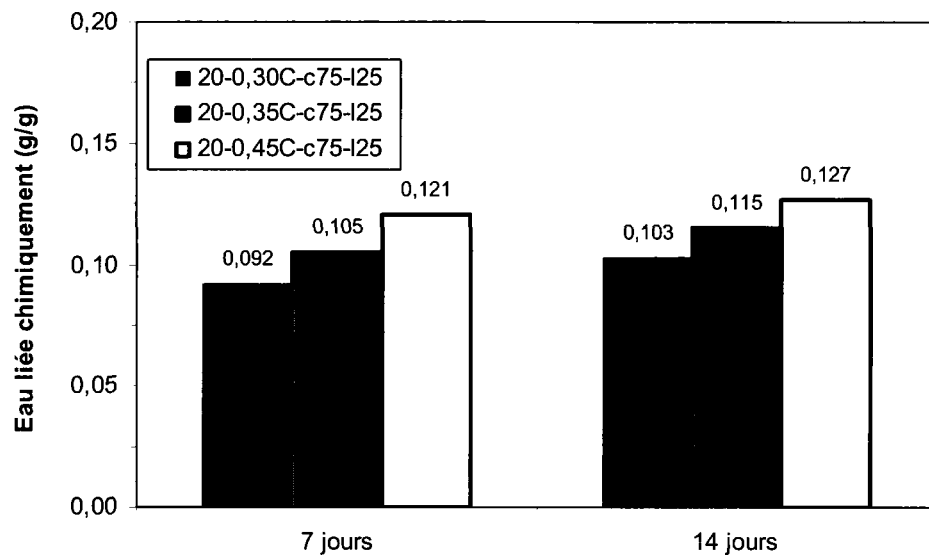


Figure 5. 9 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 25% de laitier (T = 20°C)

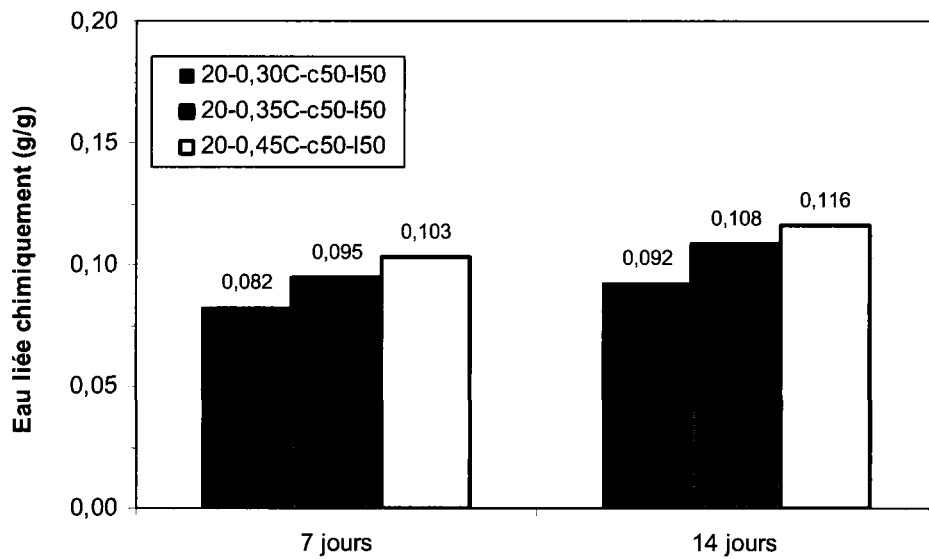


Figure 5. 10 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 50% de laitier (T = 20°C)

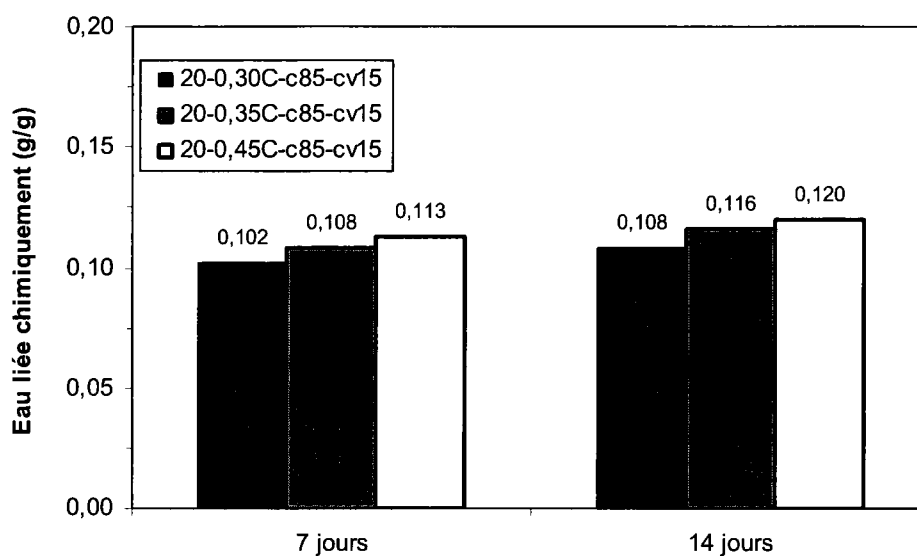


Figure 5. 11 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 15% de cendre volante (T = 20°C)

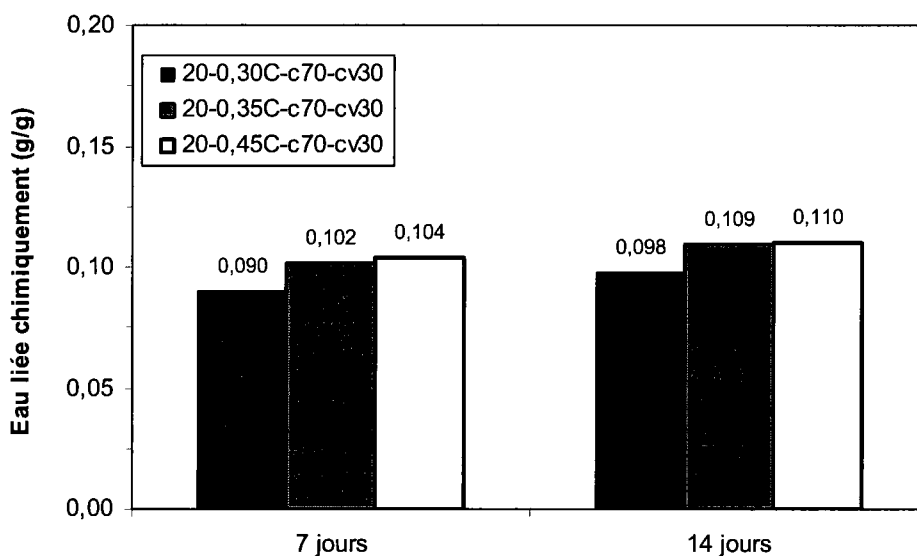


Figure 5. 12 – Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis avec 30% de cendre volante (T = 20°)

Les résultats présentés aux figures 5.7 à 5.12 démontrent également que la quantité d'eau liée après 14 jours d'hydratation augmente avec l'augmentation du rapport E/L quel que soit le type de liant.

5.2. 2 Effet de la température sur la quantité d'eau liée chimiquement

L'influence de la température sur la quantité d'eau liée mesurée dans les coulis dont le rapport E/L est égal à 0,30, 0,35 et 0,45, est présentée aux figures 5.13 à 5.15. Les résultats montrent que la quantité d'eau liée augmente avec l'augmentation de la température, quel que soit le type de liant ou le rapport E/L. Une température élevée accélère l'hydratation et le durcissement des coulis, ce qui est déjà montré par les courbes de conductivité électrique (Figures 4.21 à 4.26). Les liants sont donc activés par la température élevée et réagissent davantage pour former plus de produits d'hydratation, ce qui résulte en une plus grande quantité d'eau liée chimiquement.

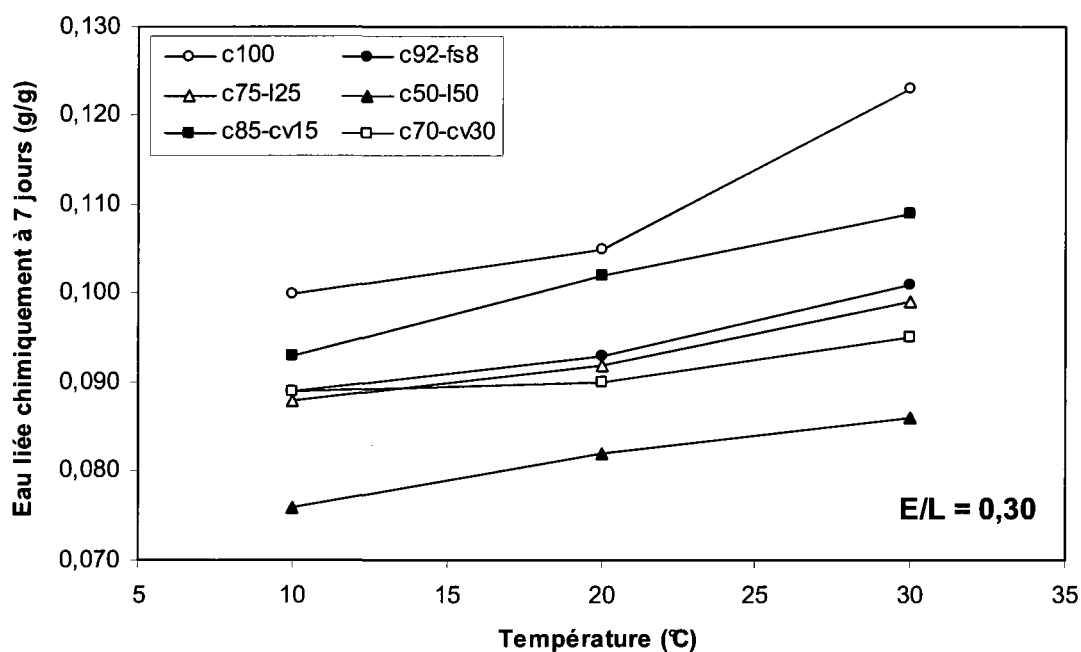


Figure 5. 13 - Eau liée chimiquement des coulis de rapport E/L = 0,30

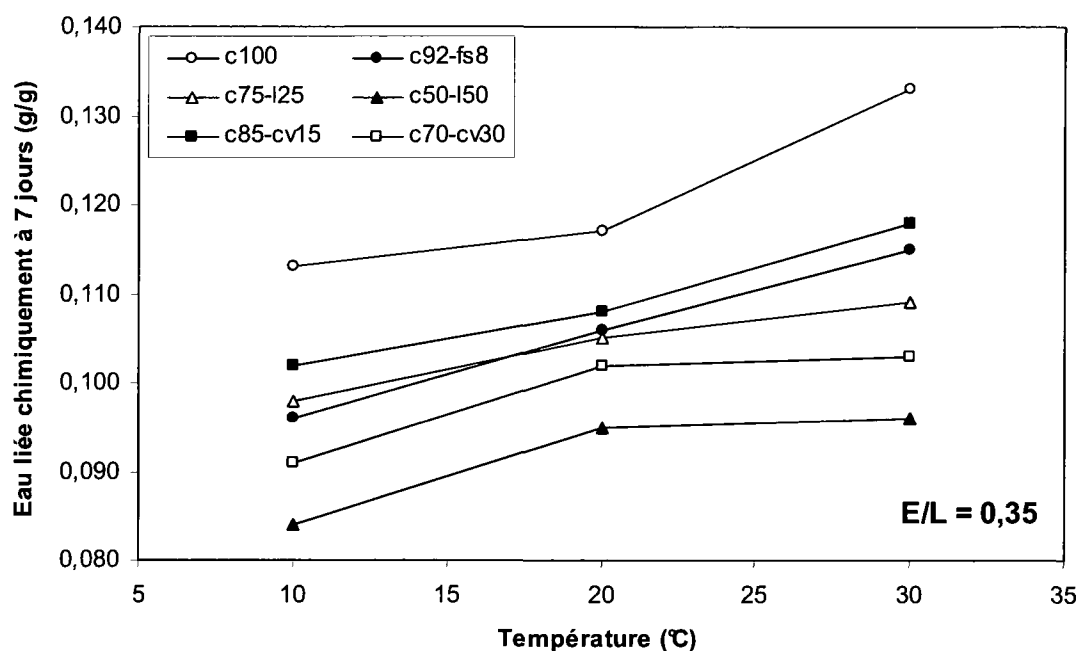


Figure 5. 14 - Eau liée chimiquement des coulis de rapport E/L = 0,35

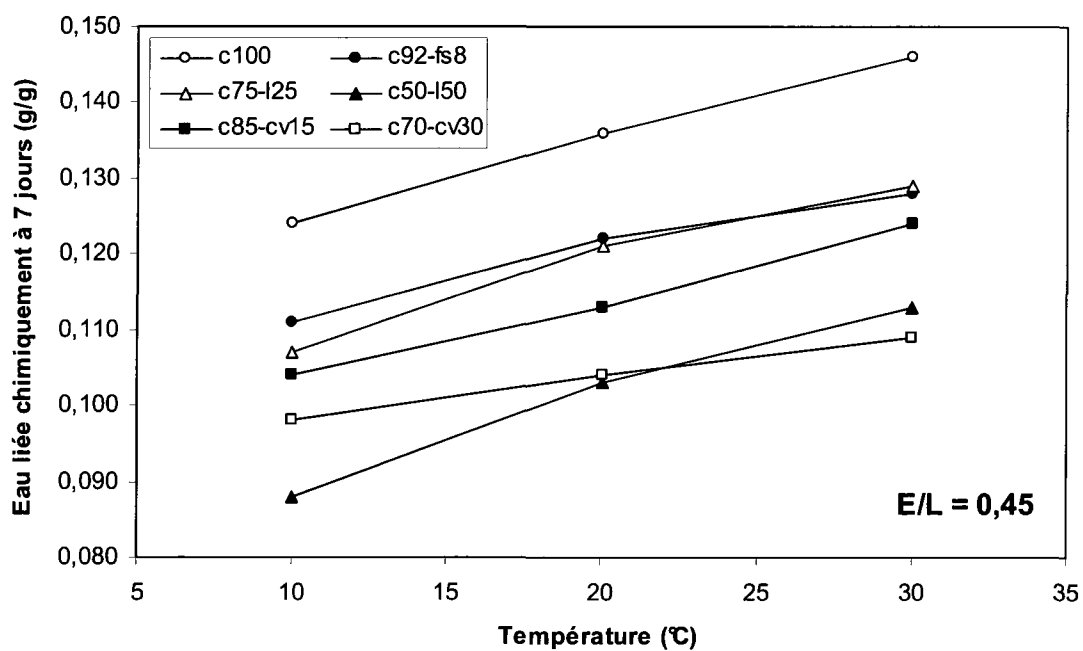


Figure 5. 15 - Eau liée chimiquement des coulis de rapport E/L = 0,45

5.2. 3 Effet du type de liant sur la quantité d'eau liée chimiquement

L'influence du type de liant sur la quantité d'eau liée chimiquement est présentée aux figures 5.13 à 5.15. La quantité d'eau liée chimiquement après 7 jours d'hydratation à 10°C est la plus élevée pour les coulis de référence et la plus faible pour les coulis avec 50 % de laitier, quel que soit le rapport E/L. Tous les autres liants possèdent des quantités d'eau liée relativement semblables pour un même rapport E/L.

Après 7 jours d'hydratation à 20°C, le liant de référence possède, encore une fois, la quantité d'eau liée chimiquement la plus élevée et le liant avec 50 % de laitier possède la quantité d'eau liée la plus faible, quel que soit le rapport E/L. Cependant, la différence entre les valeurs maximale et minimale de l'eau liée est plus faible comparativement à celle obtenue à 10°C.

À 30°C, le remplacement du ciment Portland par un ajout minéral permet, encore une fois, d'obtenir des liants qui consomment moins d'eau pendant les premiers 7 jours. Pour les rapports E/L de 0,30 et de 0,35 le liant avec 50 % de laitier consomme le moins d'eau comme dans tous les cas précédents. Par contre, dans le cas du rapport E/L de 0,45, c'est le liant avec 30% de cendre volante qui a la quantité d'eau liée la plus faible. Ces résultats suggèrent que l'augmentation de la température active l'hydratation de tous les liants mais que c'est le liant avec 30 % de cendre volante qui est le moins fortement activé par la température.

La figure 5.16 présente les quantités d'eau liée après 14 jours d'hydratation à 20°C. Dans les coulis dont le rapport E/L est égal à 0,30, c'est le liant de référence qui permet d'obtenir la quantité d'eau liée la plus élevée et celui avec 50 % de laitier la quantité d'eau liée la plus faible. Les résultats obtenus pour les autres liants sont situés entre deux extrêmes. Les résultats obtenus à 14 jours sont semblables à ceux obtenus après 7 jours, ce qui pourrait indiquer un manque d'eau de gâchage dans certains mélanges. Dans une telle situation, la réaction d'hydratation ne peut pas se faire à capacité maximale et les quantités d'eau liée aux hydrates ne changent pas beaucoup entre 7 et 14 jours. À partir du rapport 0,35, la quantité d'eau liée augmente dans les coulis au laitier, ce qui indique une activité hydraulique plus importante. Par contre, l'eau liée des coulis avec 30% de cendre volante reste basse. Ce résultat semble logique car le taux de remplacement par la cendre volante est élevé. De plus il s'agit d'un liant de faible réactivité à court terme.

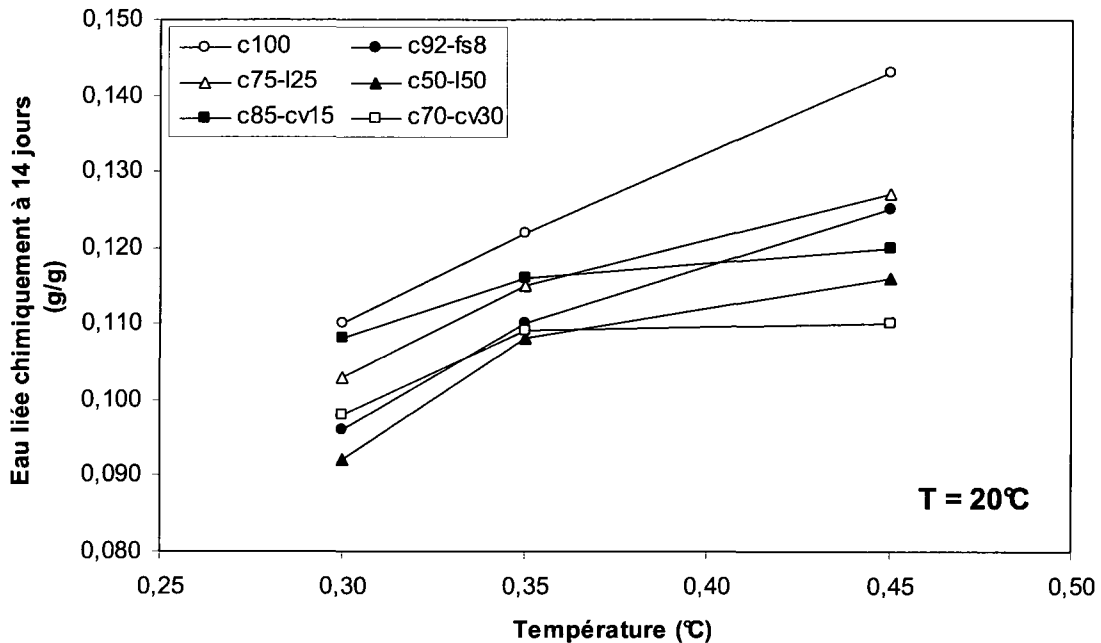


Figure 5. 16 - Eau liée chimiquement à 14 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45 ; T = 20°C)

On peut finalement conclure que le remplacement du ciment Portland de Type 10 par un ajout minéral permet d'obtenir des liants qui consomment moins d'eau après 7 et 14 jours d'hydratation que le ciment Portland pur, quel que soit le rapport E/L ou la température d'essai du retrait endogène. Après 7 jours, le liant avec 50 % de laitier et le liant avec 30 % de cendre volante possèdent les quantités d'eau liée les plus faibles, ce qui pourrait être dû aux taux élevés de remplacement combiné avec une faible réactivité de ces liants pendant les premiers 7 jours d'hydratation. La quantité d'eau liée des liants avec 8 % de fumée de silice, avec 25 % de laitier et avec 15 % de cendre volante est toujours située entre les cas extrêmes. À partir de 7 jours, le laitier commence réagir davantage, tandis que la cendre volante semble être plus inerte jusqu'à 14 jours.

5.3 Eau liée chimiquement des mortiers soumis aux essais de retrait endogène

La quantité d'eau liée chimiquement des mortiers a été déterminée à 7 jours, immédiatement à la fin de l'essai de retrait endogène ($T = 20^{\circ}\text{C}$). Elle a été calculée à l'aide de l'équation 1.12 qui prend en compte la présence du sable dans le mélange. Les quantités d'eau liées des coulis et des mortiers sont présentées à la figure 5.17. On constate que les quantités d'eau consommées par les mortiers sont similaires à celles consommées par les coulis pour le même rapport E/C. Ces résultats sont logiques car le sable peut être considéré comme inerte. Cependant, les mélanges ayant un rapport E/L de 0,30, 0,35 et 0,40 démontrent une augmentation de l'eau liée avec l'augmentation du volume de sable. Ces résultats suggèrent qu'une plus grande quantité de ciment réagit en présence d'un squelette granulaire de sable. Ce comportement pourrait être attribué à une meilleure dispersion des grains de ciment en présence du sable et aussi à la présence des zones de transitions entre la pâte et les grains de sable. Cette zone permet à l'eau de gâchage d'accéder à une plus grande quantité de ciment et de l'hydrater d'avantage.

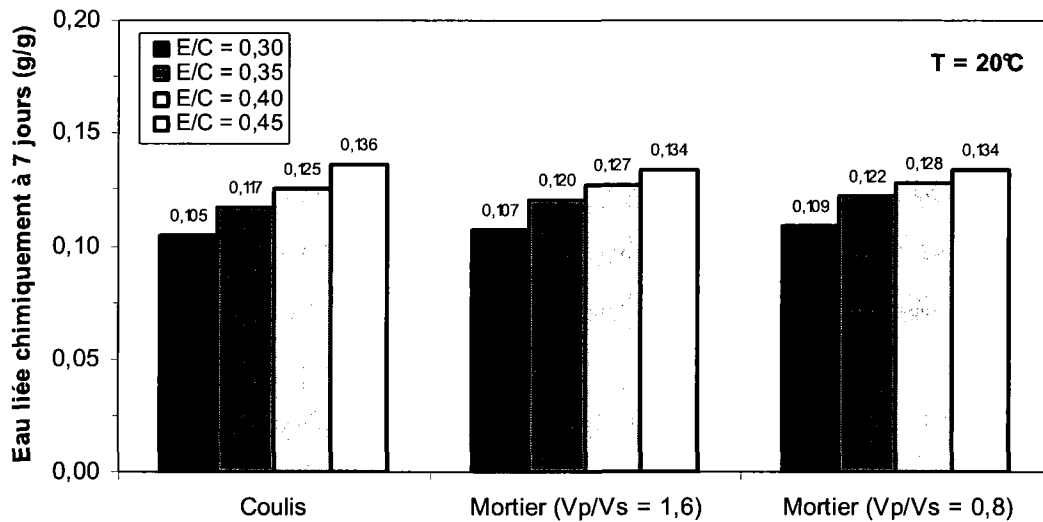


Figure 5. 17 - Eau liée chimiquement des coulis et des mortiers à 7 jours ($T = 20^{\circ}\text{C}$)

5.4 Degré d’hydratation des coulis soumis aux essais de retrait endogène

Le degré d’hydratation des matériaux cimentaires au temps t est défini comme le rapport entre la quantité d’eau liée chimiquement au temps t et la quantité maximale d’eau liée chimiquement à un temps supposé infini (Équation 1.10). Les quantités d’eau liée dans les coulis, soumis aux essais de retrait endogène pendant 7 et 14 jours, sont présentées dans la partie 5.2 de ce chapitre. La détermination de la quantité maximale d’eau liée à un temps supposé infini a été réalisée sur les coulis de rapport $E/L = 3,0$ en se basant sur les expériences de Bentz [1995]. La procédure des essais et les équations utilisées pour la détermination de la quantité maximale d’eau liée sont présentées dans la partie 2.4.2. Le tableau 5.1 montre les résultats obtenus après 30 et 60 jours de mesure.

Tableau 5. 1 - Quantités totales d’eau liée chimiquement dans les coulis

Type de liant	g d’eau/g de liant	
	30 jours	60 jours
100% ciment Portland de Type 10	0,218	0,231
92% ciment – 8% fumée de silice	0,200	0,210
85% ciment – 15% cendre volante	0,190	0,202
70% ciment – 30 % cendre volante	0,167	0,172
75% ciment – 25% laitier	0,219	0,222
50% ciment – 50% laitier	0,210	0,211

Les différences entre les quantités d’eau liée à 30 et à 60 jours sont relativement faibles (1 à 6%). Les valeurs obtenues après 60 jours ont été considérées comme les quantités maximales d’eau liée, puis utilisées pour calculer les degrés d’hydratation de différents liants. La quantité maximale d’eau liée chimiquement aux hydrates des coulis de référence fabriqués uniquement avec du ciment type 10, peut être comparée avec les quantités d’eau liée obtenues à partir des données de Copeland [1960] et Molina [1993] présentées aux tableaux 1.3 et 1.4. Le calcul est basé sur la composition potentielle du ciment présentée au tableau 3.2. À partir des données de Copeland, nous avons calculé une quantité maximale d’eau liée chimiquement de 0,203 g/g de ciment. Par contre, en utilisant les données de Molina, nous avons calculé une quantité

maximale d'eau liée chimiquement de 0,229 g/g de ciment, ce qui est très voisin de 0,231 g/g de ciment obtenu par nos essais. Une fois la quantité maximale d'eau liée chimiquement dans le coulis de référence validée, nous avons décidé d'utiliser les valeurs obtenues pour les autres liants (Tableau 5.1) afin de déterminer leur degré d'hydratation.

Les résultats du tableau 5.1 indiquent que le remplacement de 8 % de ciment Portland par la fumée de silice permet d'obtenir une plus faible proportion maximale d'eau liée chimiquement (0,210 g/g de liant) que celle du ciment Portland pur. Il s'agit d'une diminution de 9 %, ce qui est très voisin du taux de remplacement. Ce résultat suggère que la réaction pouzzolanique ne consomme pas d'eau, sauf celle contenue dans la portlandite, conformément aux résultats de Sellevold et Justness [1992].

L'utilisation de la cendre volante produit les proportions maximales d'eau liée chimiquement les plus faibles (0,202 et 0,172 g/g de liant). Le remplacement de 15 % et de 30 % du ciment par la cendre volante engendre respectivement une baisse de 13 % et de 26 % de la proportion d'eau liée chimiquement. Ces valeurs, très similaires aux taux de remplacement, suggèrent, d'une part, que la cendre volante a peut être très peu réagi à 60 jours ou, d'autre part, que son hydratation ne consomme que très peu d'eau.

En présence du laitier, la proportion maximale d'eau liée chimiquement (0,222 et 0,211 g/g de liant) est légèrement inférieure à celle du ciment Portland. Pour les taux de remplacement de 25 % et de 50 % de laitier, la proportion d'eau liée chimiquement baisse de 4 % et de 9 % respectivement. Ces données suggèrent que l'hydratation de 1 g de laitier consomme une quantité d'eau très similaire à celle consommée par 1 g de ciment Portland.

5.4.1 Effet du rapport E/L et de l'âge du coulis sur le degré d'hydratation

Le degré d'hydratation des coulis de référence à la fin de l'essai du retrait endogène (7 jours) est présenté à la figure 5.18. Le degré d'hydratation des coulis de référence est compris entre 43 % et 63 %. Il augmente graduellement avec l'augmentation du rapport E/L quelle que soit la température de l'essai du retrait endogène. Quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45, le degré d'hydratation augmente de 19 % à 31 %.

La figure 5.19 présente le degré d'hydratation des coulis avec 8 % de fumée de silice. Comme dans le cas précédant, le degré d'hydratation augmente avec le rapport E/L. Il est situé entre 42 % et 61 % et passe de 26 % à 32 % quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45.

Le degré d'hydratation des coulis au laitier est présenté aux figures 5.20 et 5.21. Pour le taux de remplacement de 25%, le degré d'hydratation est situé entre 40 % et 58 %. Le degré d'hydratation passe de 20 % à 32 % lorsque le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45. Les coulis avec 50% de laitier possèdent les plus faibles degrés d'hydratation, ils sont situés entre 36 % et 54 %.

Les figures 5.22 et 5.23 présentent le degré d'hydratation des coulis avec cendre volante. Le degré d'hydratation des coulis avec 15% de cendre volante est compris entre 46 % et 61 % et celui des coulis avec 30 % de cendre entre 52 % à 63 %. Le degré d'hydratation est moins influencé par le rapport E/L en présence de la cendre volante. Quand le rapport E/L passe de 0,30 à 0,45, le degré d'hydratation augmente de 10 à 15%.

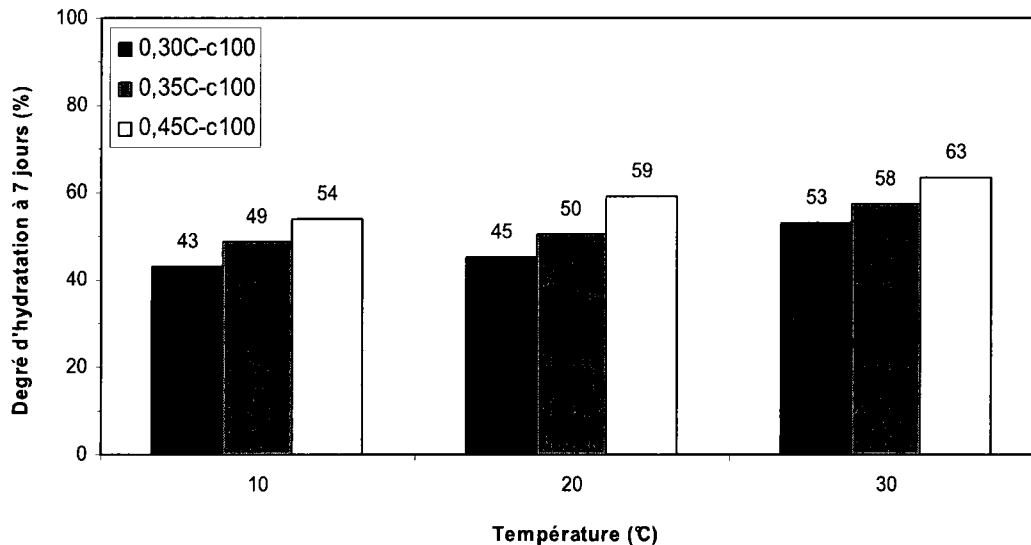


Figure 5. 18 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis de référence

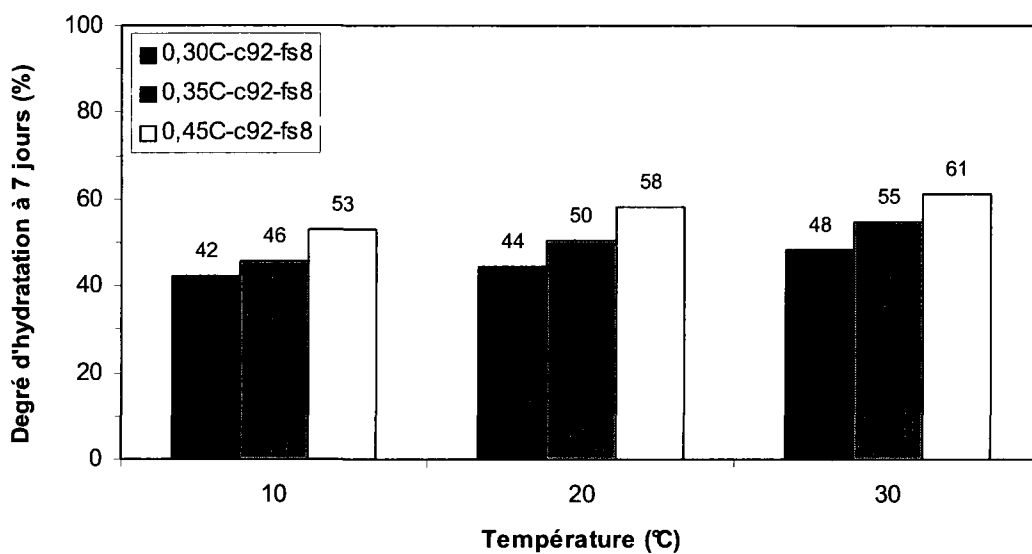


Figure 5. 19 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice

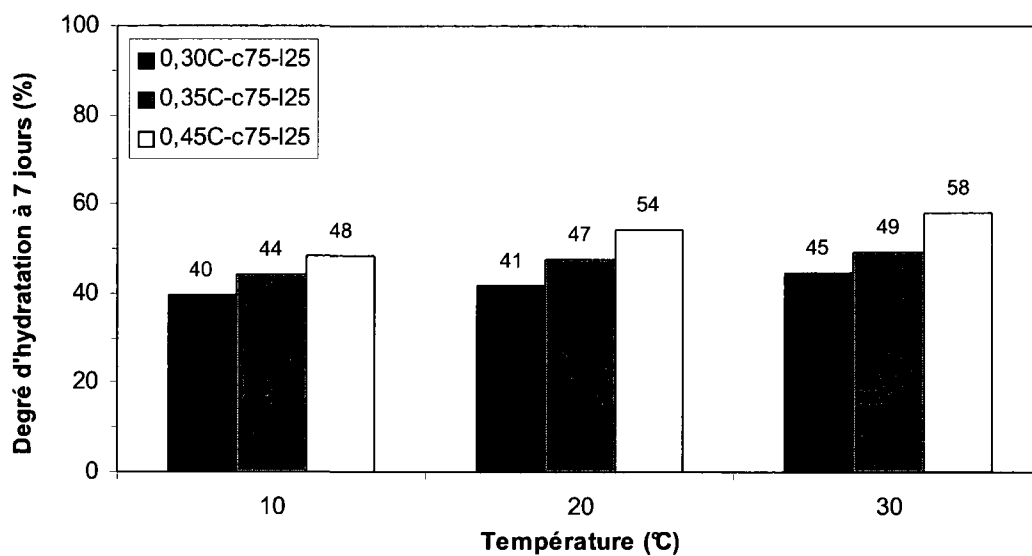


Figure 5. 20 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 25% de laitier

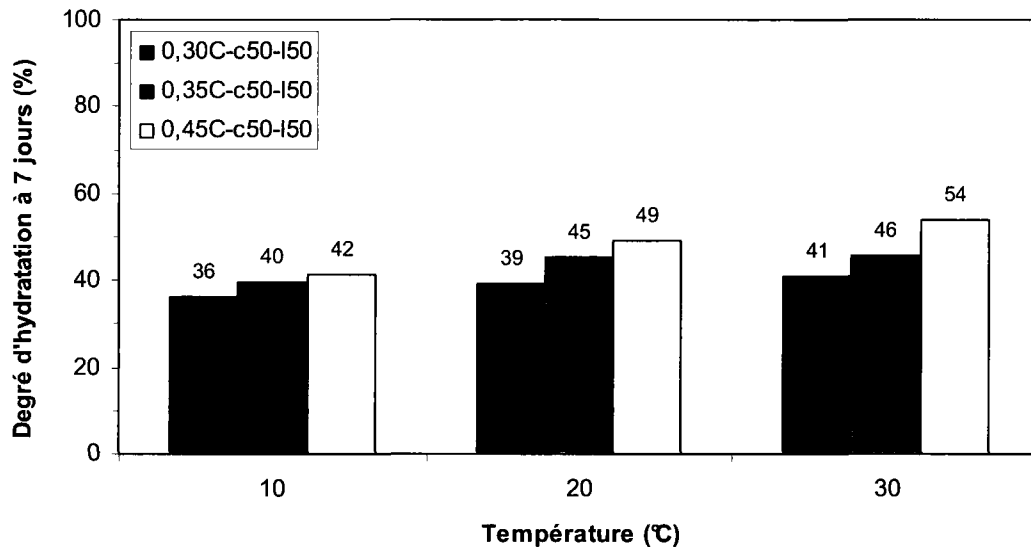


Figure 5. 21 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 50% de laitier

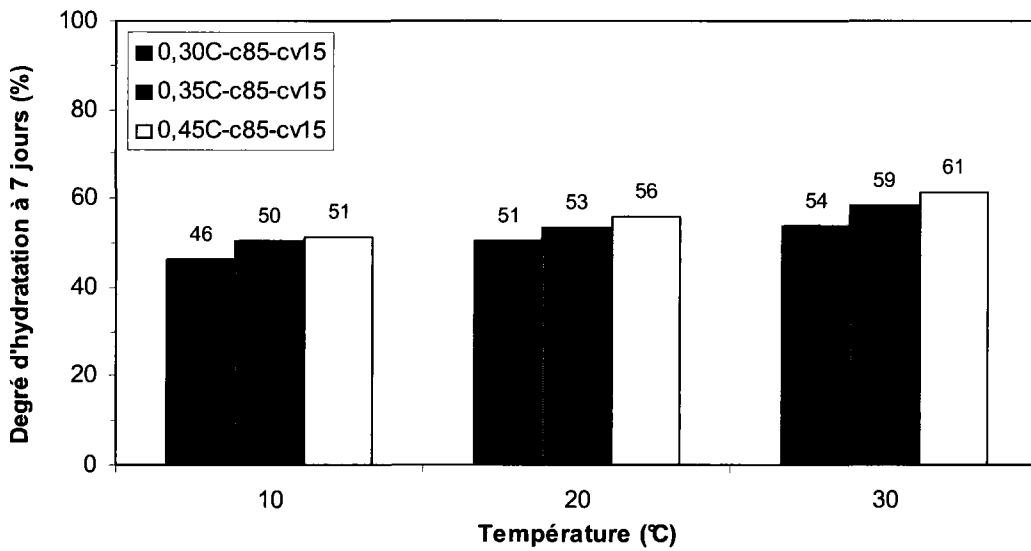


Figure 5. 22 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante

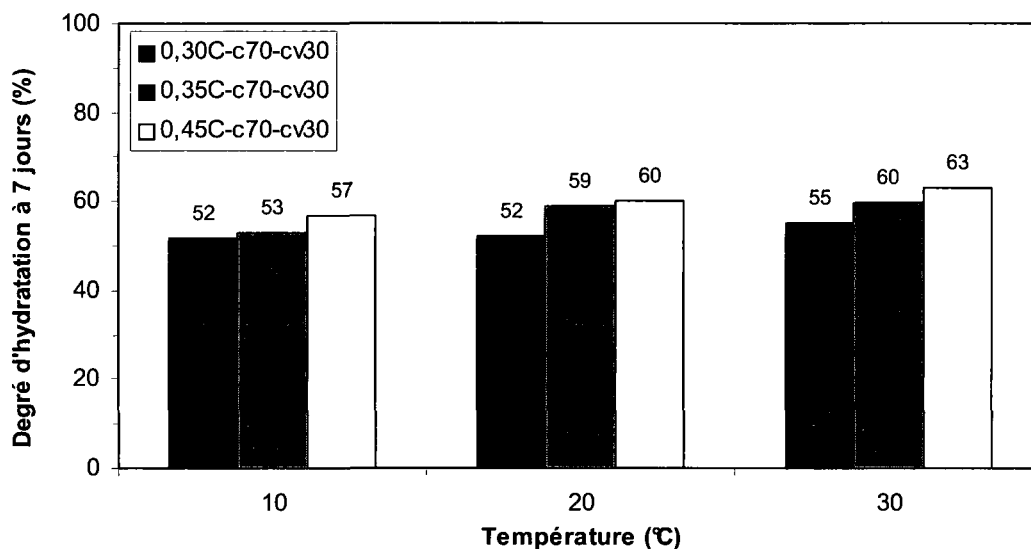


Figure 5. 23 - Degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante

On peut finalement conclure que le degré d'hydratation des coulis après 7 jours d'essai du retrait endogène augmente avec le rapport E/L, quel que soit le type de liant ou la température. Cependant, cette augmentation varie d'un liant à l'autre (Figure 5.24). Les pourcentages d'augmentation sont similaires pour le liant de référence, le liant avec fumée de silice et le liant avec laitier. Cependant, dans le cas du liant avec cendre volante, l'augmentation du degré d'hydratation est presque 2 fois plus faible comparativement à celles des autres liants. Il semble que la cendre volante diminue l'effet du rapport E/L sur le degré d'hydratation. La raison possible d'un tel comportement est la faible réactivité de la cendre volante pendant les premiers 7 jours d'hydratation. La cendre volante a plutôt un rôle de filler pendant les premiers jours. Selon Lam et coll. [2000], la réactivité de la cendre volante de classe F est d'environ 5 % après 7 jours d'hydratation.

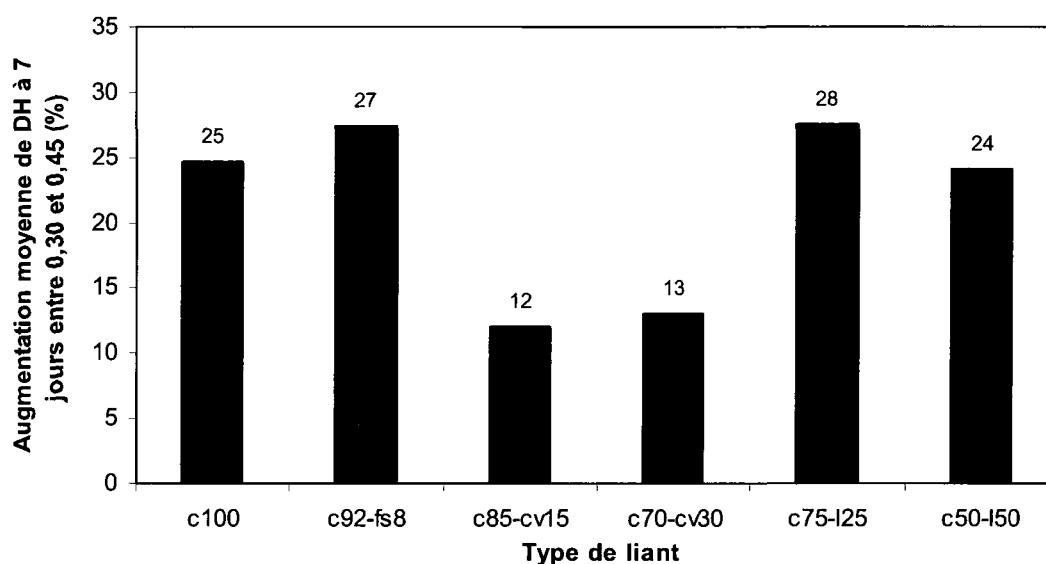


Figure 5. 24 – Augmentation moyenne du degré d'hydratation due à l'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,45 après 7 jours

L'influence de l'âge du coulis sur son degré d'hydratation est présentée aux figures 5.25 à 5.30. Le degré d'hydratation augmente avec l'âge du coulis quel que soit le type de liant. Cependant, cette augmentation varie d'un liant à l'autre. Selon la figure 5.31, le liant avec fumée de silice développe déjà à 7 jours une maturité importante qui n'augmente pas significativement jusqu'à 14 jours. Par contre, les liants au laitier montrent une plus importante augmentation du degré d'hydratation entre 7 et 14 jours. Ce comportement indique que le laitier commence à réagir, en grande partie, après 7 jours d'hydratation. L'augmentation du degré d'hydratation des liants avec cendre volante est inférieure à celle des liants au laitier. Il semble que seulement une partie de la cendre volante commence réagir après 7 jours d'hydratation. Malheureusement, dans le cadre de cette étude, il a été impossible d'évaluer quel pourcentage de laitier ou de cendre volante a pu réagir jusqu'à 14 jours.

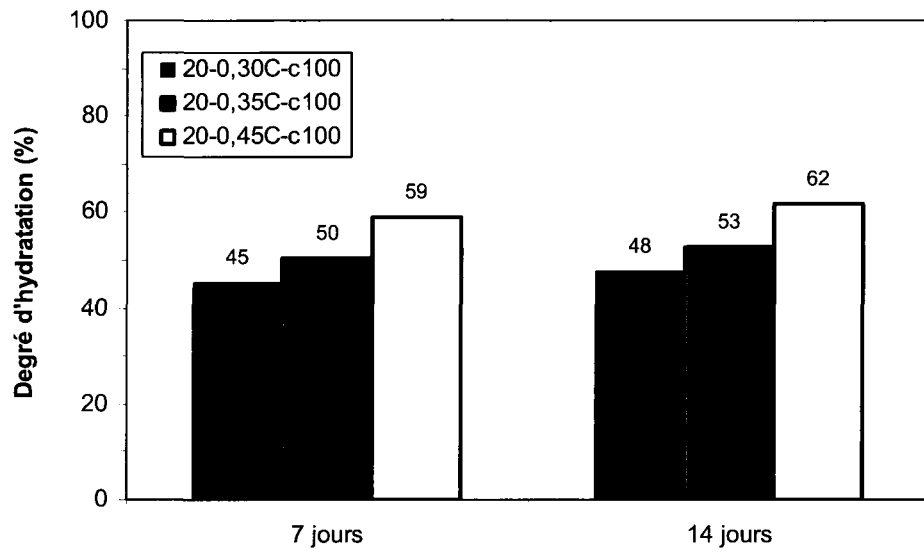


Figure 5. 25 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis de référence

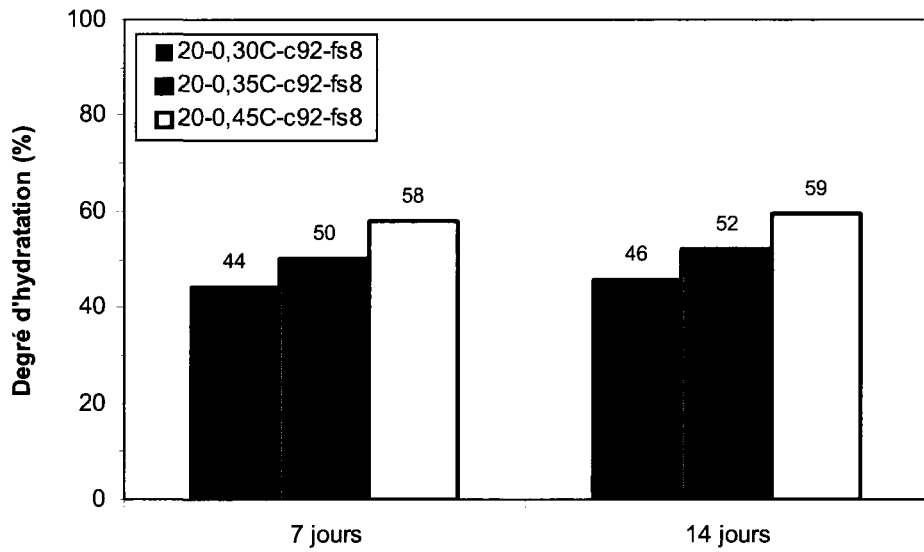


Figure 5. 26 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 8% de fumée de silice

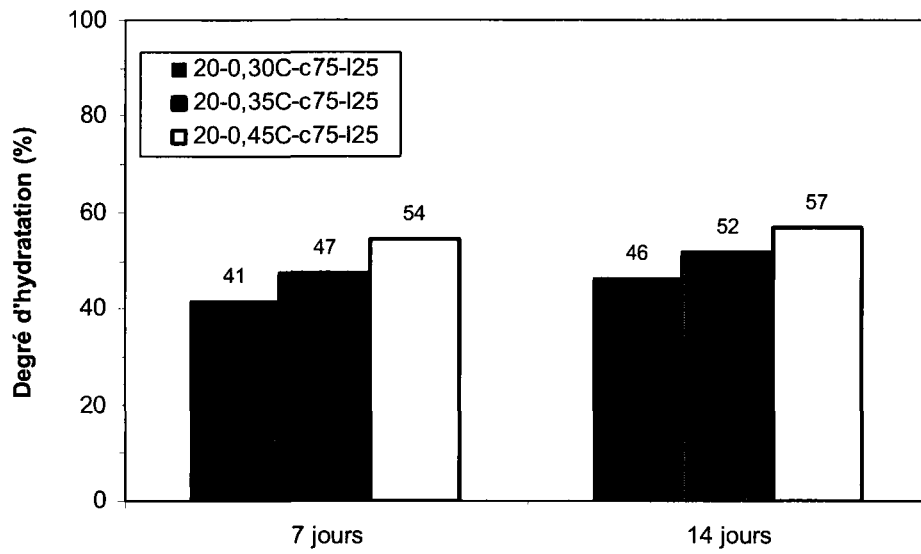


Figure 5. 27 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 25% de laitier

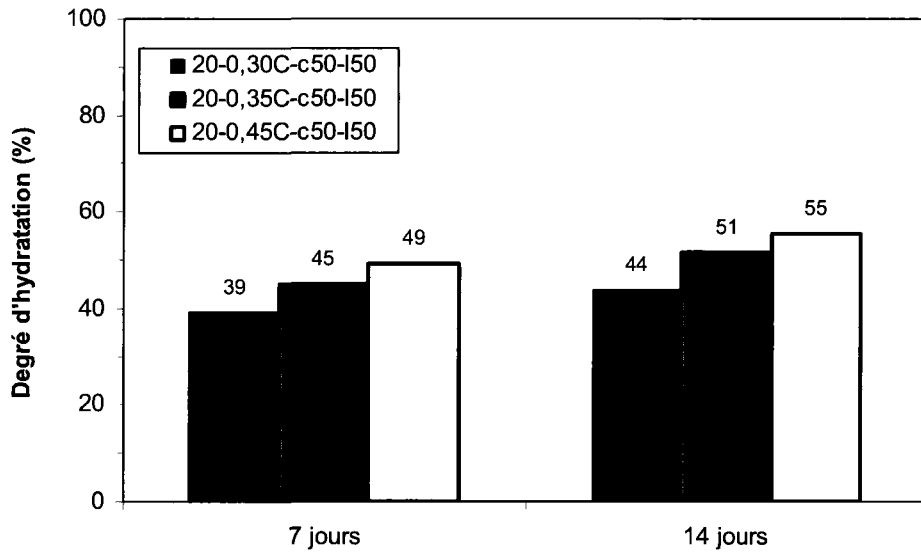


Figure 5. 28 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 50% de laitier

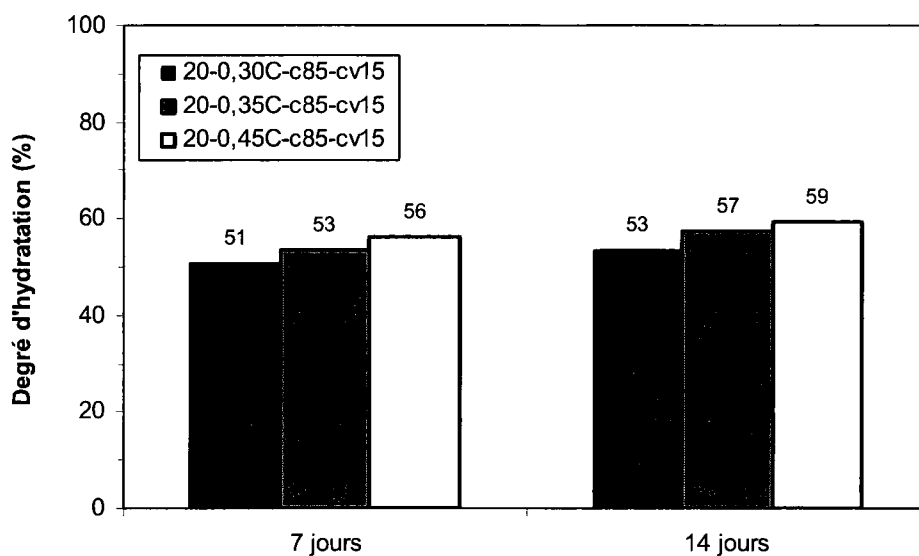


Figure 5. 29 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 15% de cendre volante

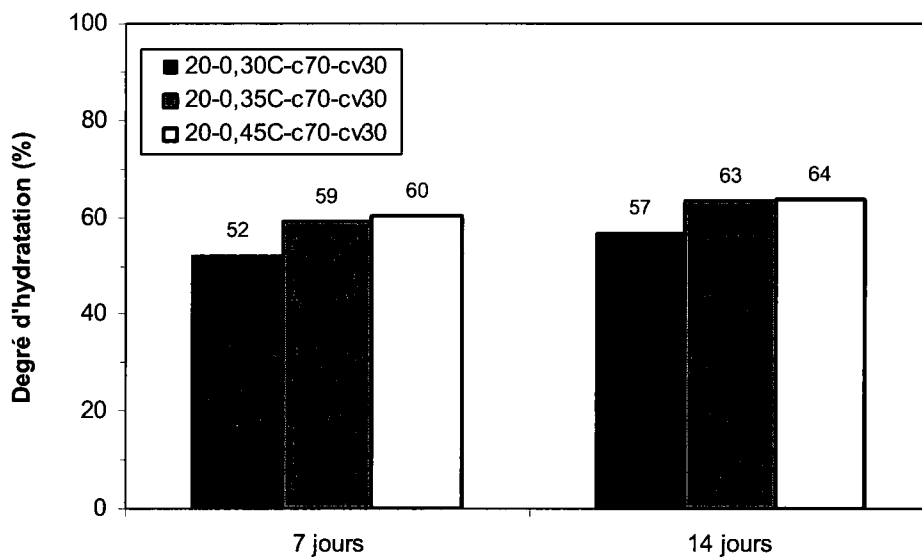


Figure 5. 30 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis avec 30% de cendre volante

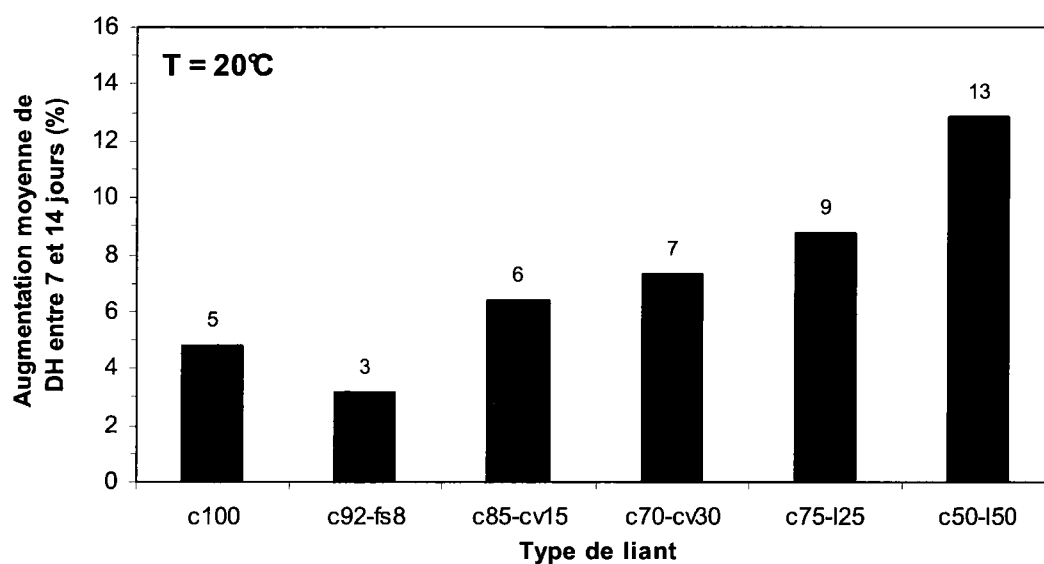


Figure 5. 31 - Augmentation moyenne du degré d'hydratation entre 7 et 14 jours

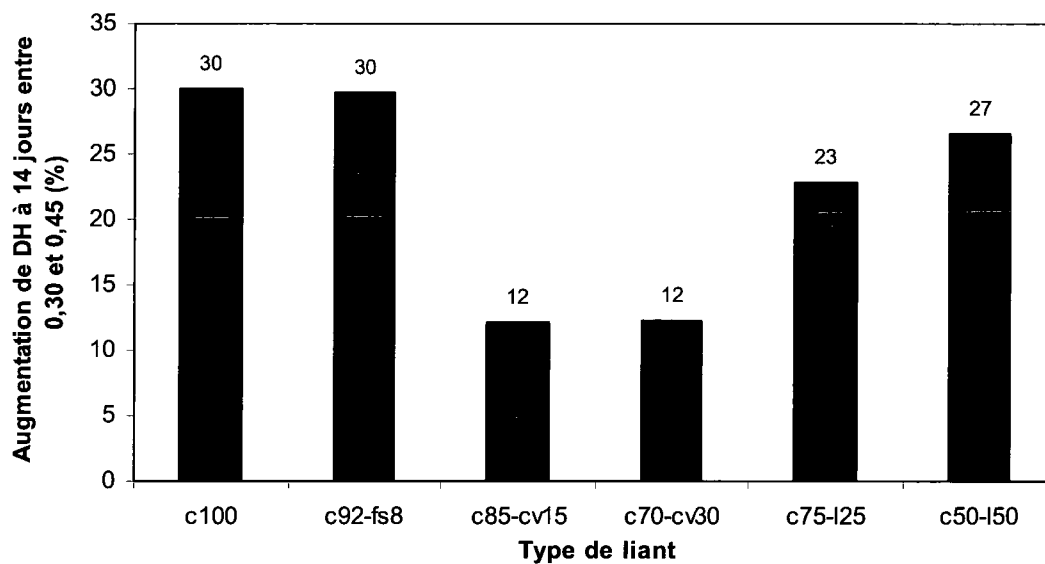


Figure 5. 32 – Augmentation du degré d'hydratation due à l'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,45 après 14 jours (T = 20°C)

5.4. 2 Effet de la température du coulis sur le degré d'hydratation

L'influence de la température sur le degré d'hydratation des coulis ayant un rapport E/L de 0,30, 0,35 et 0,45 est présentée aux figures 5.33 à 5.35. Les résultats démontrent que la réactivité augmente avec l'augmentation de la température, quel que soit le type de liant ou le rapport E/L.

5.4. 3 Effet du type de liant sur le degré d'hydratation des coulis

L'influence du type de liant sur le degré d'hydratation des coulis est présentée aux figures 5.33 à 5.35. Après 7 jours d'hydratation, les coulis avec 30 % de cendre volante possèdent un degré d'hydratation le plus élevé, quel que soit le rapport E/L ou la température d'essai du retrait endogène. La quantité maximale d'eau liée chimiquement est la plus faible dans les coulis avec 30 % de cendre volante (Tableau 5.1), ce qui augmente le degré d'hydratation. Selon Lam et coll. [2000], la réactivité de la cendre volante de classe F est d'environ 5% après 7 jours d'hydratation. Durant les premiers 7 jours, c'est principalement le ciment Portland qui s'hydrate. Les coulis avec 15% de cendre volante possèdent un degré d'hydratation supérieur à celui de la référence lorsque le rapport E/L est de 0,30 et 0,35. L'explication précédente pourrait aussi s'appliquer à ces résultats. Cependant, quand le rapport E/L augmente à 0,45, le degré d'hydratation des coulis de référence devient plus élevé que le degré d'hydratation des coulis avec 15% de cendre volante quelle que soit la température de l'essai du retrait endogène.

Après 7 jours, les degrés d'hydratation des coulis avec 8% de fumée de silice sont inférieurs à ceux des coulis de référence. Il semble que, dans des conditions endogènes, la fumée de silice fait diminuer le degré d'hydratation des coulis, quelle que soit la température. Cependant, cette diminution est relativement faible car elle ne dépasse pas 10%.

Les coulis au laitier possèdent un degré d'hydratation à 7 jours inférieur à celui de la référence, quel que soit le rapport E/L ou la température. De plus, le degré d'hydratation des coulis avec 50% de laitier est toujours le plus faible. Même si les liants au laitier possèdent des taux de remplacement importants qui entraînent une augmentation du réel rapport E/L, on n'observe pas d'augmentation du degré d'hydratation.

Il est possible que les C-S-H formés en présence de la fumée de silice et du laitier contiennent moins d'eau, ce qui fait diminuer le degré d'hydratation de ces coulis.

La réaction d'hydratation des ciments au laitier est complexe. Selon Neville [2000], le laitier réagit premièrement avec les hydroxydes alcalins. Quand la concentration de l'hydroxyde de calcium (CH) atteint un certain niveau, la réaction du laitier avec l'hydroxyde de calcium devient dominante et résulte en formation de C-S-H. Breugel et coll. [2006] ont démontré que le degré d'hydratation du liant au laitier diminue quand le dosage du laitier augmente. Nos résultats (Figures 5.33 à 5.35) démontrent aussi que les degrés d'hydratation des coulis avec 25% de laitier sont toujours supérieurs aux degrés d'hydratation des coulis avec 50% de laitier.

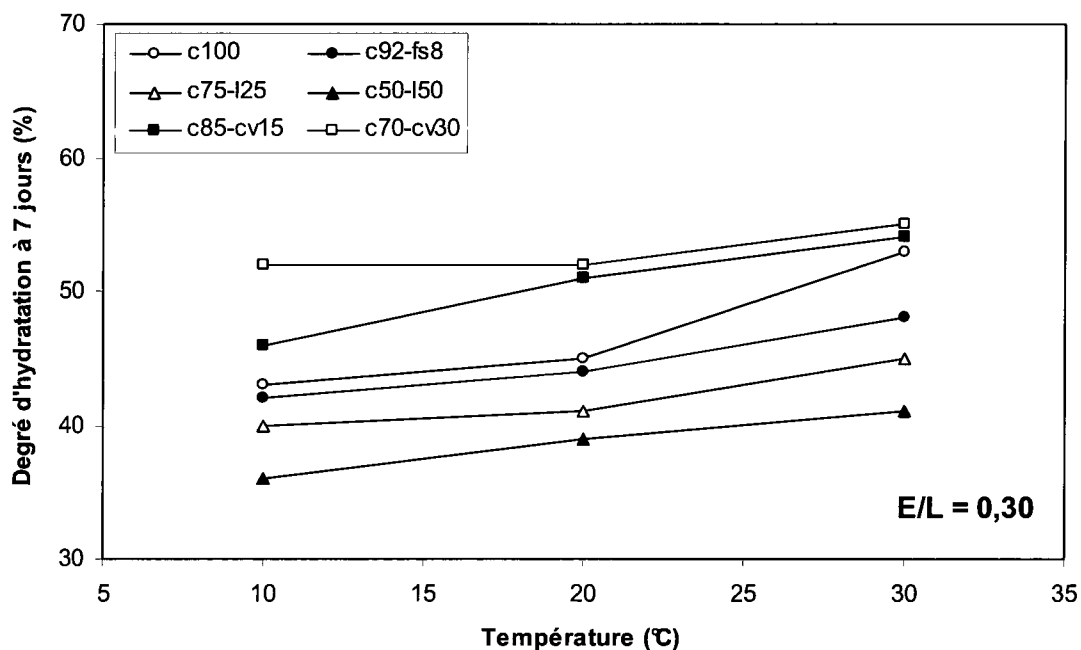


Figure 5. 33 - Degré d'hydratation à 7 jours pour les différentes températures (E/L = 0,30)

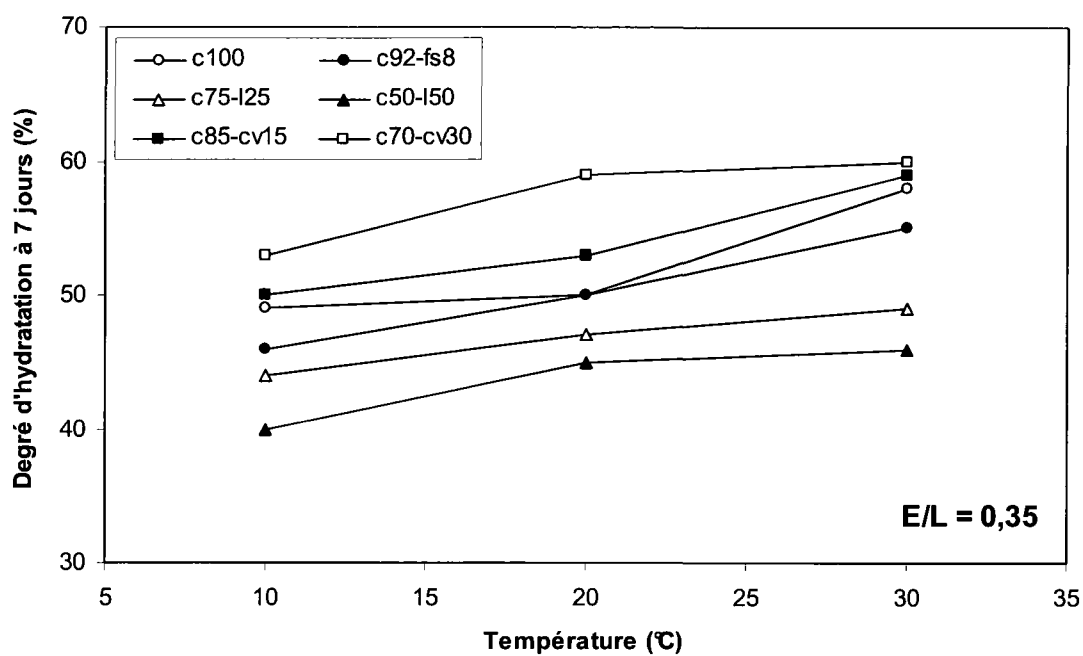


Figure 5. 34 - Degré d'hydratation à 7 jours pour les différentes températures (E/L = 0,35)

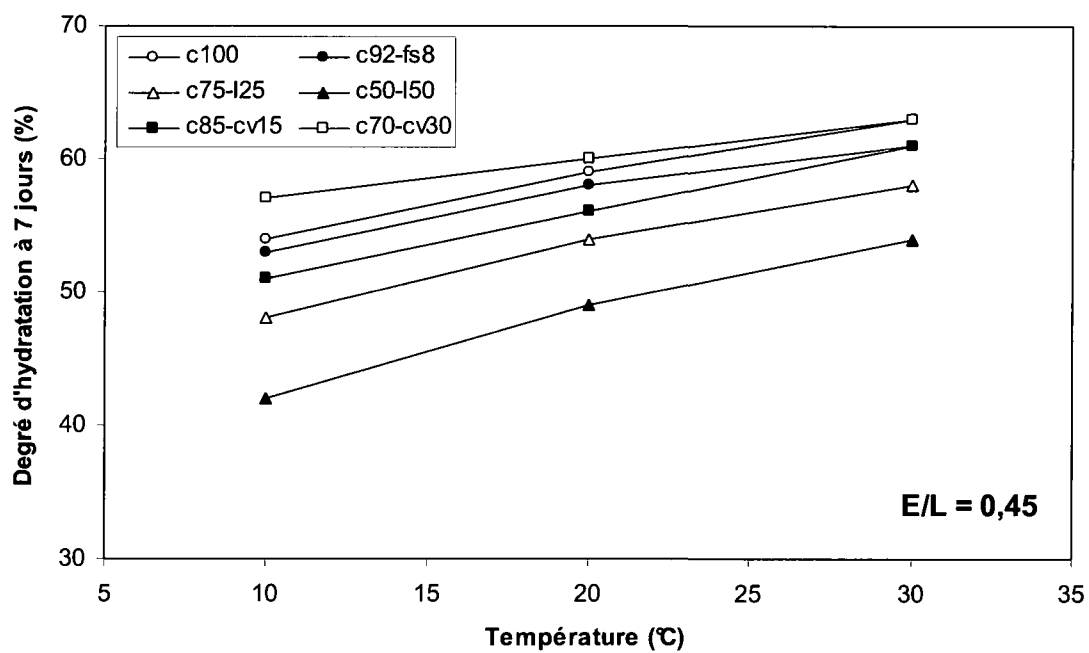


Figure 5. 35 - Degré d'hydratation à 7 jours pour les différentes températures (E/L = 0,45)

Quand on compare le degré d'hydratation du coulis de référence à 14 jours avec le degré d'hydratation des coulis avec cendre volante ou avec fumée de silice (Figure 5.36), on constate les mêmes comportements. Par contre, le comportement du coulis au laitier change après 14 jours d'hydratation. Pour un taux de remplacement de 25%, le degré d'hydratation se rapproche de celui de la référence. Pour un taux de remplacement de 50%, les degrés d'hydratation sont, encore une fois, les plus faibles.

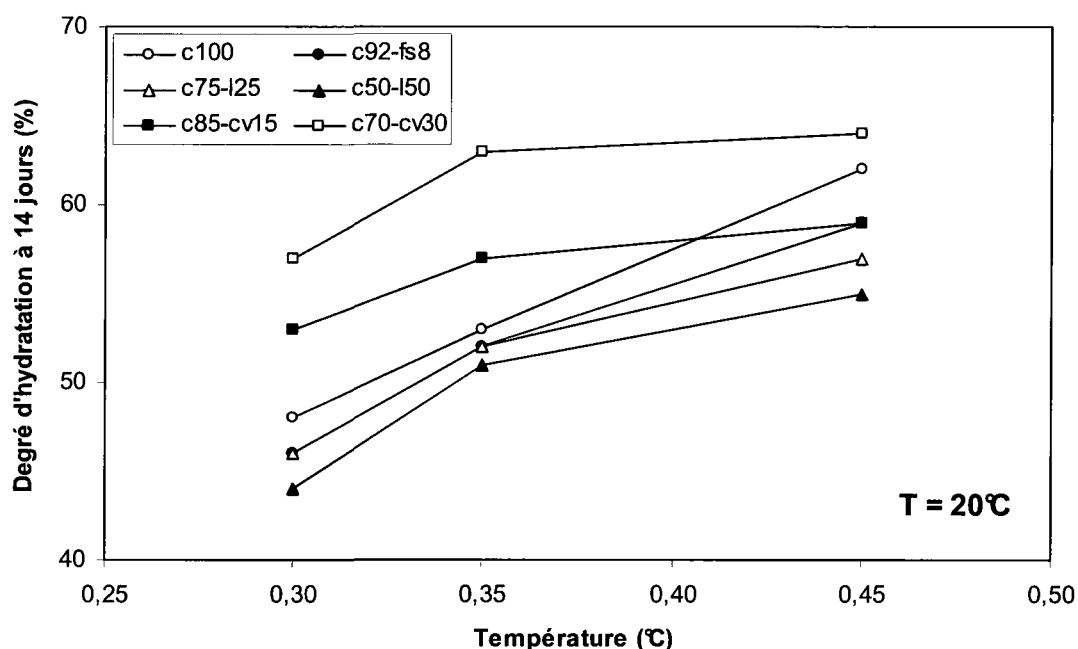


Figure 5.36 - Degré d'hydratation des coulis à 14 jours ($E/L = 0,30$ à $0,45$; $T = 20^{\circ}\text{C}$)

5.5 Degré d'hydratation des mortiers soumis aux essais de retrait endogène

Le degré d'hydratation des mortiers a été déterminé à 7 jours, soit à la fin de l'essai de retrait endogène à 20°C . Le degré d'hydratation a été calculé en utilisant l'équation 1.10. La quantité d'eau liée chimiquement après 7 jours d'hydratation a été calculée à l'aide de l'équation 1.12 qui prend en compte la présence du sable dans le mélange. Les degrés d'hydratation des coulis de référence et des mortiers sont présentés à la figure 5.37.

On constate que les degrés d'hydratation des coulis et des mortiers sont similaires, pour un même rapport E/C. Cependant, pour un même E/C, on observe une très légère augmentation du degré d'hydratation lorsqu'on ajoute du sable dans le coulis. Il est possible que la meilleure dispersion des grains de ciment en présence du sable et l'eau retenue dans la zone de transition pâte-granulat permettent d'augmenter le degré d'hydratation [Holt, 2001].

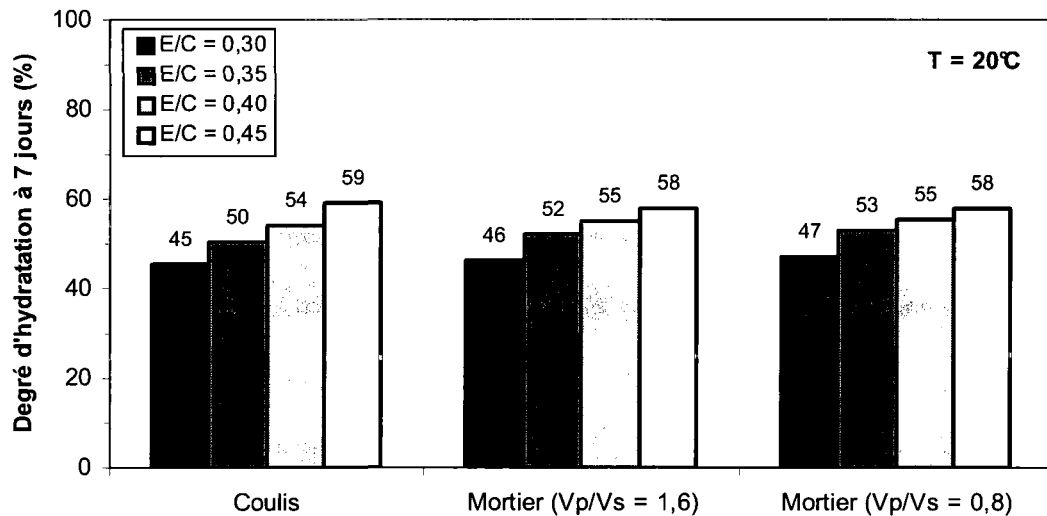


Figure 5. 37 - Degré d'hydratation des coulis et des mortiers à 7 jours (T = 20°C)

5. 6 Eau liée chimiquement et degré d'hydratation des coulis soumis aux essais de retrait chimique

La quantité d'eau liée chimiquement dans les coulis soumis aux essais de retrait chimique a été déterminée en utilisant la même procédure que celle utilisée précédemment. Les essais de retrait chimique ont été réalisés à 20°C avec des coulis de rapport E/L = 0,45. Tous les types de liant proposés dans le programme expérimental ont été testés.

5.6. 1 Effet de l'âge du coulis et du type de liant sur la quantité d'eau liée chimiquement

L'influence de la maturité du coulis sur la quantité d'eau liée est présentée à la figure 5.38. La quantité d'eau liée augmente avec l'âge du coulis quel que soit le type de liant. Entre 7 et 14 jours, la quantité d'eau liée chimiquement augmente de 1 % (avec fumée de silice) à 7 % (avec 50 % de laitier).

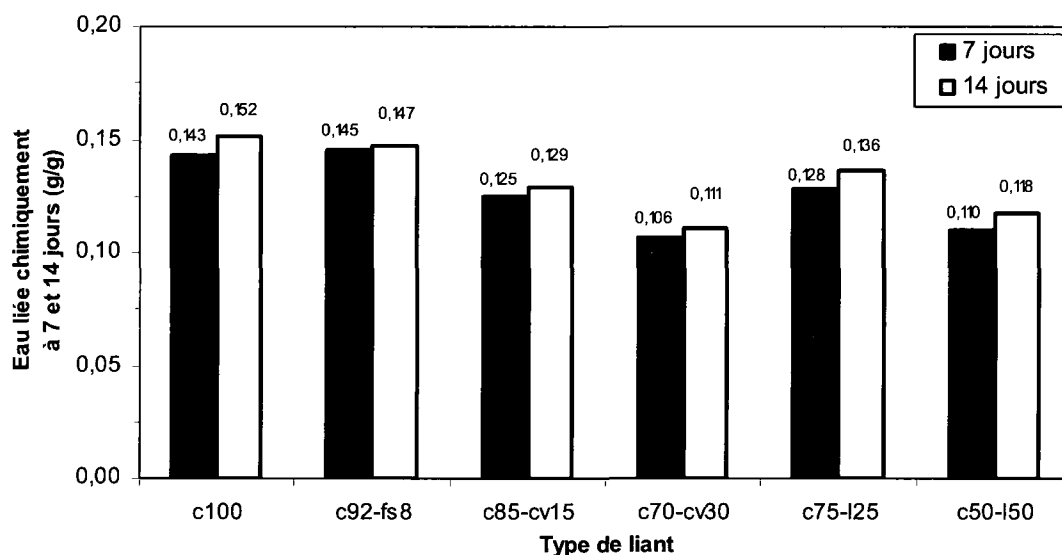


Figure 5. 38 - Eau liée chimiquement à 7 et à 14 jours des coulis soumis aux essais de retrait chimique ($E/L = 0,45$ et $T = 20^{\circ}\text{C}$)

La figure 5.38 montre l'influence du type de liant sur la quantité d'eau liée chimiquement. Après 7 ou 14 jours d'hydratation sous l'eau, le liant avec fumée de silice possède une quantité d'eau liée équivalente à celle de la référence, tandis que la quantité d'eau liée des coulis avec cendre volante ou laitier est inférieure à celle de la référence. Dans le cas des coulis avec cendre volante ou laitier, la quantité d'eau liée est plus faible lorsque le taux de remplacement du ciment est plus élevé. De plus, les quantités d'eau liées dans les coulis avec laitier sont supérieures à celles des coulis avec cendre volante.

5.6. 2 Effet de l'âge du coulis et du type de liant sur le degré d'hydratation

Le degré d'hydratation des coulis soumis aux essais de retrait chimique a été calculé selon la procédure présentée au paragraphe 1.5. La figure 5.39 présente les degrés d'hydratation des coulis après 7 et 14 jours.

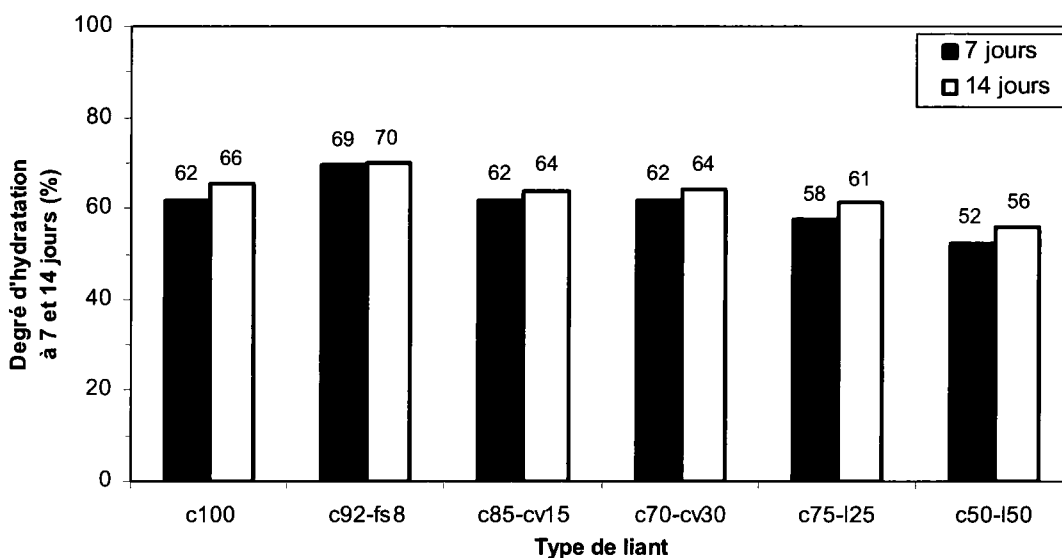


Figure 5. 39 - Degré d'hydratation à 7 et à 14 jours des coulis soumis aux essais de retrait chimique ($E/L = 0,45$ et $T = 20^{\circ}\text{C}$)

Les résultats de la figure 5.39 montrent que le degré d'hydratation augmente avec l'âge du coulis quel que soit le type de liant. Cependant, dans le cas du liant avec 8% de fumée de silice, les degrés d'hydratation à 7 et 14 jours sont pratiquement égaux. Ces résultats suggèrent que le liant avec fumée de silice réagit rapidement et développe une maturité importante après 7 jours. Selon Neville [2000], la moitié de la fumée de silice réagit en 24 heures et les deux tiers en trois jours lorsque la masse du fumée de silice correspond à 10% de la masse totale de liant. Le degré d'hydratation des liants avec cendre volante n'augmente que 3 % entre 7 et 14 jours. Ce comportement ne peut pas être relié à une maturité élevée du liant après 7 jours d'hydratation, puisque la réactivité de la cendre volante de classe F est d'environ 5% à cette échéance [Lam et coll., 2000]. Cette faible augmentation montre que, même après 14 jours, la réactivité de la

endre volante demeure très faible. La faible augmentation du degré d'hydratation entre 7 et 14 jours peut aussi résulter du rapport E/L réel plus élevé (0,53 pour 15 % de cendre volante et 0,64 pour 30 % de cendre volante) des coulis avec cendre volante. Ce rapport E/L plus élevé facilite l'hydratation du ciment Portland au jeune âge. Dans le cas des coulis de référence, nous avons mesuré une augmentation du degré d'hydratation de 6 % indiquant une réactivité continue du ciment dans le temps. Les degrés d'hydratation des liants au laitier augmentent de 5 % à 8 % entre 7 et 14 jours. Ces résultats démontrent que le laitier commence réagir d'avantage à partir de 7 jours d'hydratation.

La figure 5.46 permet aussi de comparer les degrés d'hydratation des différents liants qui s'hydratent sous l'eau pendant 7 et 14 jours. Après 7 jours, le coulis de référence et les coulis à la cendre volante possèdent les mêmes degrés d'hydratation. Étant donné que la cendre volante est pratiquement inerte jusqu'à 7 jours, on peut conclure que, dans le cas d'hydratation sous l'eau, il existe un rapport E/L critique à partir duquel le degré d'hydratation augmente très peu ou pas de tout. Le liant avec fumée de silice permet d'obtenir les degrés d'hydratation les plus élevés indiquant une grande réactivité de la fumée de silice au jeune âge. La réaction pouzzolanique s'ajoute à la réaction d'hydratation ce qui produit une plus grande quantité de C-S-H. Les degrés d'hydratation des coulis au laitier sont les plus faibles quel que soit l'âge du coulis. Ce comportement est prononcé dans les mélanges qui contiennent 50% de laitier. Les résultats semblables ont été obtenus avec les échantillons soumis aux essais de retrait endogène. La diminution du degré d'hydratation avec l'augmentation du dosage en laitier a été déjà observée par Breugel et coll. [2006].

5.7 Comparaison entre le degré d'hydratation des coulis soumis aux essais de retrait endogène et de retrait chimique

La comparaison entre le degré d'hydratation des coulis soumis aux essais de retrait endogène et de retrait chimique a été réalisée à partir des coulis de rapport E/L = 0,45. Les essais de retrait endogène et de retrait chimique ont été réalisés à 20°C. Les résultats sont présentés aux figures 5.40 à 5.41.

Les degrés d'hydratation mesurés à la fin des essais de retrait chimique (Figures 5.40 et 5.41) sont toujours supérieurs aux degrés d'hydratation mesurés à la fin des essais de retrait endogène. Un tel comportement est principalement relié aux conditions d'essai. Lors de l'essai de retrait chimique, l'échantillon est constamment en contact avec de l'eau. De plus, l'échantillon est de très petite dimension (pastilles de 65 mm de diamètre et de 10 mm d'épaisseur). Dans ces conditions, le liant a la possibilité de s'hydrater davantage, d'où le degré d'hydratation plus élevé.

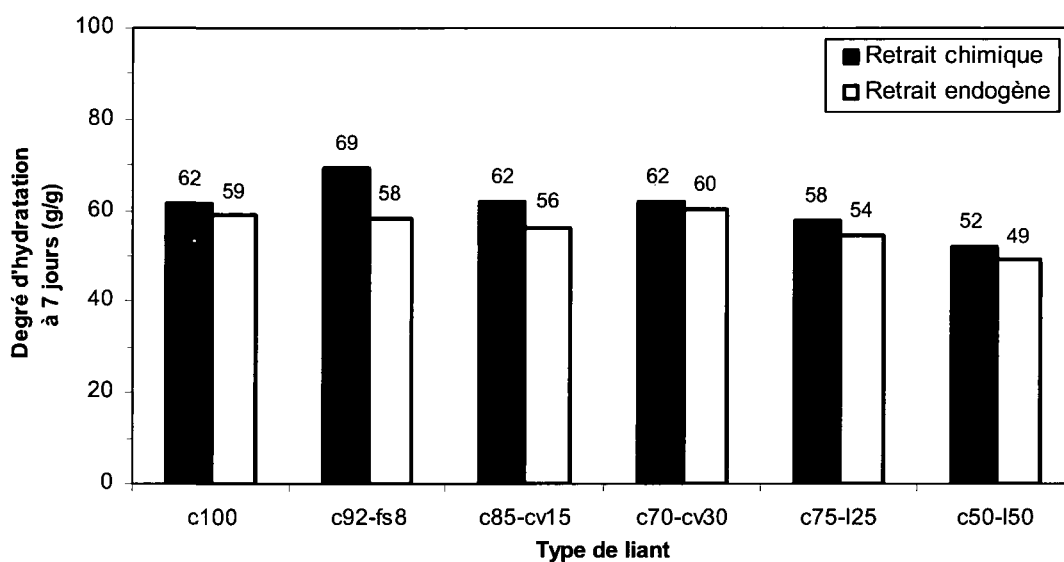


Figure 5. 40 - Degré d'hydratation à 7 jours suite aux essais de retrait chimique et de retrait endogène ($E/L = 0,45$ et $T = 20^{\circ}\text{C}$)

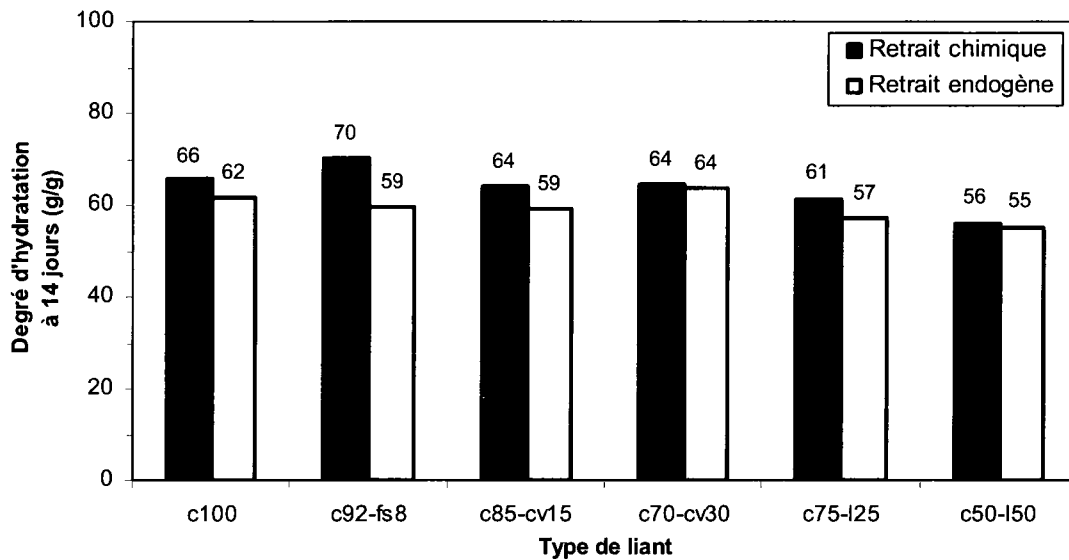


Figure 5. 41 - Degré d'hydratation à 14 jours suite aux essais de retrait chimique et de retrait endogène (E/L = 0,45 et T = 20°C)

La figure 5.42 présente la différence entre les degrés d'hydratation (7 et 14 jours) mesurés à la fin de l'essai de retrait endogène et à la fin de l'essai de retrait chimique. Cette différence dépend fortement du type de liant. Le plus fort écart a été obtenu avec le liant contenant 8 % de fumée de silice. Le plus faible degré d'hydratation en condition endogène peut résulter du fait que la fumée de silice raffine fortement la porosité et produit rapidement une forte autodessiccation. Cette autodessiccation fait chuter l'humidité interne et ralentit fortement l'hydratation. Lors de l'essai de retrait chimique, l'autodessiccation ne peut pas se produire car la pâte est constamment en contact avec de l'eau. Il y a donc, une plus grande disponibilité d'eau pour maintenir le processus d'hydratation.

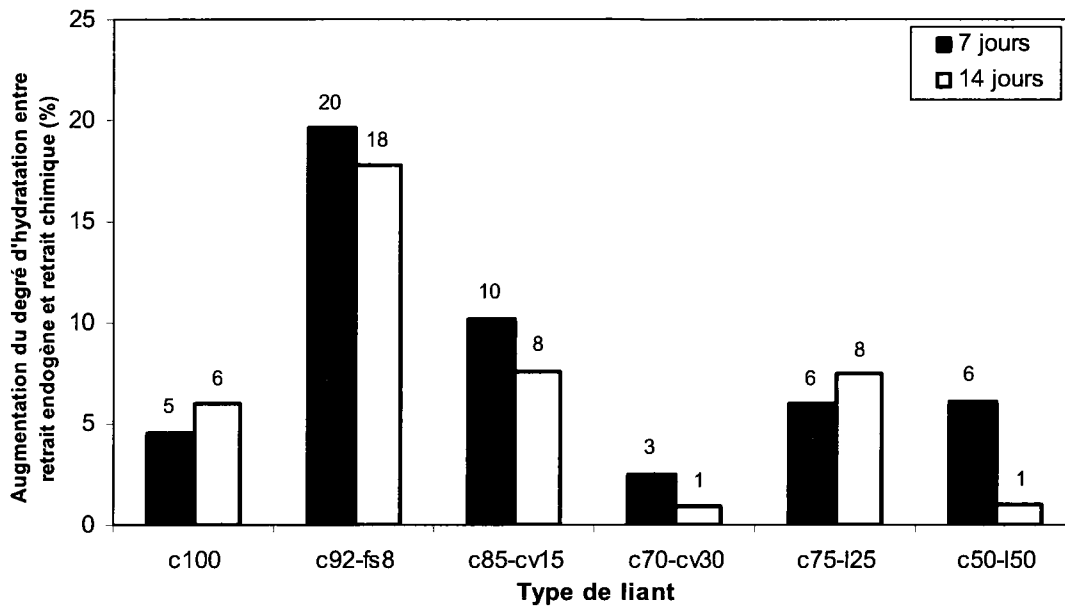


Figure 5. 42 - Augmentation du degré d'hydratation entre le retrait chimique et le retrait endogène après 7 et 14 jours d'hydratation

Les plus faibles augmentations du degré d'hydratation ont été observées dans le cas des coulis avec 30 % de cendre volante. La cendre volante est peu réactive au jeune âge et elle a plutôt le rôle de filler. On peut donc considérer que les essais de retrait ont alors été réalisés sur les coulis de rapport E/L d'environ 0,64. L'influence des conditions d'essai et des dimensions d'échantillon sur la capacité d'hydratation du liant est probablement négligeable dans ce cas.

6 POROSITÉ AU MERCURE DES COULIS

6.1 Introduction

Ce chapitre traite la porosité au mercure des coulis, soumis aux essais de retrait endogène. L'analyse porte sur l'influence du rapport E/L, de la température et du type de liant sur la structure de la porosité (porosité volumique totale, volume cumulatif des pores, distribution des pores, rayon critique et volume relatif des pores).

6.2 Porosité volumique totale des coulis

La porosité au mercure a été déterminée sur des échantillons prélevés dans les éprouvettes de coulis soumises aux essais de retrait endogène (7 jours). Les échantillons étudiés sont des fragments de coulis de forme cubique d'environ 20 mm de côté. Ils ont été prélevés après le démoulage de la cellule de retrait endogène (3 échantillons par mélange). Tout de suite après le prélèvement, les échantillons ont été immergés dans l'alcool isopropylique pour arrêter l'hydratation, puis conservés dans une étuve à $50 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'au jour de l'essai.

6.2.1 Effet du rapport E/L sur la porosité volumique totale

L'effet du rapport E/L sur la porosité volumique totale est présenté aux figures 6.1 à 6.3. Les porosités volumiques totales ont été obtenues à partir des courbes d'intrusion de mercure présentées à l'Annexe A. Les résultats démontrent que la porosité volumique totale augmente avec l'augmentation du rapport E/L quel que soit la température ou le type de liant. Les porosités totales sont les plus élevées dans les coulis de rapport E/L = 0,45 et les plus faibles dans les coulis de rapport E/L = 0,30.

Dans le cas des coulis de référence la porosité volumique totale est comprise entre 19% et 30%. Pour ce type de coulis, l'augmentation de la porosité totale entre les rapports 0,30 et 0,35 est moins importante (11%) comparativement à celle mesurée entre les rapports 0,35 et 0,45 (21% à 27%).

Les coulis avec fumée de silice possèdent une porosité totale comprise entre 16% et 30%. L'augmentation de la porosité entre les rapports 0,30 et 0,35 varie entre 4% et 17%. L'augmentation de la porosité entre les rapports 0,35 et 0,45 est, encore une fois, plus importante (33% et 39%).

L'influence du rapport E/L sur la porosité volumique totale des coulis au laitier dépend de la teneur en laitier. Dans le cas d'un remplacement de 25% de ciment par du laitier, la porosité totale varie entre 16% et 30%. Ces limites sont semblables à celles mesurées dans les coulis de référence et dans les coulis avec fumée de silice. Dans le cas d'un remplacement de 50%, la porosité totale est située dans une plage légèrement plus large (15% à 30%).

L'influence du rapport E/L sur la porosité volumique totale des coulis avec cendre volante dépend de la teneur en cendre volante. La porosité totale varie de 21% à 32% pour un taux de remplacement du ciment par la cendre volante de 15%. Dans le cas d'un remplacement de 30%, la porosité totale est située entre 22% et 36%.

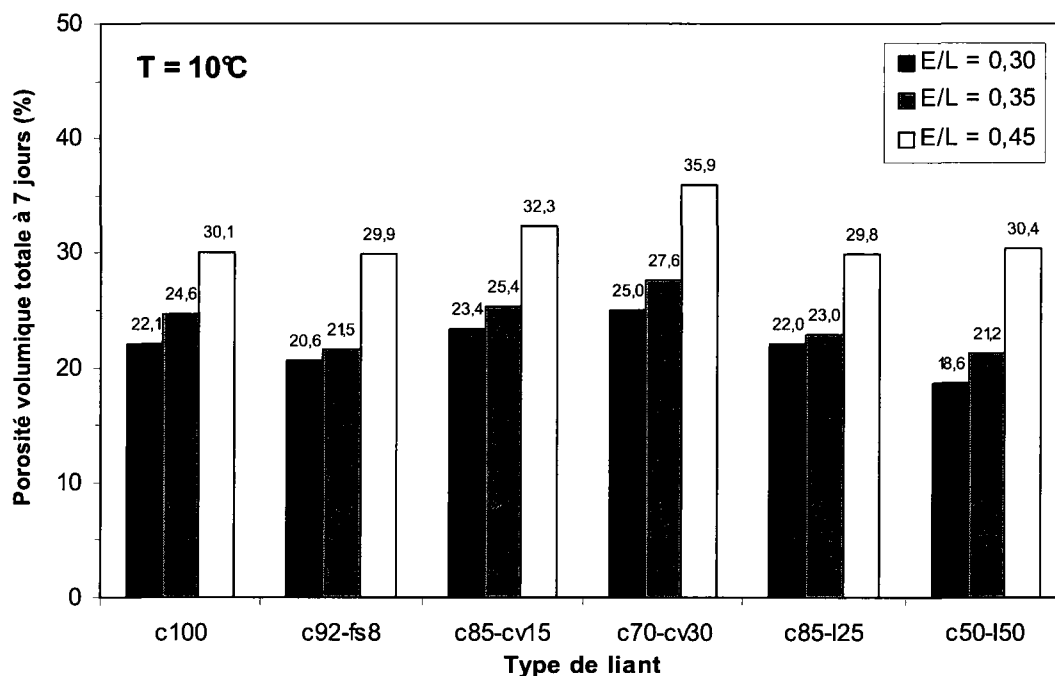


Figure 6. 1 – Porosité volumique totale des coulis à 7 jours, T = 10°C

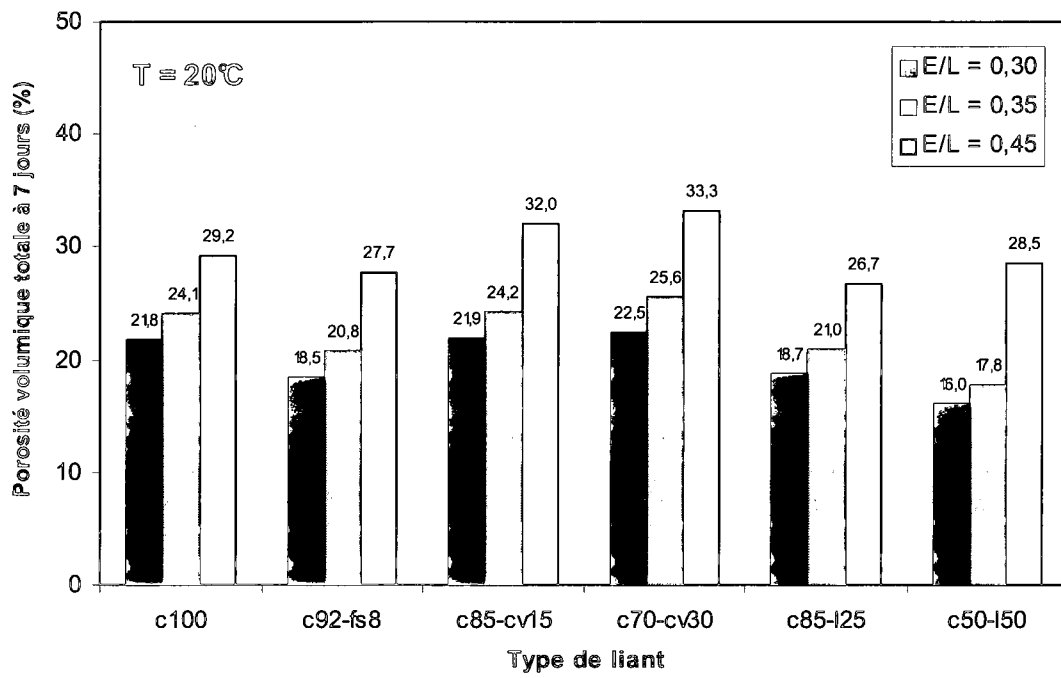


Figure 6. 2 – Porosité volumique totale des coulis à 7 jours, T = 20°C

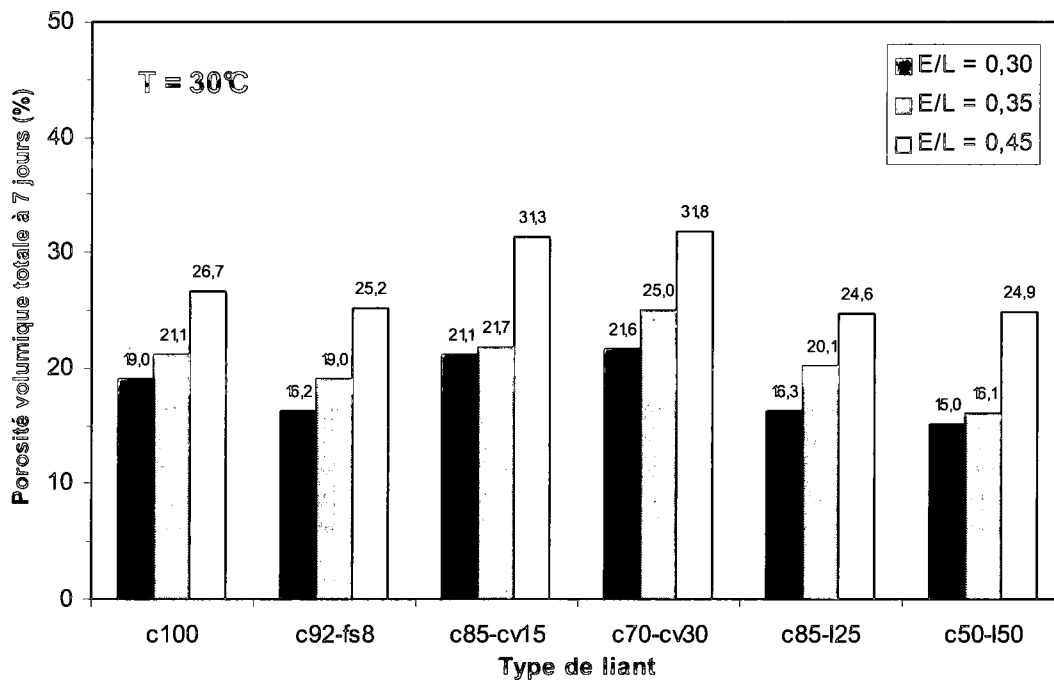


Figure 6. 3 – Porosité volumique totale des coulis à 7 jours, T = 30°C

On peut finalement conclure que la porosité totale est la plus faible pour le rapport E/L de 0,30. Elle est comprise entre 15% et 25% quels que soit la température ou le type de liant. Le passage de 0,30 à 0,35 produit une légère augmentation de la porosité volumique totale. Cette dernière est alors comprise entre 16% et 28%. Le passage du rapport E/L de 0,35 à 0,45 produit une augmentation plus importante de la porosité totale qui est alors comprise entre 25% et 36%.

6.2. 2 Effet de la température sur la porosité volumique totale

L'effet de la température sur la porosité volumique totale des coulis à la fin des essais de retrait endogène sera analysé à l'aide des figures 6.1 à 6.3. Les résultats démontrent que la porosité volumique totale diminue avec l'augmentation de la température, quel que soit le rapport E/L ou le type de liant. La porosité totale est la plus élevée dans les coulis soumis aux essais de retrait endogène à 10°C et la plus faible dans les coulis soumis aux essais de retrait à 30°C. La diminution de la porosité totale, consécutive à l'augmentation de la température, découle principalement de la maturité plus avancée des pâtes conservées à plus haute température.

Dans les coulis de référence, l'augmentation de la température de 10°C à 30°C entraîne une diminution de la porosité variant de 13% à 17%. Pour cette même augmentation de la température, la porosité totale des coulis avec fumée de silice diminue de 13% à 27%. La diminution de la porosité des coulis avec 15% de cendre volante est comprise entre 3% et 17% et celle des coulis avec 30% de cendre volante est comprise entre 10% et 16%. C'est dans les coulis au laitier que l'augmentation de la température diminue le plus fortement la porosité totale. Lorsque la température passe de 10°C à 30°C, la porosité totale diminue de 14% à 35% pour un remplacement de 25% et de 22% à 32% pour un remplacement de 50% de laitier.

On constate donc, que la porosité volumique totale est moins influencée par la température que par le rapport E/L.

6.2. 3 Effet du type de liant sur la porosité volumique totale

L'effet du type de liant sur la porosité volumique totale des coulis est présenté aux figures 6.1 à 6.3. Les résultats démontrent que les porosités volumiques totales des coulis avec fumée de silice et des coulis au laitier sont très voisines et parmi les plus faibles. Les porosités totales des coulis avec fumée de silice sont situées entre 16% et 30% et celles des coulis au laitier entre 15% et 30%. Les coulis avec cendre volante possèdent les porosités totales les plus élevées. Elles sont situées entre 21% et 36%. Les coulis de références possèdent des porosités totales intermédiaires variant de 19% à 30%. Mentionnons que ce classement relatif n'est pas influencé par la température.

6.3 Distribution des pores dans les coulis

La distribution des volumes poreux en fonction des rayons de pores a été obtenue en différenciant la courbe de volume cumulatif de mercure introduit en fonction du rayon de pores envahis (Annexe A). Dans l'analyse des résultats nous avons présenté une des trois courbes de la distribution des pores pour chaque coulis.

6.3.1 Effet du rapport E/L sur la distribution des pores

L'influence du rapport E/L sur la distribution des pores dans les coulis de référence est présentée à la figure 6.4. Les figures B.1 à B.5 jointes à l'annexe B, présentent les courbes de distribution des pores dans les coulis avec ajouts minéraux. Pour les coulis de référence (Figure 6.4), on observe un déplacement de la courbe de la distribution des volumes poreux vers les pores de plus gros diamètre quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45, quelle que soit la température. On observe la même tendance dans le cas des coulis avec 8% de fumée de silice (Figure B.1). Les courbes correspondant aux rapports 0,30 et 0,35 sont cependant plus rapprochées.

Les figures B.2 et B.3 présentent les distributions des pores dans les coulis avec cendre volante. Pour ce type de liant, on remarque plus de différence dans l'allure des courbes. Les courbes de

distribution obtenues dans les coulis de rapport 0,45 sont plus étalées comparativement aux courbes de deux autres coulis. Elles possèdent aussi les maxima situés au moins à 50 nm.

Dans le cas des coulis au laitier (Figures B.4 et B.5), on remarque encore une fois le déplacement des courbes de distribution vers les plus gros pores quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45. À 10 et à 20°C les courbes des coulis de rapport 0,45 sont plus étalées que les courbes de deux autres coulis.

L'influence du rapport E/L sur la distribution des pores se manifeste donc, comme un déplacement des courbes de distribution vers les plus gros pores quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45, quel que soit la température ou le type de liant. Les courbes des coulis de rapport 0,30 et de 0,35 sont plus serrées quel que soit le type de liant. Les coulis de rapport 0,45 qui contiennent le laitier et surtout la cendre volante possèdent les courbes plus étalées.

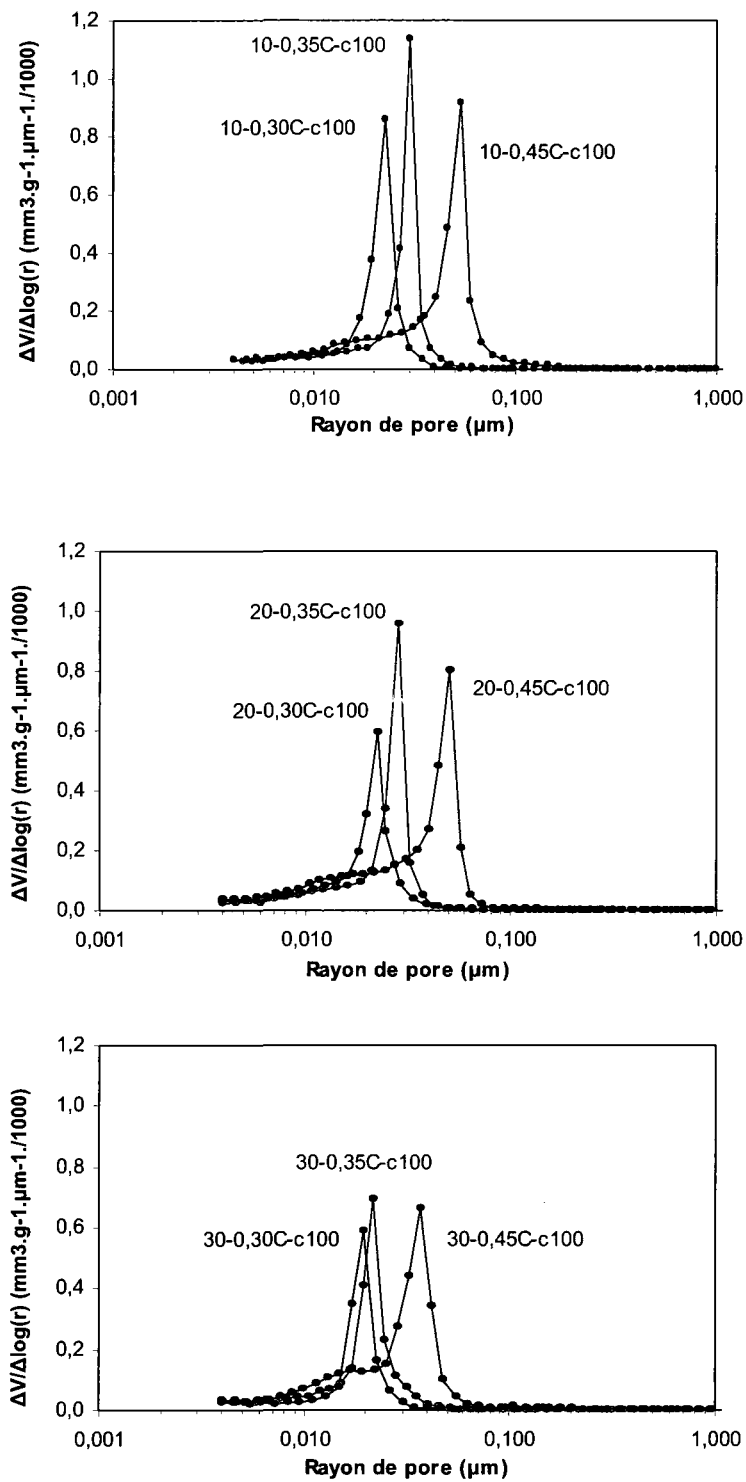


Figure 6. 4 – Distribution des pores dans les coulis de référence (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

6.3 2 Effet de la température sur la distribution des pores

L'influence de la température sur la distribution des pores dans les coulis de référence est présentée à la figure 6.5. Dans le cas des coulis de référence (Figure 6.5), l'augmentation de la température de 10°C à 30°C déplace très faiblement les courbes de distribution vers les plus petits pores, quel que soit le rapport E/L. En effet, les écarts entre les courbes sont moins importants comparativement à ceux engendrés par le rapport E/L. La température produit les mêmes effets dans le cas des coulis avec fumée de silice (Figure B.6).

L'effet de la température sur les courbes de distribution des pores dans les coulis à la cendre volante est présenté aux figures B.7 et B.8. Le changement de la température de 10°C à 30°C n'a pas d'effet significatif sur la distribution poreuse des coulis avec un rapport E/L de 0,30 et 0,35. Cependant, dans le cas des coulis ayant un rapport E/L de 0,45, l'augmentation de la température engendre un raffinement significatif de la taille des pores.

Les courbes de distribution des pores dans les coulis au laitier sont présentées aux figures B.9 et B.10. Comme dans le cas de la cendre volante, la température a très peu d'effet sur la distribution poreuse des coulis avec laitier ayant un rapport E/L de 0,30 et 0,35. Pour le rapport E/L de 0,45, le changement de température de 10°C à 30°C engendre un très net raffinement de la porosité, quel que soit le taux de remplacement du ciment par le laitier.

Globalement, la température n'a pas d'effet significatif sur la distribution poreuse des coulis ayant un rapport E/L de 0,30 et 0,35. Dans le cas des coulis ayant un E/L de 0,45, l'augmentation de la température engendre un raffinement de la structure poreuse. Ce raffinement a été observé avec tous les types de liants. Il découle probablement de l'accélération de la cinétique d'hydratation des coulis avec un rapport E/L relativement élevé.

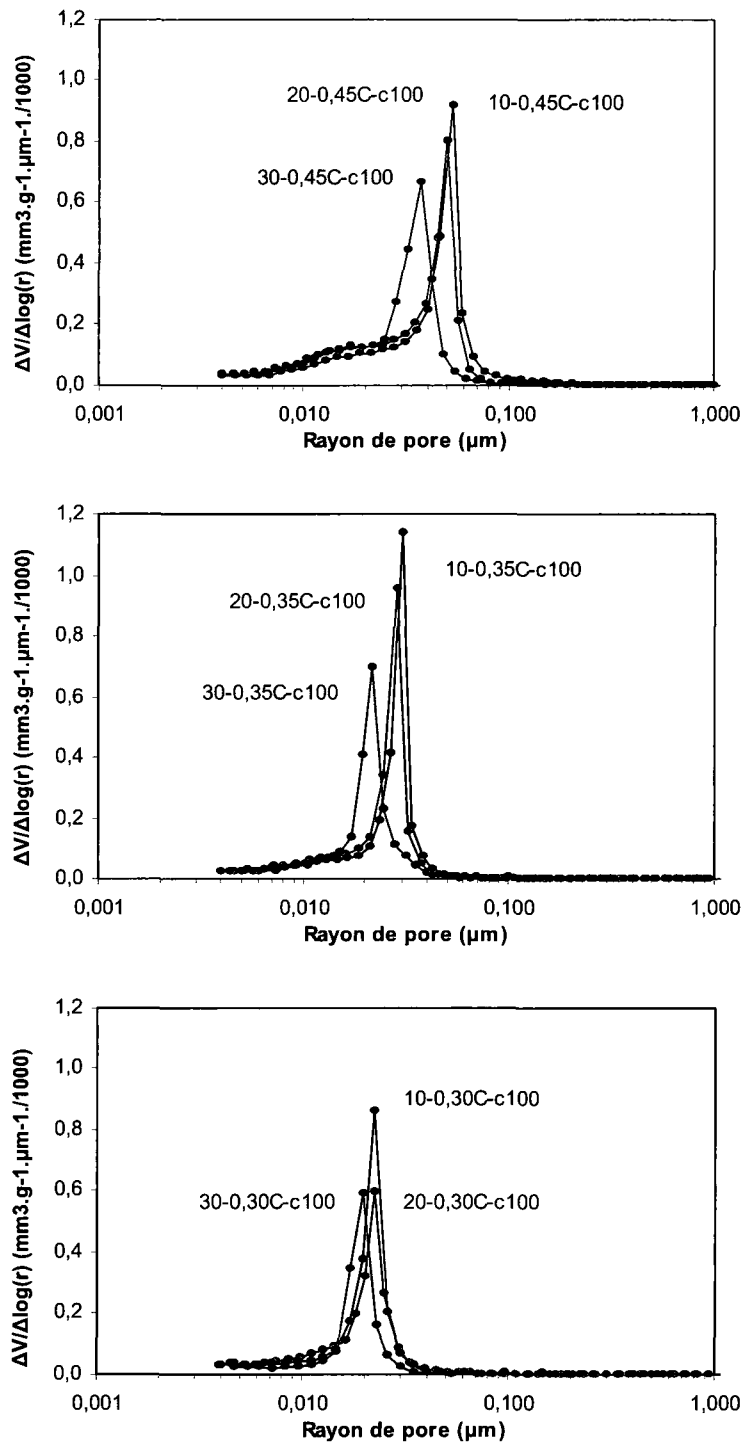


Figure 6. 5 – Distribution des pores dans les coulis de référence (T = 10, 20 et 30°C)

6.3. 3 Effet du type de liant sur la distribution des pores

L'effet du type de liant sur la distribution des pores dans les coulis de rapport E/L égal à 0,30 qui sont soumis aux essais de retrait endogène à 10, 20 et 30°C, est présenté aux figures 6.6 à 6.8. Dans le cas des coulis de rapport 0,30, toutes les courbes sont peu étalées avec une majorité des volumes poreux située entre 10 et 50 nm. Le liant avec fumée de silice et le liant avec laitier montrent des courbes de distribution des pores qui sont déplacées vers les plus petits pores comparativement au liant de référence. Les courbes obtenues avec les liants avec cendre volante sont déplacées vers les plus gros pores comparativement à celle de la référence. Ces mêmes comportements ont été observés pour toutes les températures.

Les courbes de distribution des pores dans les coulis de rapport E/L égal à 0,35 sont présentées aux figures 6.9 à 6.11. Comme pour le rapport E/L de 0,30, les courbes de distribution sont peu étalées avec une majorité des volumes poreux située entre 10 et 50 nm. La disposition des courbes obtenues avec des ajouts minéraux, comparativement aux courbes de référence, est semblable à celle observée pour les coulis de rapport 0,30.

Dans le cas des coulis de rapport E/L égal à 0,45 (Figures 6.12 à 6.14), les courbes de distribution des pores sont plus étalées, surtout pour les températures de 10 et à 20°C. À 10°C, le coulis de référence, le coulis avec fumée de silice et le coulis avec 50% de laitier possèdent un réseau poreux dont tous les pores ont un rayon inférieur à 100 nm. Les courbes de trois autres coulis s'étalent de 4 à 300 nm avec les pics situés entre 100 et 300 nm. À 10°C, tous les coulis, à l'exception de celui avec fumée de silice, possèdent des courbes de distribution des pores déplacées vers les plus gros pores comparativement à la courbe de référence. Quand la température augmente à 20°C, la majorité des courbes deviennent plus serrées. Les courbes sont aussi déplacées vers les pores de plus petits diamètres. À 30°C, la majorité des volumes poreux est située entre 10 et 100 nm. Le liant avec fumée de silice et avec du laitier permet d'obtenir les courbes qui sont le plus déplacées vers les plus petits pores comparativement à la courbe de référence. Le liant avec cendre volante produit les coulis ayant des courbes de distribution déplacées vers les plus gros pores comparativement à la référence. Un tel comportement a été déjà observé dans les coulis de rapport 0,30 et 0,35.

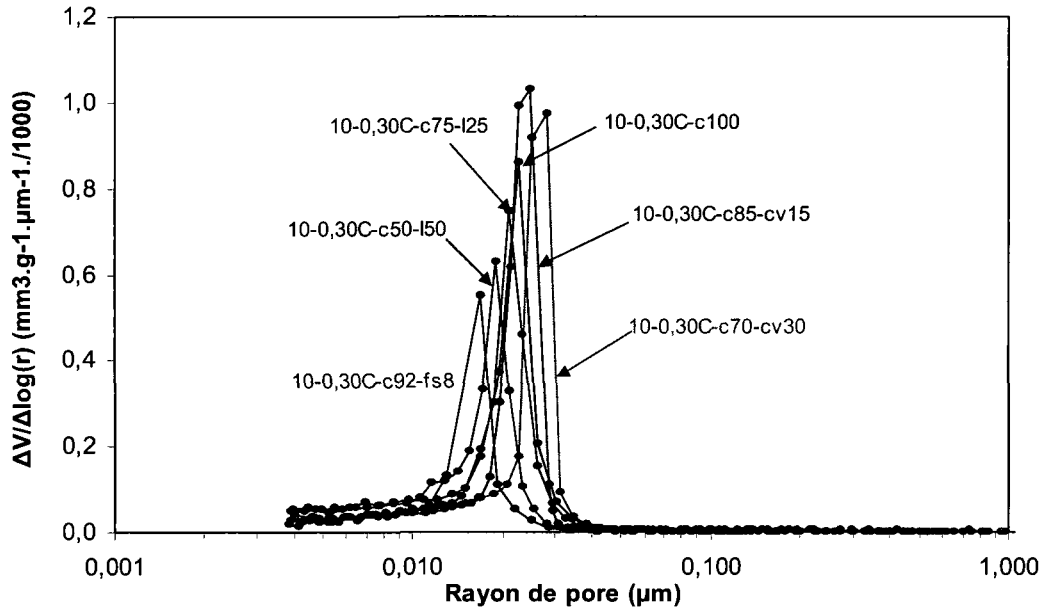


Figure 6. 6 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 10°C

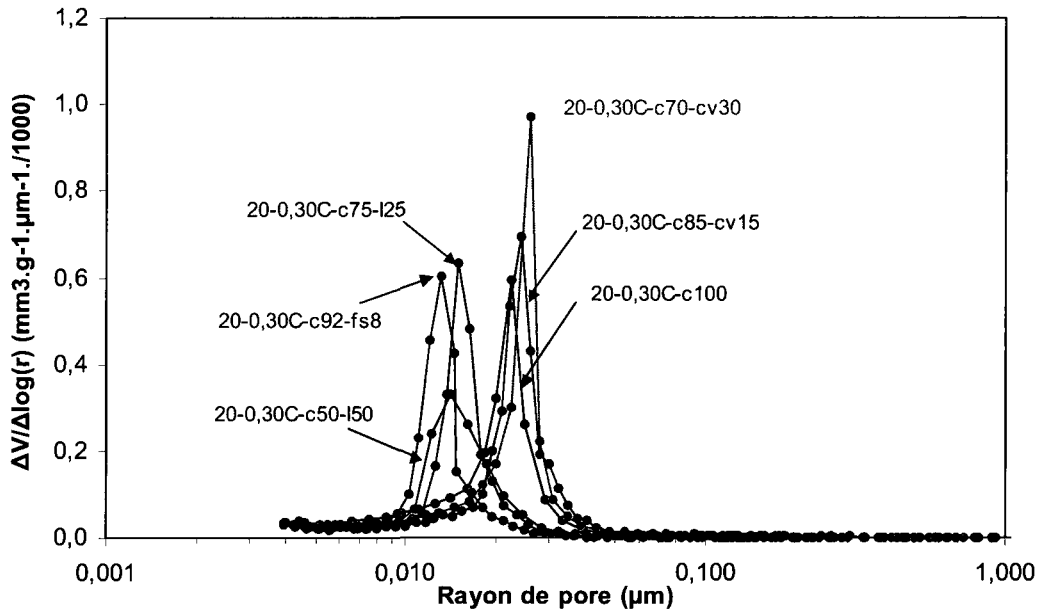


Figure 6. 7 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 20°C

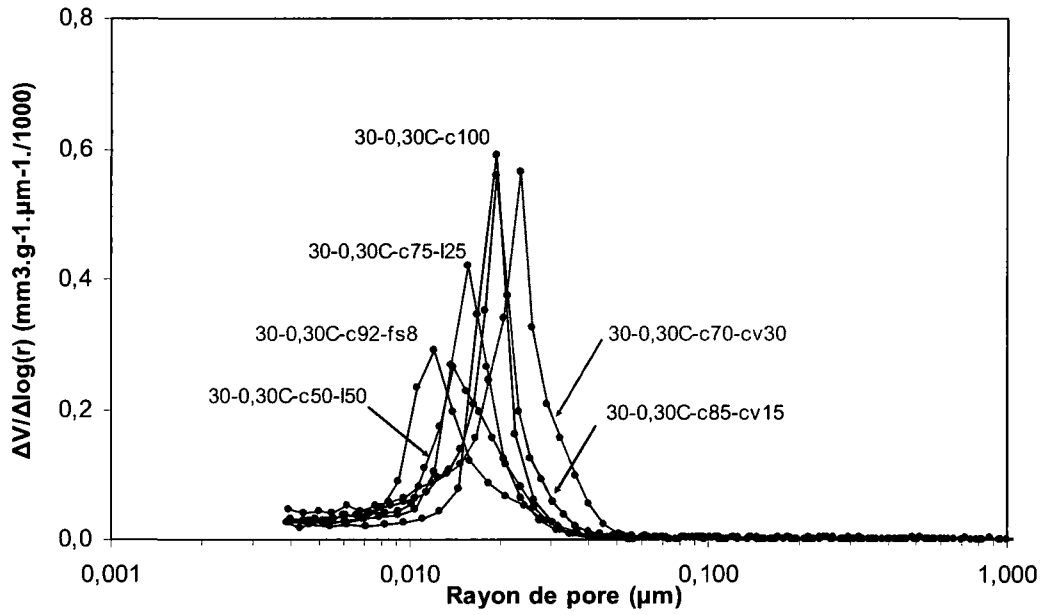


Figure 6. 8 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 30°C

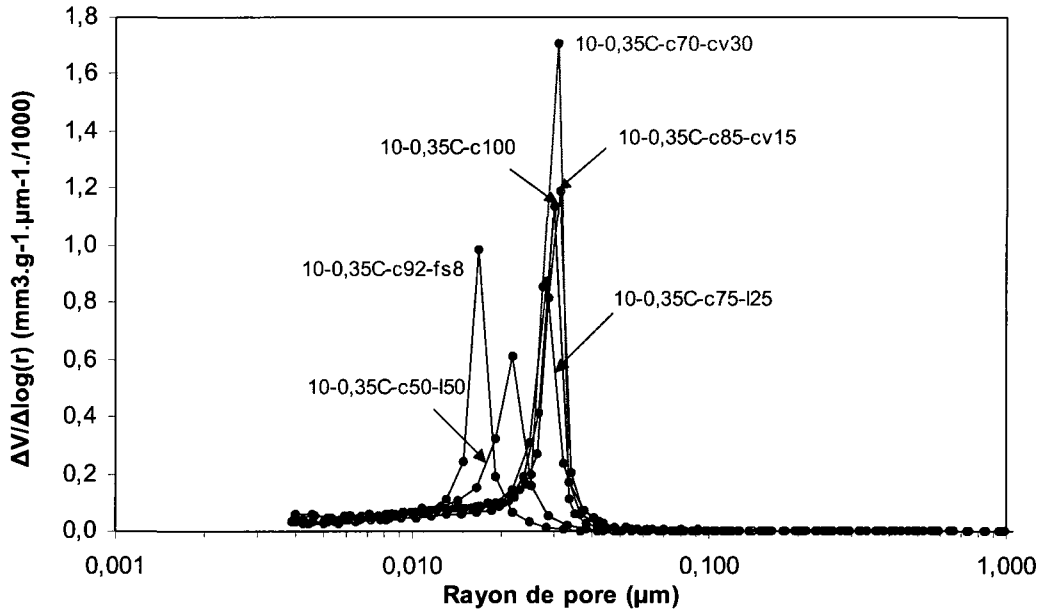


Figure 6. 9 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 10°C

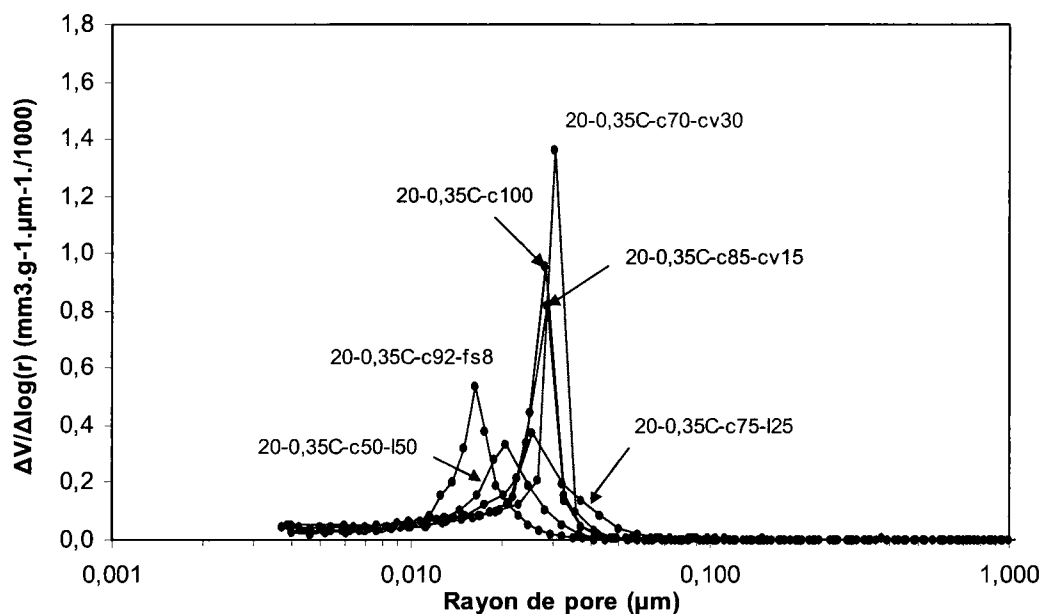


Figure 6. 10 – Distribution des pores dans tous les coulis, $E/L = 0,35$ et $T = 20^\circ\text{C}$

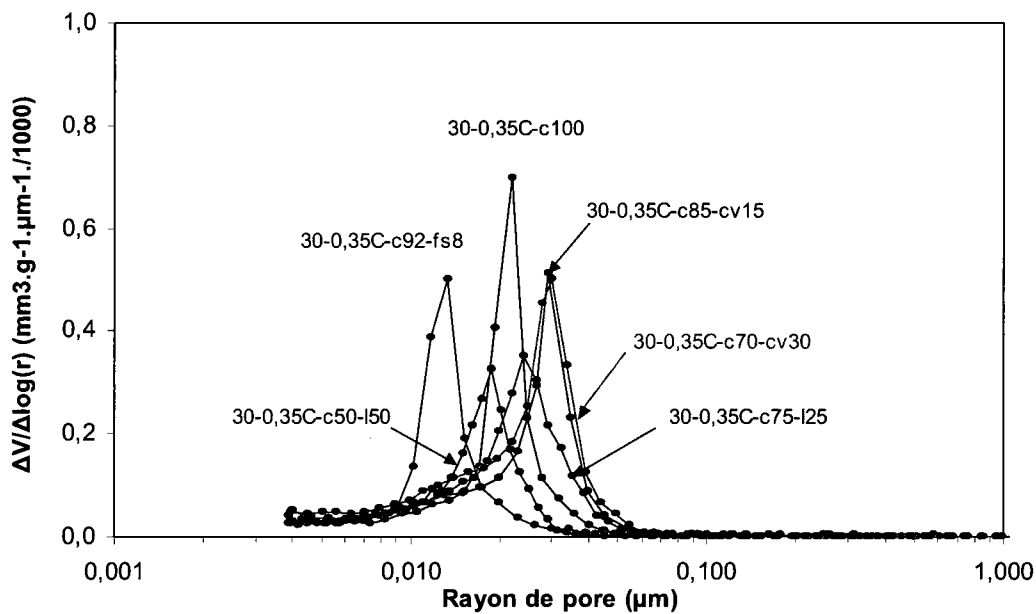


Figure 6. 11 – Distribution des pores dans tous les coulis, $E/L = 0,35$ et $T = 30^\circ\text{C}$

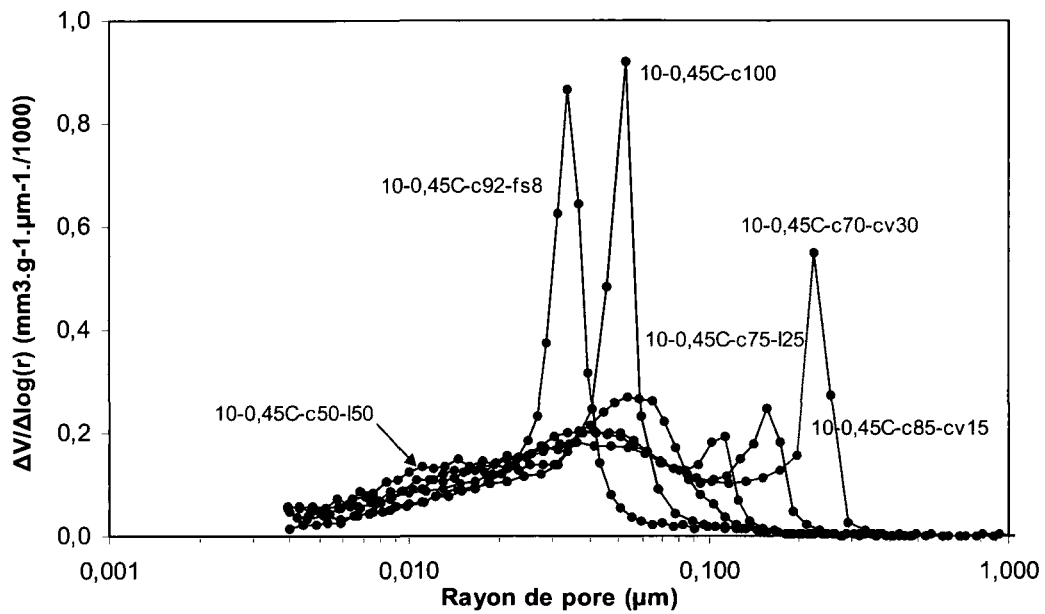


Figure 6. 12 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 10°C

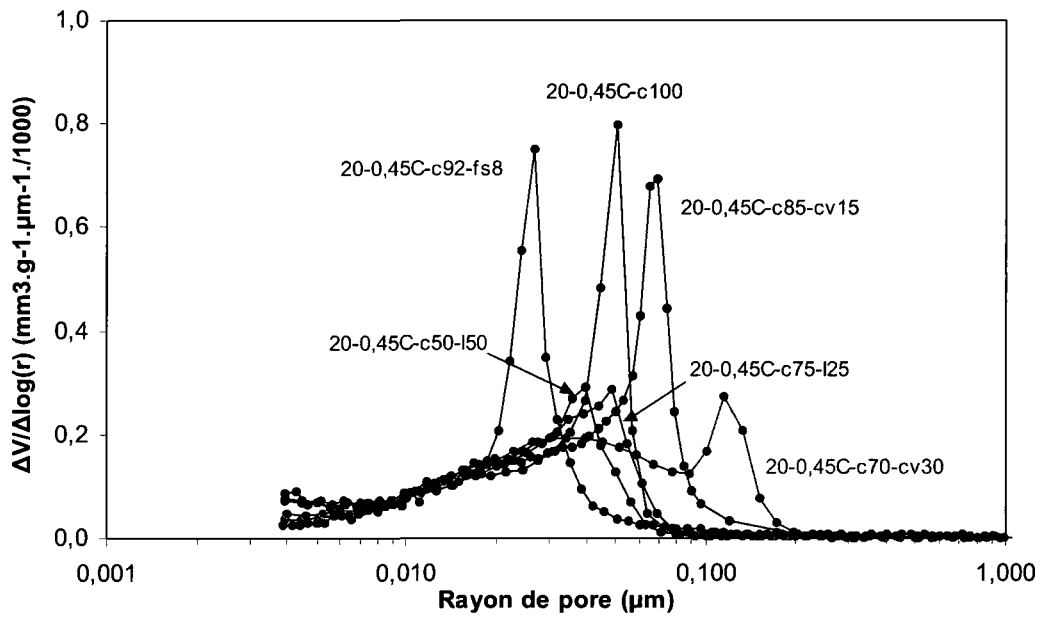


Figure 6. 13 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 20°C

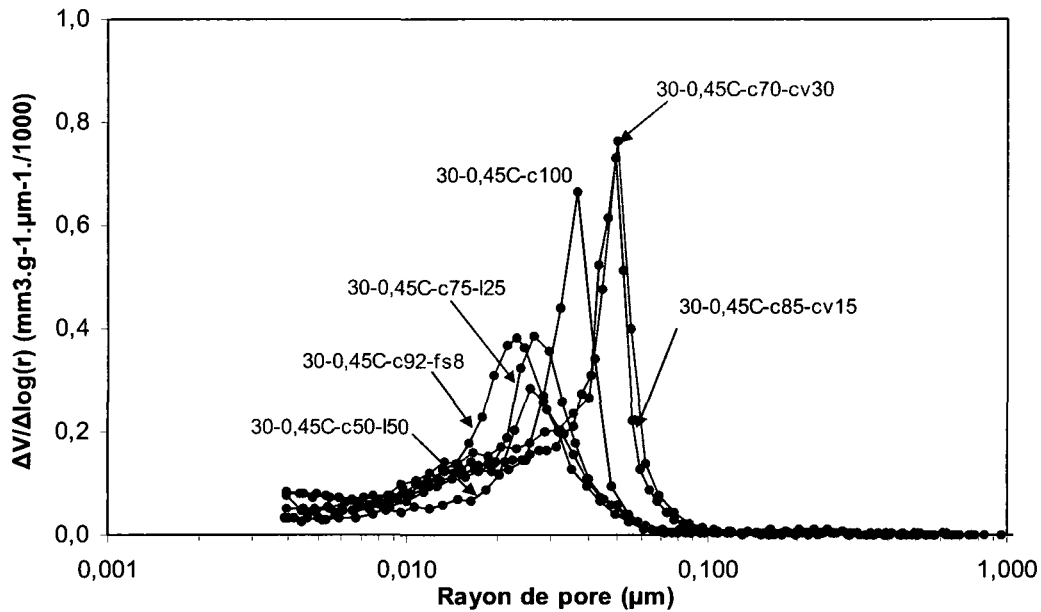


Figure 6. 14 – Distribution des pores dans tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 30°C

6. 4 Rayon critique des pores dans les coulis

Les courbes de la distribution des volumes poreux en fonction des rayons des pores $\Delta V/\Delta \log(r)$ possèdent toujours un pic qui représente la valeur maximale de l'intrusion de mercure. Le rayon de pores correspondant à ce maximum de la courbe est nommé le rayon critique des pores. Dans le texte qui suit, chaque rayon critique est la moyenne de trois résultats. Étant donné que les courbes de la distribution des pores vues dans la partie 6.4 ne correspondent qu'à un parmi les trois résultats obtenus pour chaque coulis, nous avons jugé qu'il était intéressant de discuter l'influence de nos paramètres d'étude sur le rayon critique des pores.

6.4. 1 Effet du rapport E/L sur le rayon critique des pores

L'influence du rapport E/L sur le rayon critique des pores dans les coulis de référence testés à 10, 20 et 30°C, est présentée à la figure 6.15. On constate premièrement que le rayon critique des pores dans les coulis de références est situé entre 20 et 54 nm. Il augmente avec rapport E/L. L'effet du rapport E/L est moins marqué lors du passage de 0,30 à 0,35. Dans ce cas,

l'augmentation maximale du rayon critique est de 6 nm. Quand le rapport E/L augmente de 0,35 à 0,45, le rayon critique augmente de 3 à 5 fois, dépendant de la température.

Dans les coulis avec fumée de silice (Figure 6.16), nous avons mesuré les plus faibles rayons critiques (entre 13 et 34 nm). L'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,35 a un effet négligeable sur le rayon critique des pores dans ce type de coulis. Cependant, quand on augmente le rapport E/L de 0,35 à 0,45, le rayon critique augmente de 9 à 17 nm.

Les figures 6.17 et 6.18 démontrent l'effet du rapport E/L sur le rayon critique des pores dans les coulis au laitier. Dans le cas des coulis avec 25% de laitier, les rayons critiques des pores sont situés dans une plage plus large (entre 16 et 105 nm) comparativement aux deux autres coulis. Le passage de 0,30 à 0,35 cause une augmentation du rayon critique de 5 à 10 nm. Quand le rapport E/L passe de 0,35 à 0,45, le taux d'augmentation du rayon critique dépend fortement de la température. Par exemple, à 10°C, le rayon critique est de 27 nm pour E/L = 0,35 et de 54 nm quand ce rapport est de 0,45. À 30°C, le rayon critique est de 24 nm pour E/L = 0,35 et de 26 nm pour E/L = 0,45. La température a donc un effet important sur le raffinement des pores dans ce type de coulis lorsque le rapport E/L est élevé.

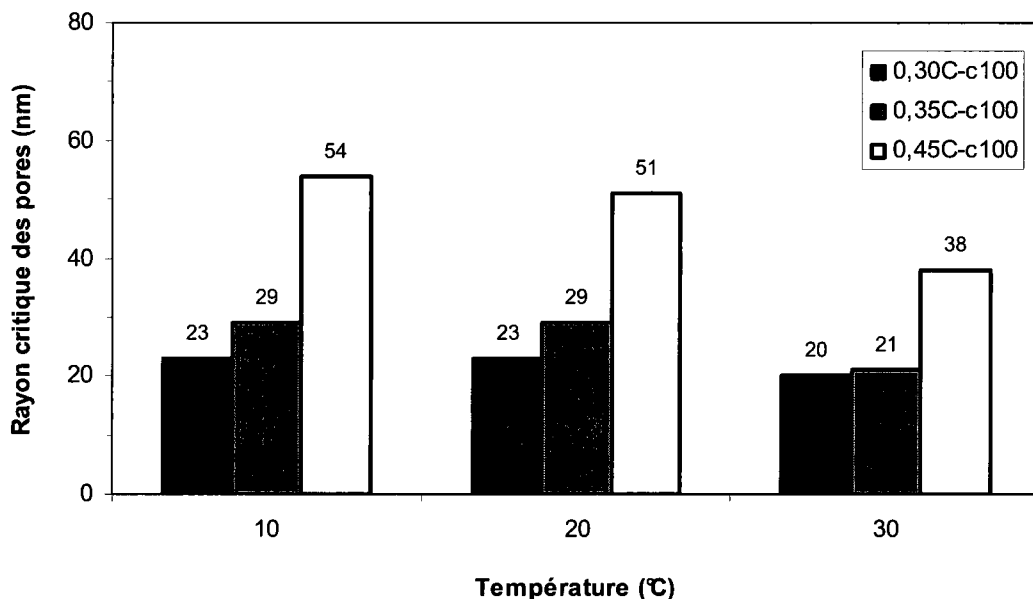


Figure 6. 15 – Rayon critique des pores dans les coulis de référence

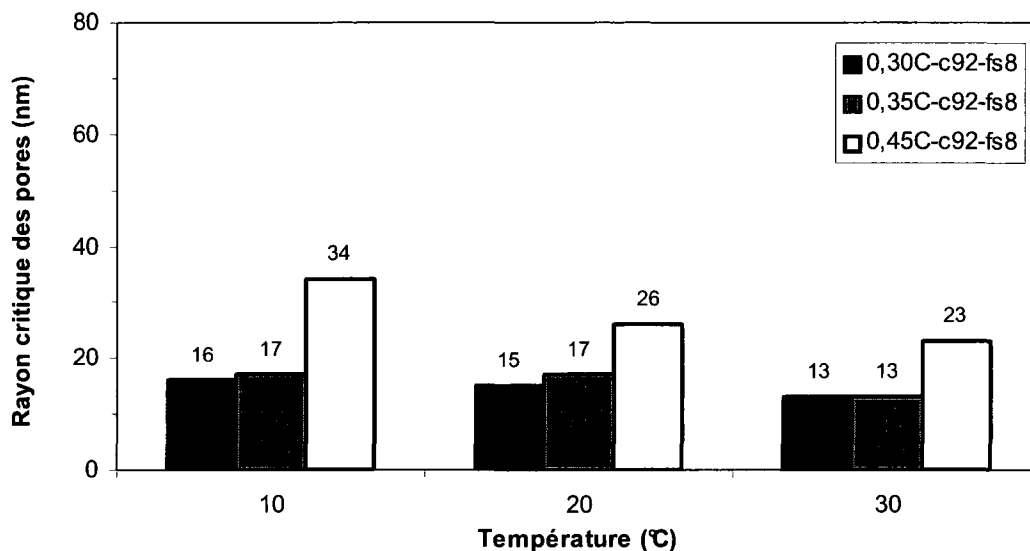


Figure 6. 16 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice

Le fait d'augmenter le dosage de laitier de 25 à 50 % permet de diminuer les rayons critiques des pores qui sont situés entre 14 et 57 nm. Cette diminution est la plus marquée (45%) dans le coulis de rapport 0,45 testé à 10°C. À 10 et à 20°C on observe une augmentation assez importante du rayon critique lors du passage de 0,35 à 0,45. Cette augmentation devient moins importante à 30°C.

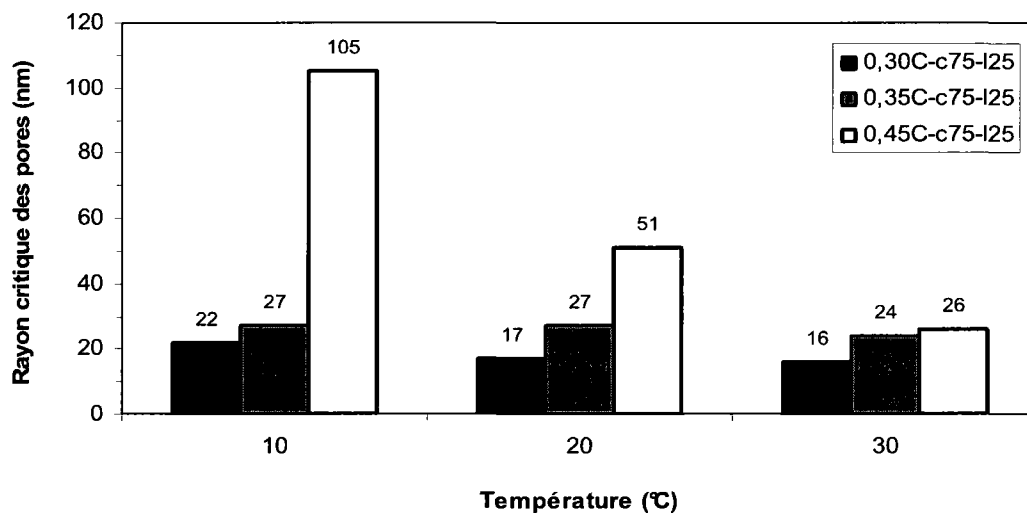


Figure 6. 17 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 25% de laitier

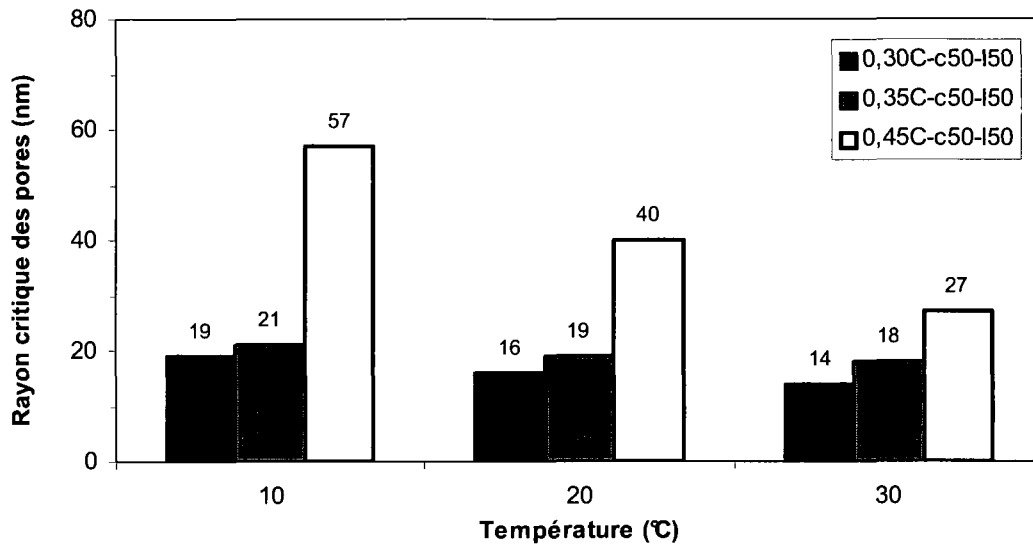


Figure 6. 18 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 50% de laitier

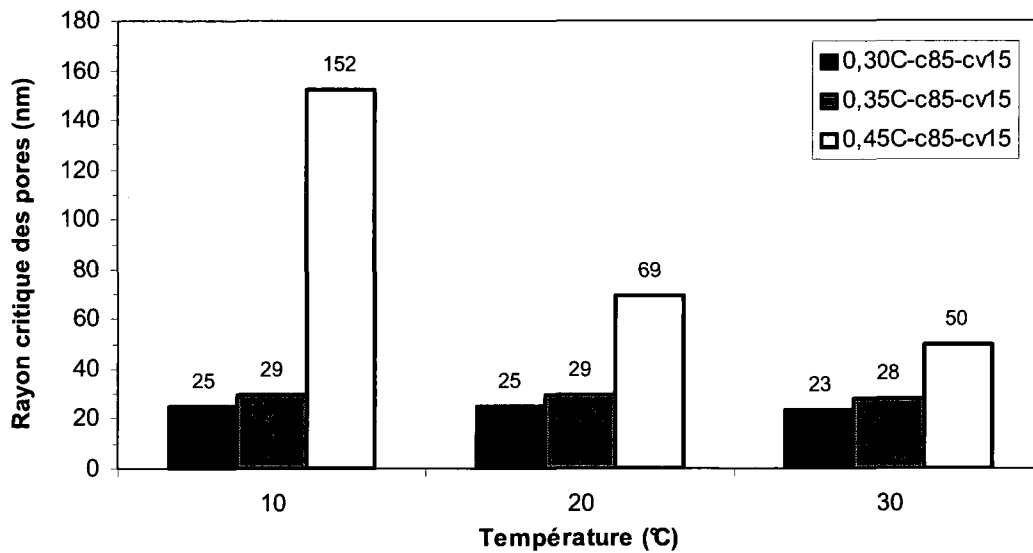


Figure 6. 19 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante

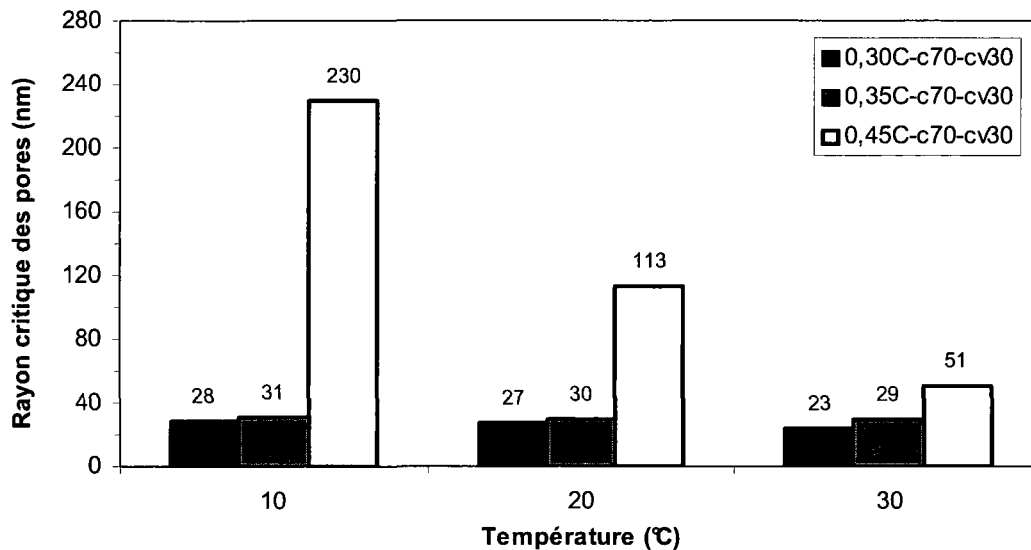


Figure 6. 20 – Rayon critique des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante

L'influence du rapport E/L sur le rayon critique des pores dans les coulis avec cendre volante est présentée aux figures 6.19 et 6.20. Pour le taux de remplacement de 15%, les rayons critiques sont situés entre 23 et 152 nm. Dans le cas des essais réalisés à 10°C on observe, encore une fois, de grandes augmentations du rayon critique quand le rapport E/L passe de 0,35 à 0,45. L'augmentation du rayon critique devient trois fois moins importante à 20°C et environ 6 fois moins importante à 30°C.

Pour un taux de remplacement par la cendre volante de 30% les rayons critiques sont les plus élevés (entre 23 et 230 nm). Dans le cas des coulis de rapport 0,45, le rayon critique des pores dépasse 100 nm à 20°C et 200 nm à 10°C (Figure 6.20). À 30°C le rayon critique est pratiquement égal à celui du coulis précédent. Dans ce type de coulis, on observe les plus grandes augmentations du rayon critique quand le rapport E/L passe de 0,35 à 0,45.

On peut finalement conclure que l'influence du rapport E/L sur le rayon critique des pores dépend du type de liant et de la température. Dans la majorité des cas, l'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,35 engendre une légère augmentation du rayon critique. Quand le rapport E/L augmente de 0,35 à 0,45, on remarque une grande augmentation du rayon critique des pores, surtout dans les coulis au laitier et à la cendre volante testés à 10°C.

6.4.2 Effet de la température sur le rayon critique des pores

L'effet de la température sur le rayon critique des pores est présenté aux figures 6.21 à 6.23.

En général, dans les coulis de rapport E/L égal à 0,30 et à 0,35, l'augmentation de la température cause une diminution du rayon critique des pores. Cette diminution est plus importante à 30°C qu'aux deux autres températures. Dans les coulis ayant un rapport E/L de 0,45, on observe constamment une baisse du rayon critique avec l'augmentation de la température. L'effet de la température est le plus prononcé dans les coulis qui contiennent la cendre volante et dans les coulis au laitier.

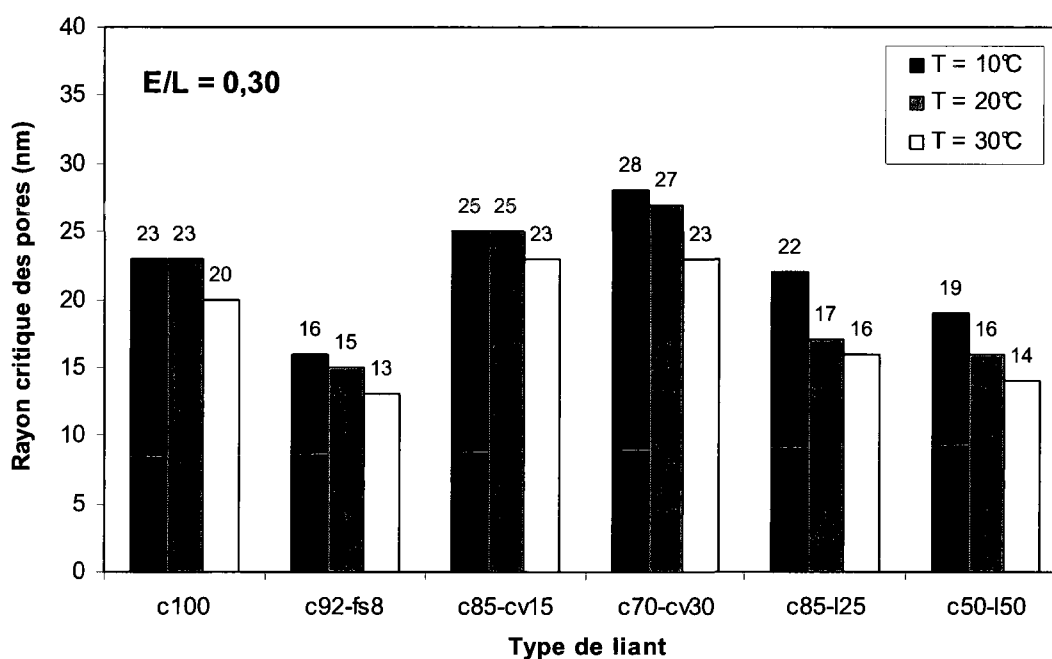


Figure 6. 21 – Rayon critique des pores dans les coulis de rapport 0,30 (T = 10, 20 et 30°C)

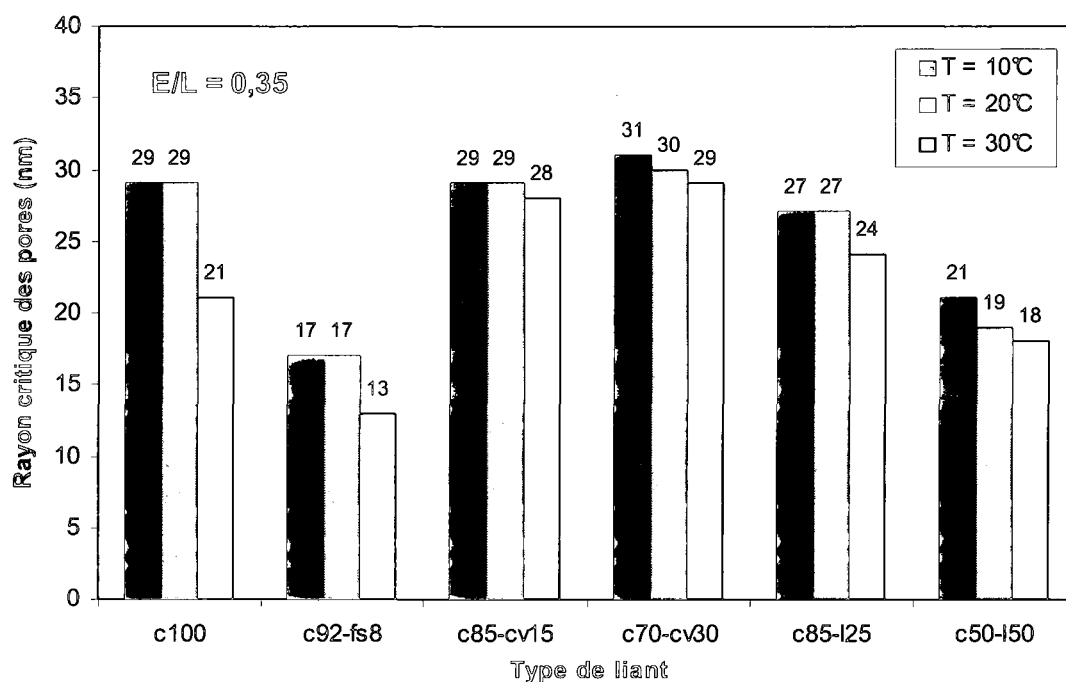


Figure 6. 22 – Rayon critique des pores dans les coulis de rapport 0,35 (T = 10, 20 et 30°C)

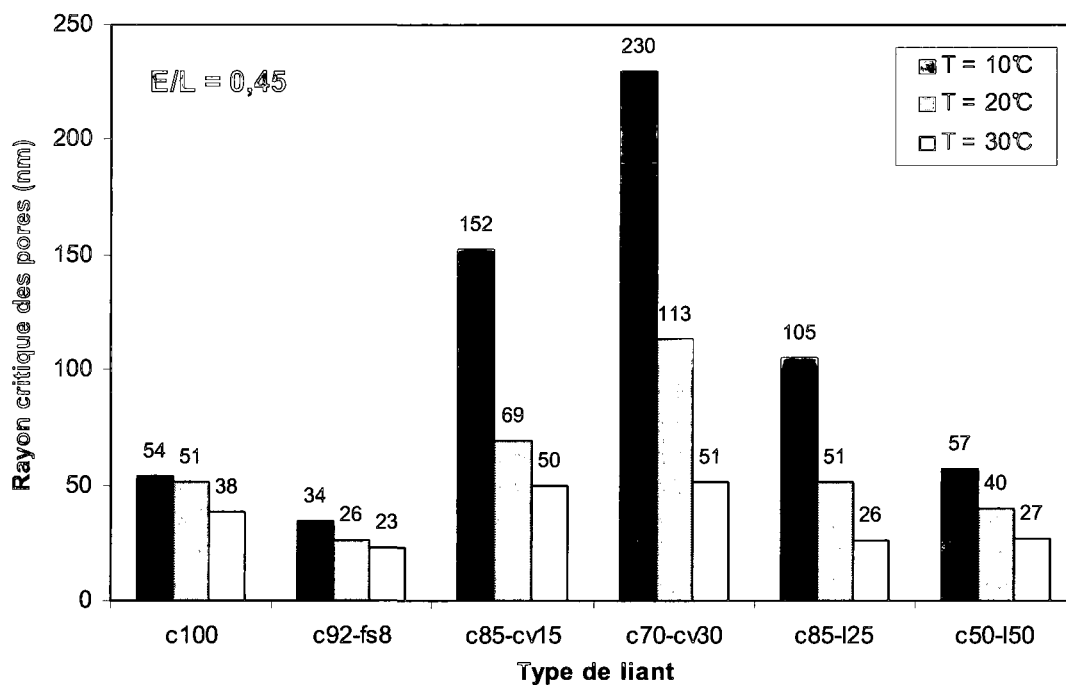


Figure 6. 23 – Rayon critique des pores dans les coulis de rapport 0,45 (T = 10, 20 et 30°C)

6.4.3 Effet du type de liant sur le rayon critique des pores

L'effet du type de liant sur le rayon critique des pores est présenté aux figures 6.24 à 6.26. Pour une température de 10°C (Figure 6.24), la fumée de silice permet d'obtenir les plus faibles rayons critiques quel que soit le rapport E/L. Par contre, le coulis avec 30% de cendre volante possède les rayons critiques les plus élevés. Dans le cas des autres coulis, l'effet du type de liant varie avec le rapport E/L. Pour les rapports de 0,30 et de 0,35, les coulis au laitier possèdent des rayons critiques plus faibles que ceux de la référence. Le laitier et la fumée de silice entraînent donc un raffinement de la porosité, contrairement à la cendre volante qui engendre un réseau poreux plus grossier. Dans les coulis de rapport E/L égal à 0,45, la situation est différente car les rayons critiques des coulis au laitier et à la cendre volante sont toujours supérieurs à ceux de la référence.

Quand on augmente la température à 20°C (Figure 6.25) l'influence des différents types de liants demeure la même si E/L ne dépasse pas 0,35. Dans le cas des coulis au laitier ayant un E/L de 0,45, on observe une diminution des rayons critiques comparativement à ceux de la référence. Ce comportement est probablement dû à une activation du laitier par la température.

Quand la température augmente à 30°C (Figure 6.26), on observe une activation du laitier mais aussi de la cendre volante. La majorité des rayons critiques des coulis au laitier est plus faible que ceux mesurés dans les coulis de référence. Les rayons critiques des coulis avec cendre volante sont encore une fois les plus élevés. Dans les coulis avec fumée de silice les rayons critiques des pores sont les plus faibles quel que soit la température ou le rapport E/L.

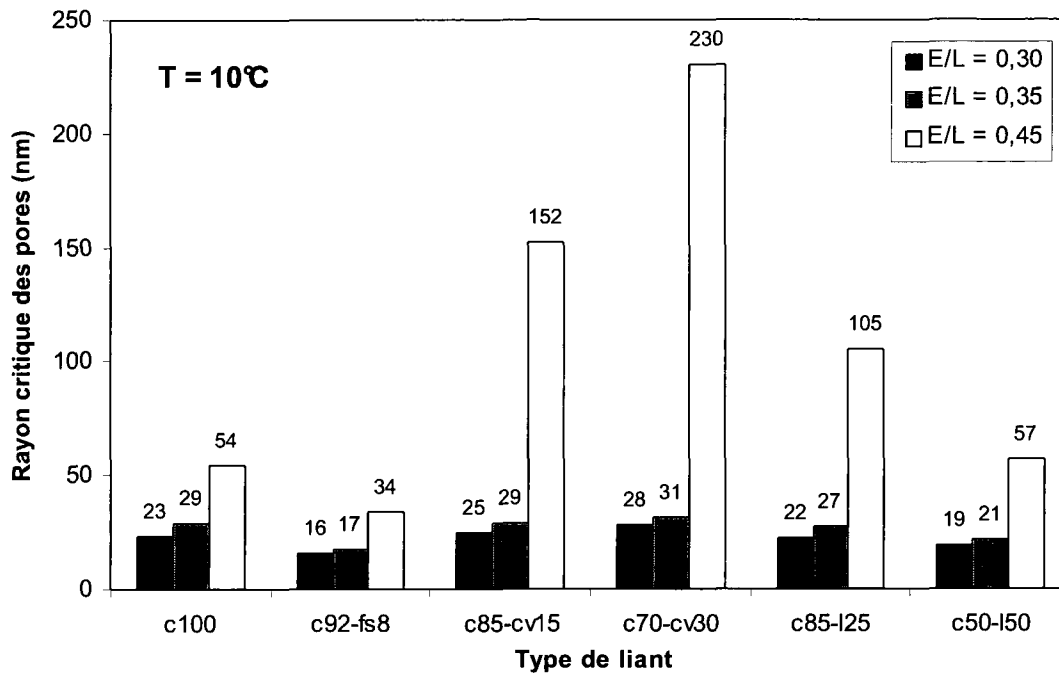


Figure 6. 24 – Rayon critique des pores dans les coulis testés à 10°C

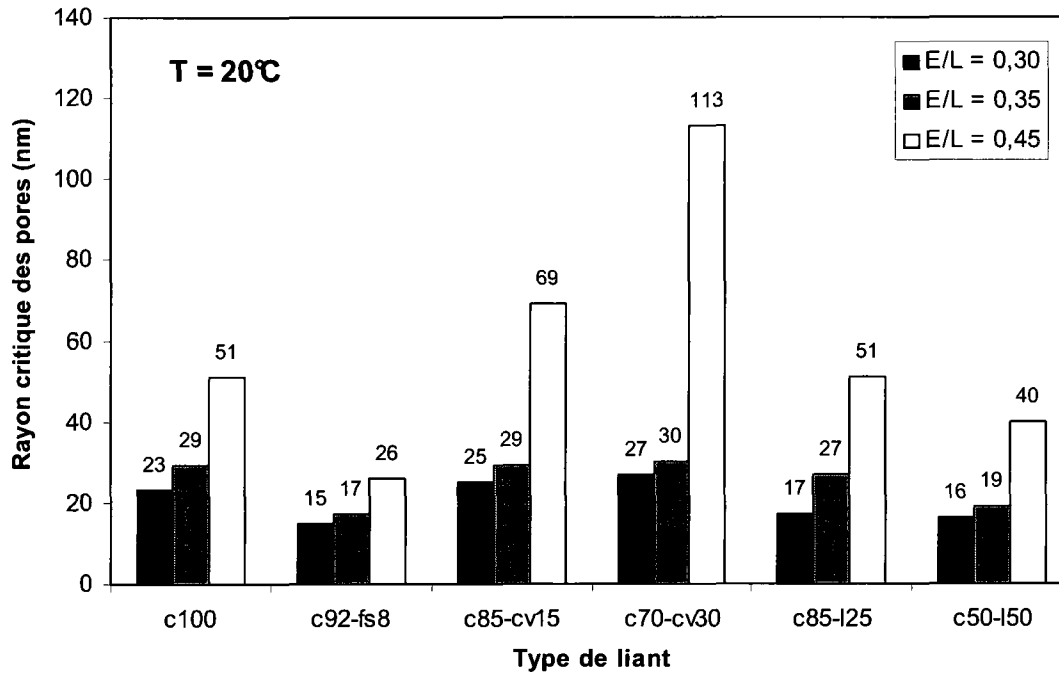


Figure 6. 25 – Rayon critique des pores dans les coulis testés à 20°C

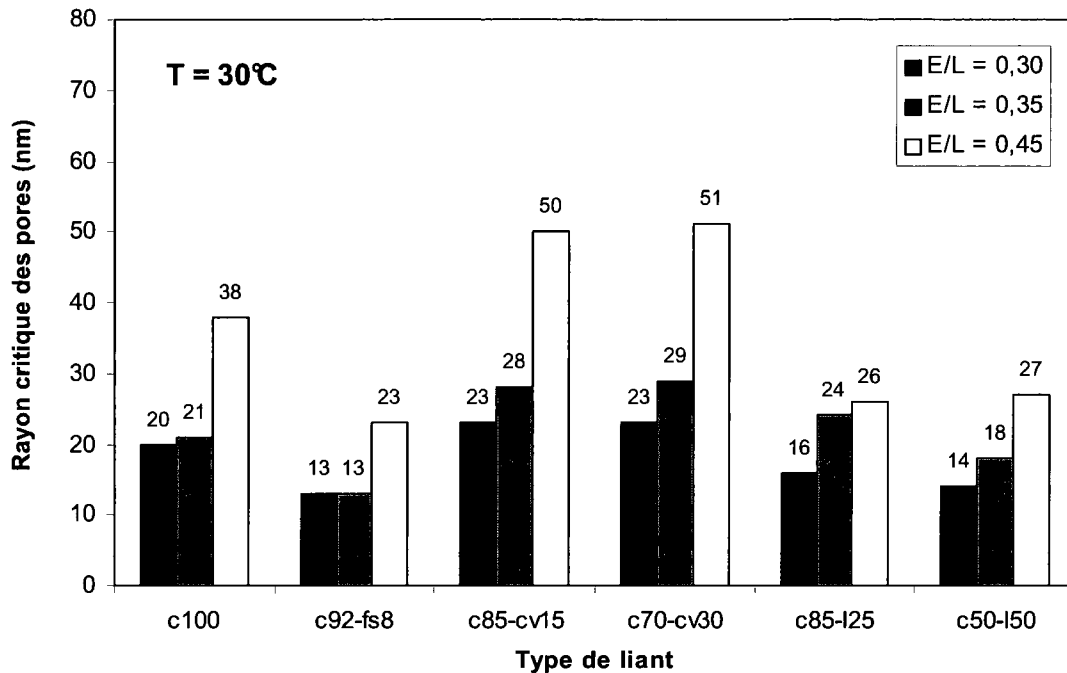


Figure 6. 26 – Rayon critique des pores dans les coulis testés à 30°C

6. 5 Volume relatif des pores dans les coulis

Le réseau poreux d'une matrice cimentaire est constitué, selon Kumar et Battacharjee [2003], de quatre types de pores : les pores de gel (micropores) ayant une dimension caractéristique de 0,5 à 10 nm, les pores capillaires (mésopores) ayant un rayon moyen de 5 à 5000 nm, les macropores dus à la libération de l'air entraîné et les macropores dus à une compaction inadéquate. Selon les mêmes auteurs, la majorité des pores de gel ont un rayon compris entre 1,5 et 2 nm. Ces pores sont plus reliés aux phénomènes du retrait et du fluage tandis que les pores capillaires et les macropores influencent la résistance à la compression. Cependant Baron [1982] a démontré que les pores capillaires dont les rayons sont inférieurs à 50 nm peuvent causer une dépression capillaire allant jusqu'à 15 MPa (Tableau 1.2). Suite aux conclusions des auteurs cités précédemment, nous avons analysé des volumes relatifs des pores en regroupant les rayons des pores de la façon suivante : 1-10 nm, 10-50 nm, 50-100 nm, 0,1-1 µm et 1-5 µm.

6.5. 1 Effet du rapport E/L sur le volume relatif des pores

Le rapport E/L a un effet important sur le volume relatif des pores quel que soit le type de liant ou la température. Les résultats obtenus avec les coulis de référence sont présentés aux figures 6.27 à 6.29. Le volume des micropores (4 à 10 nm) dans les coulis de référence est situé entre 8,5 et 21,4 mm³/g. On constate que le volume des micropores augmente avec l'augmentation du rapport E/L, quelle que soit la température. Cette augmentation est due à l'augmentation du degré d'hydratation du ciment, donc à la formation d'une plus grande quantité d'hydrates et des pores de gel. Le volume des pores capillaires ayant un rayon situé entre 10 et 50 nm varie de 90,9 à 144,9 mm³/g. Quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,35, on observe une augmentation du volume de cette taille de pores quelle que soit la température. Quand on passe de 0,35 à 0,45, on observe à location une diminution des pores de 10 à 50 nm. Cette diminution est due au fait que les coulis de rapport 0,45 possèdent une porosité plus grossière. Ils possèdent donc plus de pores de 50 à 100 nm que les coulis du rapport E/L plus faible.

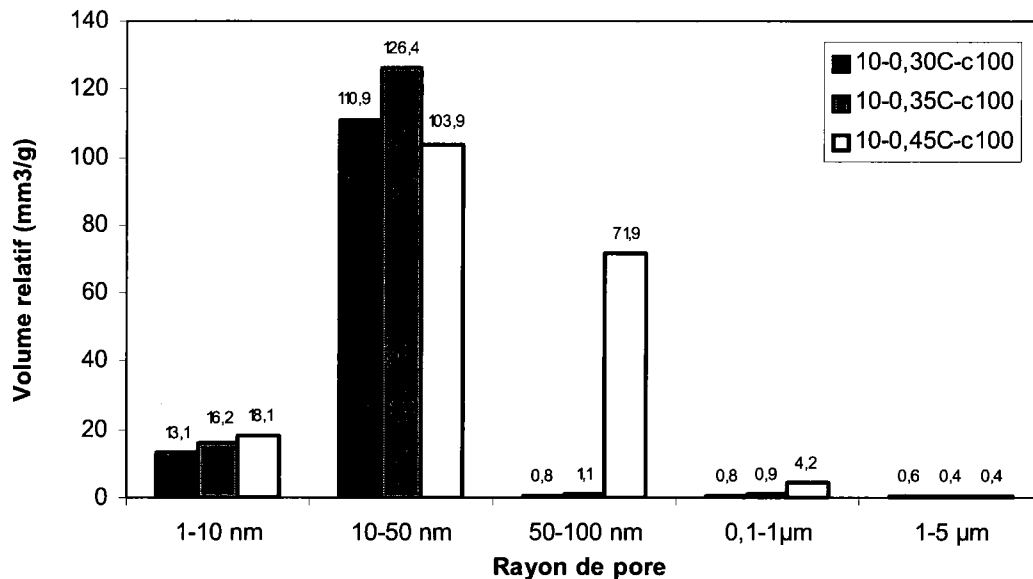


Figure 6. 27 - Volume relatif des pores dans les coulis de référence à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

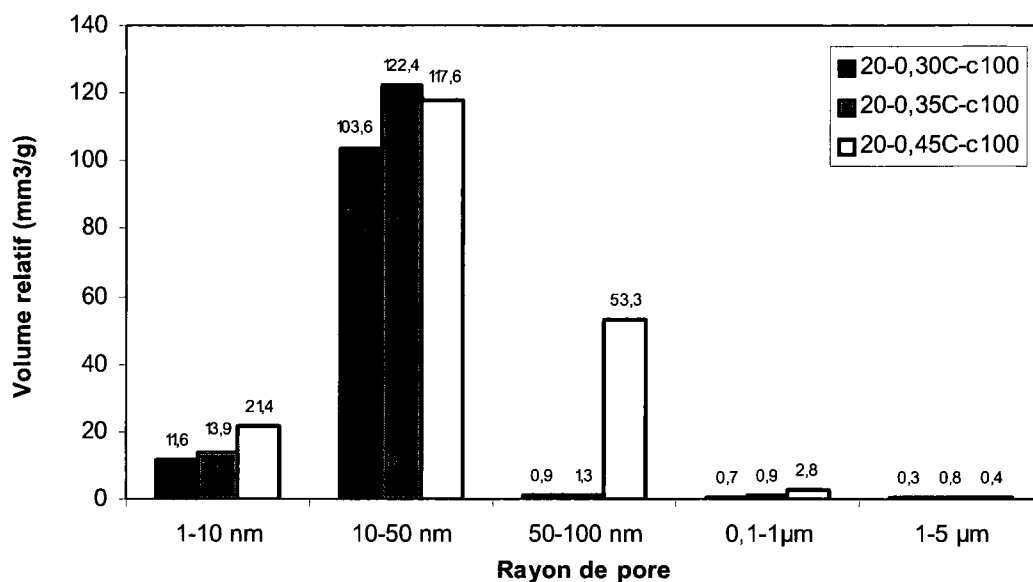


Figure 6. 28 - Volume relatif des pores dans les coulis de référence à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

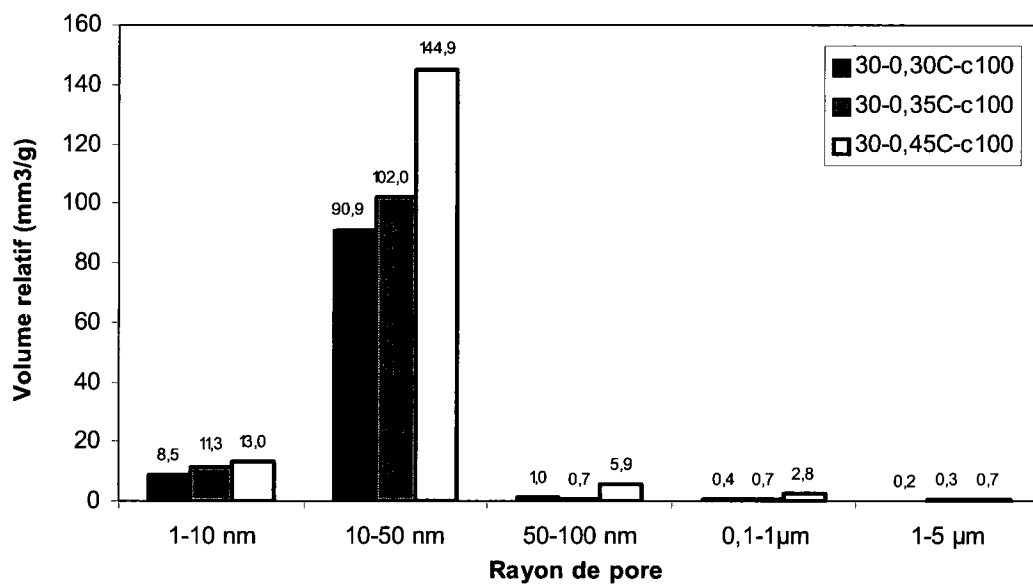


Figure 6. 29 - Volume relatif des pores dans les coulis de référence à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

Les figures 6.30 à 6.32 présentent les volumes relatifs des pores dans les coulis qui contiennent 8% de fumée de silice. Le volume relatif des micropores (4-10 nm) varie de 11,8 à 27,5 mm³/g. Il augmente avec le rapport E/L car le degré d'hydratation du liant augmente. Le volume relatif des mésopores (10-50 nm) varie de 70,6 à 155,2 mm³/g. Dans le cas de ce type de coulis on observe une augmentation du volume relatif des pores avec l'augmentation du rapport E/L pour les pores de 10 à 50 nm.

Le volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier est présenté aux figures 6.33 à 6.35. On observe, encore une fois, l'augmentation du volume relatif des micropores, indépendamment de la température, quand on augmente le rapport E/L de 0,30 à 0,45. Cette fois, le volume des micropores varie de 10,9 à 29,4 mm³/g tandis que le volume des pores ayant un rayon entre 10 et 50 nm varie de 80,5 à 125 mm³/g. Quand les essais sont réalisés à 20 et à 30°C, le volume des pores de 10 à 50 nm augment lors du passage de 0,30 à 0,45. Une telle augmentation est aussi observée à 10°C pour le passage de 0,30 à 0,35. Le coulis de rapport 0,45 possède moins de pores de 10 à 50 nm que les deux autres coulis. Cependant, il possède une quantité non négligeable (46,6 mm³/g) des pores de 50 à 100 nm. On remarque aussi une présence de pores de 0,1 à 1 µm (16,2%), ce qui représente le plus important volume de ce groupe de pores dans tous les coulis sans cendre volante.

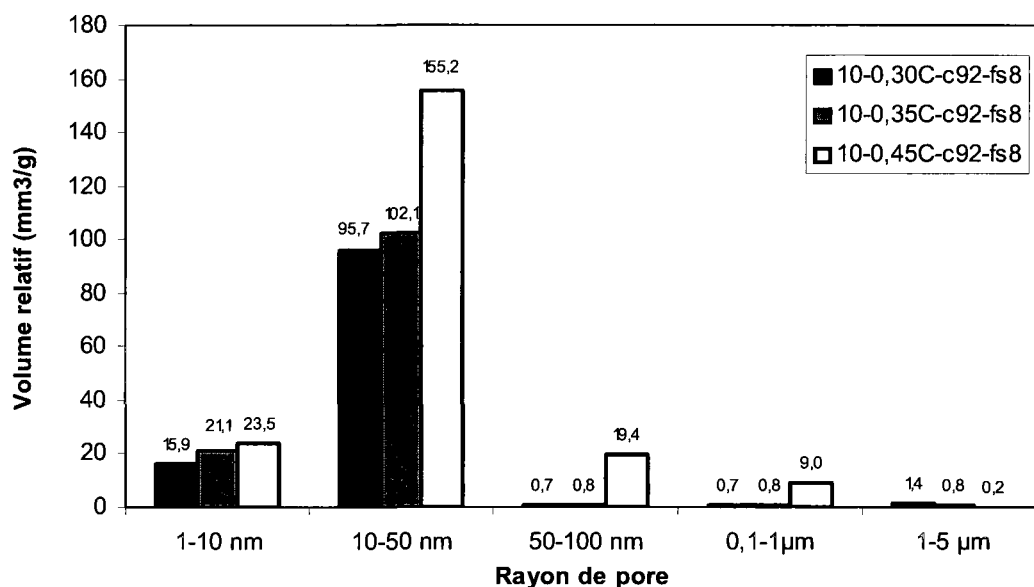


Figure 6. 30 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

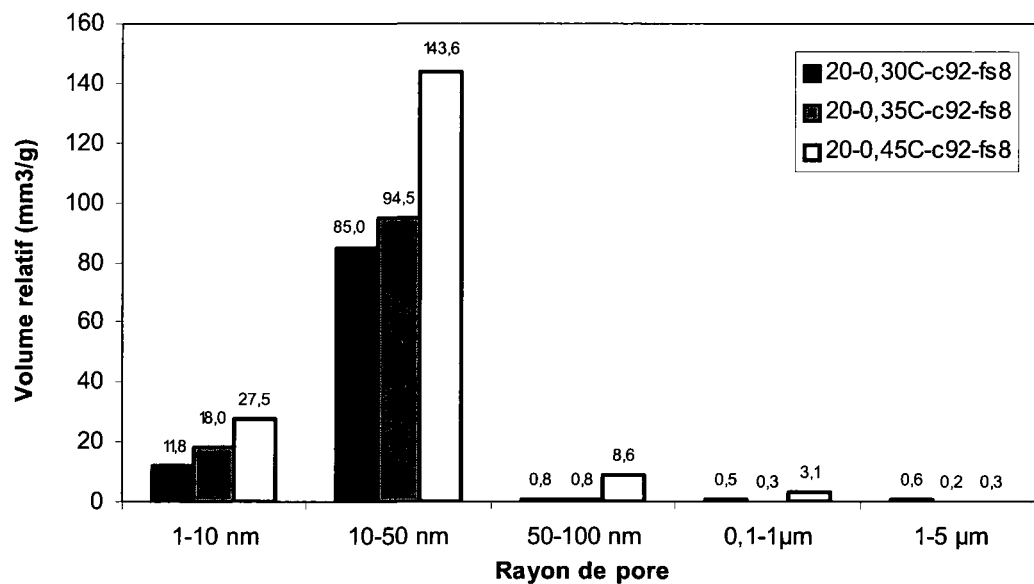


Figure 6. 31 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

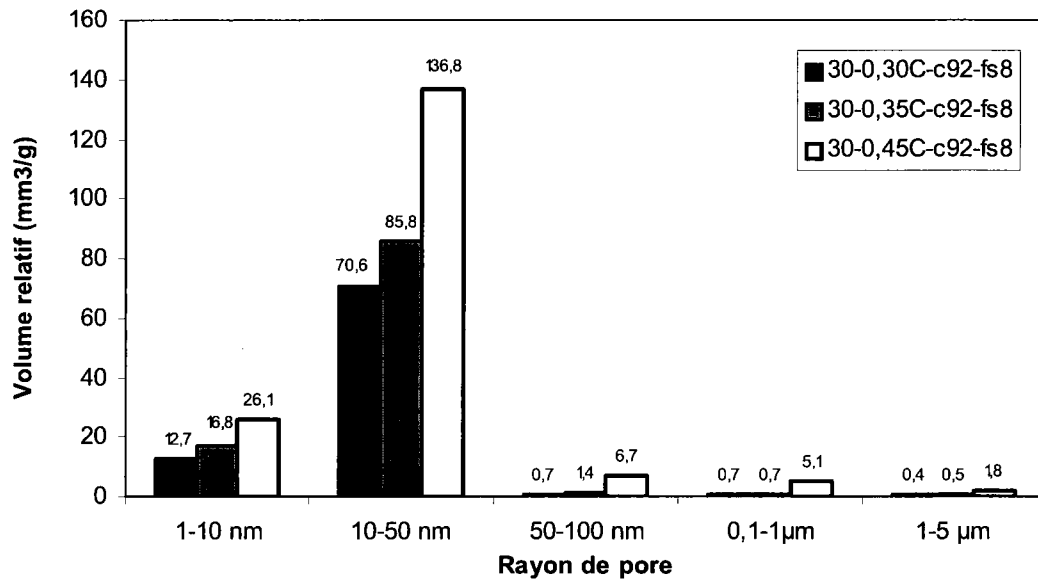


Figure 6. 32 – Volume cumulatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

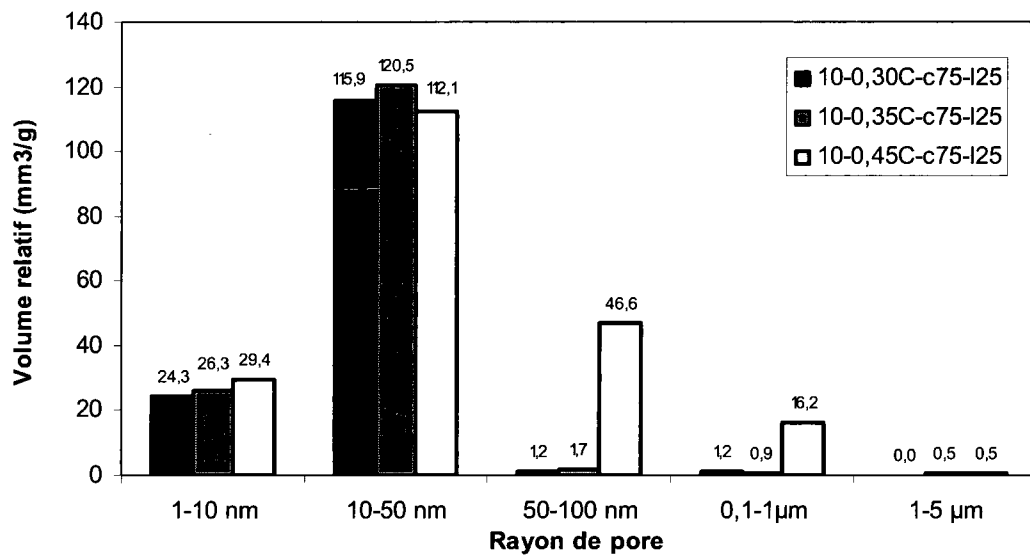


Figure 6. 33 – Volume cumulatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

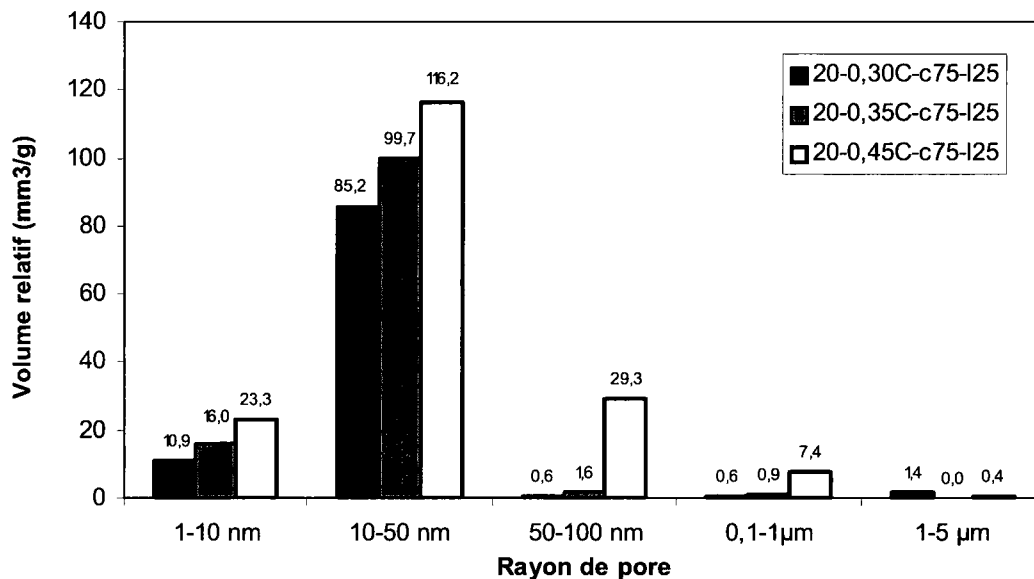


Figure 6. 34 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

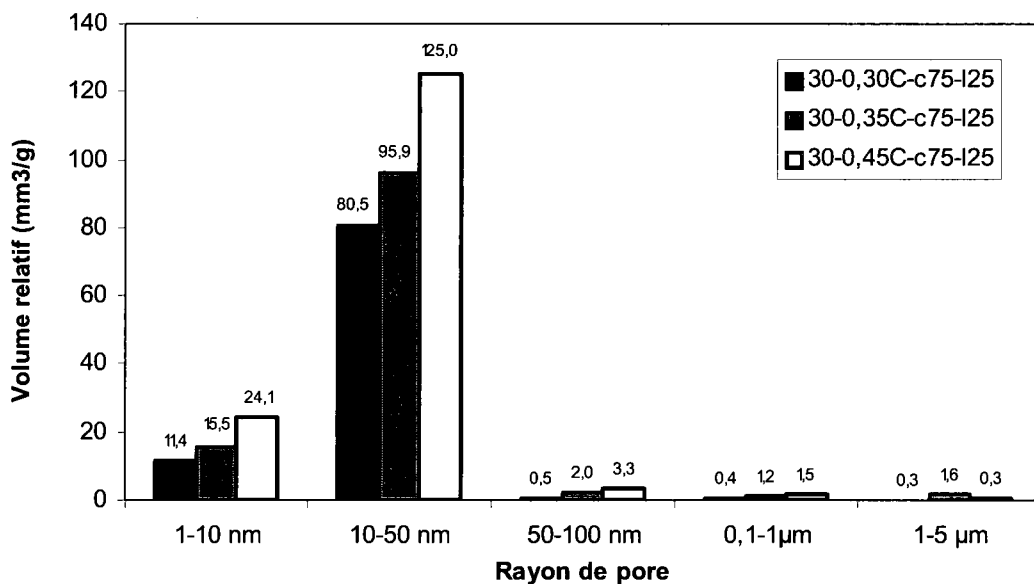


Figure 6. 35 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

Les figures 6.36 à 6.38 présentent le volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier. Dans ce type de coulis, le volume des micropores est situé entre 12,2 et 32,4 mm³/g et il augmente avec le degré d'hydratation. Le volume des mésopores de 10 à 50 nm varie de 71,2 à 114,5 mm³/g et celui des pores de 50 à 100 nm de 2,3 à 64,7 mm³/g. L'influence du rapport E/L sur le volume des pores est semblable à celui observé avec le coulis avec fumée de silice. On remarque une augmentation du volume des pores avec l'augmentation du rapport E/L, quel que soit la température ou le type de pores.

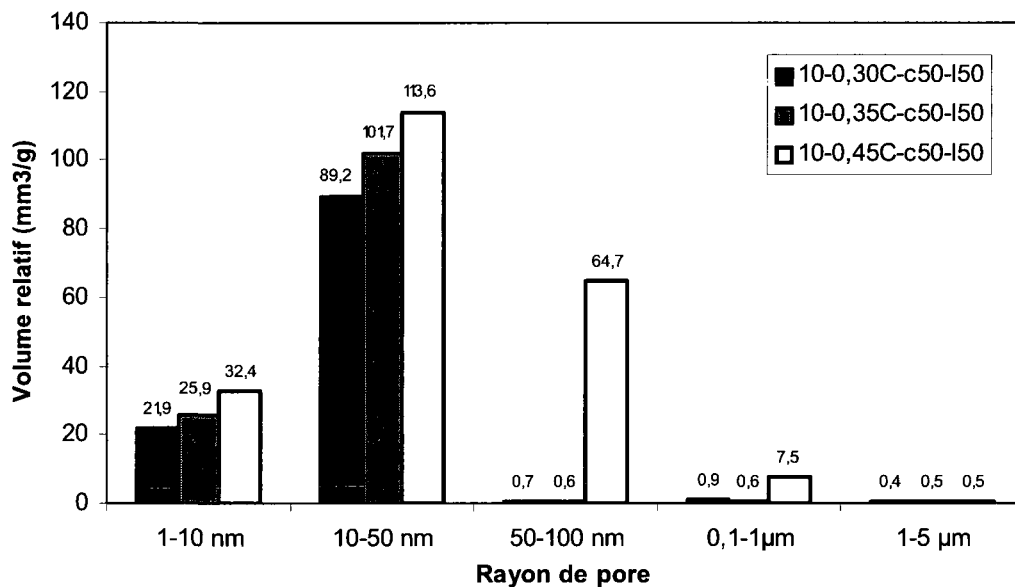


Figure 6. 36 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

Le volume relatif des pores dans les coulis avec cendre volante est présenté aux figures 6.39 à 6.44. Dans les coulis qui contiennent 15% de cendre volante, le volume des micropores (4-10 nm) est compris entre 10,4 et 21,7 mm³/g. Le volume de ces pores augmente avec l'augmentation du rapport E/L comme dans tous les cas précédents. Le volume des mésopores de 10 à 50 nm varie de 100,2 à 136,3 mm³/g. Lors du passage de 0,30 à 0,35 il augmente indépendamment de la température. Quand le rapport E/L augmente à 0,45, la répartition des volumes de pores change considérablement. À 30°C, le volume des pores de 10 à 50 nm est le plus élevé. On remarque aussi la présence des pores de 50 à 100 nm ayant un volume de

55,0 mm³/g. Quand on passe de 30 à 10°C, le volume des pores de 10 à 50 nm diminue graduellement comparativement au cas des coulis de rapports E/L plus faibles. On constate pourtant des quantités importantes de pores supérieurs à 50 nm.

La répartition des micros et mésopores dans les coulis avec 30% de cendre volante (Figures 6.42 à 6.44) est semblable à celle observée dans les coulis avec 15% de cendre. Cependant les volumes de pores sont plus importants. Par exemple, le volume des micropores varie de 14,1 à 23,2 mm³/g et celui des mésopores de 10 à 50 nm varie de 94,2 à 144,5 mm³/g. Ce type de coulis possède le plus des pores de 0,1 à 1 µm, soit 80,9 mm³/g pour un rapport E/L de 0,45.

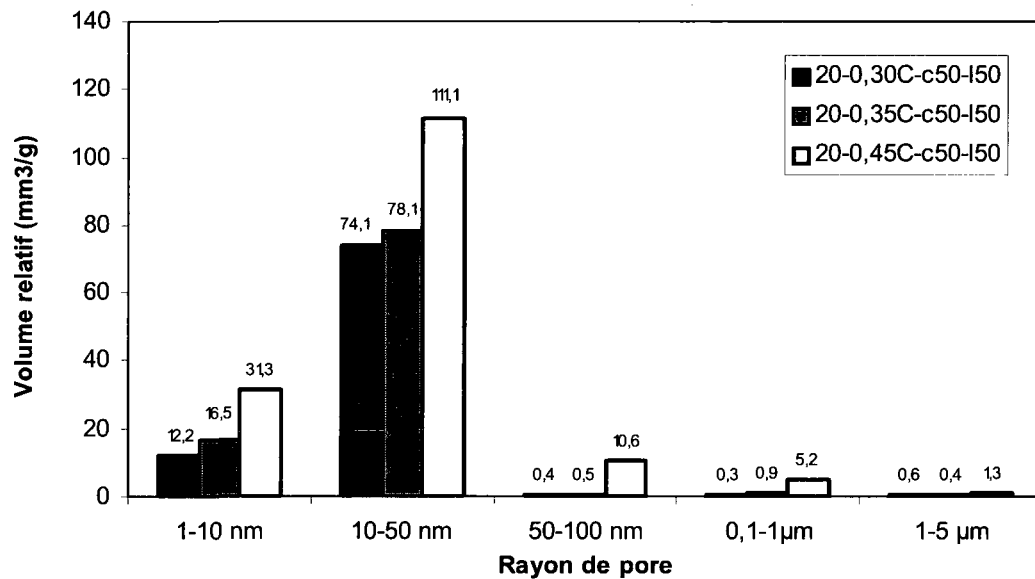


Figure 6. 37 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

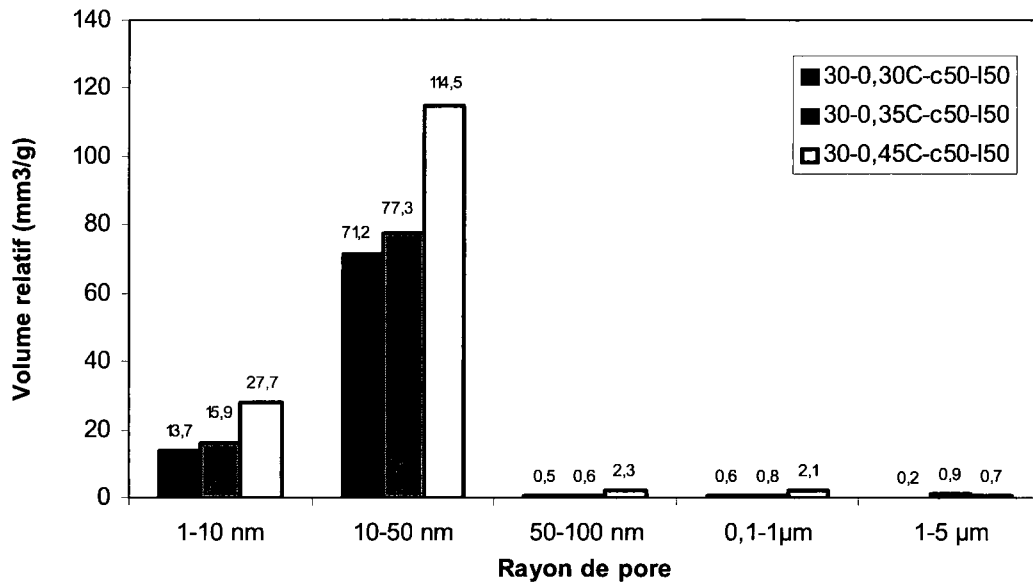


Figure 6. 38 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

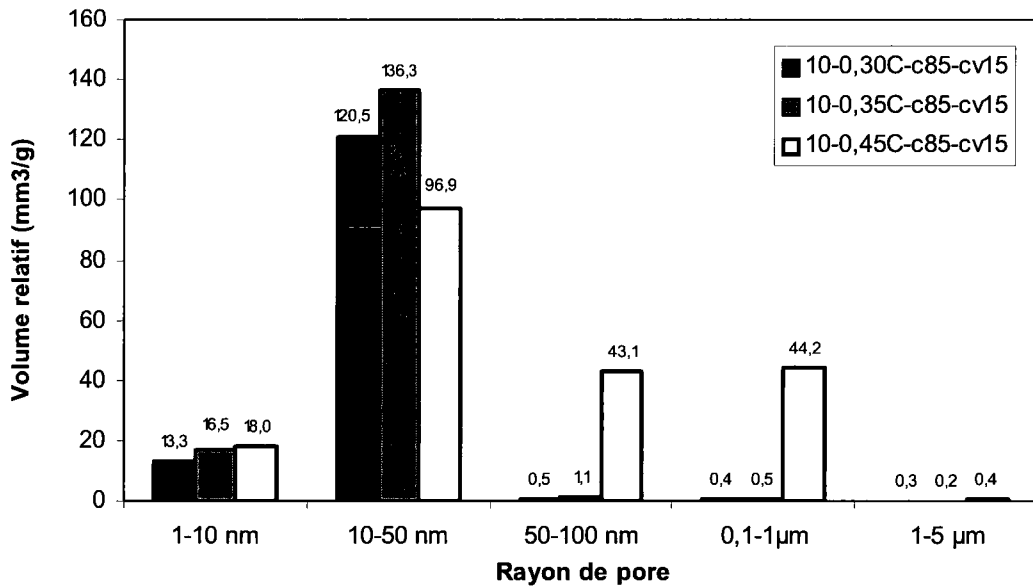


Figure 6. 39 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

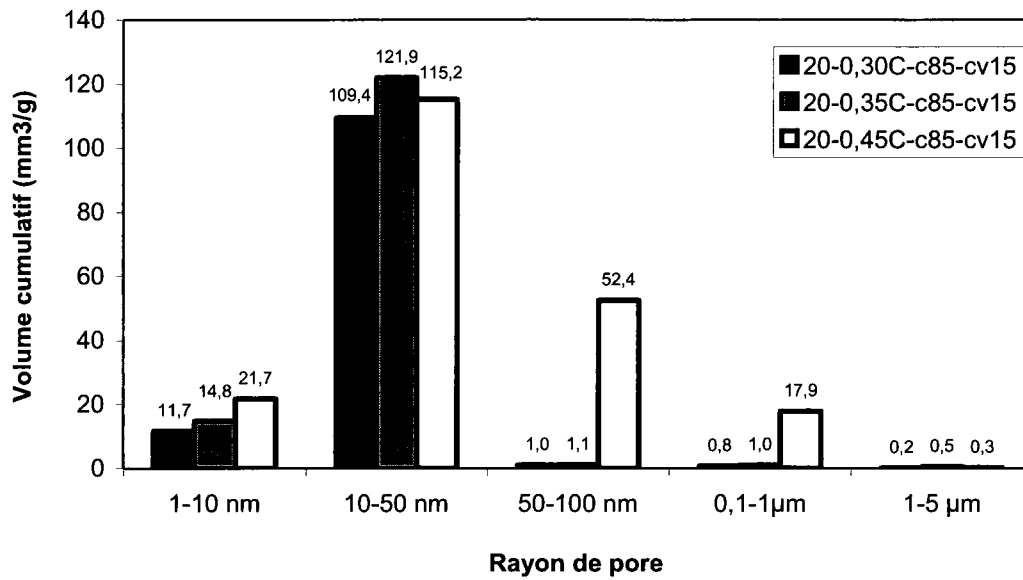


Figure 6. 40 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

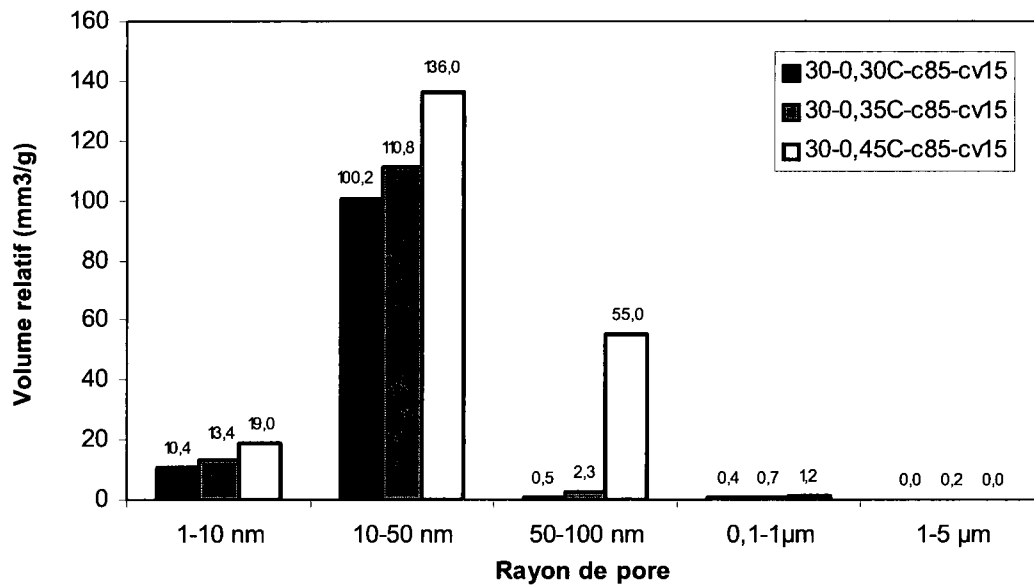


Figure 6. 41 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

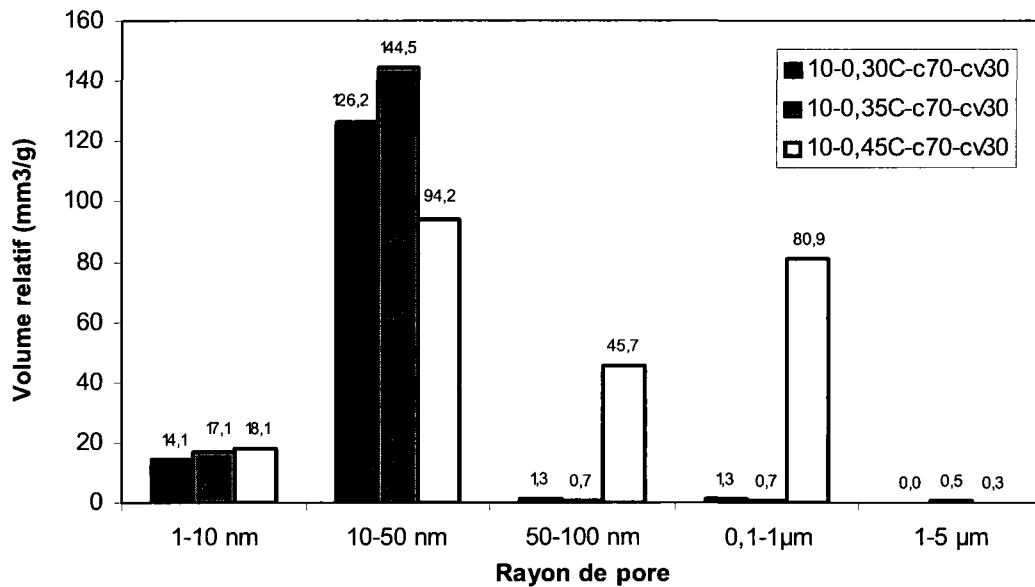


Figure 6. 42 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante à 10°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

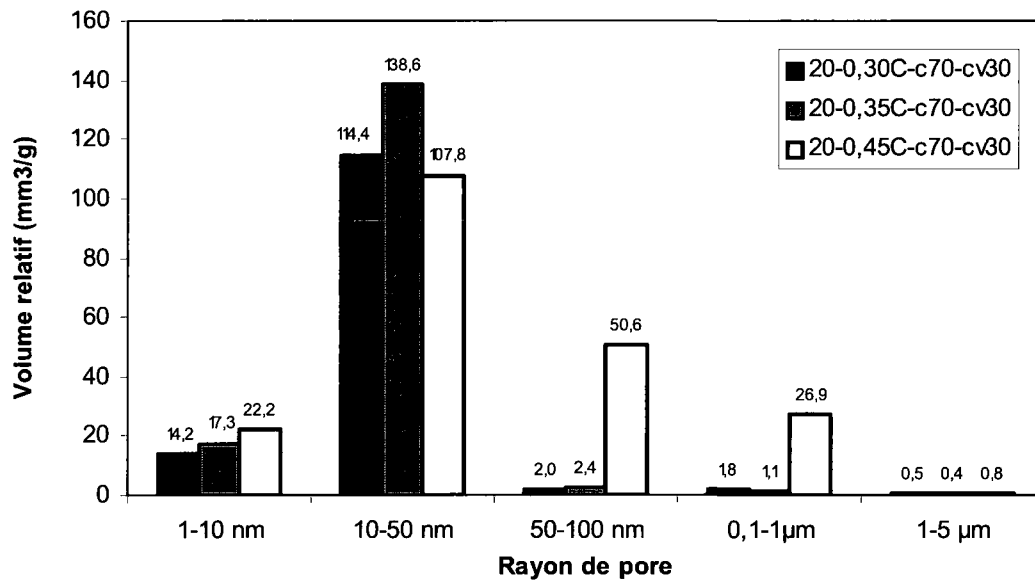


Figure 6. 43 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante à 20°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

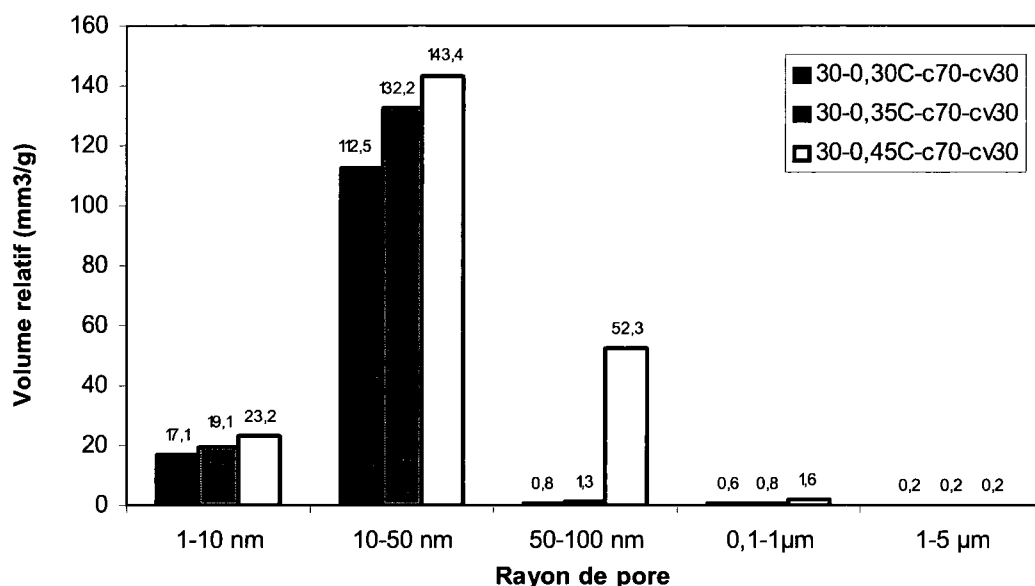


Figure 6. 44 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante à 30°C (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

On peut finalement conclure que l'effet du rapport E/L sur le volume des micropores (4-10 nm) est très clair. Le volume de ces pores augmente avec l'augmentation du rapport E/L quel que soit la température ou le type de liant car le degré d'hydratation augmente. La quantité de micropores est donc fonction de la quantité d'hydrates. L'influence du rapport E/L sur le volume des mésopores de 10 à 50 nm est variable. Quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,35, on observe constamment une augmentation du volume de ces pores quel que soit la température ou le type de liant. On constate aussi une absence des mésopores supérieurs à 50 nm. Quand le rapport E/L augmente de 0,35 à 0,45, le volume des pores de 10 à 50 nm varie avec la température. Quand les essais de retrait endogène sont réalisés à 30°C, le volume de ces pores est toujours le plus élevé comparativement aux deux autres coulis. Il est de même dans le cas de deux autres températures si le coulis contient 8% de fumée de silice ou 50% de laitier. Quand la température baisse à 20°C et surtout à 10°C, le volume des pores de 10 à 50 nm commence à diminuer, puis on observe l'apparition des plus gros pores (50 à 100 nm).

6.5. 2 Effet de la température sur le volume relatif des pores

L'influence de la température sur le volume des pores a été étudiée en même temps pour les coulis ayant un rapport E/L de 0,30 et de 0,35. Les coulis de rapport E/L égal à 0,45 possèdent, dans la majorité des cas, une répartition du volume de pores particulière, ce qui requiert une analyse séparée.

Les figures 6.45 à 6.47 présentent l'influence de la température sur le volume des pores dans les coulis de référence. Dans les coulis de rapport 0,30 et 0,35, une augmentation de la température de 10 à 30°C entraîne une diminution des micropores et des mésopores de 10 à 50 nm. Dans les coulis de référence avec un rapport E/L de 0,45, l'augmentation de la température cause une augmentation des pores de 10 à 50 nm et une diminution des pores de 50 à 100 nm.

Dans le cas des coulis avec fumée de silice (Figures 6.48 à 6.50), il est difficile de voir quel est l'effet de la température sur le volume des micropores. Cependant, l'effet de la température sur le volume des mésopores est bien clair car ce volume diminue quand la température augmente, quel que soit le rapport E/L.

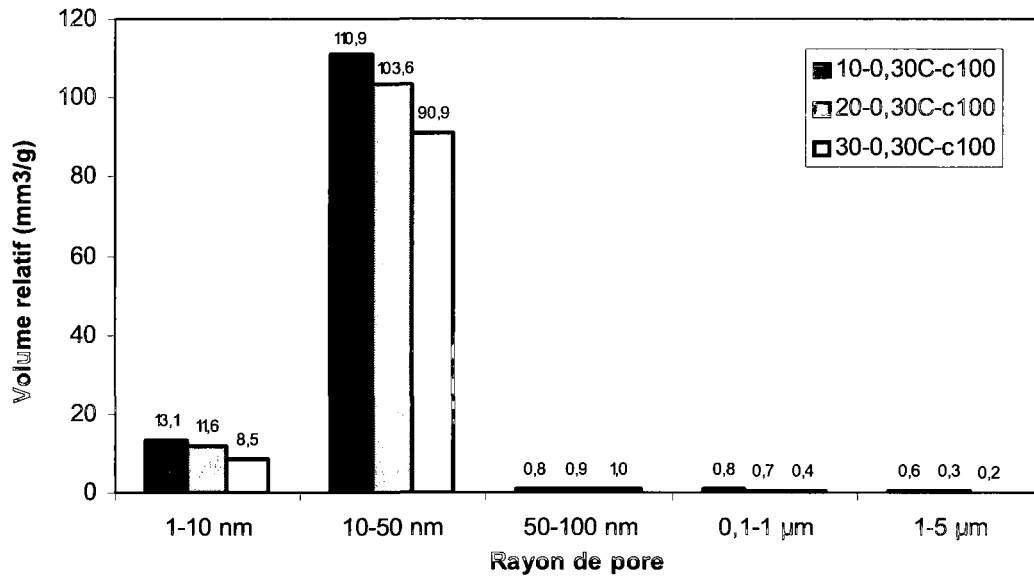


Figure 6. 45 – Volume relatif des pores dans les coulis de référence, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C

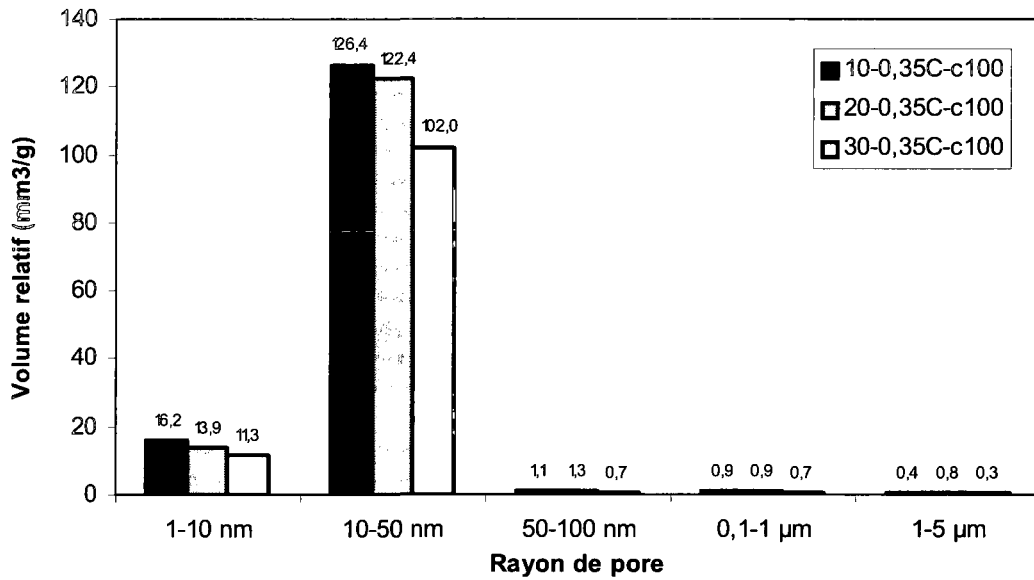


Figure 6. 46 – Volume relatif des pores dans les coulis de référence, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C

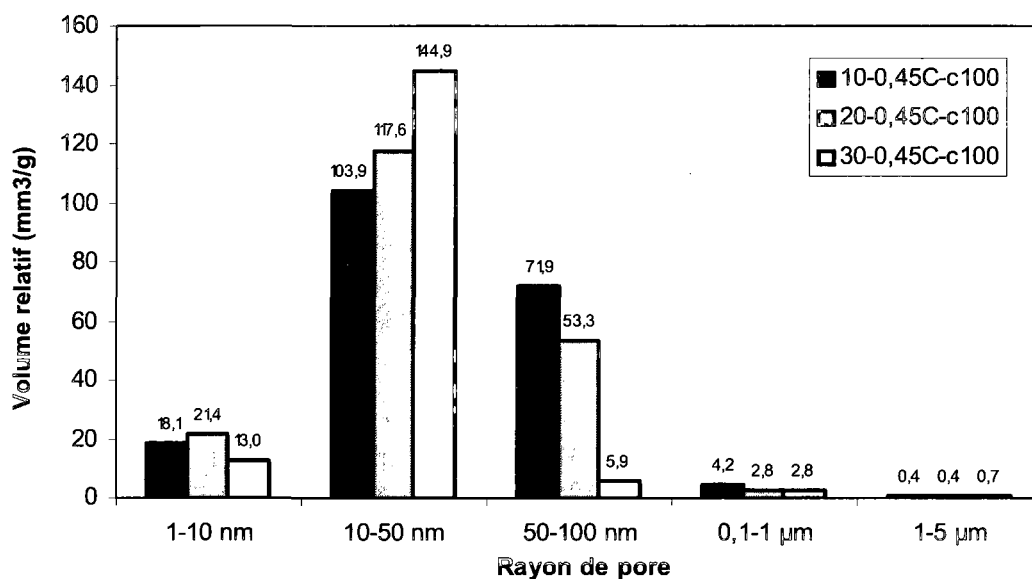


Figure 6. 47 – Volume relatif des pores dans les coulis de référence, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C

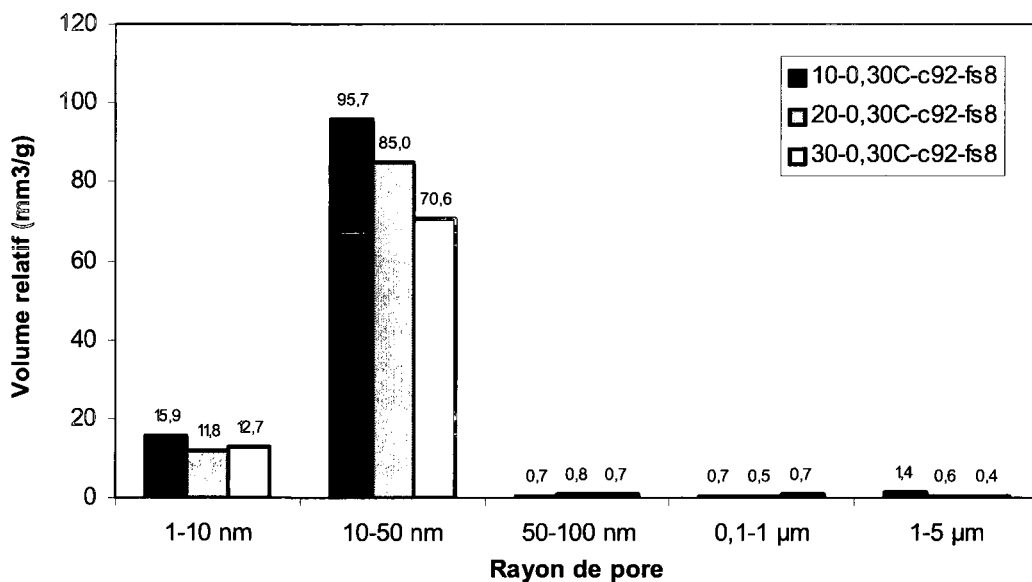


Figure 6. 48 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C

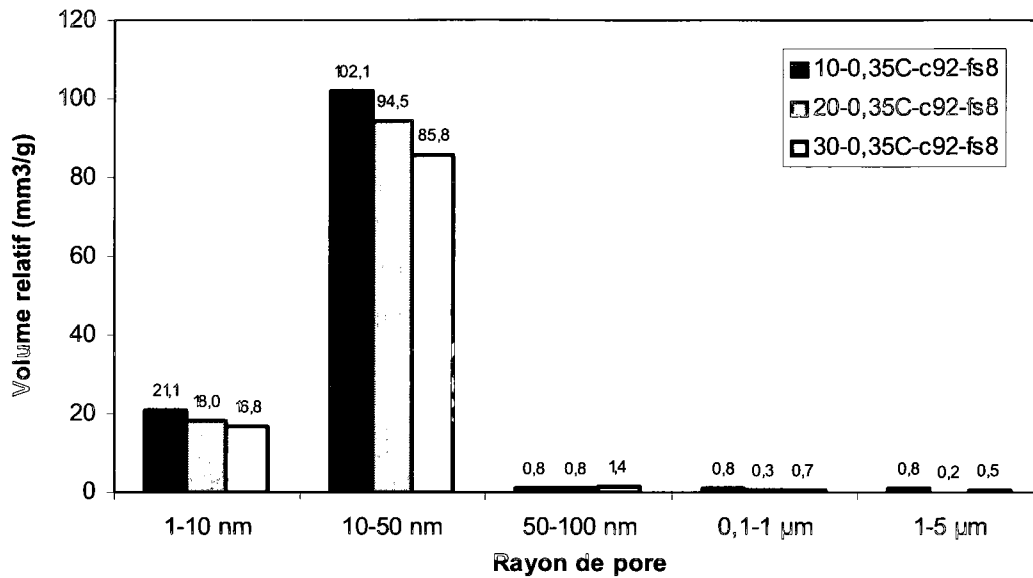


Figure 6. 49 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C

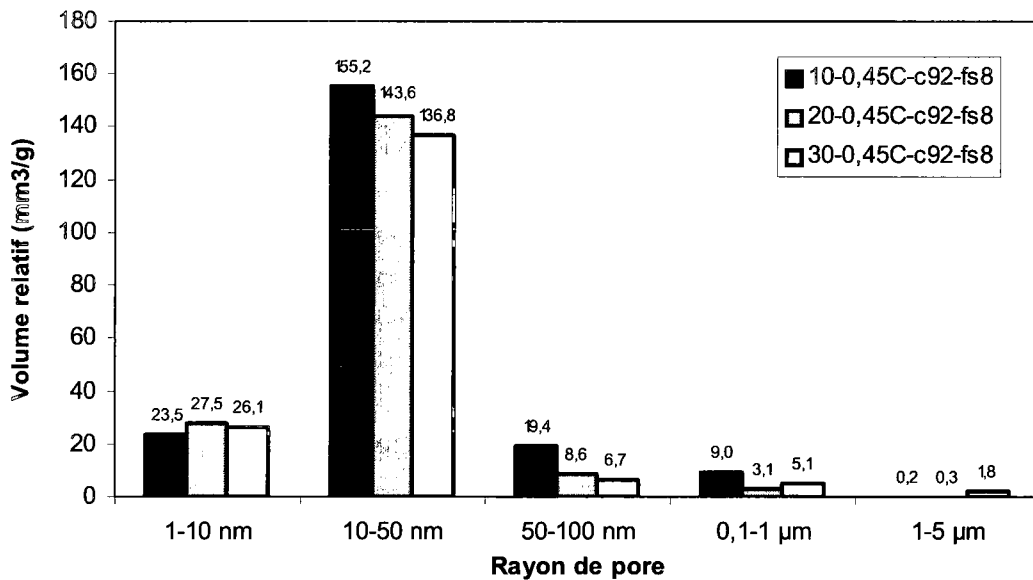


Figure 6. 50 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C

Dans les coulis au laitier (Figures 6.51 à 6.56) ayant des rapports E/L de 0,30 et 0,35, l'influence de la température sur le volume relatif des pores est semblable à celui observé dans le cas des coulis contenant de la fumée de silice. Quand le rapport E/L est égal à 0,45, le

volume des pores de 10 à 50 nm augmente avec la température, alors que le volume des pores supérieurs à 50 nm diminue.

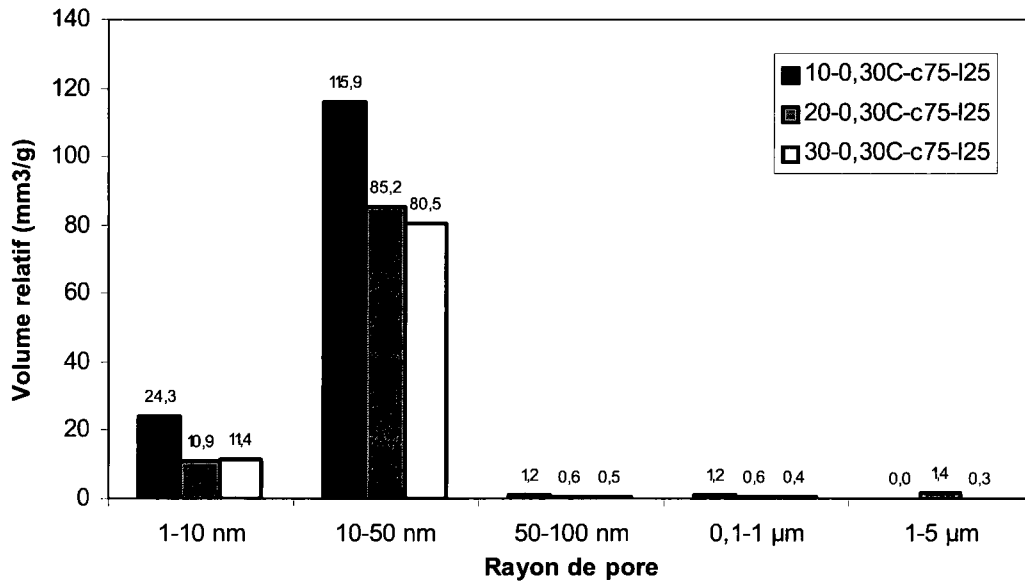


Figure 6. 51 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C

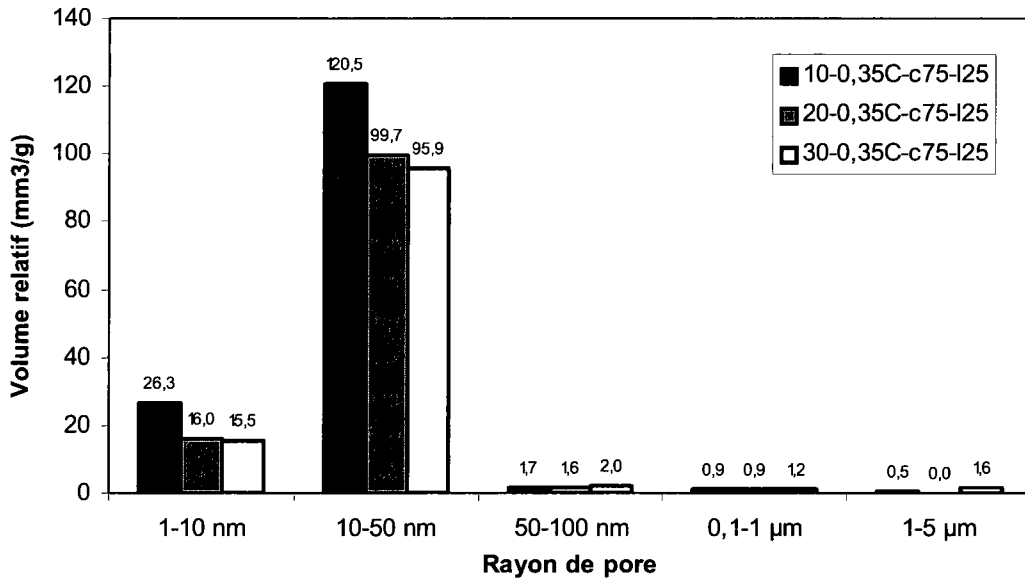


Figure 6. 52 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C

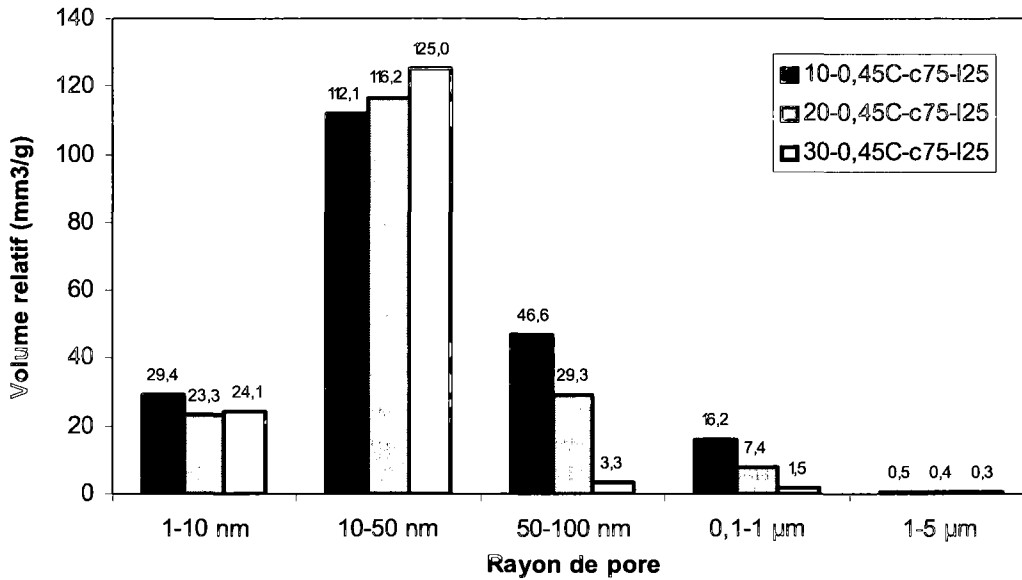


Figure 6. 53 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 25% de laitier, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C

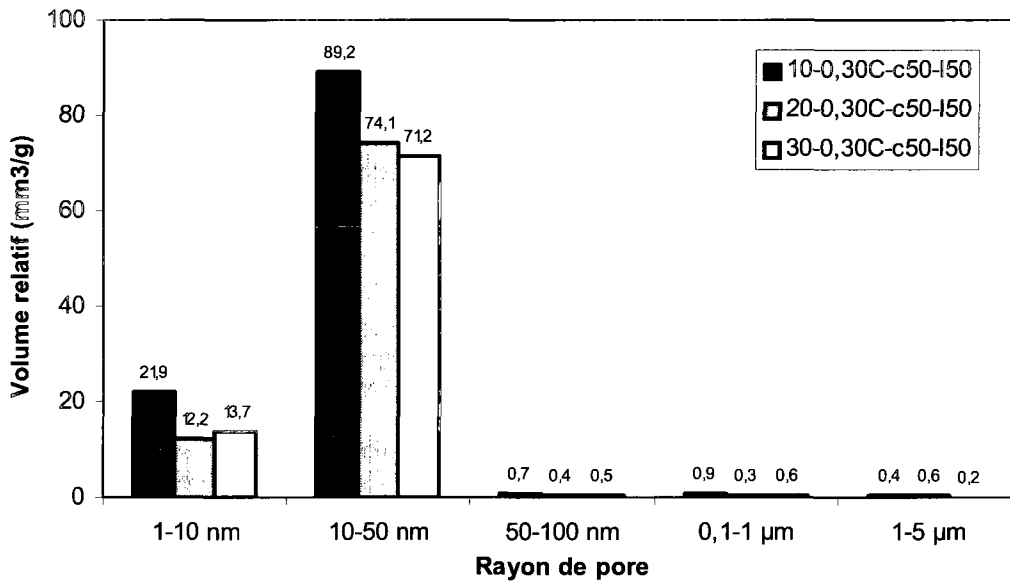


Figure 6. 54 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C

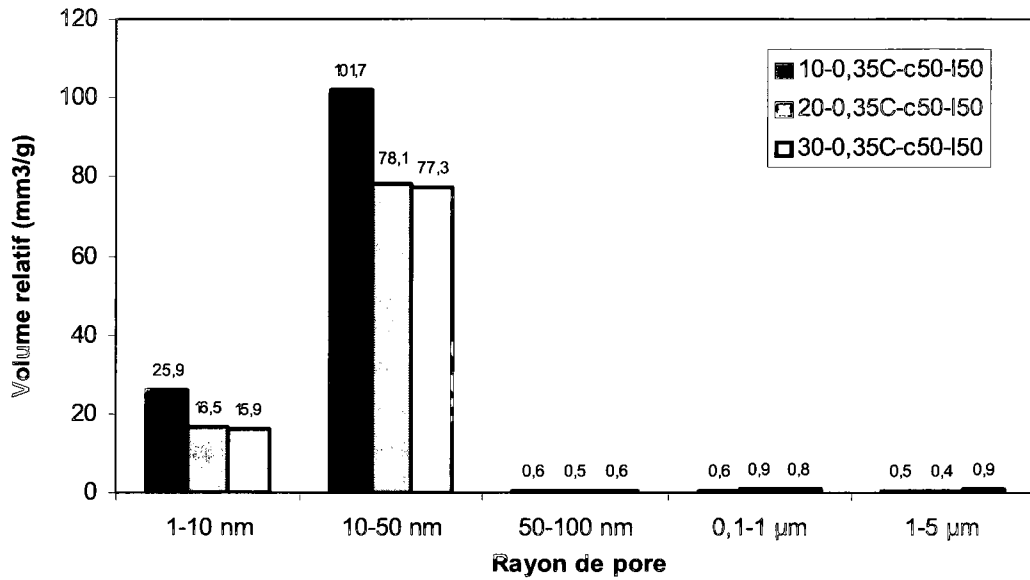


Figure 6. 55 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C

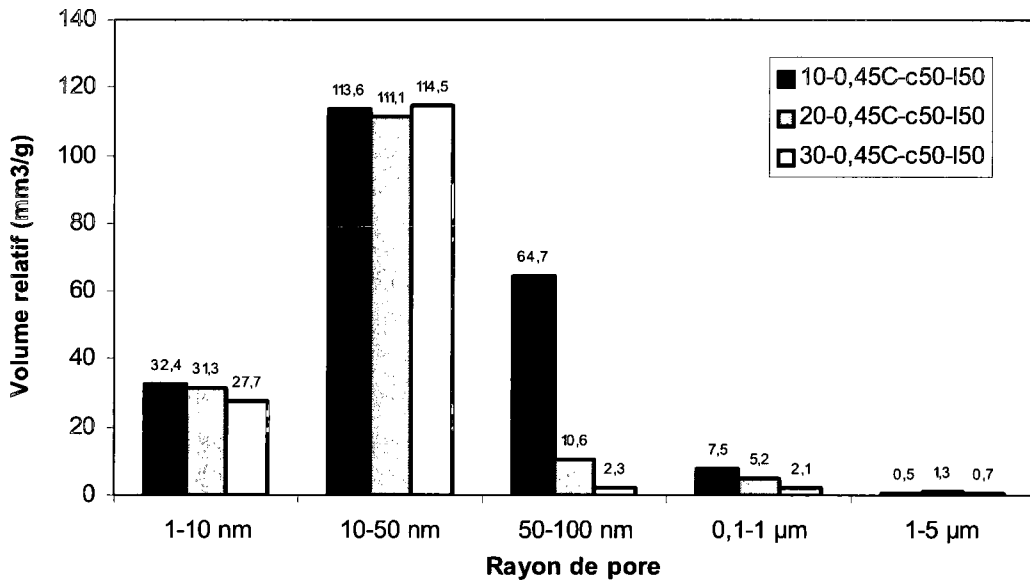


Figure 6. 56 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 50% de laitier, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C

Les figures 6.57 à 6.62 présentent le volume relatif des pores dans les coulis avec cendre volante. Quand le taux de remplacement du ciment par la cendre volante est de 15% et le rapport E/L de 0,30 et de 0,35, les volumes des micropores et des mésopores (10-50 nm) diminuent avec l'augmentation de la température. Quand le taux de remplacement est de 30% les résultats obtenus pour les micropores sont dans le sens contraire. Le volume des mésopores de 10 à 50 nm diminue encore une fois quand la température augmente. Dans les coulis de rapport 0,45, on observe une augmentation du volume de pores dont le rayon est situé entre 10 nm et 0,1 μm , avec l'augmentation de la température. La situation est contraire pour les pores de 0,1 à 1 μm .

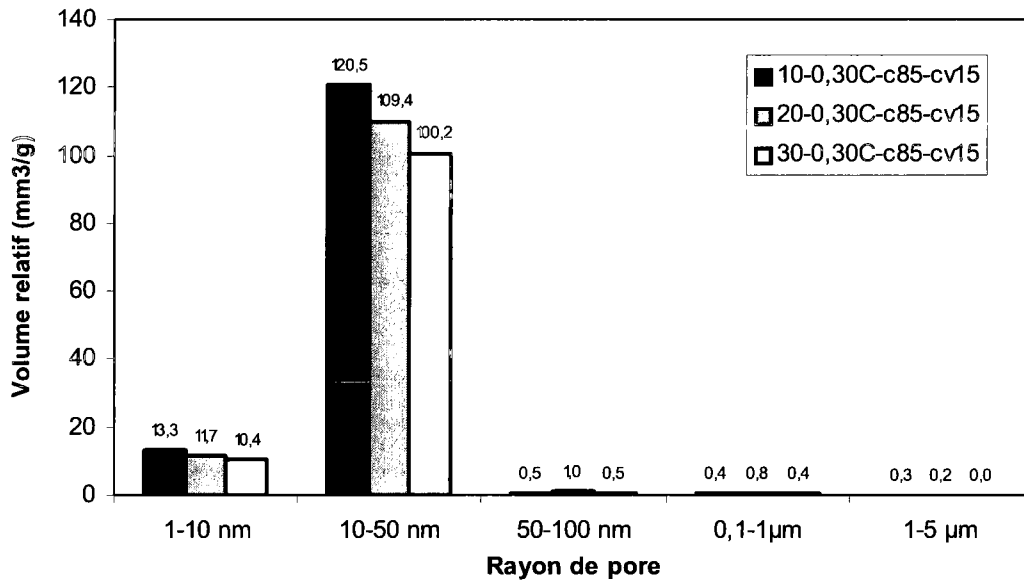


Figure 6. 57 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C

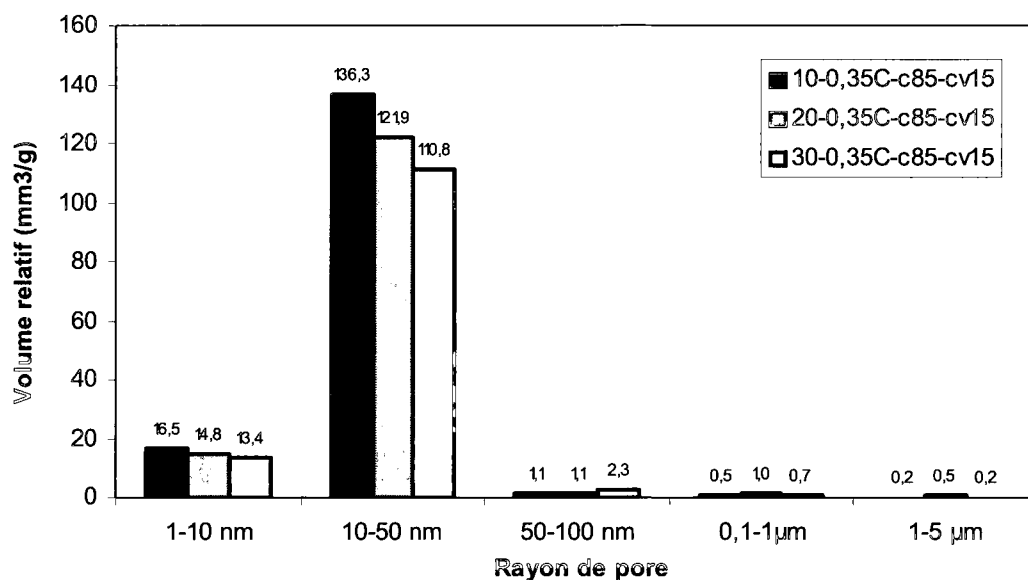


Figure 6. 58 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C

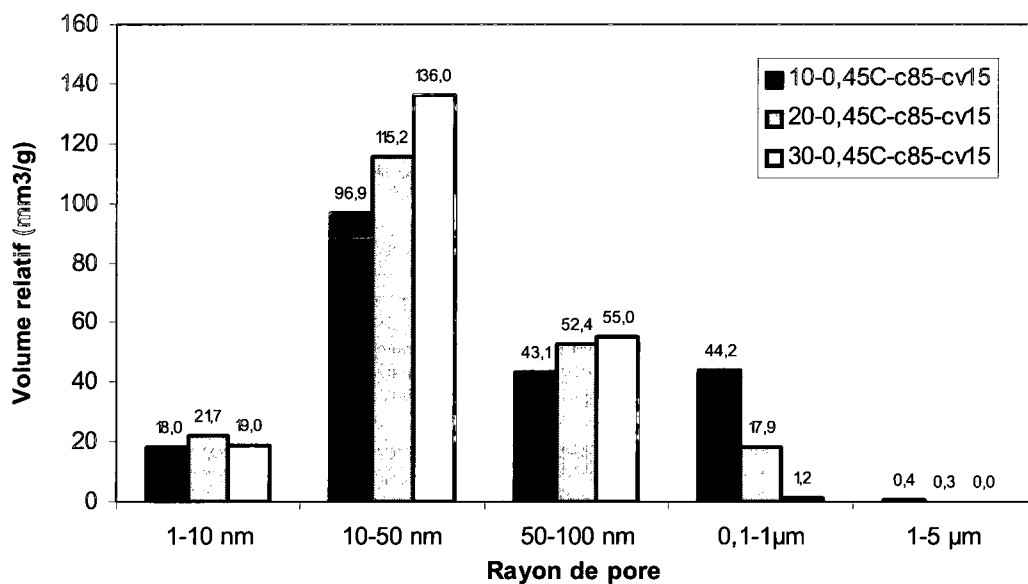


Figure 6. 59 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C

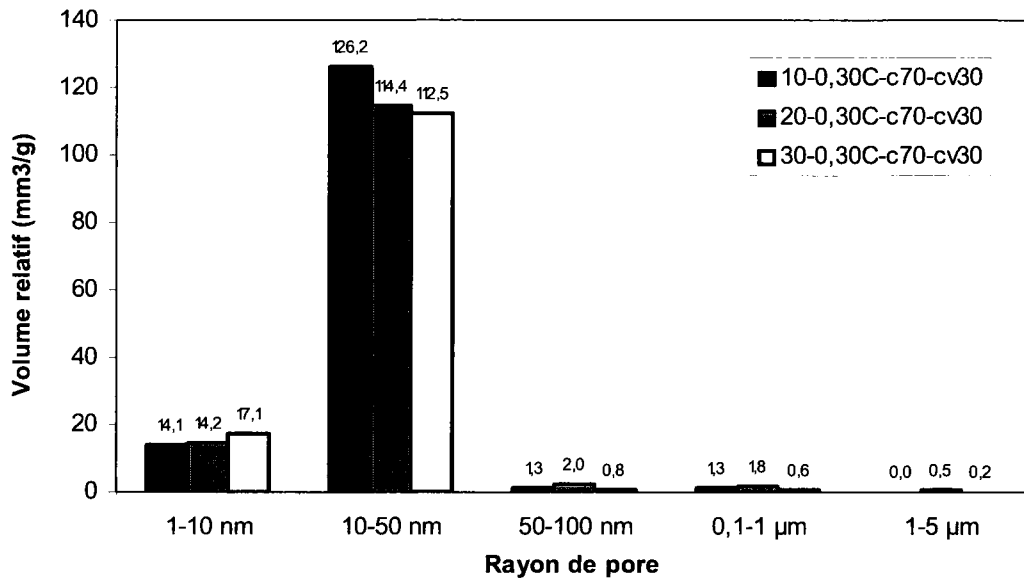


Figure 6. 60 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante, E/L = 0,30 et T = 10, 20 et 30°C

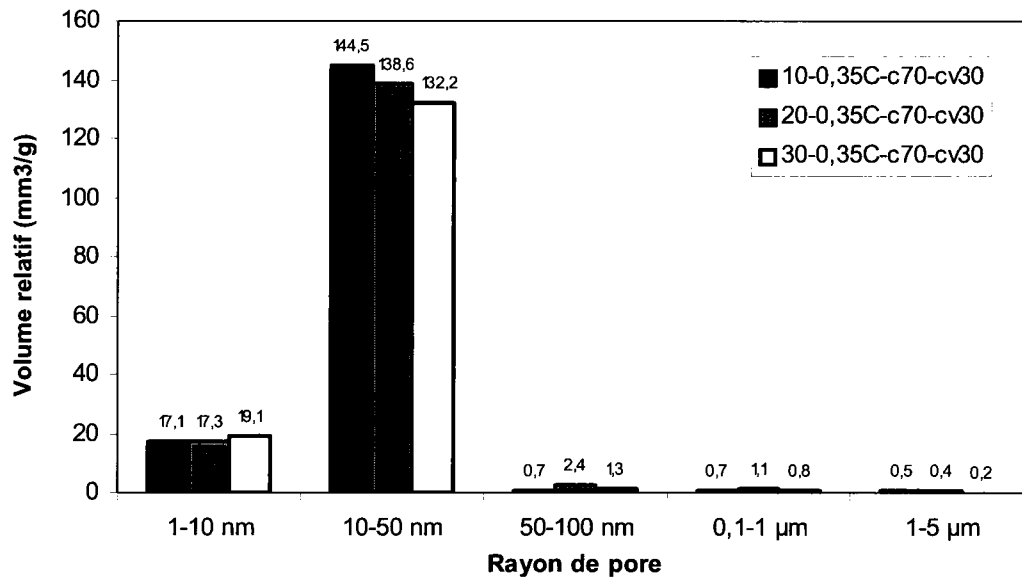


Figure 6. 61 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante, E/L = 0,35 et T = 10, 20 et 30°C

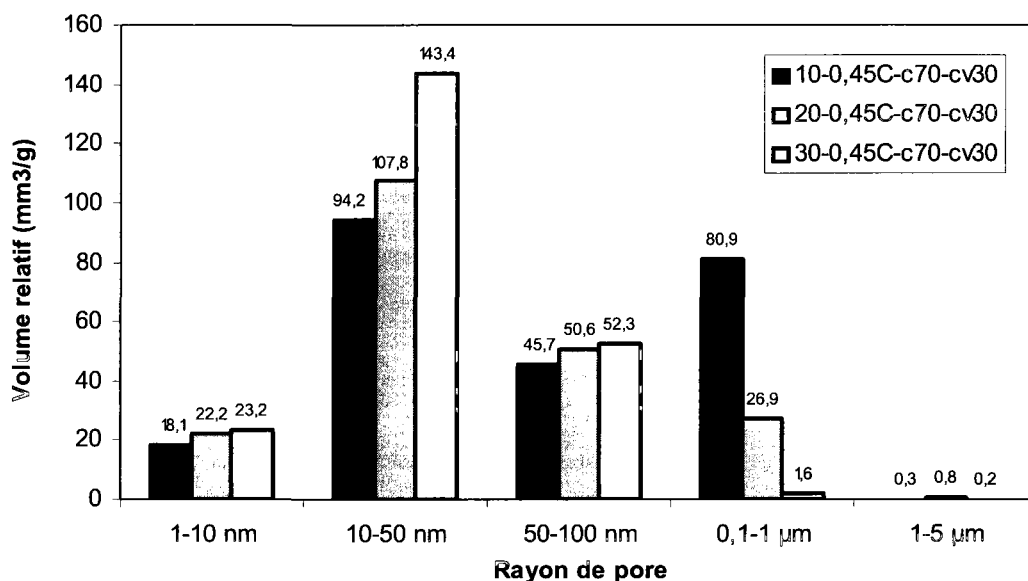


Figure 6. 62 – Volume relatif des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante, E/L = 0,45 et T = 10, 20 et 30°C

Finalement, on peut dire que l'influence de la température sur le volume relatif des pores est moins nette que l'influence du rapport E/L. Premièrement, l'influence de la température sur le volume des micropores (4-10 nm) est variable et change avec le rapport E/L et avec le type de liant. Au niveau des mésopores de 10 à 50 nm, les résultats obtenus dans les coulis de rapport 0,30 et 0,35 sont plus clairs car l'augmentation de la température cause une diminution du volume des pores, quel que soit le type de liant. Dans les coulis de rapport 0,45, on observe quelque fois une augmentation et quelque fois une diminution du volume de mésopores quand la température augmente de 10 à 30°C. Dans les coulis de rapport 0,45, l'effet de la température varie avec les rayons de pores et avec le type de liant.

7 RETRAIT ENDOGÈNE DES COULIS

7.1 Introduction

Ce chapitre traite du retrait endogène des coulis mesuré par la cellule de mesure du retrait endogène. Dans la première partie du chapitre, on présente le bilan volumétrique des diverses phases minérales qui pourraient se développer pendant l'hydratation du ciment et de la fumée de silice. On explique, par la suite, le développement de certains phénomènes observés lors de la mesure du retrait endogène interne et du retrait endogène externe.

La troisième partie du chapitre présente les courbes du retrait endogène interne, externe et total obtenues après 7 et 14 jours d'hydratation. Lors de la présentation des courbes, l'influence du rapport E/L, de la température, du type de liant et de l'âge du coulis seront discutées.

La dernière partie du chapitre présente les valeurs du retrait endogène interne, externe et total à 7 et à 14 jours. Ces résultats ont permis d'établir des relations entre le retrait endogène interne et le degré d'hydratation des coulis, puis entre le retrait endogène externe et le rayon critique des pores. Finalement une évaluation des risques de fissuration, basée sur le rapport entre le retrait externe et le retrait total, est présentée.

7.2 Bilan volumétrique des diverses phases minérales

Le déficit volumétrique dû à l'hydratation du ciment et de la fumée de silice peut être calculé à partir des équations d'hydratation des phases minérales du ciment et à partir de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice [Bentz, 1995; 1997; 2000]. Avant de présenter les équations, il est utile de connaître les notations chimiques abrégées utilisées dans ce document (Tableau 7.1). Ces notations sont souvent utilisées dans l'industrie du ciment et du béton.

Tableau 7. 1 – Notations chimiques abrégées

CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
SO ₃	S̄
H ₂ O	H
CaSO ₄	C \bar{S}
CaSO ₄ .2H ₂ O	C \bar{S} H ₂
3CaO.SiO ₂	C ₃ S
2CaO.SiO ₂	C ₂ S
3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .32H ₂ O	C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂
3CaO.Al ₂ O ₃ .CaSO ₄ .12H ₂ O	C ₄ A \bar{S} H ₁₂
1,7CaO.SiO ₂ .4H ₂ O	C _{1,7} SH ₄
1,1CaO.SiO ₂ .3,9H ₂ O	C _{1,1} SH _{3,9}
3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O	C ₃ AH ₆
Fe ₂ O ₃ .3H ₂ O	FH ₃

Pour calculer le déficit volumétrique d'une phase minérale, il est nécessaire de premièrement connaître les équations chimiques décrivant l'hydratation de cette phase. Il faut ensuite calculer la masse atomique M [g/mol] de chaque élément de l'équation. À partir des équilibres stœchiométriques et des masses atomiques, on peut calculer le nombre de mole $n = m/M$ [mol] pour chaque élément. Le volume V [ml] d'élément chimique est obtenu en divisant sa masse par sa densité. La masse m [g] est calculée à partir de la masse atomique M et le nombre de mole n . Les densités d [g/ml] de tous les éléments chimiques sont tirées des documents NISTIR 5756 [1995], NISTIR 6050 [1997] et NISTIR 6485 [2000] de Bentz, D.P.

Hydratation du C₃S

C₃S	+	5,3 H	→	C_{1,7}SH₄	+	1,3 CH
m = 1,000 g		0,418		0,996		0,422
M = 228,33 g/mol		18,02		227,51		74,10
n = 4,38 mmol		23,20		4,38		5,69
d = 3,21 g/ml		1,00		2,12		2,24
V = 0,312 ml		0,418		0,470		0,188

Retrait $100 [(0,470+0,188)-(0,312+0,418)] = -7,2 \text{ ml}/100\text{g de C}_3\text{S hydraté}$
 $100 [((0,470+0,188)-(0,312+0,418))/(0,312+0,418)] = -9,9 \%$

Hydratation du C₂S

C₂S	+	4,3 H	→	C_{1,7}SH₄	+	0,3 CH
m = 1,000 g		0,451		1,322		0,129
M = 172,25 g/mol		18,02		227,51		74,10
n = 5,81 mmol		25,03		5,81		1,74
d = 3,28 g/ml		1,00		2,12		2,24
V = 0,305 ml		0,451		0,624		0,058

Retrait $100 [(0,624+0,058)-(0,305+0,451)] = -7,4 \text{ ml}/100\text{g de C}_2\text{S hydraté}$
 $100 [((0,624+0,058)-(0,305+0,451))/(0,305+0,451)] = -9,8 \%$

Hydratation du C₃A**- Formation de l'hydrogrenat**

C₃A	+	6 H	→	C₃AH₆
m = 1,000 g		0,400		1,400
M = 270,20 g/mol		18,02		378,32
n = 3,70 mmol		22,20		3,70
d = 3,03 g/ml		1,00		2,52
V = 0,330 ml		0,400		0,556

Retrait $100 [0,556-(0,330+0,400)] = -17,4 \text{ ml}/100\text{g de C}_3\text{A hydraté}$
 $100 [(0,556-(0,330+0,400))/(0,330+0,400)] = -23,8 \%$

- Formation de l'ettringite

C₃A	+	3 C\bar{S}H₂	+	26 H	→	C₆A\bar{S}₃H₃₂
m = 1,000 g		1,911		1,734		4,645
M = 270,20 g/mol		172,19		18,02		1255,29
n = 3,70 mmol		11,10		96,00		3,70
d = 3,03 g/ml		2,32		1,00		1,70
V = 0,330 ml		0,824		1,734		2,732

Retrait $100 [2,732-(0,330+0,824+1,734)] = -15,6 \text{ ml}/100\text{g de C}_3\text{A hydraté}$
 $100 [(2,732-(0,330+0,824+1,734))/(0,330+0,824+1,734)] = -5,4 \%$

- Formation de monosulfoaluminate hydraté

2 C₃A	+	C₆A\bar{S}₃H₃₂	+	4 H	→	3 C₄A\bar{S}H₁₂
m = 1,000 g		2,322		0,133		3,455
M = 270,20 g/mol		1255,29		18,02		622,59
n = 3,70 mmol		1,85		7,38		5,55
d = 3,03 g/ml		1,70		1,00		1,99
V = 0,330 ml		1,366		0,133		1,736

Retrait $100 [1,736-(0,330+1,366+0,133)] = -9,3 \text{ ml}/100\text{g de C}_3\text{A hydraté}$
 $100 [(1,736-(0,330+1,366+0,133))/(0,330+1,366+0,133)] = -5,1 \%$

Hydratation du C₄AF- Formation de l'hydrogrenat et de l'hydroxyde de fer

C₄AF	+	10 H	→	C₃AH₆	+	CH	+	FH₃
m = 1,000 g		0,372		0,779		0,153		0,440
M = 485,98 g/mol		18,02		378,32		74,10		213,76
n = 2,06 mmol		20,64		2,06		2,06		2,06
d = 3,73 g/ml		1,00		2,52		2,24		3,00
V = 0,268 ml		0,372		0,309		0,068		0,147

Retrait $100 [(0,309+0,068+0,147)-(0,268+0,372)] = -11,6 \text{ ml}/100\text{g de C}_4\text{AF hydraté}$
 $100 [((0,309+0,068+0,147)-(0,268+0,372))/(0,268+0,372)] = -18,1 \%$

- Formation de l'ettringite et de l'hydroxyde de fer

	C₄AF	+ 3 C₃S₂H₂	+ 30 H	→	C₆A₃S₃H₃₂	+ CH	+ FH₃
m =	1,000 g	1,064	1,115		2,586	0,153	0,440
M =	485,98 g/mol	172,19	18,02		1255,29	74,10	213,76
n =	2,06 mmol	6,18	61,88		2,06	2,06	2,06
d =	3,73 g/ml	2,32	1,00		1,70	2,24	3,00
V =	0,268 ml	0,459	1,115		1,521	0,068	0,147

Retrait $100 [(1,521+0,068+0,147)-(0,268+0,459+1,115)] = -10,6$ ml/100g de C₄AF hydraté
 $100 [((1,521+0,068+0,147)-(0,268+0,459+1,115))/(0,268+0,459+1,115)] = -5,8$ %

- Formation de monosulfoaluminate hydraté et de l'hydroxyde de fer

	2 C₄AF	+ C₆A₃S₃H₃₂	+ 12 H	→	3 C₄A₃S₃H₁₂	+ 2 CH	+ 2 FH₃
m =	1,000 g	1,293	0,224		1,924	0,153	0,440
M =	485,98 g/mol	1255,29	18,02		622,59	74,10	213,76
n =	2,06 mmol	1,03	12,43		3,09	2,06	2,06
d =	3,73 g/ml	1,70	1,00		1,99	2,24	3,00
V =	0,268 ml	0,761	0,224		0,967	0,068	0,147

Retrait $100 [(0,967+0,068+0,147)-(0,268+0,761+0,224)] = -7,1$ ml/100g de C₄AF hydraté
 $100 [((0,967+0,068+0,147)-(0,268+0,761+0,224))/(0,268+0,761+0,224)] = -5,7$ %

Réaction pouzzolanique de la fumée de silice

	S	+ 1,1 CH	+ 2,8 H	→	C_{1,1}SH_{3,9}
m =	1,000 g	1,356	0,840		3,196
M =	60,09 g/mol	74,10	18,02		192,06
n =	16,64 mmol	18,30	46,61		16,64
d =	2,20 g/ml	2,24	1,00		1,69
V =	0,455 ml	0,605	0,840		1,891

Retrait $100 [1,891-(0,455+0,605+0,840)] = -0,9$ ml/100g de S hydraté
 $100 [(1,891-(0,455+0,605+0,840))/(0,455+0,605+0,840)] = -0,5$ %

À partir des déficits volumétriques calculés dans les équations précédentes, nous avons déterminé le déficit volumétrique du ciment de Type 10 utilisé dans cette étude (Tableau 7.2), en prenant en considération sa composition phasique (Tableau 3.2). L'hydratation des aluminates est complexe et divisée en trois réactions soient la formation de l'hydrogrenat, de l'ettringite et de monosulfoaluminate hydraté. L'hydroxyde de fer est aussi présent dans les réactions avec le C_4AF . Selon Stark et Bollmann [2000], pour transformer 10% de C_3A en ettringite il faut avoir 9,1% de SO_3 dans le ciment (en masse). Étant donnée que la teneur en SO_3 dans les ciments ne devrait pas dépasser entre 2,3 et 4,5% dépendamment du type de ciment [ASTM C 150, 2004], il n'y a pas assez de sulfates pour réagir avec tous les aluminates. Donc, après 7 ou 14 jours, on peut trouver tous les produits d'hydratation des aluminates dans une pâte de ciment. Dans le cas du ciment de cette étude, pour l'hydratation du C_3A , nous avons décidé de répartir le déficit volumétrique de la façon suivante : 50% pour la formation de C_3AH_6 , 25% pour la formation de l'ettringite et 25% pour la formation de monosulfoaluminate, alors que dans le cas de l'hydratation du C_4AF le déficit volumétrique est reparti de la façon suivante : 50% pour la formation de $(C_3AH_6 + FH_3)$, 25% pour la formation de (ettringite + FH_3) et 25% pour la formation de (monosulfoaluminate + FH_3) [Kosmatka et coll., 2008].

Si l'on compare les réactions d'hydratation des silicates avec la réaction pouzzolanique, on remarque que le C-S-H formé par les silicates est plus dense que le C-S-H pouzzolanique. Cela pourrait expliquer une importante différence dans les déficits volumétriques des deux réactions. L'hydratation des silicates produit un retrait d'environ 10% tandis que le retrait dû à la réaction pouzzolanique est inférieur à 1%. Même si le retrait obtenu par la réaction pouzzolanique est très faible, la consommation d'eau dans cette réaction est pratiquement deux fois plus élevée que celle obtenue pendant l'hydratation des silicates.

Tableau 7. 2 – Déficit volumétrique du ciment de cette étude

Constituant	Déficit volumétrique	
	% de volume initial	ml/100g de constituant hydraté
C ₃ S	9,9	7,2
C ₂ S	9,8	7,4
C ₃ A	14,5	14,9
C ₄ AF	11,9	10,2
Ciment	9,2	7,1

7.3 Analyse et traitement des mesures brutes de changement de volume

7.3.1 Retrait endogène interne

Comme on l'a déjà vu au chapitre 2.4.2 et à la figure 2.16, la courbe du retrait endogène interne passe par un maximum qui correspond au début de la rigidification de la matrice cimentaire. À partir de ce moment là, une porosité, initialement remplie d'eau, se forme à l'intérieur du squelette rigide. La diminution de volume due à la contraction Le Chatelier entraîne la formation de vides gazeux dans cette porosité. Un déséquilibre entre la pression de gaz dans les pores et la pression atmosphérique fait en sorte que l'échantillon de la pâte de ciment commence à aspirer de l'air. Le début de la rigidification de la matrice, c'est à dire, le début de la succion, est considéré comme le début du développement du retrait endogène interne.

L'expulsion d'air observée sur la courbe du retrait interne avant la rigidification de la matrice, (Figure 2.16) est due à la contraction de l'échantillon, fluide et déformable, qui est confiné dans l'eau de l'enceinte interne. Cette déformation doit être négligée car cette expulsion d'air est intrinsèque au fonctionnement de la cellule et n'est pas relié à l'hydratation du ciment. Un traitement de données brutes est donc nécessaire. Selon ce traitement, le retrait endogène interne est nul jusqu'au début de la rigidification (début de prise). Le reste de la courbe du retrait interne évolue comme avant le traitement. Cependant, ce changement a un effet sur la

mesure du retrait endogène externe dont il faudra tenir compte. L'évolution du retrait endogène interne après le traitement de données est présentée à la figure 7.1.

- Comparaison entre le début de rigidification de la matrice cimentaire et le début du retrait interne

La conductivité électrique des coulis a été mesurée pendant les premières 24 heures de l'essai de retrait endogène. Chaque courbe de conductivité électrique permet de repérer le début de la précipitation de portlandite qui correspond à la fin de période dormante. Ce moment correspond au maximum de la courbe de conductivité (Figure 7.1). Le maximum de conductivité est suivi d'un palier où la conductivité baisse plus lentement, puis d'une chute plus marquée. Le changement de pente entre le palier et la chute de conductivité correspond au moment de la connexion des hydrates qui définit le début de rigidification de la matrice cimentaire. Les mesures du retrait endogène ont démontré que la succion commence à peu près en même temps que la rigidification. Les différences sont relativement faibles et inférieures à 10 minutes dans la majorité des cas. Le début du retrait endogène interne se produit donc bien en même temps que le début de la rigidification de la matrice cimentaire, ou le début de la prise.

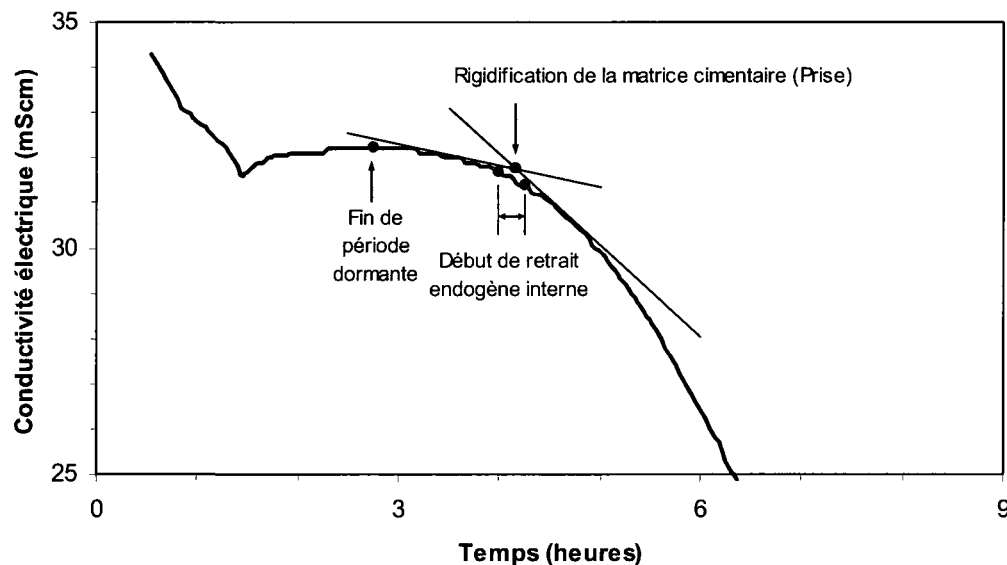


Figure 7. 1 – Comparaison entre le début du retrait interne et le début de la rigidification de la matrice cimentaire

7.3. 2 Retrait endogène externe

L'expulsion de l'eau observée sur la courbe du retrait interne avant le début de prise est due à la contraction de l'échantillon encore déformable. Les mesures du retrait endogène externe doivent être corrigées pour éliminer la partie de la contraction correspondant au volume d'eau expulsé pour le retrait endogène interne avant la prise. L'évolution du retrait endogène externe après le traitement des données est présentée à la figure 7.2.

Comme on peut le voir à la figure 7.2, une bosse est présente sur la courbe du retrait externe durant la période de 0 à 24 heures. Cette bosse a été déjà observée par Aouad [1999] qui a utilisé le même montage pour mesurer le retrait endogène volumique. Cependant, ses mesures n'ont pas été effectuées dans les conditions isothermes. Selon cet auteur le gonflement est principalement dû à l'augmentation de la température de l'échantillon. Il a trouvé que la bosse se situe au même moment où la température du coulis augmente. Nous avons observé les mêmes comportements au cours de nos essais (Figure 7.2). En effet, la bosse observée sur la courbe du retrait externe correspond à la dilatation thermique de l'échantillon. En même temps le retrait interne augmente rapidement. Même si le coulis gonfle de l'extérieur, il y a une diminution du volume au niveau des pores capillaires. Ainsi, le changement de volume total reste négatif, ce qui est en accord avec la contraction Le Chatelier.

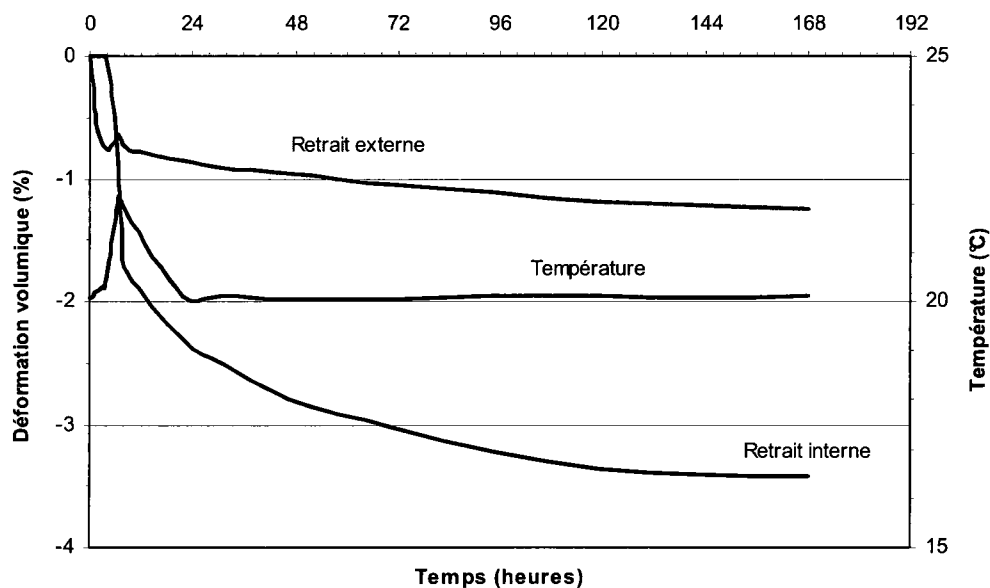


Figure 7. 2 – Courbes des retraits externe et interne et la courbe de la température de l'échantillon

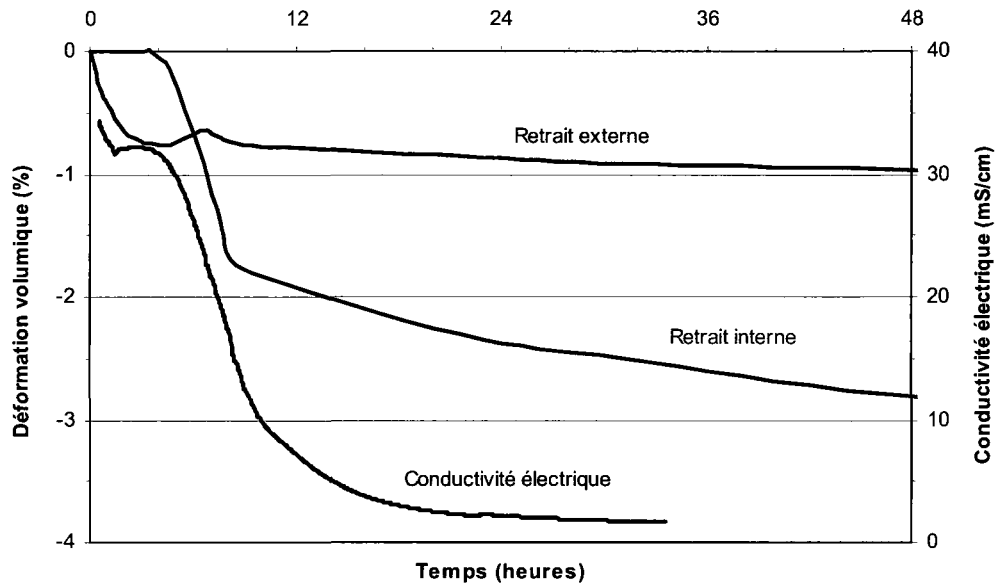


Figure 7.3 – Courbes des retraits externe et interne et la courbe de la conductivité électrique de l'échantillon

Selon la figure 7.3, le gonflement de l'échantillon se situe à l'endroit où la conductivité électrique chute rapidement. C'est le temps de la structuration rapide de la matrice cimentaire pendant laquelle on observe aussi une augmentation de la température.

Il reste à vérifier si les valeurs de gonflement que nous avons mesurées correspondent à la dilatation thermique qui peut être calculée à l'aide de l'équation suivant :

$$\varepsilon_t = CDT \cdot \Delta T \quad (7.1)$$

CDT : Coefficient de dilatation thermique de la matrice cimentaire;

ΔT : Augmentation de la température de l'échantillon comparativement à la température de référence (2°C au maximum dans le cas de nos essais).

Le CDT des coulis et des bétons est très variable au jeune âge. Selon Kada et coll. [2002], le coefficient de dilatation thermique du béton est élevé pendant les premières 10 à 12 heures suivant le contact eau - liant, puis il se stabilise par la suite. Il peut être 2 à 5 fois plus

important que celui obtenu après la stabilisation. Le temps nécessaire pour la stabilisation de CDT pourrait dépasser les premières 12 heures dépendamment de la rapidité de structuration des hydrates. La vitesse de structuration des hydrates dépend du type de liant, de rapport E/L et de la température, ce qui a été démontré au chapitre 4.

Neville [2000] a montré que le coefficient de dilatation thermique des pâtes de ciment est plus élevé que celui des mortiers et des bétons. Il pourrait être de $22 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ pour une pâte de ciment âgée de 6 mois. D'après les travaux de Kada et coll. [2002], pendant la période où on observe le gonflement de l'échantillon, le CDT pourrait varier de 44 à $110 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. La dilatation thermique pourrait donc varier de 88 à $220 \mu\text{m}/\text{m}$. Selon Aouad [1999], un retrait volumique de 1% obtenu par la cellule de mesure du retrait endogène correspond à un retrait linéique de $3300 \mu\text{m}/\text{m}$. Cela veut dire que le gonflement volumique pourrait varier de 0,03 à 0,07 % du volume initial de l'échantillon. Dans une grande majorité des cas nous avons mesuré les gonflements inférieurs à 0,10%, ce qui concorde bien avec les calculs de dilatation thermique.

7.3. 3 Retrait endogène total

Le retrait endogène total est la somme des retraits endogènes externe et interne. Les deux traitements effectués précédemment sur les courbes de retraits interne et externe s'annulent mutuellement. Il est donc possible d'obtenir la courbe du retrait endogène total à partir de deux autres courbes avec ou sans traitement. Ce comportement est logique parce que la cellule forme un système fermé.

La figure 7.4 présente l'évolution des déformations endogènes après le traitement de données. Avant la rigidification de la matrice cimentaire (prise), la variation de volume est causée par la contraction Le Chatelier (retrait chimique) qui n'engendre qu'un retrait endogène externe. À partir de la prise, la variation de volume comprend un retrait endogène externe et un retrait endogène interne. Le retrait endogène externe est causé par l'effet simultané du retrait chimique et de la dépression capillaire. Le retrait endogène interne correspond au volume total des vides créés dans la porosité capillaire. Le retrait endogène total est la somme du retrait endogène interne et du retrait endogène externe, avant et après la prise.

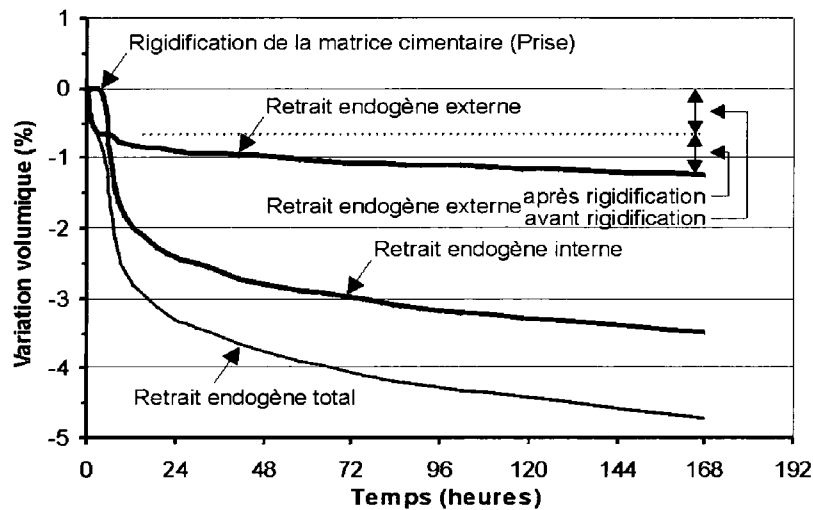


Figure 7. 4 – Évolution des retraits externe, interne et total après traitement de données

7.4 Interprétation et comparaison des courbes de retrait endogène interne mesuré pendant sept jours

7.4.1 Influence du rapport E/L

L'influence du rapport E/L sur le développement du retrait endogène interne des coulis de référence (0-7 jours) est présentée à la figure 7.5. Les figures C.1 à C.5 jointes à l'Annexe C, présentent l'influence du rapport E/L sur le développement du retrait endogène interne des coulis avec ajouts minéraux.

Pour une même température et pour un liant donné, on constate que le début du retrait endogène subit une évolution à peu près similaire, quel que soit le rapport E/L. En effet, durant une période comprise entre 0 et 24 heures (parfois 0 et 48 heures) toutes les courbes sont approximativement superposées pour tous les rapports E/L. Durant ce période, la pente est relativement importante, car l'hydratation progresse rapidement et engendre une apparition rapide de vides gazeux dans la porosité capillaire. Après environ 24 heures (parfois 48 heures dans le cas des liants avec cendre volante), les courbes commencent à se séparer les unes des autres et la pente diminue rapidement. C'est toujours avec le rapport E/L de 0,30 que la

stabilisation du retrait interne débute le plus tôt. Cette diminution rapide du développement du retrait interne est probablement due au ralentissement de l'hydratation dû à la diminution de la disponibilité d'eau. On constate aussi qu'après 7 jours d'hydratation, le retrait interne final des coulis avec un E/L de 0,30 est toujours le plus faible. Il augmente avec la valeur du E/L. Le retrait endogène interne plus élevé des coulis avec un E/L de 0,45 est dû à un degré d'hydratation plus élevé (chapitre 5.4.1).

Pour le liant de référence et pour le liant avec fumée de silice, le point de séparation des courbes survient à environ 24 heures. Pour une température donnée, ce point correspond au moment où les courbes changent de pente en fonction du rapport E/L. Ce résultat indique que c'est entre 0 et 24 heures que ce développe très rapidement environ 50% à 80% du retrait endogène interne des coulis de référence et des coulis avec fumée de silice.

Dans le cas des coulis avec laitier, la pente initiale est plus faible et le point de séparation des courbes (en fonction du E/L) survient plus tard. Il peut atteindre plus de 48 heures si la température est faible (10°C). Le point de séparation des courbes est peu affecté par la teneur en liant. Globalement, la pente plus faible et le point de séparation plus tardif indiquent que l'hydratation au jeune âge du laitier est plus lente que celle des coulis de référence et des coulis avec fumée de silice.

Dans le cas des coulis avec cendre volante, le point de séparation se produit à environ 24 heures (20°C) pour le taux de remplacement de 15% et après environ 48 heures (20°C) pour le taux de remplacement de 30%. Après le point de séparation le rapport E/L a relativement peu d'effet sur l'allure des courbes et l'intensité du retrait endogène interne final.

Pour le taux de remplacement de 30% (figure C.5), les courbes montrent que le rapport E/L a très peu d'influence sur le développement du retrait endogène interne. Quel que soit le rapport E/L, les courbes ont une forme très similaire et l'intensité du retrait final varie très peu. Pour un taux de remplacement de 30% et un rapport E/L de 0,30 à 0,45, le rapport E/C varie de 0,43 à 0,64. Ces résultats suggèrent que pour un taux de remplacement élevé le développement du retrait endogène interne est principalement gouverné par l'hydratation du ciment et que entre 0 et 7 jours la cinétique du développement du retrait endogène interne est peu affecté par le rapport E/C.

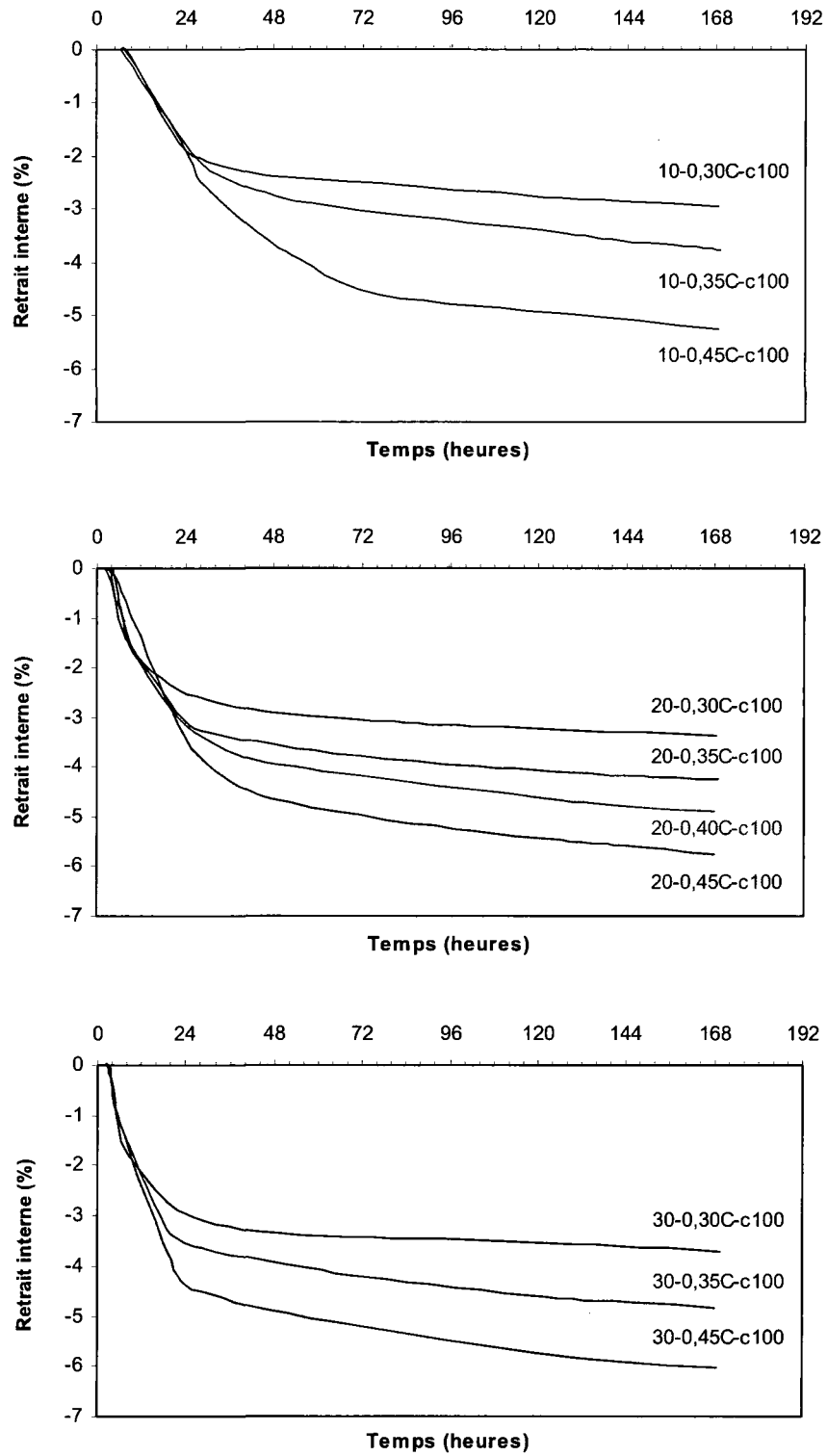


Figure 7. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

7.4.2 Influence de la température

L'influence de la température sur le développement du retrait endogène interne des coulis de référence est présentée à la figure 7.6. Les figures C.6 à C.10 jointes à l'Annexe C présentent l'influence de la température sur le développement du retrait endogène interne des coulis avec ajouts minéraux.

La température affecte le temps initial du début du développement du retrait endogène interne et la pente initiale des courbes. La figure 7.6 présente l'influence de la température sur le retrait interne des coulis de référence. On remarque que le retrait interne débute très tôt (5 heures) dans les coulis testés à 30°C quel que soit le rapport E/L. Le retrait interne augmente très rapidement à cette température pour atteindre la stabilisation après environ 24 ou 48 heures, dépendamment du rapport E/L. Ces résultats indiquent qu'une température élevée accélère l'hydratation et le durcissement des coulis de référence.

Des résultats inverses sont observés avec les coulis testés à 10°C. Dans ce cas le retrait interne commence très tard (10 à 12 heures) et son développement dans le temps est plus lent. Après la stabilisation, qui peut atteindre jusqu'à 72 heures, les pentes des courbes devient similaires jusqu'à 7 jours (pour un même rapport E/L).

Après 7 jours, le retrait interne atteint une valeur plus élevée lorsque la température est plus élevée. La comparaison des courbes des figures 7.5 et 7.6 montre que l'effet de la température sur l'allure des courbes de retrait interne est plus marqué pendant les premiers 2 ou 3 jours. Pendant cette période, on distingue bien l'influence de la température sur le début du retrait interne et sur la vitesse de structuration de la matrice cimentaire. Par contre, l'effet du rapport E/L est plus marqué à partir de deuxième jusqu'au septième jour puisque le rapport E/L influence plus significativement la pente des courbes dans cette période. L'effet plus faible du rapport E/L sur l'allure des courbes de retrait interne pendant les deux premiers jours pourrait être dû aux différents dosages de superplastifiant dans les coulis de différent rapport E/L. Puisque la quantité de superplastifiant a augmenté avec la diminution du rapport E/L, l'influence de ce rapport sur le début du retrait interne et sur la vitesse de structuration de la pâte ne s'est peut être pas manifesté complètement.

La figure C.6 présente l'effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec fumée de silice. Dans les coulis testés à 30°C, le retrait interne se développe rapidement et se stabilise très tôt pour atteindre des valeurs les plus faibles au bout de 7 jours. Par contre, dans les coulis testés à 10°C, le retrait interne se développe et se stabilise plus lentement et atteint des valeurs les plus élevées à 7 jours. Ce comportement, indépendant du rapport E/L, est en contradiction avec le développement du degré d'hydratation après 7 jours. Le degré d'hydratation de ce type de coulis augmente graduellement avec l'augmentation de la température (figure 5.22). Cette contradiction est probablement due à la faible perméabilité des coulis testés à haute température. Le problème d'imperméabilisation de certains mélanges et les difficultés qu'elle amène au niveau des mesures du retrait interne seront discutés au chapitre 7.10.

L'influence de la température sur les courbes de retrait interne des coulis avec 25 % de laitier est présentée à la figure C.7. Comme dans le cas des coulis de référence, l'effet de la température est plus marqué avant la stabilisation du retrait interne. Pendant cette période (2 à 3 jours), on distingue bien des différences au niveau de début du retrait interne et au niveau des pentes des courbes. Après 7 jours, les retraits internes sont plus élevés dans les coulis testés à la température plus élevée. Cependant cet effet de la température est moins marqué dans les coulis de rapport E/L égal à 0,30. Quand le taux de remplacement du ciment par le laitier augmente à 50 %, l'effet de la température sur les courbes de retrait interne lors des premiers 3 jours est semblable à celui observé dans les coulis avec 25 % de laitier (figure C.8). Le retrait interne commence plus tard et se développe plus lentement dans les coulis testés à 10°C. Par contre, il commence plus tôt, se développe plus rapidement et se stabilise aussi plus rapidement dans les coulis testés à 30°C. Après 7 jours, le retrait interne est plus important dans les coulis testés à plus faible température. Il faut mentionner que les différences mesurées à ce niveau sont moins importantes que celles observés pour les coulis avec fumée de silice. On constate quand même une sous estimation du retrait interne due à l'imperméabilisation plus importante des coulis de plus faibles rapports E/L testés aux températures plus élevées.

L'effet de la température sur l'allure des courbes du retrait interne des coulis avec cendre volante (figure C.9 et C.10) est semblable à celui observé avec les coulis de référence. Cela est probablement dû au fait que la cendre volante est pratiquement inerte pendant les premiers 7

jours. Les conclusions concernant l'effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis de référence sont donc valables pour les coulis avec cendre volante.

Globalement, l'hydratation à une faible température (10°C) a pour effet de retarder le début du développement du retrait interne (prise). Lorsque ce retrait s'amorce, il se développe plus lentement (pente plus faible) et le retrait final est généralement plus faible. La faible température affecte particulièrement l'hydratation au jeune âge des liants avec laitier et avec cendre volante.

L'hydratation à haute température (30°C) diminue le temps du début de développement du retrait interne. Par la suite, il se développe très rapidement et le retrait final est plus important. L'hydratation au jeune âge des coulis avec laitier et cendre volante est fortement accélérée par la température.

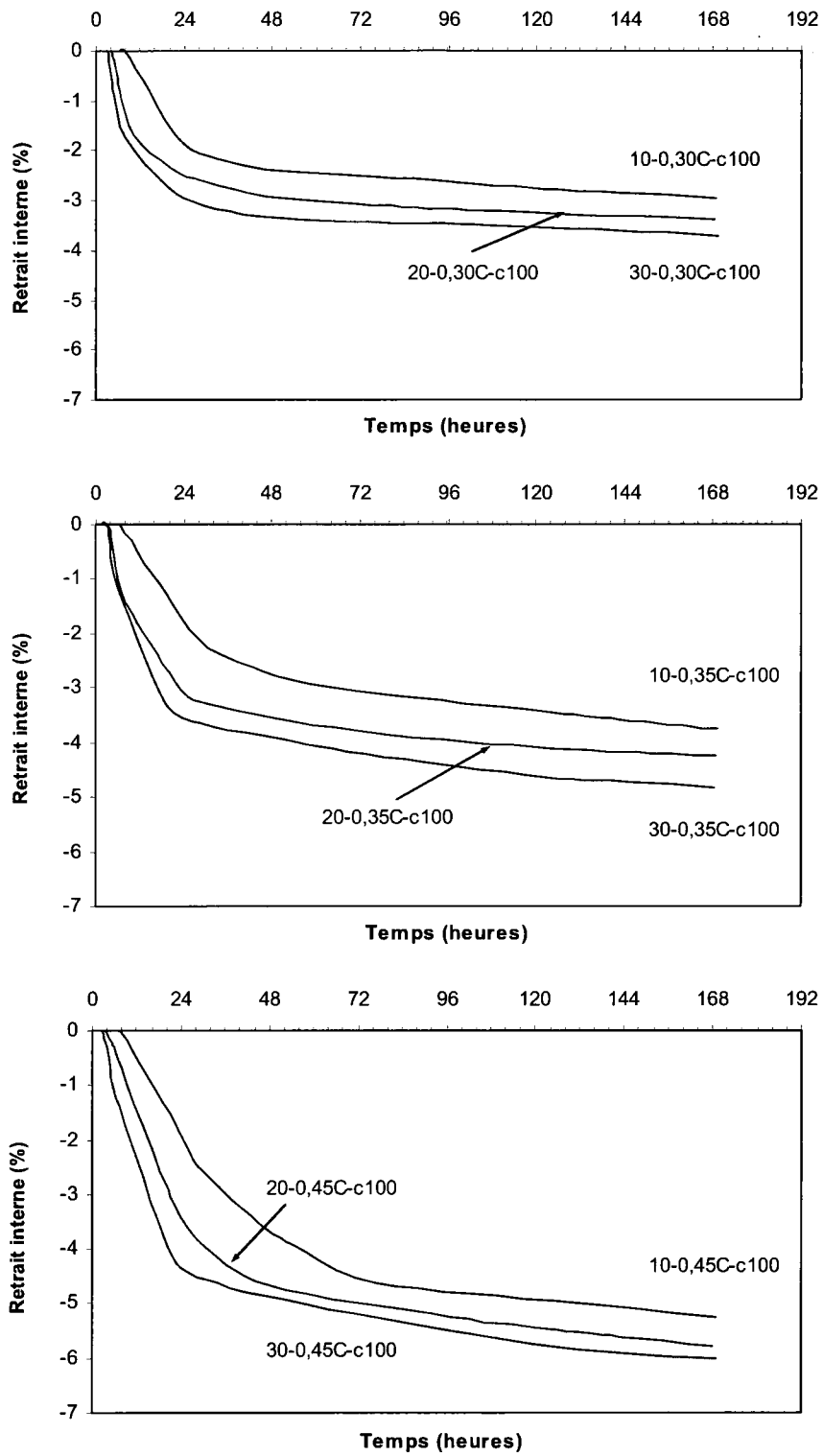


Figure 7. 6 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

7.4.3 Influence du type de liant

Les figures 7.7 à 7.15 présentent l'influence du type de liant sur le développement du retrait endogène interne des coulis fabriqués avec un rapport E/L de 0,30, 0,35 et 0,45 et testés à 10, 20 et 30°C.

Les figures 7.7 à 7.15 montrent que c'est le liant avec 8 % de fumée de silice qui développe le plus faible retrait endogène interne. Ce plus faible retrait interne à 7 jours a été mesuré quel que soit le rapport E/L ou la température. Il n'existe en fait qu'une seule exception, soit lorsque le rapport E/L est égal à 0,45 à 10°C (figure 7.13). Le plus faible retrait endogène interne du liant avec fumée de silice n'est pas dû à un plus faible degré d'hydratation. Ces résultats découlent plutôt de l'incapacité de la cellule de retrait de mesurer tout le retrait endogène interne des coulis à très faible perméabilité. Ce problème a déjà été discuté auparavant. Nous croyons que le retrait endogène interne de ce type de liant est certainement plus important que celui qui a été mesuré. Les résultats expérimentaux ne permettent cependant pas d'analyser plus en détail ce type de résultat. La comparaison entre les résultats du retrait chimique et du retrait interne intrinsèque montre que les autres types de liant ne présentent pas ce problème si le rapport E/L est de 0,45 (figure 9.3).

Le liant de référence développe un retrait endogène interne relativement faible quelque soit la température ou le rapport E/L. Le développement du retrait est rapide durant les premières heures (24 heures) mais il se stabilise par la suite pour atteindre 3 à 5 % dépendant des conditions d'essais. Globalement, c'est le liant qui produit le plus faible retrait endogène interne à l'exception du liant contenant de la fumée de silice.

Les liants avec cendre volante développent un retrait endogène interne très variable en fonction des conditions d'essais (E/L, température). Pour une condition d'essai donnée, le retrait endogène interne est parfois supérieur ou inférieur à celui du liant de référence.

Lorsque le rapport E/L = 0,30, les liants avec cendre volante développent un retrait endogène interne toujours plus important que celui du liant de référence, quel que soit la température. Ce phénomène est compatible avec le degré d'hydratation plus élevé mesuré dans ces conditions. Il résulte probablement du fait que la cendre volante est inerte au jeune âge. Le rapport E/C effectif est alors plus élevé, ce qui favorise une hydratation plus complète du ciment portland.

Lorsque le rapport E/L est de 0,35, le retrait endogène des coulis avec cendre volante est légèrement plus élevé que celui du coulis de référence lorsque la température est faible (10°C). Lorsque la température augmente (20°C et 30°C), le retrait endogène des coulis avec cendre volante devient alors plus faible que celui du coulis de référence. De plus, pour une condition d'essai donnée, c'est toujours le coulis avec le plus fort contenu en cendre volante qui possède le retrait endogène le plus faible. Pour un rapport E/L de 0,45, les coulis avec cendre volante développent systématiquement un retrait endogène interne plus faible que celui du coulis de référence. Comme pour les autres E/L, c'est le coulis avec le plus fort contenu en cendre volante qui développe le moins de retrait.

Globalement, les résultats indiquent que la cendre volante augmente le retrait endogène interne lorsque le rapport E/L est faible (0,30). Plus le rapport E/L augmente, plus la cendre volante diminue le développement du retrait endogène interne par rapport au liant de référence.

Parmi tous les liants testés, ce sont ceux avec laitier qui développent systématiquement le plus grand retrait endogène interne quel que soient le rapport E/L ou la température. En général, c'est le liant avec la plus forte teneur en laitier qui développe le plus grand retrait interne. Ces résultats sont compatibles avec les mesures du degré d'hydratation qui ont bien montré que c'est le laitier qui développe les plus forts degrés d'hydratation.

Pour mieux comprendre comment le type de liant peut influencer le développement du retrait endogène interne, il est nécessaire de prendre en compte le degré d'hydratation. Cette analyse sera effectuée plus loin dans cette thèse.

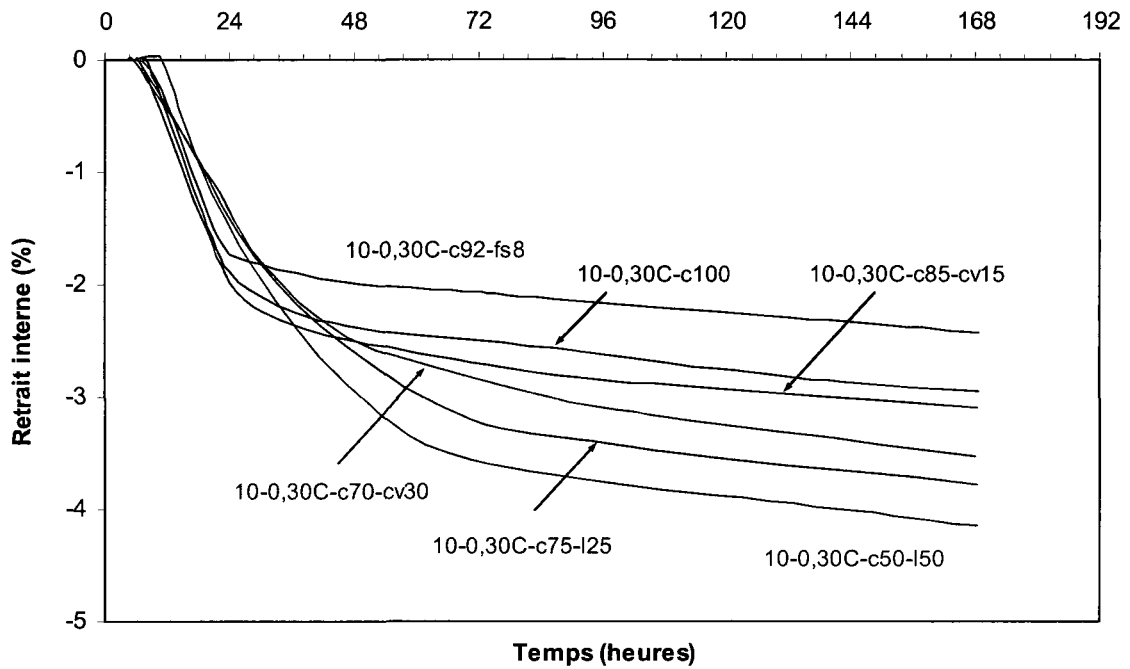


Figure 7. 7 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 10°C

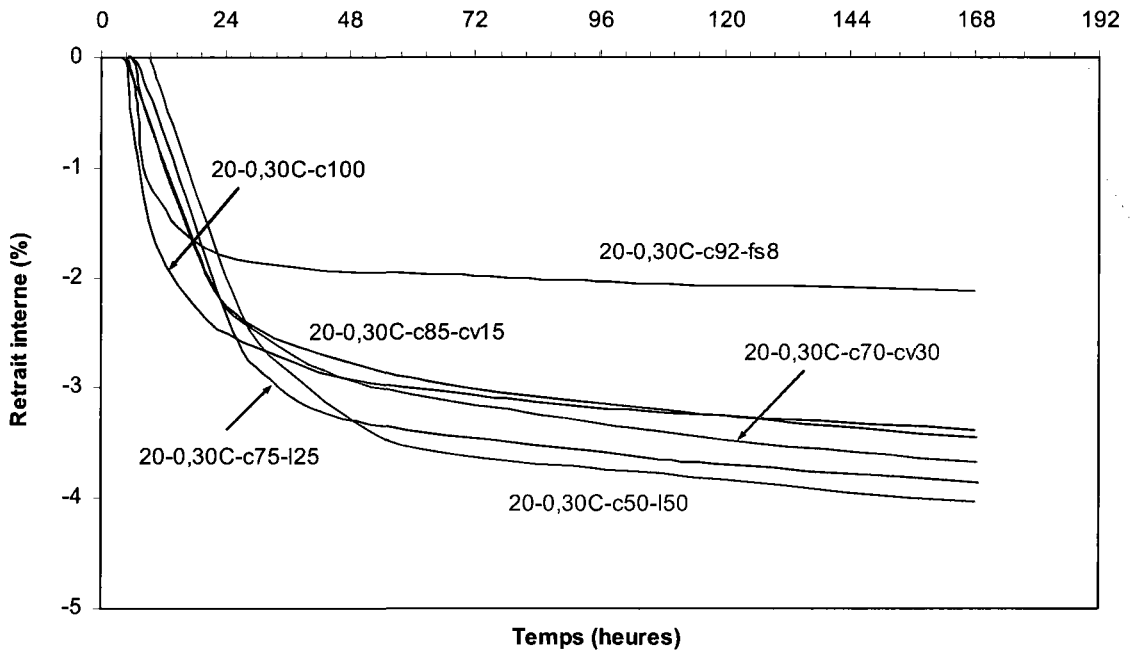


Figure 7. 8 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 20°C

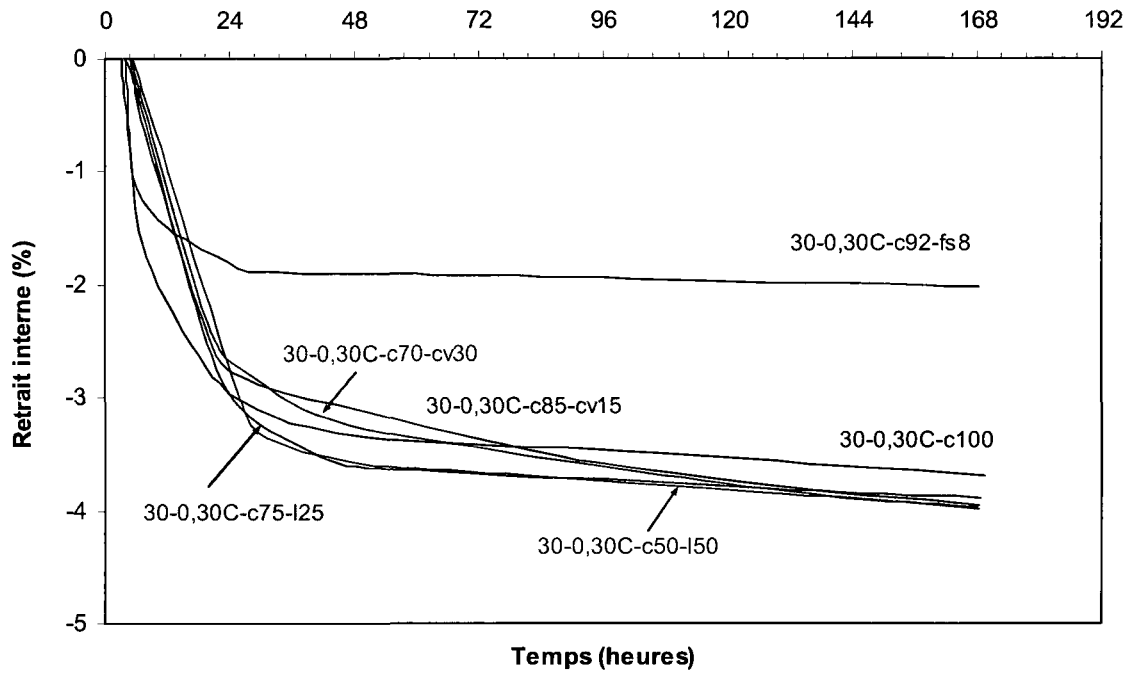


Figure 7. 9 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 30°C

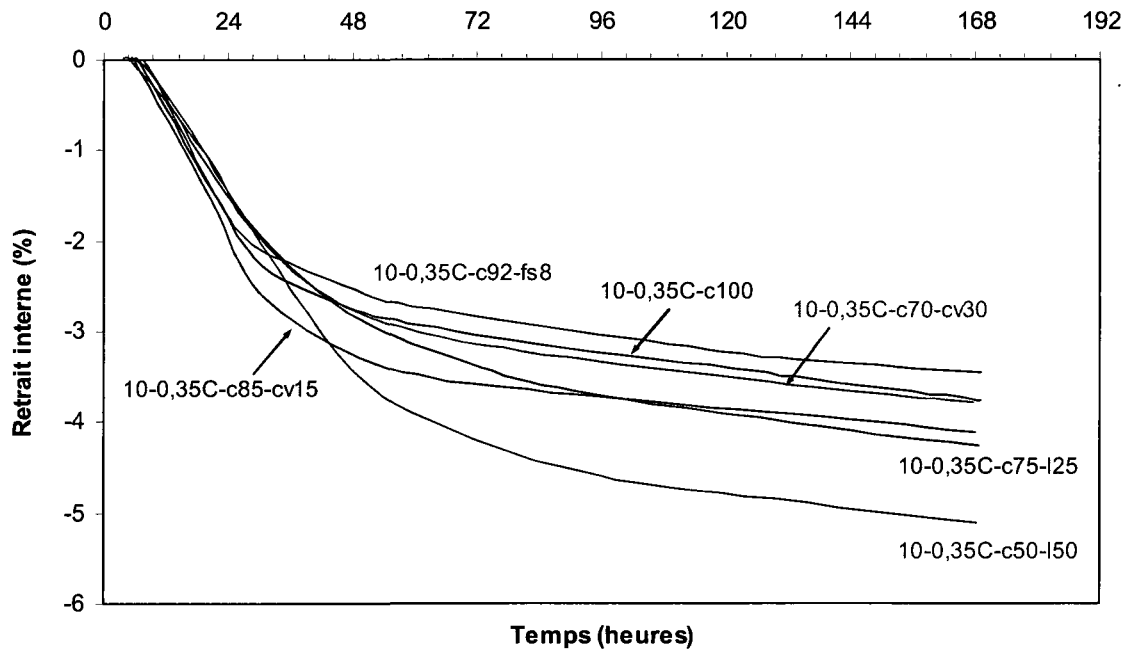


Figure 7. 10 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à 10°C

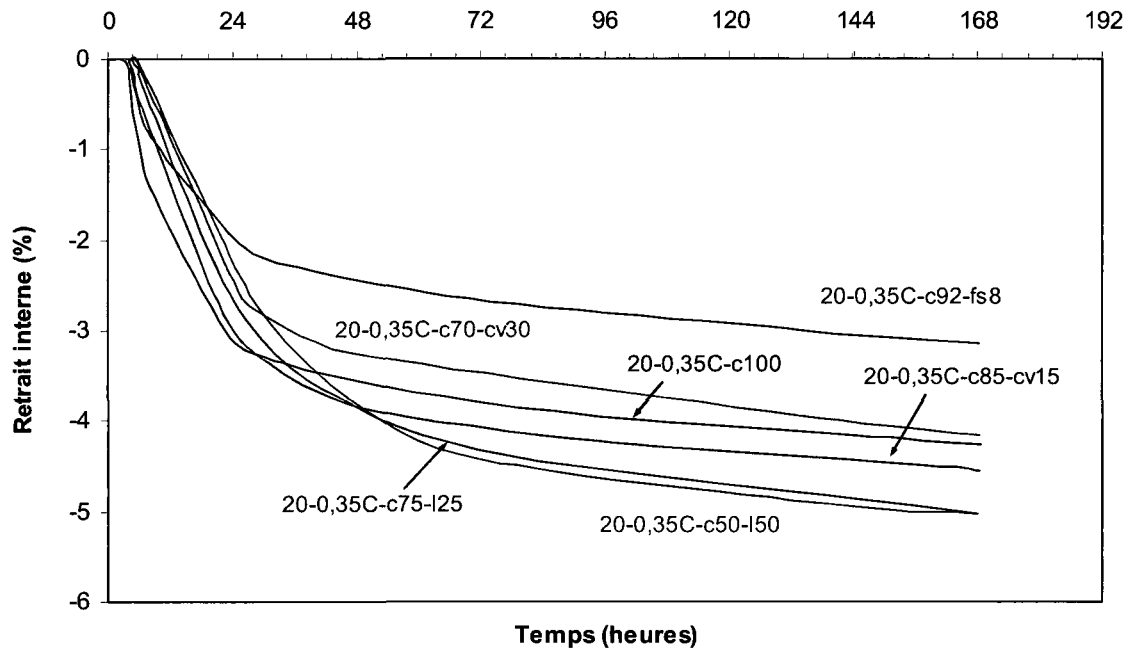


Figure 7. 11 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à 20°C

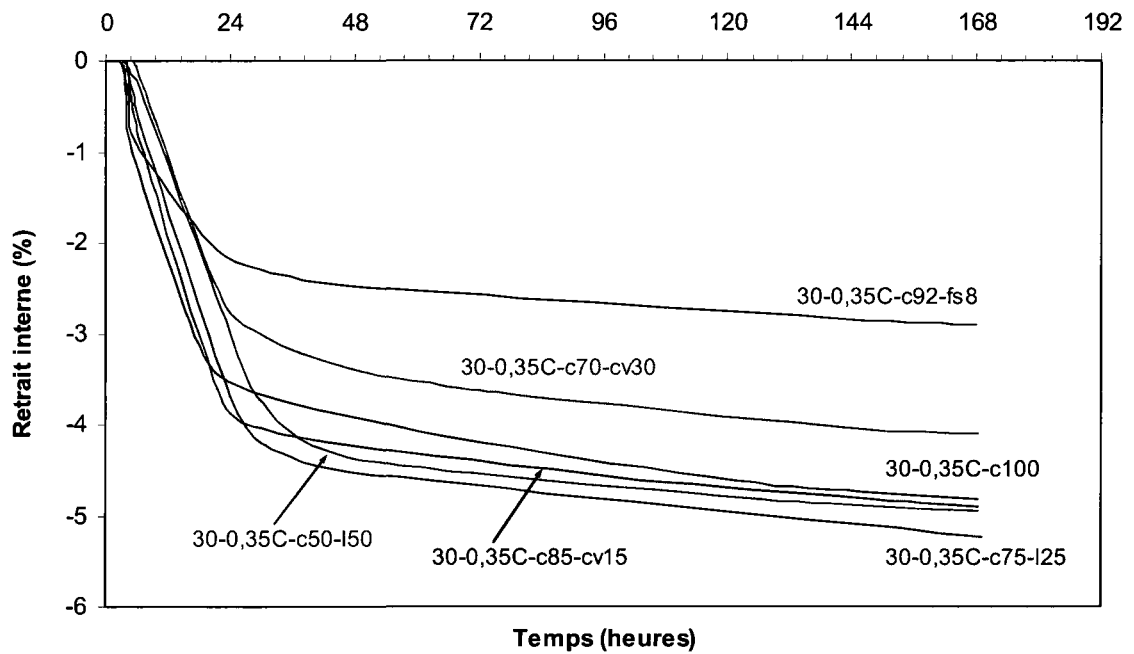


Figure 7. 12 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à 30°C

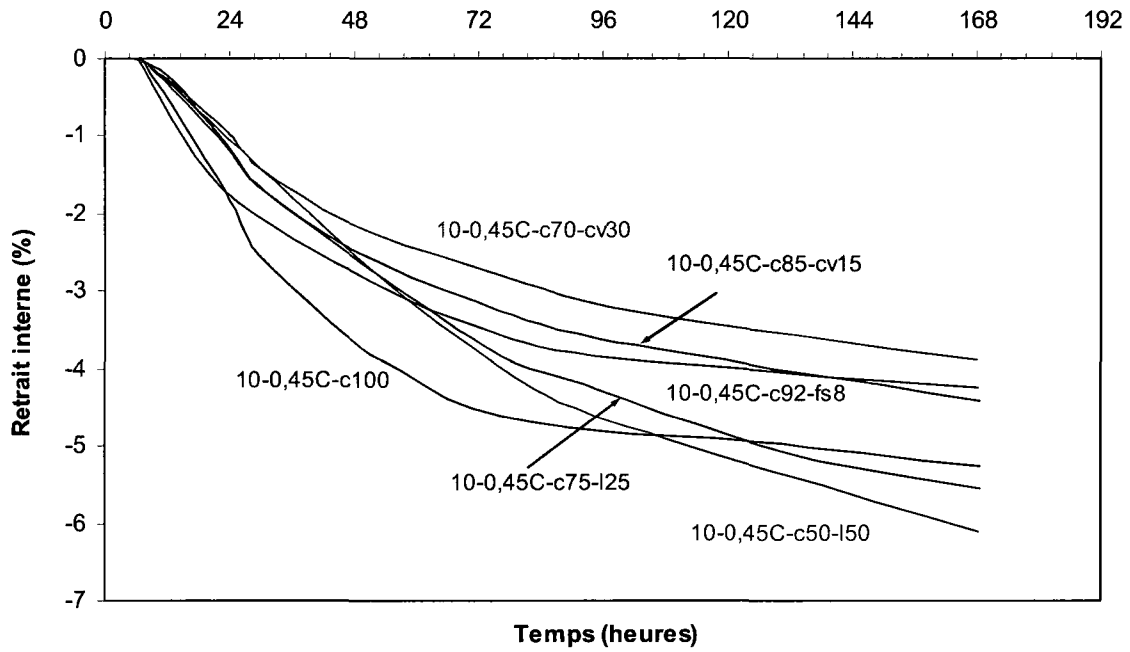


Figure 7. 13 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,45 testés à 10°C

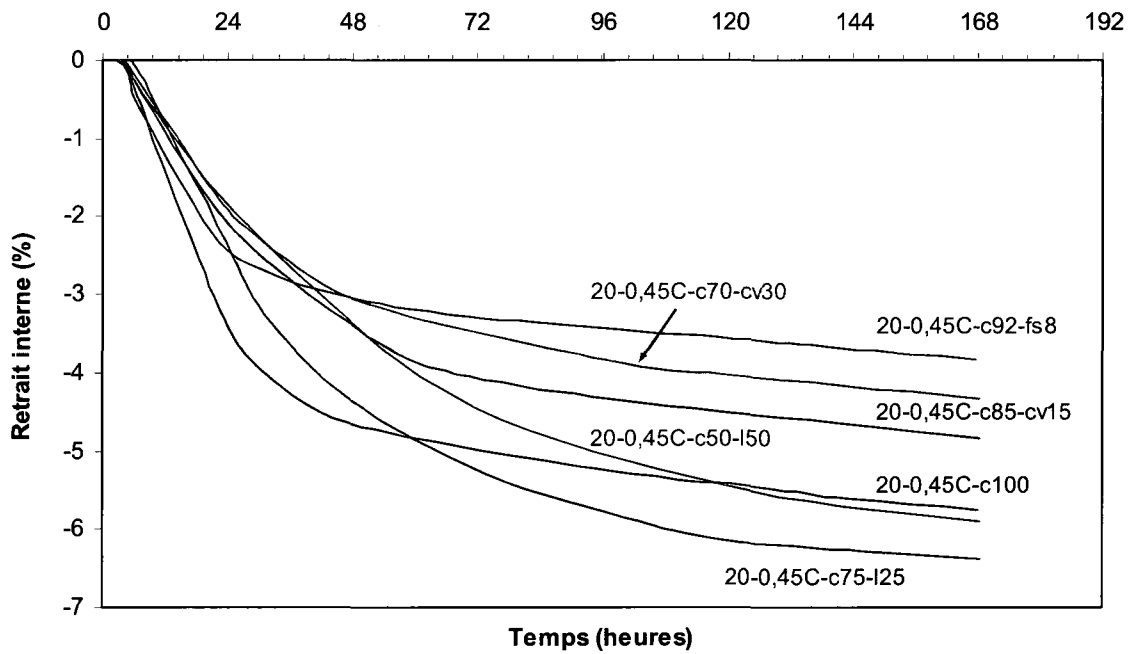


Figure 7. 14 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,45 testés à 20°C

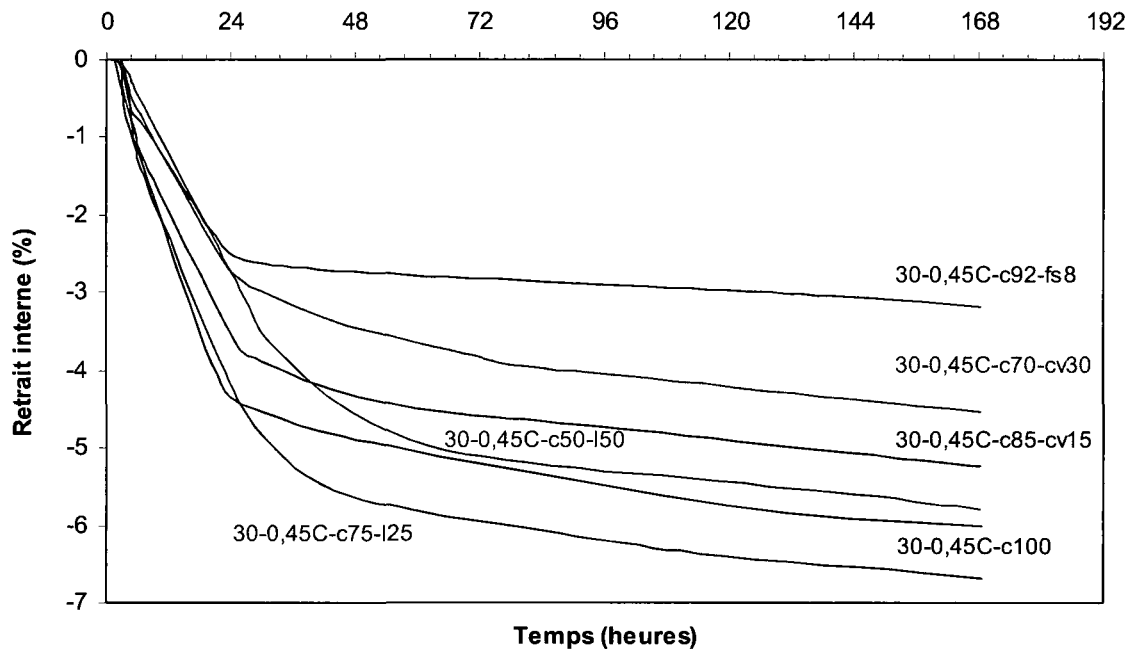


Figure 7. 15 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,45 testés à 30°C

7.5 Interprétation et comparaison des courbes de retrait endogène interne mesuré pendant quatorze jours

7.5.1 Influence du rapport E/L et de l'âge du coulis

Les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 14 jours sont présentées à la figure 7.16, alors que les figures C.11 à C.15 jointes à l'Annexe C, présentent les courbes du retrait interne des coulis avec ajouts minéraux.

On remarque que la grande majorité du retrait interne se développe pendant les premiers 7 jours. Les plus grandes augmentations du retrait interne entre 7 et 14 jours sont observées dans les coulis de rapport E/L égal 0,45. Ces coulis contiennent plus d'eau et leur hydratation se poursuit plus longtemps. La cendre volante produit la plus grande augmentation du retrait interne entre 7 et 14 jours parmi tous les liants. Ce liant a besoin plus de temps pour stabiliser d'avantage son retrait interne.

Le retrait interne augmente avec l'augmentation du rapport E/L quel que soit le type de liant. L'allure des courbes établie après 3 jours d'hydratation ne change pratiquement plus jusqu'à 14 jours.

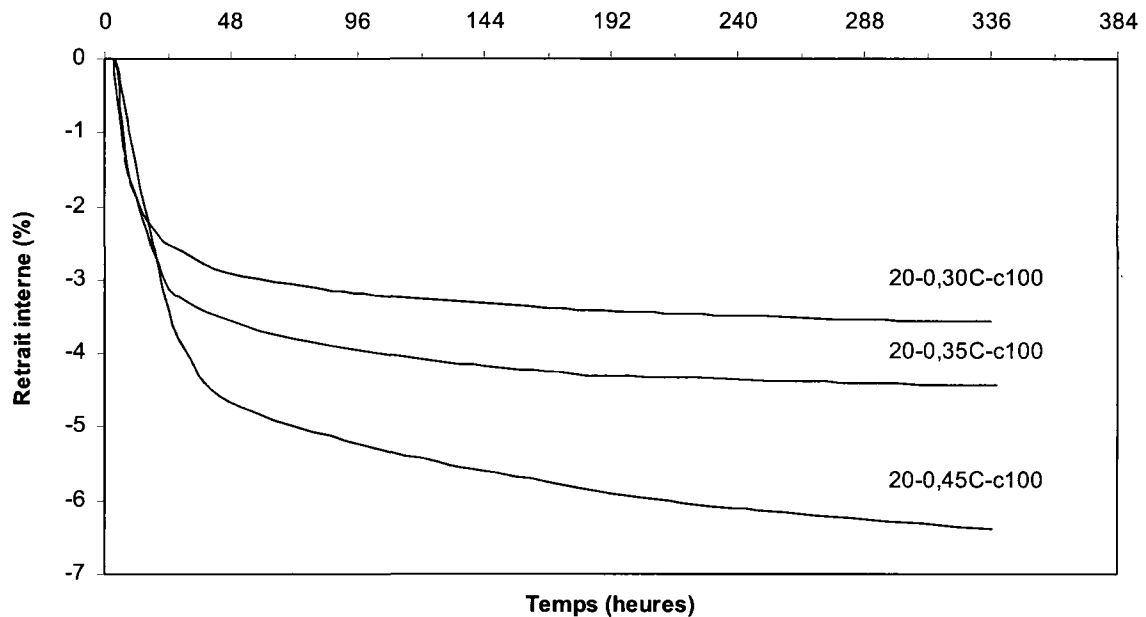


Figure 7. 16 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis de référence mesuré pendant 14 jours

7.5.2 Influence du type de liant

L'influence du type de liant sur l'allure des courbes du retrait interne est présentée aux figures 7.17 à 7.19. Dans le cas du rapport 0,30, la courbe obtenue en présence de la fumée de silice s'écarte des autres courbes et démontre une complète stabilisation du retrait interne à partir de 7 jours. Les courbes des coulis avec cendre volante démontrent le plus grand développement du retrait interne entre 7 et 14 jours. Selon la pente des courbes, il semble que la stabilisation du retrait survient après 14 jours. Quand le rapport E/L augmente à 0,35, la courbe de coulis 20-0,35C-c92-fs8 s'approche aux autres courbes. La courbe du coulis avec 30% de cendre volante possède la plus grande pente. Dans le cas du rapport 0,45, le développement du retrait interne entre 7 et 14 jours est plus prononcé quel que soit le type de liant parce que les pentes de toutes les courbes sont plus élevées. Le classement de l'intensité des retraits internes des différents liants établis à 7 jours se maintient jusqu'à 14 jours.

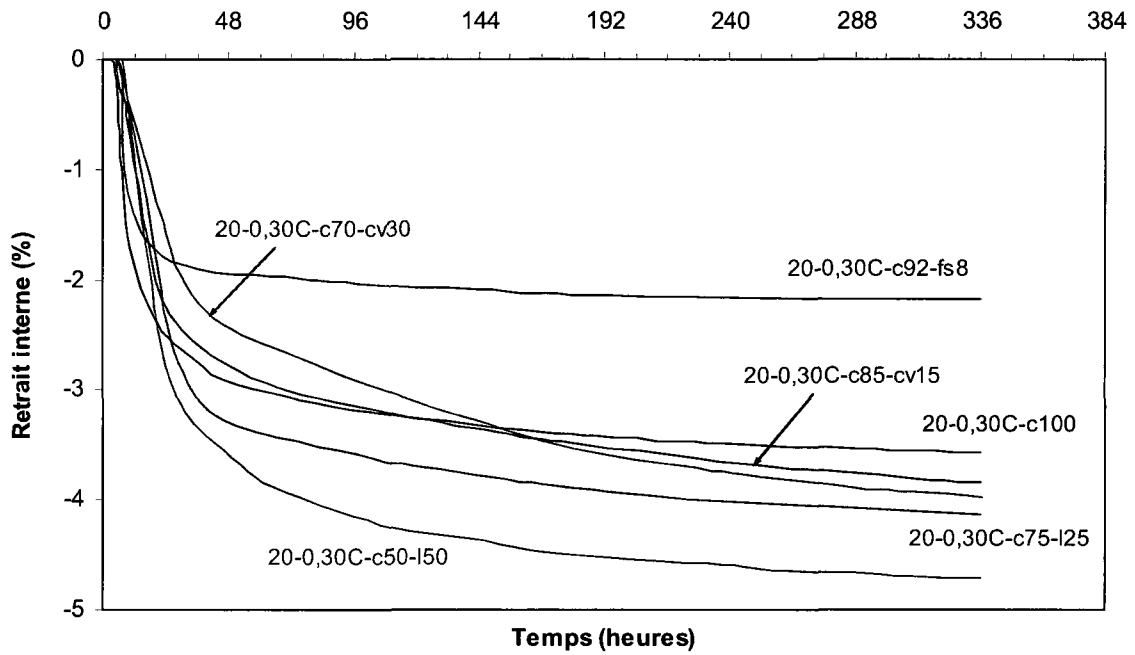


Figure 7. 17 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport $E/L = 0,30$

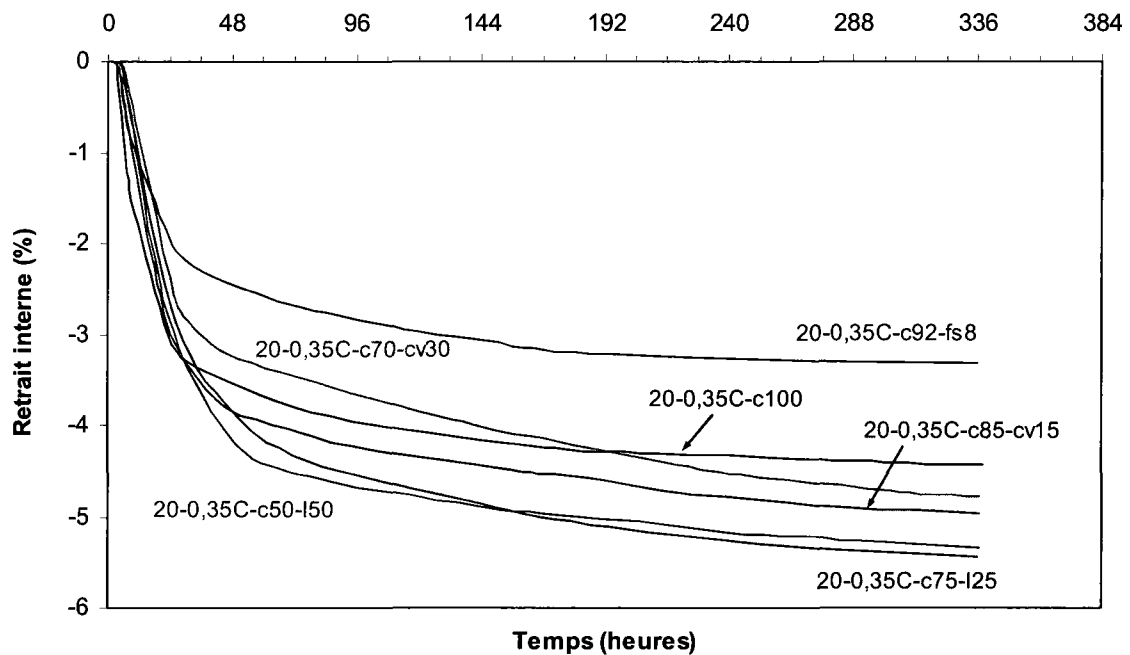


Figure 7. 18 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport $E/L = 0,35$

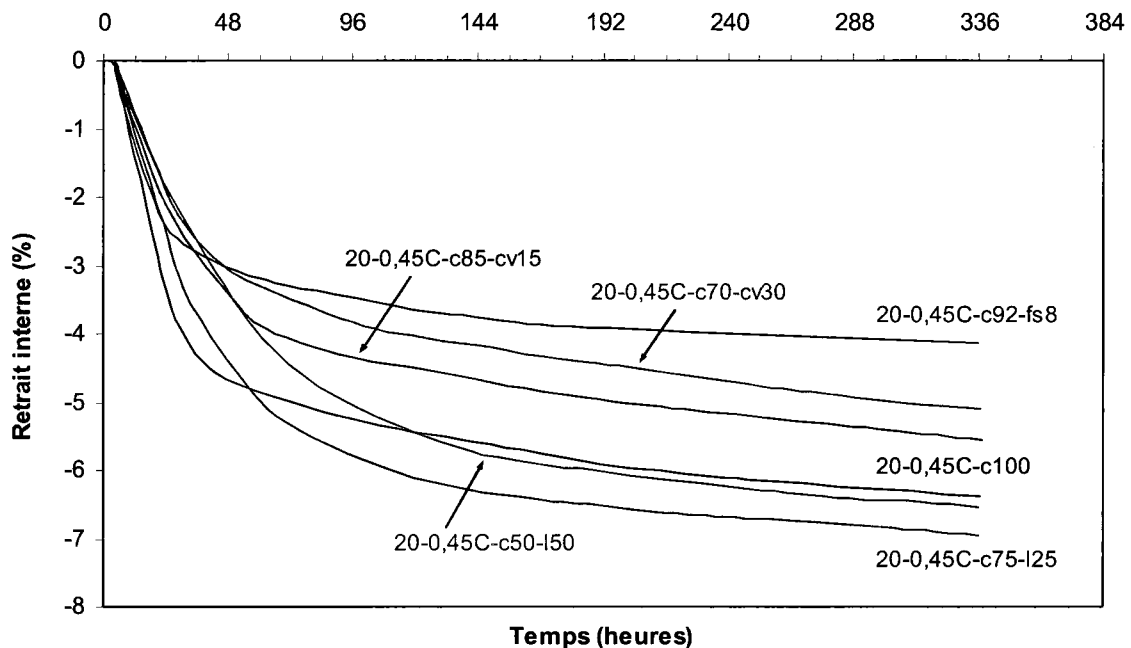


Figure 7. 19 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait interne des coulis de rapport $E/L = 0,45$

7.6 Interprétation et comparaison des courbes du retrait endogène externe mesuré pendant sept jours

7.6.1 Influence du rapport E/L

L'effet du rapport E/L sur l'allure des courbes du retrait externe des coulis de référence est présenté à la figure 7.20. L'effet du rapport E/L sur l'allure des courbes du retrait externe des coulis avec ajouts minéraux est présenté aux figures D.1 à D.5 jointes à l'Annexe D.

Globalement, toutes ces figures démontrent que pour une température donnée, le retrait externe se développe toujours plus rapidement quand le rapport E/L diminue. Les écarts apparaissent rapidement et se maintiennent jusqu' à 7 jours. On observe sur la plupart des courbes, un gonflement qui se produit pendant les premières 48 heures. Le coulis de référence, le coulis avec fumée de silice et le coulis avec 25% de laitier produisent plus de gonflement, tandis que le coulis avec 50% de laitier et les coulis à la cendre volante ont très peu de gonflement. Comme on l'a déjà vu dans la partie 7.3.2 de ce chapitre, il s'agit d'une dilatation thermique causée par l'augmentation de la température pendant la structuration de la pâte (Figures 7.2 et 7.3). Dans la majorité des cas, l'influence du rapport E/L sur les courbes du retrait externe est

visible dès le début d'essai ou, au plus tard, à la fin de la dilatation thermique. Les courbes sont pratiquement parallèles par la suite. Selon les calculs présentés à la section 7.3.2, le gonflement thermique peut varier de 0,03 à 0,07 % du volume initial de l'échantillon. Le retrait externe des coulis présentant le gonflement thermique pourrait donc être sous estimé pour les même valeurs.

7.6.2 Influence de la température

L'effet de la température sur l'allure des courbes de retrait externe des coulis de référence est présenté à la figure 7.21, alors que les figures D.6 à D.10 jointes à l'Annexe D, présentent l'effet de la température sur l'allure des courbes de retrait externe des coulis avec ajouts minéraux.

Pendant les premières 12 heures, le retrait externe progresse plus rapidement lorsque la température d'essai est faible. Ce comportement est principalement dû au retard de prise observé avec les coulis testés à faible température. Pour un rapport E/L donné, le retrait externe développé à plus faible température demeure plus important pendant 7 jours. Lors de l'analyse des courbes de conductivité électrique nous avons observé un retard de prise avec la diminution de la température. Pour un rapport E/L donné et un type de liant donné, le début de la rigidification de matrice cimentaire (défini comme le début de prise dans la partie 7.3.1) survient plus tard à 10°C et plus tôt à 30°C. Pour une faible température, une plus grande partie du retrait externe peut donc se développer avant la prise quand l'échantillon est déformable. Selon Scott [1963] et Bjontegaard [1999], la viscosité de la phase liquide et la tension de surface entre la phase liquide et la phase gazeuse dans la porosité capillaire augmente avec la diminution de la température. La dépression capillaire et le retrait d'autodissociation sont donc plus importants à faible température. Le coulis testé à 10°C pourrait donc développer plus de retrait externe que celui testé à 30°C même après la prise.

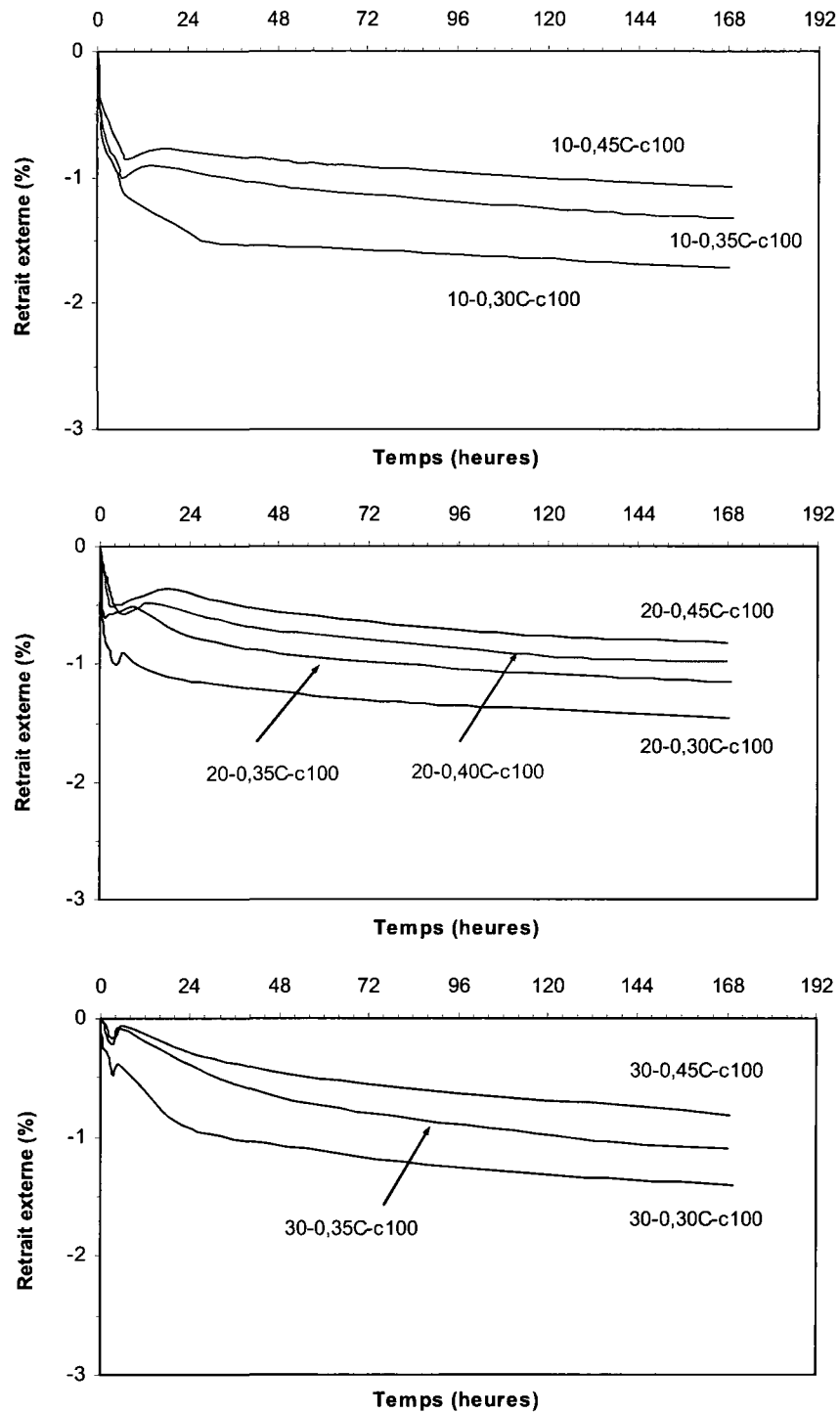


Figure 7. 20 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

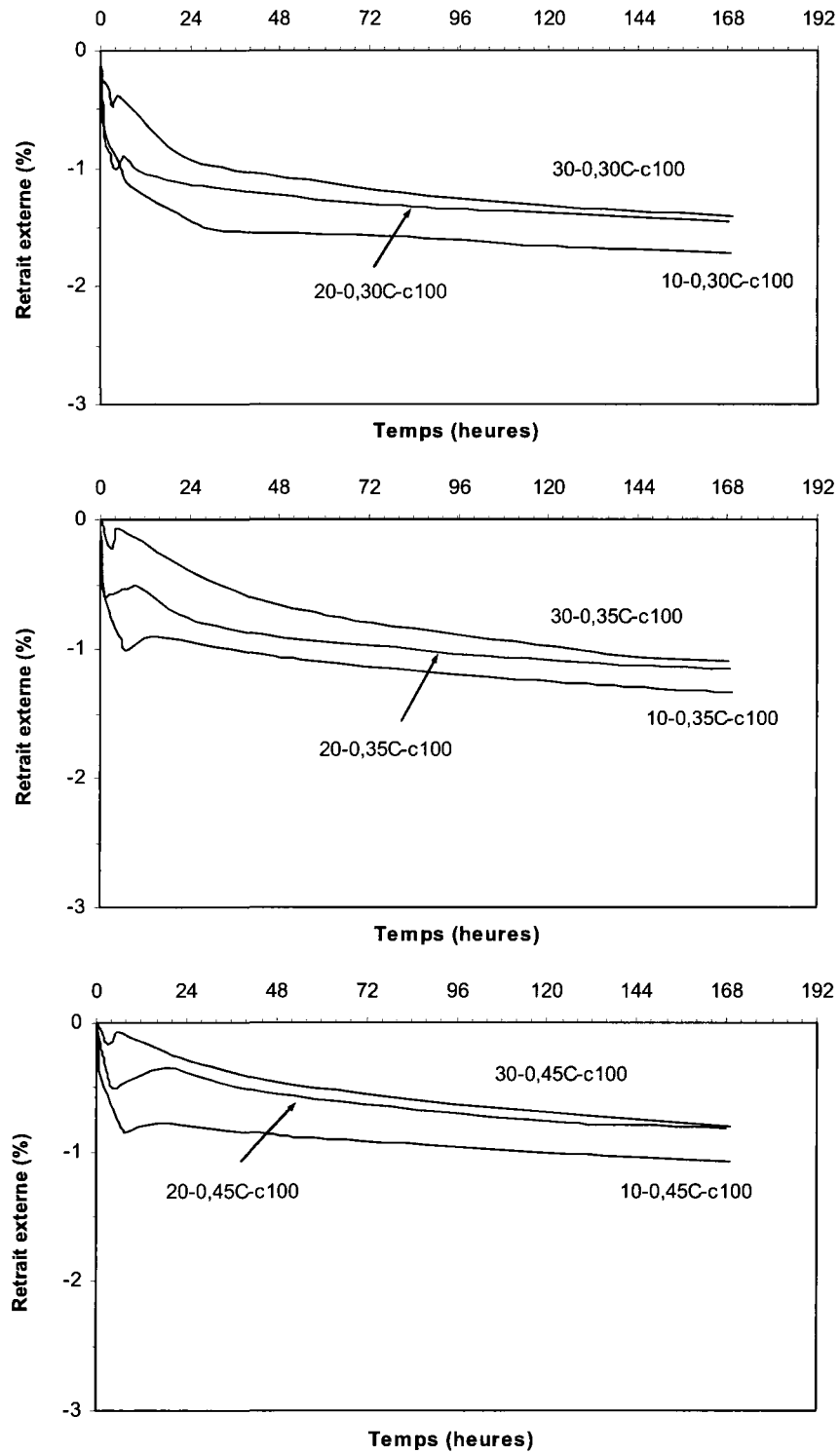


Figure 7. 21 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

On remarque aussi aux figures 7.21 et D.6 à D.10 que la dilatation thermique commence plus tôt à 30°C qu'à 10°C. Dans la majorité des cas, l'influence de la température sur les courbes du retrait externe est plus visible pendant les premiers 48 heures. Les différences entre les courbes deviennent moins importantes par la suite.

7.6.3 Influence du type de liant

L'influence du type de liant sur l'allure des courbes de retrait externe est présentée aux figures 7.22 à 7.30. Pendant les premiers 48 heures, il est un peu difficile de distinguer l'effet du type de liant car certains coulis subissent une dilatation thermique et d'autres non. En plus, la progression du retrait externe pendant les premiers 12 heures varie en même temps en fonction du type de liant, du rapport E/L et de la température. À partir de 48 heures d'hydratation, on observe une séparation des courbes. En effet, les courbes obtenues avec liant de référence et avec cendre volante s'écartent des courbes obtenues avec fumée de silice et avec laitier. Les courbes du retrait externe obtenues avec les trois premiers liants démontrent ainsi moins de retrait externe que les trois autres courbes. Ce comportement est pratiquement observé sur toutes les figures démontrant l'influence du type de liant sur le retrait externe. Ces résultats sont en accord avec les distributions de pores présentées aux figures 6.36 à 6.41 du chapitre 6. Les courbes de distribution sont déplacées vers les plus petits pores lors d'utilisation de la fumée de silice et du laitier. La dépression capillaire qui se développe en présence de ces ajouts est plus importante, ce qui cause plus de retrait externe.

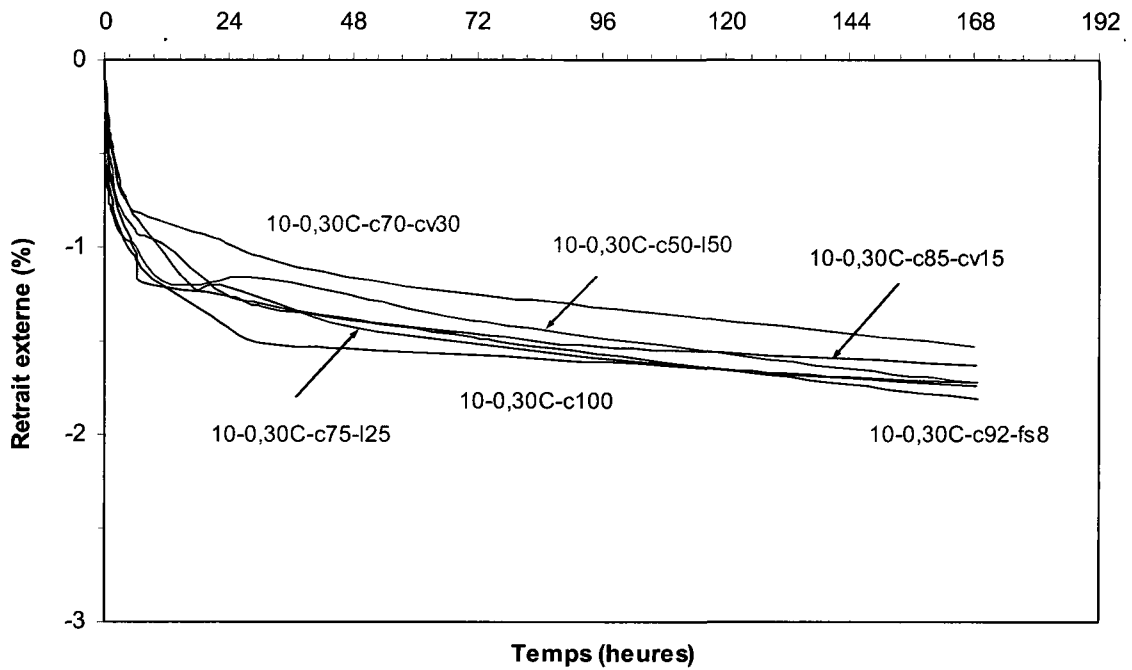


Figure 7. 22 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 10°C

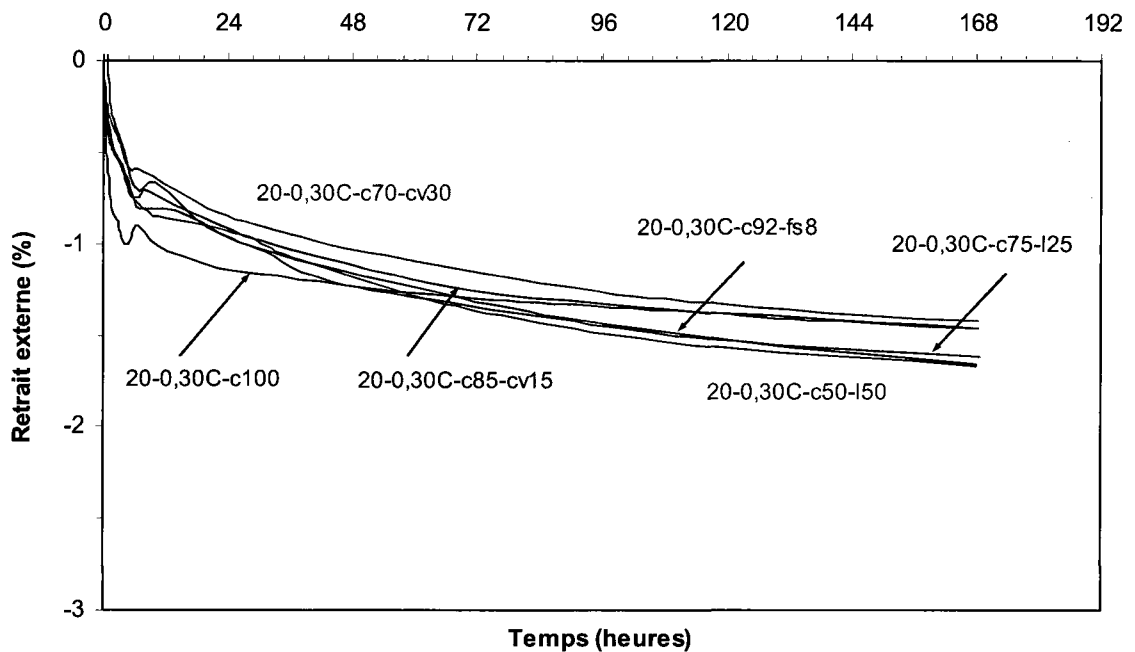


Figure 7. 23 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 20°C

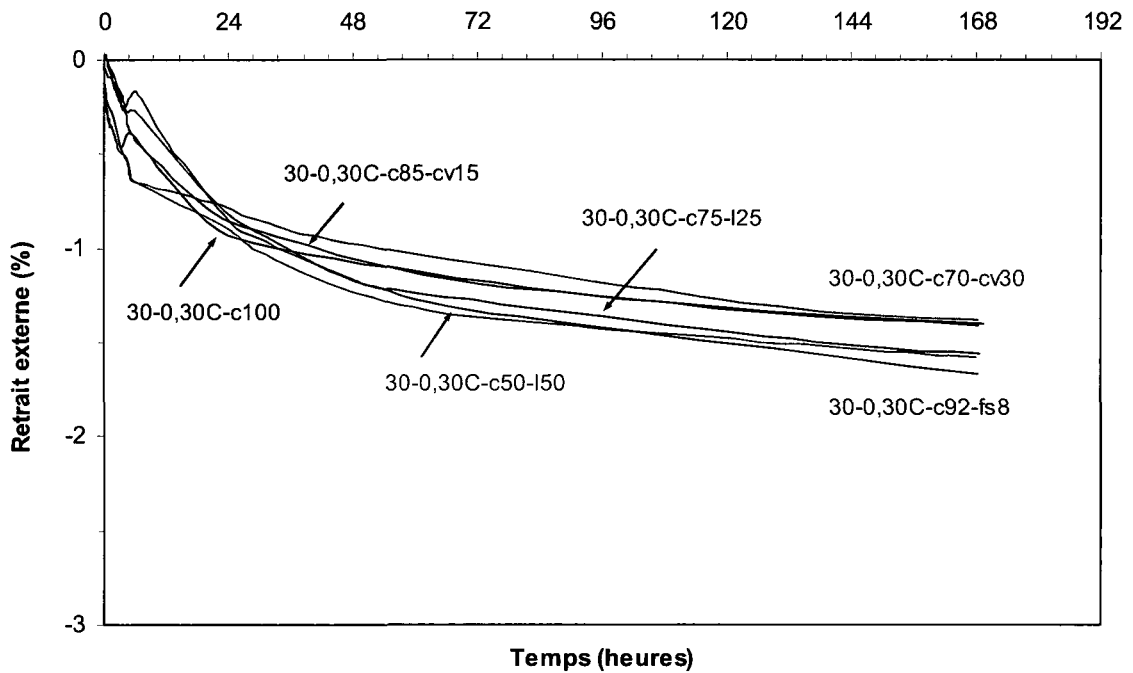


Figure 7. 24 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 30°C

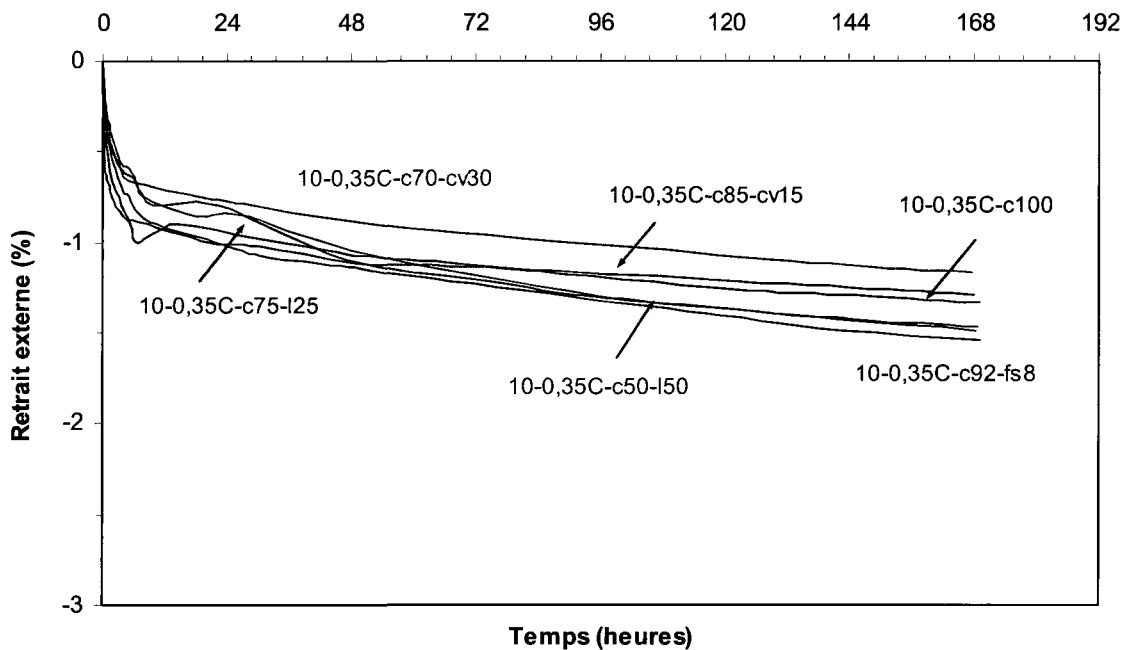


Figure 7. 25 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 testés à 10°C

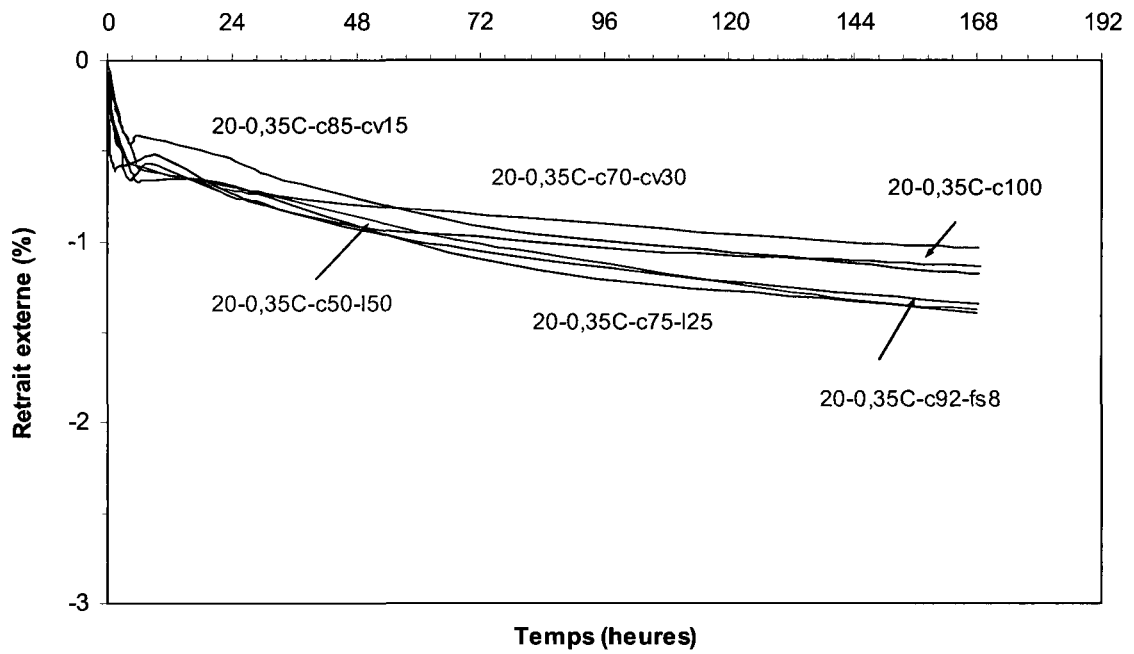


Figure 7. 26 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,35$ testés à 20°C

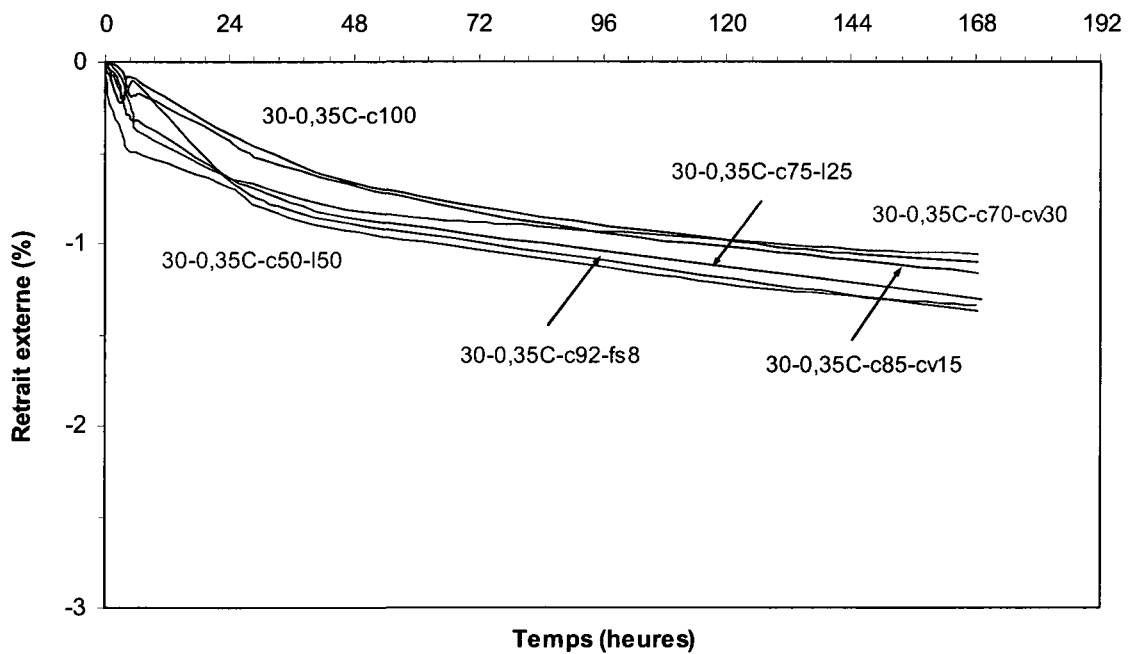


Figure 7. 27 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,35$ testés à 30°C

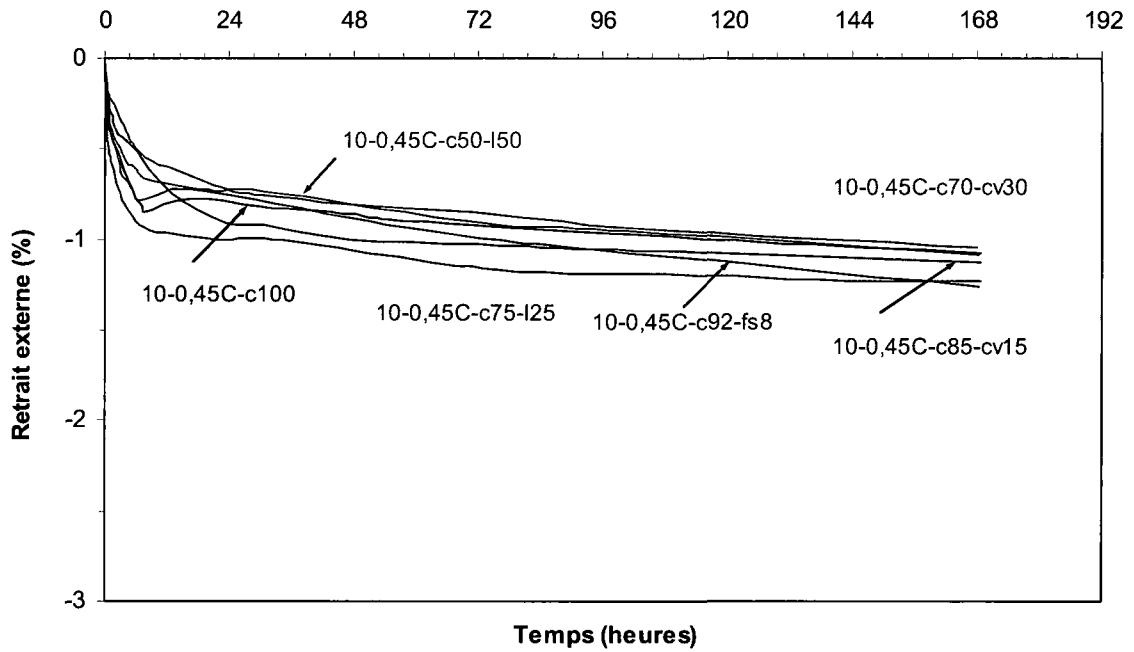


Figure 7. 28 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 10°C

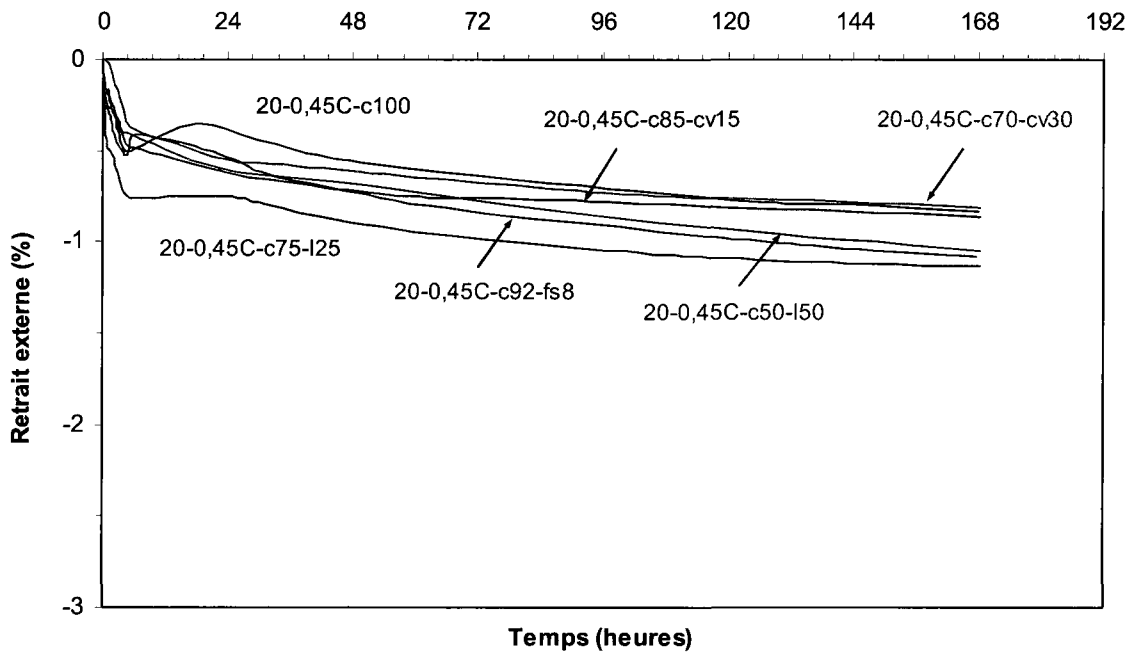


Figure 7. 29 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 20°C

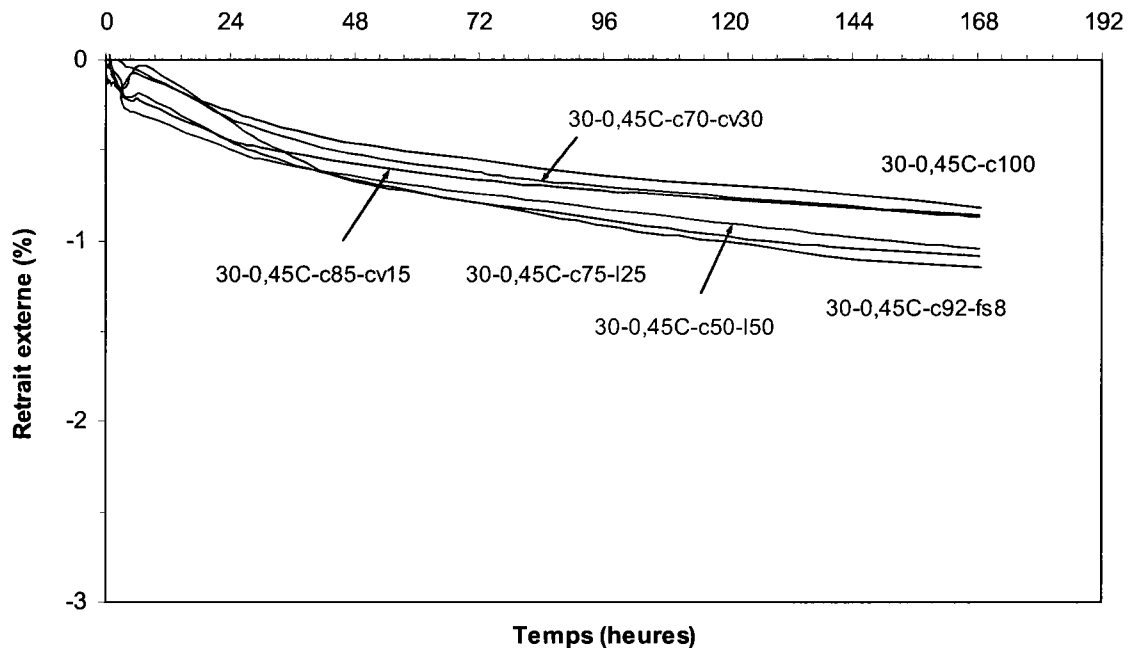


Figure 7. 30 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,45$ testés à 30°C

7.7 Interprétation et comparaison des courbes de retrait endogène externe mesuré pendant quatorze jours

7.7.1 Influence du rapport E/L et de l'âge du coulis

Les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant quatorze jours sont présentées à la figure 7.31. Les figures D.11 à D.15 de l'Annexe D présentent les courbes de retrait externe des coulis avec ajouts minéraux.

Les courbes de retrait externe démontrent encore une fois que le retrait externe est plus important pour les rapports E/L plus faibles, quel que soit le type de liant. À partir de 48 heures d'hydratation les courbes du retrait externe sont pratiquement parallèles jusqu'à 14 jours. L'augmentation du retrait entre 7 et 14 jours est faible mais on observe quand même l'avancement du retrait pendant cette période.

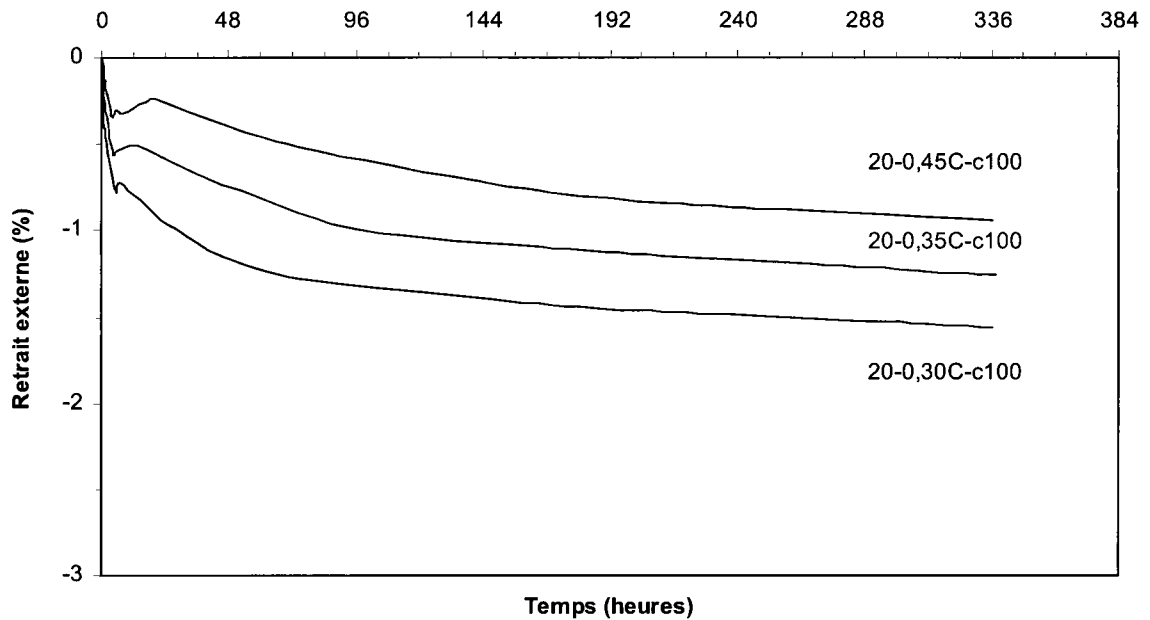


Figure 7. 31 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis de référence mesuré pendant 14 jours

7.7.2 Influence du type de liant

L'influence du type de liant sur l'allure des courbes du retrait externe pendant 14 jours d'hydratation est présentée aux figures 7.32 à 7.34. On remarque encore une fois que les liants au laitier et à la fumée de silice développent plus de retrait externe que la référence ou le liant à la cendre volante.

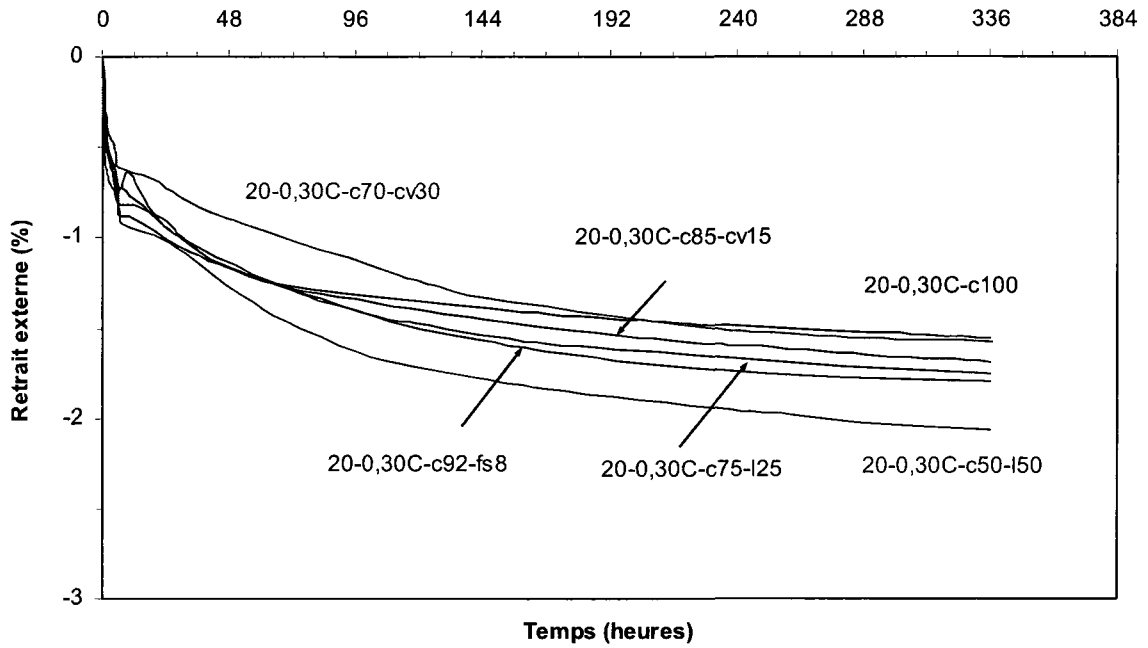


Figure 7. 32 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,30$ mesuré pendant 14 jours

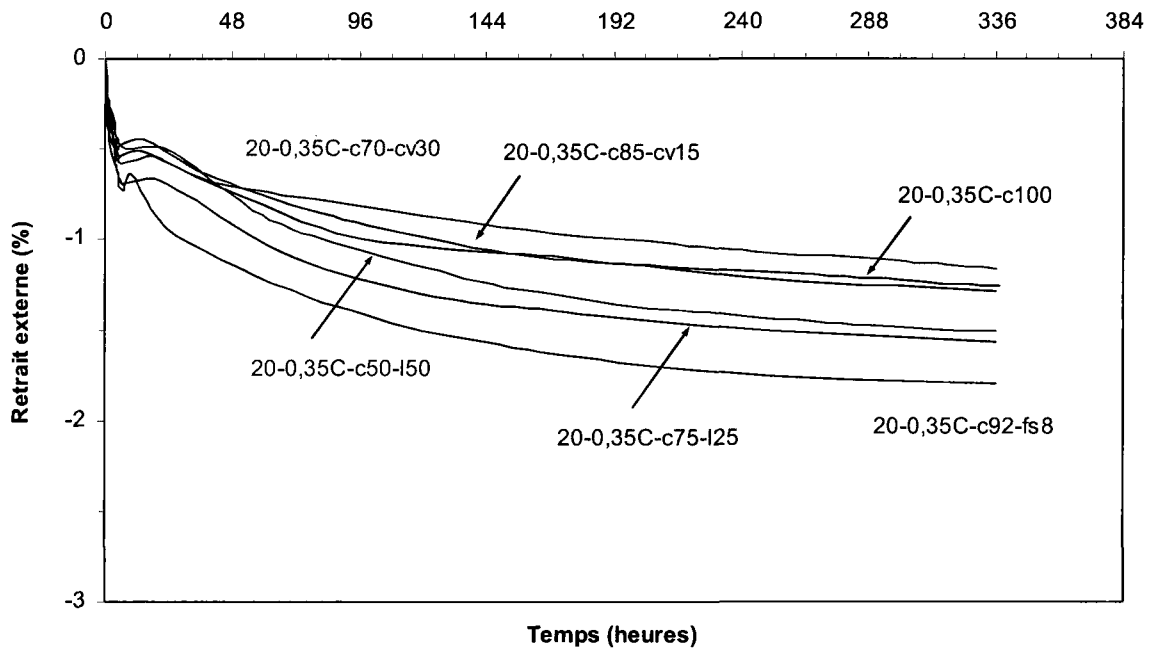


Figure 7. 33 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,35$ mesuré pendant 14 jours

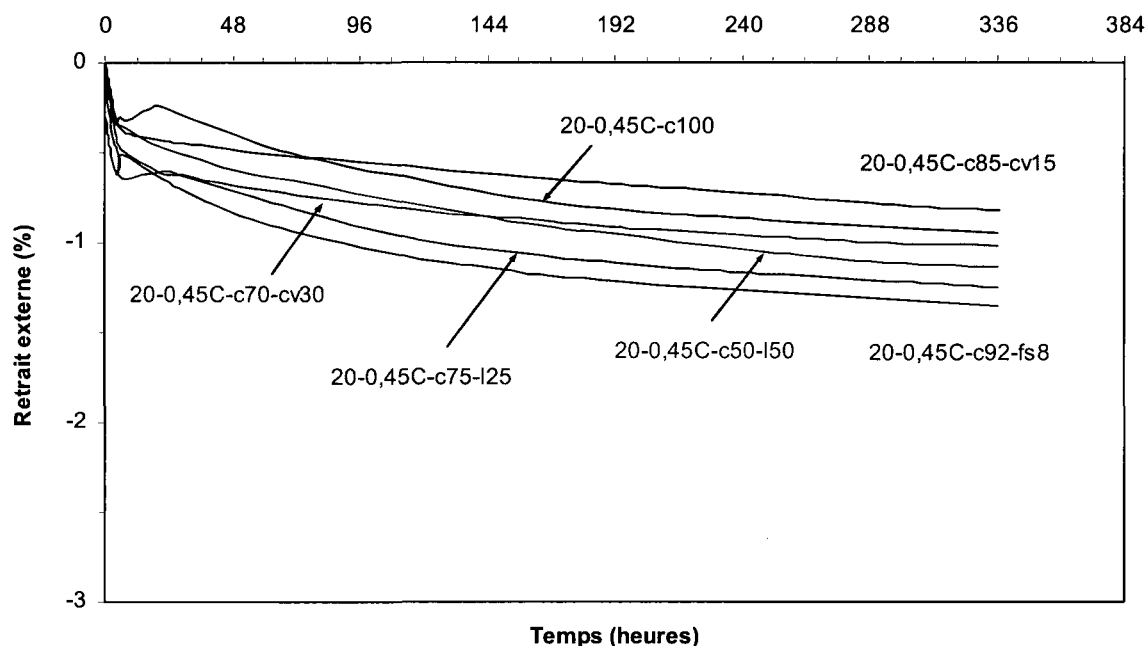


Figure 7. 34 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait externe des coulis de rapport $E/L = 0,45$ mesuré pendant 14 jours

7.8 Interprétation et comparaison des courbes du retrait endogène total mesuré pendant sept jours

7.8.1 Influence du rapport E/L

En milieu scellé, avant la prise du liant, la variation de volume est causée par le retrait chimique qui n'engendre qu'un retrait endogène externe. Après la prise, la variation de volume comprend un retrait endogène externe et un retrait endogène interne. Le retrait endogène externe est causé par l'effet simultané du retrait chimique et de la dépression capillaire. Le retrait endogène interne correspond au volume total des vides gazeux formés dans la porosité capillaire. Le retrait endogène total est la somme du retrait endogène interne et du retrait endogène externe (avant et après la prise). Le retrait endogène total est plus influencé par le retrait interne qui est toujours plus important que le retrait externe. C'est pourquoi les courbes du retrait total ressemblent plus aux courbes du retrait interne qu'à celle du retrait endogène externe. La figure 7.35 présente les courbes de retrait total des coulis de référence. Les courbes de retrait total des coulis avec ajouts minéraux sont présentées aux figures E.1 à E.5 jointes à l'Annexe E.

Dans le cas des coulis de référence et des coulis à la fumée de silice, les courbes du retrait total sont légèrement déformées pendant les premiers 24 heures à cause de la dilatation thermique mesurée pendant cette période. À partir de 24 heures, on observe la stabilisation du retrait total qui progresse plus lentement jusqu'au 7 jours. Les coulis 10-0,45C-c100 et 10-0,45C-c92-fs8 ont besoin de 48 heures pour stabiliser leur retrait total. Suite à la stabilisation, le retrait total est plus important dans les coulis de plus grand rapport E/L.

Des comportements semblables ont été observés avec les coulis au laitier (Figures E.2 et E.3). Dans le cas du rapport E/L de 0,45, le retrait total se stabilise plus lentement puis atteint des valeurs plus élevées après 7 jours d'hydratation.

Dans les coulis avec cendre volante, l'augmentation du rapport E/L fait ralentir la stabilisation du retrait total. Quand le liant contient 15% de cendre volante, les retraits totaux des coulis de rapport E/L de 0,35 et de 0,45 se rapprochent considérablement et les courbes deviennent presque superposées (Figure E.4).

Quand la teneur en cendre volante augmente à 30%, l'influence du rapport E/L sur l'allure des courbes devienne pratiquement négligeable suite à la stabilisation du retrait (Figure E.5).

7.8.2 Influence de la température

L'effet de la température sur les courbes de retrait total des coulis de référence est présenté à la figure 7.36, alors que les figures E.6 à E.10 de l'Annexe E présentent l'effet de la température sur les courbes de retrait total des coulis avec ajouts minéraux.

L'effet de la température sur les courbes de retrait total est plus marqué avant la stabilisation du retrait total. Pour un rapport E/L donné, le retrait total se développe et se stabilise plus rapidement quand la température d'essai est plus élevée. Après la stabilisation, le retrait total développé à haute température demeure plus élevé dans le cas du liant de référence, du liant avec 25% de laitier ou du liant avec cendre volante. Le comportement est l'inverse avec l'utilisation de la fumée de silice ou de 50% de laitier. Dans le cas de ces deux derniers liants, le retrait interne a été sous-estimé à haute température, ce qui a influencé les courbes du retrait total.

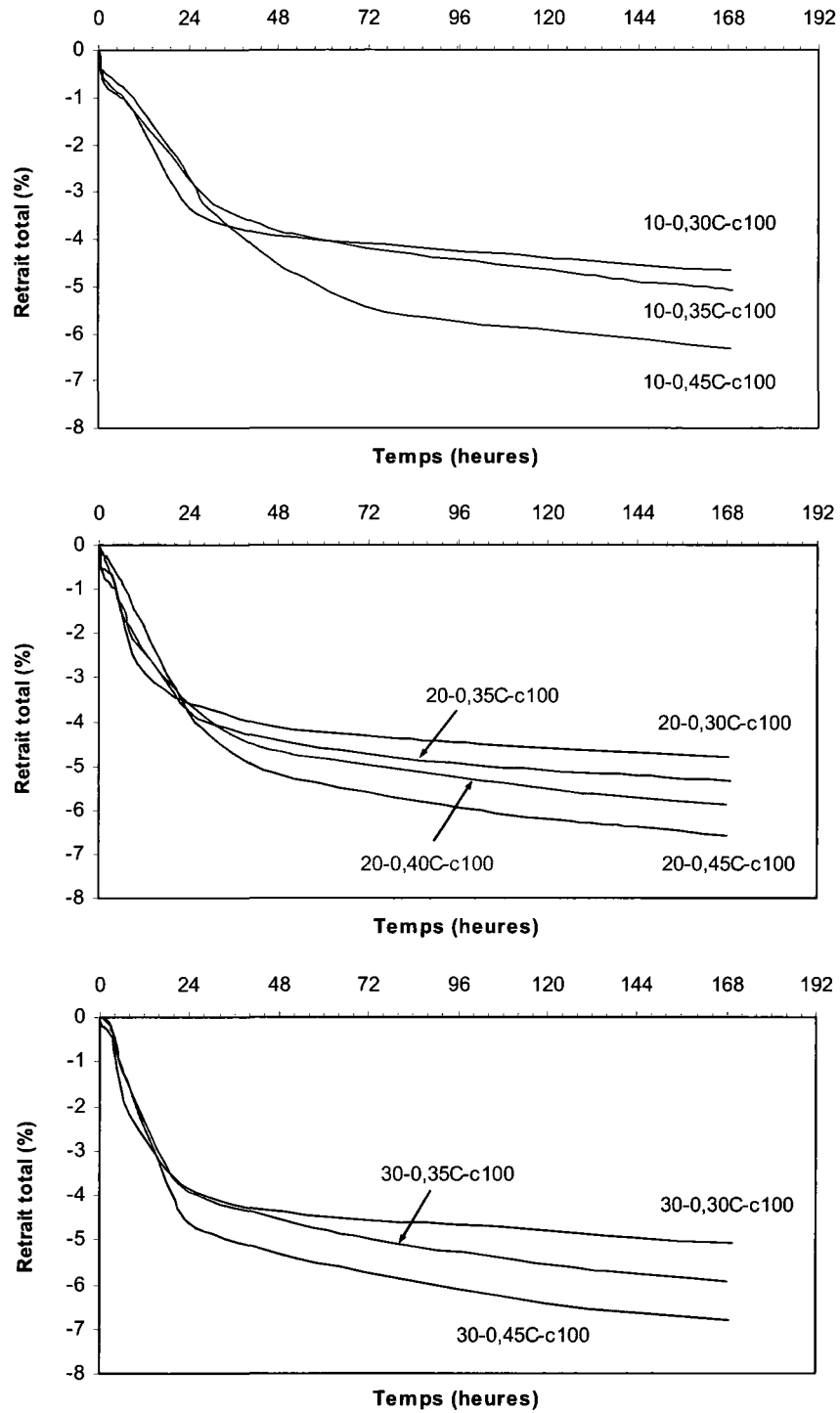


Figure 7. 35 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

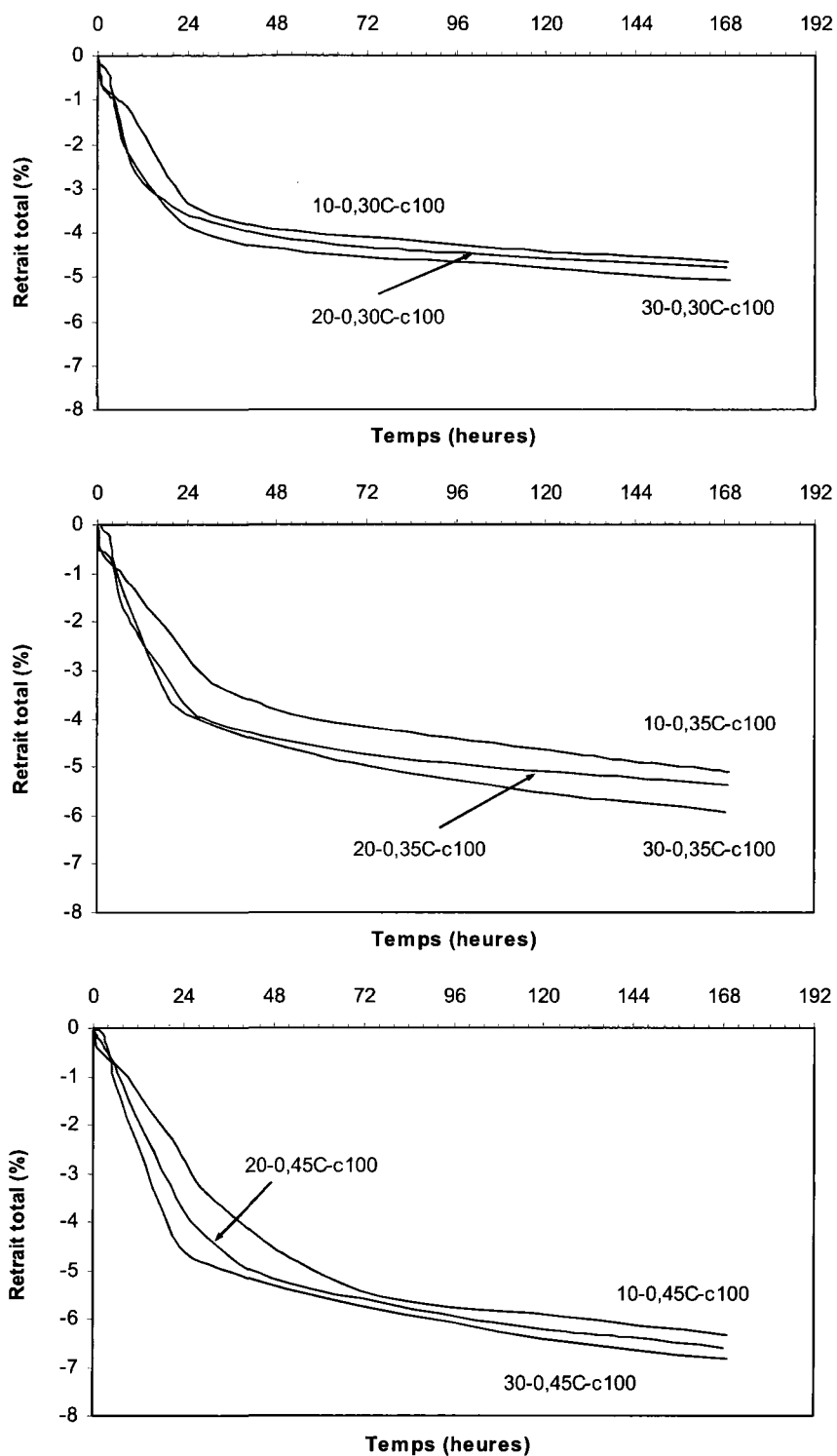


Figure 7. 36 – Effet de la température sur les courbes de retrait total des coulis de référence mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

7.8.3 Influence du type de liant

Les figures 7.37 à 7.45 présentent l'effet du type de liant sur l'allure des courbes de retrait total. Quand le rapport E/L est égal à 0,30 le retrait total se développe plus rapidement lors d'utilisation du liant de référence et du liant avec fumée de silice. Suite à la stabilisation, le retrait total demeure le plus faible quand on utilise 8% de fumée de silice et le plus élevé lors de l'utilisation du laitier. Des comportements semblables ont été observés avec les coulis dont le rapport E/L est égal à 0,35 et à 0,45.

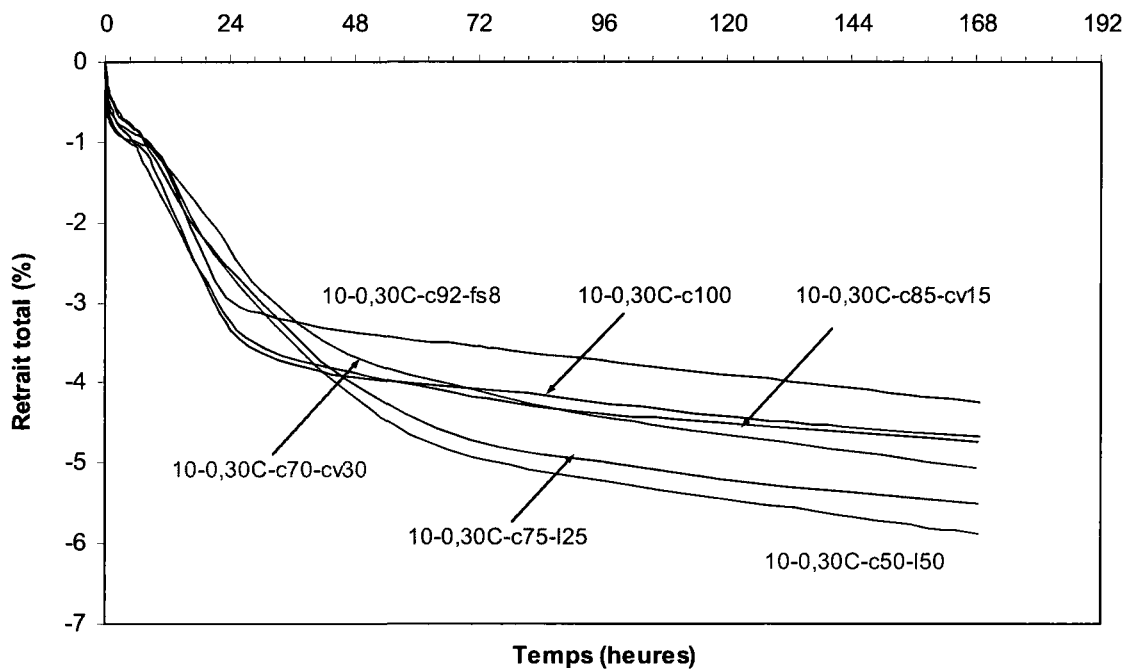


Figure 7.37 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 10°C

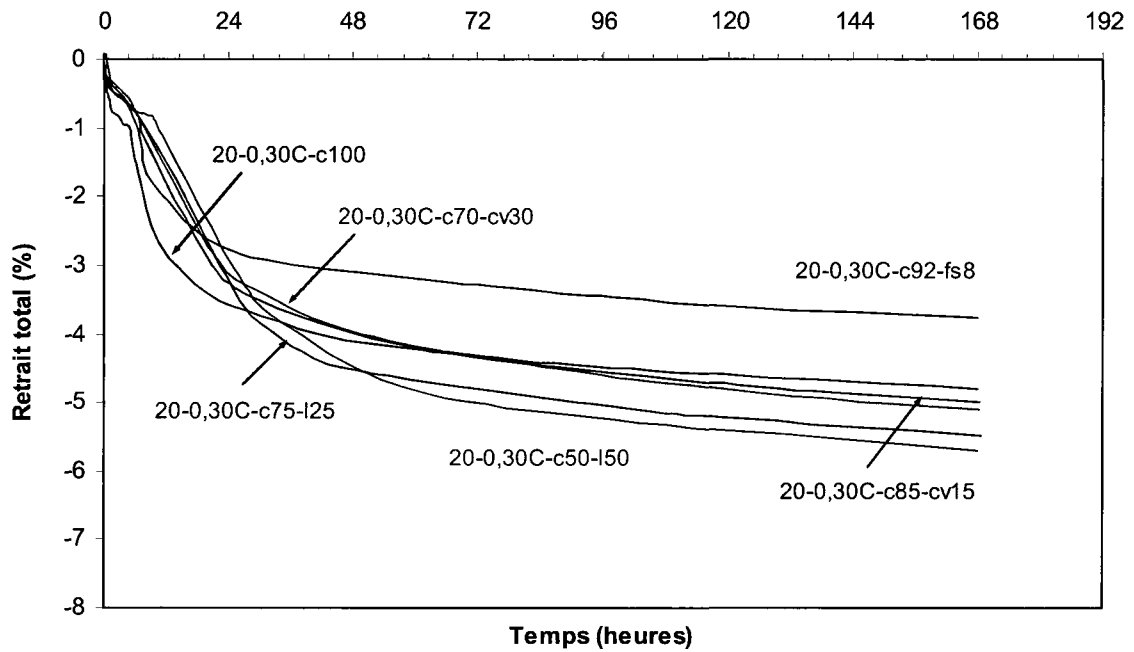


Figure 7. 38 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 20°C

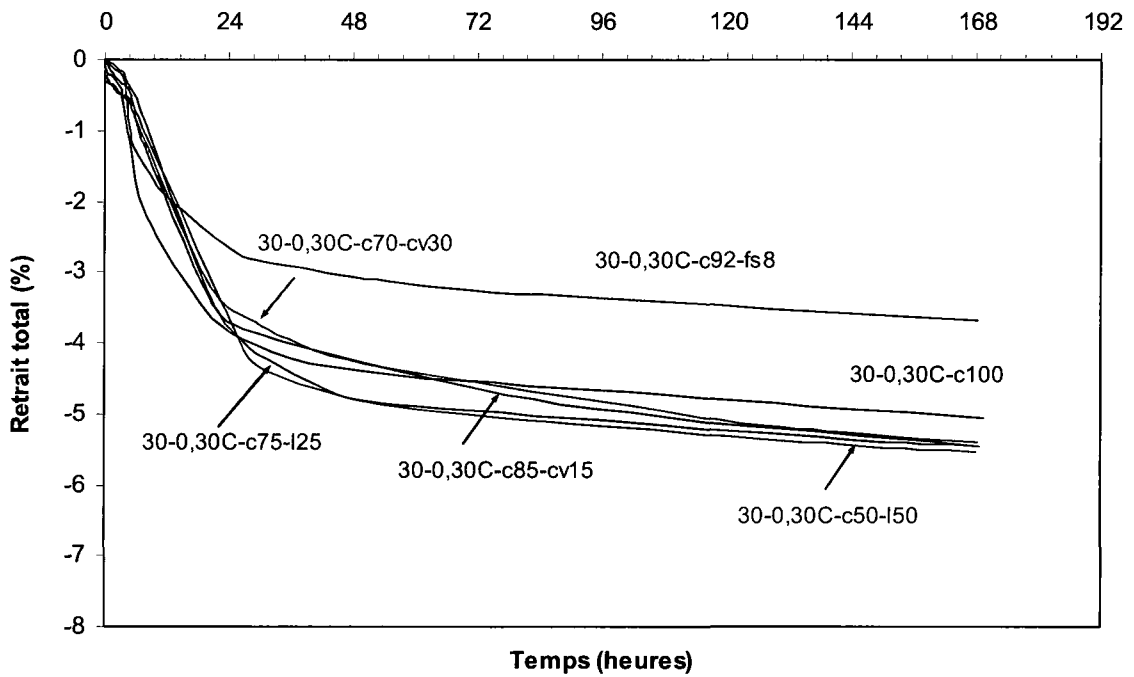


Figure 7. 39 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 testés à 30°C

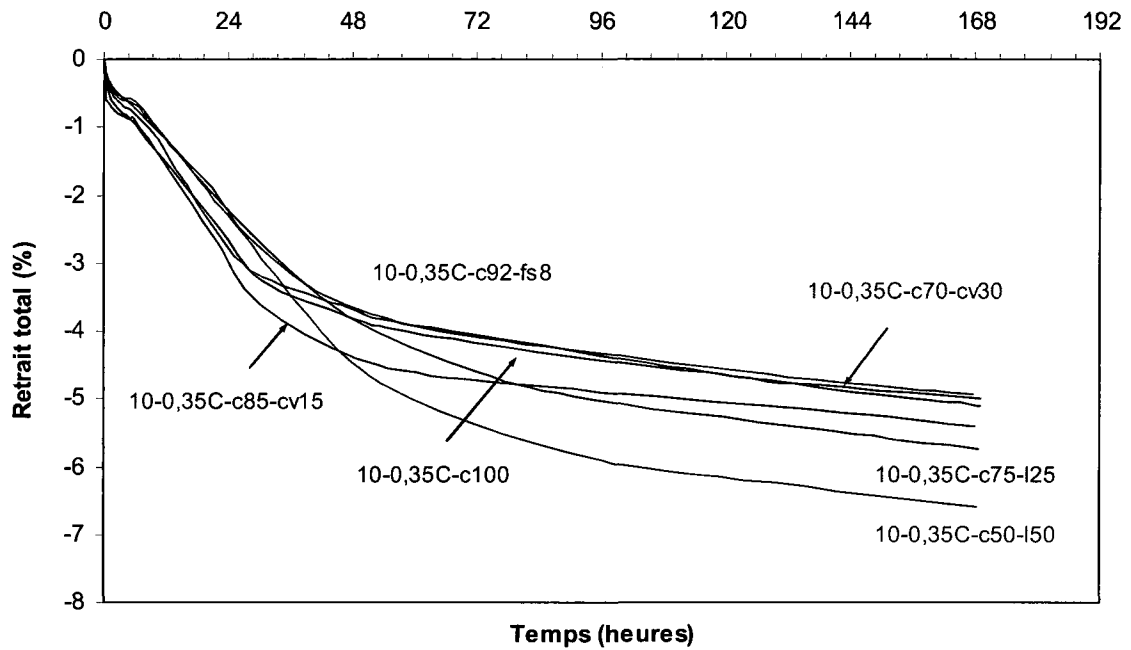


Figure 7. 40 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport $E/L = 0,35$ testés à 10°C

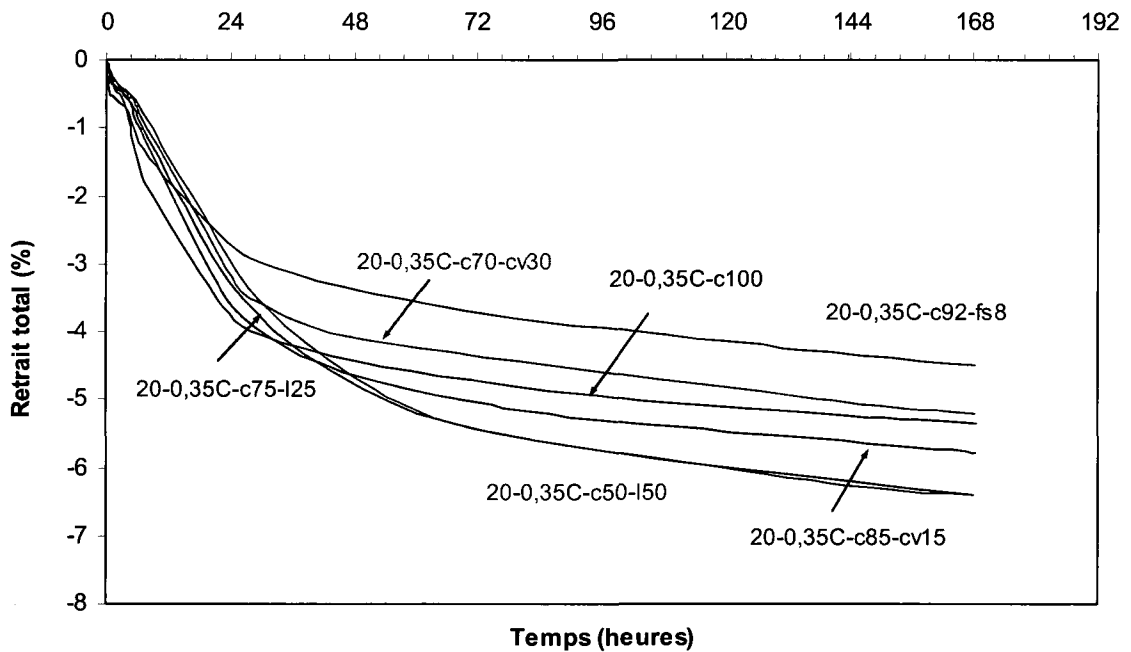


Figure 7. 41 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport $E/L = 0,35$ testés à 20°C

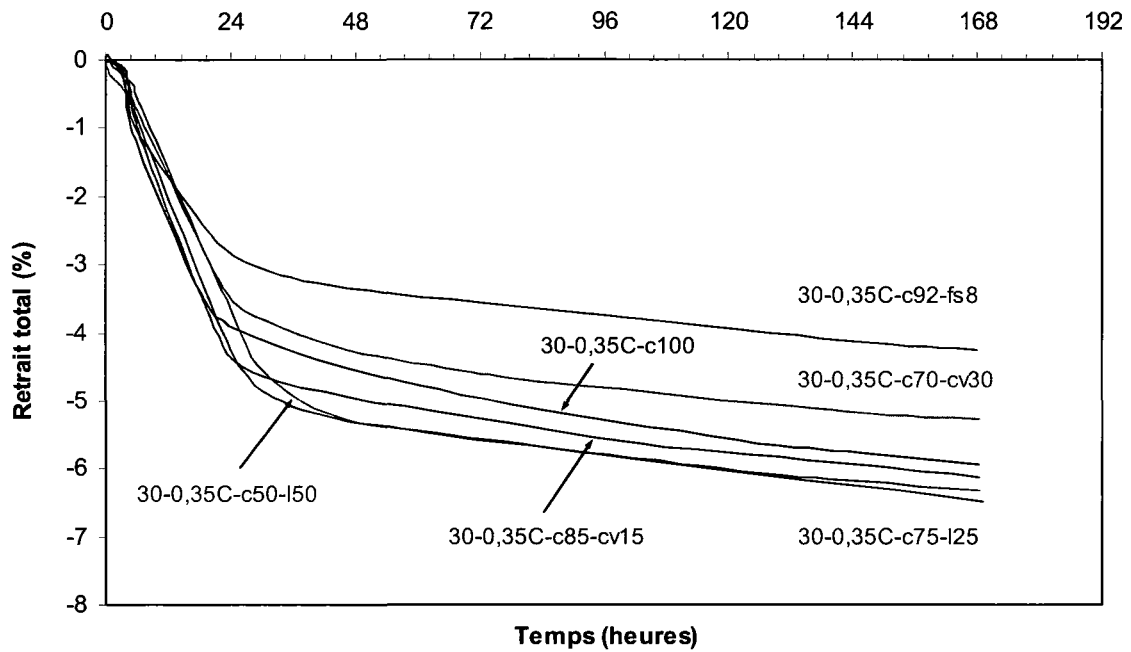


Figure 7. 42 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport $E/L = 0,35$ testés à 30°C

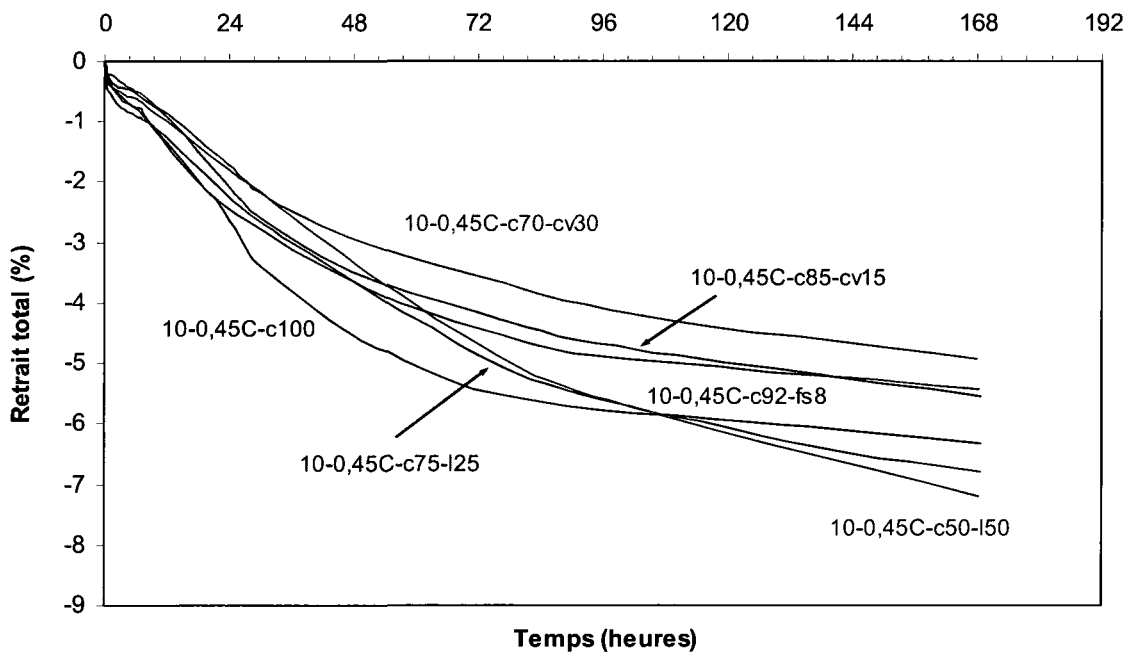


Figure 7. 43 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport $E/L = 0,45$ testés à 10°C

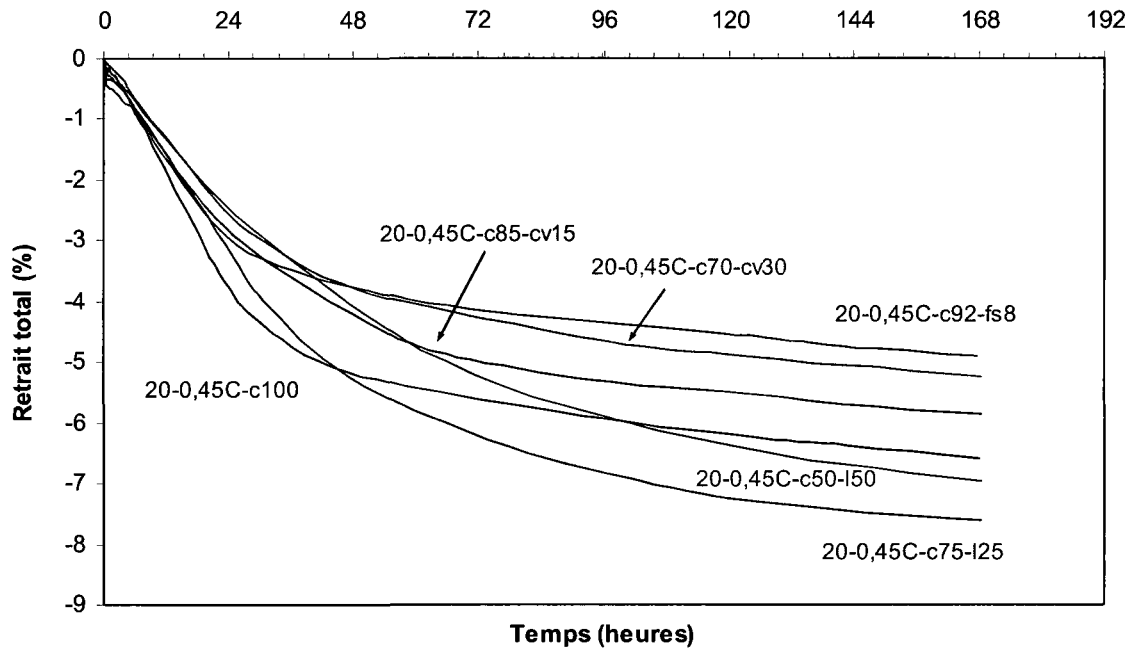


Figure 7. 44 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 20°C

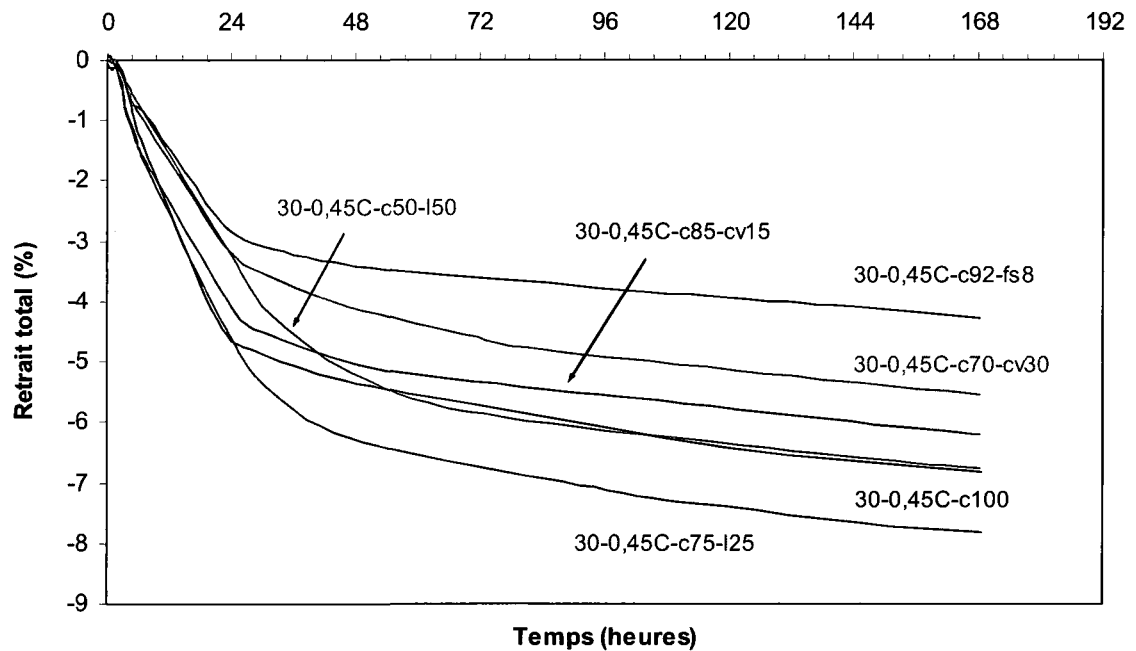


Figure 7. 45 – Effet du type de liant sur les courbes du retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 testés à 30°C

7.9 Interprétation et comparaison des courbes de retrait endogène total mesuré pendant quatorze jours

7.9.1 Influence du rapport E/L et de l'âge du coulis

Les courbes de retrait total des coulis de référence obtenues après 14 jours d'hydratation sont présentées à la figure 7.46. Les courbes E.11 à E.15 jointes à l'Annexe E, présentent les courbes de retrait total des coulis avec ajouts minéraux.

La grande majorité du retrait total se développe pendant les premiers 2 à 3 jours. Le retrait total se stabilise par la suite, puis augmente lentement jusqu'à 14 jours. Pour un type de liant donné, les courbes du retrait total sont pratiquement parallèles à partir de 7 jours. L'influence du rapport E/L sur le développement du retrait total entre 7 et 14 jours est donc moins marquée.

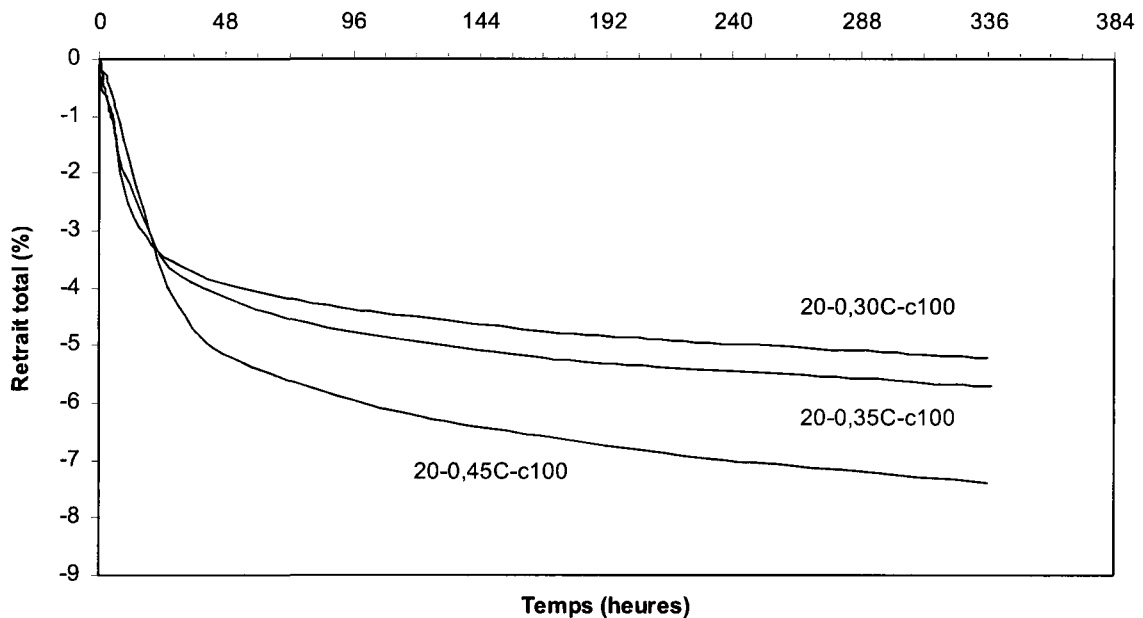


Figure 7. 46 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis de référence mesuré pendant 14 jours

7.9.2 Influence du type de liant

Les figures 7.47 à 7.49 présentent l'effet du type de liant sur le retrait total pendant 14 jours d'hydratation. L'influence du type de liant est pratiquement établie à 7 jours quelque soit le rapport E/L. Les courbes démontrent que le liant avec fumée de silice développe le moins de retrait total tandis que le liant au laitier en développe le plus. Les courbes du retrait total obtenues avec le liant de référence et avec le liant à la cendre volante sont situées entre les courbes représentant deux autres liants.

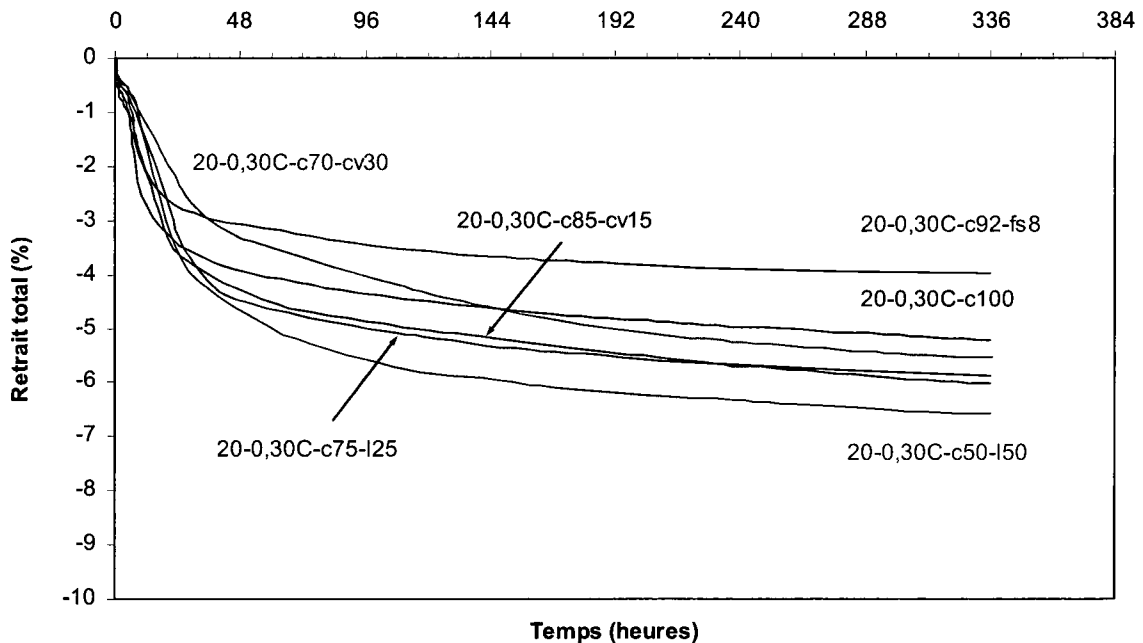


Figure 7.47 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait total des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré pendant 14 jours

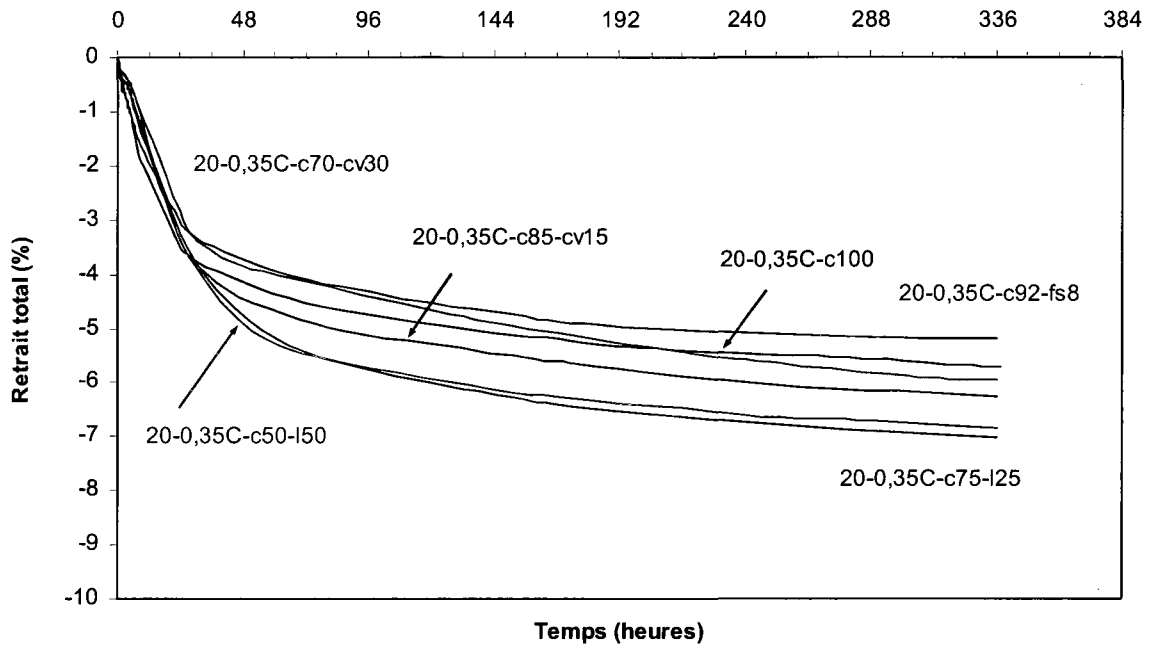


Figure 7. 48 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait total des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré pendant 14 jours

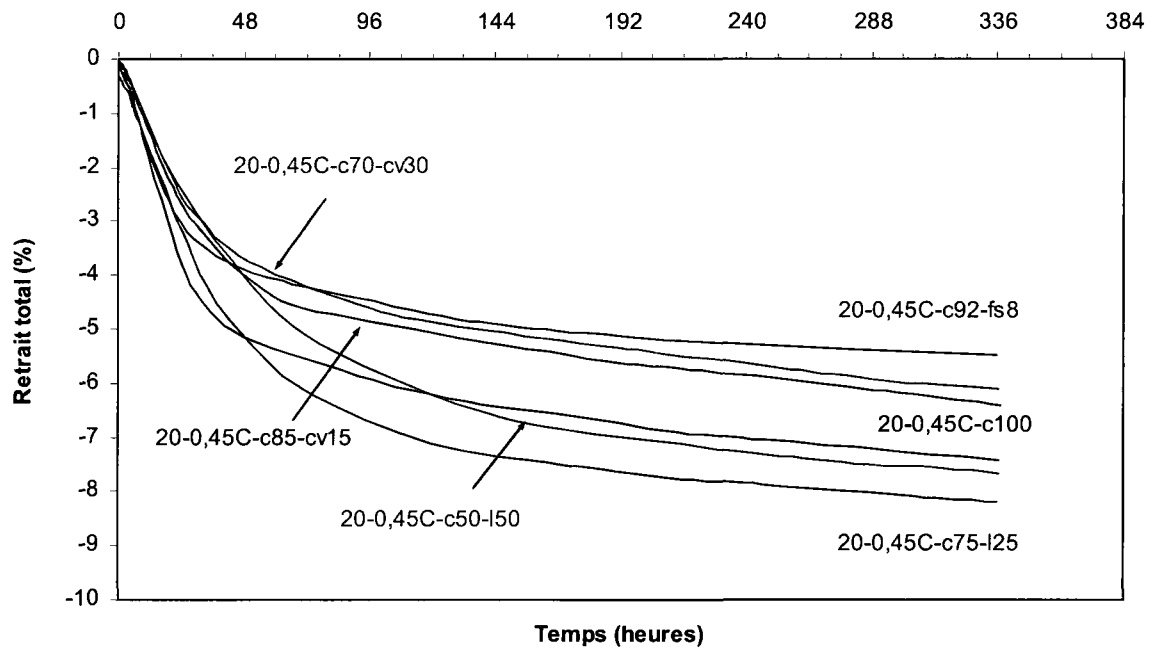


Figure 7. 49 – Effet du type de liant sur les courbes de retrait total des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré pendant 14 jours

7.10 Retrait endogène interne à 7 jours

7.10.1 Effet du rapport E/L sur le retrait endogène interne à 7 jours

Le retrait endogène interne après 7 jours d'hydratation des coulis de référence est présenté à la figure 7.50. Sur les deux premières parties de cette figure, le retrait interne est exprimé en pourcentage du volume initial et en millilitres par 100 grammes de liant total. Le retrait interne est principalement influence par le degré d'hydratation du ciment. Selon la figure 7.50, il varie entre 3 et 6,4% ou entre 1,8 et 4,8 ml/100 g de liant total. Il augmente avec l'augmentation du rapport E/L quelle que soit la température de l'essai du retrait endogène. Le même comportement a été observé lors d'analyse des degrés d'hydratation en fonction du rapport E/L. Quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45, le retrait interne augmente de 73 à 82%, exprimé en variation du volume initial.

Sur la troisième partie de la figure 7.50, le retrait interne est exprimé en millilitres par 100 grammes de liant hydraté. Lorsqu'il est exprimé à l'aide de ces unités, il est nommé retrait intrinsèque interne. Il correspond au volume des vides créés dans la porosité capillaire suite à l'hydratation de 100 g de ciment. Le retrait intrinsèque interne est fonction de la nature chimique du liant. Par définition, il n'est pas influencé par la maturité de la matrice cimentaire. Il devrait être indépendant de la température et du rapport E/L. Les résultats de la figure 7.50 démontrent que ce retrait diminue avec la diminution du rapport E/L. Quand le rapport E/L est égal à 0,45, la valeur moyenne du retrait intrinsèque est de 7,6 ml/100 g de liant hydraté. Cette valeur est très voisine de la valeur calculée à partir des équations chimiques, soit une contraction de 7,1 ml/100 g de liant hydraté (Tableau 7.2). Quand le rapport E/L diminue à 0,35, nous avons un retrait moyen de 5,3 ml/100 g de liant hydraté. Ce retrait diminue jusqu'à 4,3 ml/100 g de liant hydraté quand le rapport E/L diminue à 0,30. Cette diminution est probablement due à notre technique expérimentale qui pourrait sous estimer le retrait interne des matrices cimentaires de faible rapport E/L. En effet, le retrait interne est basé sur la mesure du volume gazeux formé dans la porosité capillaire. La faible perméabilité au gaz des pâtes à faible rapport E/L pourrait bloquer les transferts gazeux entre les tiges poreuses et une partie de la porosité capillaire. Ce phénomène pourrait alors conduire à une sous-estimation du retrait interne. Les dimensions de l'enceinte interne ne permettaient pas d'augmenter à plus de cinq le

nombre de tiges poreuses. Le diamètre du bloc poreux ainsi que les dimensions de la coupe transversale des tiges sont les principales contraintes. De plus, les tiges sont longues et se déforment légèrement à leur extrémité. L'ajout de tiges supplémentaires risquerait que les tiges se touchent dans le coulis, ce qui fausserait les mesures du retrait interne.

La figure 7.51 présente le retrait interne après 7 jours d'hydratation des coulis avec 8% de fumée de silice. On remarque que le retrait interne varie de 2,2 à 4,2% ou de 1,4 à 3,3 ml/100 g de liant total. Quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45, le retrait interne augmente de 41 à 75% exprimé en fonction du volume initial. On remarque aussi que le retrait interne diminue avec l'augmentation de la température (pour un même rapport E/L). Ce comportement sera discuté dans la partie qui traite l'effet de la température sur le retrait interne. Il nous permet quand même de supposer que l'augmentation du retrait causée par l'augmentation du rapport E/L pourrait être plus importante si on avait pu mesurer tout le retrait interne. L'évolution du degré d'hydratation des coulis avec fumée de silice en fonction du rapport E/L est semblable à celle observée avec les coulis de référence (Figures 5.18 et 5.19). Pourtant l'évolution du retrait interne est différente pour deux types de coulis. Les résultats démontrent également que le retrait intrinsèque interne diminue avec la diminution du rapport E/L mais aussi avec l'augmentation de la température. Dans le cas de la fumée de silice une sous-estimation du retrait interne est donc observée. Elle est probablement due à une augmentation de l'imperméabilité au gaz de la pâte contenant de la fumée de silice.

L'évolution du retrait interne après 7 jours d'hydratation des coulis avec 25% de laitier est présentée à la figure 7.52. Le retrait interne est compris entre 3,8 et 6,7% ou entre 2,3 et 5,2 ml/100 g de liant total. Il augmente de 53 à 72% quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45. Le retrait intrinsèque interne diminue avec la diminution du rapport E/L. Il est égal en moyenne à 9,1 ml/100 g de liant hydraté quand le rapport E/L est égal à 0,45, puis diminue jusqu'à 5,7 ml/100 g de liant hydraté quand ce rapport est de 0,30. Le comportement de ce type de coulis en fonction du rapport E/L est semblable à celui des coulis de référence, ce qui nous permet de tirer les mêmes conclusions dans les deux cas.

La figure 7.53 présente l'influence du rapport E/L sur le retrait interne des coulis avec 50% de laitier. Dans le cas de ce type de liant, le retrait interne est situé entre 3,9 et 5,7% ou entre 2,4 et 4,4 ml/100 g de liant total. Exprimé par rapport au volume initial de coulis, le retrait interne

augmente de 36 à 43% quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45. Comme dans le cas des coulis contenant de la fumée de silice, nous observons une diminution du retrait interne avec l'augmentation de la température (pour un même rapport E/L). L'augmentation du retrait interne avec l'augmentation du rapport E/L devrait donc être plus importante. Une sous-estimation du retrait interne due à l'imperméabilité élevée de la pâte est encore observée. Le phénomène d'imperméabilité pourrait être relié à la distribution des tailles de pores. En effet, les courbes de distribution des pores sont toujours déplacées vers les plus gros pores quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45. De plus, les courbes de distribution sont plus serrées dans les coulis de rapport 0,30 et plus étalées dans les coulis de rapport 0,45. Les coulis de plus faible rapport E/L possèdent donc plus de pores de petit diamètre et moins de pores de gros diamètre. Ils devront alors être plus imperméables. Selon les courbes de distribution poreuses les coulis avec fumée de silice et avec 50% de laitier possèdent le plus de petits pores. Leurs rayons critiques sont les plus faibles. Ces deux types de liants produisent les coulis avec la perméabilité la plus faible et leur retrait interne est sous-estimé le plus.

Le retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante est situé entre 3,1 et 5,3% ou entre 1,9 et 4,1 ml/100 g de liant total (Figure 7.54). On observe, encore une fois, l'augmentation du retrait interne avec l'augmentation du rapport E/L quelle que soit la température de l'essai du retrait endogène. Lors du passage de 0,30 à 0,45, le retrait interne augmente de 35 à 39%. Le retrait intrinsèque interne diminue avec la diminution du rapport E/L comme dans tous les cas précédents.

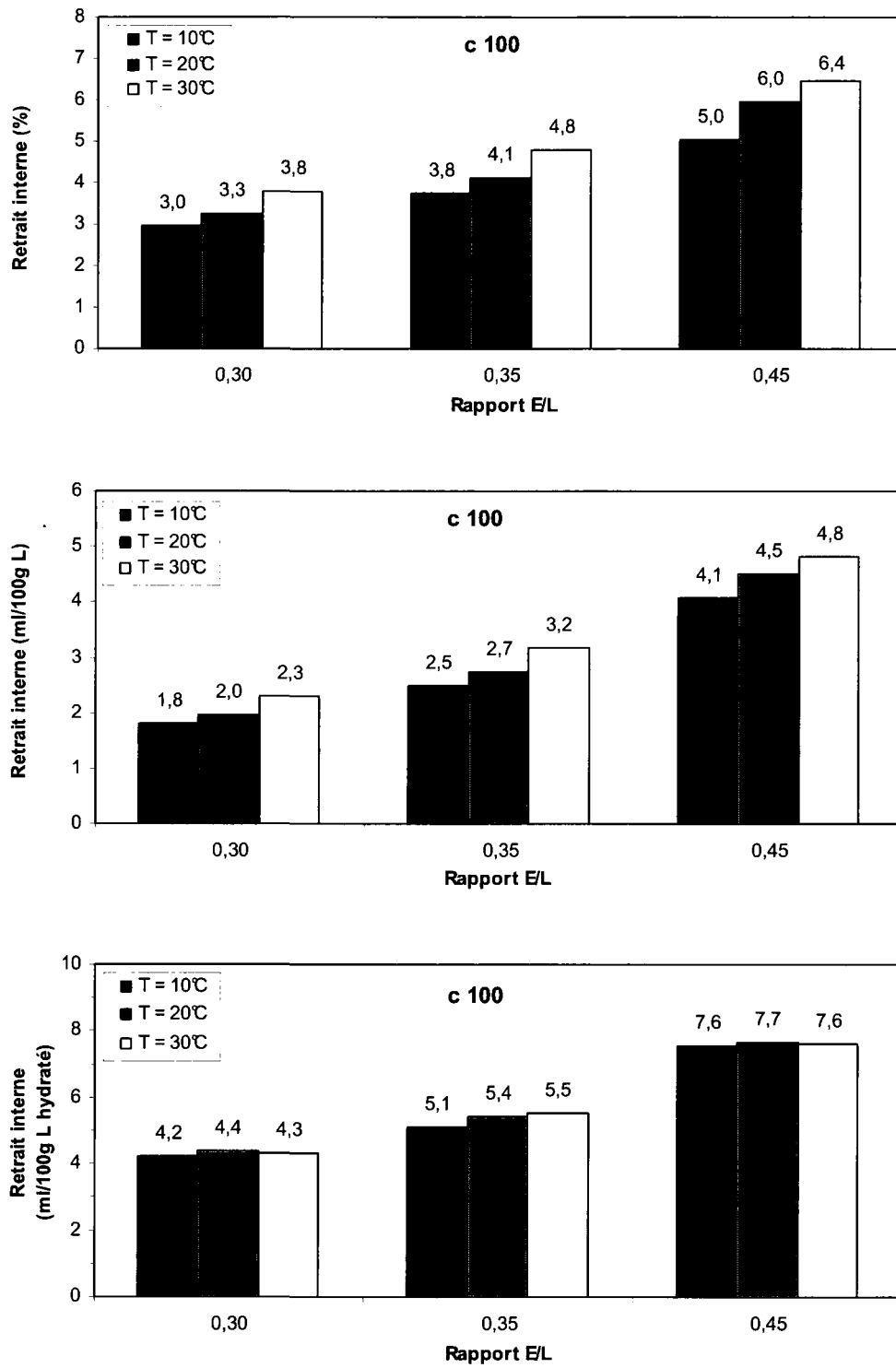


Figure 7. 50 – Retrait interne à 7 jours des coulis de référence

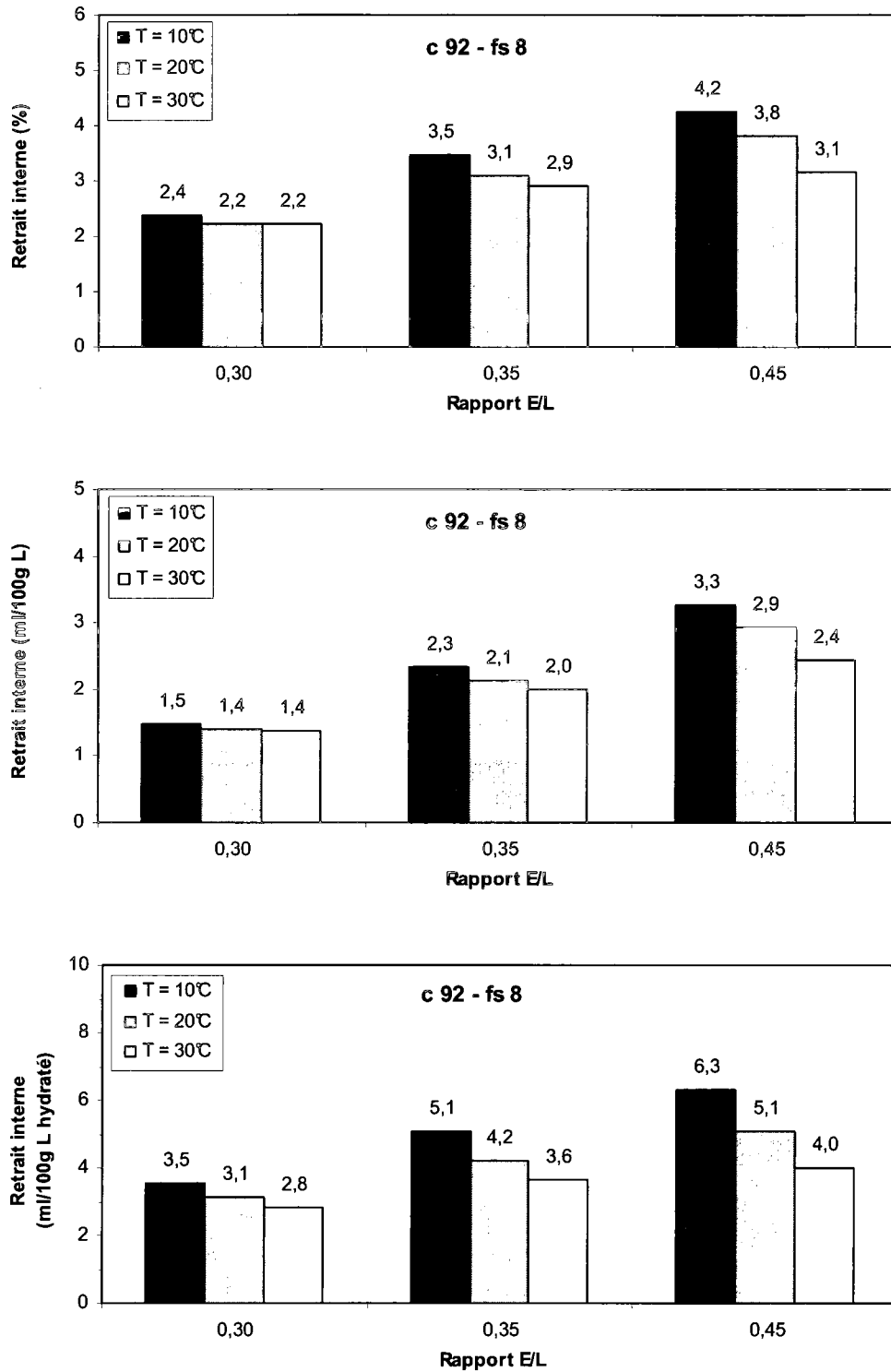


Figure 7. 51 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice

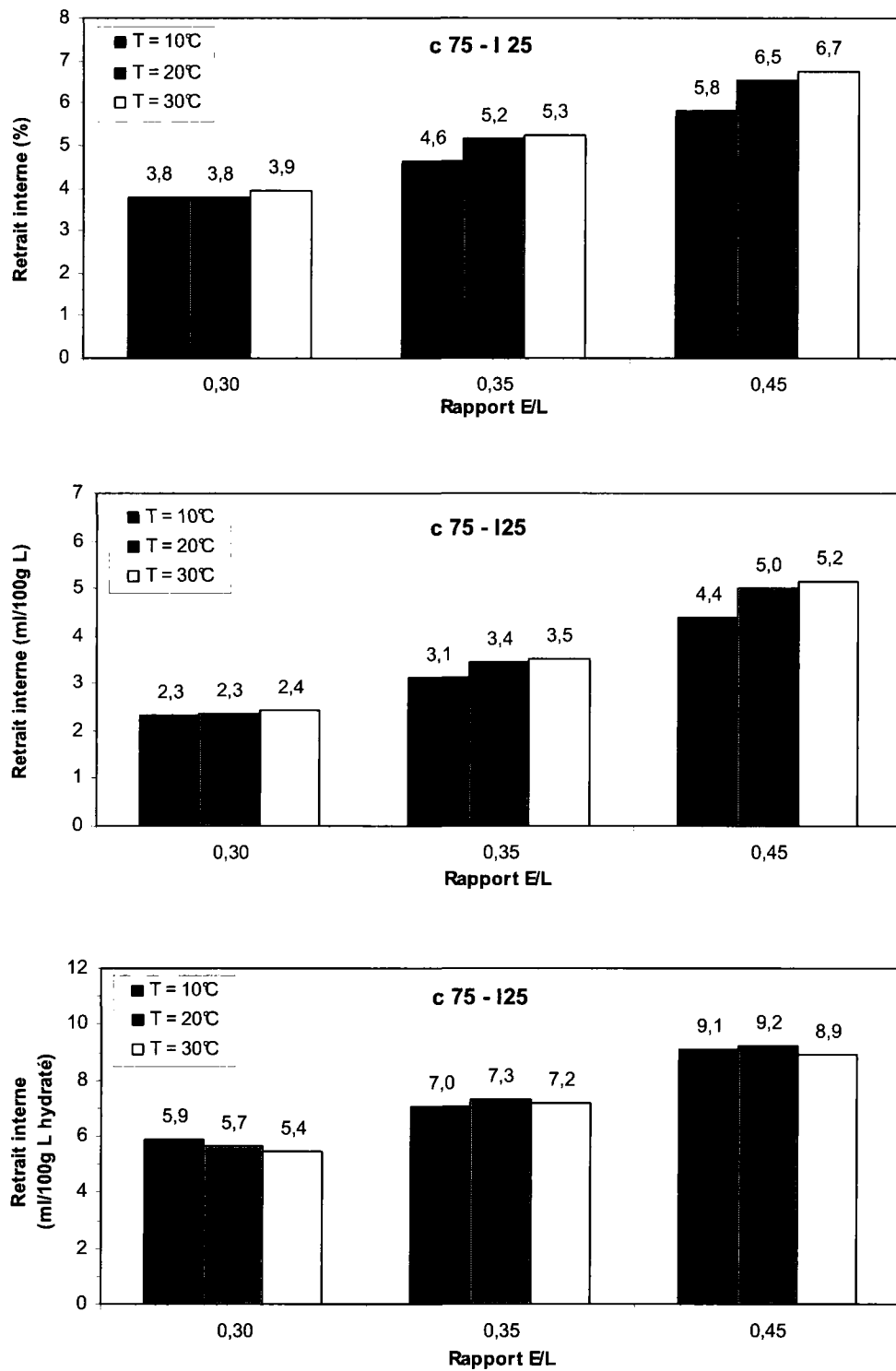


Figure 7. 52 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 25% de laitier

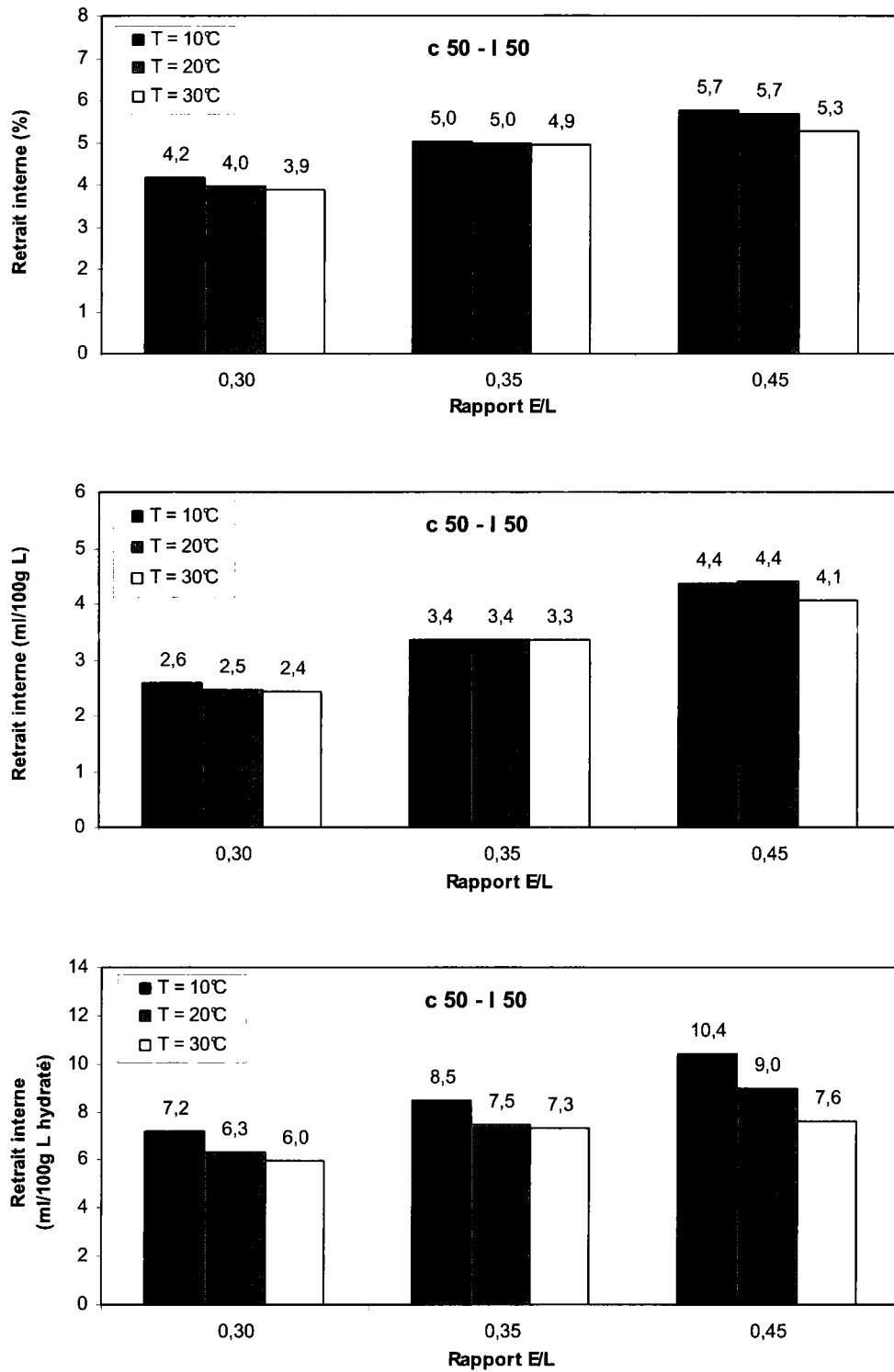


Figure 7. 53 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 50% de laitier

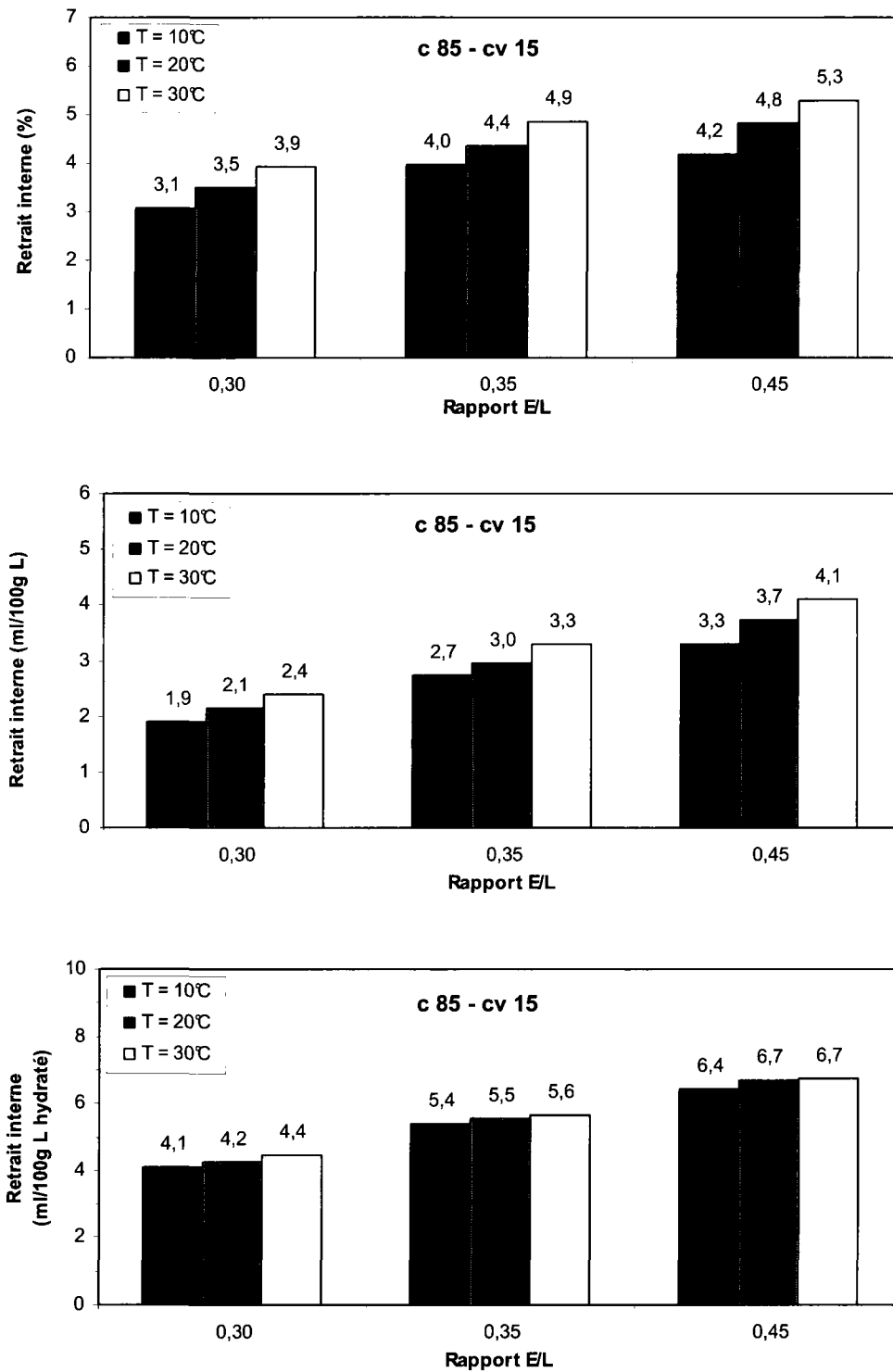


Figure 7. 54 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante

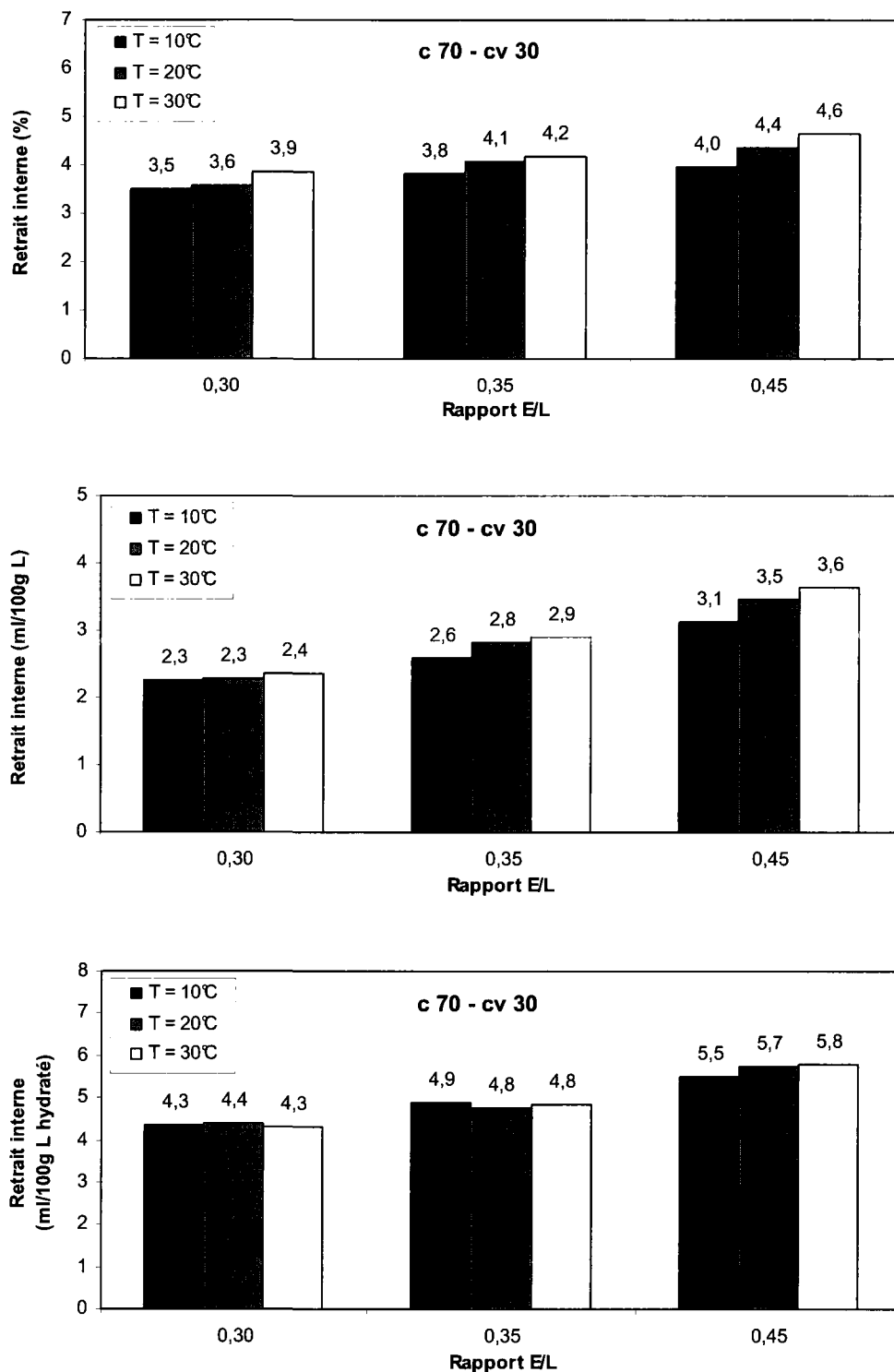


Figure 7. 55 – Retrait interne à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante

La figure 7.55 présente l'influence du rapport E/L sur le retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante. Pour ce type de coulis, le retrait interne est situé entre 3,5 et 4,6% ou entre 2,3 et 3,6 ml/100 g de liant total. Il augmente avec l'augmentation du rapport E/L quelle que soit la température. Cependant cette augmentation est la plus faible. Quand le rapport E/L passe de 0,30 à 0,45, le retrait augmente de 14 à 22%. Comme dans tous les cas précédents, le retrait intrinsèque interne augmente avec l'augmentation du rapport E/L. Les différences entre les retraits des coulis de différents rapports E/L sont les plus faibles cette fois. Le retrait intrinsèque moyen des coulis de rapport 0,30 est de 4,3 ml/100 g de liant hydraté et de 4,8 ml/100 g de liant hydraté pour le rapport 0,35. Dans le cas des coulis de rapport 0,45, il est de 5,7 ml/100 g de liant hydraté.

7.10.2 Effet de la température sur le retrait endogène interne à 7 jours

L'influence de la température sur le retrait interne après 7 jours d'hydratation sera discutée à l'aide des figures 7.50 à 7.55. Le retrait interne des coulis de référence (Figure 7.50) exprimé en pourcentage du volume initial et en ml/100 g de liant total, augmente graduellement avec l'augmentation de la température, quel que soit le rapport E/L. Ce comportement est logique car le degré d'hydratation du ciment augmente de la même façon. Pour un rapport E/L donné, le retrait intrinsèque interne varie très peu avec la variation de la température. On peut donc conclure qu'il est indépendant de la température au niveau du même rapport E/L.

Contrairement aux coulis de référence, le retrait interne des coulis avec fumée de silice diminue graduellement quand la température monte de 10 à 30°C. Les résultats de la figure 7.51 indiquent que le retrait interne de ces coulis est sous-estimé à cause de l'imperméabilisation de la pâte qui augmente avec l'augmentation de la température et avec la diminution du rapport E/L. Notre constatation est basée sur le fait que le degré d'hydratation de ces coulis augmente quand la température augmente. Les échantillons auraient donc du aspirer une plus grande quantité d'air que ce qui a été réellement mesuré, au moins pour les rapports E/L de 0,30 et de 0,35.

L'effet de la température sur le retrait interne des coulis au laitier dépend du dosage en laitier. Quand le taux de remplacement est de 25%, l'effet de la température est semblable à celui observé avec les coulis de référence (Figure 7.52). Quand le taux de remplacement augmente à 50% (Figure 7.53), le phénomène d'imperméabilisation de la pâte avec l'augmentation de la température est encore présent. On constate donc que le retrait interne de ces coulis est sous-estimé comme celui des coulis contenant de la fumée de silice.

Le retrait interne des coulis avec cendre volante augmente graduellement avec la température, quel que soit le rapport E/L ou le taux de remplacement du ciment par la cendre (Figures 7.54). Le retrait intrinsèque est plus ou moins constant, pour un même rapport E/L, indiquant son indépendance de la température.

7.10.3 Effet du type de liant sur le retrait endogène interne à 7 jours

L'influence du type de liant sur le retrait interne des coulis après 7 jours d'hydratation est présentée aux figures 7.56 à 7.64. Dans les coulis de rapport E/L égal à 0,30 testés à 10, 20 et 30°C, les liants au laitier et à la cendre volante produisent un plus grand retrait interne (Figure 7.56) que celui des coulis de référence. Cette augmentation est située entre 3 et 6% dans les coulis avec 15% de cendre volante et entre 9 et 20% dans les coulis avec 30% de cendre volante. La réactivité de la cendre volante de classe F ne dépasse pas 5% après 7 jours d'hydratation [LAM et coll., 2000]. Le rapport E/L réel est donc voisin de 0,35 pour 15% de cendre et de 0,43 pour 30% de cendre volante. La quantité d'eau disponible pour la réaction du ciment est plus importante, ce qui cause une légère augmentation du degré d'hydratation du ciment [BERRY et coll., 1994]. Les coulis avec cendre volante possèdent aussi des degrés d'hydratations supérieurs à ceux des coulis de référence (Figures 5.22 et 5.23). De plus les retraits internes, de même que les degrés d'hydratations des coulis avec 30% de cendre volante sont supérieurs à ceux mesurés avec les coulis contenant 15% de cendre.

Selon la figure 7.56, le retrait interne des coulis au laitier est aussi supérieur au retrait interne de la référence, quel que soit la température. L'augmentation du retrait interne varie entre 5 et 27% dans les coulis avec 25% de laitier, puis entre 5 et 40% dans les coulis avec 50% de laitier. Comme on a déjà vu dans le chapitre qui traite les degrés d'hydratation, le laitier commence à

réagir, en grande partie, à partir de 7 jours d'hydratation. Donc, le rapport E/L est plus élevé que 0,30 dans les coulis au laitier, ce qui rend plus d'eau disponible à l'hydratation du ciment. Selon ESCALANTE et coll., [2001], le laitier augmente la réactivité du ciment. Dans notre cas, la quantité de laitier ayant réagi à 7 jours pourrait être importante car la finesse du laitier est supérieure à la finesse du ciment de Type 10 ($610 \text{ m}^2/\text{kg}$ vs. $410 \text{ m}^2/\text{kg}$). De plus, le ciment Portland est un activateur du laitier, ce qui favorise la formation d'hydrates supplémentaires. On pourrait donc croire que les degrés d'hydratation des coulis au laitier devraient être plus importants que ceux des références étant donné que les retraits internes se comportent à cette façon. Nous ne pouvons malheureusement pas relier l'augmentation du retrait interne des coulis au laitier à leurs degrés d'hydratation. Par contre, les degrés d'hydratation des coulis avec laitier sont constamment les plus faibles (Figures 5.20 et 5.21). Selon Breugel et coll. [2006] plus la teneur en laitier augmente, plus le degré d'hydratation du ciment Portland augmente et plus le degré d'hydratation du liant diminue. Entre autre, Breugel a testé des coulis avec 50% de laitier ayant des rapports E/L de 0,40 et de 0,50. Il a déterminé les degrés d'hydratation de chaque composante du liant après un jour d'hydratation en utilisant l'analyse d'images obtenues par les électrons retrodiffusés (BSE). À partir de ces résultats, nous avons calculé, pour un coulis de rapport 0,45, des degrés d'hydratation de 52% pour le ciment, de 11% pour le laitier et de 32% pour le liant. Selon la figure 5.18, le degré d'hydratation du coulis de référence ayant le même rapport E/L varie de 54 à 63% après 7 jours d'hydratation. Après 7 jours, le degré d'hydratation du ciment dans le liant composé pourrait facilement être égal ou même supérieur au degré d'hydratation du ciment tout seul. L'échantillon de pâte fabriqué avec liant composé pourrait donc aspirer plus d'air que l'échantillon de référence. Étant donné que les volumes de tous les coulis sont semblables (environ 800 ml), les coulis au laitier peuvent avoir un retrait interne supérieur au celui des coulis de référence. Cette explication pourrait s'appliquer aux coulis avec 25% de laitier dont les retraits internes sont plus faibles que les retraits internes des coulis avec 50% de laitier, tandis que les résultats sont inverses au niveau du degré d'hydratation.

Les retraits internes des coulis avec fumée de silice sont les plus faibles (Figure 7.56). La fumée de silice réagit rapidement, ce qui permet de conclure que sa réactivité n'influence pas significativement le rapport E/L réel pendant les premiers 7 jours. Ces degrés d'hydratations sont plus faibles que les degrés d'hydratation des coulis de référence. Cette diminution est de

2% quand la température d'essai est de 10 et de 20°C. Elle est de 9% quand la température monte à 30°C. Le retrait interne devrait donc être plus faible en présence de la fumée de silice. Cependant, la diminution que nous avons observée est beaucoup plus importante. Elle est située entre 20 et 40%. Une telle diminution du retrait interne pourrait être attribuée à l'imperméabilisation des coulis de faible rapport E/L fabriqué avec fumée de silice. Dans le cas de ce type de liant, nous pouvons faire confiance aux degrés d'hydratation déterminés par la perte au feu parce que la réaction pouzzolanique consomme de l'eau. Cette réaction est présentée à la partie 7.2 de ce chapitre.

L'influence du type de liant sur le retrait interne exprimé en ml/100 g de liant (Figure 7.57) est très semblable à celle observée avec le retrait interne exprimé en pourcentage du volume initial. Les conclusions tirées précédemment sont donc encore valables.

La figure 7.58 présente l'effet du type de liant sur le retrait intrinsèque interne des coulis de rapport 0,30. On remarque que les coulis de référence et les coulis avec cendre volante possèdent les mêmes retraits intrinsèques qui sont situés entre 4,1 et 4,4 ml/100 g de liant hydraté. Ce comportement confirme notre constatation de la très faible réactivité des cendres volantes de classe F pendant les premiers 7 jours d'hydratation. Selon nos résultats, c'est uniquement le ciment qui s'hydrate pendant cette période. Le retrait intrinsèque des coulis au laitier est supérieur à celui des coulis de référence. Dans le cas des essais réalisés à 10°C, l'augmentation du retrait intrinsèque est égale à 40% pour le liant avec 25% de laitier. Cette augmentation est de 70% quand le dosage du laitier augmente à 50%. Dans le cas des essais réalisés à 20 et à 30°C, le retrait augmente de 30% et de 43% comparativement à celui de la référence. Nous pensons que, en réalité, l'augmentation du retrait intrinsèque avec 50% de laitier devrait être d'environ 70%, quelle que soit la température. L'effet de l'imperméabilisation de la pâte sur la mesure du retrait interne est donc responsable de cet écart qui est d'ailleurs observé avec les coulis contenant de la fumée de silice. Le retrait intrinsèque des coulis avec fumée de silice est plus faible que celui de la référence. Cette diminution est de 17% à 10°C et de 33% à 30°C.

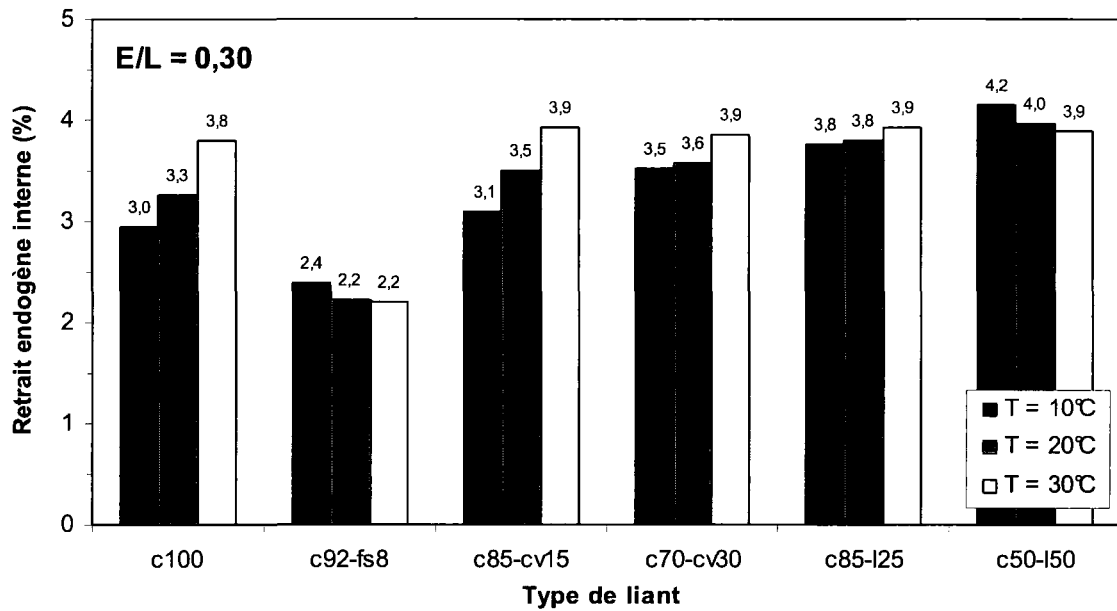


Figure 7. 56 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L = 0,30 exprimé en pourcentage du volume initial

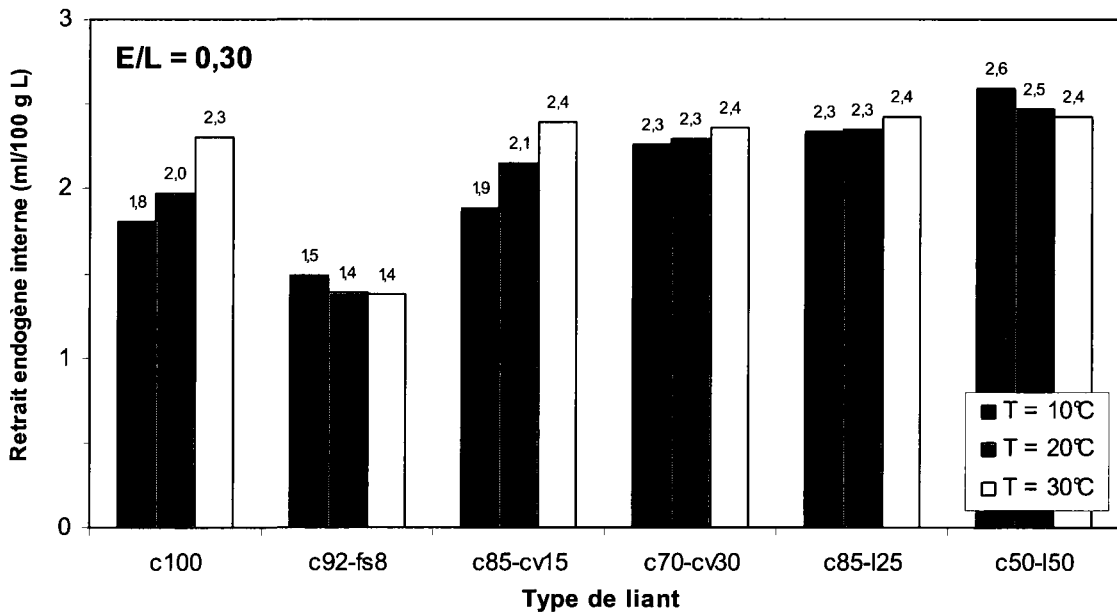


Figure 7. 57 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L = 0,30 exprimé en ml/100 g de liant

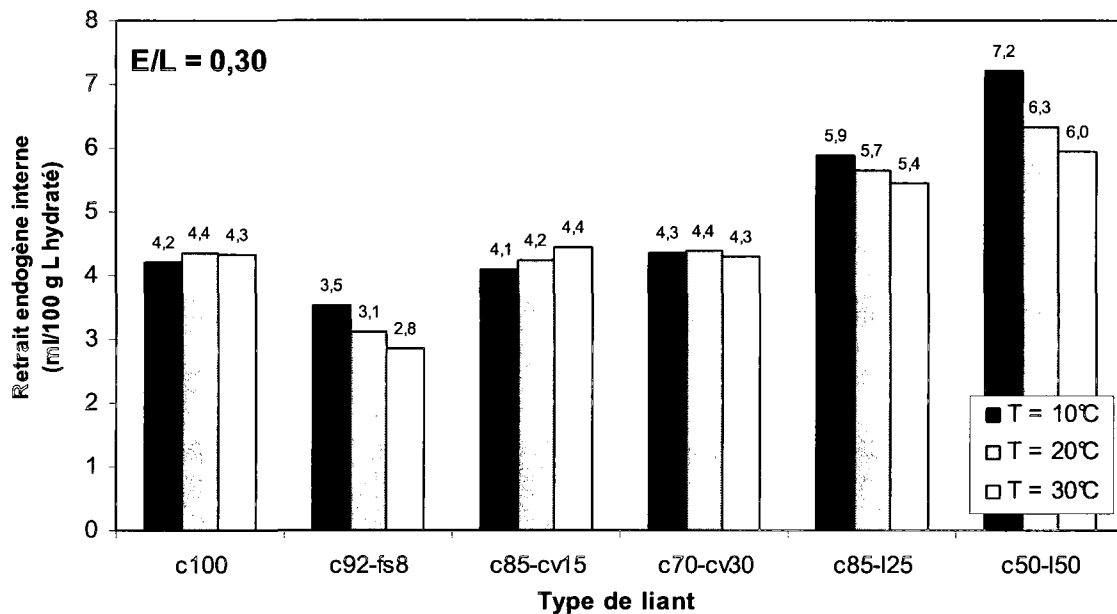


Figure 7. 58 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L = 0,30 exprimé en ml/100 g de liant hydraté (retrait intrinsèque interne)

La figure 7.59 présente le retrait interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 testés à trois températures. Le retrait interne est exprimé en pourcentage du volume initial sur cette figure. On remarque que le retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante est supérieur à celui de la référence, quelle que soit la température. Cette augmentation ne dépasse pas 7%. Ce comportement a été aussi observé avec les coulis de rapport E/L égal à 0,30. Comme on l'a déjà mentionné, il est dû à une faible réactivité de la cendre volante pendant les premiers 7 jours, ce qui augmente le rapport E/L réel de 0,35 à environ 0,41 et favorise l'hydratation supplémentaire du ciment Portland. Il est de même pour les coulis avec 30% de cendre volante. Cependant leur retrait interne ne dépasse pas celui de la référence car ces coulis ont un surplus d'eau dans la porosité capillaire (le rapport E/L réel monte à 0,50). Les coulis au laitier possèdent un retrait interne plus élevé que celui de la référence. Dans les coulis avec 25% de laitier, l'augmentation du retrait interne est d'environ 20% à 10°C, puis monte à environ 30% à 20°C. Elle n'est que 13% quand l'essai est réalisé à 30°C. Quand le dosage du laitier est de 50% l'augmentation du retrait interne est d'environ 30% à 10°C puis tombe à 4% à 30°C. Les raisons pour lesquelles les coulis au laitier ont des retraits internes supérieurs aux ceux des

coulis de référence ont été déjà expliquées pendant la discussion des résultats des coulis de rapport 0,30. La fumée de silice produit encore une fois des coulis de plus faible retrait interne exprimé en pourcentage du volume initial. Dans le cas du liant avec fumée de silice, nous observons encore l'effet d'imperméabilisation de la pâte.

L'influence du type de liant sur le retrait interne exprimé en ml/100 g de liant total (Figure 7.60) est semblable à celle observée avec le retrait interne exprimé en pourcentage du volume initial. Les conclusions précédemment tirées sont donc encore valables.

La figure 7.61 présente le retrait intrinsèque interne des coulis ayant le rapport E/L de 0,35. On remarque que le coulis de référence et le coulis avec 15% de cendre volante développent pratiquement les mêmes retrait intrinsèques (5,1 à 5,6 ml/100 g de liant hydraté). Le retrait du coulis avec 30% de cendre volante diminue à 4,8 ml/100 g de liant hydraté probablement à cause d'un surplus d'eau dans la porosité capillaire. À 10 C, le coulis avec fumée de silice a le même retrait intrinsèque que la référence mais le retrait chute considérablement quand la température augmente à 30°C. Le liant avec 25% de laitier permet d'obtenir un retrait intrinsèque moyen de 7,2 ml/100 g de liant hydraté, ce qui présente une augmentation de 35% par rapport au retrait de la référence. L'augmentation du retrait intrinsèque des coulis avec 50% de laitier varie avec la température à cause de son imperméabilisation aux températures élevées. L'augmentation du retrait est donc de 67% à 10°C et de 37% à deux autres températures.

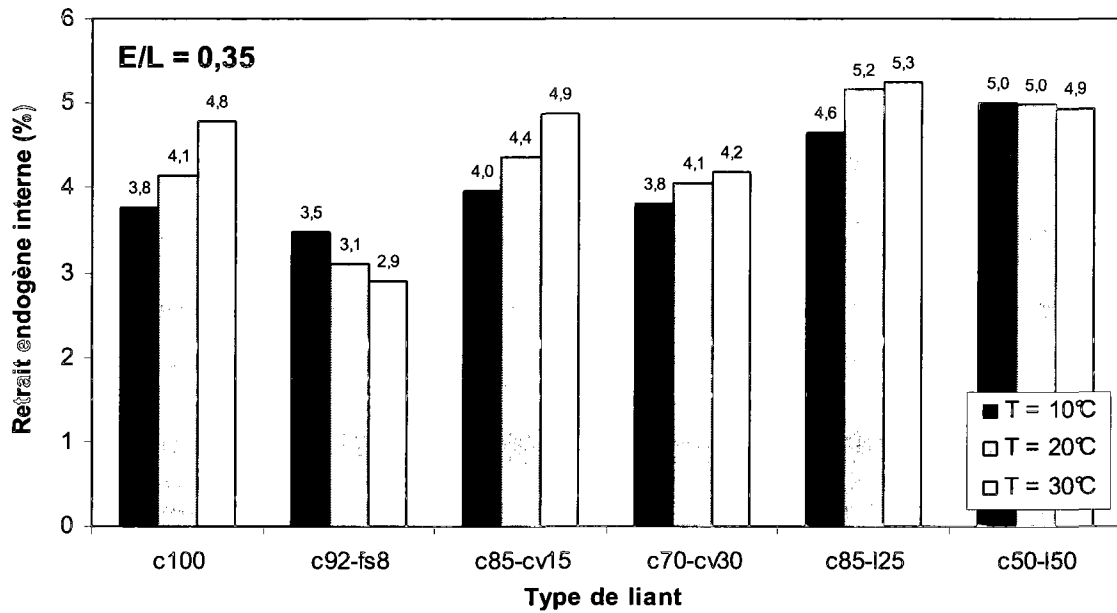


Figure 7. 59 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 exprimé en pourcentage du volume initial

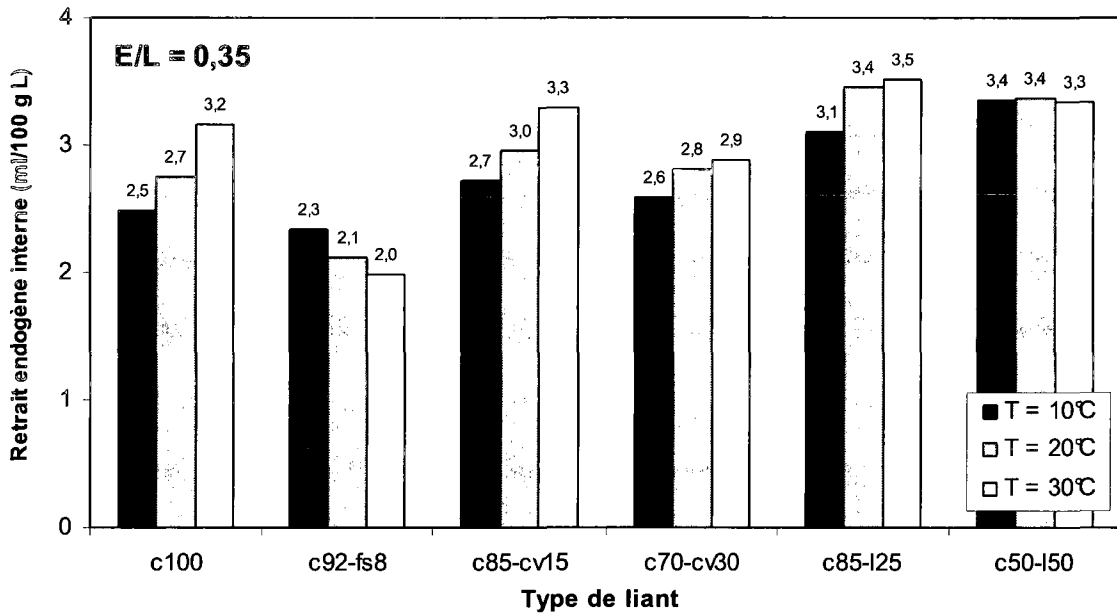


Figure 7. 60 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 exprimé en ml/100 g de liant

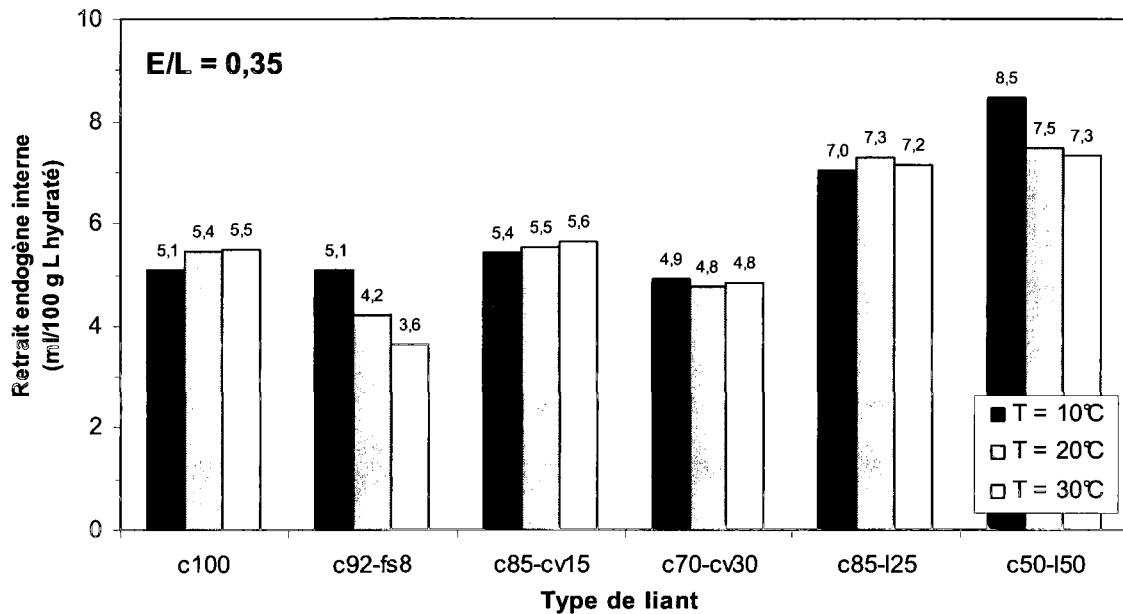


Figure 7. 61 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal à 0,35 exprimé en ml/100 g de liant hydraté (retrait intrinsèque interne)

Quand le rapport E/L augmente à 0,45 (Figure 7.62) le retrait endogène interne diminue avec l'ajout de la cendre volante. Cette diminution, par rapport au retrait de la référence, varie de 17 à 20% quand la teneur en cendre est de 15%. Quand la quantité de cendre volante augmente à 30% la diminution du retrait est de 23 à 28%. Étant donné que la réactivité de la cendre volante pendant les premiers 7 jours est très faible, les rapports E/L réels montent à environ 0,53 pour 15% de cendre et à environ 0,64 pour 30% de cendre. Le retrait interne des coulis avec 25% de laitier est encore une fois supérieur au retrait de la référence pour raisons que l'on vient de mentionner dans les paragraphes précédents. Quand la teneur en laitier augmente à 50% les retraits internes développés à 20 et à 30°C deviennent inférieurs aux ceux de la référence pour 10 et 17%. Ce comportement est probablement dû à une importante augmentation du rapport E/C qui monte à 0,90.

Selon la figure 7.64 le retrait intrinsèque interne des coulis avec cendre volante est plus faible que celui de la référence. De plus il diminue quand la teneur en cendre augmente. La diminution du retrait est de 13% pour le liant avec 15% de cendre volante et de 25% pour le liant avec 30% de cendre. Le retrait intrinsèque des coulis avec fumée de silice est aussi plus

faible que celui de la référence. À 10°C, la diminution du retrait est de 17%. Elle devient plus importante par la suite probablement à cause de sous-estimation du retrait interne dans ce type de coulis. Le liant au laitier produit des retraits internes supérieurs à ceux de la référence. Cette augmentation est de 20% pour le liant avec 25% de laitier. Dans les coulis avec 50% de laitier l'augmentation du retrait dépend de la température à cause de sous-estimation du retrait interne. Elle est de 37% à 10°C puis disparaît complètement à 30°C.

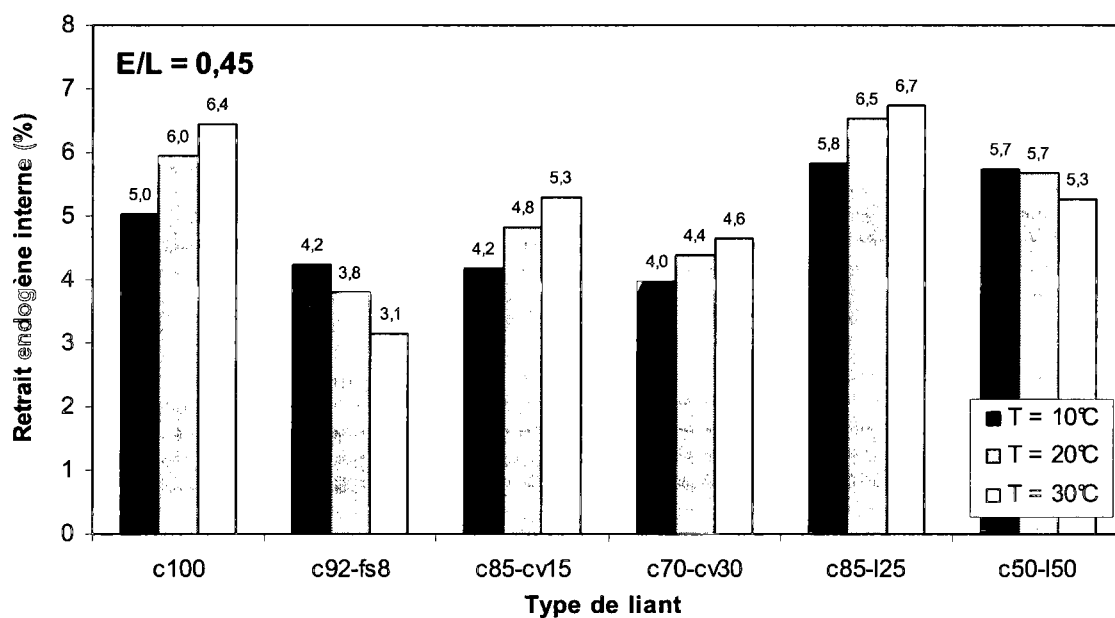


Figure 7. 62 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal 0,45 exprimé en pourcentage du volume initial

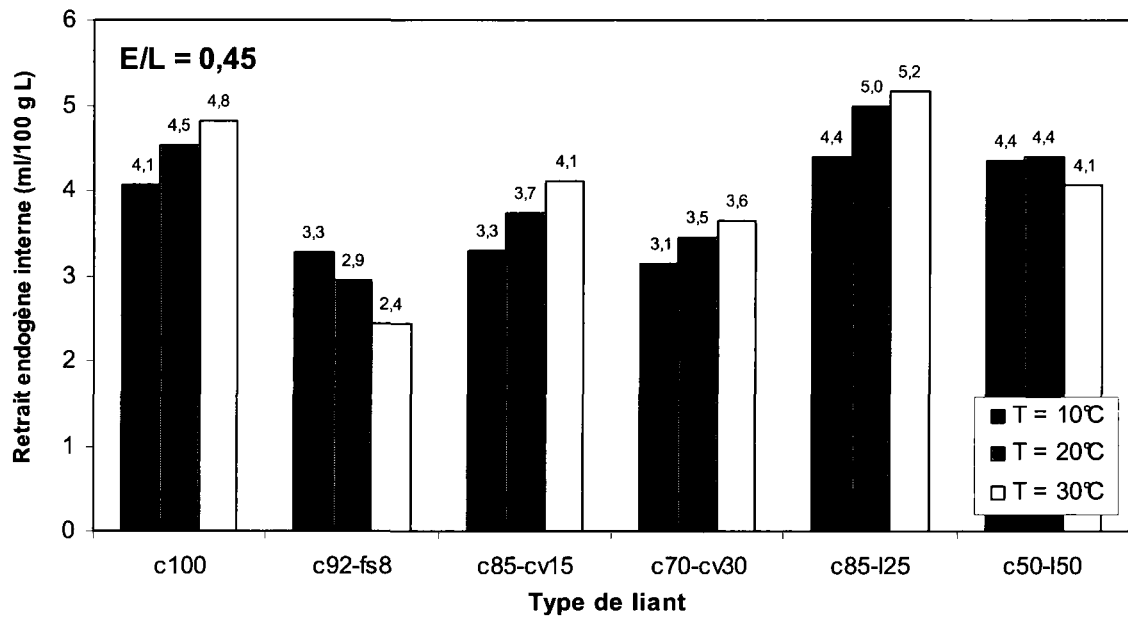


Figure 7. 63 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal 0,45 exprimé en ml/100 g de liant

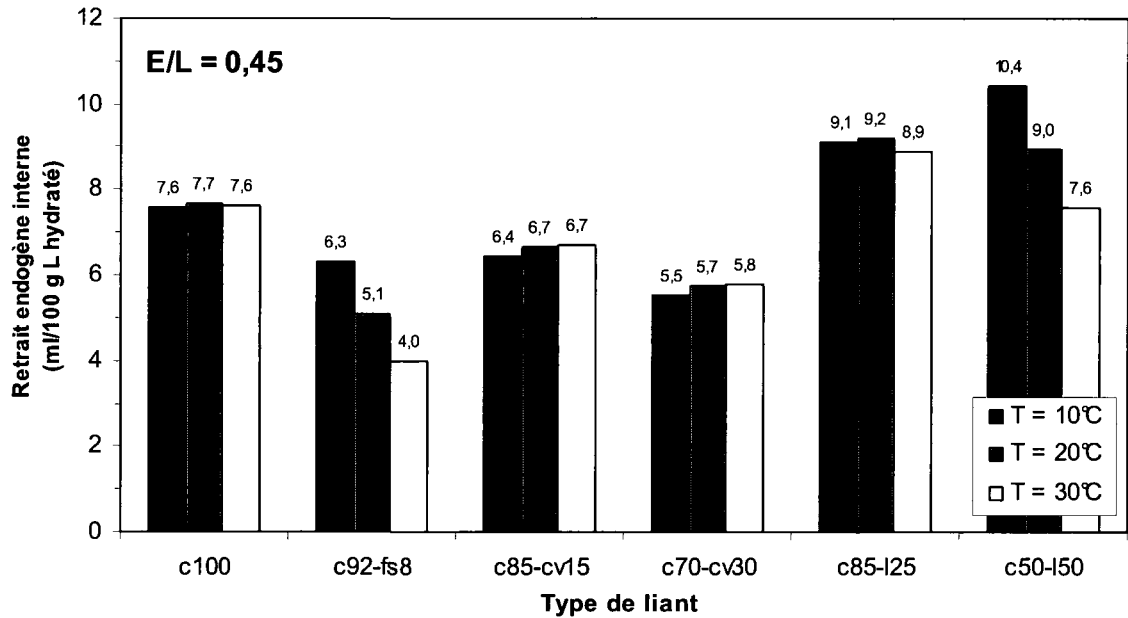


Figure 7. 64 – Retrait endogène interne des coulis de rapport E/L égal 0,45 exprimé en ml/100 g L hydraté (retrait intrinsèque interne)

7.10.4 Effet de l'âge du coulis sur le retrait endogène interne

Les mesures du retrait interne pendant 7 et 14 jours permettent de voir quel est l'effet de l'âge du coulis sur son retrait endogène interne. Cette étude est uniquement réalisée à 20°C et les résultats sont présentés aux figures 7.65 à 7.70. Dans les coulis de référence (Figure 7.65), le retrait interne augmente avec l'âge du coulis, quel que soit le rapport E/L. Cette augmentation est la plus importante avec les coulis de rapport 0,45 et égale à 10% quand le retrait interne est exprimé en pourcentage du volume initial. Ces résultats concordent bien avec les résultats du degré d'hydratation qui augmente lui aussi entre 7 et 14 jours. Le retrait intrinsèque des coulis de référence augmente très légèrement entre 7 et 14 jours. Nous avons considéré que cette augmentation est négligeable car elle ne dépasse pas 5% et pourrait être considérée comme une variabilité des résultats. Nous pouvons donc conclure que les retraits intrinsèques internes après 7 et 14 jours sont égaux pour un même rapport E/L.

Le retrait interne des coulis avec fumée de silice est présenté à la figure 7.66. On observe une légère augmentation du retrait interne entre 7 et 14 jours quand il est exprimé en pourcentage du volume initial. Cette augmentation ne dépasse pas 5%. L'augmentation du retrait interne et du degré d'hydratation de ce type de coulis entre 7 et 14 jours est la plus faible. Cela laisse croire que ces coulis possèdent une maturité élevée après 7 jours d'hydratation. Le retrait intrinsèque interne ne varie pas avec l'âge du coulis pour un même rapport E/L. Après 14 jours d'hydratation, nous n'avons pas observé une diminution du retrait intrinsèque due à l'imperméabilisation de la pâte. Les quantités d'air aspiré entre 7 et 14 jours étaient faibles ainsi que l'augmentation du degré d'hydratation (Figure 5.29). Les travaux de Meddah et Tagnit-Hamou [2006] laissent croire que l'imperméabilité de la pâte demeure stable pendant cette période. Ces chercheurs ont trouvé que la plus grande partie du raffinement des pores dans un béton de rapport E/L égal à 0,35, fabriqué avec 8% de fumée de silice, se produit pendant les premiers 3 jours.

Les figures 7.67 et 7.68 présentent les retraits internes des coulis au laitier après 7 et 14 jours d'hydratation. Les retraits internes augmentent avec l'âge du coulis, quel que soit le rapport E/L ou la teneur en laitier. La plus grande augmentation du retrait interne (14%) a été observé avec le coulis de rapport 0,45 ayant 50% de laitier. Le retrait intrinsèque est constant pour un même rapport E/L. Dans le cas des coulis avec 50% de laitier nous n'avons pas observé une

diminution du retrait due à l'imperméabilisation de la pâte. Il est possible que l'imperméabilité des échantillons reste stable entre 7 et 14 jours comme avec coulis contenant de la fumée de silice.

Comme dans tous les cas précédents, le retrait interne des coulis avec cendre volante augmente entre 7 et 14 jours (Figures 7.69 et 7.70). La plus grande augmentation (13%) est obtenue avec coulis de rapport 0,45 qui a 15 % de cendre volante. Le retrait intrinsèque des coulis avec 15% de cendre augmente légèrement entre 7 et 14 jours. Cette augmentation est inférieure à 5% et pourrait être considéré comme une variation des mesures. Dans les coulis de rapport E/L de 0,30 et 0,35, les retraits intrinsèques sont stables. Cependant quand le rapport E/L augmente à 0,45, le retrait intrinsèque augmente de 7% entre 7 et 14 jours.

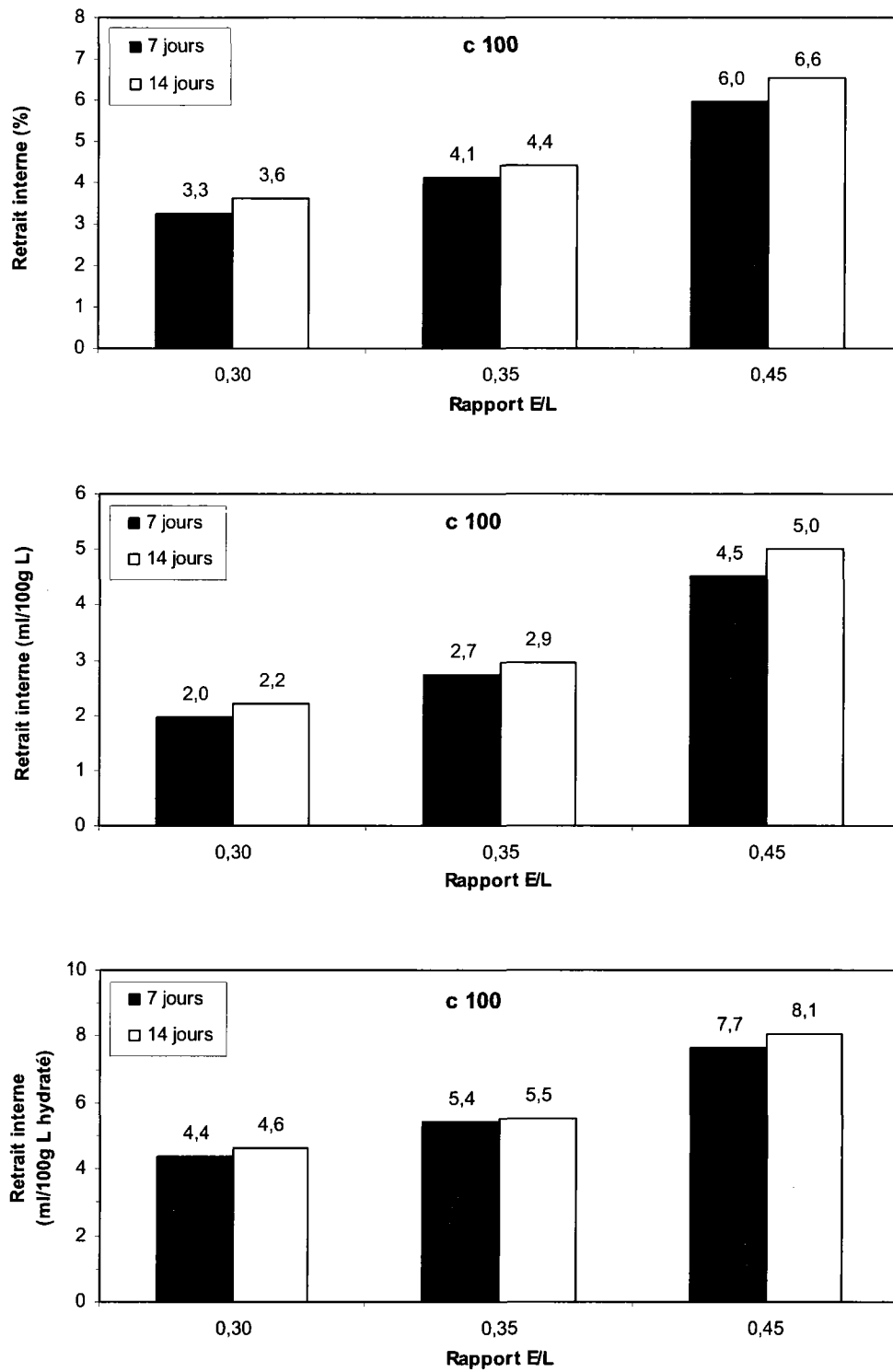


Figure 7. 65 – Retrait interne des coulis de référence après 7 et 14 jours d’hydratation

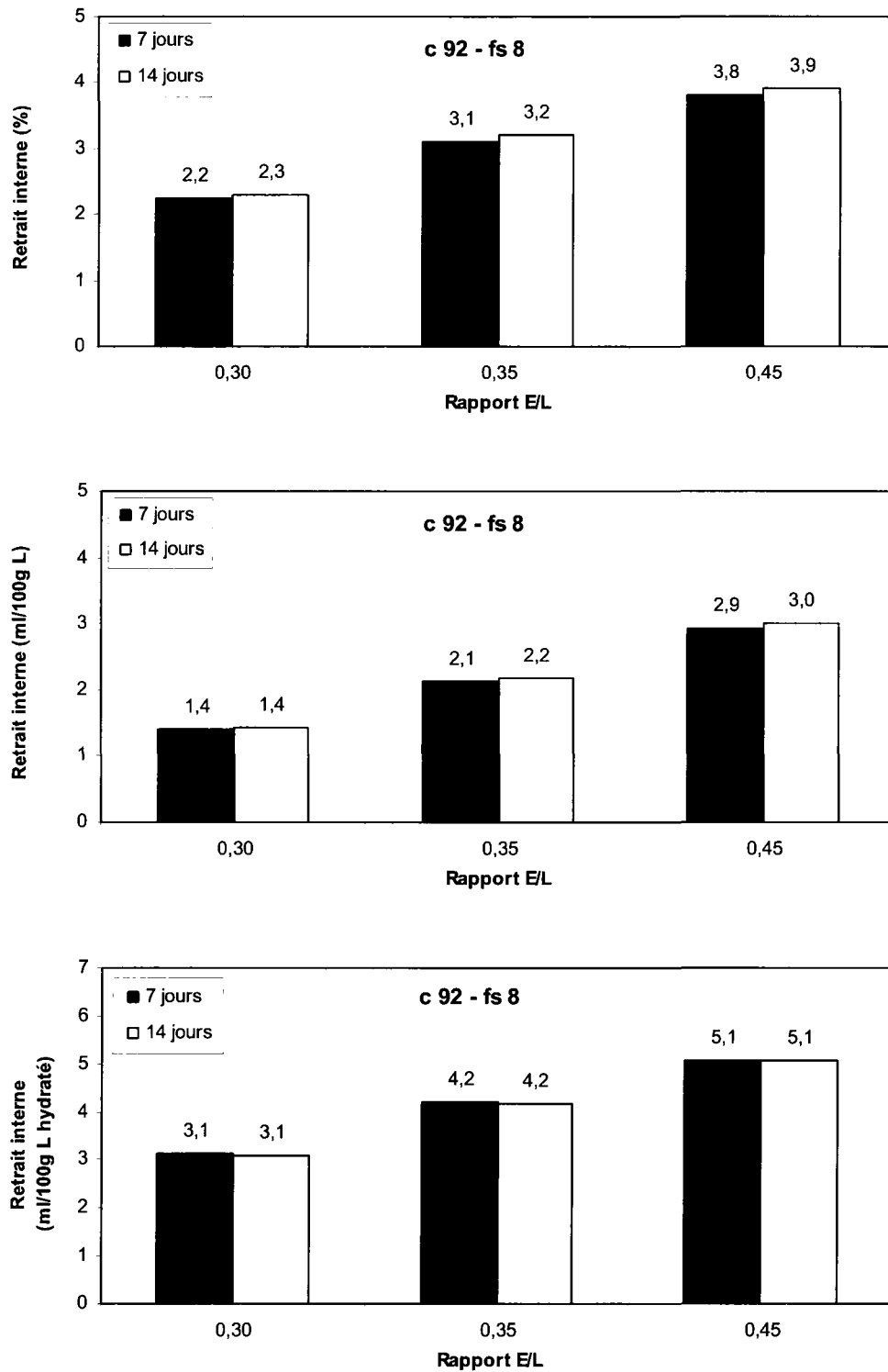


Figure 7. 66 – Retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice après 7 et 14 jours

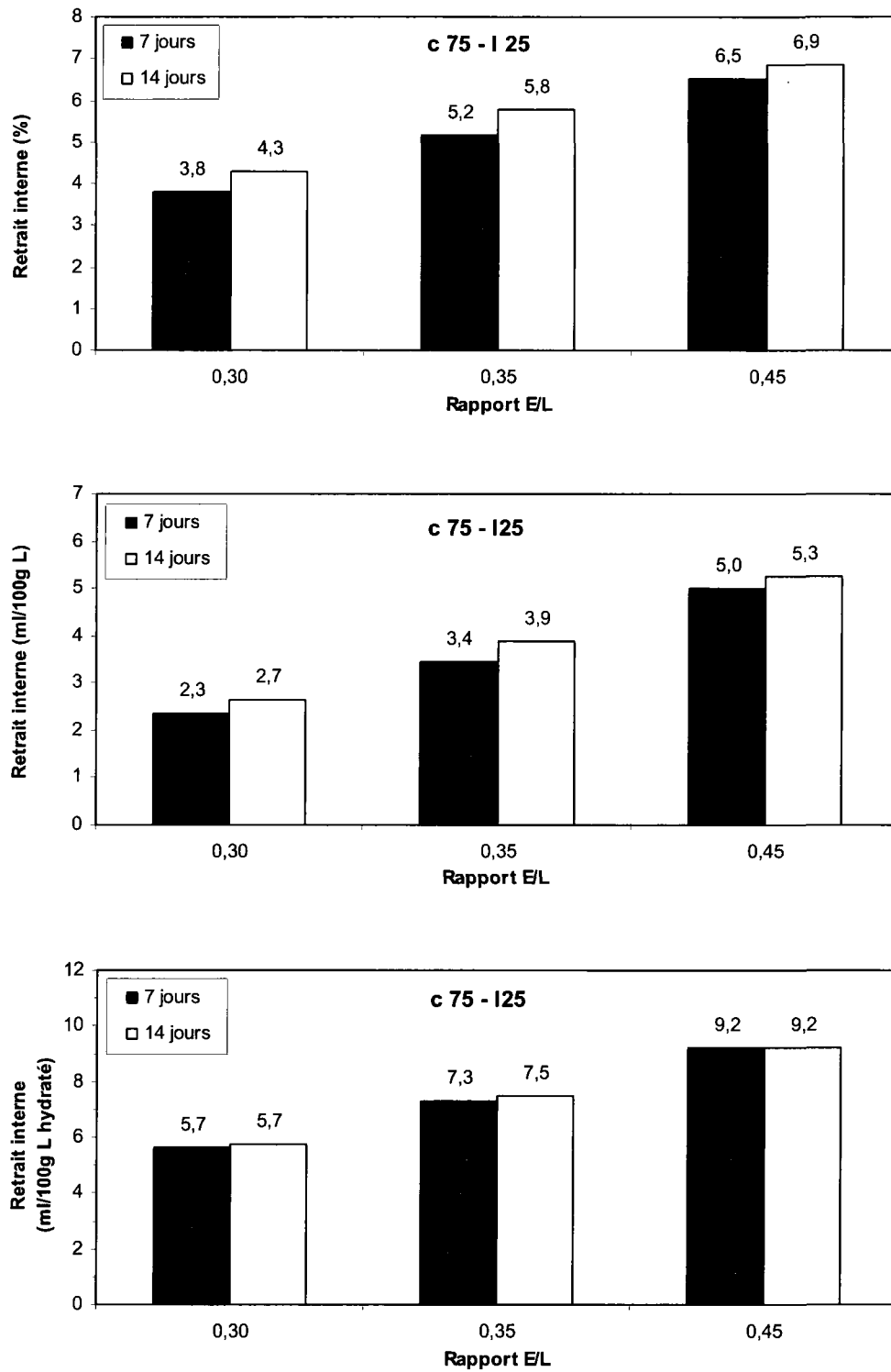


Figure 7. 67 – Retrait interne des coulis avec 25% de laitier après 7 et 14 jours

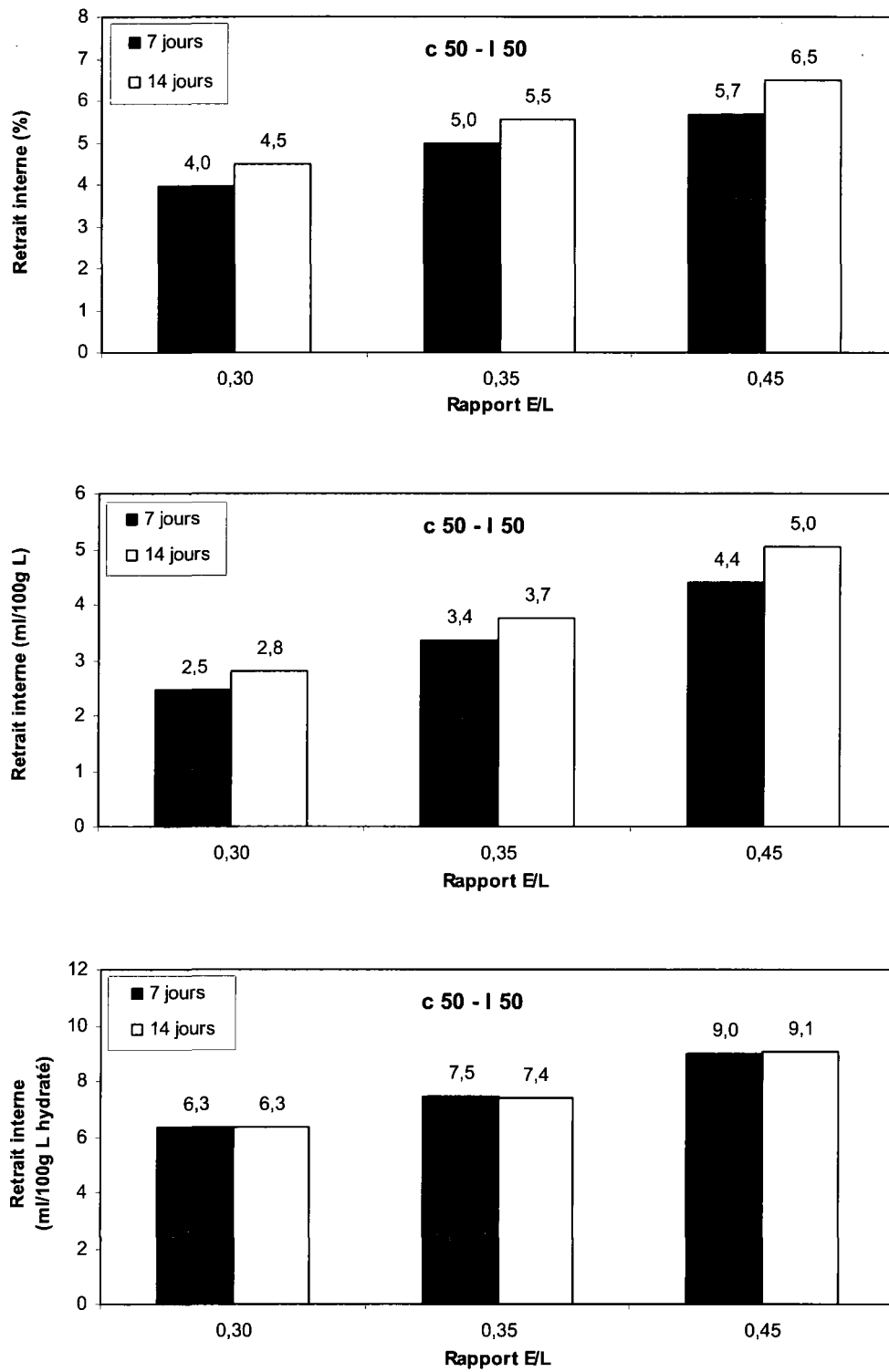


Figure 7. 68 – Retrait interne des coulis avec 50% de laitier après 7 et 14 jours

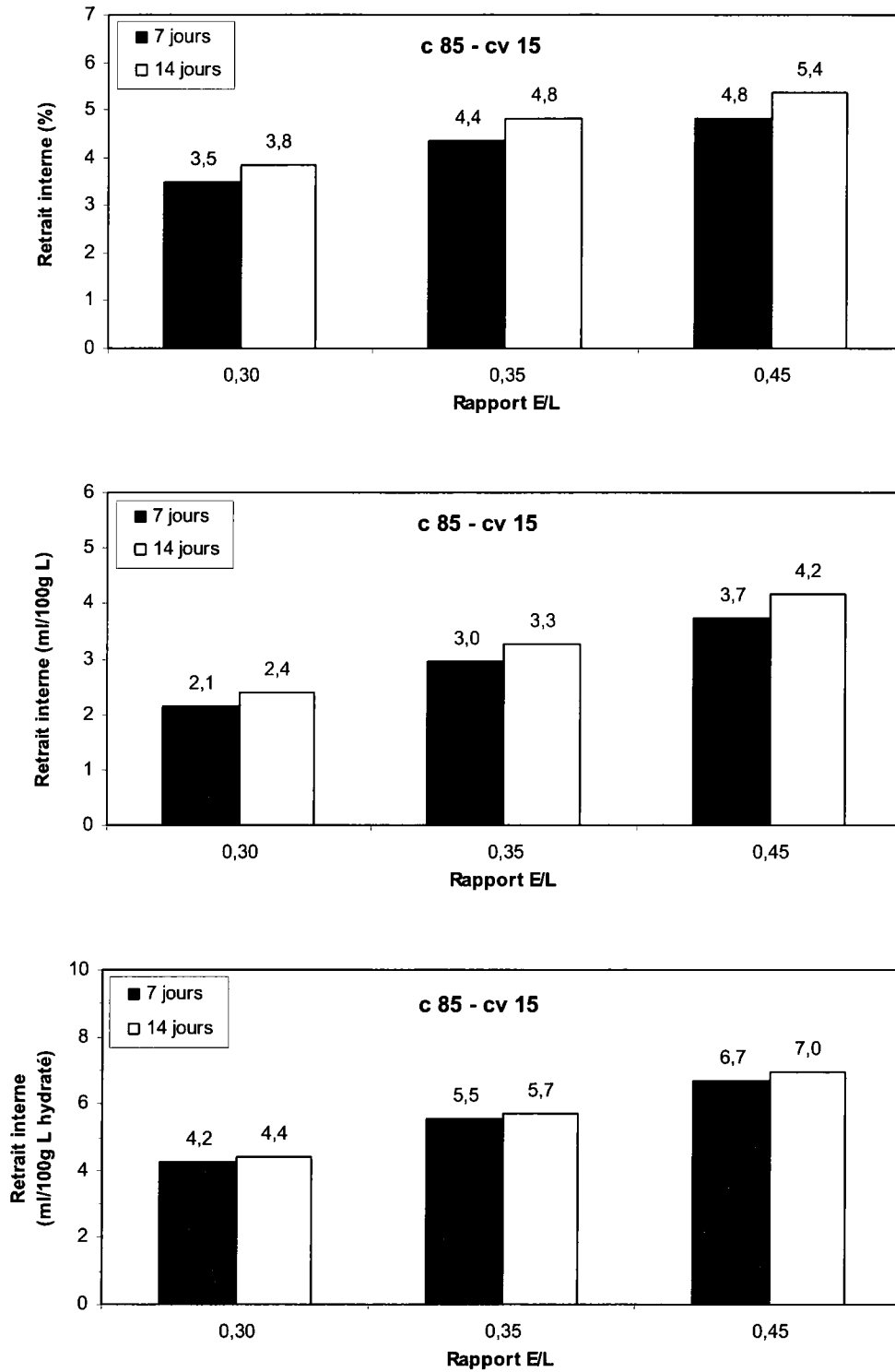


Figure 7. 69 – Retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante après 7 et 14 jours

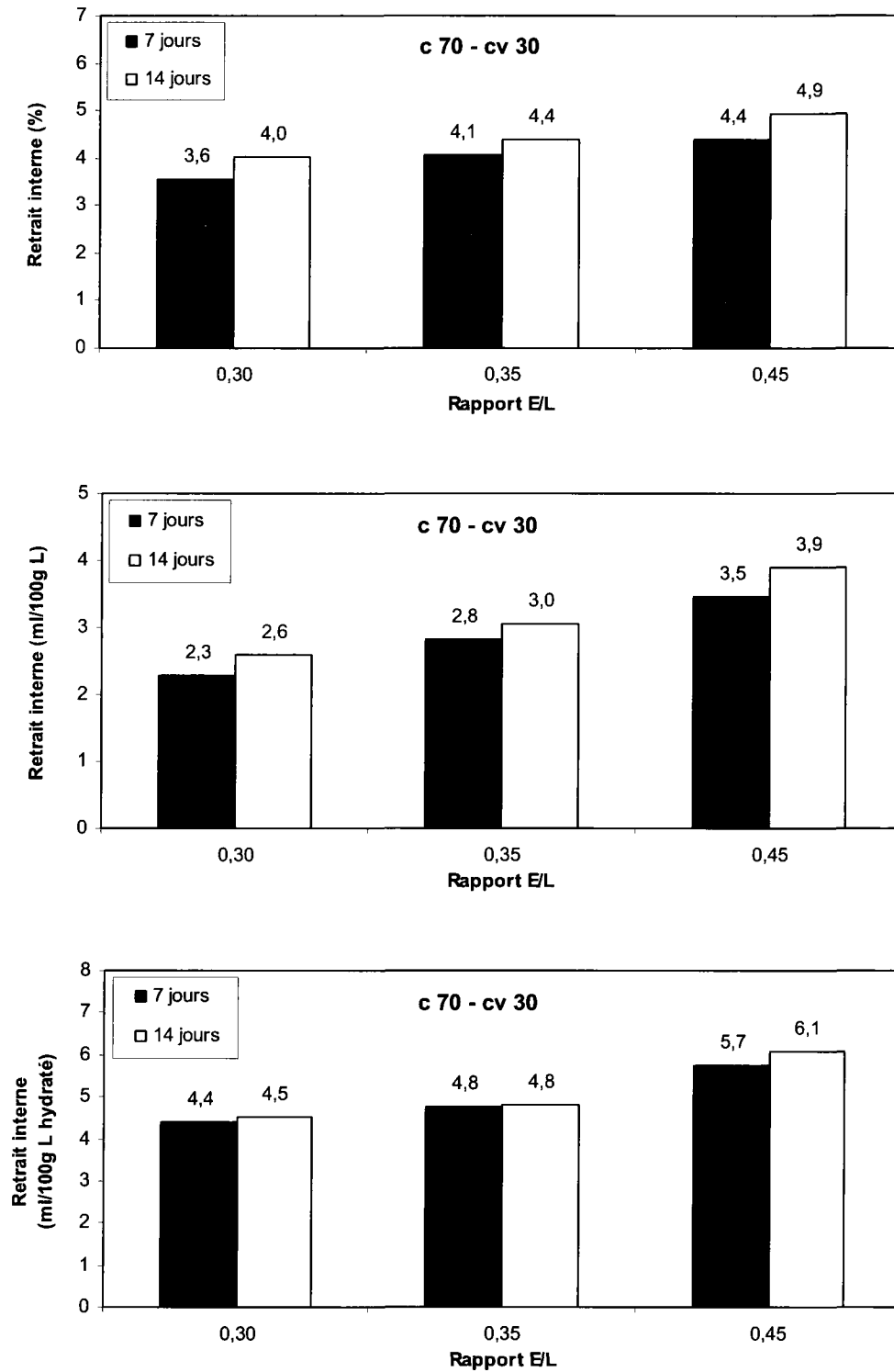


Figure 7. 70 – Retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante après 7 et 14 jours

Les résultats présentés aux figures 7.66 à 7.70 démontrent aussi que le retrait interne à 14 jours, exprimé en pourcentage du volume initial, augmente graduellement avec l'augmentation du rapport E/L, quel que soit le type de liant. Selon sa définition, le retrait intrinsèque interne ne dépend pas de la maturité de la matrice cimentaire. Nos résultats confirment cette définition car les retraits intrinsèques sont pratiquement égaux après 7 et après 14 jours d'hydratation. Les retraits intrinsèques à 14 jours tendent à diminuer lorsque le rapport E/L diminue, quel que soit le type de liant. Une sous-estimation du retrait interne due à la faible perméabilité des pâtes à faible rapport E/L, est aussi observée à 14 jours.

7.10.5 Effet du type de liant sur le retrait interne à 14 jours

Les mesures de retrait endogène pendant 14 jours ont été réalisées à 20°C. Il est donc possible d'étudier l'effet du type de liant sur le retrait interne à 14 jours. Les résultats sont présentés aux figures 7.71 à 7.73.

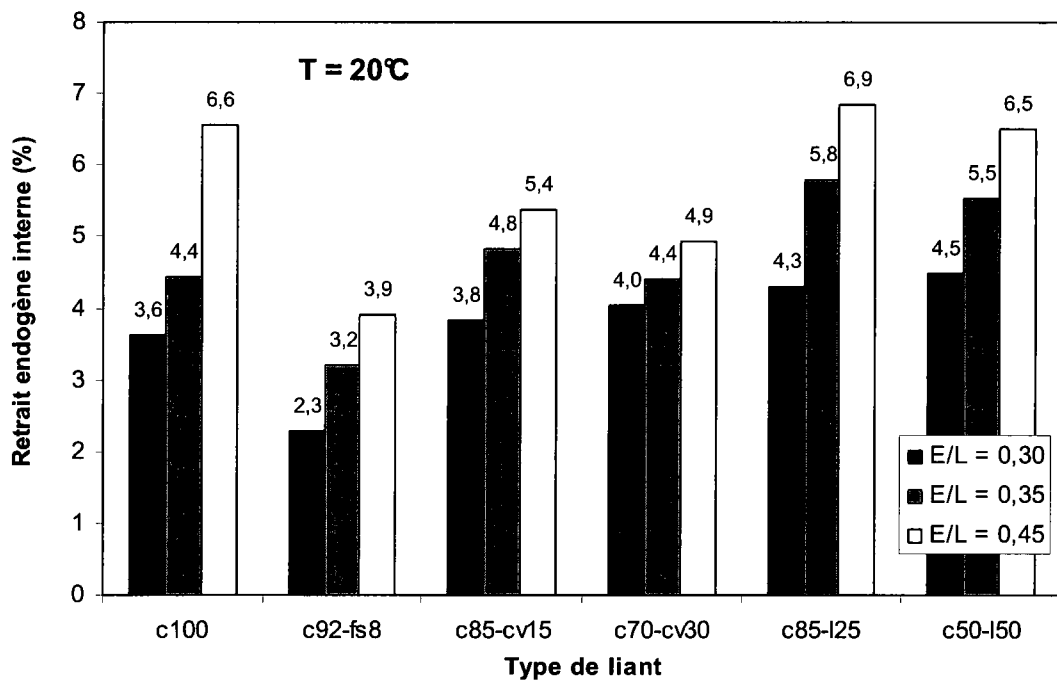


Figure 7. 71 – Retrait endogène interne des coulis à 14 jours exprimé en pourcentage du volume initial

La figure 7.71 présente les retraits internes à 14 jours exprimés en pourcentage du volume initial. Dans le cas des coulis de rapport E/L égal à 0,30, l'influence du type de liant sur le retrait interne à 14 jours est semblable à celle observée après 7 jours. Le coulis avec fumée de silice possède le retrait interne de 36% plus faible que la référence. Les retraits internes des coulis au laitier et à la cendre volante sont plus élevés que celui de la référence. L'augmentation est légère (6%) pour les coulis avec 15% de cendre volante, puis augmente à 11% pour les coulis avec 30% de cendre. Dans les coulis au laitier, l'augmentation du retrait interne est de 19% pour 25% de laitier et de 25% pour 50% de laitier. La discussion des résultats obtenus après 7 jours d'hydratation est applicable aux résultats obtenus après 14 jours.

Pour les coulis de rapport E/L égal à 0,35, l'augmentation du retrait interne par rapport à la référence perd en intensité dans le cas des plus fortes teneurs en cendre volante et en laitier. Le retrait interne obtenu avec la fumée de silice demeure la plus faible. Quand le rapport E/L augmente à 0,45, le liant avec 25 % de laitier est le seul qui produit un retrait interne supérieur au retrait de la référence.

La figure 7.73 présente les retraits intrinsèques des coulis après 14 jours d'hydratation. Dans le cas du rapport 0,30, le retrait des coulis avec cendre volante est égal au retrait de la référence. Ce comportement est le signe d'une faible réactivité de la cendre volante même après 14 jours. À partir du rapport 0,35, le retrait des coulis contenant de la cendre volante commence à baisser. La diminution du retrait peut aller jusqu'à 25%. Le retrait intrinsèque des coulis au laitier est le plus élevé quel que soit le rapport E/L. Son augmentation par rapport au retrait du coulis de référence peut aller jusqu'à 37%. Une réactivité élevée du ciment Portland dans le liant au laitier combinée avec l'activation et l'hydratation du laitier permet d'obtenir un retrait intrinsèque interne aussi grand.

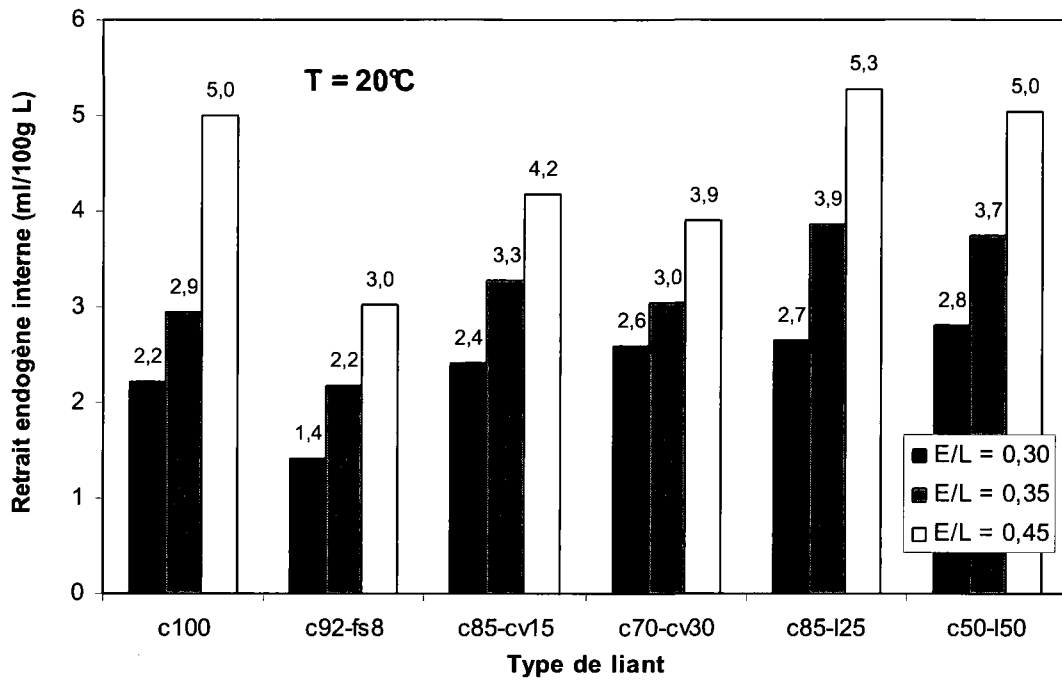


Figure 7. 72 – Retrait endogène interne des coulis à 14 jours exprimé en ml/100 g de liant

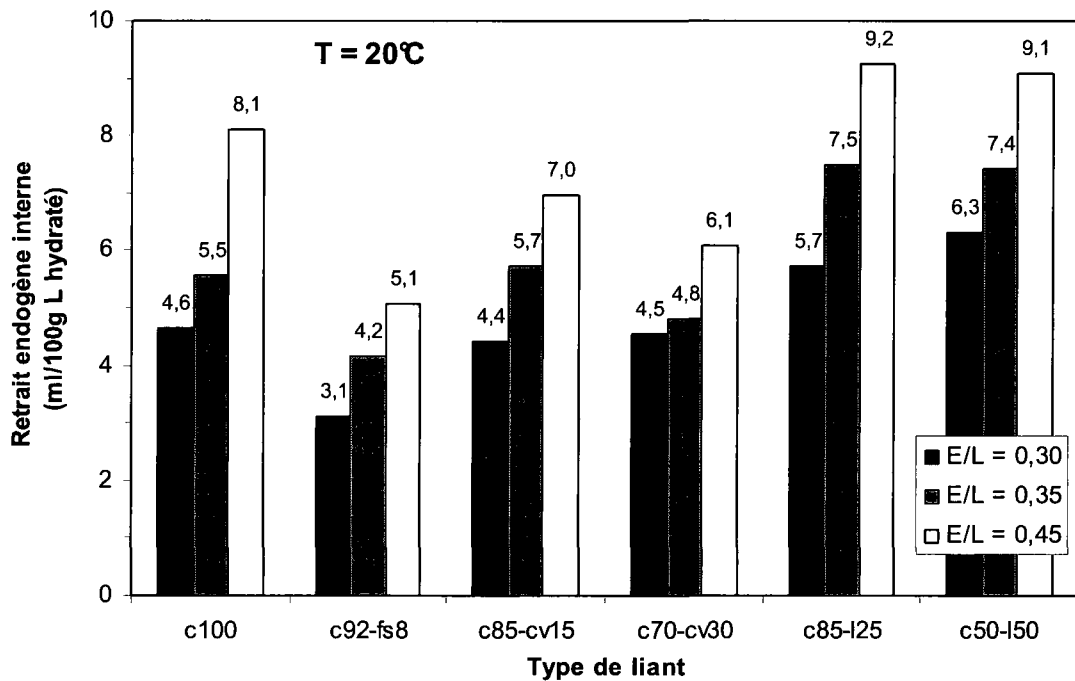


Figure 7. 73 – Retrait endogène interne des coulis à 14 jours exprimé en ml/100 g de liant hydraté (retrait intrinsèque interne)

7.11 Relation entre le retrait endogène interne et le degré d'hydratation des coulis

Comme on a déjà vu dans les paragraphes précédents le retrait endogène interne exprimé en pourcentage du volume initial est directement lié au degré d'hydratation de la matrice cimentaire.

Le retrait interne correspond au volume de vides gazeux formés dans la porosité capillaire lors de l'hydratation. Le volume de vides est aussi lié au degré d'hydratation du liant. Cependant il y a des cas où le retrait interne ne suit pas le degré d'hydratation. Ce comportement a été observé dans les coulis contenant 30% de cendre volante. Dans les coulis contenant 50% de laitier on a observé des faibles degrés d'hydratation accompagnés par les retraits internes élevés. Finalement une sous-estimation du retrait interne causé par la faible perméabilité des pâtes de faible rapport E/L produit un écart entre le degré d'hydratation et le retrait interne. Certains liants comme celui contenant de la fumée de silice peuvent produire les mêmes effets.

Les figures 7.74 à 7.79 présentent les relations entre les retraits internes et les degrés d'hydratation à 7 jours. L'étude couvre les rapports E/L égaux à 0,30, 0,35 et 0,45, puis les températures de 10, 20 et 30°C. Dans le cas des coulis de référence nous avons aussi inclus les coulis de rapport E/L égal à 0,40.

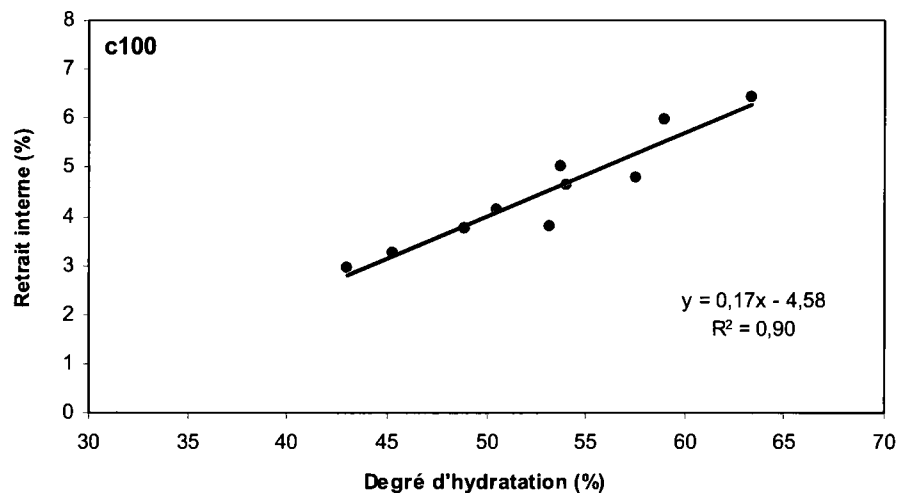


Figure 7. 74 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 7 jours des coulis de références (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

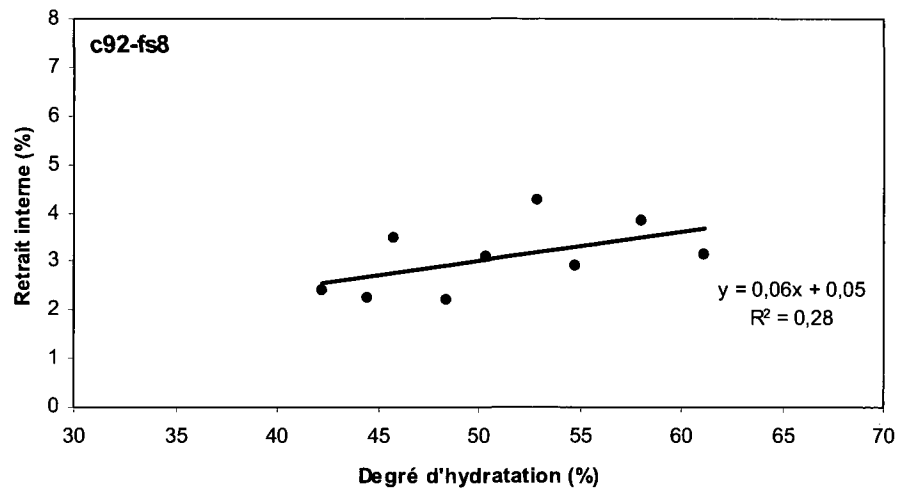


Figure 7. 75 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

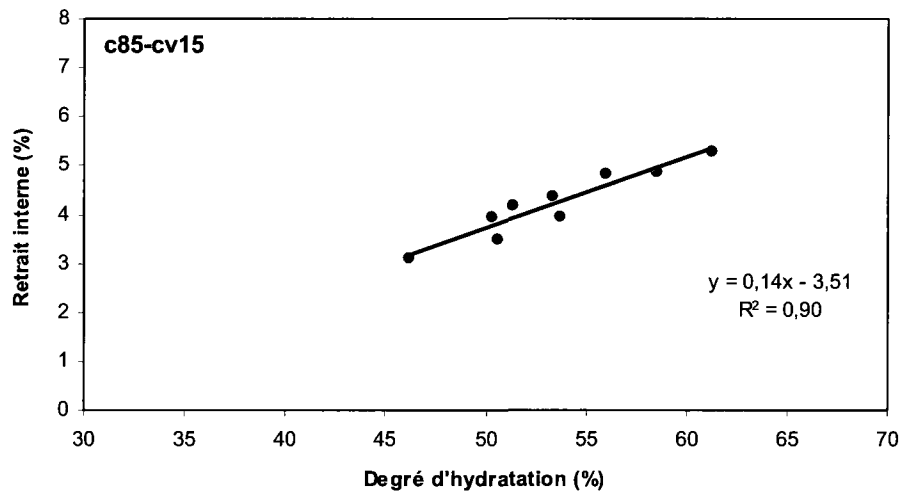


Figure 7. 76 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation des coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

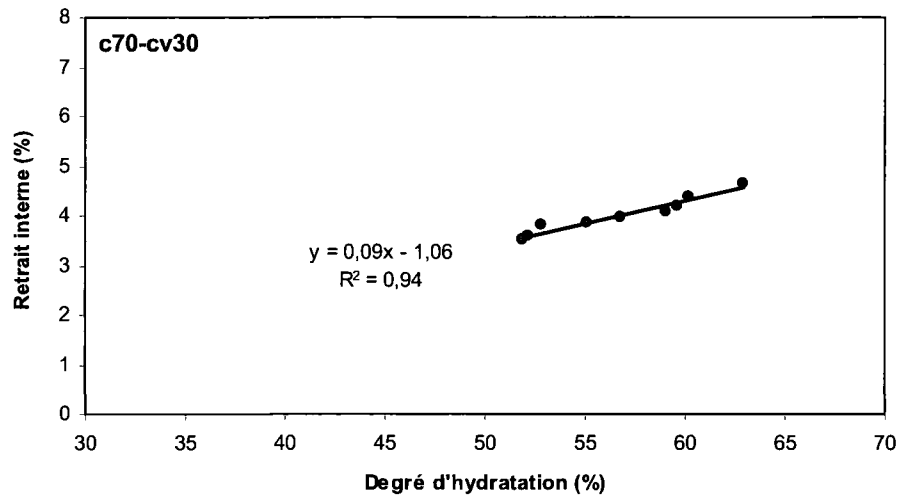


Figure 7.77 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation des coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

Les figures 7.74 à 7.79 démontrent qu'il y a de bonnes corrélations entre les retraits internes et les degrés d'hydratation et que cette corrélation dépend du type de liant. Dans le cas des coulis de référence et des coulis contenant 15% de cendre volante nous avons obtenu une régression linéaire avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,90$. Le coefficient de corrélation est de 0,91 pour les coulis qui contiennent 25% de laitier et de 0,94 pour les coulis avec 30% de cendre volante.

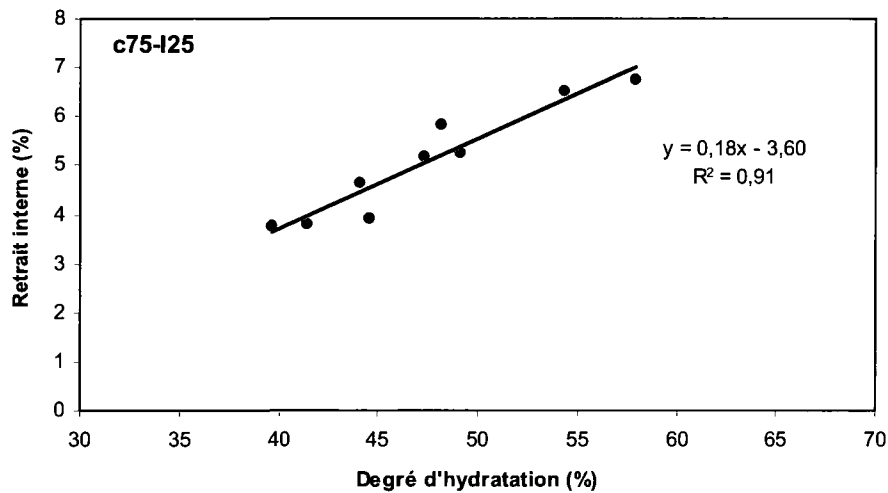


Figure 7.78 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation des coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

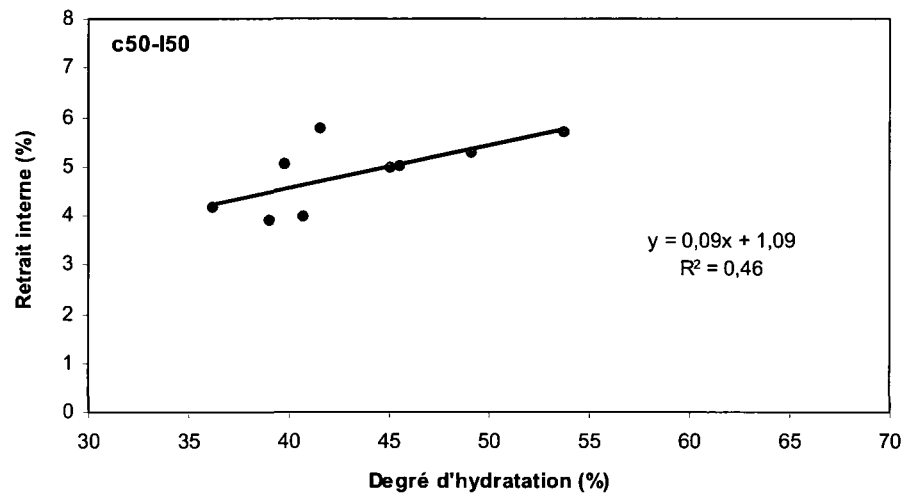


Figure 7. 79 – Relation entre le retrait interne et le degré d’hydratation des coulis avec 50% de laitier ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)

Nous n’avons pas trouvé de corrélation nette entre le retrait interne et le degré d’hydratation dans le cas des coulis contenant 8% de fumée de silice. L’absence de corrélation nette est selon nous due à la sous-estimation du retrait interne. L’absence de relation observée avec les coulis contenant 50% de laitier pourrait aussi être due à la sous-estimation du retrait interne mais aussi aux différences entre les degrés d’hydratation du ciment et du liant dans le ciment composé.

Les figures 7.80 à 7.85 présentent les relations entre le retrait interne et le degré d’hydratation des coulis après 14 jours d’hydratation. Les résultats obtenus à 20°C avec les coulis de rapport E/L de $0,30$ à $0,45$ ont été inclus dans cette étude. Sur ces figures on peut voir les régressions linéaires avec des coefficients de corrélation supérieurs à $0,90$ dans tous les cas.

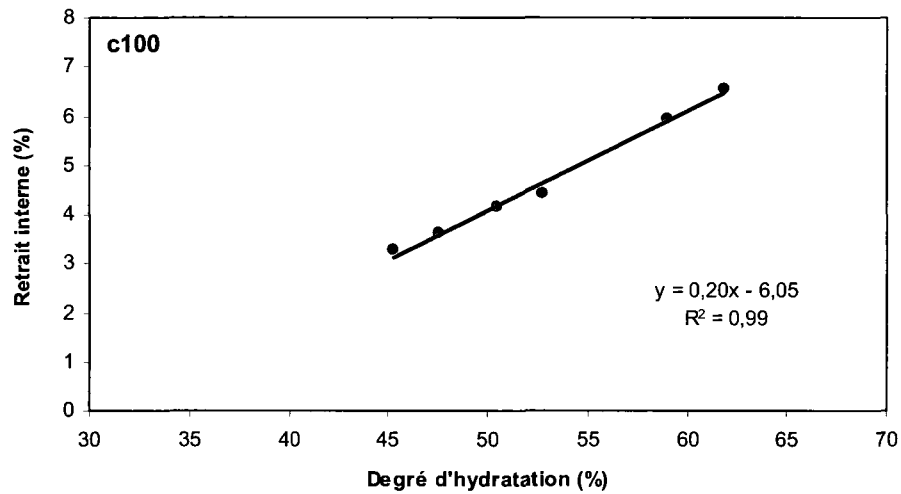


Figure 7. 80 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 14 jours des coulis de référence ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 20^\circ\text{C}$)

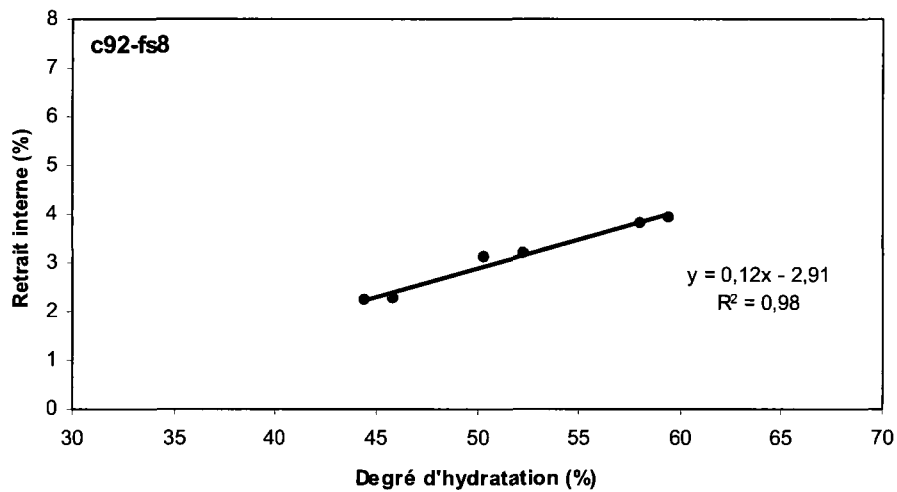


Figure 7. 81 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 14 jours des coulis avec 8% de fumée de silice ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 20^\circ\text{C}$)

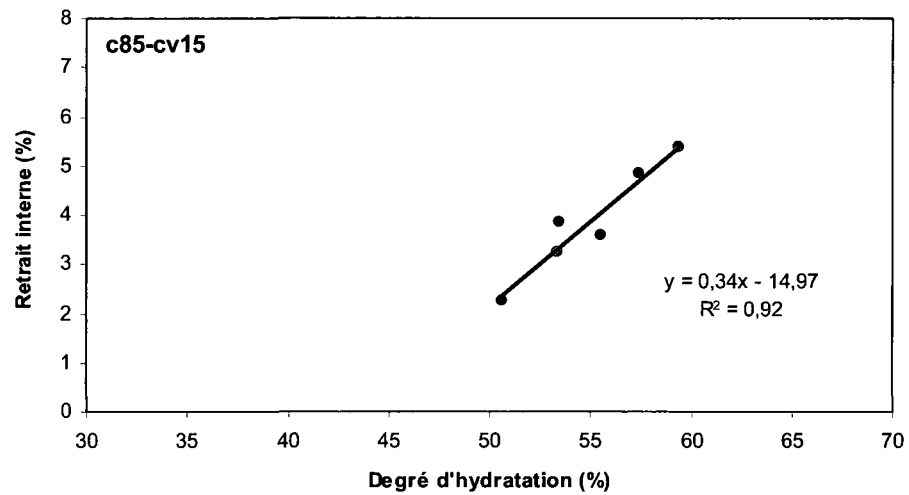


Figure 7. 82 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 14 jours des coulis avec 15% de cendre volante ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 20^\circ\text{C}$)

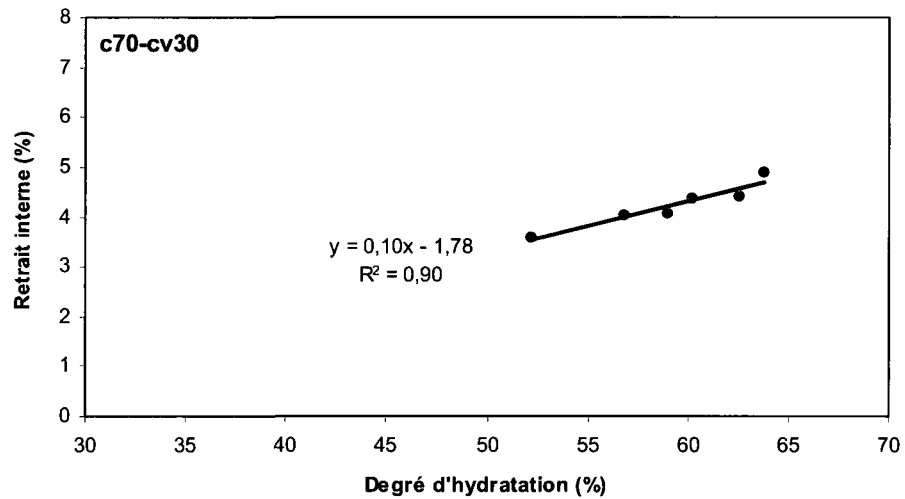


Figure 7. 83 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 14 jours des coulis avec 30% de cendre volante ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 20^\circ\text{C}$)

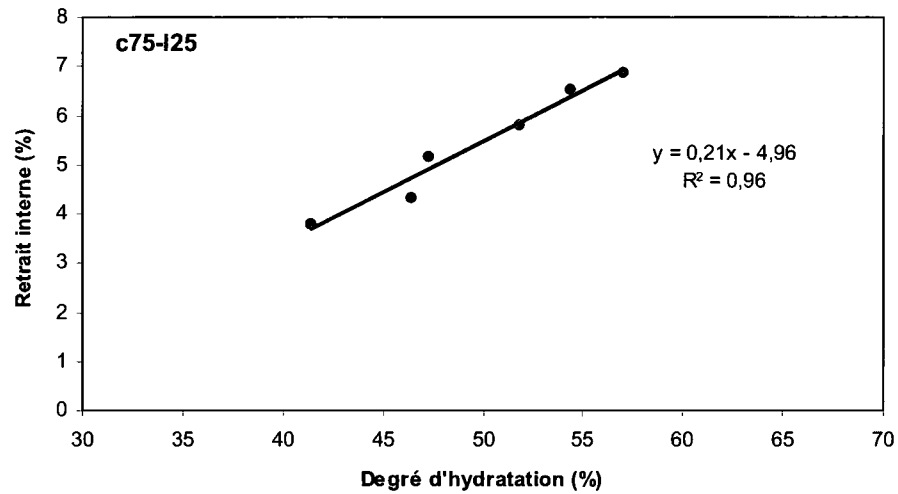


Figure 7. 84 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 14 jours des coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C)

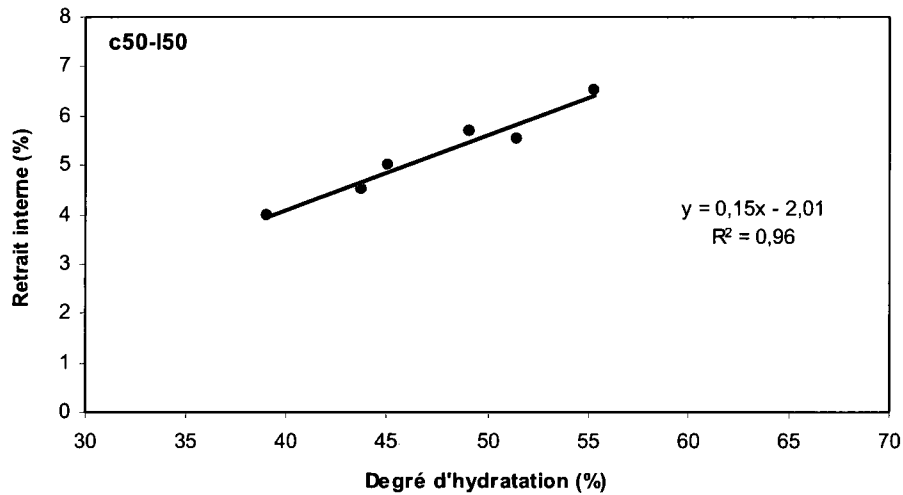


Figure 7. 85 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 14 jours des coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 20°C)

7.12 Retrait endogène externe à 7 jours

7.12.1 Effet du rapport E/L sur le retrait endogène externe à 7 jours

Le retrait endogène externe après 7 jours d'hydratation, mesuré à partir du début de l'essai, est présenté aux figures 7.88 à 7.93. Sur la première partie de chaque figure, le retrait externe est exprimé en pourcentage du volume initial, puis en ml/100 g de liant total sur la deuxième partie. La troisième partie de chaque figure présente le retrait intrinsèque externe qui est la contraction volumique externe due à l'hydratation de 100 g de liant.

La figure 7.88 présente les valeurs du retrait externe mesuré à partir de début d'essai obtenues avec les coulis de référence. Le retrait est compris entre 1,7 et 0,7% ou entre 1,0 et 0,5 ml/100 g de liant total. Le retrait intrinsèque externe varie de 0,8 à 2,4 ml/100 g de liant hydraté. On remarque que le retrait externe diminue quand le rapport E/L augmente, quelle que soit la température d'essai. La diminution du retrait externe lors du passage de rapport E/L de 0,30 à 0,45 est comprise entre 47 et 53% lorsque le retrait est exprimé en pourcentage du volume initial. La diminution du retrait intrinsèque est comprise entre 42 et 53%. Le plus grand retrait externe des coulis à faible rapport E/L découle de leur porosité capillaire plus fine qui accentue la courbure des interfaces air-eau. La traction capillaire est plus importante, ce qui tend à comprimer d'avantage la matrice cimentaire.

Le retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice est présenté à la figure 7.89. Le retrait est compris entre 1,1 et 1,8% ou entre 0,8 et 1,1 ml/100 g de liant total, tandis que le retrait intrinsèque varie de 1,4 à 2,6 ml/100 g de liant hydraté. Quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45 le retrait externe diminue de 28 à 31% et le retrait intrinsèque diminue de 23 à 32%. Il semble que l'effet du rapport E/L sur le retrait externe à 7 jours est moins important dans le cas des coulis avec la fumée de silice comparativement aux coulis de référence.

Avec les coulis au laitier, on observe, encore une fois, le même effet du rapport E/L sur le retrait externe (Figures 7.90 et 7.91). Cependant, la diminution du retrait lors du passage de rapport E/L de 0,30 à 0,45 est plus prononcée dans les coulis qui contiennent plus de laitier. Par exemple, le retrait intrinsèque des coulis avec 25% de laitier diminue de 30 à 38%, tandis que celui des coulis avec 50% de laitier diminue de 36 à 50%.

Les figures 7.92 et 7.93 présentent le retrait externe des coulis avec la cendre volante obtenu après 7 jours d'hydratation. Le retrait externe des coulis de plus faible rapport E/L est encore une fois plus élevé, quelle que soit la température d'essai. Lors du passage de rapport E/L de 0,30 à 0,45 le retrait externe diminue de 44 à 50% dans le coulis ayant 15% de cendre volante. Le retrait intrinsèque de ce type de coulis diminue de 36 à 44% en même temps. Quand le dosage de cendre volante augmente à 30% le retrait externe diminue de 36 à 46%, alors que le retrait intrinsèque diminue de 33 à 38%.

Les valeurs du retrait externe de tous les coulis obtenus à 10, 20 et 30 C et mesuré à partir du début de l'essai jusqu'à l'âge de 7 et 14 jours sont regroupées à la figure 7.86.

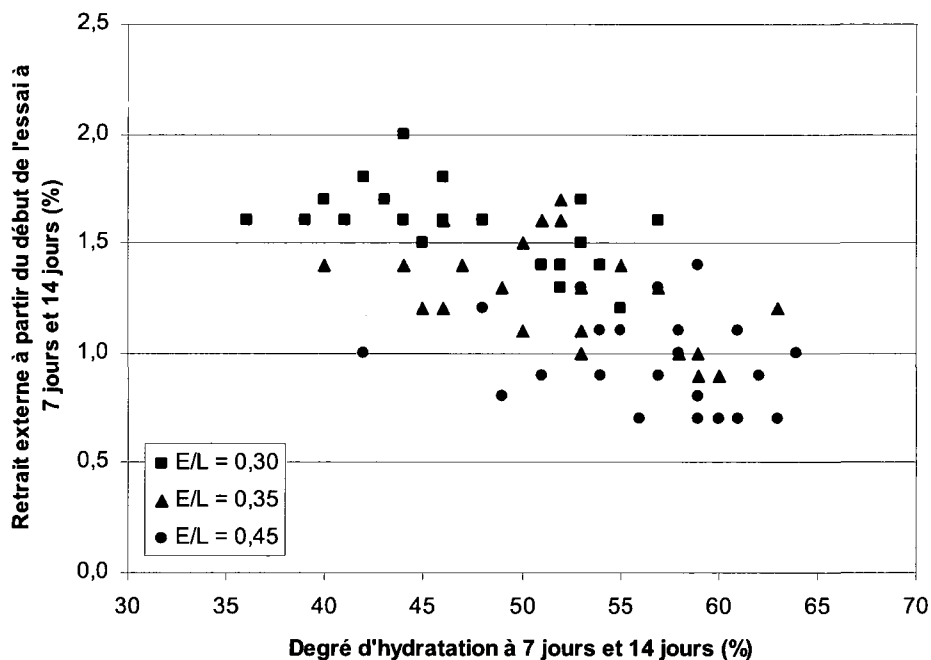


Figure 7. 86 – Retrait externe à partir du début de l'essai jusqu'à l'âge de 7 et 14 jours pour les coulis ayant des rapports E/L de 0,30, 0,35 et 0,45

Le retrait endogène externe après 7 jours d'hydratation mesuré à partir de début de prise est présenté aux figures 7.94 à 7.99. Le retrait externe mesuré à partir de début de prise est

toujours inférieur au retrait externe mesuré à partir de début d'essai. Avant la prise, le coulis est encore fluide et déformable. Le retrait externe qui se développe pendant cette période découle directement de la contraction le Chatelier. À partir de la prise, le retrait externe est causé par l'effet simultané du retrait chimique et de la dépression capillaire.

La figure 7.94 présente le retrait externe des coulis de référence mesuré à partir de début d'essai. Ce retrait varie entre 0,4 et 1,1% de volume initial ou entre 0,3 et 0,7 ml/100 g de liant total. Le retrait intrinsèque externe mesuré à partir de la prise varie entre 0,6 et 1,2 ml/100 g de liant hydraté dépendant du rapport E/L et de la température. Comme dans le cas du retrait mesuré à partir du début d'essai, le retrait externe mesuré à partir du début de prise diminue avec l'augmentation du rapport E/L, quelle que soit la température. La diminution du retrait des coulis de rapport E/L égal à 0,45 par rapport au celui des coulis de rapport 0,30 est située entre 36 et 43%. Le retrait intrinsèque diminue de 33 à 45%.

Le retrait externe à partir de la prise des coulis avec fumée de silice (Figure 7.95) varie entre 0,5 et 1,5% ou entre 0,4 et 0,9 ml/100 g de liant total. Le retrait intrinsèque est compris entre 0,7 et 1,9 ml/100 g de liant hydraté. Le retrait externe de ce type de coulis tend aussi à augmenter quand le rapport E/L diminue. Lors du passage des rapports E/L de 0,30 à 0,45 le retrait externe diminue de 33 à 44%. Le retrait intrinsèque diminue pratiquement de la même façon.

La diminution du retrait externe causé par l'augmentation du rapport E/L de 0,30 à 0,45 est plus importante avec les coulis contenant 25% de laitier (Figure 7.96). Elle est comprise entre 15 et 63% quand le retrait externe est exprimé en pourcentage du volume initial. La diminution du retrait est plus importante à 10°C qu'à 30°C. Pour une même augmentation du rapport E/L, le retrait externe des coulis avec 50% de laitier diminue de 29 à 50%, tandis que le retrait intrinsèque diminue de 33 à 47%. Dans le cas des coulis contenant de la cendre volante, l'effet du rapport E/L est le même que celui observé avec les autres types de coulis. Le retrait externe diminue d'environ 30 à 50% et le retrait intrinsèque externe d'environ 30 à 40% quand le rapport E/L augmente de 0,30 à 0,45.

On peut conclure que l'influence du rapport E/L sur le retrait externe à 7 jours est évident dès le début d'essai et que le retrait externe est plus élevé avec les coulis de faible rapport E/L. Ce comportement découle d'une porosité plus fine des coulis de faible rapport E/L.

Les valeurs du retrait externe de tous les coulis obtenus à 10, 20 et 30 C et mesuré à partir de la prise jusqu'à l'âge de 7 et 14 jours sont regroupées à la figure 7.87.

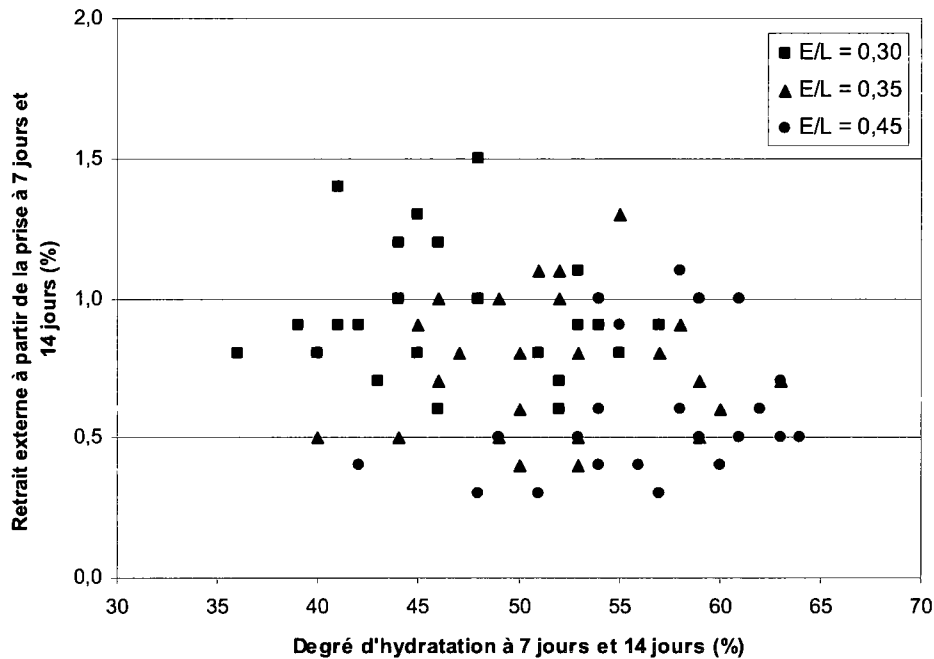


Figure 7. 87 – Retrait externe à partir de la prise jusqu'à l'âge de 7 et 14 jours pour les coulis ayant des rapports E/L de 0,30, 0,35 et 0,45

7.12.2 Effet de la température sur le retrait endogène externe à 7 jours

Les figures 7.88 à 7.99 présentent l'influence de la température et du rapport E/L sur le développement du retrait externe. Les six premières figures (7.88 à 7.93) présentent le retrait externe mesuré à partir du contact eau-ciment jusqu'à la fin de l'essai (7 jours). Les six figures suivantes présentent le retrait endogène externe mesuré entre la prise et la fin de l'essai (7 jours).

L'analyse des figures 7.88 à 7.93 (retrait externe à partir du début de l'essai) montre que le retrait endogène est systématiquement plus important lorsque la température d'hydratation est

faible (10°C). À l'inverse, une température d'hydratation de 30°C a systématiquement pour effet de diminuer le retrait endogène externe. Ce phénomène a été constaté avec tous les types de liants.

Lors de l'analyse des courbes de conductivité électrique, on a observé un retard de prise avec la diminution de la température. Pour un rapport E/L donné et un type de liant donné, le début de la rigidification de la matrice cimentaire, qui est défini comme le début de prise à la section 7.3.1, survient plus tard à 10°C et plus tôt à 30°C. Avant la prise, le retrait externe causé par le retrait chimique, se développe rapidement et sans entrave (figure 2.16). Après la prise, le retrait externe est plus lent et il devient principalement la conséquence de la dépression capillaire.

Lorsque la température est faible (10°C) la prise survient plus tard. Une plus grande proportion du retrait externe peut donc se produire librement avant la rigidification de la matrice (prise). Lorsque la température est plus forte (30°C) la prise survient plus tôt. La matrice cimentaire se rigidifie plus rapidement. Cette rigidification semble ralentir le développement du retrait endogène externe. Le plus faible retrait endogène externe est probablement transformé en retrait endogène interne plus important.

L'influence de la température sur le développement du retrait endogène externe à partir du début de l'essai est systématiquement la même quelles que soient les conditions d'essais (E/L) et la manière d'exprimer le retrait endogène externe (% , ml/100 g de liant, ml/100 g de liant hydraté). Il est important de noter qu'un plus grand retrait endogène externe, mesuré à partir du début de l'essai, n'est pas nécessairement défavorable. En effet, ce retrait externe inclus le retrait externe avant la prise. Ce dernier se développe en phase plastique, ce qui n'augmente pas les risques de fissurations dues au retrait empêché.

Les figures 7.94 à 7.99 présentent l'influence de la température sur le développement du retrait endogène après la prise. Dans ces conditions, la température produit un effet inverse, c'est à dire que le retrait endogène externe est plus faible lorsque la température est basse (10°C) et plus important lorsque la température est haute (30°C). Ce phénomène a été systématiquement observé pour toutes les conditions d'essais (E/L, type de liant).

À basse température (10°C) le retrait endogène après la prise est plus faible car on a justement montré que la majeure partie du retrait endogène externe se produit avant la prise. À haute

température (30°C) le retrait endogène après la prise est plus important car la prise se produit très tôt. La majeure partie du retrait endogène se développe donc après la prise.

Ces derniers résultats suggèrent qu'une température de mûrissement plus faible diminue les risques de fissuration due au retrait endogène empêché après la prise. En effet, l'analyse des données des figures 7.94 à 7.99 montre que lorsque la température d'hydratation passe de 30°C à 20°C, le retrait endogène externe après la prise (ml/100 g de liant hydraté) diminue en moyenne de 8% à 35% dépendant du type de liant. Lorsque la température passe de 30°C à 10°C, cette diminution est en moyenne de 23% à 48% dépendant du type de liant.

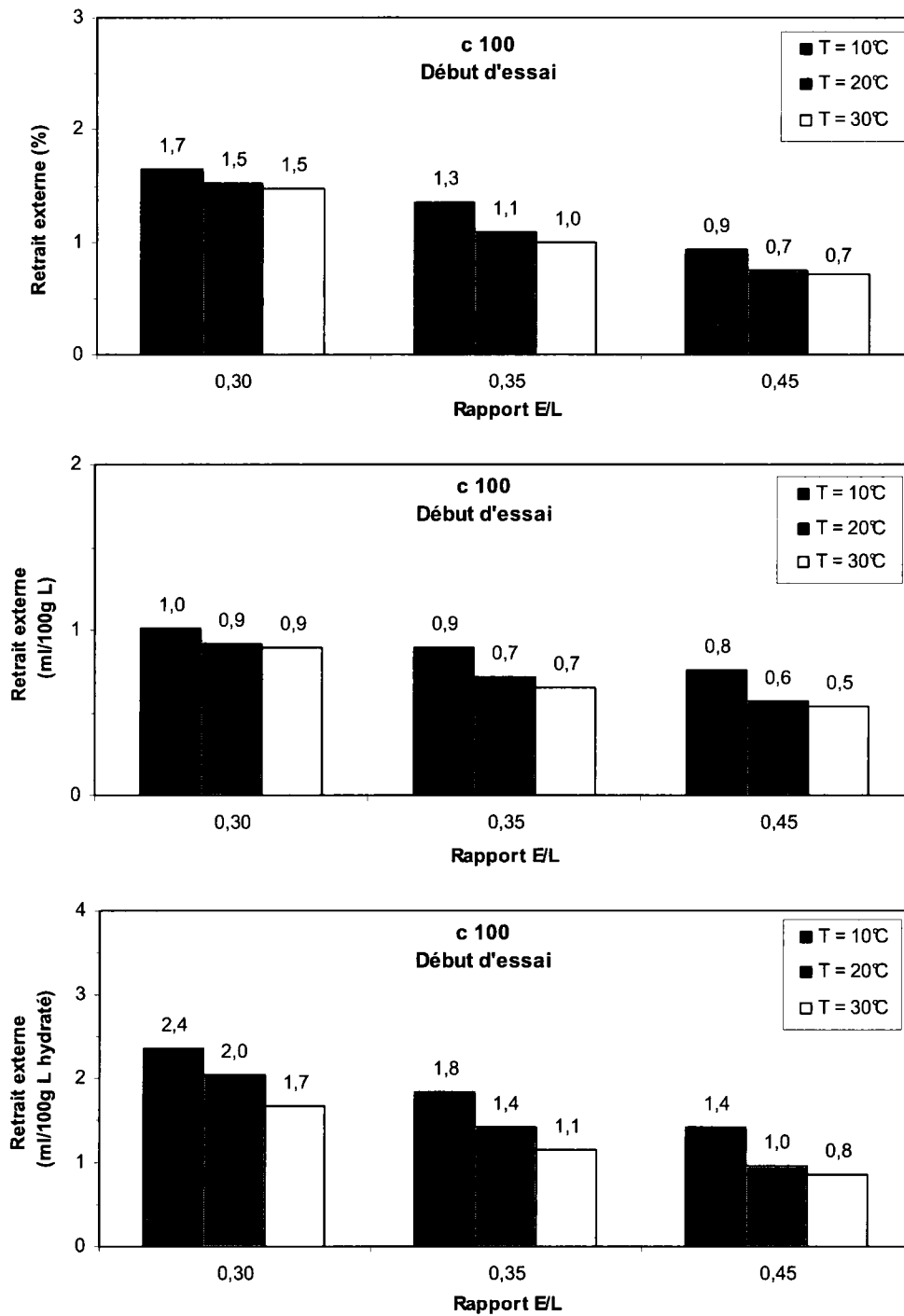


Figure 7. 88 – Retrait externe à 7 jours des coulis de référence mesuré à partir du début de l'essai

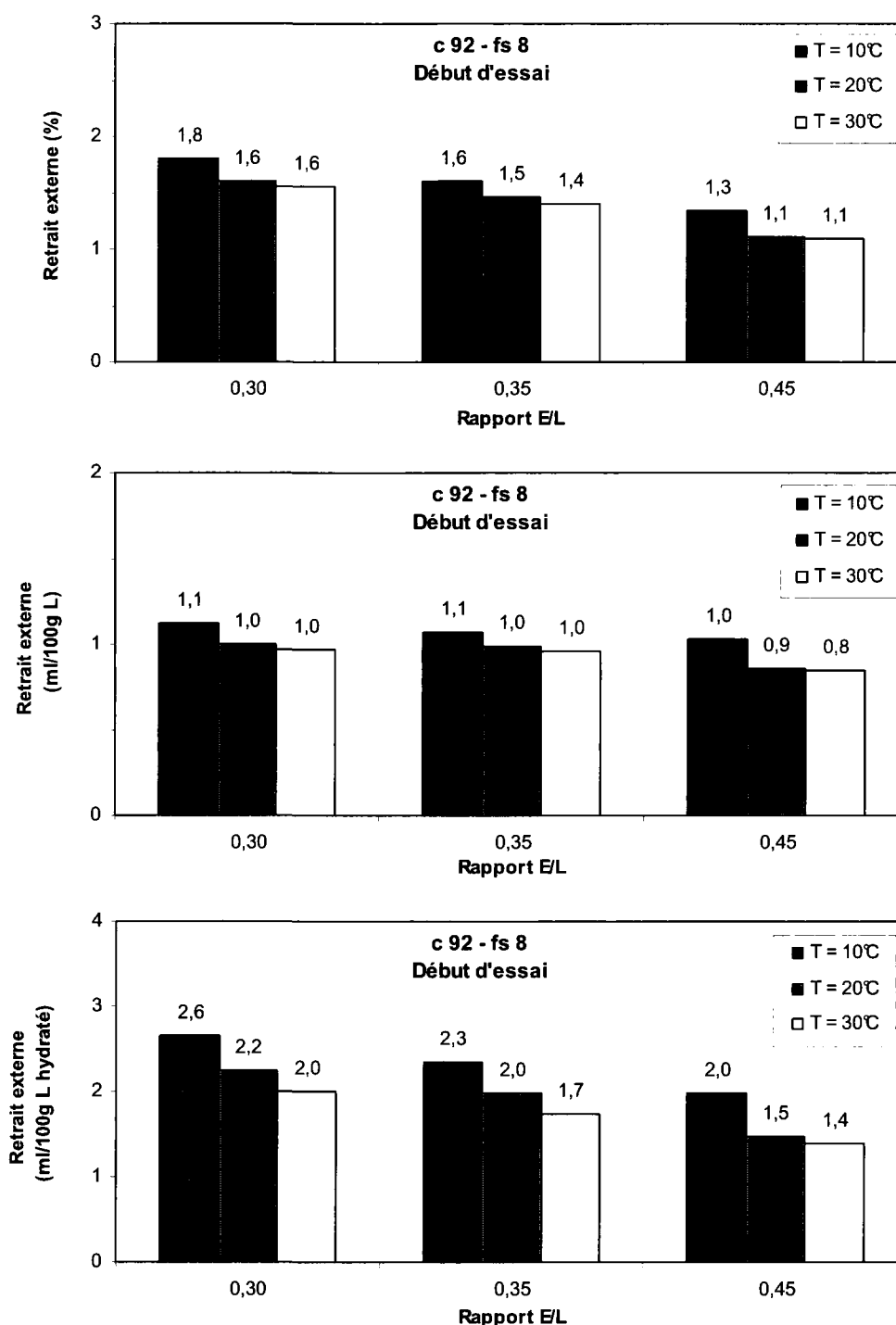


Figure 7. 89 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré à partir du début de l’essai

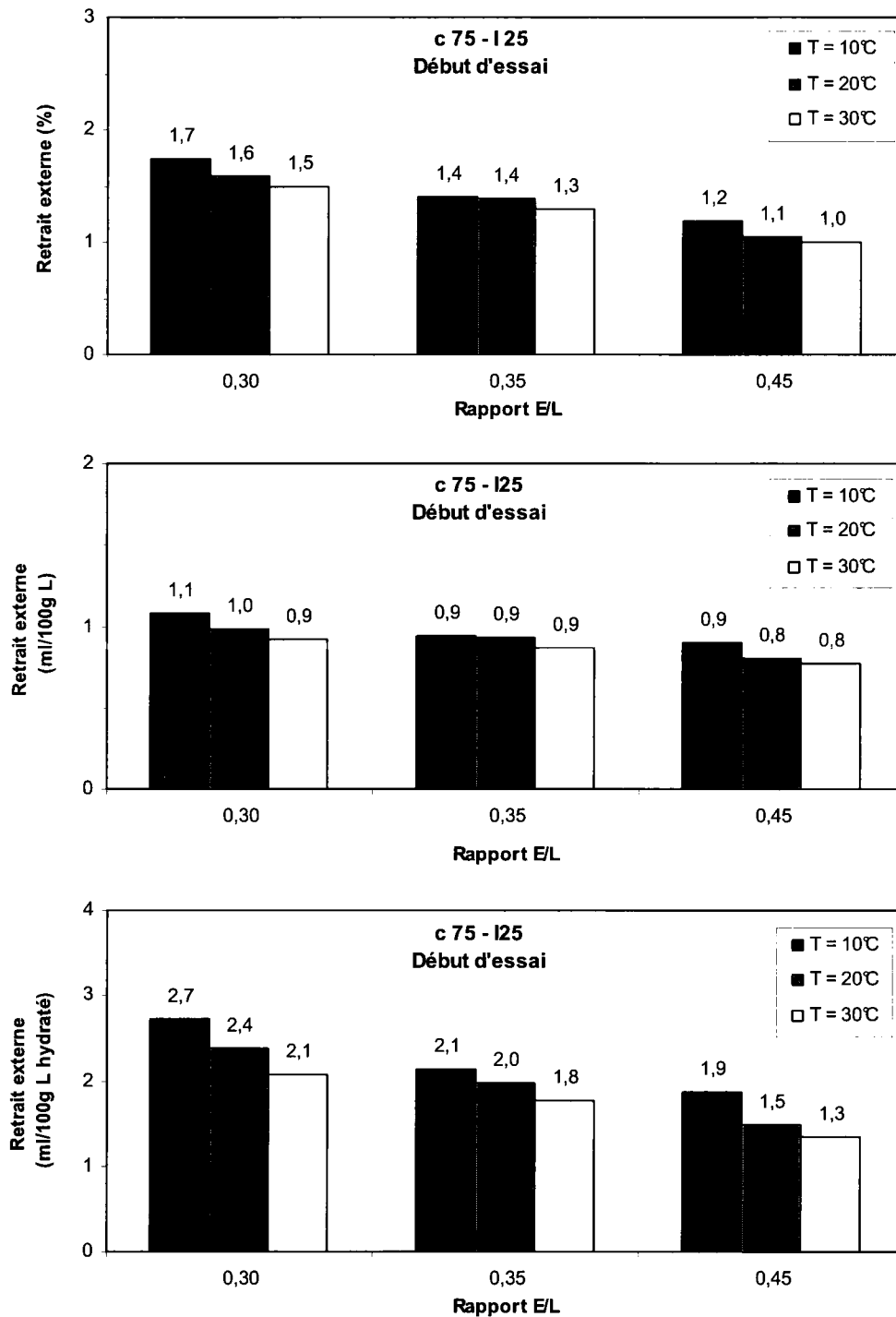


Figure 7. 90 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 25% de laitier mesuré à partir du début de l’essai

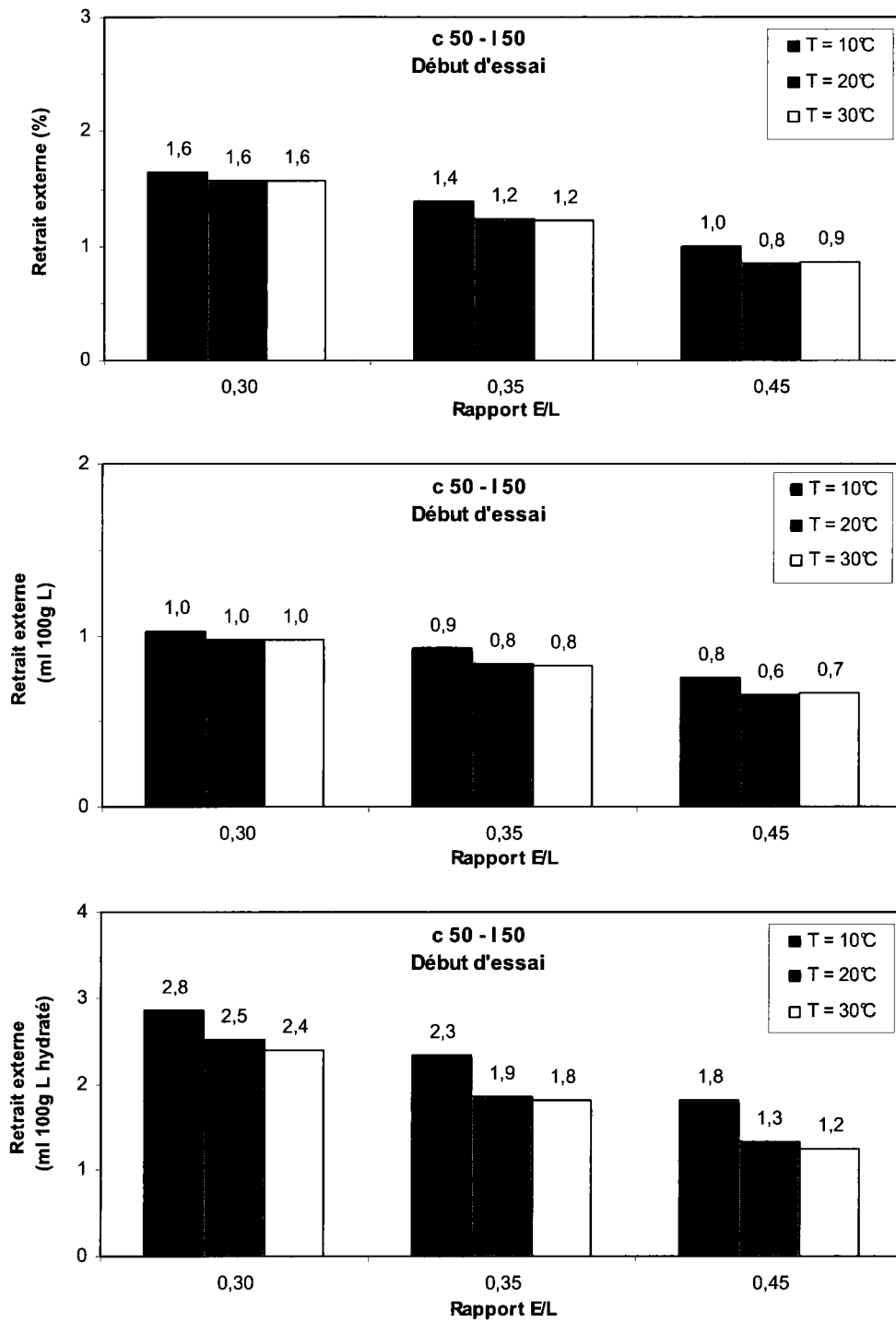


Figure 7. 91 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 50% de laitier mesuré à partir du début de l’essai

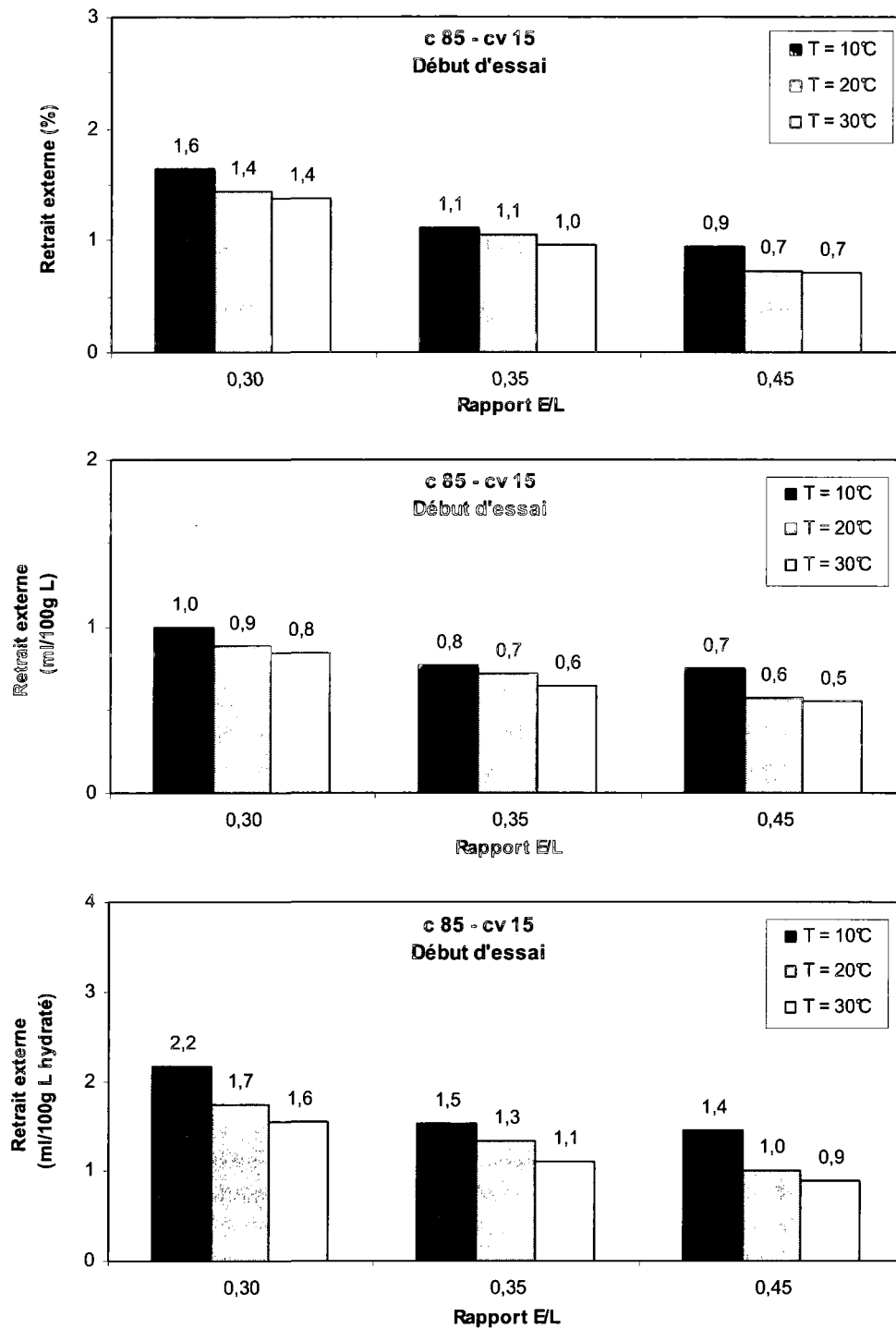


Figure 7. 92 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante mesuré à partir du début de l'essai

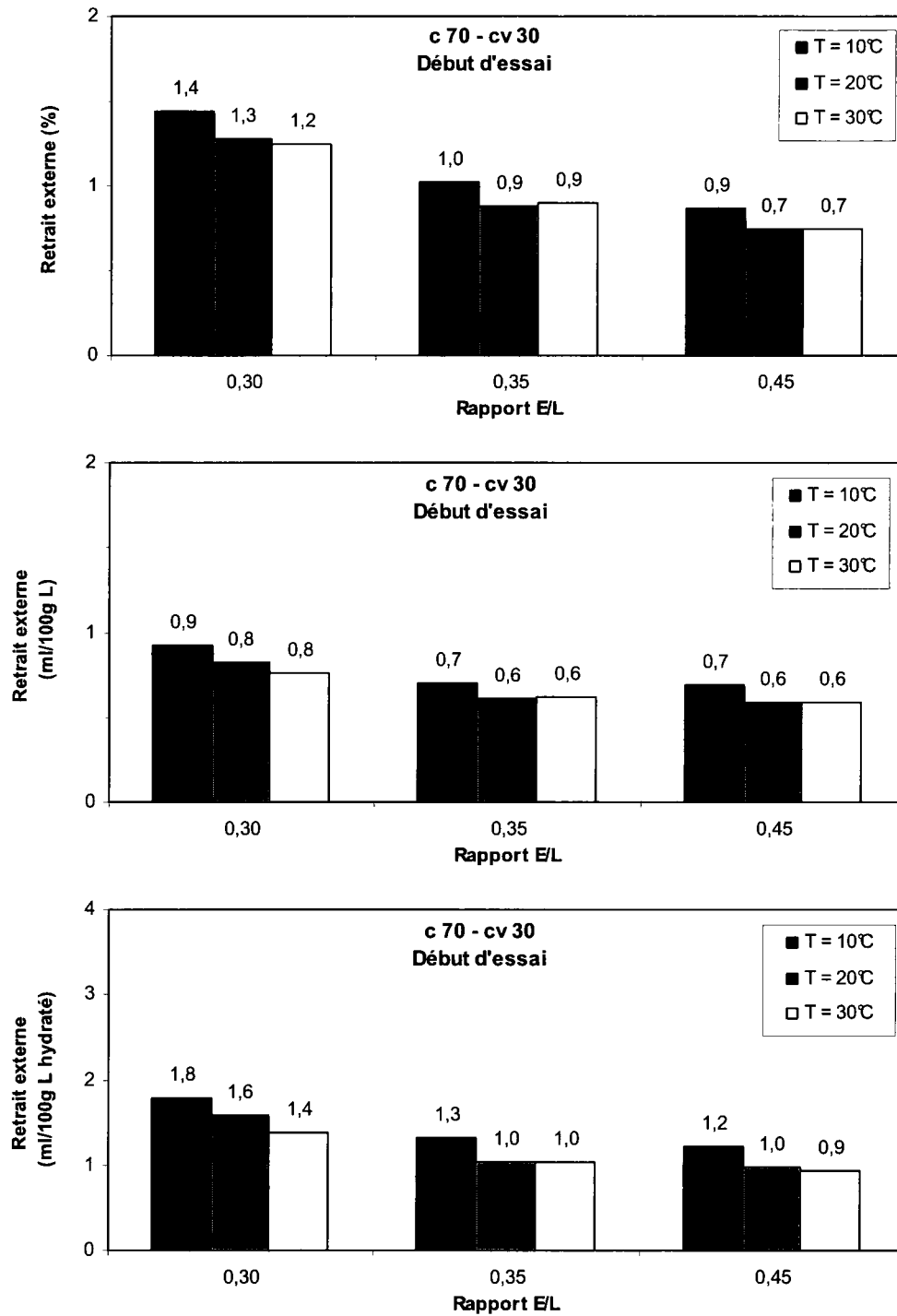


Figure 7. 93 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante mesuré à partir du début de l’essai

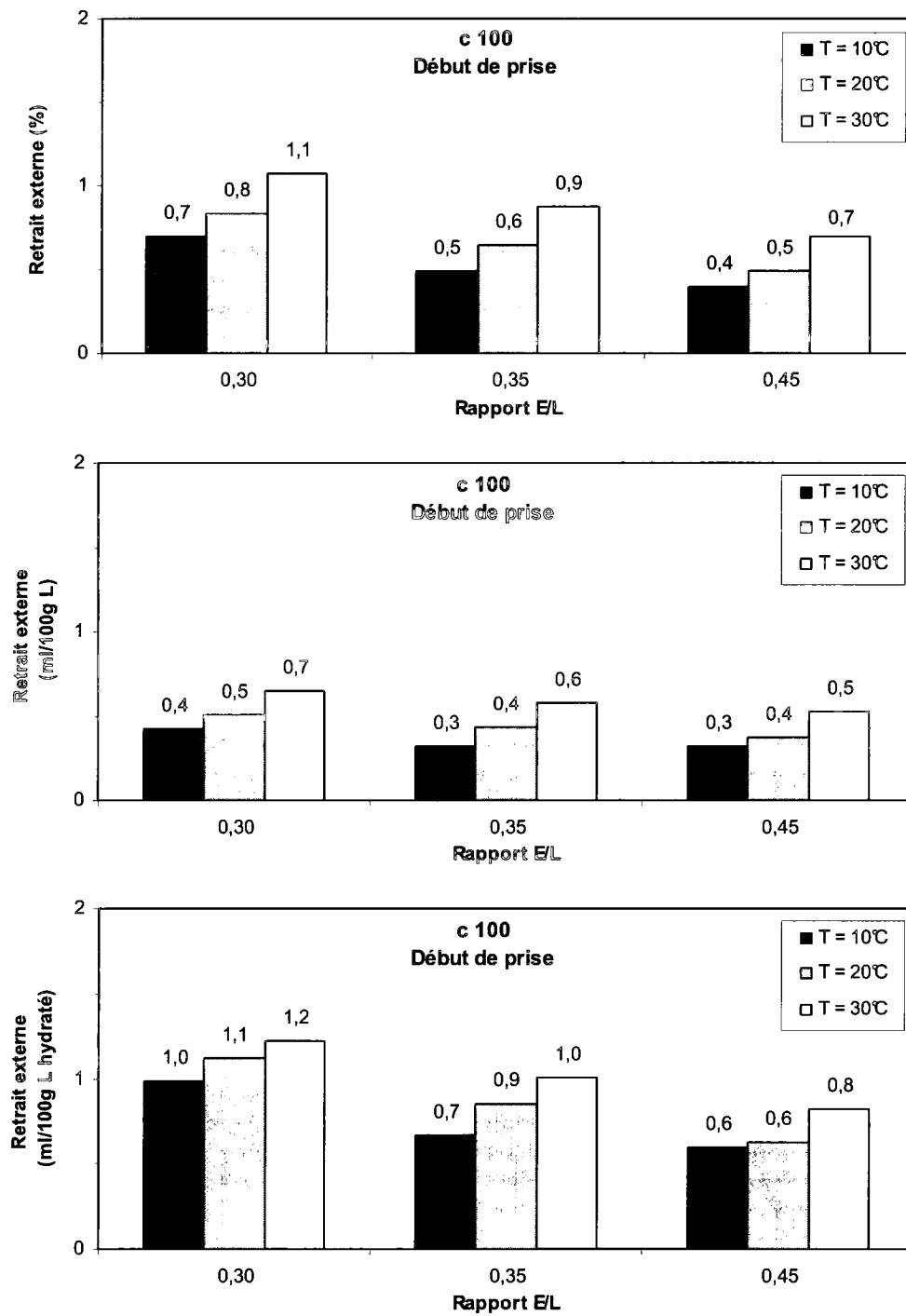


Figure 7. 94 – Retrait externe à 7 jours des coulis de référence mesuré à partir du début de prise

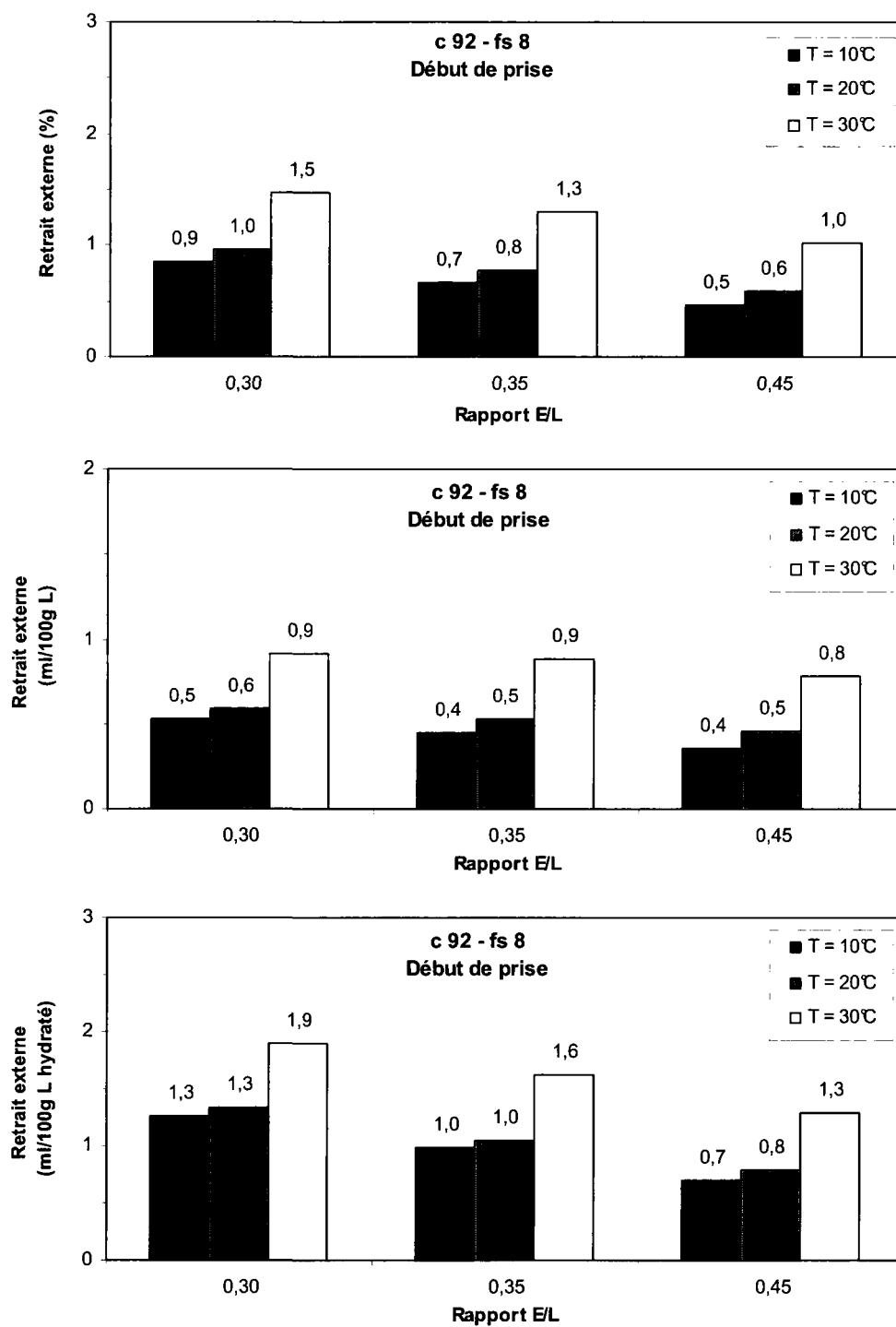


Figure 7. 95 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré à partir du début de prise

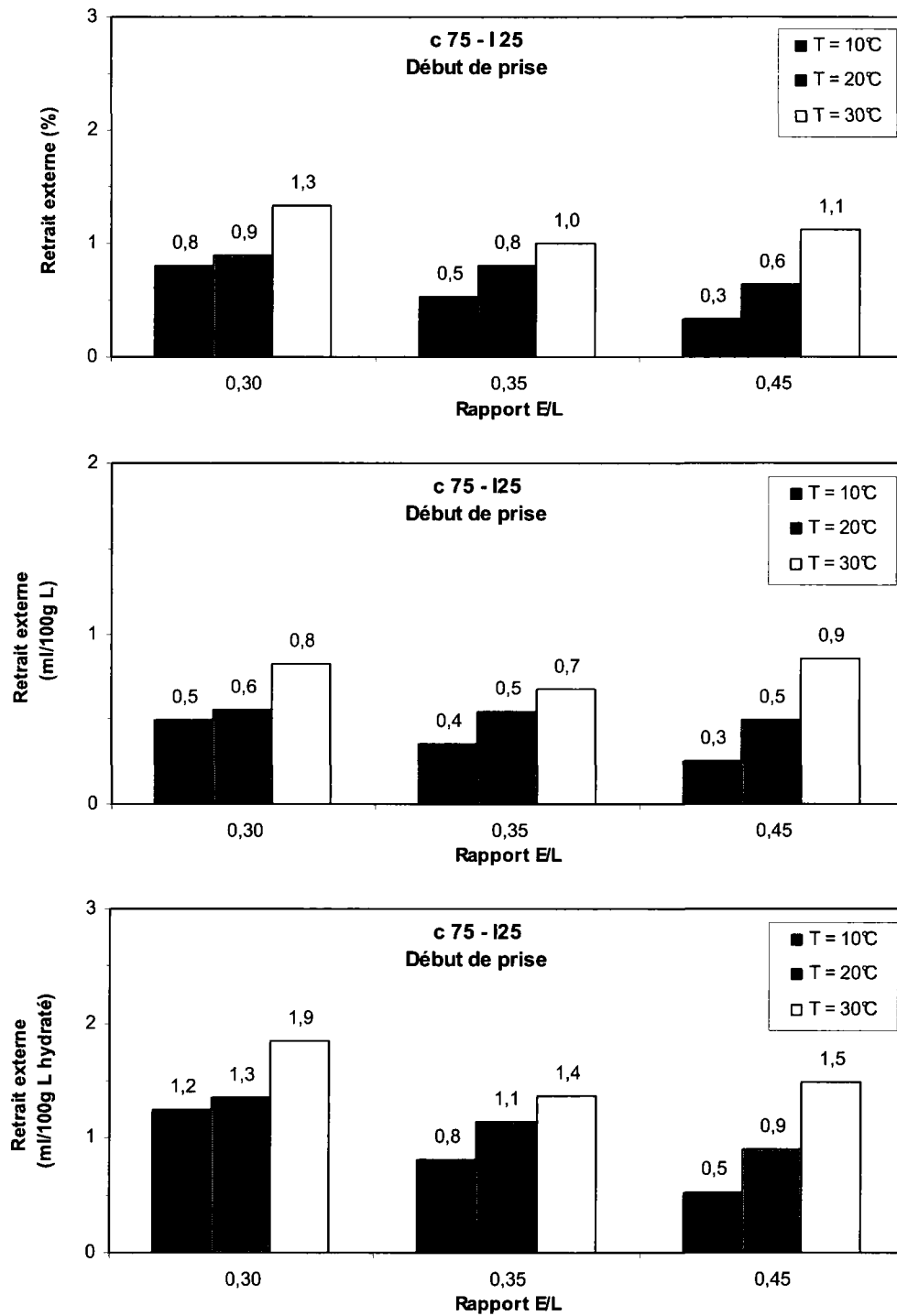


Figure 7. 96 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 25% de laitier mesuré à partir du début de prise

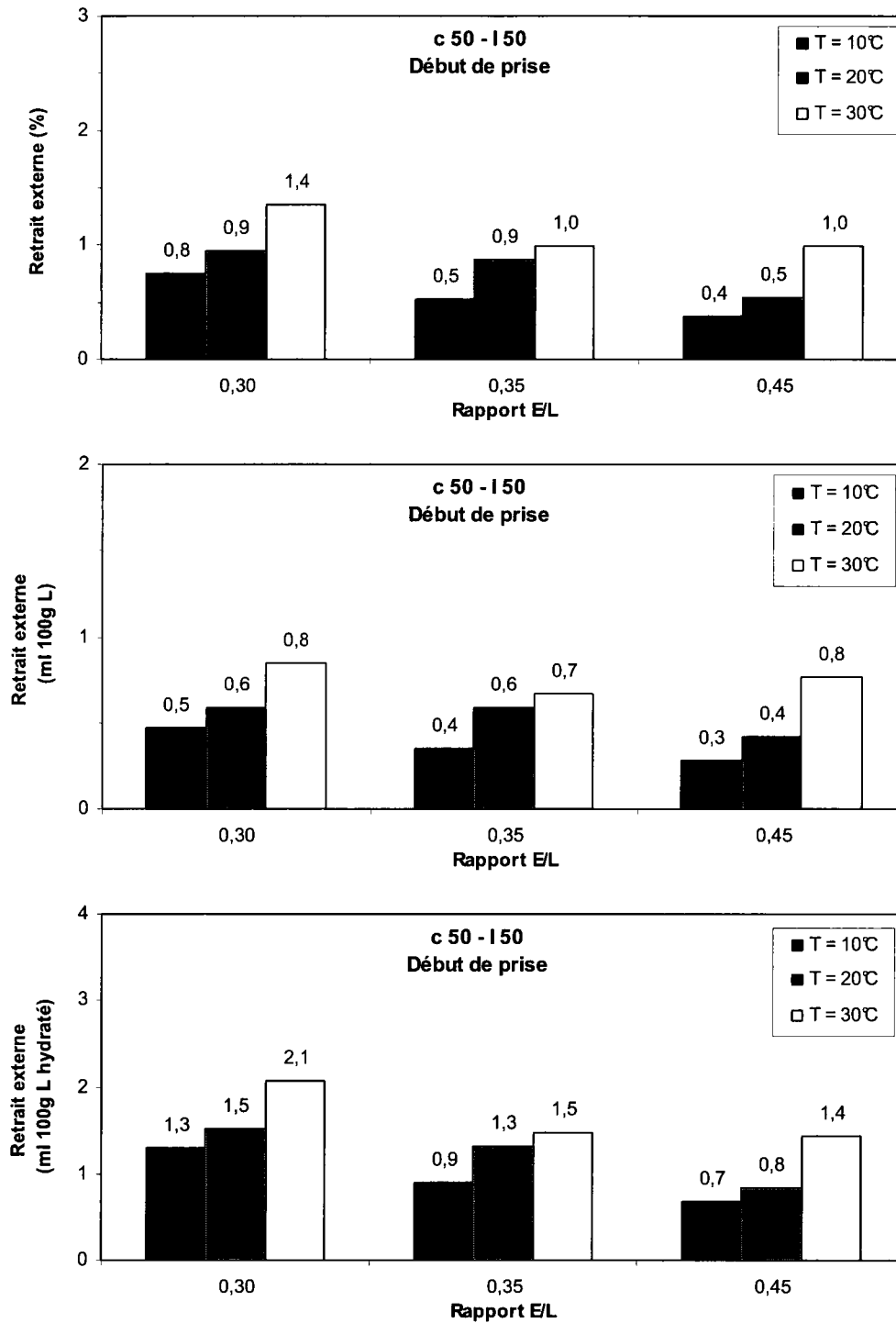


Figure 7. 97 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 50% de laitier mesuré à partir du début de prise

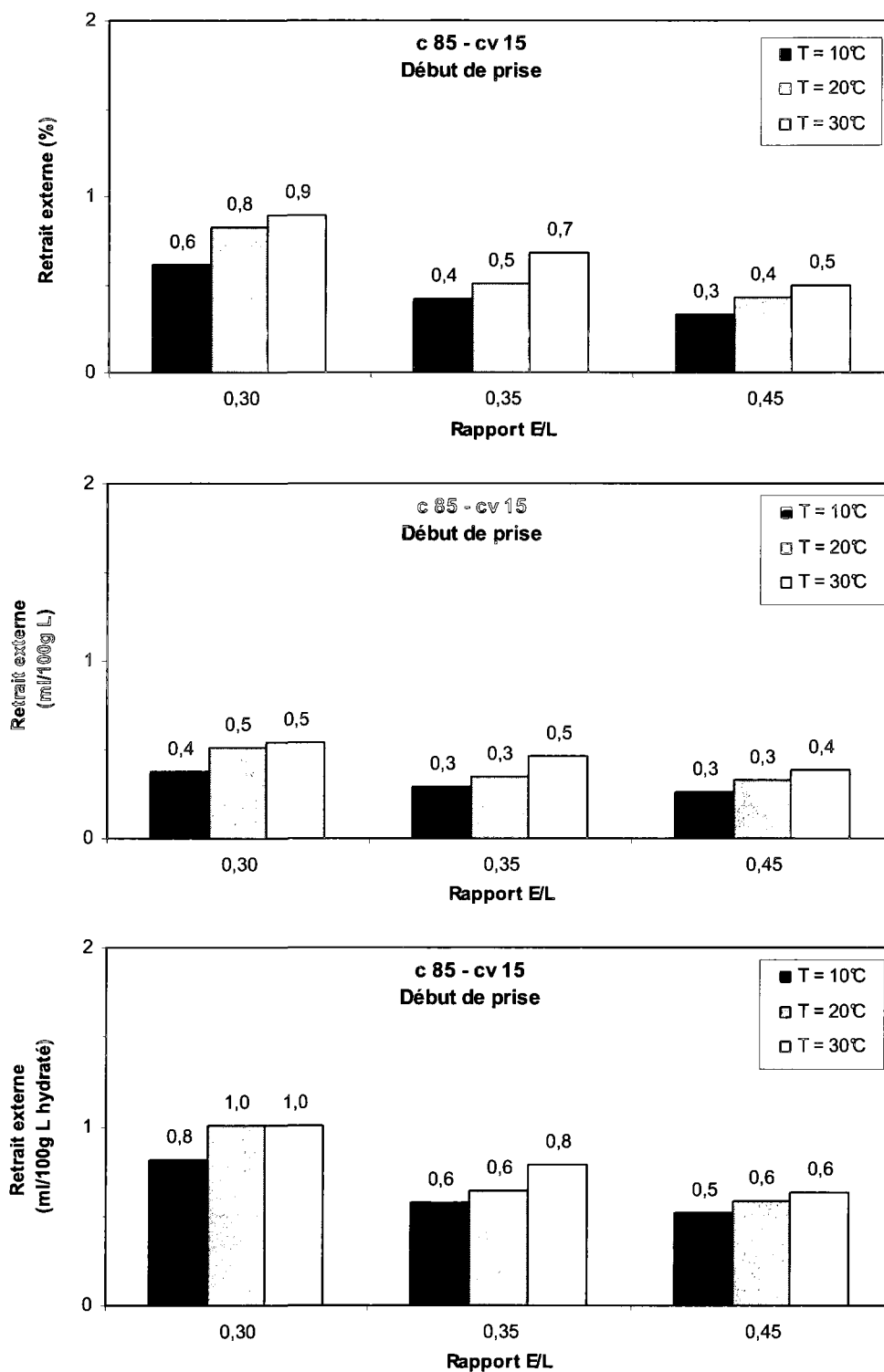


Figure 7. 98 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 15% de cendre volante mesuré à partir du début de prise

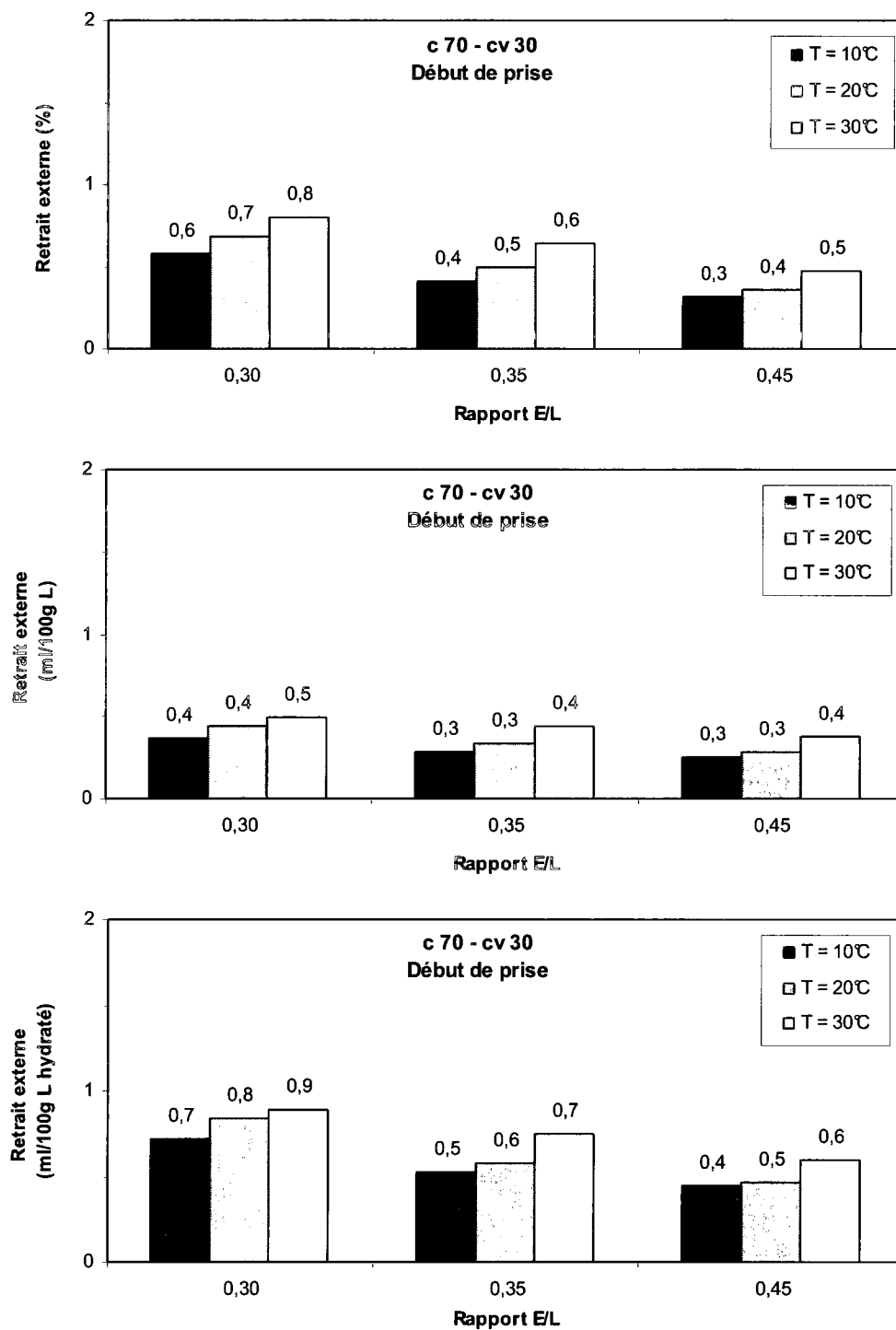


Figure 7. 99 – Retrait externe à 7 jours des coulis avec 30% de cendre volante mesuré à partir du début de prise

7.12.3 Effet du type de liant sur le retrait endogène externe à 7 jours

L'influence du type de liant sur le retrait externe mesuré à partir du début de l'essai après 7 jours d'hydratation est présentée aux figures 7.100 à 7.105. Dans le cas des coulis de rapport E/L égal à 0,30 (Figure 7.100), le retrait externe exprimé en pourcentage du volume initial varie peu d'un liant à l'autre. On constate quand même que la fumée de silice et le laitier produisent des retraits externes supérieurs à ceux de la référence. Par contre, les retraits externes sont inférieurs à ceux de la référence quand on utilise la cendre volante. Ces comportements sont pratiquement valables pour chaque température d'essai. L'effet du type de liant sur le retrait intrinsèque externe est plus marqué. Ce retrait dépasse celui de la référence quand on utilise la fumée de silice et du laitier. Parmi ces deux ajouts le laitier produit les plus grands retraits qui augmentent, en plus, avec le dosage en laitier. La cendre volante produit les plus faibles retraits intrinsèques externes. La diminution du retrait est plus prononcée dans le cas des forts dosages en cendre volante.

L'influence des ajouts minéraux sur le retrait externe à partir du début de l'essai dans le cas des coulis avec le rapport E/L égal à 0,35 (Figure 7.101) est semblable à celle observée avec les coulis de rapport 0,30. La plus grande différence est présente au niveau du laitier qui commence par produire un peu moins de retrait externe que la fumée de silice.

La figure 7.102 présente les retraits externes des coulis avec un rapport E/L égal à 0,45. La fumée de silice et le laitier produisent encore une fois des retraits externes supérieurs à ceux de la référence, quelle que soit la température d'essai ou la méthode de calcul du retrait ((%, ml/100 g de liant, ml/100 g de liant hydraté). Cependant, la fumée de silice tend à produire un retrait externe plus important que celui du laitier.

L'influence du type de liant sur le retrait externe mesuré à partir de la prise est présentée aux figures 7.103 à 7.105. Dans le cas des coulis de rapport E/L = 0,30, l'effet du type de liant est semblable à celui observé dans le cas du retrait externe mesuré à partir du début de l'essai. Quand le rapport E/L augmente à 0,35, le retrait externe des coulis au laitier commence à baisser comparativement au coulis contenant de la fumée de silice. Dans le cas des coulis de rapport 0,45 l'influence de différents types de liants ressemble à celle déjà observée lors de l'analyse du retrait externe mesuré à partir du début de l'essai.

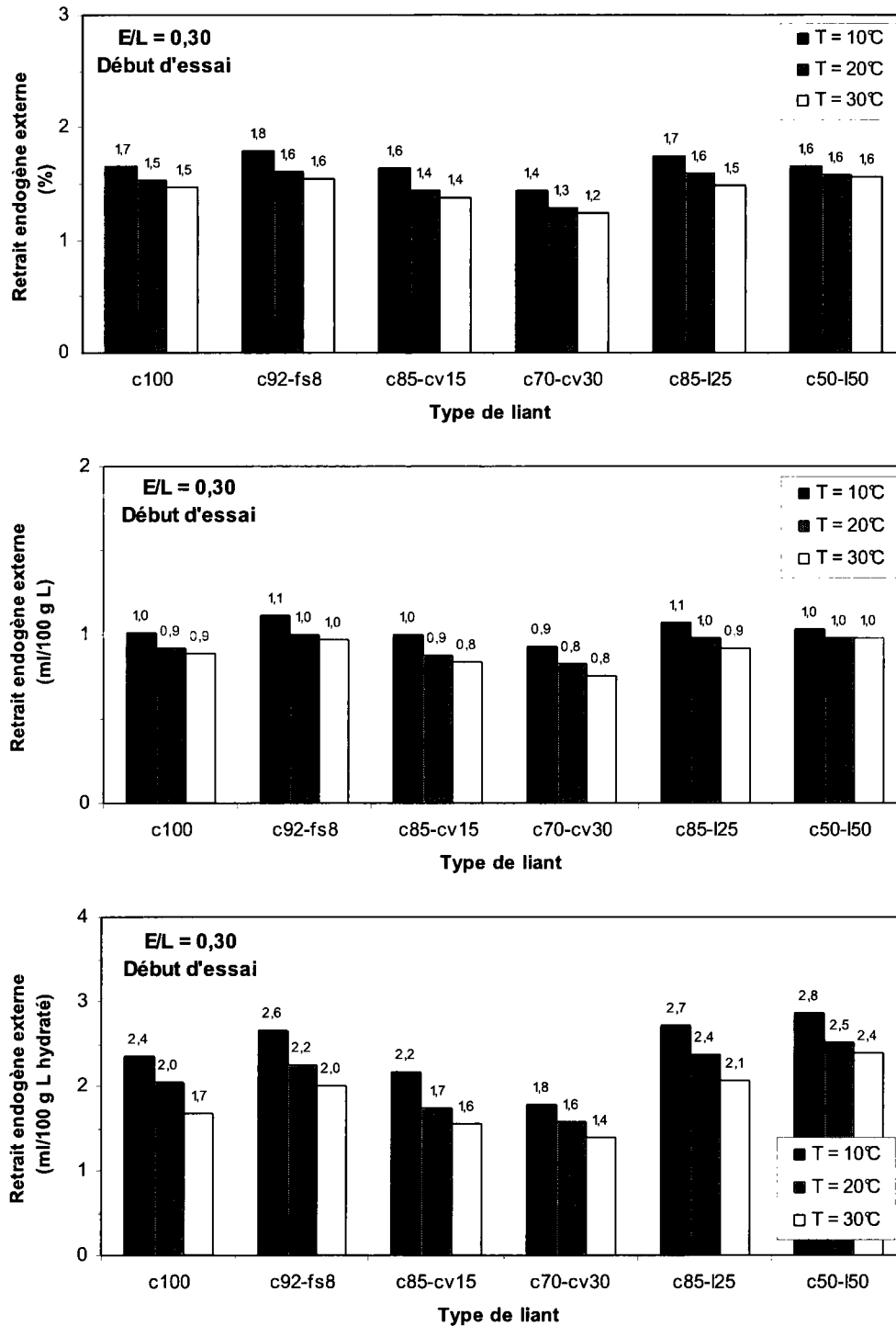


Figure 7. 100 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré à partir du début de l'essai

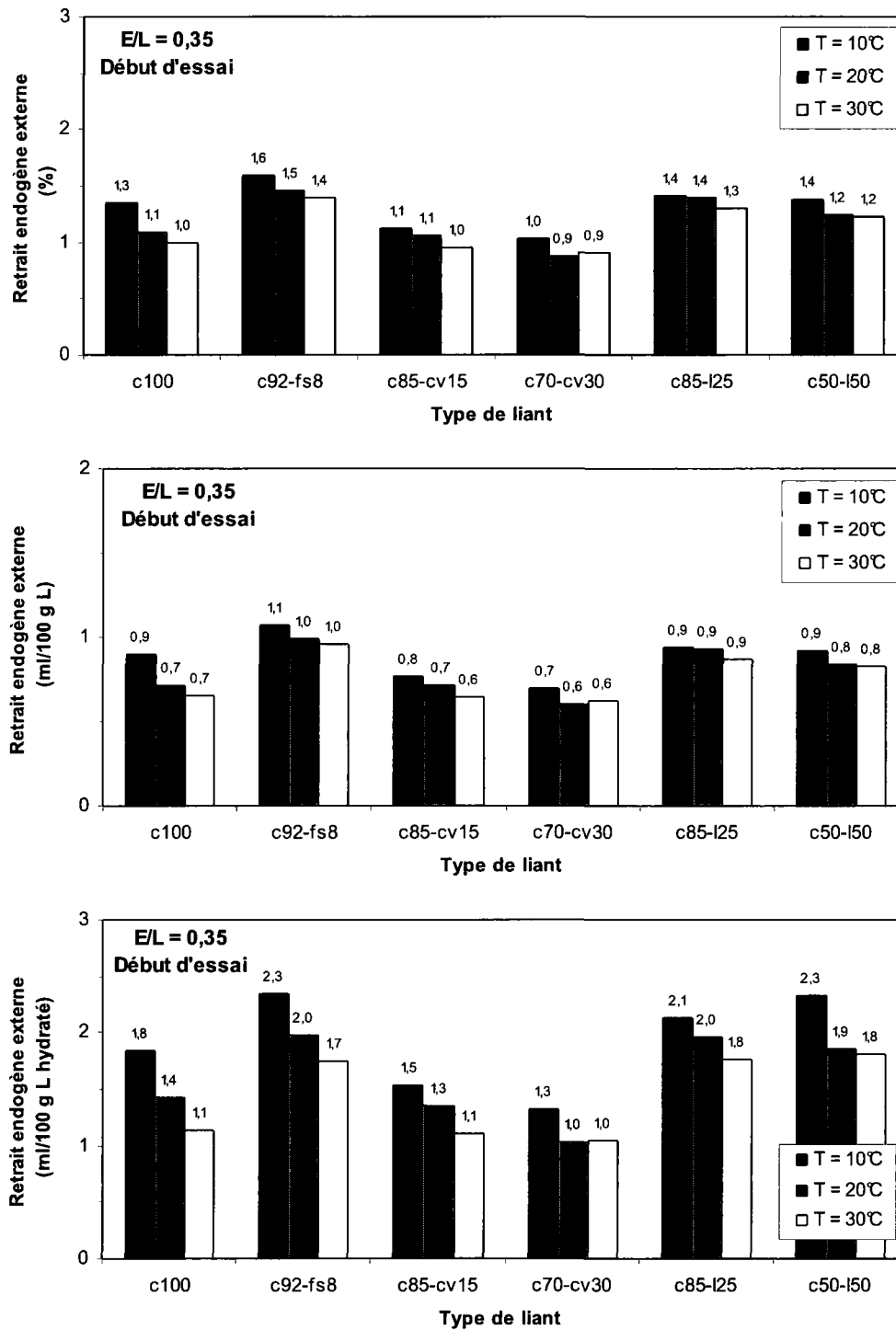


Figure 7. 101 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré à partir du début de l'essai

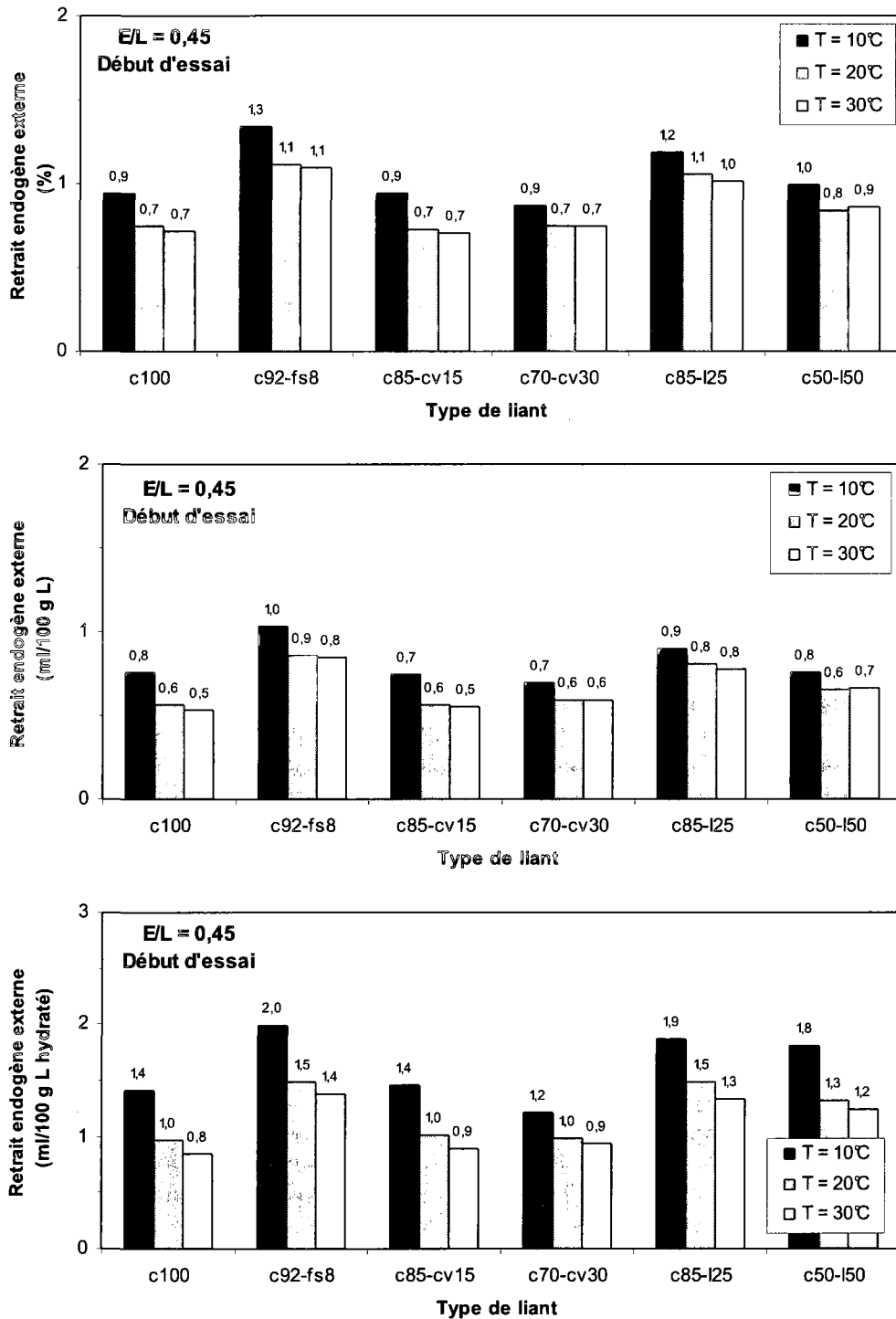


Figure 7. 102 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré à partir du début de l'essai

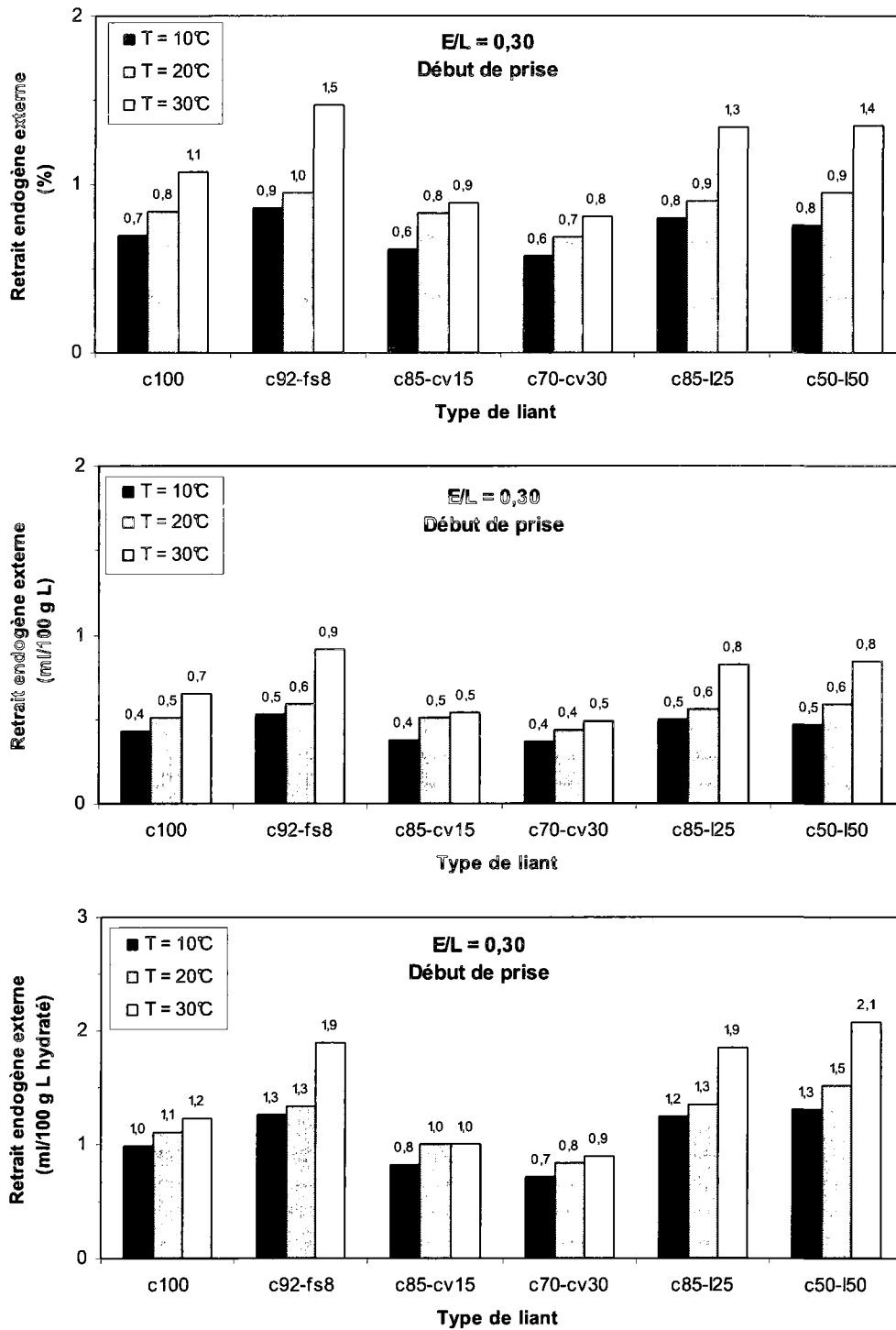


Figure 7. 103 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,30 mesuré à partir du début de prise

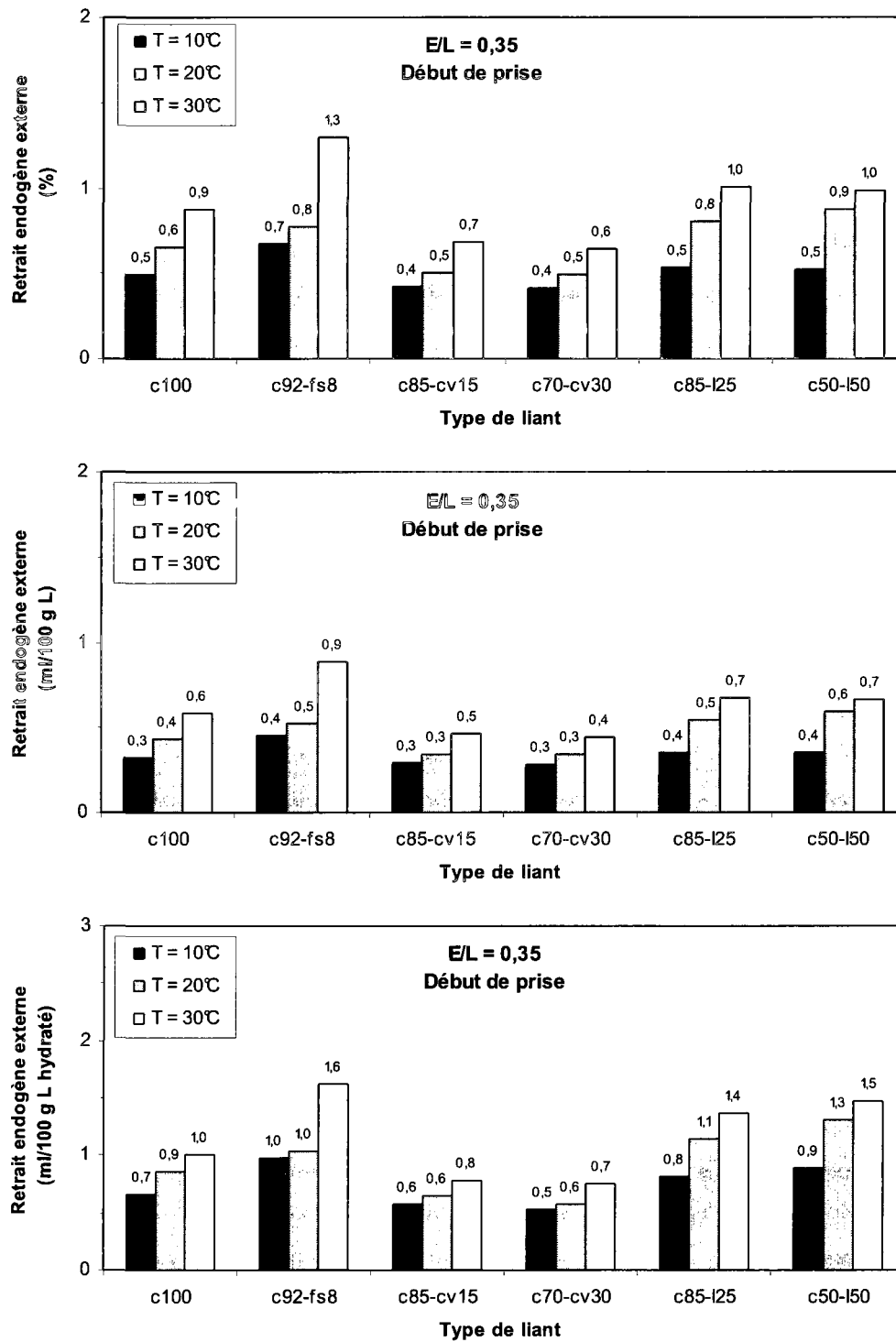


Figure 7. 104 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,35 mesuré à partir du début de prise

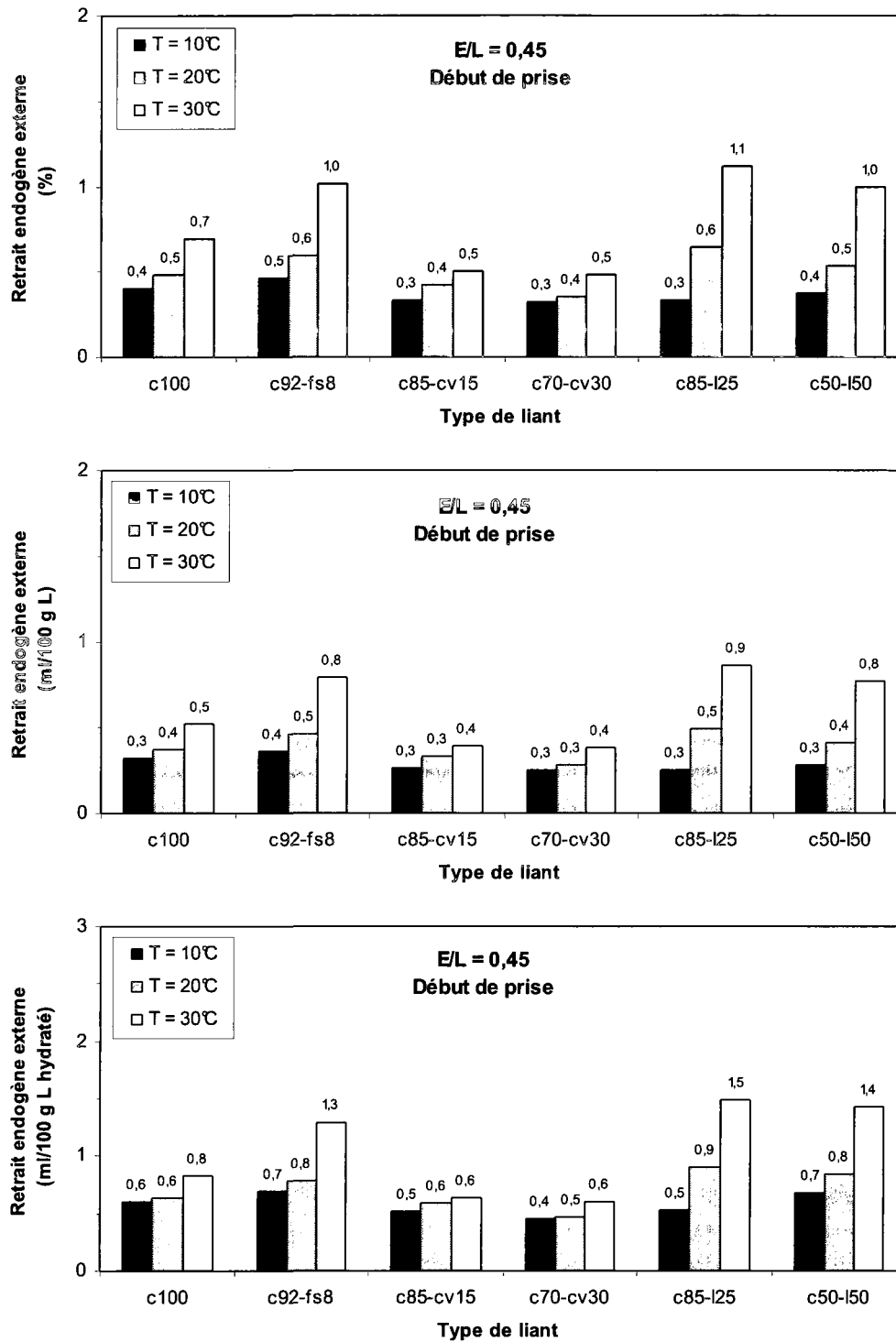


Figure 7. 105 – Retrait externe à 7 jours des coulis de rapport E/L = 0,45 mesuré à partir début de prise

7.12.4 Effet de l'âge du coulis sur le retrait endogène externe

L'influence de l'âge du coulis sur son retrait externe mesuré à partir de début d'essai est présentée aux figures 7.106 à 7.111. On remarque que le retrait externe augmente avec l'âge du coulis, quel que soit le rapport E/L ou le type de liant. On constate aussi que le retrait externe après 14 jours d'hydratation diminue quand le rapport E/L augmente, quel que soit le type de liant.

Les figures 7.112 à 7.117 présentent le retrait externe après 7 et 14 jours d'hydratation qui est mesuré à partir de la prise. On constate que ce retrait augmente avec l'âge du coulis. De plus, le retrait mesuré à 14 jours tend à diminuer quand le rapport E/L augmente. Mentionnons que le retrait externe intrinsèque à 14 jours est toujours un peu plus grand que celui à 7 jours. Il semble que la formation des produits d'hydratation à plus long terme engendre plus de retrait endogène que celle des hydrates formés au plus jeune âge.

7.12.5 Effet du type de liant sur le retrait endogène externe à 14 jours

L'influence du type de liant sur le retrait externe mesuré à partir du début de l'essai est présentée aux figures 7.118 à 7.120. Les figures 7.121 à 7.123 présentent le même retrait mesuré à partir de la prise. Après 14 jours d'hydratation, dans les coulis de rapport E/L = 0,30, les liants à la fumée de silice et au laitier produisent plus de retrait externe que la référence. Cependant, le retrait externe des coulis à la cendre volante est pratiquement égal à celui de la référence. Le retrait intrinsèque externe est le plus important dans le cas des coulis au laitier et des coulis à la fumée de silice, tandis qu'il est le plus faible avec les coulis contenant de la cendre volante (Figure 7.118). Dans le cas des coulis de rapport E/L = 0,35, l'influence des ajouts minéraux sur le retrait externe est semblable à celui observé chez les coulis de rapport 0,30 (Figure 7.119). Quand le rapport E/L augmente à 0,45, le retrait externe du coulis avec 50% de laitier baisse légèrement mais reste supérieur au celui de la référence. Le retrait externe du coulis avec 30% de cendre volante dépasse légèrement celui de la référence, ce qui pourrait être dû au retard de prise plus prononcé des coulis avec fort dosage en cendre volante (Figure 120). À partir de la prise, l'effet du type de liant sur le retrait externe est semblable à celui observé à partir du début de l'essai (Figures 7.121 à 7.123).

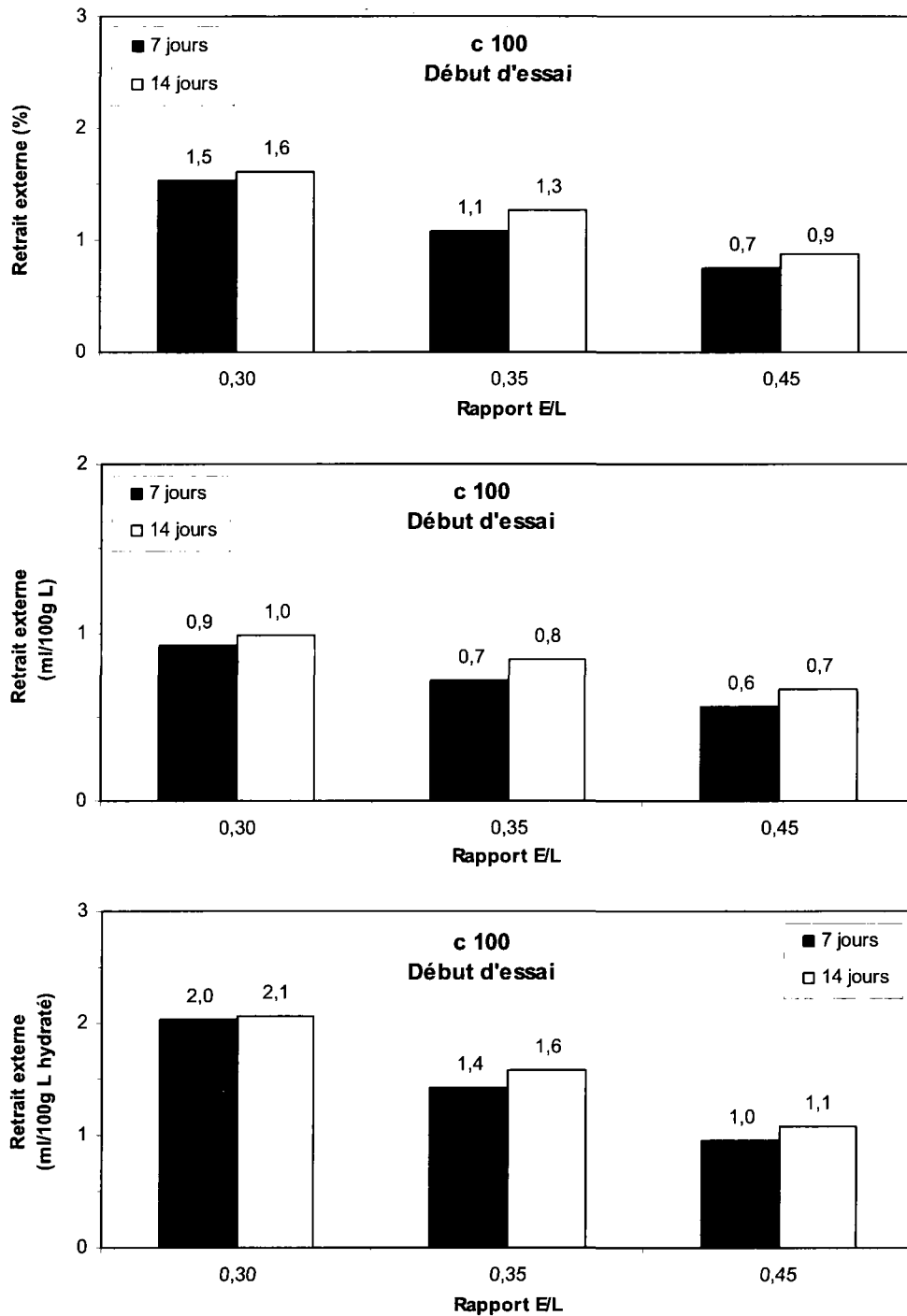


Figure 7. 106 – Retrait externe des coulis de référence après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai

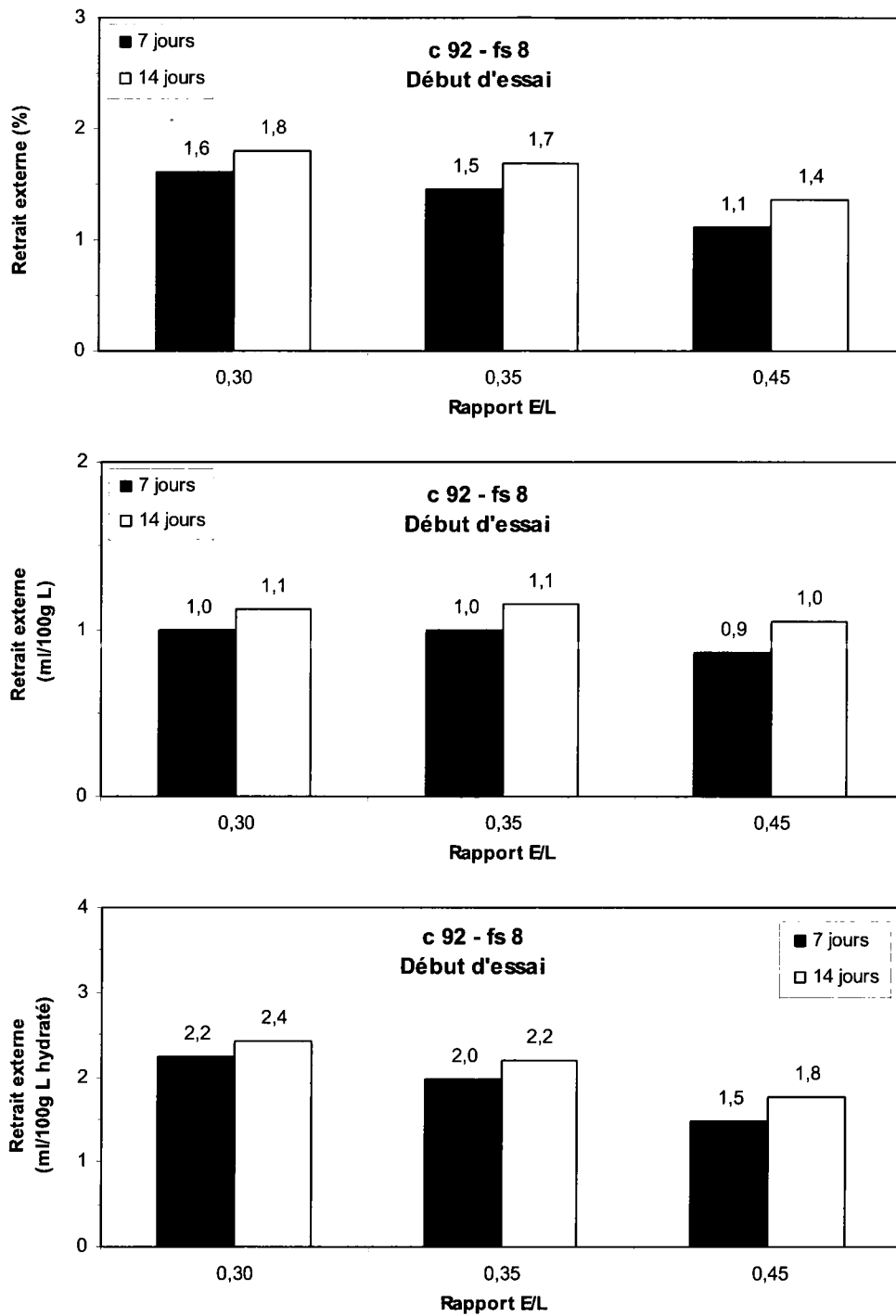


Figure 7. 107 – Retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai

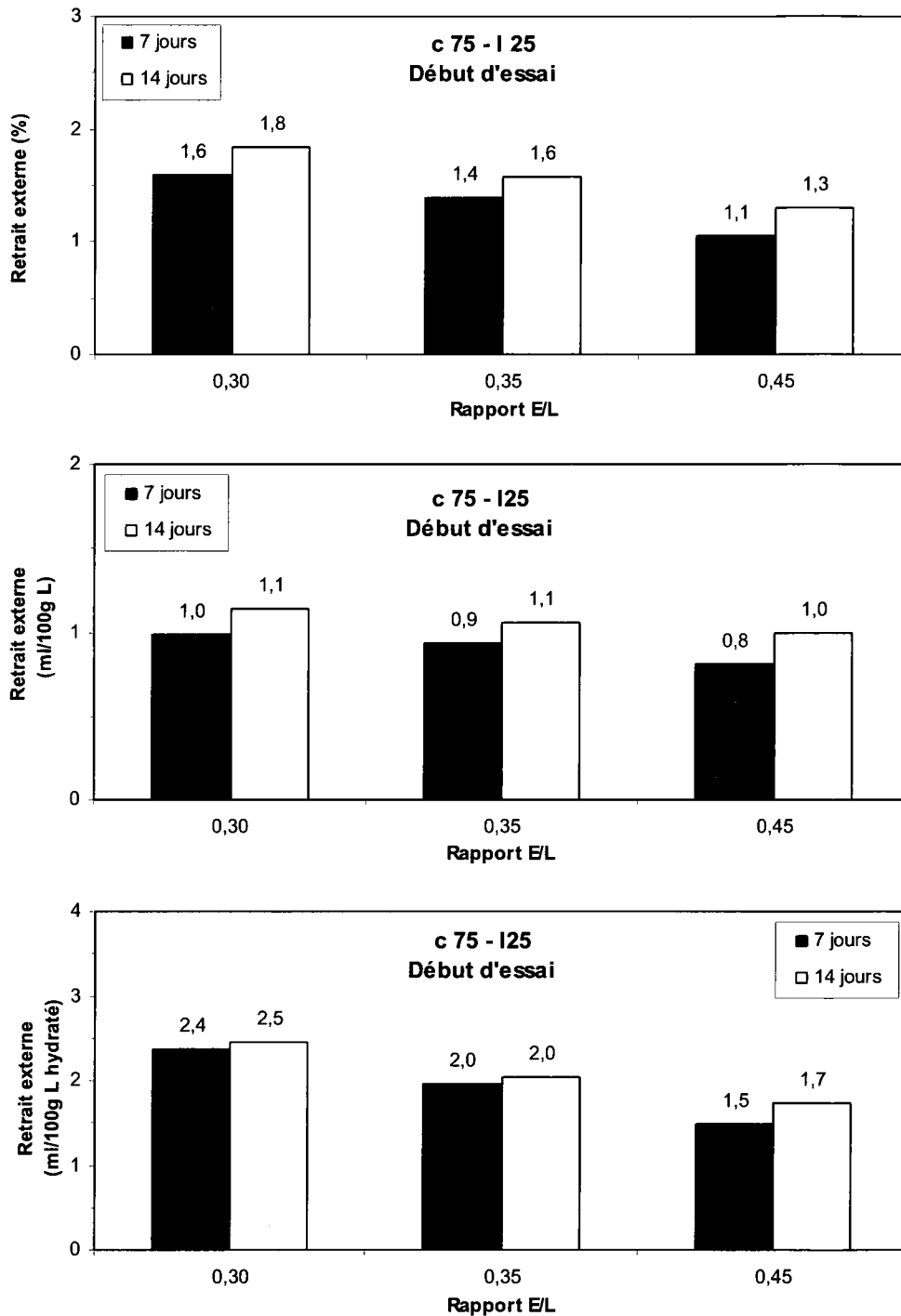


Figure 7. 108 – Retrait externe des coulis avec 25% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai

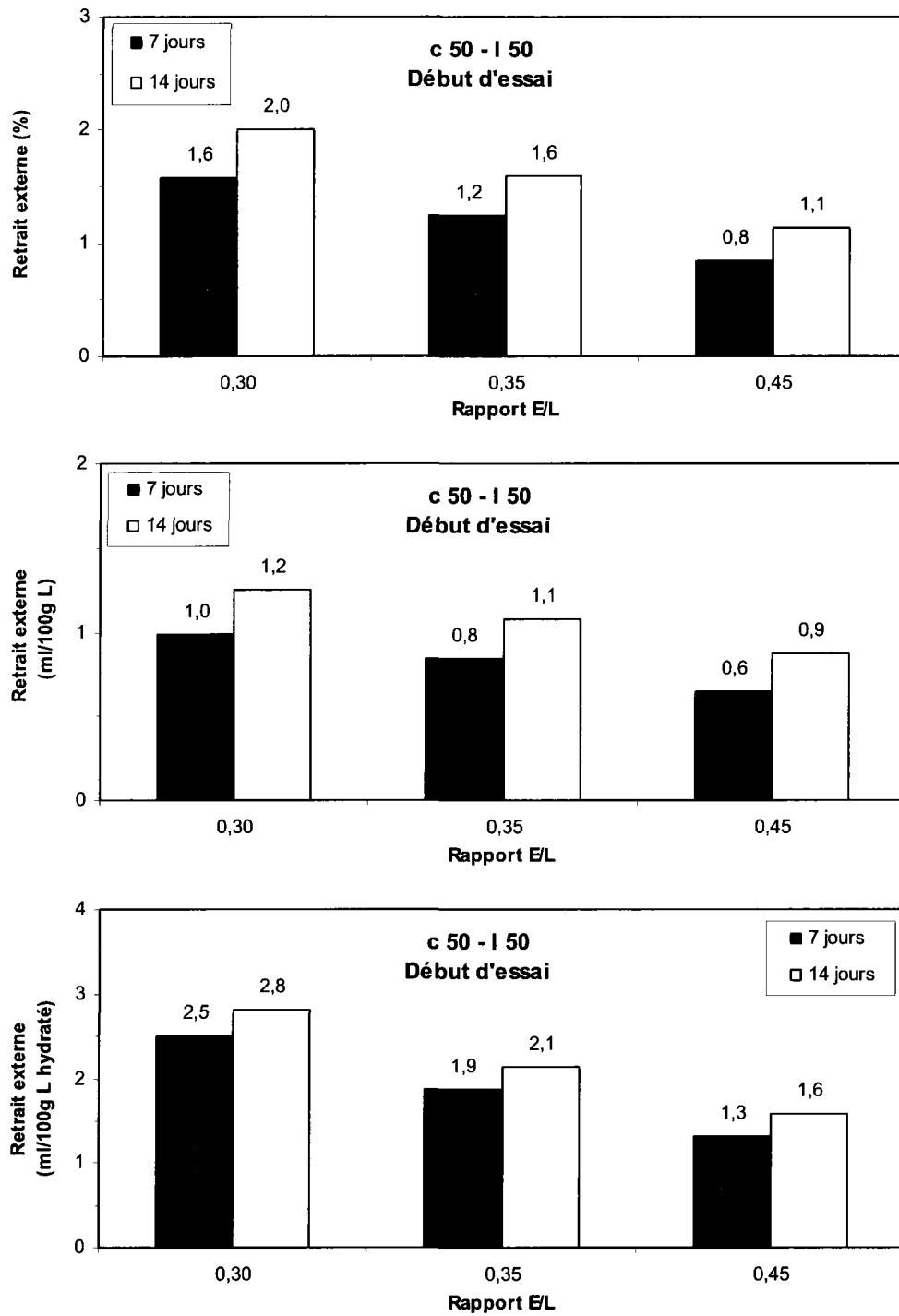


Figure 7. 109 – Retrait externe des coulis avec 50% de laitier après 7 et 14 jours d'hydratation mesuré à partir du début de l'essai

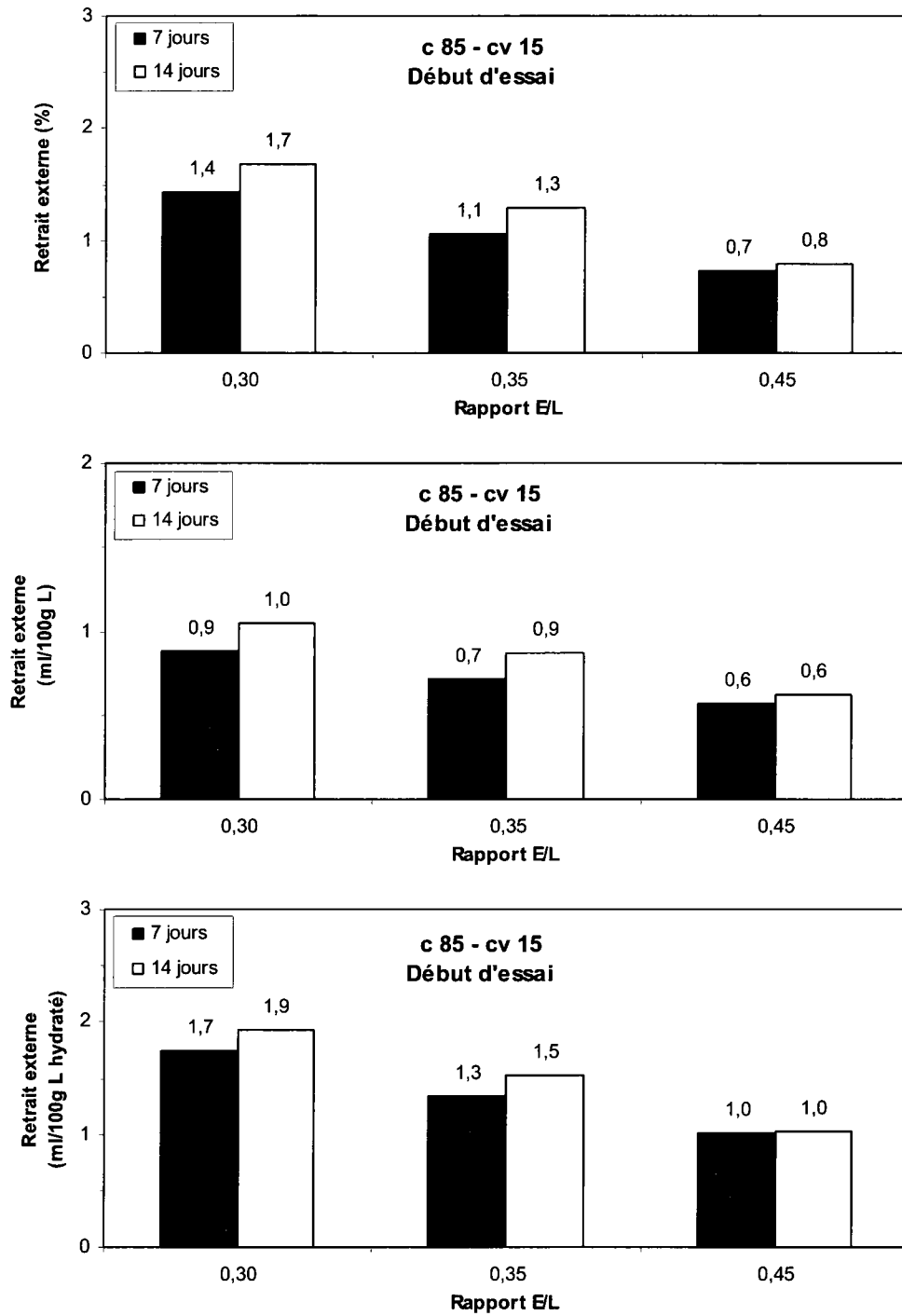


Figure 7. 110 – Retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante après 7 et 14 jours d'hydratation mesuré à partir du début de l'essai

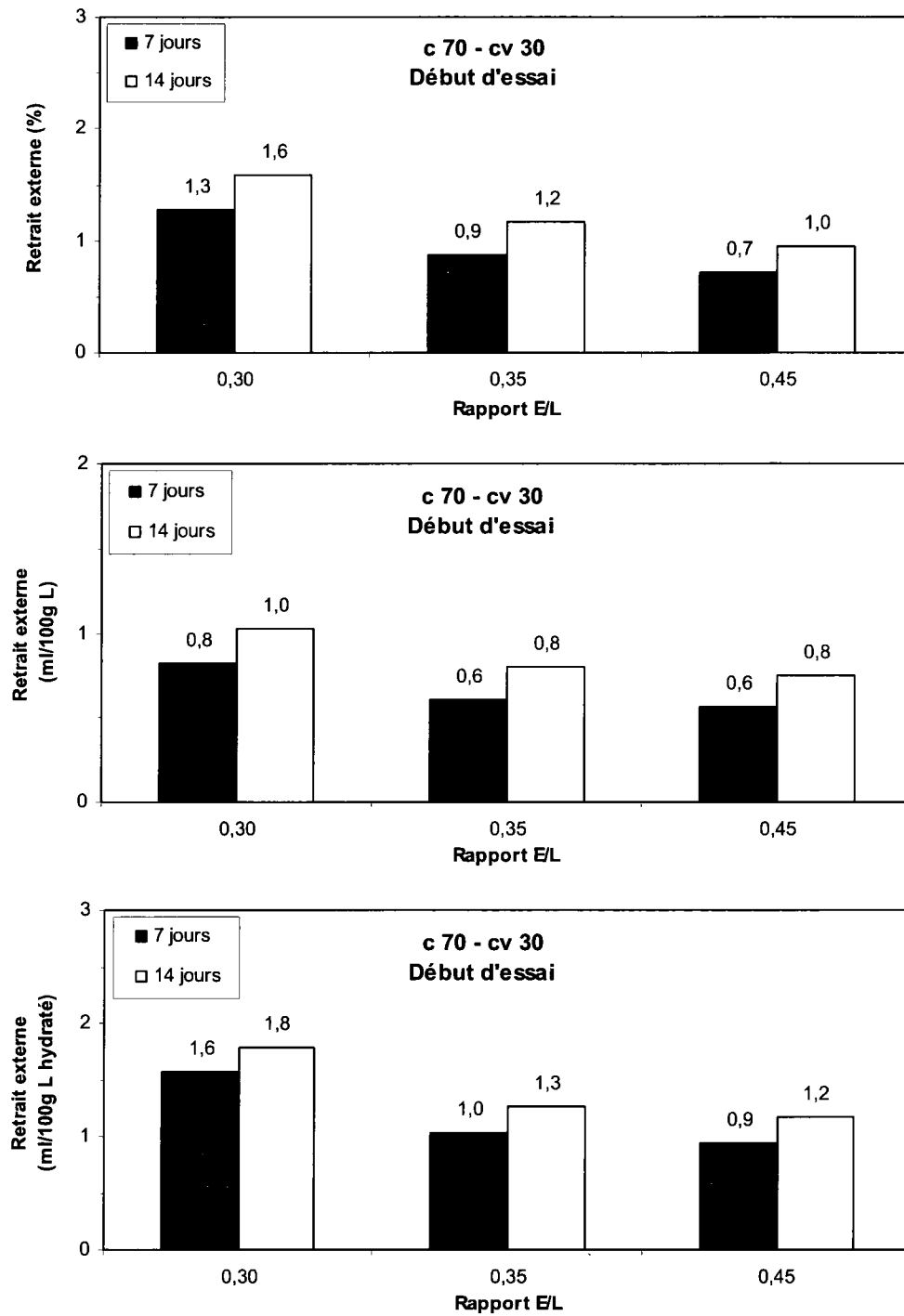


Figure 7. 111 – Retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de l’essai

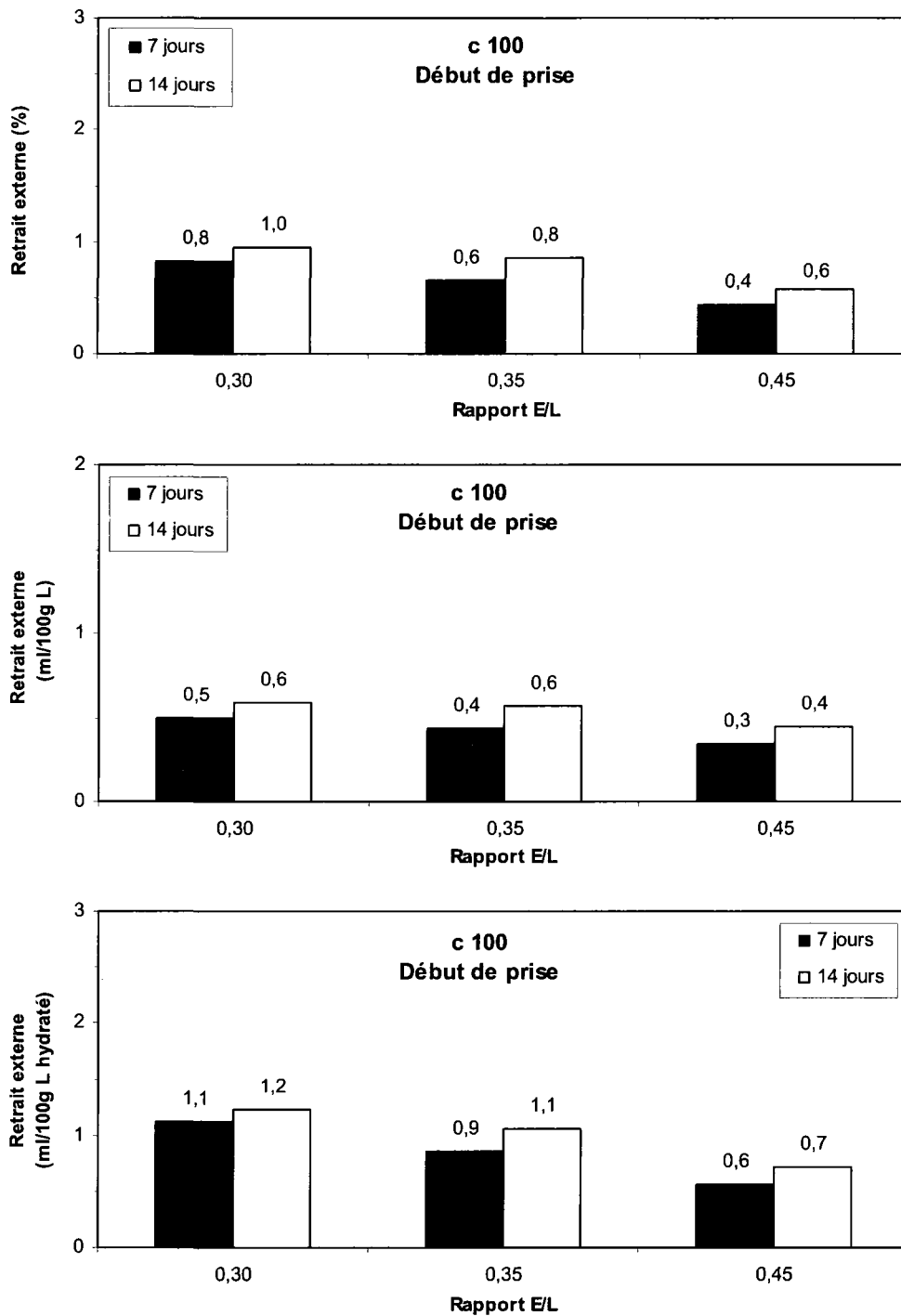


Figure 7. 112 – Retrait externe des coulis de référence après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise

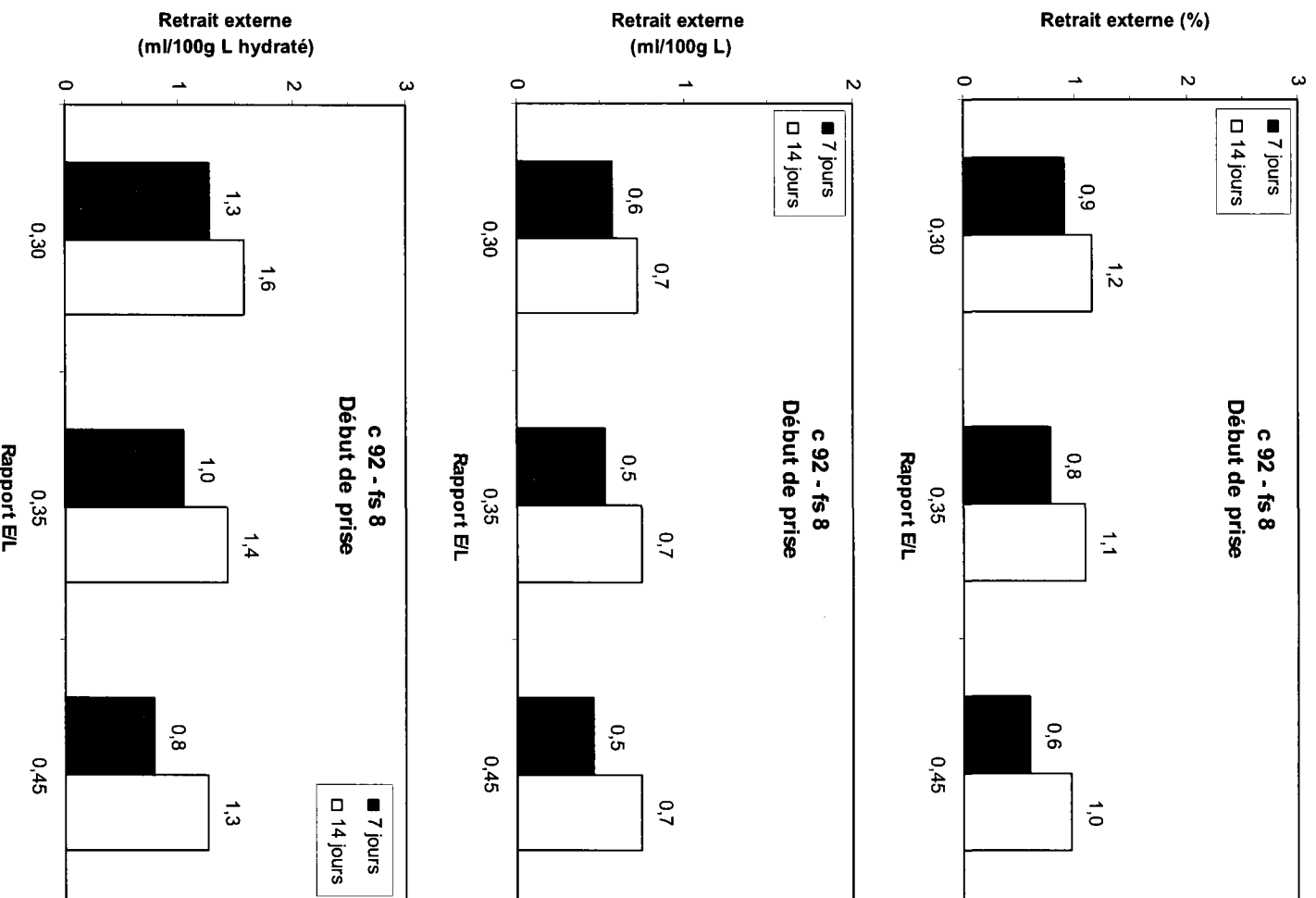


Figure 7. 113 – Retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise

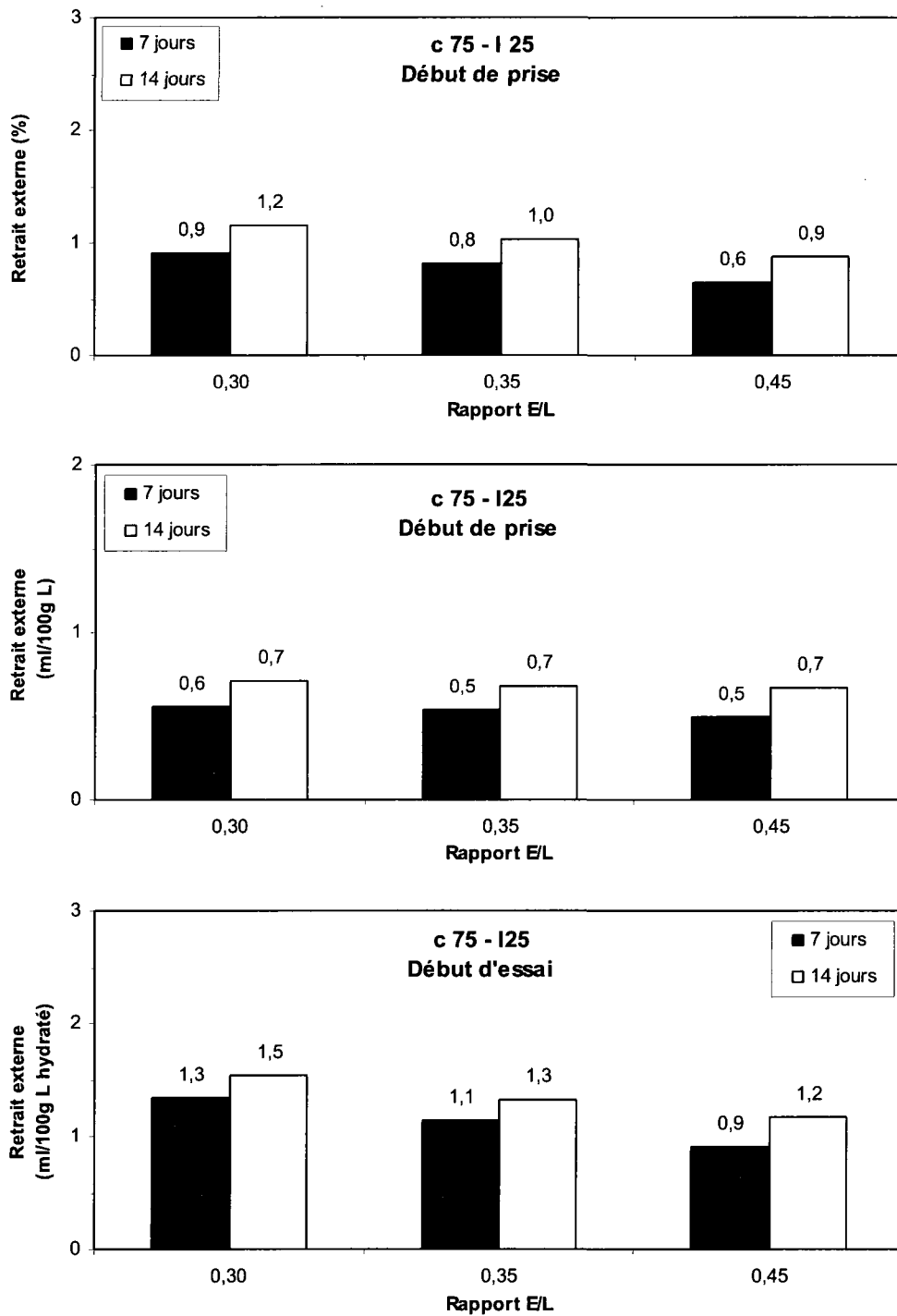


Figure 7. 114 – Retrait externe des coulis avec 25% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise

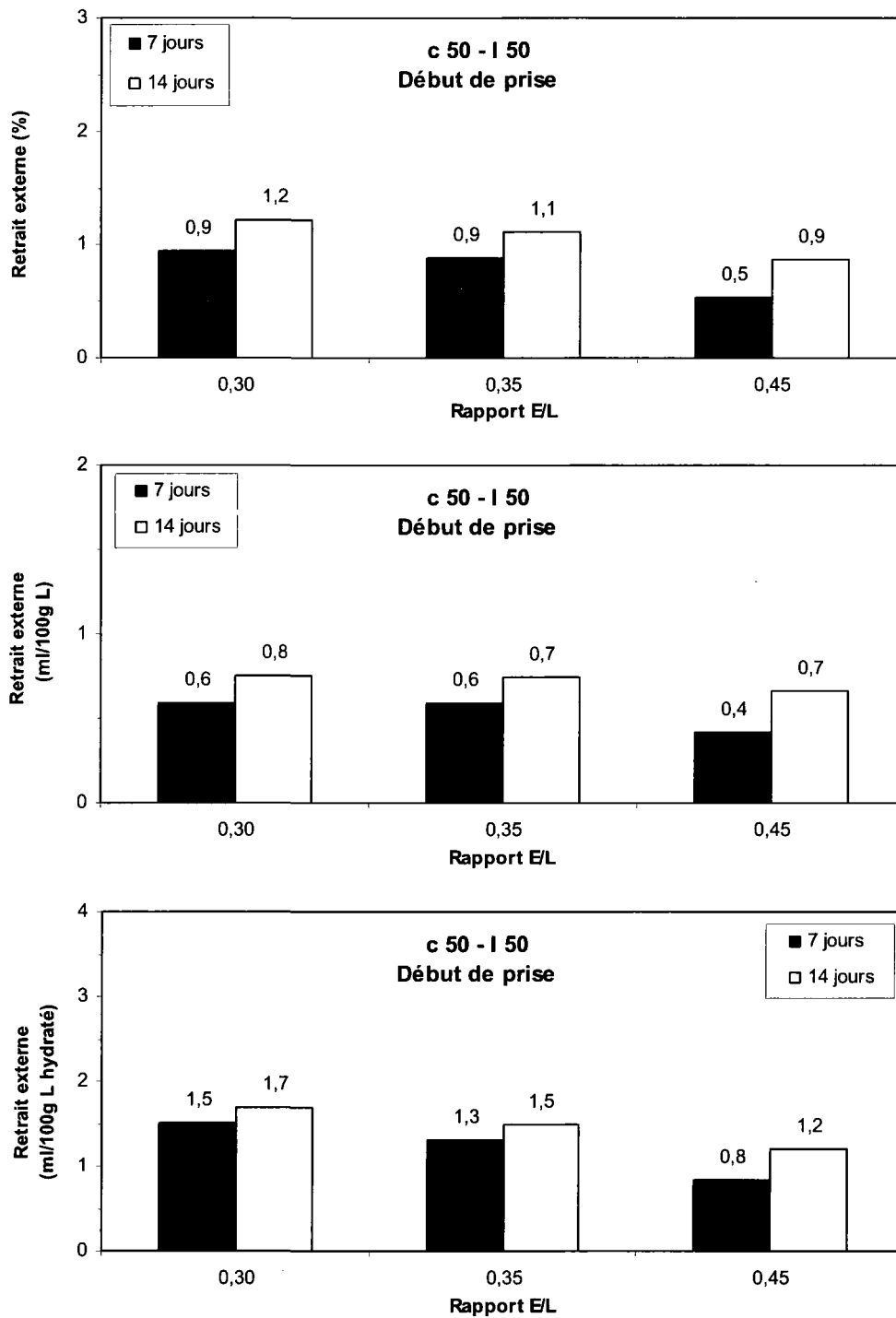


Figure 7. 115 – Retrait externe des coulis avec 50% de laitier après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise

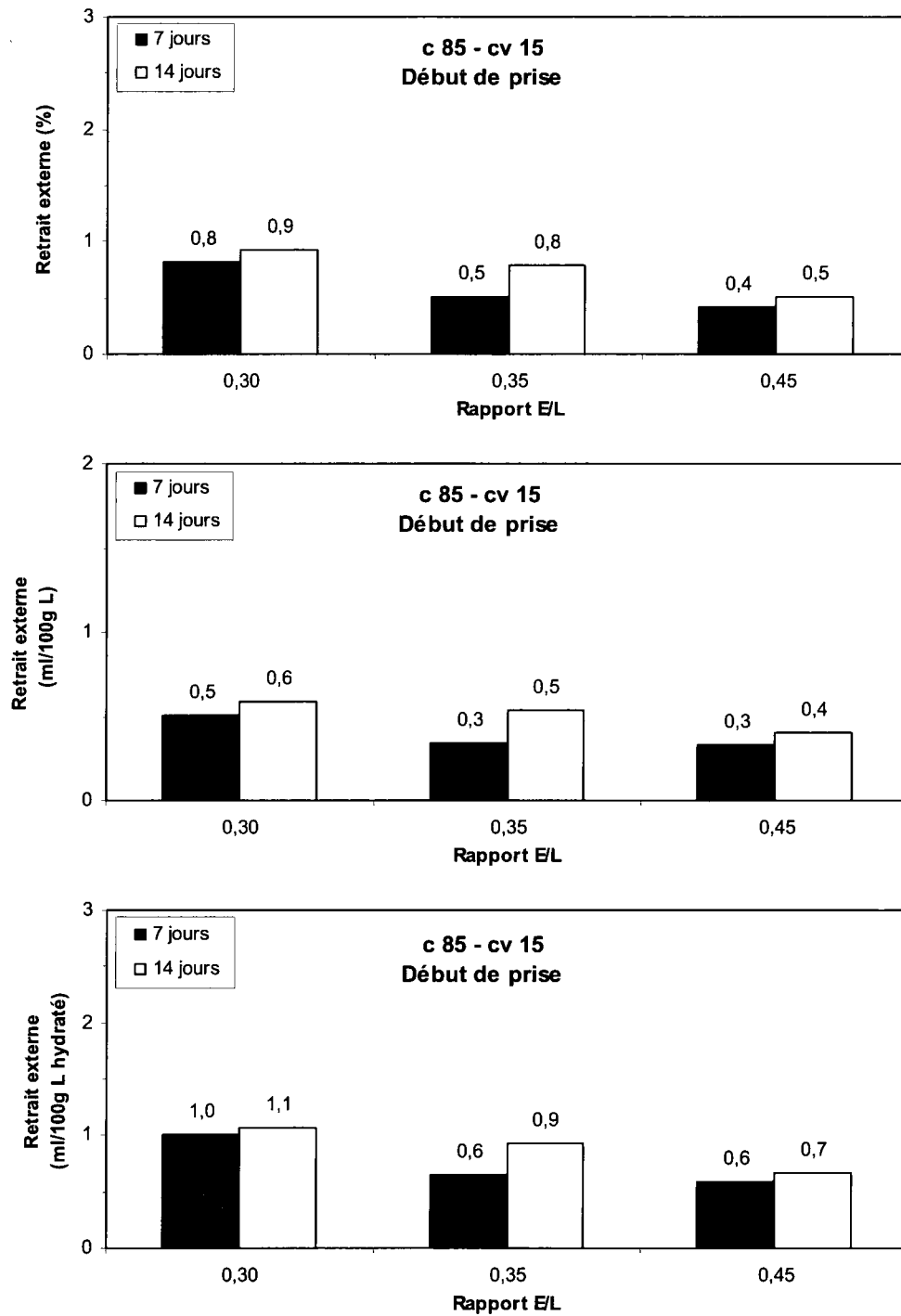


Figure 7. 116 – Retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise

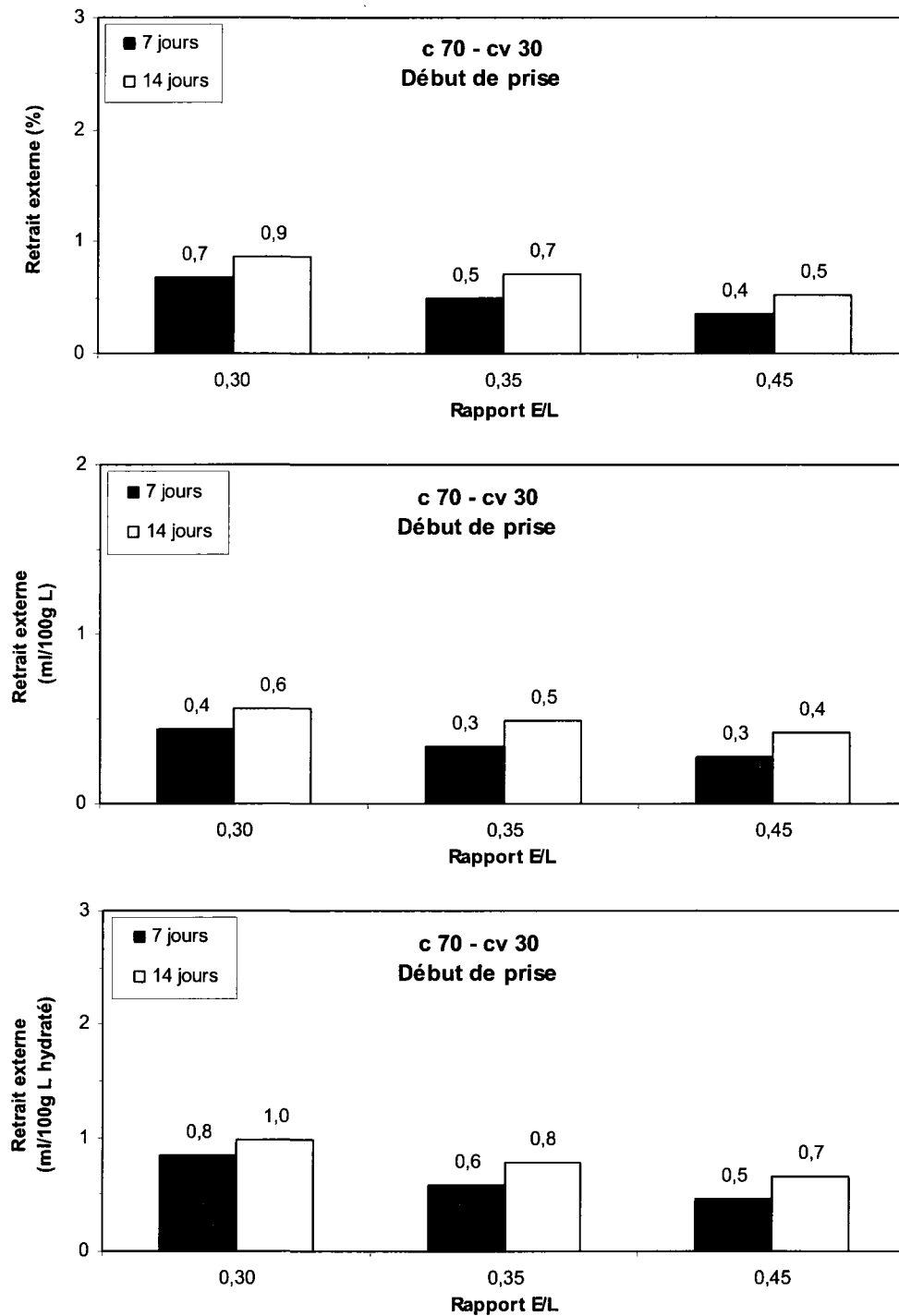


Figure 7. 117 – Retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante après 7 et 14 jours d’hydratation mesuré à partir du début de prise

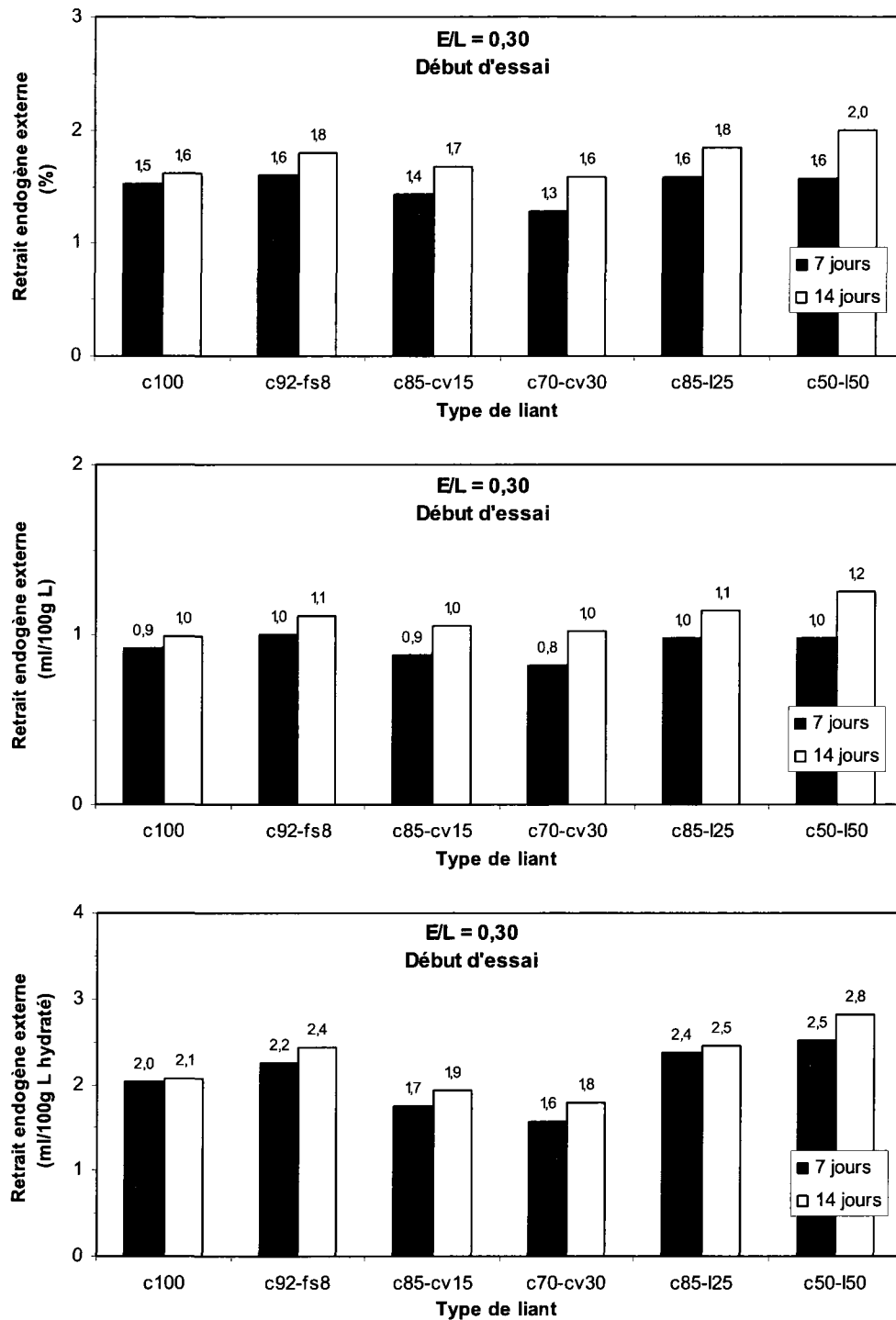


Figure 7. 118 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de l'essai

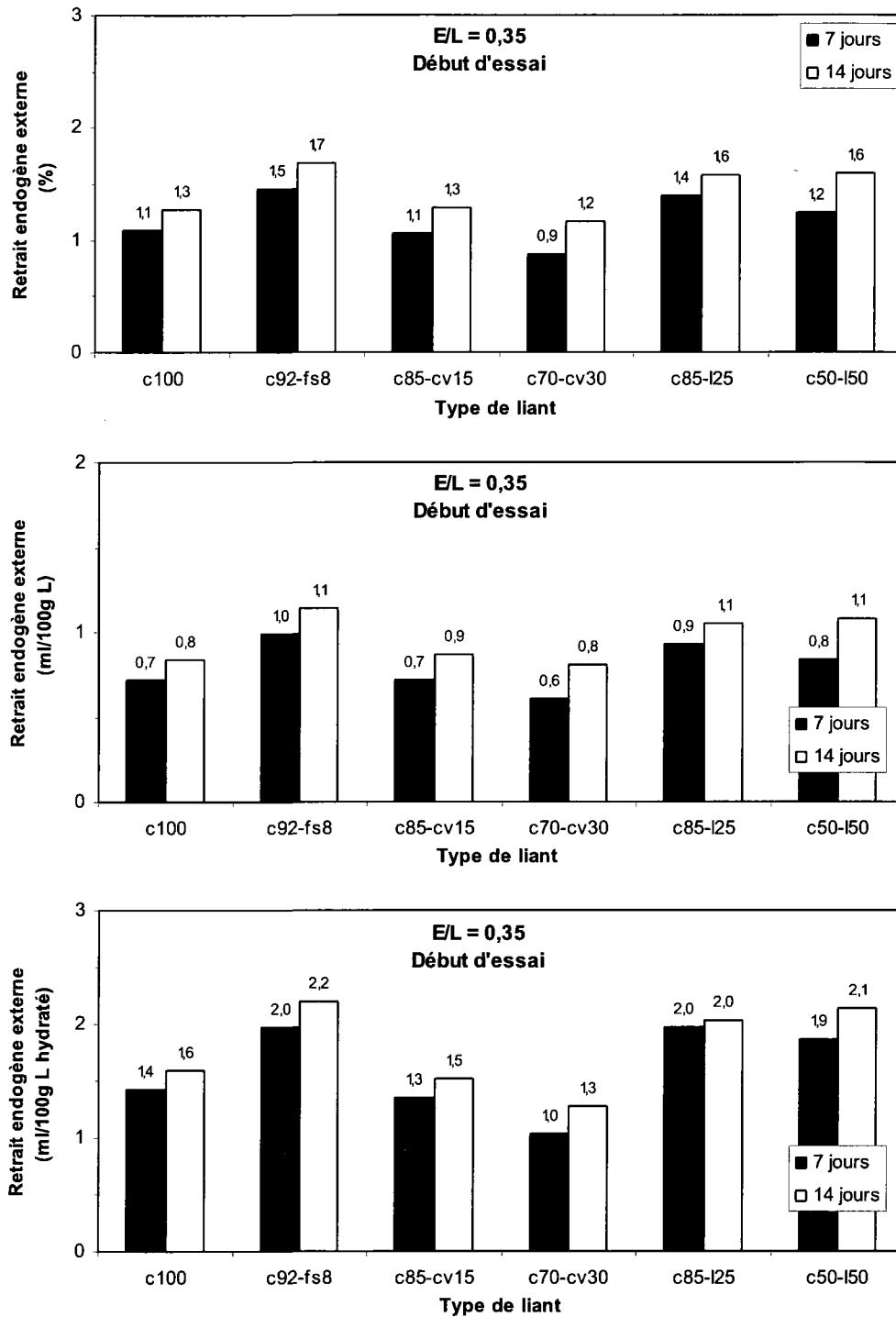


Figure 7. 119 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de l'essai

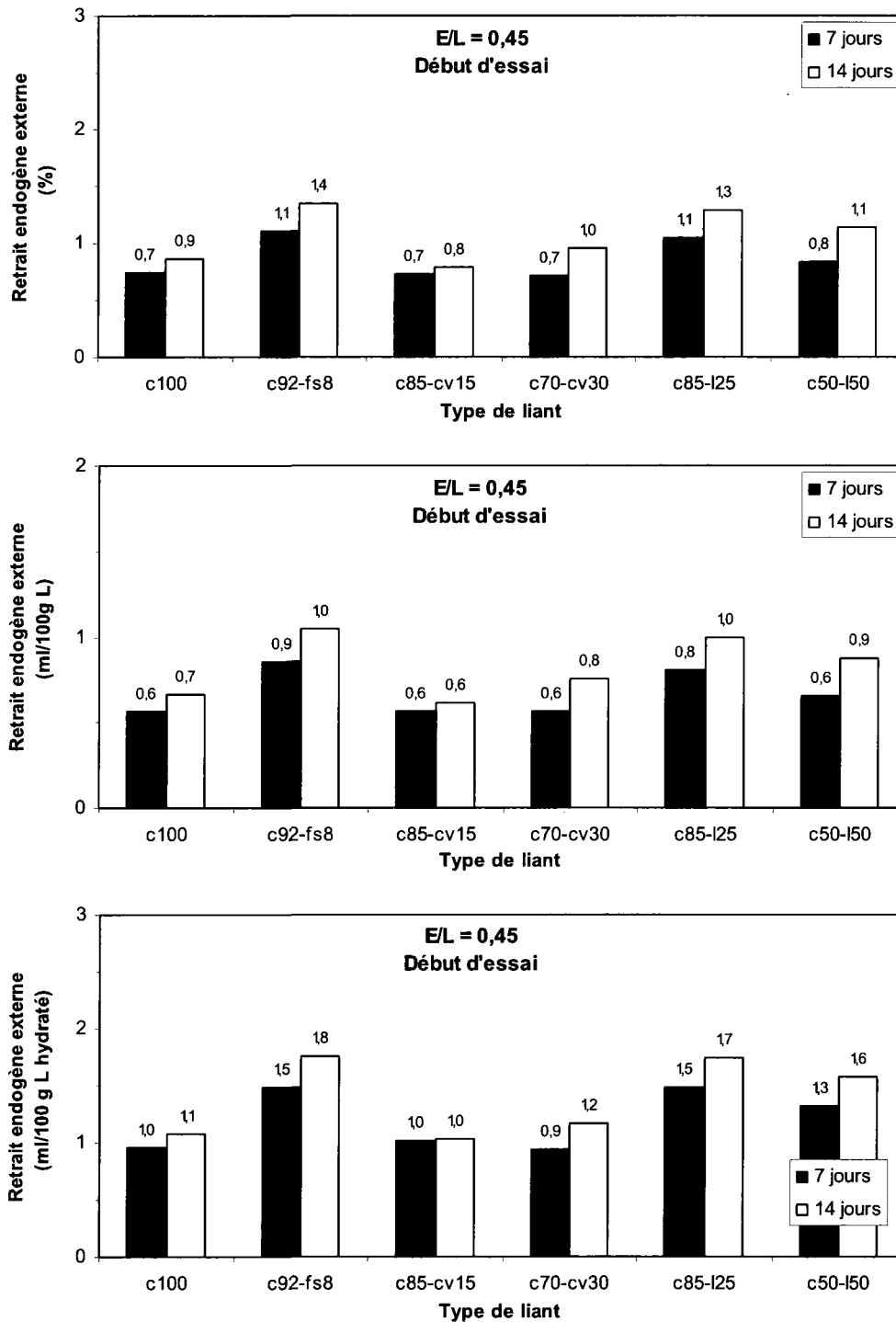


Figure 7. 120 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de l'essai

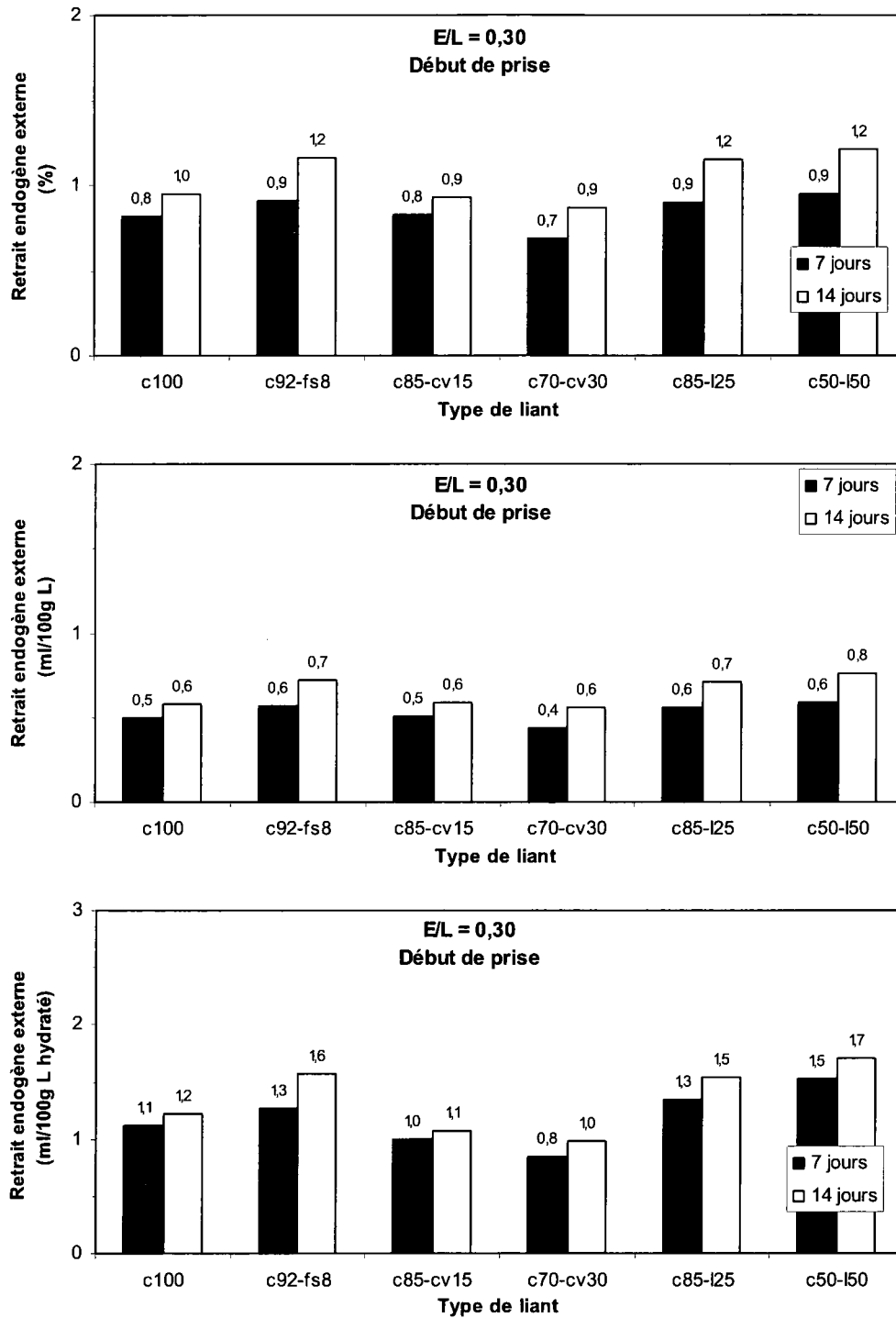


Figure 7. 121 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,30 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de prise

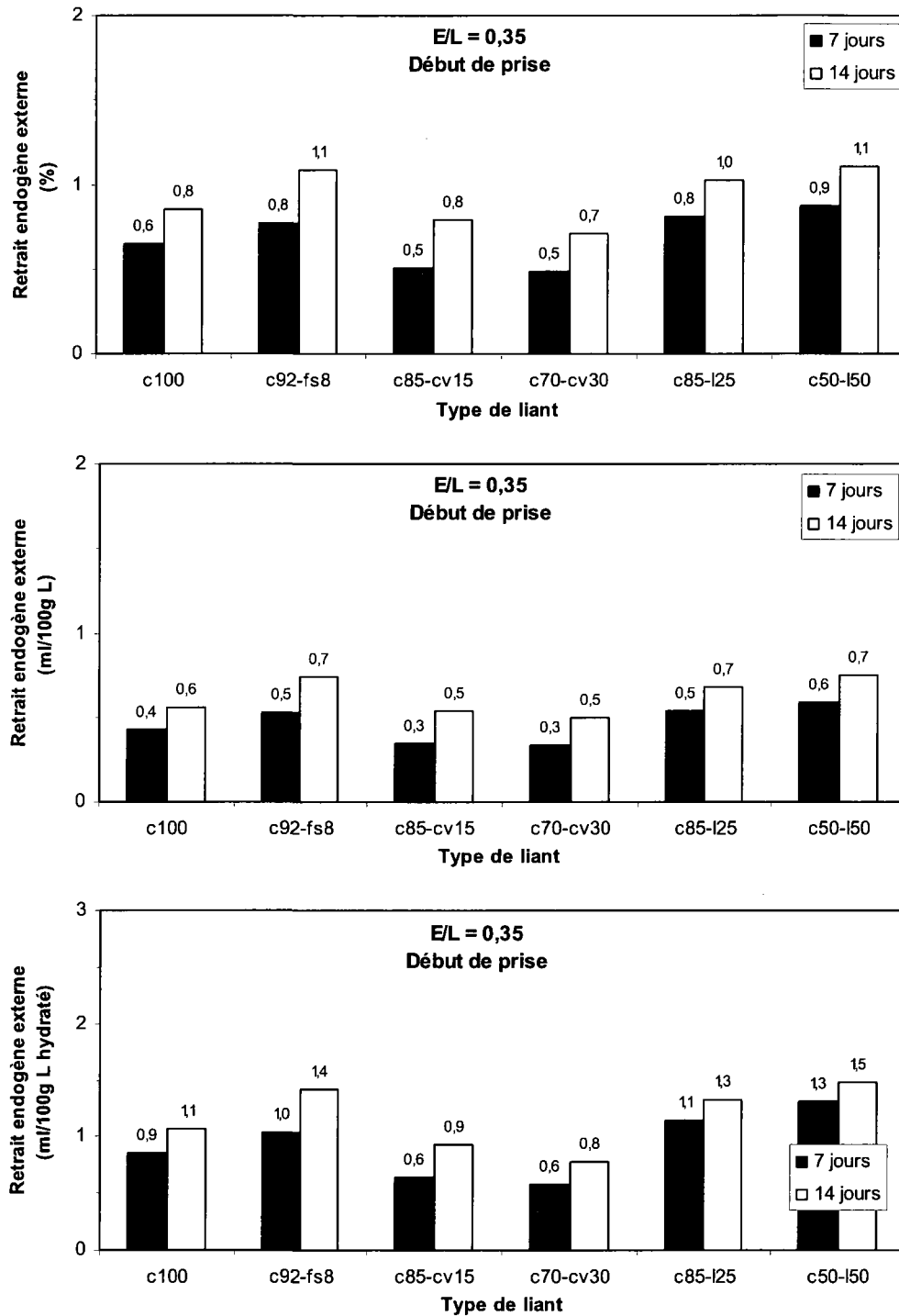


Figure 7. 122 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,35 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de prise

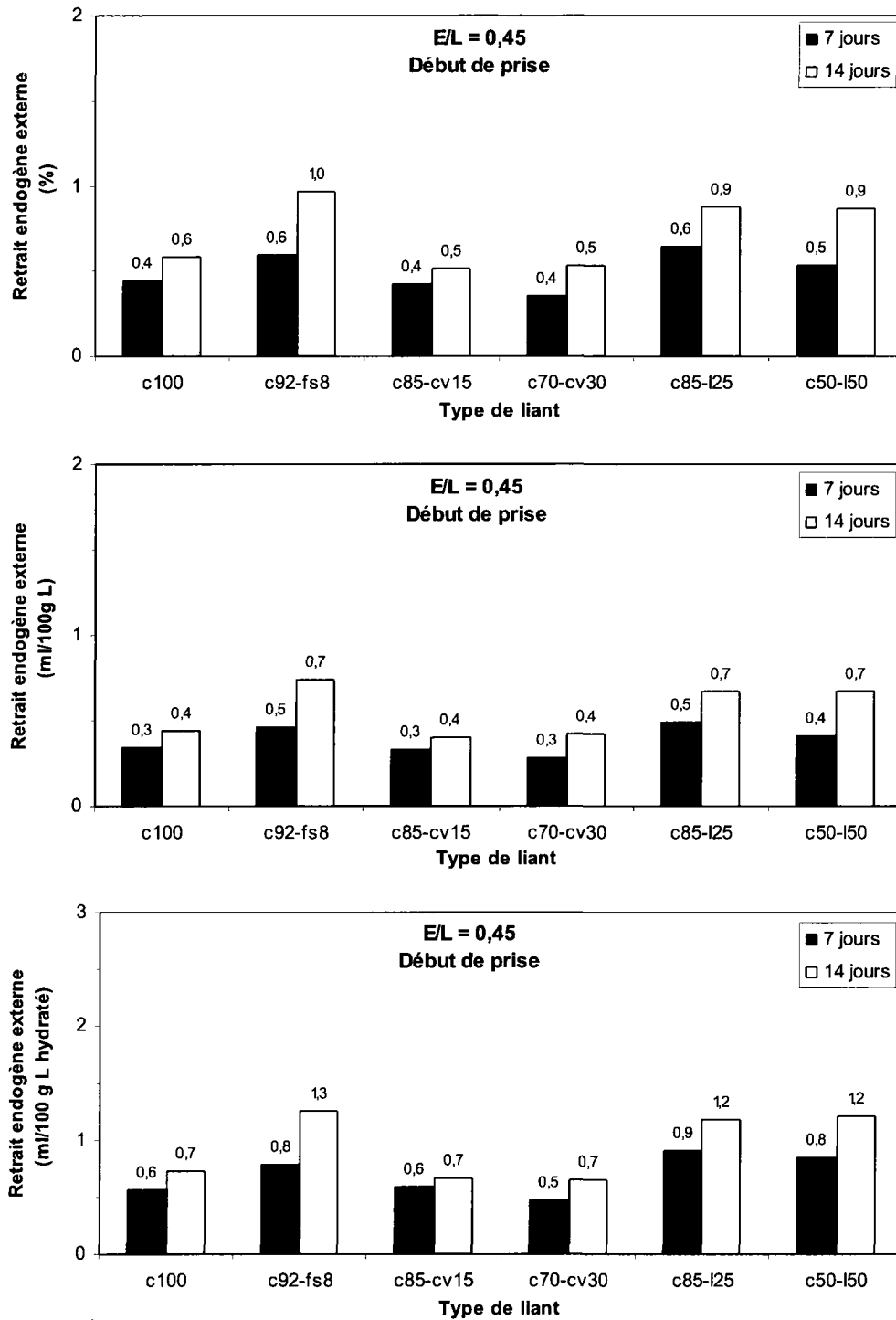


Figure 7. 123 – Retrait externe des coulis de rapport E/L = 0,45 après 7 et 14 jours mesuré à partir du début de prise

7.13 Relation entre le retrait endogène externe et le rayon critique des pores

En milieu scellé, avant la prise du liant, la variation de volume est causée par le retrait chimique qui n'engendre qu'un retrait endogène externe. Après la prise, la variation de volume comprend un retrait endogène externe et un retrait endogène interne. Le retrait endogène externe est causé par l'effet simultané du retrait chimique et de la dépression capillaire. Selon la loi de Laplace, la dépression capillaire dépend du rayon des pores qui pourrait être représenté par le rayon critique présenté dans la partie 6.5 où le rayon critique des pores a été calculé à partir des mesures de la porosité au mercure après 7 jours d'hydratation. La relation entre le rayon critique des pores et le retrait externe à partir de la prise exprimé en pourcentage du volume initial est présenté aux figures 7.124 à 7.129. On remarque que le retrait externe diminue avec l'augmentation du rayon critique des pores quel que soit le type de liant.

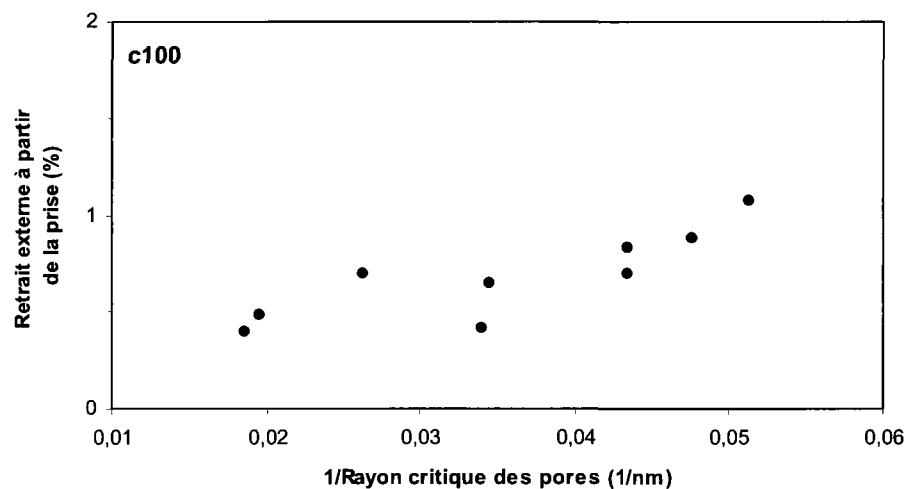


Figure 7. 124 – Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis de référence ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)

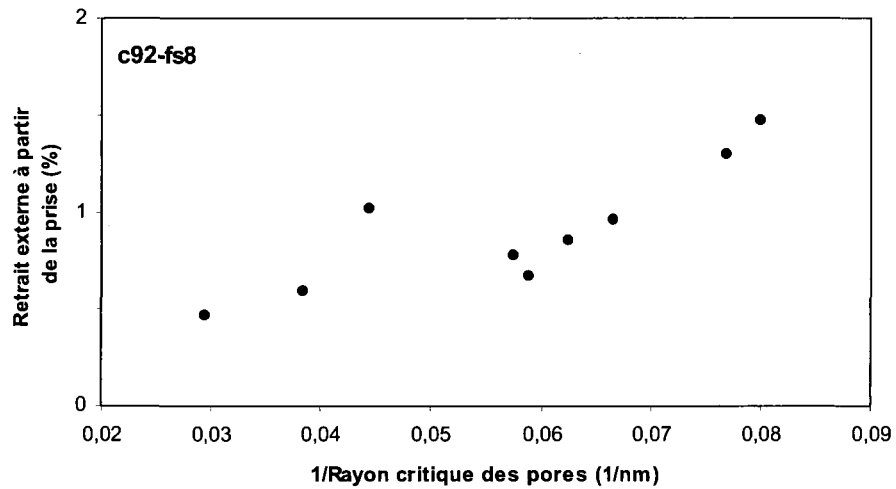


Figure 7. 125 – Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 8% de fumée de silice ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)

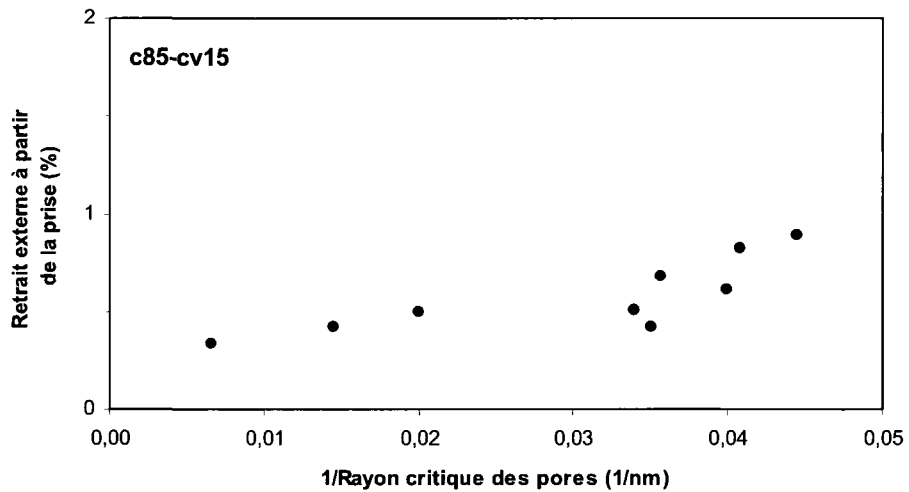


Figure 7. 126 – Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 15% de cendre volante ($E/L = 0,30$ à $0,45$, $T = 10$ à 30°C)

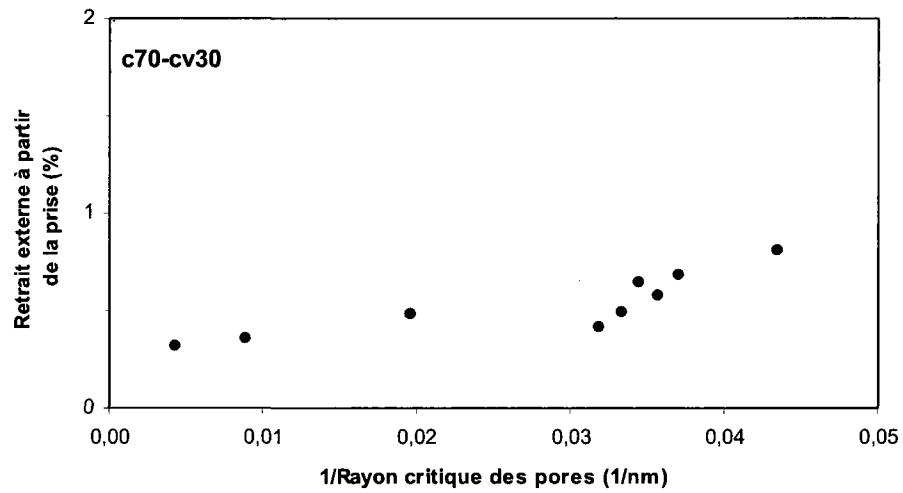


Figure 7. 127 - Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

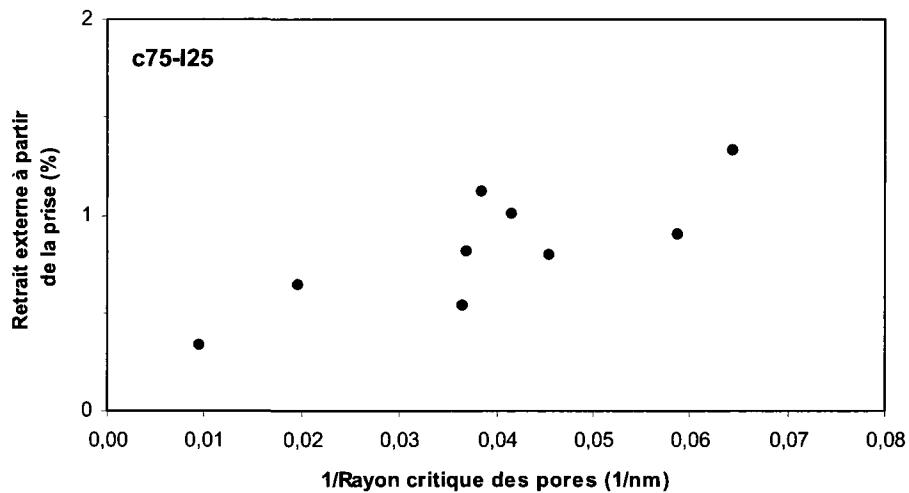


Figure 7. 128 - Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

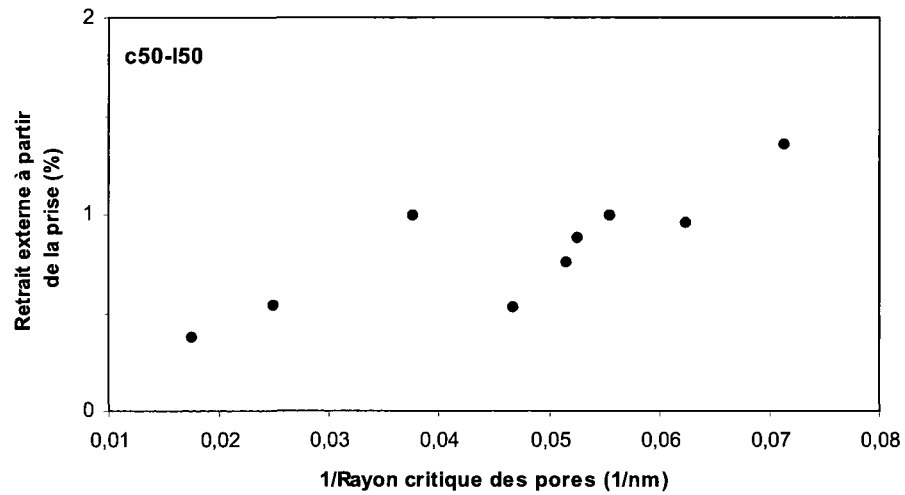


Figure 7. 129 - Relation entre le retrait externe mesuré à partir de la prise et le rayon critique des pores à 7 jours pour les coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30 à 0,45, T = 10 à 30°C)

8 RETRAIT ENDOGÈNE DES MORTIERS

8.1 Introduction

Ce chapitre analyse le retrait endogène des mortiers mesuré à l'aide de la cellule de mesure du retrait endogène. Dans les trois premières parties de ce chapitre, on présente l'influence du rapport E/L et de la teneur en sable sur le développement des retraits interne, externe et total.

Les trois dernières parties du chapitre présentent la relation entre le retrait endogène interne et le degré d'hydratation, la relation entre les retraits endogènes et la teneur en sable ainsi que les risques de fissuration du mortier du au retrait empêché.

8.2 Interprétation et comparaison des courbes du retrait endogène interne des mortiers

8.2.1 Influence du rapport E/L

Les mortiers soumis aux essais de retrait endogène ont été fabriqués avec un ciment Portland de Type 10. Deux teneurs en sable ont été utilisées afin d'obtenir des rapports volumiques pâte de ciment sur sable (V_p/V_s) compris entre 0,8 et 1,6. Tous les essais de retrait endogène sur mortiers ont été réalisés à 20°C. Le retrait a été mesuré pendant 7 jours. Chaque essai a été répété à trois reprises afin d'obtenir une mesure plus représentative. Les figures 8.1 et 8.2 présentent les courbes de retrait interne des mortiers fabriqués avec un rapport E/L compris entre 0,30 et 0,45.

Dans les mortiers plus riches en sable, dont le rapport E/L est de 0,30 et 0,35, le retrait interne se développe plus rapidement pendant les premiers 24 heures. À partir de 24 heures, on observe une stabilisation du retrait interne qui évolue ensuite plus lentement jusqu'à 7 jours. Quand le rapport E/L augmente à 0,40, puis à 0,45, le retrait interne se stabilise après 48 heures d'hydratation. À la fin de l'essai le retrait interne atteint une plus grande valeur si le rapport E/L du mortier est plus élevé (Figure 8.1).

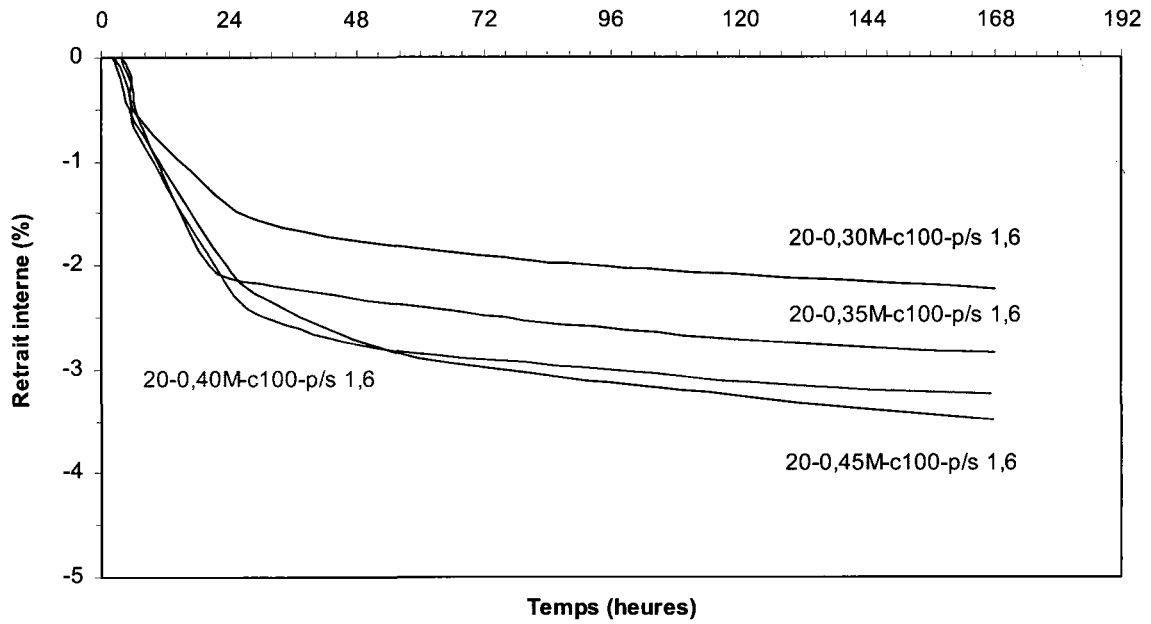


Figure 8. 1 – Courbes de retrait interne des mortiers ($V_p/V_s = 1,6$)

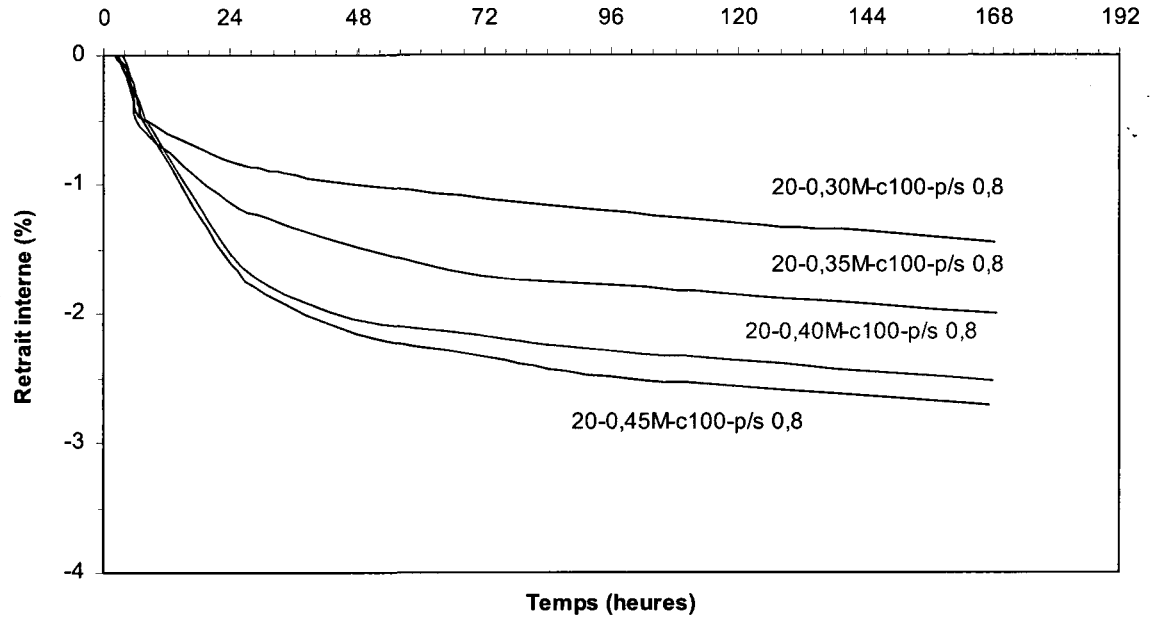


Figure 8. 2 - Courbes de retrait interne des mortiers ($V_p/V_s = 0,8$)

Quand le rapport volumique entre la pâte et le sable diminue à 0,8, le retrait interne progresse plus rapidement pendant les premières 24 heures, puis se stabilise par la suite, quel que soit le rapport E/L. Les valeurs du retrait interne après 7 jours d'hydratation sont plus importantes quand le rapport E/L du mortier est plus élevé (Figure 8.2) étant donné que le degré d'hydratation du liant augmente avec l'augmentation du rapport E/L.

8.2.2 Influence de la teneur en sable

L'influence de la teneur en sable sur l'allure des courbes du retrait interne est présentée aux figures 8.3 à 8.6. L'influence de la teneur en sable est évidente après les premières 8 heures d'hydratation quand les courbes commencent à s'écarter. Entre les 8 et 24 heures, la progression du retrait interne diminue avec l'augmentation de la teneur en sable. Cette tendance est visible jusqu'à la fin d'essai. L'influence de la teneur en sable sur les courbes du retrait interne est indépendante du rapport E/L. Ces résultats montrent que le retrait endogène interne diminue lorsque la proportion de pâte diminue dans le mortier. Ce phénomène est normal puisque le retrait endogène interne se produit dans la pâte de ciment.

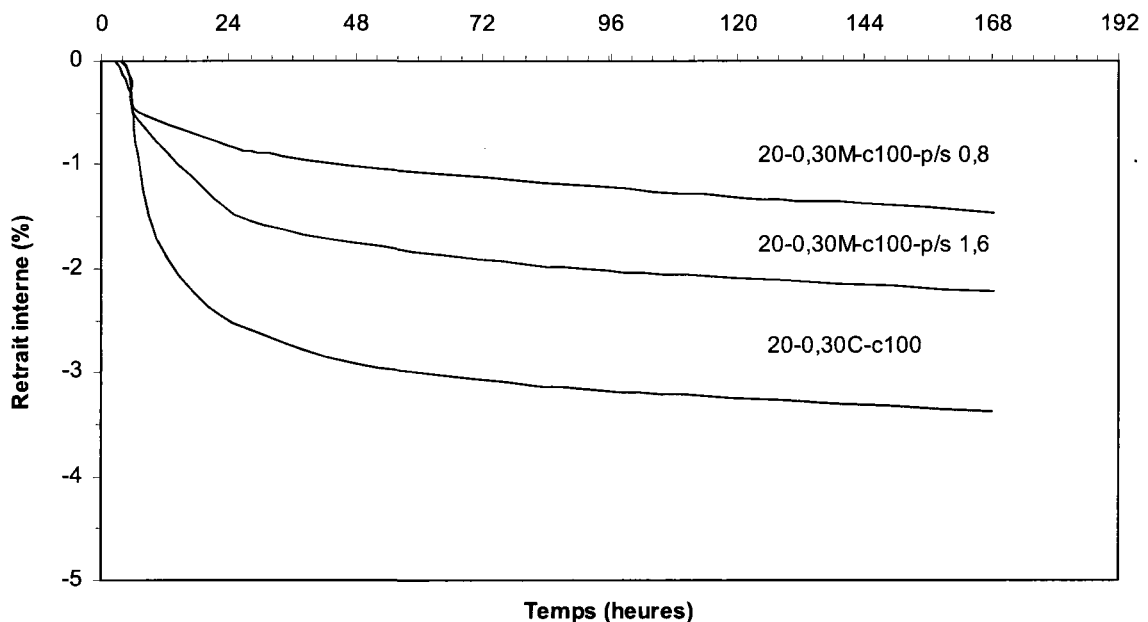


Figure 8. 3 – Courbes de retrait interne des mortiers de rapport E/L = 0,30 ayant différents dosages de sable

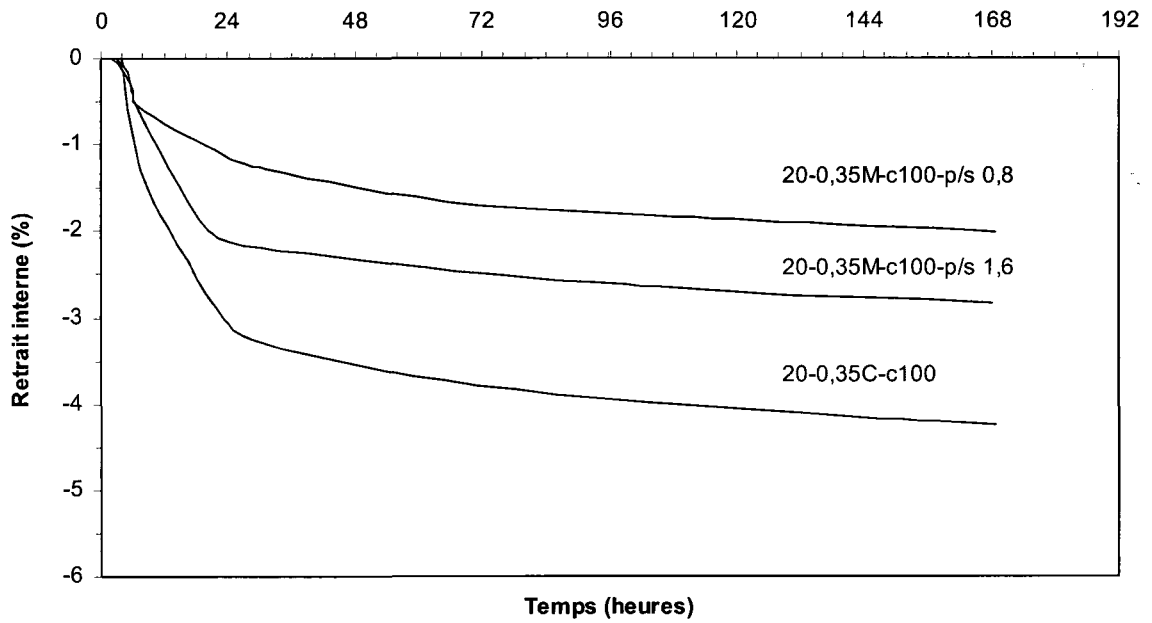


Figure 8. 4 - Courbes de retrait interne des mortiers de rapport E/L = 0,35 ayant différents dosages de sable

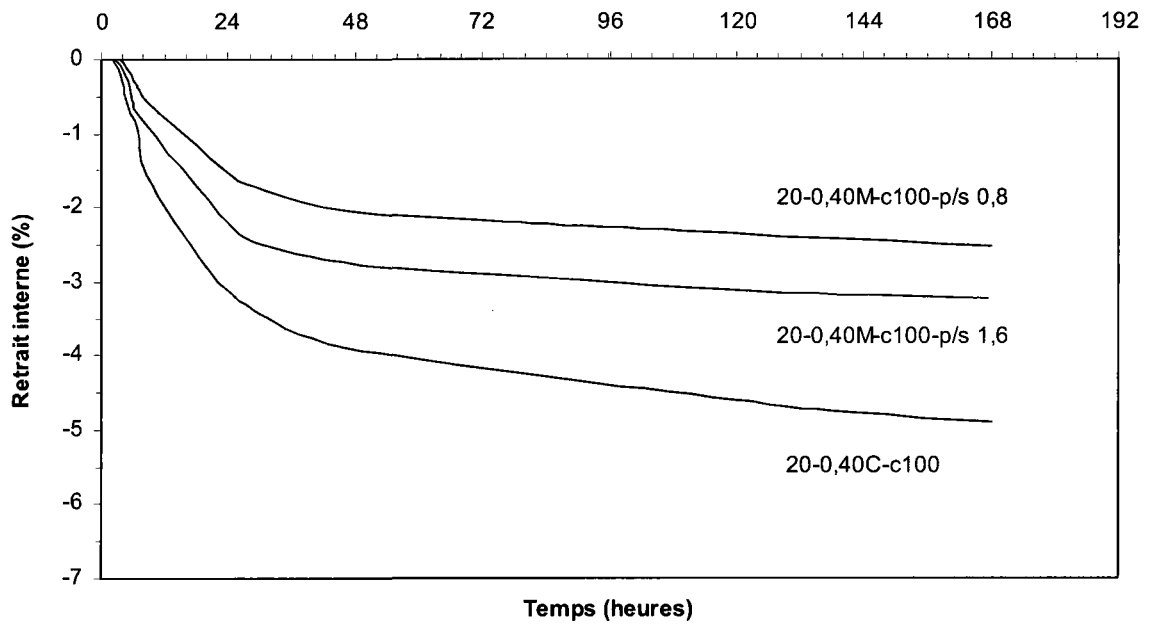


Figure 8. 5 - Courbes de retrait interne des mortiers de rapport E/L = 0,40 ayant différents dosages de sable

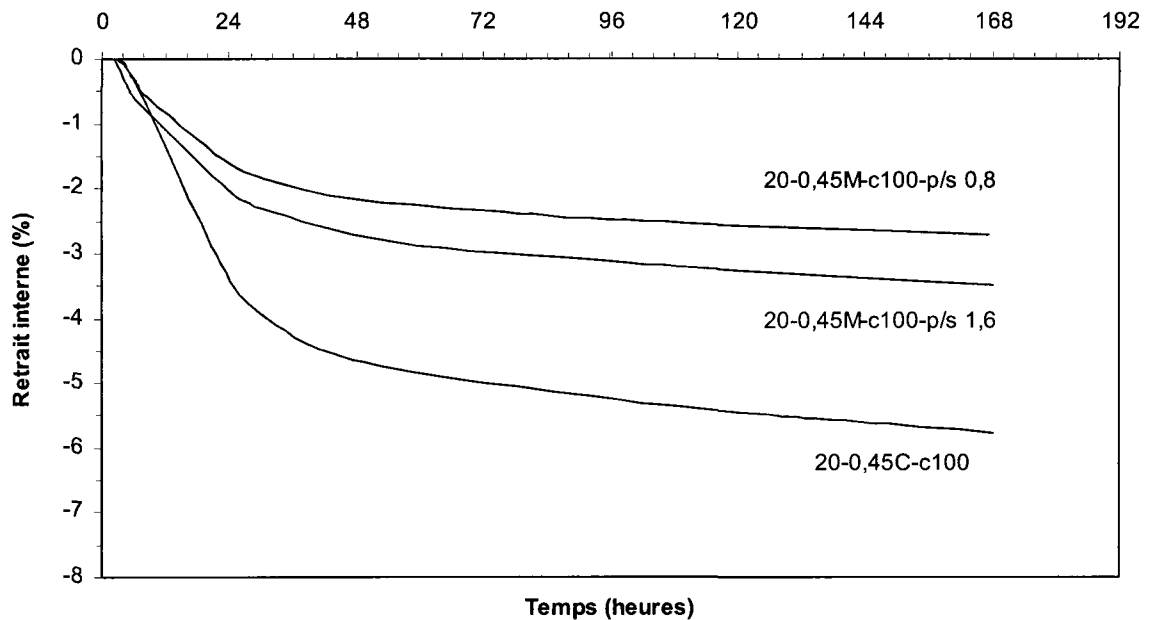


Figure 8. 6 - Courbes de retrait interne des mortiers de rapport E/L = 0,45 ayant différents dosages de sable

8.3 Interprétation et comparaison des courbes du retrait endogène externe des mortiers

8.3.1 Influence du rapport E/L

L'influence du rapport E/L sur l'allure des courbes du retrait externe est présentée aux figures 8.7 et 8.8. Comme dans le cas des coulis, le retrait externe est plus important dans les mortiers avec un faible rapport E/L.

8.3.2 Influence de la teneur en sable

Les figures 8.9 à 8.12 montrent l'effet de la teneur en sable sur le retrait externe, pendant les premiers 7 jours d'hydratation. On remarque que le retrait externe est plus important dans les coulis que dans les mortiers, quel que soit le rapport E/L. La dilatation thermique qui se produit pendant les premiers 24 heures est toujours plus importante dans les coulis que dans les mortiers. La plus grande dilatation thermique des coulis est probablement due à la plus grande quantité de ciment par m^3 , ce qui augmente l'intensité du dégagement thermique. Le retrait externe est plus faible dans les mortiers qui ont plus de sable. Cependant, pour un même

rapport E/L, l'influence de la teneur en sable sur le retrait externe des mortiers reste relativement faible.

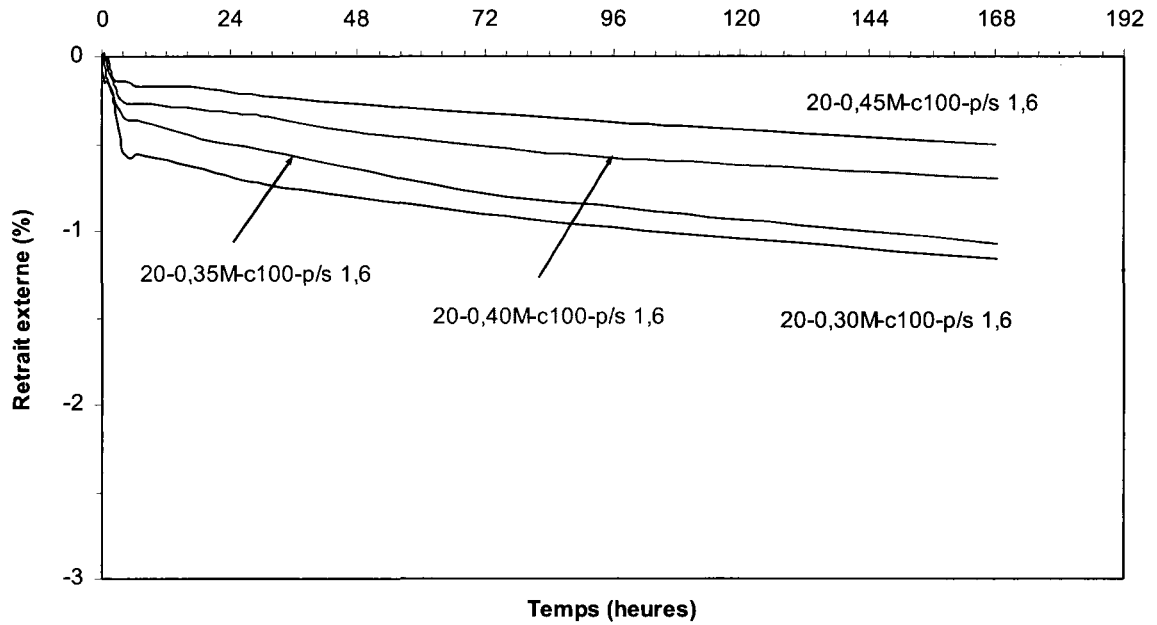


Figure 8. 7 - Courbes de retrait externe des mortiers ($V_p/V_s = 1,6$)

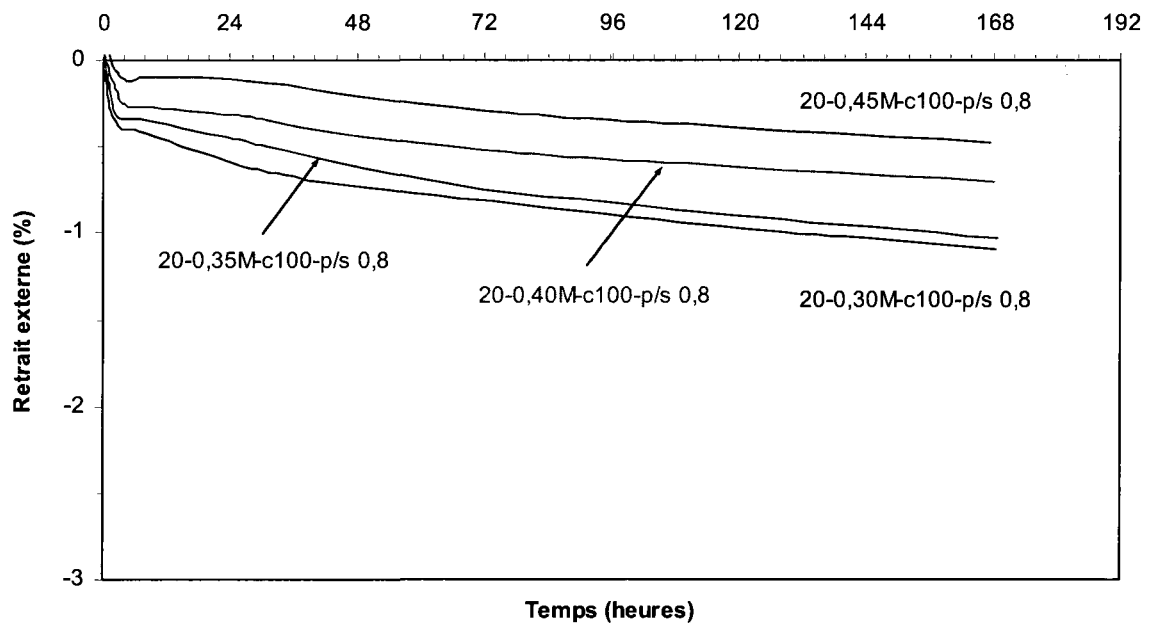


Figure 8. 8 - Courbes de retrait externe des mortiers ($V_p/V_s = 0,8$)

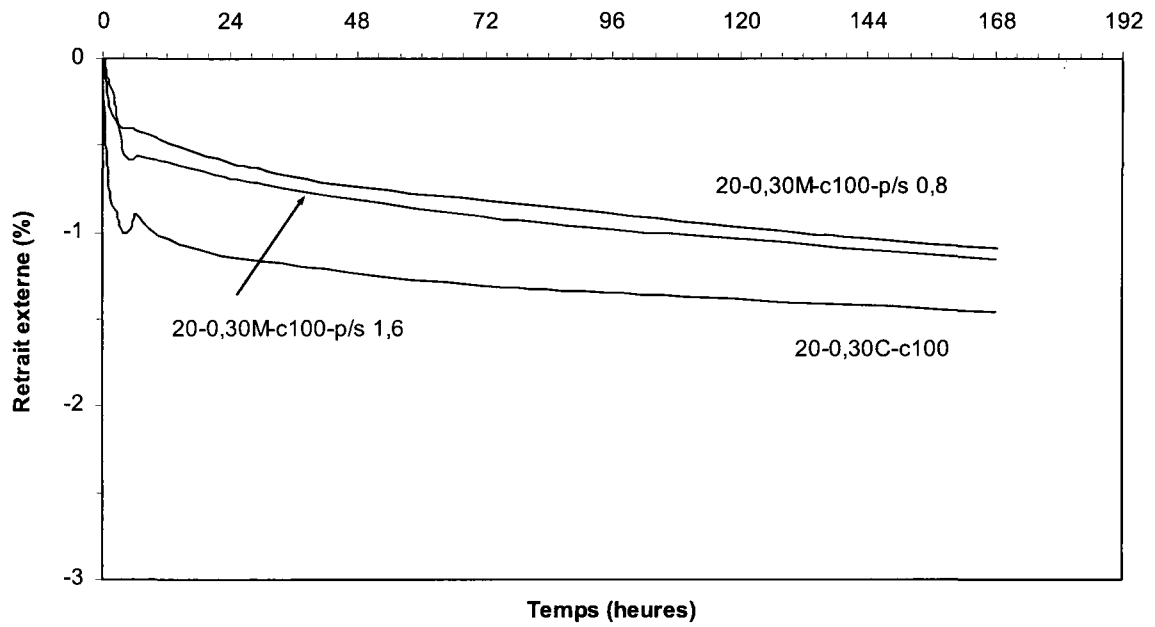


Figure 8. 9 – Courbes de retrait externe des mortiers de rapport E/L = 0,30 ayant différents dosages de sable

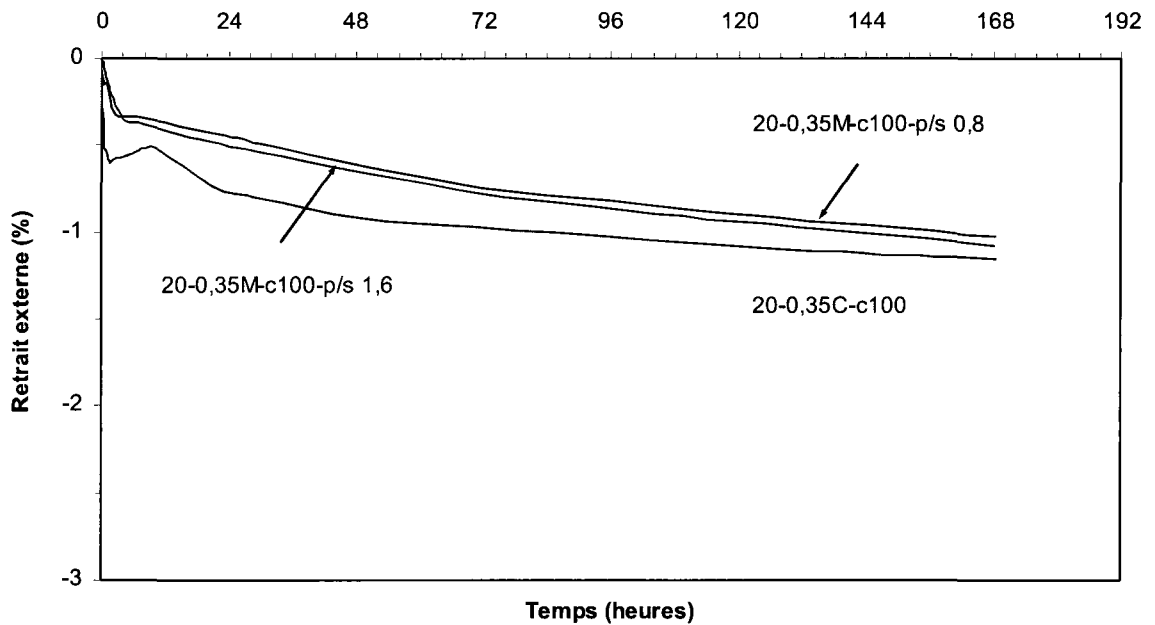


Figure 8. 10 - Courbes de retrait externe des mortiers de rapport E/L = 0,35 ayant différents dosages de sable

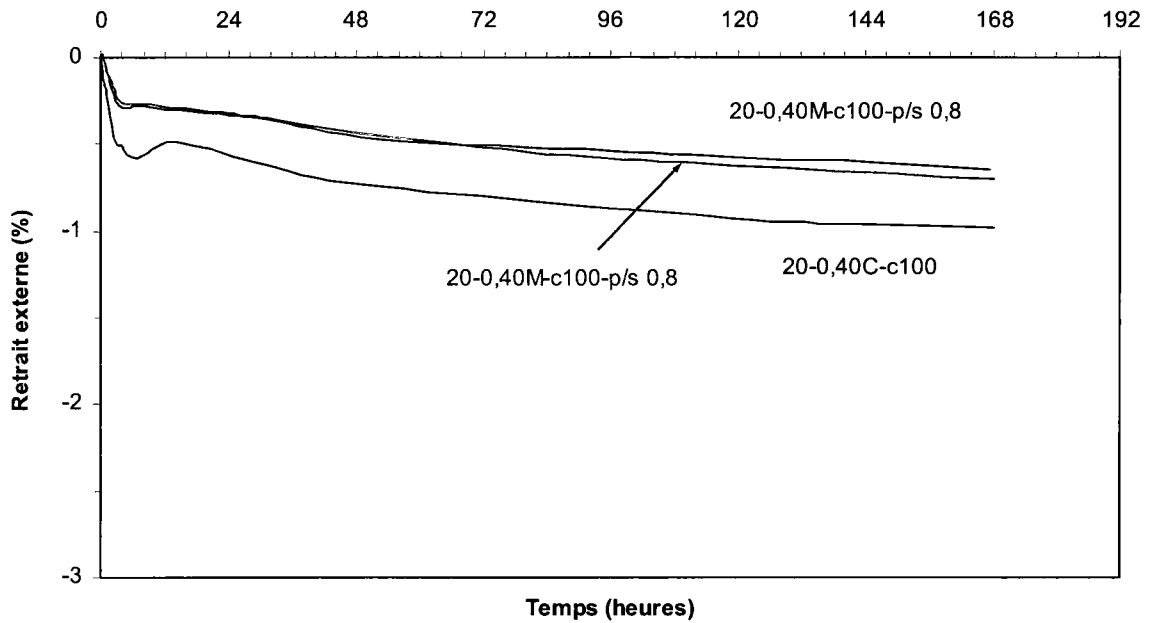


Figure 8. 11 - Courbes de retrait externe des mortiers de rapport E/L = 0,40 ayant différents dosages de sable

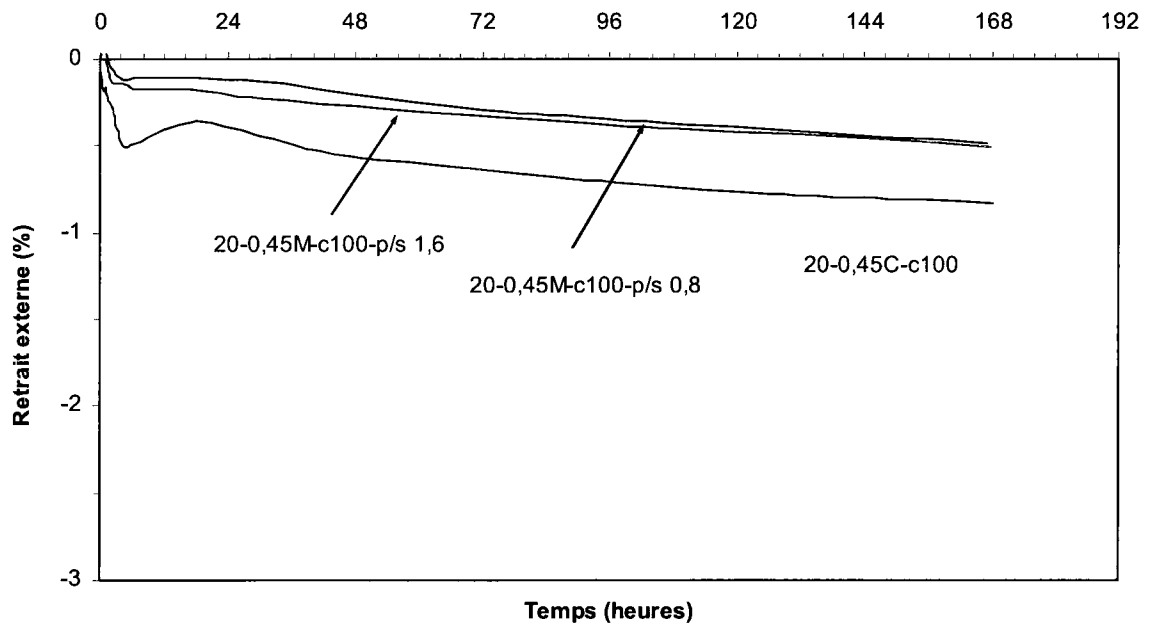


Figure 8. 12 - Courbes du retrait externe des mortiers de rapport E/L = 0,45 ayant différents dosages de sable

8.4 Interprétation et comparaison des courbes de retrait endogène total des mortiers

8.4.1 Influence du rapport E/L et de la teneur en sable

L'influence du rapport E/L sur l'évolution du retrait total est présentée aux figures 8.13 et 8.14. Après 48 heures, c'est le rapport E/L de 0,30 qui produit systématiquement le retrait total le plus faible. Cette constatation est valable quel que soit la teneur en sable du mortier.

L'influence de la teneur en sable sur le retrait total est très semblable à celle observée dans le cas du retrait interne car le retrait total est beaucoup plus influencé par le retrait interne que par le retrait externe. On constate donc que le retrait total diminue avec l'augmentation de la teneur en sable. Ce comportement est répétitif et bien marqué pour chaque rapport E/L (Figures 8.15 à 8.18).

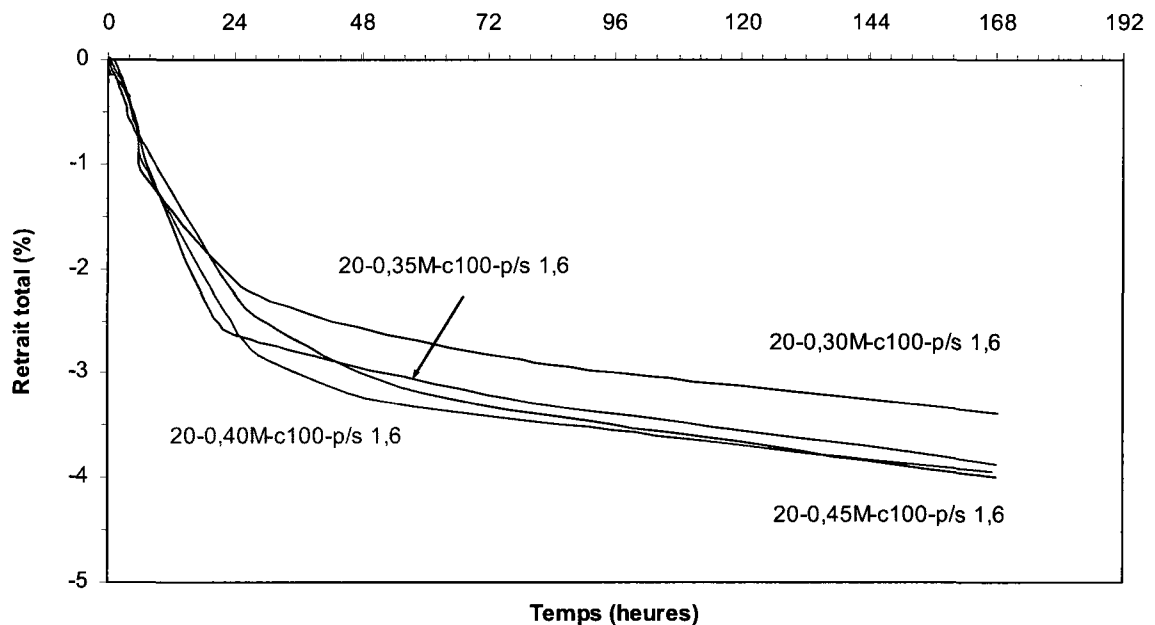


Figure 8. 13 - Courbes de retrait total des mortiers ($V_p/V_s = 1,6$)

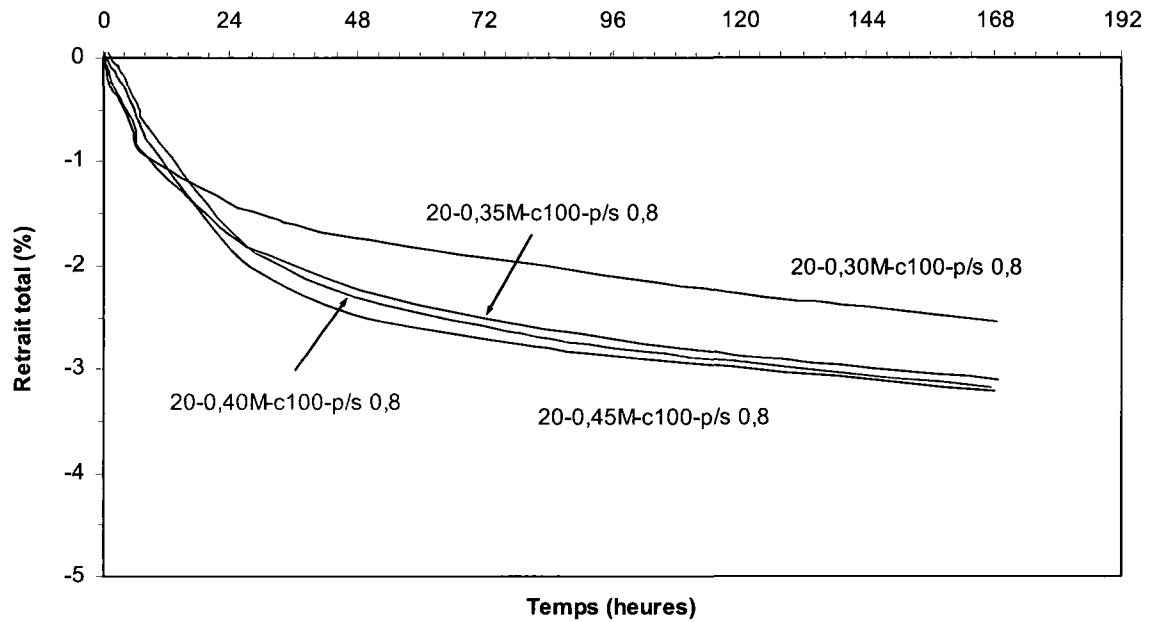


Figure 8. 14 - Courbes de retrait total des mortiers ($V_p/V_s = 0,8$)

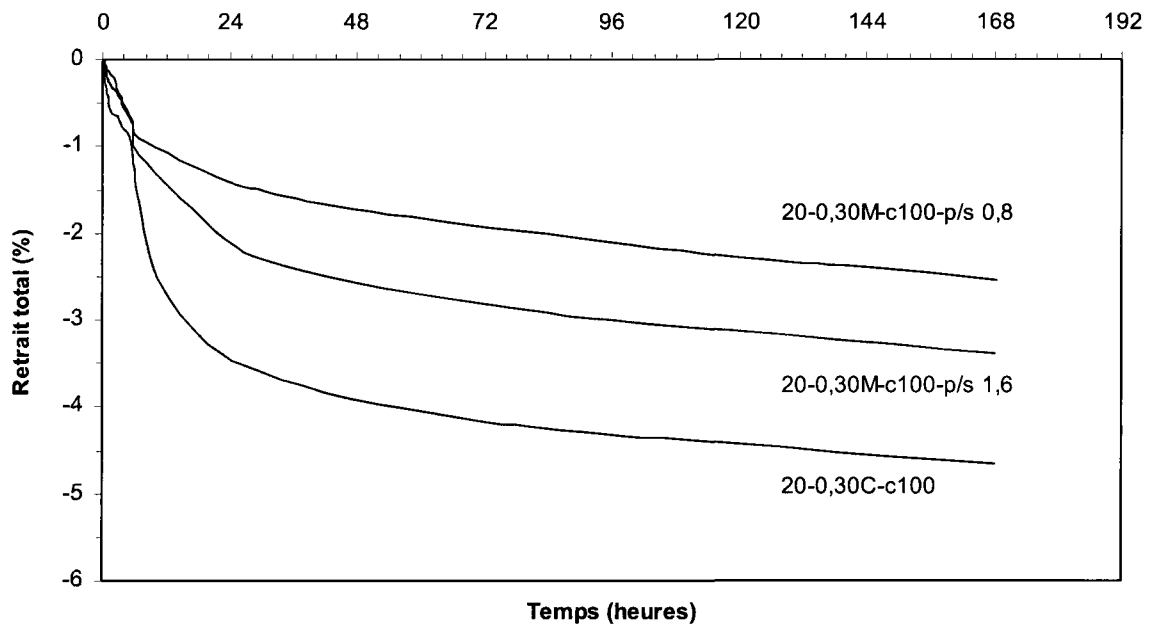


Figure 8. 15 - Courbes de retrait total des mortiers de rapport $E/L = 0,30$ ayant différents dosages de sable

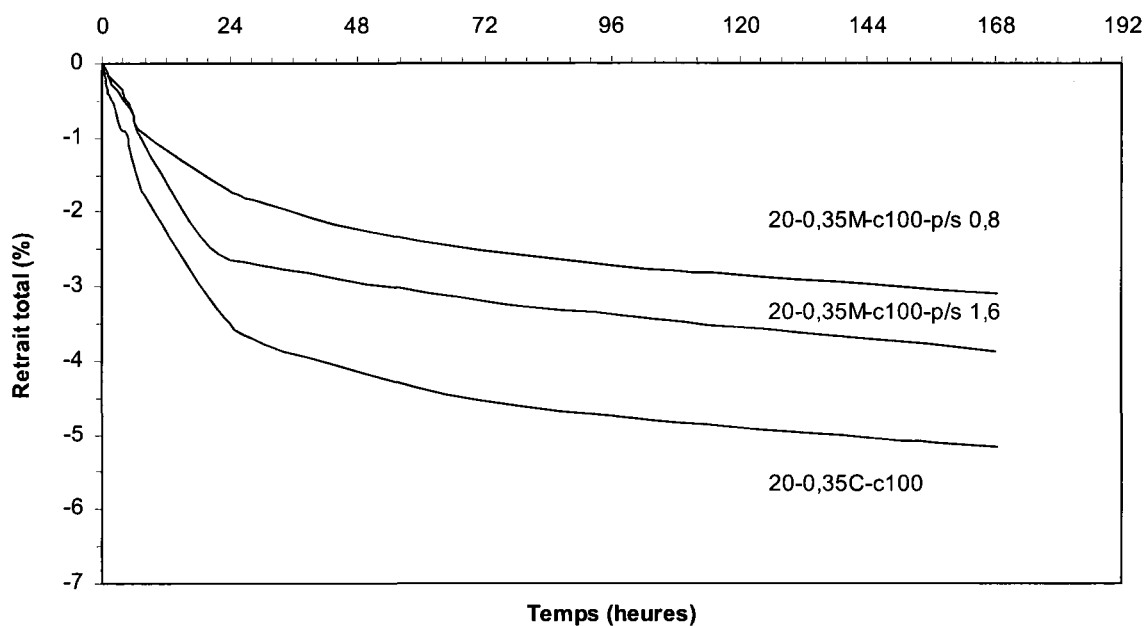


Figure 8. 16 - Courbes de retrait total des mortiers de rapport E/L = 0,35 ayant différents dosages de sable

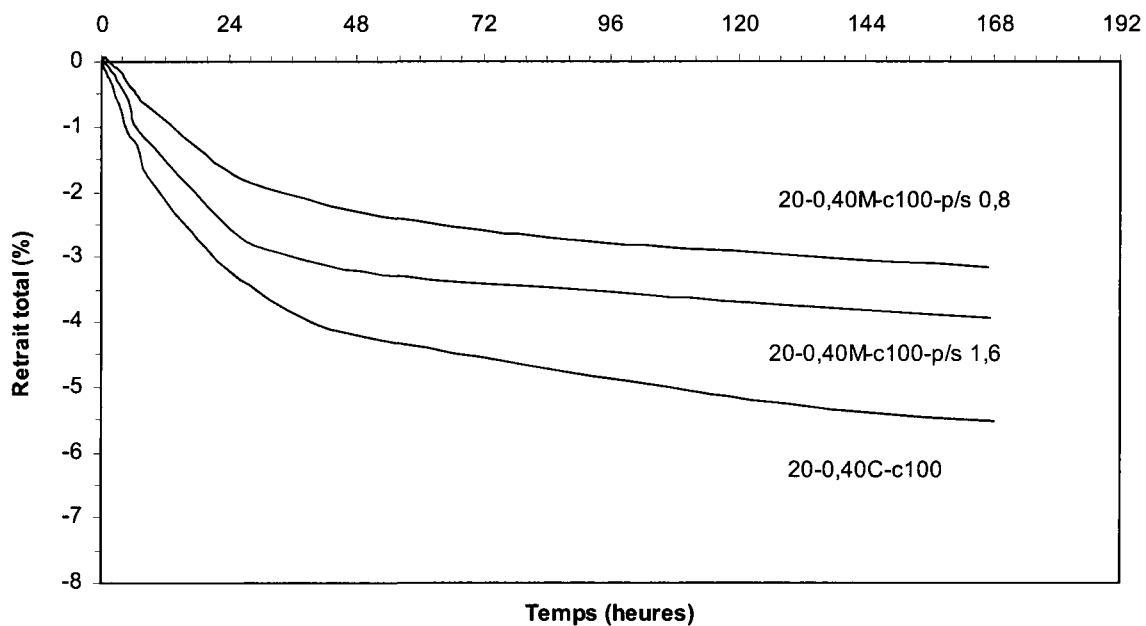


Figure 8. 17 - Courbes de retrait total des mortiers de rapport E/L = 0,40 ayant différents dosages de sable

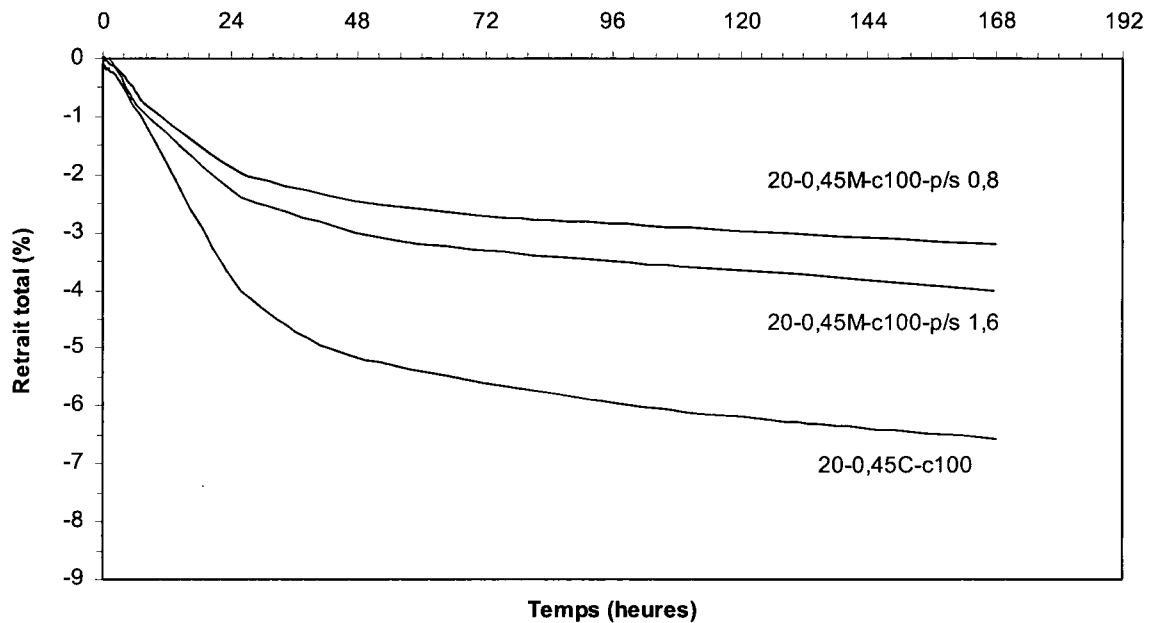


Figure 8. 18 - Courbes du retrait total des mortiers de rapport E/L = 0,45 ayant différents dosages de sable

8.5 Retrait interne des mortiers à 7 jours

Ce paragraphe a pour but d'analyser et de comparer l'influence des paramètres de composition des mortiers sur l'intensité du retrait interne à 7 jours, en tenant compte du degré d'hydratation du ciment. Pour ce faire, les résultats de retrait interne ont été notamment exprimés en ml/100 g de liant hydraté.

8.5.1 Effet du rapport E/L sur le retrait endogène interne

L'influence du rapport E/L sur le retrait interne des mortiers après 7 jours d'hydratation est présentée à la figure 8.19. Les résultats de la figure 8.19 montrent que le retrait endogène interne des mortiers augmente avec le rapport E/L. Cette même tendance a aussi été observée dans le cas des coulis. Le retrait endogène interne, exprimé en ml/100 g de liant hydraté, devrait normalement être à peu près le même pour tous les rapports E/L. Ce n'est pas le cas car

notre technique de mesure sous-estime le retrait interne des matériaux très imperméables au gaz.

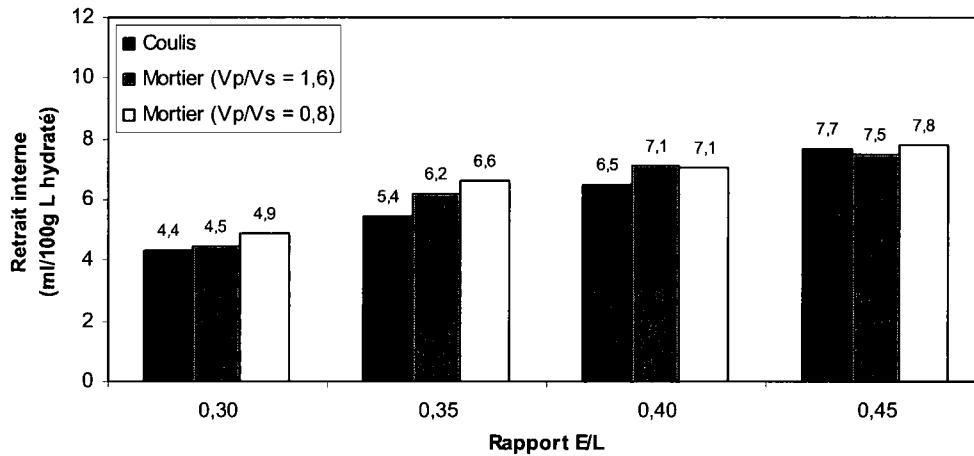


Figure 8. 19 – Retrait intrinsèque total des mortiers après 7 jours d’hydratation

8.5.2 Effet de la teneur en sable sur le retrait endogène interne

Pour un rapport E/L donné, le retrait interne diminue avec l’augmentation de la teneur en sable (Figure 8.20). Par définition, le retrait interne correspond au volume des vides gazeux formés dans la porosité capillaire. Les vides gazeux se forment uniquement dans la pâte de ciment parce que leur formation dépend directement de l’hydratation du ciment. Dans un mortier, la proportion du volume de pâte est plus faible et la quantité des vides formés sera donc plus faible.

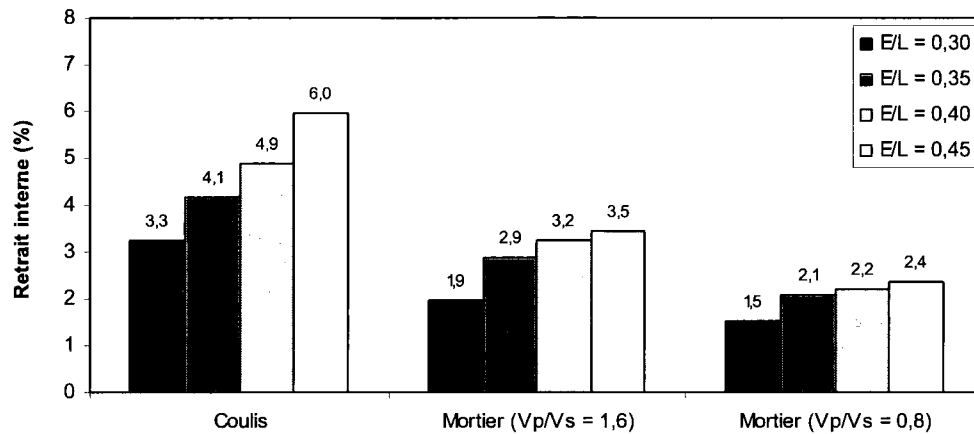


Figure 8. 20 – Retrait interne des mortiers après 7 jours d’hydratation

Les résultats de la figure 8.20 montrent l’influence du volume de pâte sur le retrait endogène interne exprimé en ml/100 g de liant hydraté. Lorsque le retrait est exprimé sous cette forme, le degré d’hydratation et le dosage en liant sont pris en compte. Pour un rapport E/L donné, on constate que le retrait endogène interne varie relativement peu en fonction du volume de pâte. Ces résultats sont logiques puisque le retrait endogène exprimé en ml/100 g de liant hydraté tient compte du fait que les dosages en liant des mortiers varient en fonction du volume de pâte. Globalement ces résultats démontrent que la phase granulaire n’affecte pas les mécanismes responsables du développement du retrait endogène interne des mortiers.

Une analyse plus poussée montre que pour un E/L donné, lorsque le volume de pâte diminue (la volume de sable augmente), le retrait endogène interne tend à augmenter très légèrement. Ce comportement est probablement dû au fait que le sable facilite le passage de l’air dans la matrice en raison de la présence d’interface pâte-granulat dont la porosité et la microfissuration sont plus importantes.

8.6 Retrait externe des mortiers à 7 jours

8.6.1 Influence du rapport E/L sur le retrait endogène externe

Le retrait externe des mortiers mesuré à partir de début d’essai est présenté à la figure 8.21. Pour une teneur donnée en sable, le retrait externe avant la prise diminue avec l’augmentation

du rapport E/L . Le retrait externe des mortiers de rapport 0,30 est presque deux fois plus élevé que celui mesuré dans les mortiers de rapport 0,45 s'il est exprimé en pourcentage du volume initial. L'influence du rapport E/L sur le développement du retrait externe des mortiers est donc similaire au cas des coulis.

Le retrait intrinsèque externe, mesuré à partir le début d'essai (Figure 8.22) diminue lorsque le rapport E/L augmente. À nouveau, ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans le cas des coulis.

Les figures 8.23 et 8.24 présentent l'influence du volume de pâte et du rapport E/L sur le retrait externe des mortiers après la prise. La figure 8.23 montre que le rapport E/L affecte le retrait externe après la prise des mortiers de la même manière que dans le cas des coulis. En effet, l'augmentation du rapport E/L provoque systématiquement une diminution du retrait externe après la prise.

L'influence du rapport E/L sur le retrait externe intrinsèque des mortiers après la prise est même pour les coulis et les mortiers. Pour une teneur en pâte donnée, une diminution du rapport E/L engendre systématiquement une augmentation du retrait endogène intrinsèque après la prise.

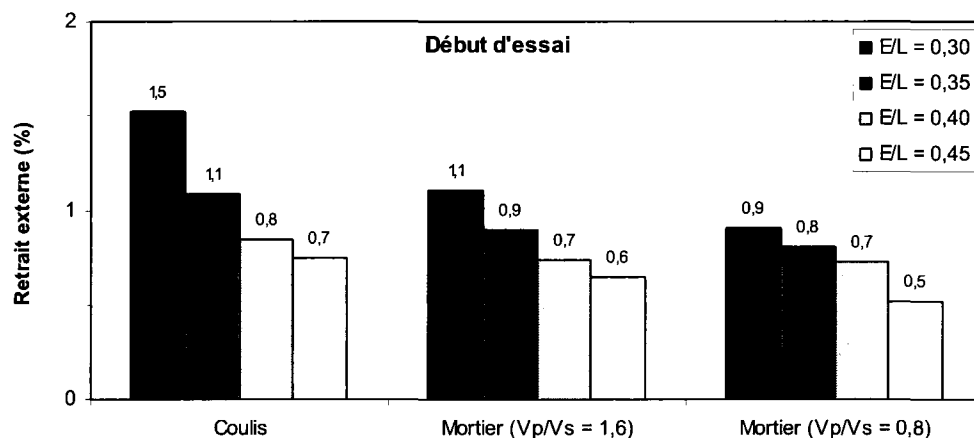


Figure 8. 21 – Retrait externe des mortiers mesuré à partir du début d'essai et jusqu'à 7 jours

8.6.2 Influence de la teneur en sable sur le retrait endogène externe

Les résultats de la figure 8.21 montrent que l'ajout d'une phase granulaire à un coulis (production d'un mortier) engendre une diminution du retrait externe mesuré à partir du début de l'essai. Pour un rapport E/L donné, plus la proportion de la pâte diminue, plus le retrait externe à 7 jours diminue. Ces résultats sont logiques car c'est dans la pâte que ce produit le retrait endogène.

Les résultats de la figure 8.22 montrent un phénomène nouveau et plutôt inattendu. On constate que la présence d'une phase granulaire fait augmenter le retrait endogène externe (ml/100 g de liant hydraté). Ces résultats suggèrent que l'hydratation d'une quantité donnée de liant produit plus de retrait endogène externe dans un mortier que dans un coulis. Ce phénomène a été constaté avec tous les rapports E/L considérés. Il faut bien rappeler que pour un rapport E/L donné, le retrait externe absolu d'un mortier est inférieur à celui d'un coulis. Les résultats de la figure 8.22 viennent cependant montrer qu'en présence d'une phase granulaire, l'hydratation complète de 100 g de liant produit plus de retrait endogène externe que dans un coulis. L'origine de ce phénomène est encore inconnue. Il est possible que le retrait endogène intrinsèque plus important dans les mortiers résulte de la présence de la zone d'interface pâte/granulats. Cette zone, plus faible et plus poreuse, pourrait favoriser la présence d'une plus grande quantité de ménisques responsables du développement du retrait endogène.

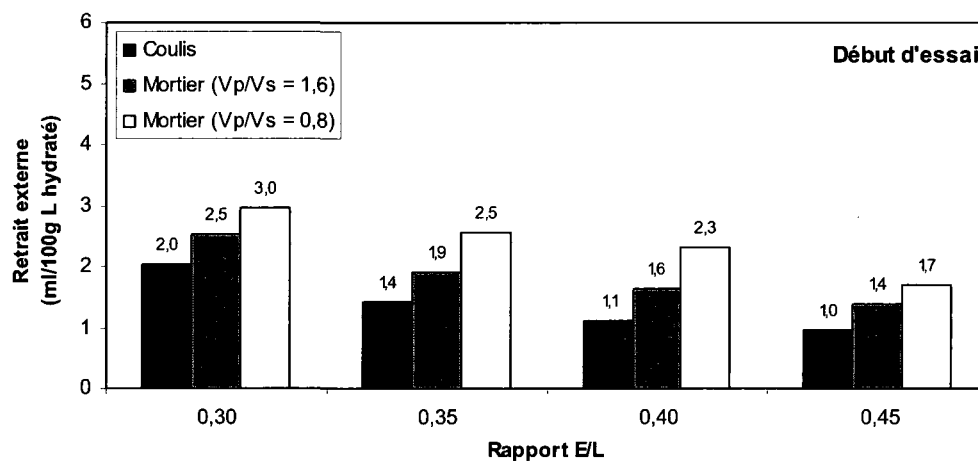


Figure 8. 22 - Retrait intrinsèque externe des mortiers après 7 jours d'hydratation

La figure 8.23 présente l'influence de la teneur en sable sur le développement du retrait externe (%) après la prise. On constate que l'ajout de sable dans le coulis diminue très légèrement le retrait externe après la prise. La quantité de sable ajouté n'a pas d'influence sur l'intensité du retrait externe après la prise. Ce comportement est différent de celui observé dans le cas du retrait externe mesuré à partir du début de l'essai. Dans ce dernier cas on avait montré que l'ajout de sable diminue significativement ce type de retrait. La faible influence du sable sur l'intensité du retrait après la prise découle probablement du fait que la très grande majorité du retrait total se produit avant la prise.

La figure 8.24 indique que le retrait intrinsèque externe à partir de la prise augmente avec la teneur en sable. Ce comportement est similaire à celui décrit lors de l'analyse du retrait intrinsèque mesuré à partir du début de l'essai.

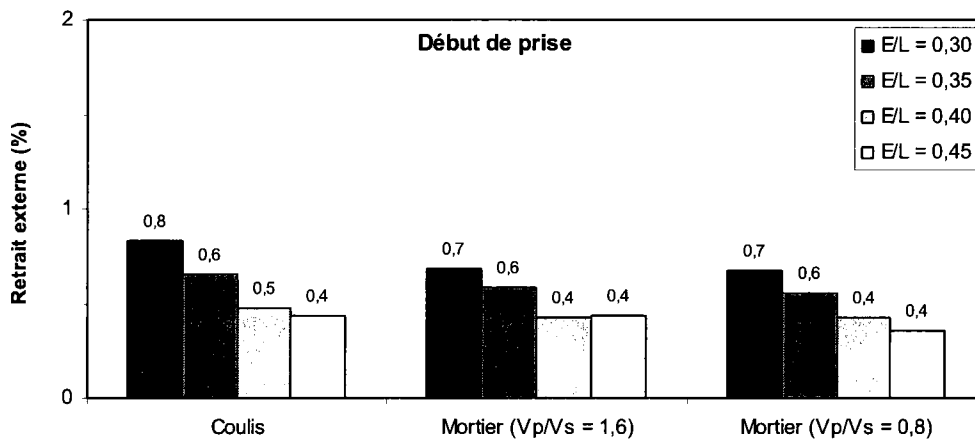


Figure 8. 23 – Retrait externe des mortiers mesuré à partir du début de la prise et jusqu'à 7 jours

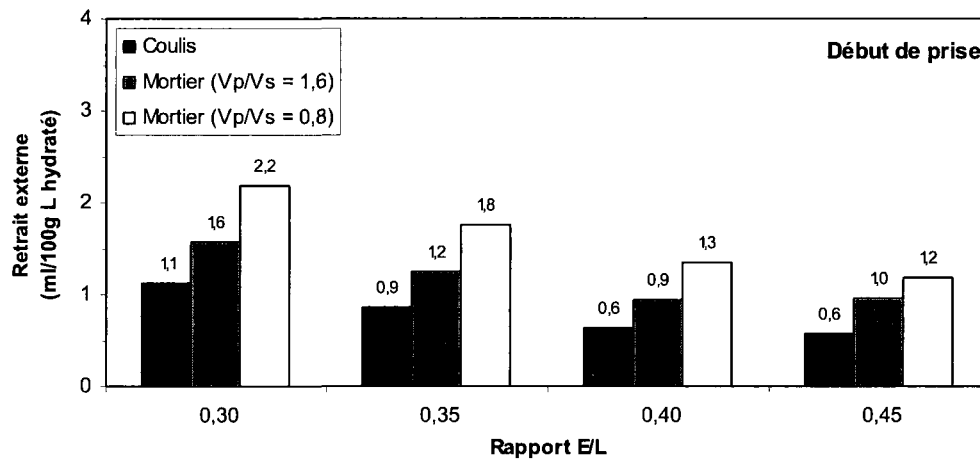


Figure 8. 24 – Retrait intrinsèque externe des mortiers mesuré à partir du début de la prise et jusqu'à 7 jours d'hydratation

8.7 Relation entre le retrait endogène interne et le degré d'hydratation des mortiers

Le retrait endogène interne des mortiers est directement lié à leur degré d'hydratation lorsqu'il est exprimé en pourcentage du volume initial de l'échantillon. La figure 8.25 présente la relation entre le retrait interne (%) et le degré d'hydratation des mortiers fabriqués avec les deux différents dosages en sable. Les données obtenues avec le coulis sont aussi présentées à titre de comparaison. Les relations entre ces deux paramètres sont linéaires avec un coefficient de détermination supérieur à 0,95. Le comportement semblable a été observé avec les coulis de référence (Figure 7.125). Ces résultats confirment que la méthode que nous avons utilisée pour déterminer le degré d'hydratation des mortiers est valable (Équation 1.12). De plus, la cellule de mesure du retrait endogène semble être fiable pour mesurer le retrait interne des mortiers avec les différents dosages de sable.

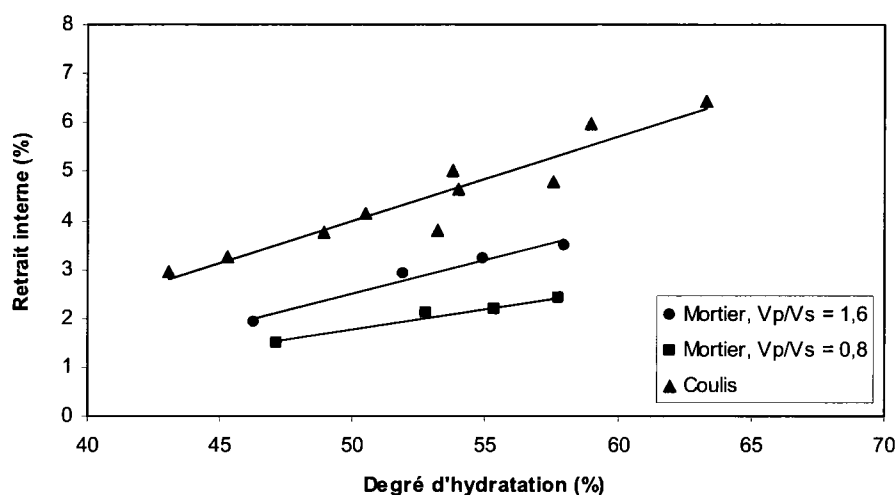


Figure 8. 25 – Relation entre le retrait interne et le degré d'hydratation à 7 jours des mortiers et des coulis ($E/L = 0,30, 0,35, 0,40$ et $0,45$)

Les données de la figure 8.25 confirment que le développement du retrait interne est directement relié à la progression de l'hydratation. C'est également ce qui a été démontré dans le cas des coulis. Pour un degré d'hydratation donné, le retrait interne diminue avec l'augmentation de la teneur en sable. Cette évolution est tout à fait logique car le retrait endogène interne se produit essentiellement dans la pâte. Son intensité est donc notamment liée à la proportion de pâte dans le matériau cimentaire.

8.8 Relation entre les retraits endogènes et la teneur en sable du mortier

Afin de mieux comprendre l'effet de la teneur en sable sur le retrait endogène nous avons calculé les rapports entre le retrait endogène des mortiers et le retrait endogène des coulis ayant les mêmes rapports E/L . Des essais supplémentaires ont été aussi réalisés sur les mortiers dont le rapport E/L est égal à $0,45$. Nous avons ajouté deux autres dosages de sable pour obtenir des rapports Vp/Vs égaux à $0,6$ et à $0,4$. Les tableaux 8.1 à 8.3 et la figure 8.26 présentent les rapports entre le retrait endogène du mortier et le retrait endogène du coulis pour chaque E/L ainsi que les valeurs moyennes de ce rapport.

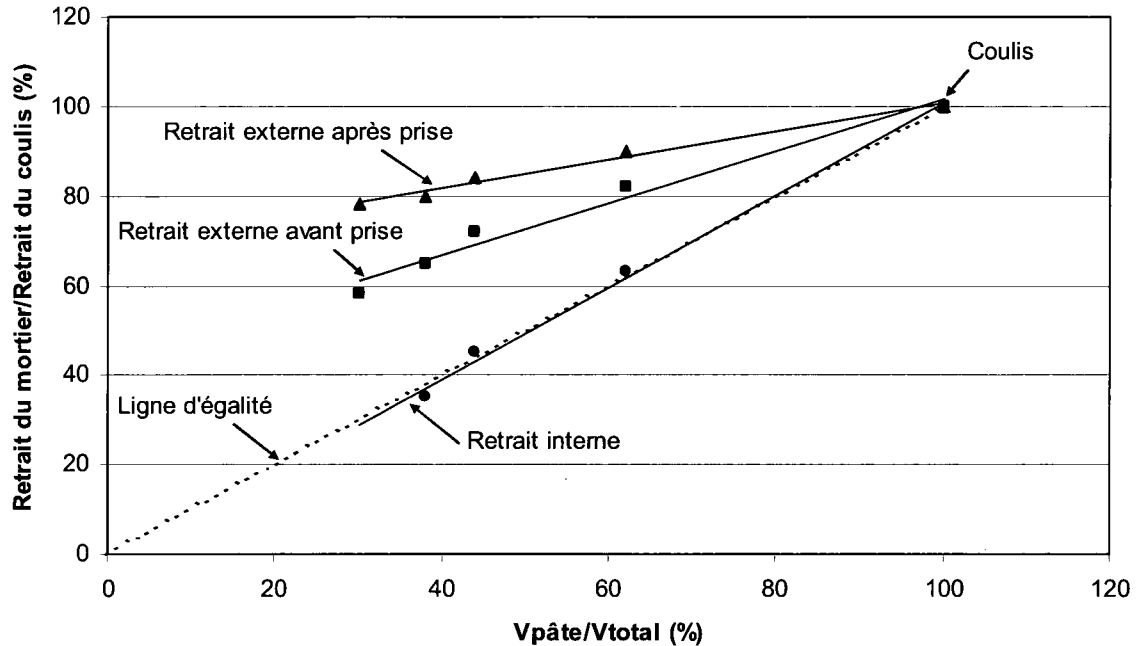


Figure 8. 26 – Relation entre les retraits du mortier et du coulis

En moyenne, le rapport interne mesuré dans les mortiers correspond au volume de pâte contenue dans ces mortiers. Ces résultats sont logiques et satisfaisants puisque le retrait interne peut uniquement se développer dans la pâte de ciment lors d'hydratation de ce dernier. Ces résultats prouvent aussi que la cellule du retrait endogène peut correctement mesurer le retrait interne des mortiers. Cependant les mortiers devront être suffisamment maniabiles pour assurer leur bonne mise en place dans l'enceinte interne de la cellule ainsi que l'installation des tiges poreuses qui permettent la mesure du retrait interne.

Tableau 8. 1 – Rapport entre le retrait interne du mortier et le retrait interne du coulis

$V_{p\grave{a}te}/V_{total}$ (%)	Retrait interne du mortier (pourcentage du retrait d'un coulis équivalent)				
	0,30	0,35	0,40	0,45	Moyenne
100	100	100	100	100	100
62	60	70	66	58	63
44	46	51	45	40	45
38				35	35
30				*	

*La faible maniabilité du mortier n'a pas permis d'installer les tiges poreuses et de mesurer le retrait interne.

Tableau 8. 2 – Rapport entre le retrait externe du mortier et le retrait externe du coulis avant la prise

Vpâte/Vtotal (%)	Retrait externe du mortier avant la prise (pourcentage du retrait d'un coulis équivalent)				
	0,30	0,35	0,40	0,45	Moyenne
100	100	100	100	100	100
62	72	83	87	86	82
44	60	74	85	69	72
38				65	65
30				58	58

Tableau 8. 3 – Rapport entre le retrait externe du mortier et le retrait externe du coulis après la prise

Vpâte/Vtotal (%)	Retrait externe du mortier après la prise (pourcentage du retrait d'un coulis équivalent)				
	0,30	0,35	0,40	0,45	Moyenne
100	100	100	100	100	100
62	82	89	88	100	90
44	81	85	88	82	84
38				80	80
30				78	78

Les tableaux 8.2 et 8.3 démontrent que le retrait externe des mortiers diminue avec la diminution du volume de pâte mais cette diminution ne correspond pas au volume de pâte. Ce comportement ne peut pas être causé par la présence des vides d'air entre la surface du mortier et la membrane en latex. Les figures 8.32 et 8.33 démontrent que la surface des échantillons de mortier est lisse et exempte des défauts surtout dans le cas des mortiers riches en pâte ($V_p/V_t = 62\%$ ou $V_p/V_s = 1,6$). Pourtant, dans ce type de mortier le retrait externe avant prise correspond à 82% de retrait du coulis (Tableau 8.2). Le retrait externe après prise développé dans ce type de mortier correspond à 90% de retrait externe du coulis (Tableau 8.3). Il est possible que la zone de transition pâte - granulats entraîne une porosité supplémentaire qui fait augmenter le retrait externe. Il est aussi possible que le retrait externe ne devrait pas correspondre au volume de pâte étant donné que ce phénomène ne dépend uniquement pas du degré d'hydratation du ciment.

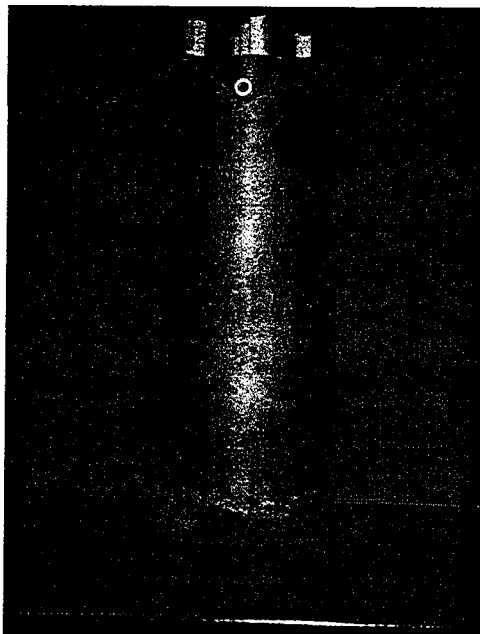


Figure 8. 27 – Échantillon de mortier ayant $V_p/V_s = 1,6$ ou $V_p/V_t = 62\%$

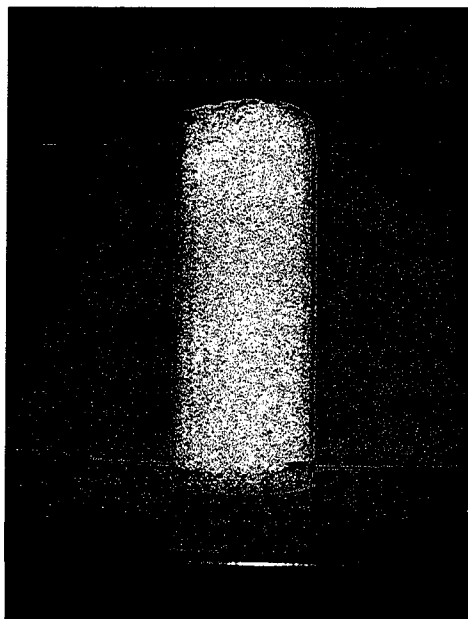


Figure 8. 28- Échantillon de mortier ayant $V_p/V_s = 0,8$ ou $V_p/V_t = 44\%$

8.9 Résistance à la compression des mortiers

La résistance à la compression des mortiers a été déterminée conformément à la norme ASTM C 109 sur les cubes de 50 mm de côté. Elle a été déterminée au démoulage (24 heures), puis après 7 et 28 jours de mûrissement humide à la température contrôlée. Les tableaux 8.4 et 8.5 ainsi que les figures 8.29 et 8.30 présentent les valeurs moyennes de la résistance à la compression.

Tableau 8. 4 - Résistance à la compression des mortiers (p/s = 1,6)

Mortier	Résistance à la compression (MPa)					
	24 heures		7 jours		28 jours	
0,30M1-c100-p/s1,6	41,7		64,6		82,4	
0,30M2-c100-p/s1,6	39,4	40,5	65,3	65,0	79,7	81,1
0,35M1-c100-p/s1,6	30,5		59,5		66,9	
0,35M2-c100-p/s1,6	32,7	31,6	56,5	58,0	65,6	66,2
0,40M1-c100-p/s1,6	27,4		54,2		64,9	
0,40M2-c100-p/s1,6	25,5	26,5	52,6	53,4	63,9	64,4
0,45M1-c100-p/s1,6	18,5		44,4		58,9	
0,45M2-c100-p/s1,6	17,3	17,9	46,6	45,5	62,7	60,8

Tableau 8. 5 - Résistance à la compression des mortiers (p/s = 0,8)

Mortier	Résistance à la compression (MPa)					
	24 heures		7 jours		28 jours	
0,30M3-c100-p/s0,8	42,2		60,1		64,7	
0,30M4-c100-p/s0,8	42,1	42,2	59,2	59,7	67,0	65,8
0,35M3-c100-p/s0,8	33,0		48,8		61,1	
0,35M4-c100-p/s0,8	31,1	32,1	45,6	47,2	58,2	59,6
0,40M3-c100-p/s0,8	24,7		42,3		47,9	
0,40M4-c100-p/s0,8	23,2	23,9	40,9	41,6	51,4	49,7
0,45M3-c100-p/s0,8	17,8		37,0		42,0	
0,45M4-c100-p/s0,8	18,8	18,3	37,6	37,3	45,1	43,6

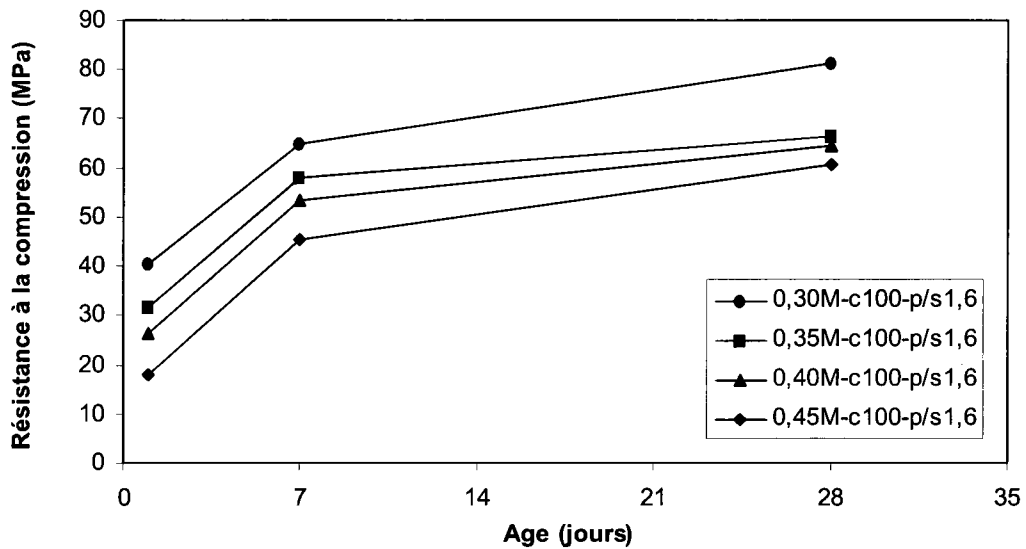


Figure 8. 29 - Résistance à la compression des mortiers (p/s = 1,6)

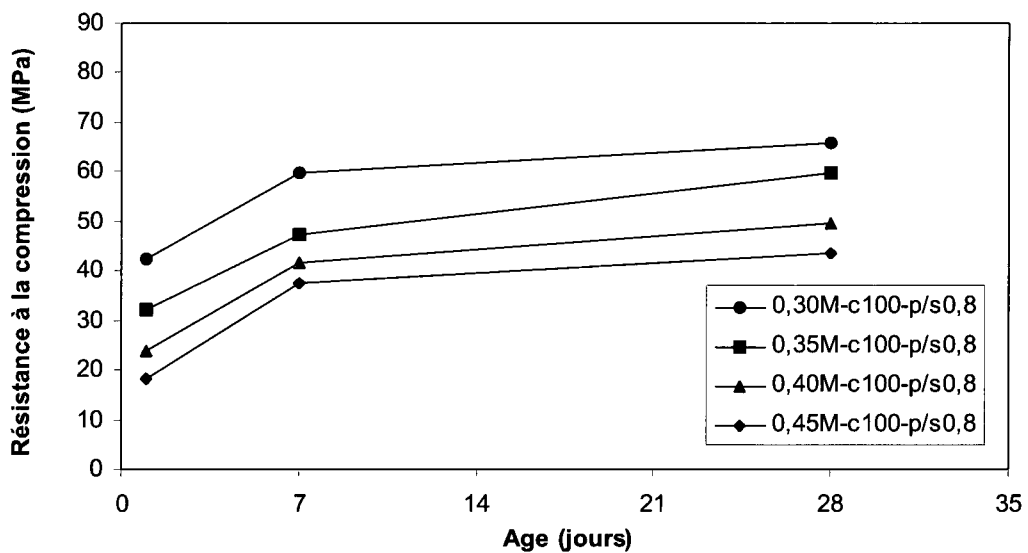


Figure 8. 30 - Résistance à la compression des mortiers (p/s = 0,8)

Les résultats démontrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du rapport E/C quel que soit la teneur en sable. Dans le cas des mortiers riche en pâte (Tableau 8.4), l'augmentation du rapport E/C de 0,30 à 0,45 fait diminuer la résistance à la compression

après 24 heures de 55 %. La diminution de la résistance est de 30 % après 7 jours et de 25 % après 28 jours.

Dans le cas des mortiers riches en sable (Tableau 8.5), la résistance à la compression diminue de 57 % après 24 heures, puis de 38 % après 7 jours et de 34 % après 28 jours pour une augmentation du rapport E/C de 0,30 à 0,45. La résistance à la compression est la plus faible au démoulage (24 heures) puis augmente avec l'âge du mortier quel que soit le rapport E/C ou la teneur en sable. L'augmentation de la résistance entre 24 heures et 28 jours est plus importante dans le cas des mortiers qui ont plus de pâte.

9 RETRAIT CHIMIQUE (CONTRACTION LE CHATELIER)

9.1 Introduction

Ce chapitre analyse le retrait chimique (la contraction Le Chatelier) des coulis avec et sans ajouts minéraux. Le début du chapitre analyse l'influence du type de liant sur le retrait chimique. Une comparaison entre les résultats du retrait chimique et du retrait endogène est présentée par la suite.

9.2 Retrait chimique des coulis

Les mesures de la contraction Le Chatelier ont été réalisées pour étudier l'influence des ajouts minéraux sur le retrait chimique mais aussi pour mieux comprendre les résultats obtenus avec la cellule de mesure du retrait endogène. Ces mesures ont été réalisées sur les coulis de rapport E/L égal 0,45 pendant une période de 7 et de 14 jours à la température de 20 C. La procédure et les conditions d'essai sont présentées dans la partie 2.4.2.

La figure 9.1 présente les courbes du retrait chimique mesuré pendant 14 jours. On remarque que la majeure partie du retrait chimique se développe pendant les trois premiers jours. Le retrait se développe le plus rapidement dans le coulis de référence et le plus lentement dans le coulis avec 30% de cendre volante. Le coulis de référence et le coulis avec fumée de silice développent presque complètement leur retrait chimique après 7 jours d'hydratation. Le retrait des coulis avec laitier progresse plus entre 3 et 14 jours comparativement au retrait des autres coulis. Pour un même type d'ajout minéral, les courbes du retrait sont pratiquement parallèles à partir de 3 jours. De plus, les valeurs du retrait chimique sont plus faibles pour les taux de remplacement plus élevés.

La figure 9.2 présente le retrait chimique après 7 et 14 jours d'hydratation de tous les coulis soumis à cet essai. On constate que le retrait chimique, exprimé en pourcentage du volume initial et en ml/100 g de liant, augmente avec l'âge du coulis, quel que soit le type de liant. Les retraits chimiques dépendent de la maturité de la pâte. Une plus grande quantité de liant hydraté cause donc un plus important retrait chimique. L'augmentation du retrait entre 7 et 14

jours est la plus faible pour le coulis de référence (6%), puis un peu plus importante avec le coulis avec fumée de silice (9%). Dans le cas des coulis avec cendre volante, l'augmentation du retrait chimique est de 11% quand le taux de remplacement est égal à 15% et de 15% quand le taux de remplacement est égal à 30%. Les coulis au laitier présentent les augmentations du retrait chimique de 12 et 17% pour les taux de remplacement de 25 et 50% respectivement.

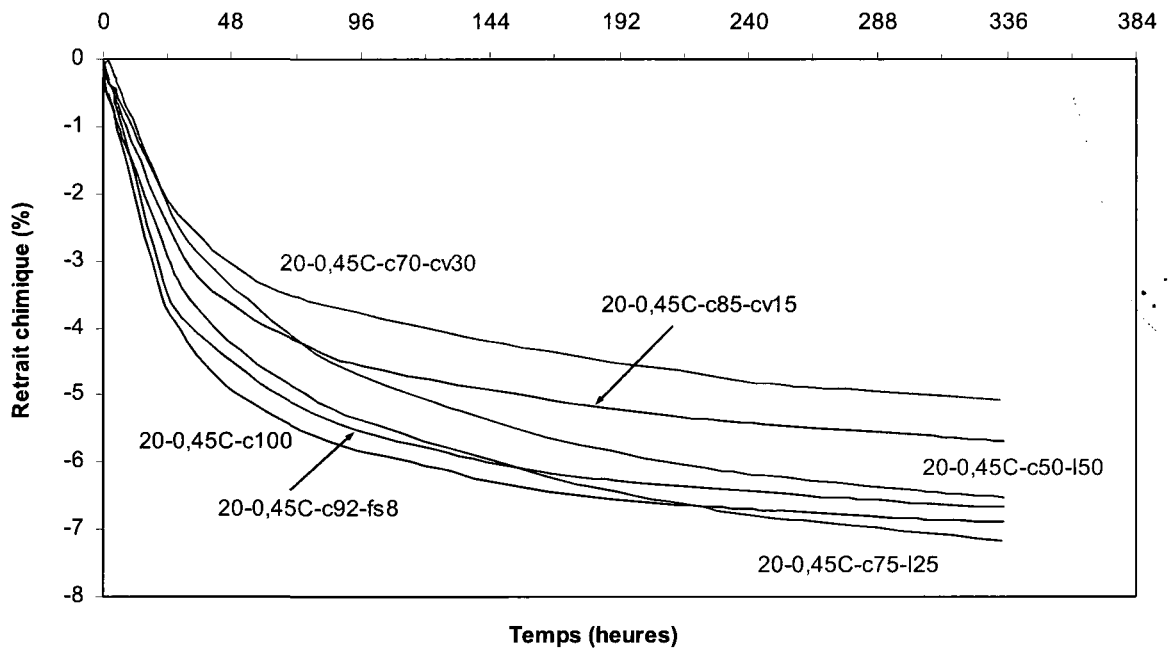


Figure 9. 1 – Courbes du retrait chimique des coulis

Selon sa définition, le retrait intrinsèque chimique devrait être indépendant de la maturité de la pâte. Donc, les retraits intrinsèques chimiques des coulis fabriqués avec même type de liant devraient être approximativement égaux après 7 et 14 jours d'hydratation. Selon la figure 9.2, le coulis de référence est le seul coulis dont le retrait intrinsèque est le même à 7 et 14 jours. Les retraits intrinsèques des autres coulis après 14 jours d'hydratation sont supérieurs aux ceux mesurés après 7 jours. Cette augmentation varie entre 5 et 10%. Elle est probablement due à la difficulté de calculer précisément les degrés d'hydratation des liants avec ajouts cimentaires.

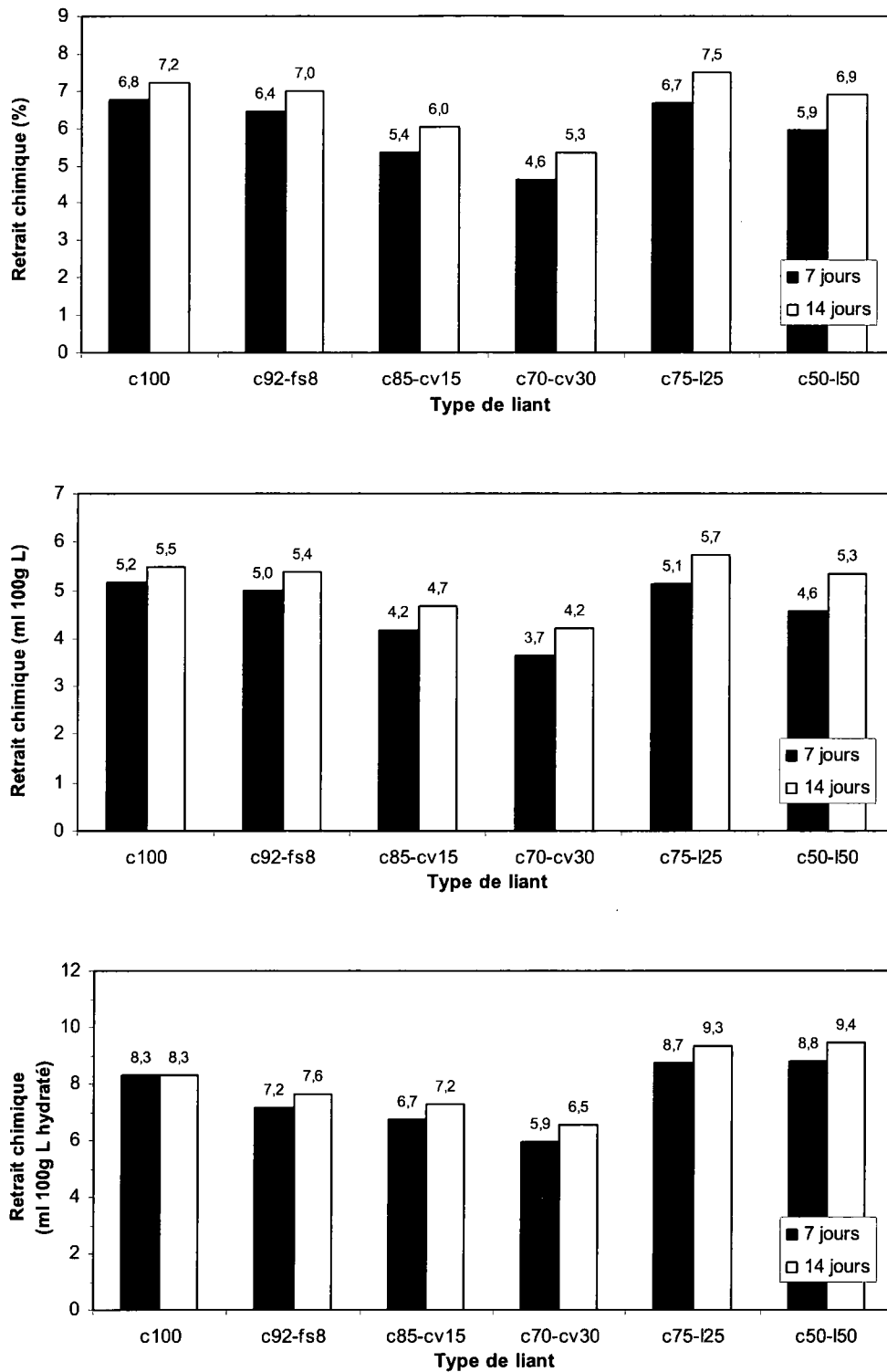


Figure 9. 2 – Retrait chimique des coulis après 7 et 14 jours d’hydratation

Les résultats de la figure 9.2 permettent aussi d'étudier l'influence du type de liant sur le retrait chimique des coulis. Après 7 jours d'hydratation, le retrait chimique de la référence exprimé en pourcentage du volume initial est le plus important et celui développé en présence de la cendre volante est le plus faible. La différence entre les retraits chimiques de la référence et des autres coulis devient moins prononcée après 14 jours. Il est important de noter que les retraits chimiques des liants pouzzolaniques (avec fumée de silice ou cendre volante) sont systématiquement plus faibles que ceux du ciment Portland pur. Ces données sont compatibles avec les résultats précédents qui indiquaient que les C-S-H pouzzolaniques sont moins denses, donc ils produisent moins de retrait chimique. À l'inverse, c'est le laitier qui développe le plus de retrait chimique. Cela explique probablement une partie du fait que les liants avec laitier développent un fort retrait endogène.

La figure 9.3 présente les comparaisons entre le retrait chimique et le retrait endogène après 7 jours d'hydratation. On remarque que le retrait chimique est toujours supérieur au retrait endogène quel que soit le type de liant. Ce comportement est logique parce que le degré d'hydratation à la fin de l'essai de retrait chimique est toujours supérieur au celui mesuré à la fin de l'essai du retrait endogène. Les retraits intrinsèques développés à 7 jours par les deux méthodes de mesure sont semblables dans le cas des coulis avec laitier et avec cendre volante avec une différence maximal de 6%. Le coulis avec fumée de silice développe une très grande différence entre les retraits intrinsèques (40%). Ces résultats confirment notre constatation concernant la sous estimation du retrait endogène en présence de la fumée de silice.

Après 14 jours d'hydratation (Figure 9.4), le retrait chimique demeure plus important que le retrait endogène pour un même type de liant, ce qui est en accord avec les degrés d'hydratations présentés au chapitre 5. Les relations entre les retraits intrinsèques sont aussi semblables à celles observées à 7 jours, ce qui permet de tirer des mêmes conclusions concernant l'utilisation de la fumée de silice.

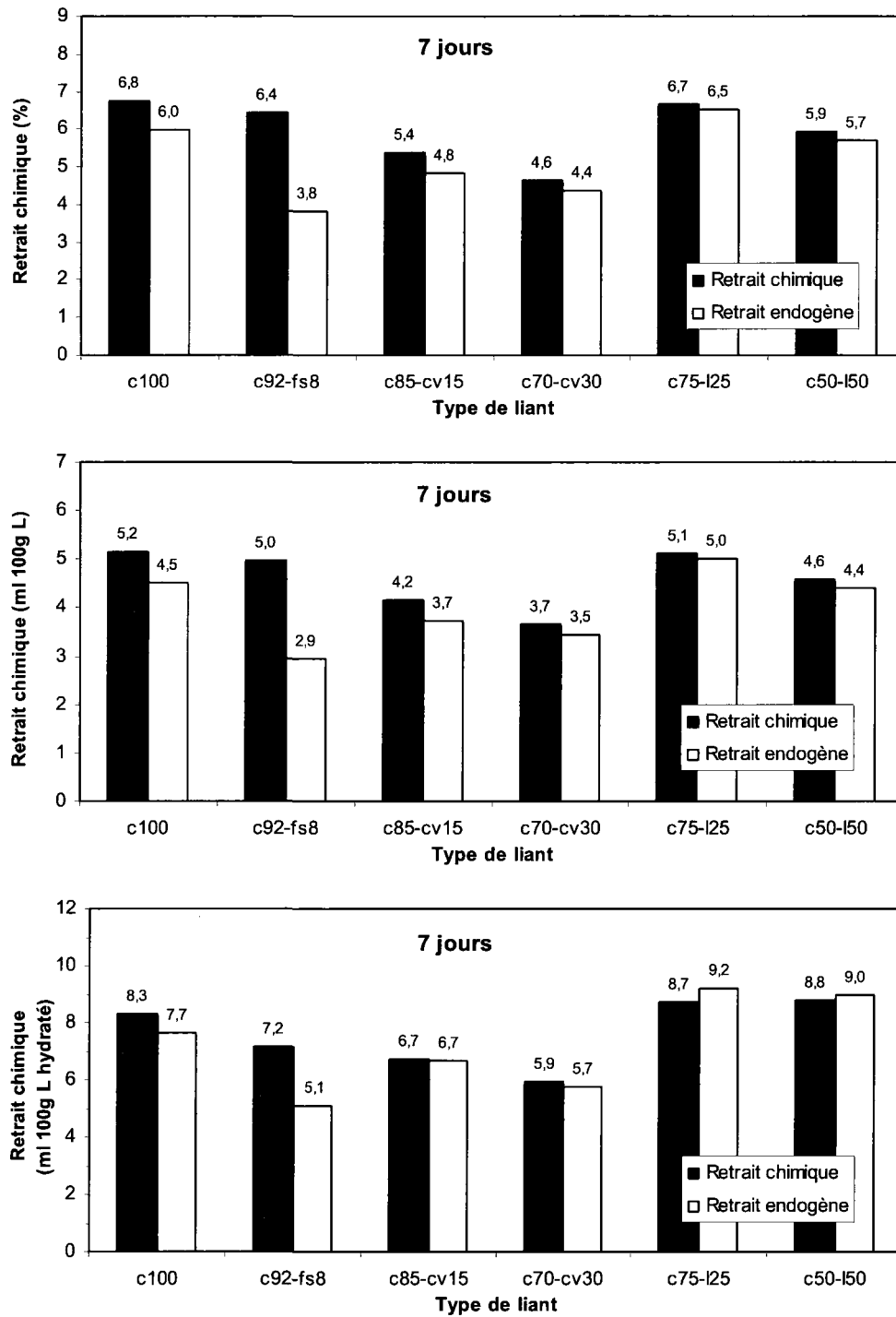


Figure 9. 3 – Comparaison entre le retrait chimique et le retrait endogène après 7 jours d’hydratation

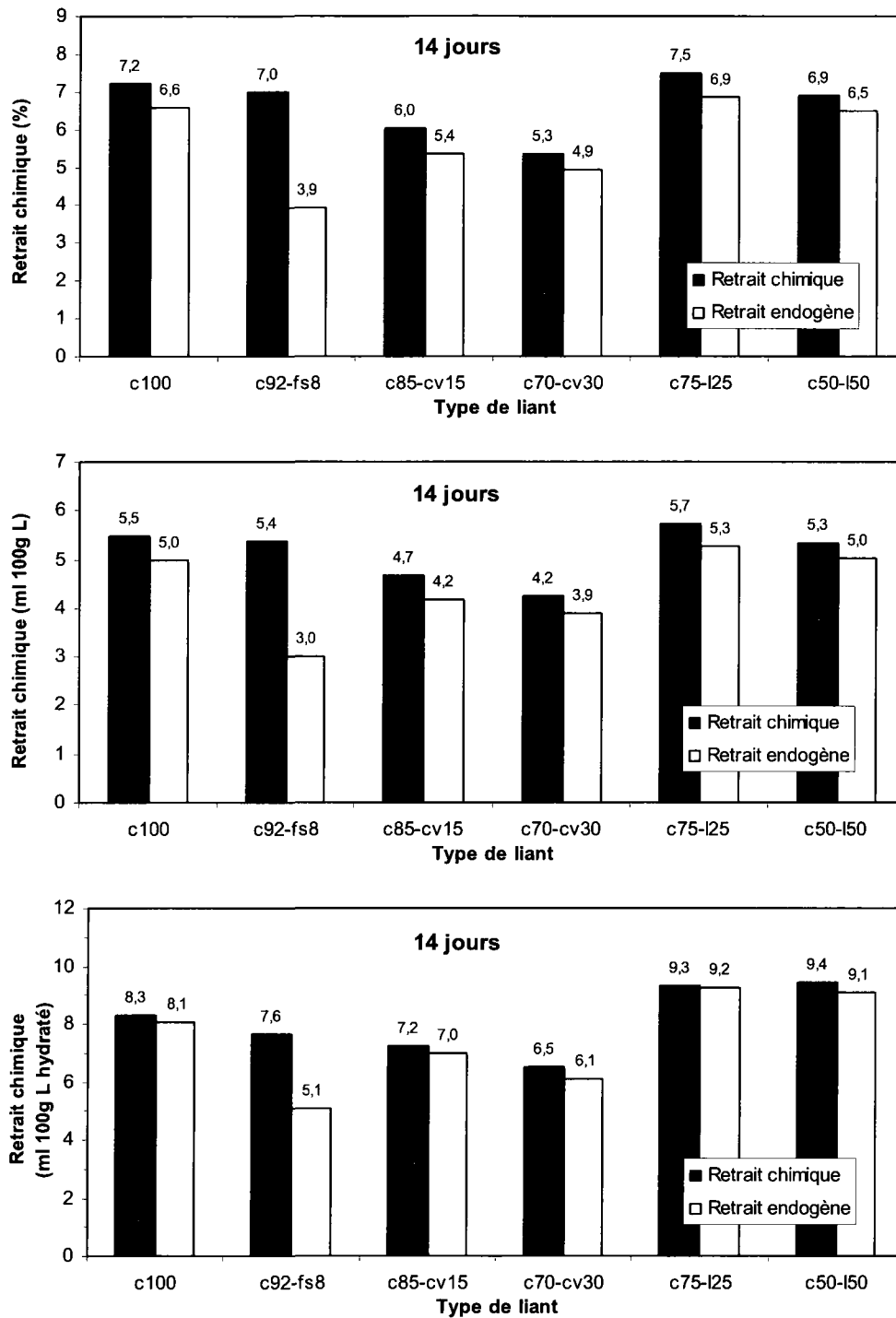


Figure 9. 4 – Comparaison entre le retrait chimique et le retrait endogène après 14 jours d'hydratation

10 SYNTHÈSE

Dans ce chapitre on analyse globalement l'ensemble des résultats en fonction des objectifs spécifiques de la thèse, soit : comprendre les effets des ajouts cimentaires, de la température, du squelette granulaire et du rapport E/L sur le développement du retrait endogène.

10.1 Effet du type de liant

10.1.1 Coulis à 100 % ciment Portland

Parmi les liants utilisés dans cette étude, le ciment Portland de Type 10 est le liant qui est capable de fixer chimiquement la plus grande quantité d'eau à 7 jours ou à 14 jours (Figure 5.38). Après 60 jours d'hydratation du ciment Portland, nous avons mesuré une quantité totale d'eau liée chimiquement de 0,231 grammes d'eau par gramme de liant (Tableau 5.1). Le bilan volumique de la réaction d'hydratation du ciment Portland est négatif. Selon les calculs présentés au tableau 7.2, le ciment Portland pleinement hydraté développe un déficit volumique de 9,2 % ou environ de 7,1 ml/100 g de ciment hydraté. Ces résultats sont très similaires à ceux qui sont habituellement publiés dans le cas du ciment Portland de Type 10.

Le degré d'hydratation à 7 jours ou à 14 jours est fortement dépendant du rapport E/L et de la température. Plus le rapport E/L et la température augmentent, plus le degré d'hydratation augmente. C'est la progression du degré d'hydratation qui fait progresser le retrait endogène interne et le retrait endogène externe. Mentionnons que 50% à 80% du retrait endogène se développe entre 0 et 24 heures. Pour un rapport E/L donné, plus le degré d'hydratation est élevé plus le retrait endogène augmente.

Le rapport E/L a un effet majeur sur le développement du retrait endogène. Cet effet découle de l'influence du rapport E/L sur la structure de la porosité capillaire. Par exemple, à 7 jours le rayon critique des pores de coulis avec un rapport E/L de 0,30 (20 à 23 nm) est environ deux fois plus faible que celui des coulis avec un rapport E/L de 0,45 (38 à 54 nm) (Figure 6.25).

Après la prise, le déficit volumique (retrait chimique) engendre la formation de vides gazeux dans la porosité capillaire (retrait endogène interne). Ces vides créent des ménisques aux

interfaces air-eau. Dans les coulis avec un rapport E/L faible, le rayon des ménisques est plus faible car les pores sont plus fins (rayon critique plus petit). Ces ménisques plus fins engendrent de fortes dépressions capillaires et, par conséquent, un retrait endogène externe plus important. Globalement tous les résultats démontrent que le développement du retrait endogène est gouverné par deux principaux paramètres fondamentaux :

- L'intensité du retrait chimique (contraction Le Chatelier). C'est une caractéristique intrinsèque du liant.
- L'évolution des caractéristiques de la structure poreuse de la pâte. Cette structure est gouvernée par le degré d'hydratation et le rapport E/L.

C'est à partir de ces deux paramètres qu'on peut théoriquement, pour un liant, un rapport E/L et un degré d'hydratation donnés, déterminer le rayon des ménisques dans la porosité capillaire, l'intensité de la dépression capillaire qui en découle et ainsi l'intensité du retrait endogène.

10.1.2 Coulis avec 8% de fumée de silice

Le C-S-H pouzzolanique est moins dense que le C-S-H formé par les silicates. Le déficit volumétrique de la réaction pouzzolanique est inférieur à 1%. L'ajout de la fumée de silice devrait donc diminuer la contraction Le Chatelier. Les résultats de la figure 9.2 confirment qu'il y a une légère diminution du retrait chimique intrinsèque en présence de la fumée de silice. Mentionnons que le retrait endogène est plus faible si le retrait chimique est plus faible.

Pour un rapport E/L et une température donnés, la fumée de silice (8%) diminue la quantité d'eau liée chimiquement à 7 jours (Figure 5.2). La diminution d'environ 9% correspond à peu près au taux de remplacement en fumée de silice (8%). À 60 jours, le liant avec 8% de fumée de silice lie chimiquement 0,210 grammes d'eau par gramme de liant. C'est environ 9% moins d'eau liée chimiquement que dans le cas d'un ciment Portland pur (Tableau 5.1).

À 7 et 14 jours, le degré d'hydratation du liant avec fumée de silice est très légèrement plus faible (différence de moins de 3%) que pour un ciment Portland pur.

Tous les effets mentionnés précédemment ont un effet bénéfique sur la réduction du retrait endogène. Cependant, les résultats expérimentaux démontrent que la fumée de silice augmente le retrait endogène. Ce comportement peut s'expliquer de la façon suivante :

- La fumée de silice augmente le retrait endogène en raison de son effet sur la structure de la porosité capillaire. Cependant, l'effet de la fumée de silice sur le volume total de la porosité est négligeable à 7 et 14 jours.
- La fumée de silice (8%) diminue le rayon critique des pores par un facteur compris entre 1,5 et 2 (dépendant de la température et du rapport E/L). Par exemple, l'utilisation de 8% de fumée de silice produit le même raffinement de la porosité capillaire que l'abaissement du rapport E/L de 0,45 à 0,35.
- Donc, la fumée de silice (8%) raffine fortement les pores, diminue le rayon des ménisques, augmente la dépression capillaire et augmente le retrait endogène externe. Globalement, les effets néfastes de la fumée de silice (raffinement de la porosité) sur le développement du retrait endogène sont bien plus importants que les effets bénéfiques (diminution du retrait chimique).

10.1.3 Coulis avec 25% et 50% de laitier

Les résultats de retrait chimique montrent que c'est le laitier qui produit la plus forte contraction Le Chatelier (Figure 9.3).

L'utilisation du laitier diminue la quantité d'eau liée chimiquement à 7 jours. Plus la quantité de laitier est importante plus la quantité d'eau liée chimiquement diminue. La diminution moyenne est de 12% pour 25% de laitier et de 23% pour 50% de laitier. La quantité d'eau liée plus faible et la diminution du degré d'hydratation à 7 et 14 jours ont des effets bénéfiques sur l'intensité du retrait endogène au jeune âge.

Le laitier (25% et 50%) engendre une diminution de la porosité totale et un léger raffinement des pores (diminution du rayon critique, figures 6.27 et 6.28). À 50% de remplacement, le raffinement des pores est presque aussi intense que celui engendré par la fumée de silice. Ce raffinement des pores capillaires engendre un retrait endogène plus important (Figures 7.90 et

7.91). L'utilisation de 50% de laitier produit un retrait endogène externe similaire à celui obtenu avec 8% de fumée de silice car les structures de la porosité capillaire obtenues avec 50% de laitier et 8% de fumée de silice sont très similaires.

Donc, le laitier raffine les pores, surtout à un taux de remplacement de 50%, diminue le rayon des ménisques, augmente la dépression capillaire et augmente le retrait endogène. Mentionnons que le laitier utilisé dans cette étude est relativement fin et plus réactif que les laitiers usuels.

10.1.4 Coulis avec 15% et 30% de cendre volante

Parmi tous les liants utilisés, c'est la cendre volante qui engendre la contraction Le Chatelier la plus faible (Figure 9.3). L'ajout de la cendre volante devrait donc diminuer le retrait endogène par l'effet de la dilution et à cause du retrait chimique faible.

Pour un rapport E/L et une température donnés, les cendres volantes diminuent fortement la quantité d'eau liée chimiquement à 7 et 14 jours (Figure 5.11 et 5.12). La diminution est de 11 à 23% avec 30% de cendre volante et de 2 à 16% avec 15% de cendre volante. Cependant, les degrés d'hydratations à 7 et 14 jours sont peu affectés par la cendre volante car le rapport E/C effectif est plus élevé, ce qui favorise une meilleure hydratation du ciment Portland. Après 7 et 14 jours d'hydratation, on peut considérer que la cendre volante ne s'hydrate que très peu et joue un rôle de filler. Les effets qui précèdent contribuent à diminuer le développement du retrait endogène au jeune âge.

L'effet le plus significatif des cendres volantes est leur impact sur le rayon critique des pores. L'utilisation de 15% de cendre volante produit des pores plus grossiers, surtout pour le rapport E/L de 0,45. L'utilisation de 30% de cendre volante augmente le rayon critique des pores par un facteur compris entre 3% et 300%, surtout pour E/L de 0,45.

Globalement, la cendre volante diminue le retrait endogène interne et externe (Figures 7.92 et 7.93).

10.1.5 Synthèse sur l'effet des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires influencent :

- La densité des C-S-H. Les C-S-H formés par les silicates sont plus denses que ceux formés par les pouzzolanes.
- L'intensité de la contraction Le Chatelier. La contraction Le Chatelier est plus importante lors de la formation de C-S-H plus denses.
- Degré d'hydratation au jeune âge.
- Structure de la porosité capillaire.

Les ajouts cimentaires les plus défavorables au niveau du retrait endogène externe sont la fumée de silice et le laitier. Ils engendrent un raffinement de la porosité capillaire et augmentent le degré d'hydratation au jeune âge.

Les ajouts cimentaires les plus favorables au niveau du retrait endogène externe sont les cendres volantes. Lors d'hydratation des cendres volantes, le degré d'hydratation est peu élevé et la porosité capillaire est grossière, surtout au jeune âge (< 14 jours).

10.2 Effet de la température

Pour tous les types de liants, une augmentation de la température engendre une augmentation du degré d'hydratation à 7 et 14 jours (Figures 5.1 à 5.6). L'augmentation du degré d'hydratation se traduit par un retrait interne plus fort (en conditions quasi isotherme).

Pour tous les types de liants, une augmentation de la température engendre une légère diminution du rayon critique des pores (raffinement de la porosité). C'est normal puisque l'hydratation est plus avancée.

L'effet de la température est très important dans le cas des liants avec cendre volante si le rapport E/L est de 0,45. Dans ce cas, on observe une activation de l'hydratation des cendres volantes par la température élevée.

Une température faible (10°C) augmente le retrait endogène externe mesuré à partir du début d'essai, alors qu'une température élevée (30°C) le diminue (Figure 10.1). La structure des C-S-H est probablement influencée par la température. Les C-S-H développés à faible température sont peut-être plus denses, ce qui engendre plus de retrait chimique et, par conséquent, plus de retrait externe à partir du début d'essai. De plus, une température faible retarde la prise. Le coulis reste plastique pendant une plus longue période. Il n'y a donc pas de rigidification du squelette minéral pour s'opposer à la contraction Le Chatelier. Le retrait endogène externe avant la prise pourrait donc être augmenté.

Dans le cas du retrait externe mesuré après la prise, l'effet de la température est l'inverse de celui observé pour le retrait externe mesuré à partir du début de l'essai. Ainsi, une température plus élevée (30°C) augmente le retrait externe après la prise, alors qu'une température plus faible (10°C) le diminue (Figure 10.1). À plus forte température (30°C), le retrait externe plus important après la prise est probablement dû à la formation d'une porosité capillaire plus faible et plus fine (Figures 6.1 à 6.3), ce qui diminue la taille des ménisques et augmente la traction capillaire dans la phase interstitielle.

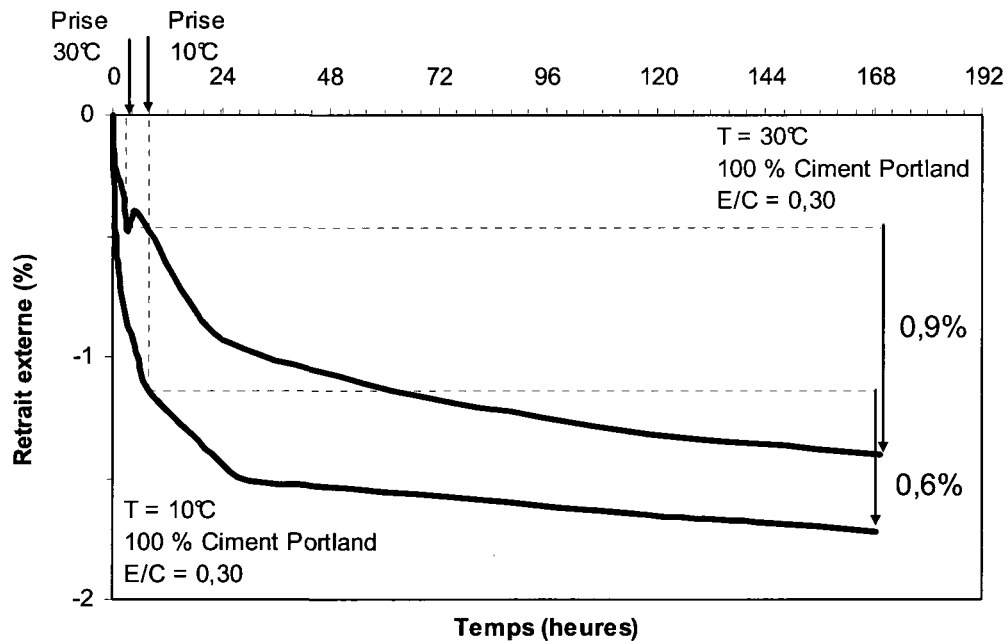


Figure 10. 1 – Courbes de retrait externe obtenues à 10°C et 30°C

10.3 Effet du squelette granulaire

L'influence de la proportion volumique de sable sera analysée en deux parties, soient :

- Effet sur le retrait interne
- Effet sur le retrait externe

10.3.1 Retrait interne

Le retrait interne des mortiers est essentiellement gouverné par le degré d'hydratation comme celui des coulis. Le retrait interne des mortiers diminue proportionnellement avec le volume de pâte. Plus on augmente la proportion de sable, plus on diminue la proportion de pâte et plus le pourcentage de retrait interne diminue (Figure 8.26, Tableau 8.1).

10.3.2 Retrait externe

L'utilisation du sable permet de diminuer le retrait endogène externe car le sable (inerte volumétriquement) occupe une partie du volume total du mortier (il remplace la pâte). Plus la proportion volumique du sable augmente, plus le retrait endogène externe du mortier diminue. Cependant, cette diminution n'est pas proportionnelle au volume de pâte dans le mortier (Figure 8.26 et Tableaux 8.2 et 8.3). Par exemple, un mortier contenant 44 % de pâte en volume ne développe pas 44 % du retrait endogène externe d'un coulis équivalent. Il en développe en moyenne 72 % à partir du début d'essai et 84 % après la prise.

Ces résultats suggèrent que l'ajout d'une phase granulaire introduit un nouveau mécanisme favorisant le développement du retrait endogène externe. Il est possible que ce mécanisme soit associé à la présence de la zone d'interface pâte-granulat. Dans les mortiers, cette zone d'interface pourrait ajouter une porosité supplémentaire. Cette porosité, tout comme la porosité capillaire, pourrait accueillir des ménisques qui contribuent à la mise en tension de la solution capillaire. Donc, pour un volume de pâte donné, le retrait endogène externe est plus important en présence de sable car la porosité totale est plus importante puisqu'elle inclut la porosité capillaire et aussi la porosité d'interface.

10.4 Analyse de la relation entre la structure de la porosité capillaire et le développement du retrait endogène

Le retrait endogène externe est lié à l'intensité de la dépression capillaire. L'intensité de la dépression capillaire est donnée par la loi de Laplace (Équation 1.7) :

$$P_g - P_l = \frac{2\sigma_{lg}}{r_{ms}}$$

Selon la loi de Laplace, plus le rayon du ménisque est petit, plus la dépression capillaire est importante. La formation des ménisques dans les pores capillaires est présentée sur les photos 1.2 à 1.6. Selon Baroghel-Bouny, on peut considérer que le rayon du ménisque est égal au rayon du pore qui le contient. Il devrait donc y avoir une relation entre l'intensité du retrait endogène externe et le rayon des pores capillaires qui contient les ménisques.

La figure 10.2 présente la relation générale entre le rayon critique des pores et l'intensité du retrait endogène externe après la prise après 7 jours d'hydratation. Cette relation inclut tous les coulis testés dans le cadre de cette thèse. La figure 10.2 démontre qu'il y a une relation linéaire entre le retrait endogène externe après la prise et l'inverse du rayon critique des pores. Cette relation est compatible avec la loi de Laplace. On constate clairement que plus le rayon critique du pore est petit, plus le retrait endogène externe après prise est important. Il faut rappeler que le rayon critique ne correspond pas nécessairement au rayon du ménisque. Cependant un rayon critique faible indique que globalement la porosité capillaire est fine et que par conséquent, le rayon de ménisque serait lui aussi petit (ménisque plus courbé).

La figure 10.2 démontre que l'intensité du retrait endogène externe après prise est essentiellement gouvernée par la structure de la porosité capillaire. Les effets de tous les paramètres étudiés (E/L, liant, température) sur le développement du retrait endogène externe peuvent donc s'analyser en évaluant les impacts de ces paramètres sur la finesse de la porosité capillaire. Plus la porosité capillaire est fine plus les tractions capillaires sont importantes et plus le retrait endogène externe est fort.

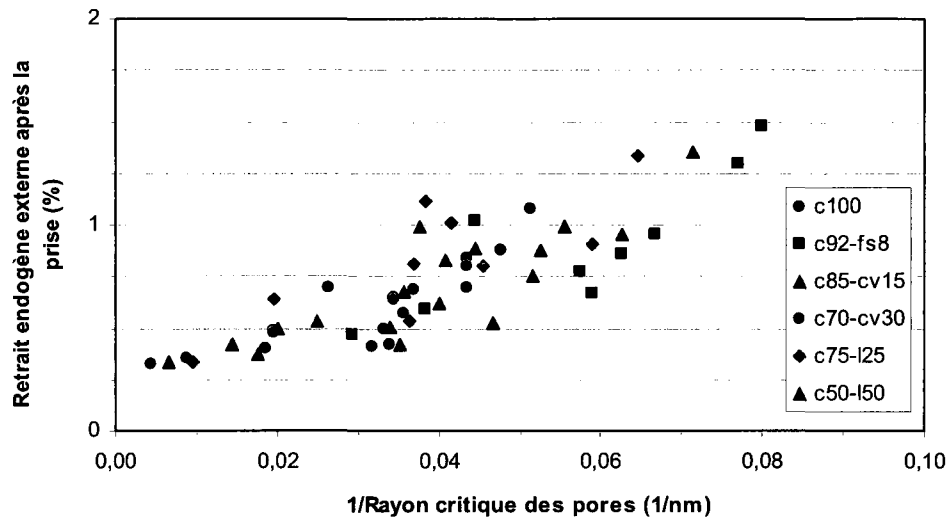


Figure 10. 2 – Relation entre le retrait endogène externe après la prise et le rayon critique des pores après 7 jours d'hydratation

Notre approche expérimentale permet d'évaluer plus directement la relation entre le retrait endogène externe et la dimension des ménisques formés dans la porosité capillaire. La méthode d'analyse consiste à utiliser les mesures du retrait endogène interne pour évaluer le degré de saturation de la porosité capillaire à 7 jours. En couplant les mesures du degré de saturation avec les courbes de porosité au mercure, il est alors possible d'estimer le rayon des pores contenant des ménisques (Figure 10.3).

La figure 10.4 présente la relation entre le rayon du ménisque et l'intensité du retrait endogène externe à 7 jours de tous les coulis testés à 20°C. On constate qu'il existe encore une fois une relation unique et linéaire entre le retrait endogène externe après la prise et l'inverse du rayon du ménisque. Cette relation est tout à fait compatible avec la loi de Laplace.

Pour comprendre l'influence des paramètres de formulation (E/L, type et dosage de liant) sur l'intensité du retrait endogène externe, il suffit donc d'évaluer le rayon des ménisques formés dans la porosité capillaire à un âge donné.

Ainsi, on remarque que les formulations qui produisent des ménisques de grande dimension sont celles qui développent les plus faibles retraits endogènes externes à 7 jours. C'est notamment le cas des coulis avec un rapport E/L de 0,45 avec ou sans cendre volante.

À l'inverse, les formulations qui conduisent à la formation de ménisques très fins sont celles qui développent les retraits endogènes externes les plus grands. C'est le cas des coulis avec fumée de silice et laitier fabriqués avec un rapport E/L de 0,30.

D'après la figure 10.2, la taille des ménisques est comprise entre 15 nm et 90 nm. Selon les calculs de Baron (Tableau 1.2) on peut estimer que la dépression capillaire est comprise entre moins de 3 MPa (90 nm) et près de 10 MPa (15 nm). On constate ainsi que dans les coulis développant le plus fort retrait endogène (1%) à 7 jours, la dépression capillaire est plus que 3 fois supérieure à celle des coulis développant les retraits endogènes les plus faibles (0,4%).

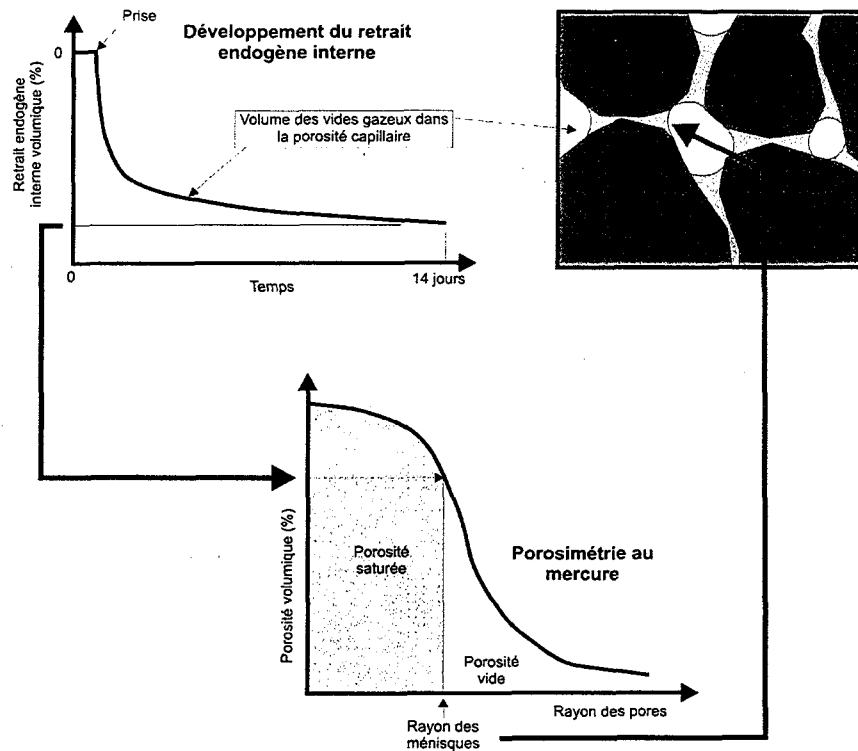


Figure 10. 3 – Détermination du rayon des ménisques à partir des résultats de la porosité au mercure

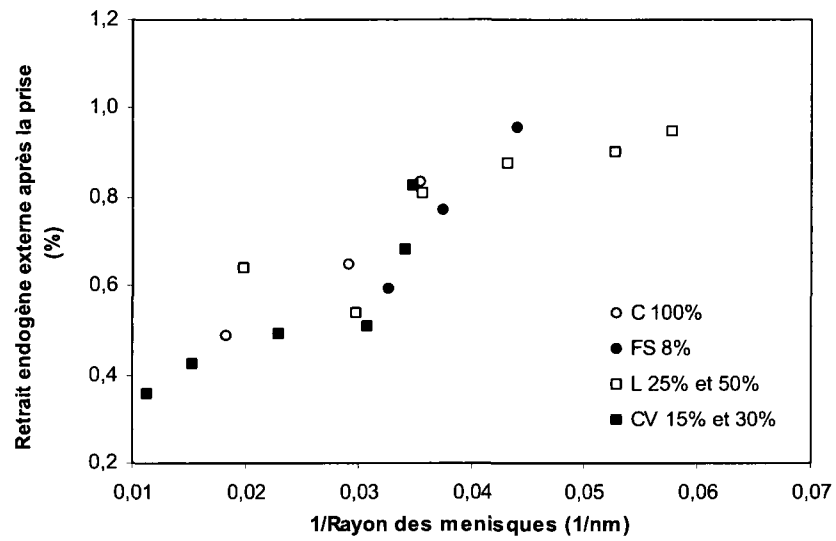


Figure 10. 4 – Relation entre le retrait endogène externe après la prise et le rayon des ménisques après 7 jours d'hydratation

11 CONCLUSION

Cette recherche sur l'influence des ajouts cimentaires, de la température, du rapport E/L et de la teneur en sable sur le retrait endogène des matrices cimentaires a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- Le retrait endogène total peut être séparé en deux composantes : le retrait endogène interne et le retrait endogène externe. Cette recherche a permis de quantifier précisément la composante interne du retrait endogène de matrices cimentaires excluant l'utilisation de la fumée de silice et d'un rapport E/L faible. L'approche expérimentale a permis de mesurer, en cours d'hydratation, le volume des vides gazeux dans la porosité capillaire. Cette information permet ensuite de déterminer le rayon des ménisques à l'interface des phases gazeuse et liquide dans la porosité capillaire.
- C'est la progression du degré d'hydratation qui contrôle le développement du retrait endogène (externe et interne). Dépendant du type de liant et du rapport E/L, environ 50 à 80% du retrait endogène se développe entre 0 et 24 heures.
- Le rapport E/L a un effet majeur sur le développement du retrait endogène en raison de son influence sur la structure de la porosité capillaire, plus celle-ci est fine, plus le retrait endogène est important. Nous avons pu montrer que le rayon critique des pores capillaires dans une pâte avec un rapport E/L de 0,30 est environ deux fois plus petit que celui d'une pâte avec un rapport E/L de 0,45. Le retrait chimique engendre la formation des vides gazeux après la prise. Ces vides créent des ménisques aux interfaces air-eau. Dans les pâtes à faible rapport E/L, les ménisques sont plus courbés, ce qui engendre de fortes dépressions capillaire et par conséquent, un retrait endogène plus important.
- La fumée de silice influence le retrait chimique. Les C-S-H pouzzolaniques sont moins denses que les C-S-H formés par l'hydratation du ciment Portland. Nos résultats ont confirmé que le retrait chimique d'un liant avec 8 % de fumée de silice est légèrement plus faible que celui du ciment Portland pur. De plus, à 7 jours et 14 jours le degré d'hydratation du liant avec fumée de silice est très légèrement plus faible. Ces effets devraient contribuer à diminuer le retrait endogène. Cependant, nos résultats ont

démontré que l'utilisation de 8 % de fumée de silice augmente le retrait endogène en raison de son effet sur la structure de la porosité capillaire. La fumée de silice diminue le rayon critique des pores par un facteur compris entre 1,5 à 2,0. Ce raffinement de la porosité capillaire diminue le rayon des ménisques, augmente la dépression capillaire et par conséquent le retrait endogène.

- Le laitier utilisé pour cette recherche est beaucoup plus fin que les laitiers usuels et ses effets sur l'hydratation et la structure de la pâte de ciment hydraté sont donc plus importants au jeune âge (7 et 14 jours). Les liants avec laitier (25 % et 50 %) produisent une contraction Le Chatelier plus importante de celle du ciment Portland pur. Cependant, le degré d'hydratation à 7 et 14 jours est plus faible que celui du ciment Portland. Le laitier produit une diminution de la porosité totale et un raffinement des pores capillaires. Pour un taux de remplacement de 50 %, le raffinement des pores est approximativement équivalent à celui engendré par la fumée de silice (8 %). Le raffinement des pores engendre une augmentation du retrait endogène des liants avec laitier. Pour une teneur en laitier de 50 %, le retrait endogène externe est similaire à celui obtenu avec 8 % de fumée de silice.
- Les liants avec cendres volantes ont une contraction Le Chatelier plus faible que celle du ciment Portland pur. Cette faible contraction découle du fait que la cendre volante s'hydrate très peu au jeune âge et que les C-S-H pouzzolaniques sont possiblement moins denses. Au jeune âge (14 jours) la porosité totale est plus importante et les pores capillaires sont plus grossiers. Par exemple, l'utilisation de 30 % de cendre volante augmente le rayon critique des pores par un facteur pouvant atteindre 3 dans le cas du rapport E/L de 0,45. Globalement, les liants avec cendre volante produisent, au jeune âge, un réseau de pores capillaire plus grossiers qui comporte donc des ménisques de plus grand diamètre et qui sont moins courbés. Ce phénomène est la principale cause du retrait endogène moins important des matrices cimentaires avec cendre volante.
- Les retraits endogènes interne et externe des mortiers sont influencés par la proportion volumique de pâte (ou par celle du sable). Le retrait interne est proportionnellement gouverné par le volume de pâte. Une diminution de 25% du volume de pâte engendre une diminution de 25% du retrait interne. L'ajout de sable (ou la diminution du volume de

pâte), diminue le retrait endogène externe. Cependant, cette diminution n'est pas proportionnelle au volume de pâte. Ainsi, un mortier contenant 44% de pâte (en volume) développe plus que 44% du retrait endogène externe d'un coulis équivalent. Ces résultats suggèrent que l'ajout d'une phase granulaire introduit un nouveau mécanisme favorisant le développement du retrait endogène externe. C'est probablement la porosité d'interface pâte-granulat qui pourrait accueillir des ménisques qui contribuent à la mise en tension de la solution capillaire.

- L'intensité du retrait endogène après la prise est essentiellement gouvernée par la structure de la porosité capillaire. Plus la porosité est fine, plus les tractions capillaires sont importantes et plus le retrait endogène externe est fort. Il existe une relation unique et linéaire entre le retrait endogène externe après la prise et l'inverse du rayon du ménisque. Pour comprendre l'influence des paramètres de formulation (E/L, type et dosage du liant) sur l'intensité du retrait endogène externe, il suffit donc d'évaluer le rayon des ménisques formés dans la porosité capillaire. Dans les coulis testés, la taille des ménisques est comprise entre 15 nm et 90 nm. On peut estimer que la dépression capillaire est alors comprise entre 3 et 10 MPa. Ainsi, dans les coulis développant le plus fort retrait endogène, la dépression capillaire est environ trois fois supérieure à celle des coulis développant le retrait endogène le plus faible.

Les résultats et les conclusions de cette thèse permettent de proposer et de supporter les thématiques futures de recherche suivantes :

- Poursuivre les travaux amorcés dans le but de mieux comprendre la relation permettant de prédire le retrait linéique à partir du retrait volumique.
- Exploiter les mesures expérimentales et les mécanismes fondamentaux pour supporter le développement et la validation du modèle mathématique et numérique du développement du retrait endogène des matrices cimentaires.

- Utiliser la cellule de retrait endogène pour comprendre et optimiser l'utilisation d'agents expansifs, d'agents réducteurs de retrait et de granulats légers (internal curing) pour contrôler le retrait endogène des bétons.
- Poursuivre les travaux sur l'influence de la porosité d'interface pâte – granulats sur le développement du retrait endogène externe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AÏTCIN, P.-C. (2002) *Le contrôle du retrait endogène*, Université de Sherbrooke, 19 p.
- AÏTCIN, P.-C. (2001) (a) *Bétons haute performance*, Éditions Eyrolles, Paris, 683 p.
- AÏTCIN, P.-C. (2001) (b) *Les liants hydrauliques*, Notes de cours, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, 485 p.
- AÏTCIN, P.-C. (2000) *Cement and concrete development from an environmental perspective*, Proceedings of : Concrete technology for a sustainable development in 21st century, p. 206-217.
- AOUAD, I. (1999) *Étude de l'influence du rapport eau/liant, de la fumée de silice et d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène de pâtes de ciment*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, 175 p.
- ASTM C 150 (2004) *Standard Specification for Portland Cement*, 8 p.
- BARCELO, L. (2001) *Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge*, Thèse de doctorat, L'école Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France, 298 p.
- BAROGHEL-BOUNY, V. (1994) *Caractérisation des pâtes de ciment et des béton, Méthodes, analyse, interprétation*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 468 p.
- BAROGHEL-BOUNY, V., KHEIRBEK, A. (2000) *Effect of mix-parameters on autogenous deformations of cement pastes-microstructural interpretations*, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000, Paris, p.115-141.
- BARON, J. (1982) *Les retraits de la pâte de ciment*, présenté dans *Le béton hydraulique*, Paris, Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées, p. 485-501.
- BENTZ, D.P. (2000) *CEMHYD3D : A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package. Version 2.0*, NISTIR 6485, United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 50 p.
- BENTZ, D.P., REMOND, S. (1997) *Incorporation of Fly Ash into a 3-D Cement Hydration Microstructure Model*, NISTIR 6050, United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 9 p.
- BENTZ, D.P. (1995) *A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Program. I. Hydration Rate, Heat of Hydration, and Chemical Shrinkage*, NISTIR 5756, United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 47 p.

- BERRY, E.E., HEMMINGS, R.T., ZHANG, M.H., CORNELIOUS, B.J. et GOLDEN, D.M., (1994) *Hydration in high-volume fly ash binders*, ACI Materials Journal, Vol. 91, p. 382-389.
- BJØNTEGAARD, Ø. (1999) *Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete*, Ph.D. thesis of NTNU, Trondheim, 256 p.
- BREUGEL, K.V., ZHOU, J., YE, G. (2006) *Hydration of Portland Cement Blended with Blast Furnace Slag at Early Stage*, 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 11-13 September 2006, Quebec City, Canada, p. 371-379.
- BREUGEL, K.V. (1991) *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*, Ph.D. thesis, Delft University, The Netherlands, 295 p.
- BUIL, M. (1979) *Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante*, Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 67 p.
- CARLES-GIBERGUES, A. (1990) *Les apports de la DRX dans l'étude des bétons*, publié par laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction, I.N.S.A.-U.P.S Génie civil, Toulouse, France, 28 p.
- CHARRON, J.-P. (2003) *Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte*, Thèse de doctorat, Université Laval, Département de génie civil, Québec, 340 p.
- DAIMON, M. (1980) *Mécanisme et cinétique de l'hydratation du ciment au laitier*, 7^e Congrès International de la chimie des ciments, Vol. 1, Paris, p.125-132.
- DESROSIERS, H. (1999) *Influence des cendres volantes sur le comportement au gel des matériaux cimentaires*, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil, Québec, 299 p.
- DUVAL, R., KHEIRBEK, A., BAROGHEL-BOUNY, V. (1998) *Influence de la fumée de silice sur le retrait endogène de la pâte de ciment*, Science des Matériaux et Propriétés des Bétons, Proceedings des 1ères Rencontres Internationales de Toulouse, Toulouse, France, p. 19-27.
- ESCALANTE, J.I., GOMEZ, L.Y., JOHAL, K.K., MENDOZA, G., MANCHA, H. et MÉNDEZ, J., (2001) *Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions*, Cement and Concrete Research, No 31, p. 1403-1409.
- FELDMANN, R. F., SEREDA, P. J. (1968) *A model for hydrated cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*, Matériaux et Construction, Vol. 1, No. 6, p. 509-520.
- FRAAY, A. L. A., BIJEN, J. M., HAAN, Y. M. (1989) *The reaction of fly ash in concrete – A critical examination*, Cement and Concrete Research, Vol. 19, p. 235-246.

GAGNÉ, R. (1997) *Durabilité et réparation du béton*, Notes de cours, Université de Sherbrooke, p. 21-200.

GAGNÉ, R., AOUAD, I., SHEN, J., POULIN, C. (1999) *Development of a new experimental technique for the study of the autogenous shrinkage of cement paste*, Materials and Structures, Vol.32, p. 635-642.

GARCIA BOIVIN, S. (1999) *Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*, Thèse de doctorat, L'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 249 p.

GEIKER, M. (1983) *Studies of portland cement hydration by measurements of chemical shrinkage and a systematic evaluation of hydration curves by means of dispersion model*, Ph.D. thesis, Institute of Mineral Industry, Technical University of Denmark, Lyngby, 260 p.

HANEHARA, S., HIRAO, H., UCHIKAWA, H., (1998) *Relationships between autogenous shrinkage, and the microstructure and humidity changes at inner part of hardened cement paste at early age*, Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, Hiroshima, Japan, p. 89-100.

HOLT, E. E. (2001) *Early age autogenous shrinkage of concrete*, Ph.D. thesis, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 446, 193 p.

HUA, C. (1992) *Analyses et modélisation du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante*, Thèse de doctorat, L'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 160 p.

JENSEN, O. M. (1995) *Thermodynamic limitation of self-dessiccation*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 1, p. 157-164.

JENSEN, O. M. (1998) *Influence of temperature on autogenous deformation and RH-change in hardening cement paste*, Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, 32 p.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. (1995) *A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste*, Materials and Structures, No. 28, p. 406-409.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. (1996) *Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste*, ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 6, p. 539-543.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. (2001) *Autogenous deformation and RH-change in perspective*, Cement and Concrete Research, No. 31, p. 1859-1865.

JUSTNES, H., VAN GEMERT, A., VERBOVEN, F., SELLEVOLD, E. J. (1996) *Total and external chemical shrinkage of low W/C ratio cement pastes*, Advances in cement research, Vol. 8, No. 31, p. 121-126.

JUSTNES, H., SELLEVOLD, E. J. REYNIERS, B., VAN LOO, D., VAN GEMERT, A., VERBOVEN, F., VAN GEMERT, D. (1998) (a) *The influence of cement characteristics on chemical shrinkage*, Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, Hiroshima, Japan, p. 67-76.

JUSTNES, H., HAMMER, T., SELLEVOLD (1998) (b) *Chemical shrinkage of cement paste, mortar and concrete*, Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, Hiroshima, Japan, p. 201-211.

JUSTNES, H., SELLEVOLD, E. J. REYNIERS, B., VAN LOO, D., VAN GEMERT, A., VERBOVEN, F., VAN GEMERT, D. (1999) *Chemical shrinkage of cementitious pastes with mineral additives*, Self-desiccation and its importance in concrete technology, Proceedings of the Second International Research Seminar, Lund, p. 73-84.

KHAYAT, K., AİTCIN, P.-C. (1992) *Silica Fume in concrete : an Overview*, Proceedings of ACI 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol II, Istanbul, Turquie, p. 835-871.

KOSMATKA, S. H., KERKHOFF, B., PANARESE, W. C., MACLEOD, N. F., MCGRATH, R. J. (2008) *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, septième édition canadienne, Association Canadienne du Ciment, 355 p.

KUMAR, R., BHATTACHARJEE, B., (2003) *Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete*, Cement and Concrete Research, No 33, p. 155-164.

LAM, L., WONG, Y.L. et POON, C.S., (2000) *Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems*, Cement and Concrete Research, No. 30, p. 747-756.

LAPLANTE, P., BOULAY, C. (1994) *Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers âges*, Materials and Structures, No. 27, p. 596-605.

LEA, F.M. (1970) *The Chemistry of Cement and Concrete* , Chemical Publishing inc.

MALHOTRA, V. M. (1987) *Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton*, Édité par V. M. Malhotra, CANMET, Ottawa, 471 p.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. (1996) *Pozzolan and Cementitious Materials*, Gordon and Breach Publishers, 189 p.

- MALTAIS, Y., (1996) *Étude de l'évolution du degré d'hydratation de ciments et du développement des résistances mécaniques de mortiers et de bétons soumis à différentes températures de mûrissement*, Thèse de doctorat, Université Laval, Département de génie civil, Québec, 188 p.
- MANAI, K., (1995) *Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, 180 p.
- MEDDAH, M.-S., TAGNIT-HAMOU, A. (2006) *Effect of mineral admixtures on concrete pore network and its impact on autogenous shrinkage*, Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montréal, p. 251-271.
- MEHTA, P. K. (1986) *Concrete structure, properties and materials*, Prentice-Hall, 450 p.
- MOLINA, L., (1993) *On Predicting the Influence of Curing Conditions on the Degree of Hydration*, Rapport CBI, Swedish Cement and Concrete Research Institute S-100 44, Stockholm, 96 p.
- MORANVILLE-REGOURD, M. (1998) *Cements Made From Blastfurnace Slag*, présenté dans Lea's Chemistry of Cement and Concrete par PETER C. HEWLETT, Éditions Arnold, p. 633-674.
- MORIN, R., HADDAD, G., AÏTCIN, P.-C. (2002) *Crack-Free, High-Performance Concrete Structures*, Concrete international, Vol. 24, No. 9, p. 43-48.
- NEVILLE, A. M. (2000) *Propriétés des bétons*, Éditions Eyrolles, Paris, 806 p.
- ODLER, I., YUGENFREUND, M., SKALNY, J., BRUNAUER, S. (1972) *Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity – III, Degree of Hydration, Expansion of Paste, Total Porosity*, Cement and Concrete Research, Vol. 2, p.
- POPIC, A., GAGNÉ, R. (2007) *Influence du rapport eau/liant et des ajouts minéraux sur le retrait endogène et le retrait chimique des pâtes de ciment*, Huitième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Montréal, 5-6 juillet 15 p.
- REGOURD, M. (1980) *Structure et comportement des hydrates des ciments au laitier*, 7^e Congrès International de la chimie des ciments, Vol. 1, Paris, p.
- REGOURD, M. (1983) *Pozzolanic Reactivity of Condensed Silica Fume*, présenté dans Condensed Silica Fume par AÏTCIN, P.-C., Université de Sherbrooke, Sherbrooke, p. 20-24.
- ROUSSEL, S. (2000) Communication privée, 125 p.

- SARIC-CORIC, M. (2001) *Interactions superplastifiant-laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, 291 p.
- SCHIEBL, P., PLANNERER, M., BRANDES, CHR. (2000) *Influence of binders and admixtures on autogenous shrinkage of high performance concrete*, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000, Paris, p.179-190.
- SELLEVOLD, E. J., JUSTNES, H., LUNDEVALL, G. (1992) *High Strength Concrete Binders, Part A : Reactivity and Composition of Cement Pastes With and Without Condensed Silica Fume*, Proceedings of the Fourth Canmet/ACI International conference on Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Istanbul, Turkey, p. 873-889.
- SELLEVOLD, E. J., JUSTNES, H. (1992) *High Strength Concrete Binders, Part B : Nonevaporable Water, Self-Desiccation and Porosity of Cement Pastes With and Without Condensed Silica Fume*, Proceedings of the Fourth Canmet/ACI International conference on Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Istanbul, Turkey, p. 891-902.
- SETTER, N., ROY, D. M. (1978) *Mechanical features of chemical shrinkage of cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol. 8, No. 5, 623-634.
- STARK, J., BOLLMANN, K. (2000) *Späte Ettringitbildung im Beton, Teil I / Late ettringite formation in concrete, Part I*, ZKG International, Vol. 53, No.4, p. 232-240.
- TAGNIT-HAMOU, A. (1997) *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*, Notes de cours, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, 287 p.
- TAKEMOTO, K., UCHIKAWA, H. (1980) *Hydration of pouzzolanic cement*, 7^e Congrès International sur la chimie des ciments, Paris, Vol.1, p. 1-29.
- TAYLOR, H.F.W. (1990) *Cement chemistry*, Academic Press Limited, 475 p.
- TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1992) *Autogenous shrinkage of cement paste with condensed silica fume*, 4th Canmet/ACI International Conference of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Istanbul, Turkey, p. 875-894.
- TAZAWA, E., MIYAZAWA, S., KASAI, T. (1995) (a) *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*, Cement and concrete research, Vol.25, No. 2, p. 288-292.
- TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1995) (b) *Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste*, Cement and concrete research, Vol.25, No. 2, p. 281-287.
- TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1997) *Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials*, Magazine of Concrete Research, Vol. 49, No. 178, p. 15-22.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1998) (a) *Autogenous Shrinkage of Concrete and its mechanism*, Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, Hiroshima, Japan, p. 11-28.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1998) (b) *Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete*, Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, Hiroshima, Japan, p. 257-268.

TOMA, G. (1999) *Comportement des bétons au jeune âge*, Thèse de doctorat, Université Laval, Département de génie civil, Québec, 264 p.

UCHIKAWA, H. (1986) *Effects of blending components on hydration and structure formation*, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brésil, p. 249-280.

VERNET, C., CADORET, G. (1992) *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à haute performance pendant les premiers jours*, Technodes, présenté dans Liants Hydrauliques par AITCIN, P-C., Département de génie civil, Université de Sherbrooke, p.7.L1-7.L13.

XU, A. (1992) *Structure of hardened cement-fly ash systems and their related properties*, Ph.D. thesis, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 295 p.

ANNEXE A

Volume cumulatif des pores dans les coulis

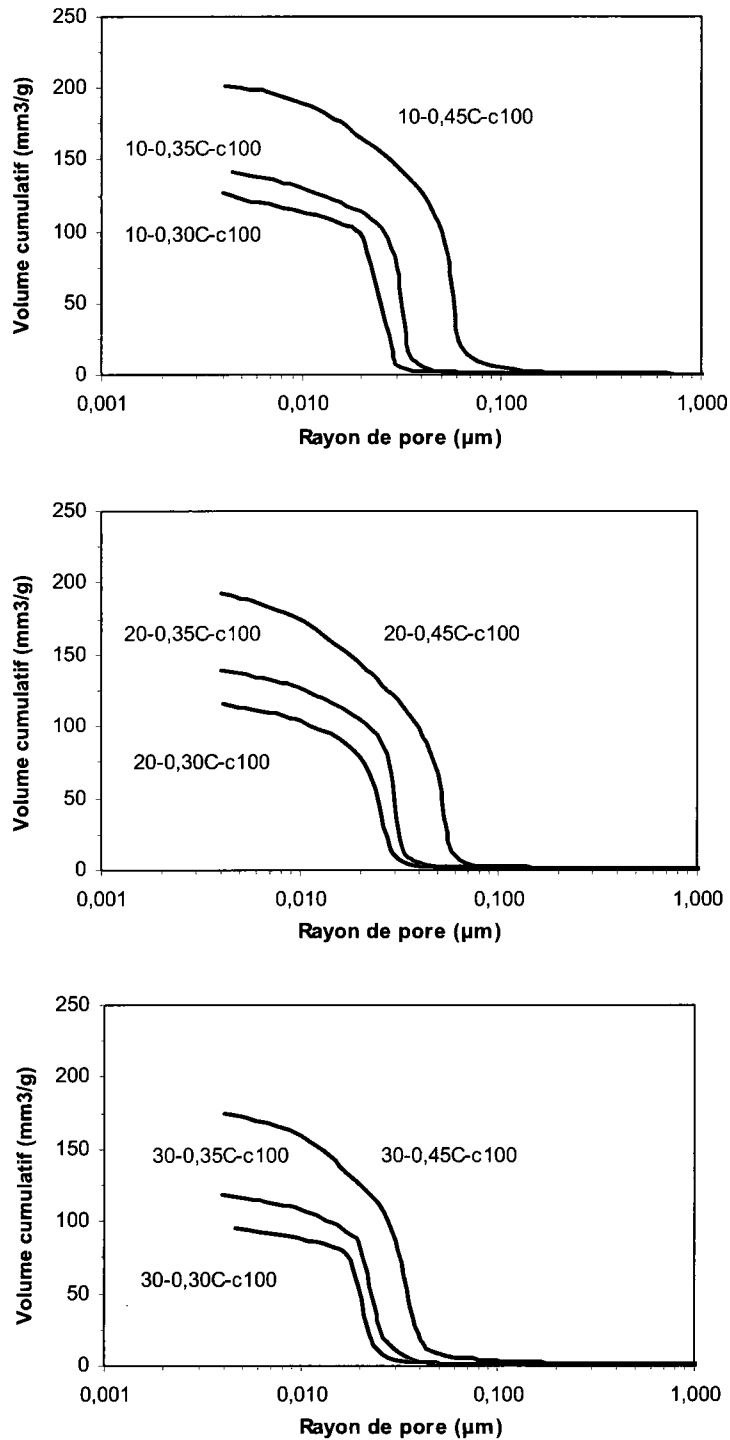


Figure A. 1 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis de références ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

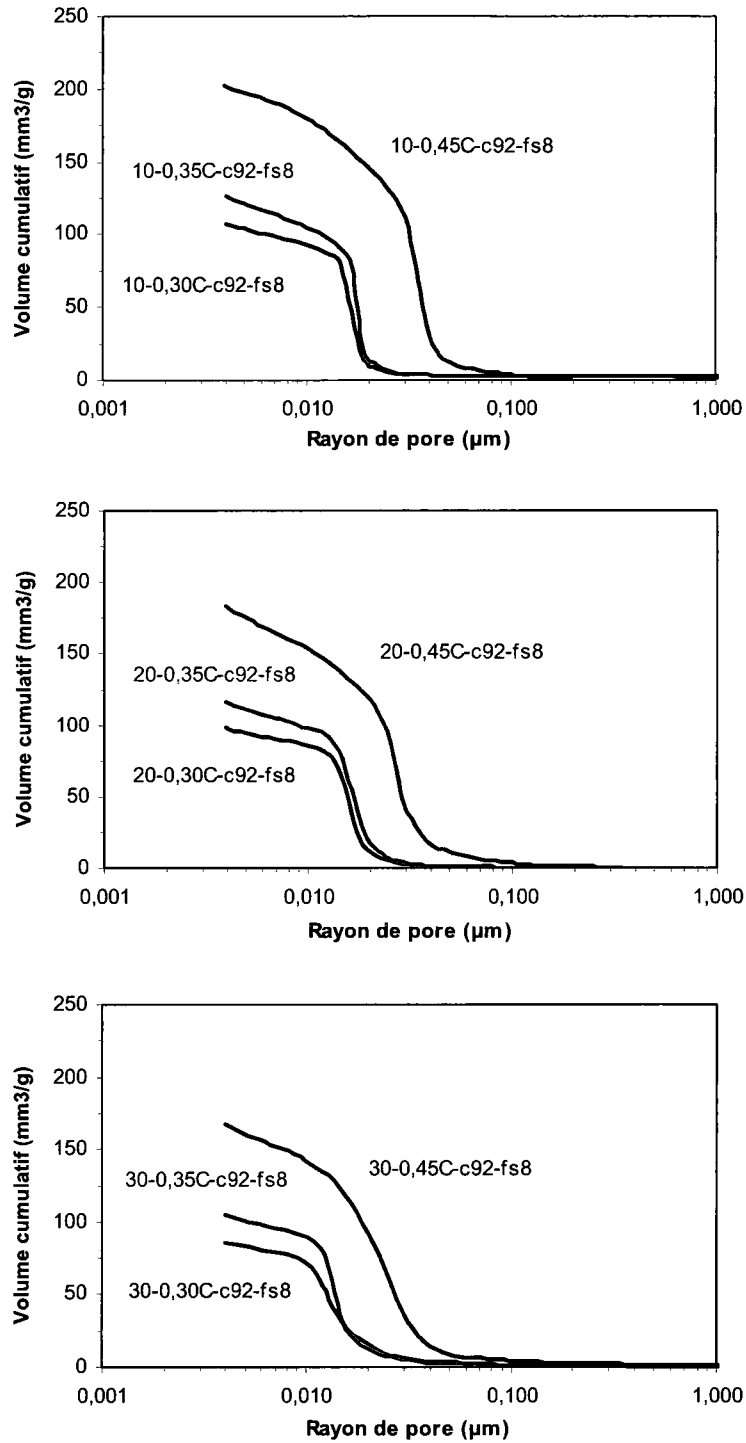


Figure A. 2 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

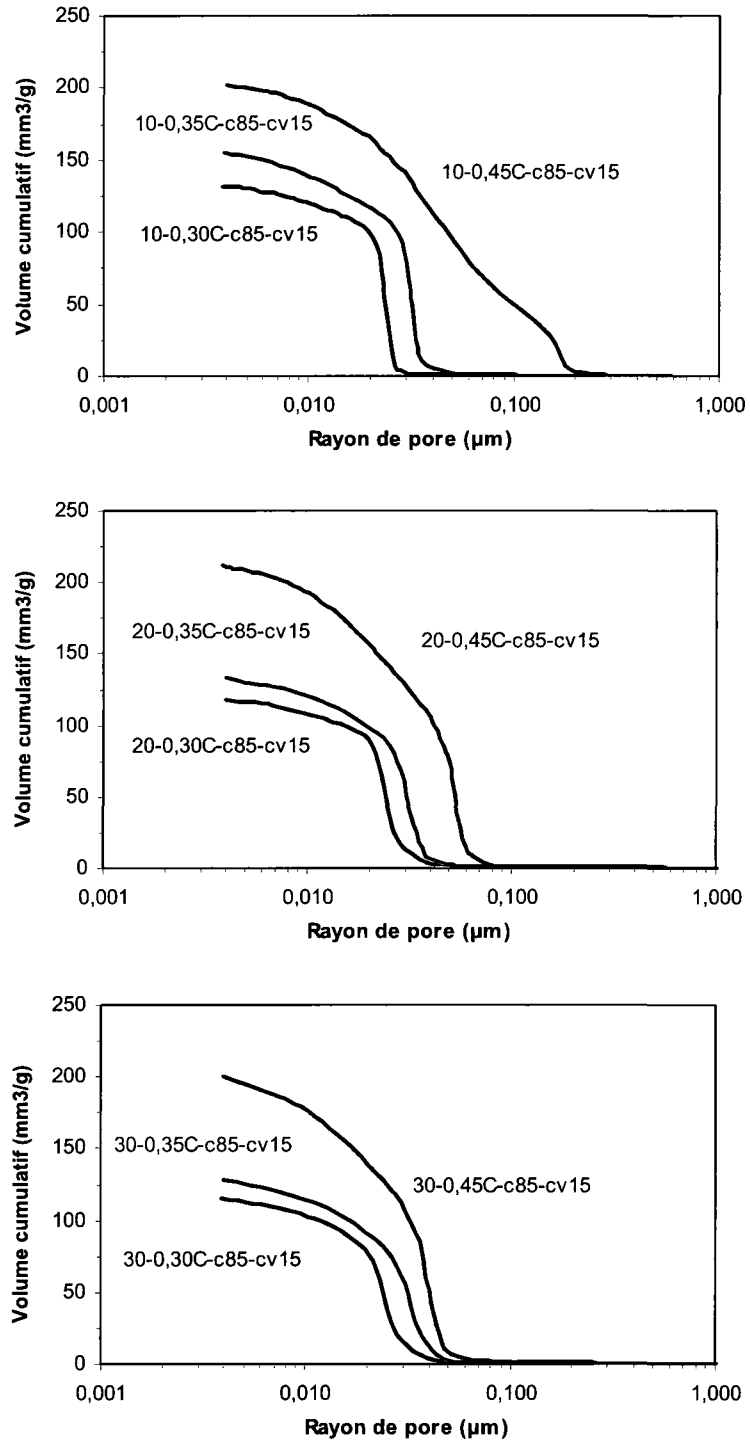


Figure A. 3 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

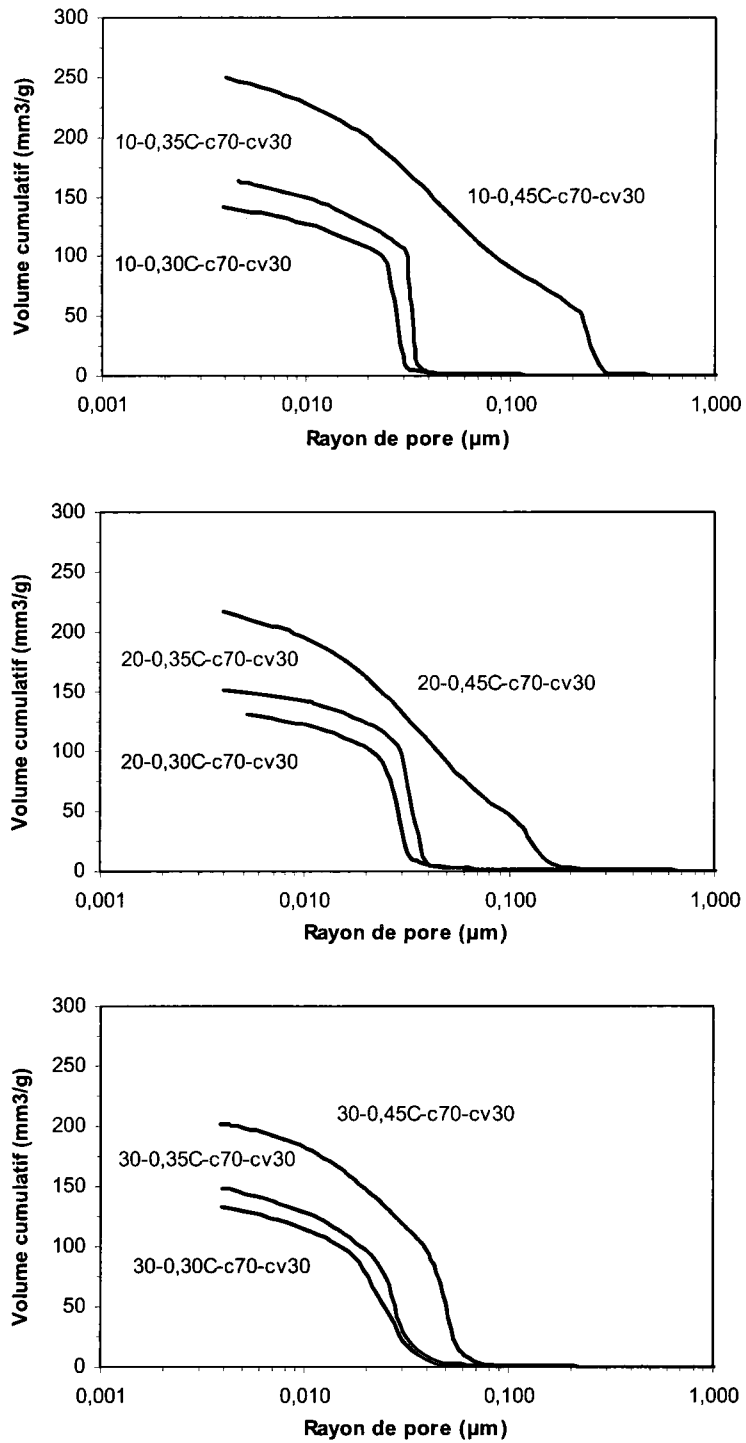


Figure A. 4 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

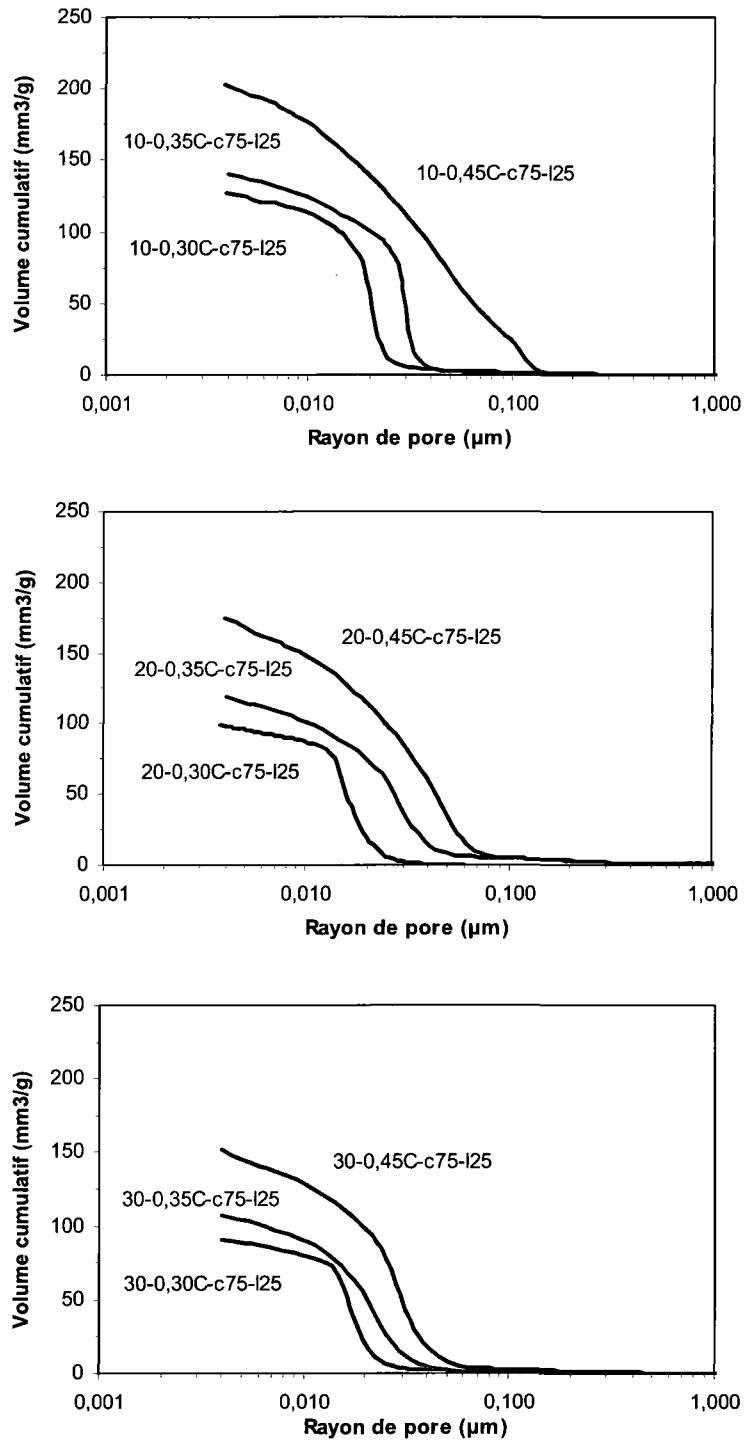


Figure A. 5 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

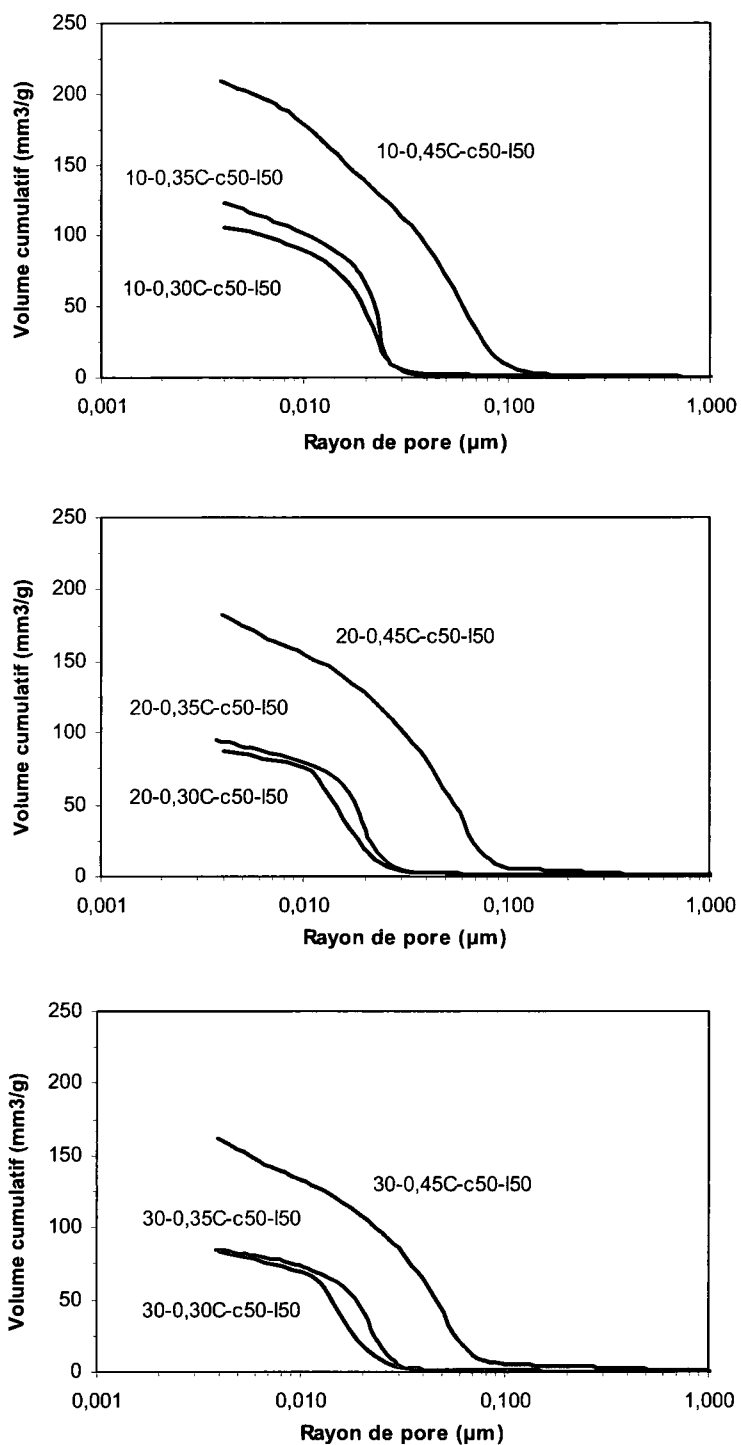


Figure A. 6 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

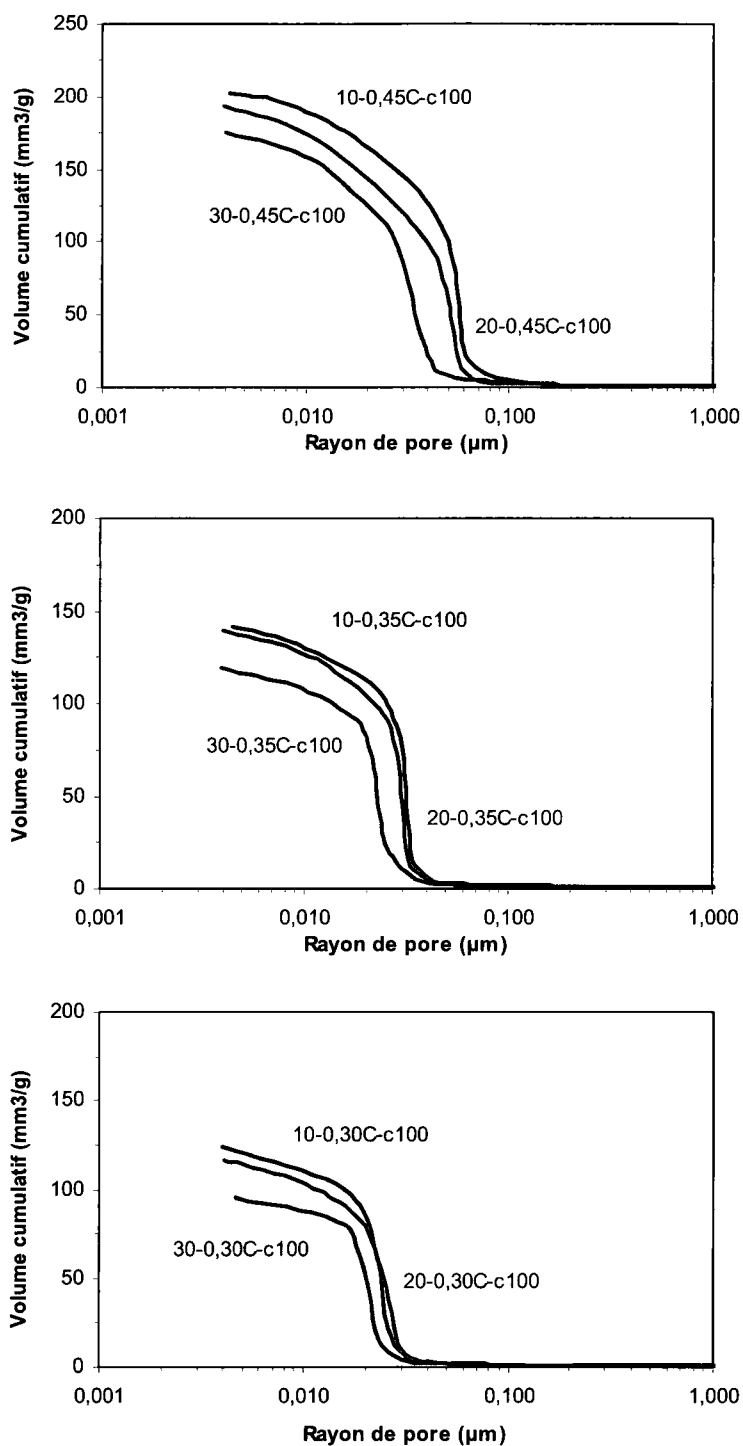


Figure A. 7 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis de références (T = 10, 20 et 30°C)

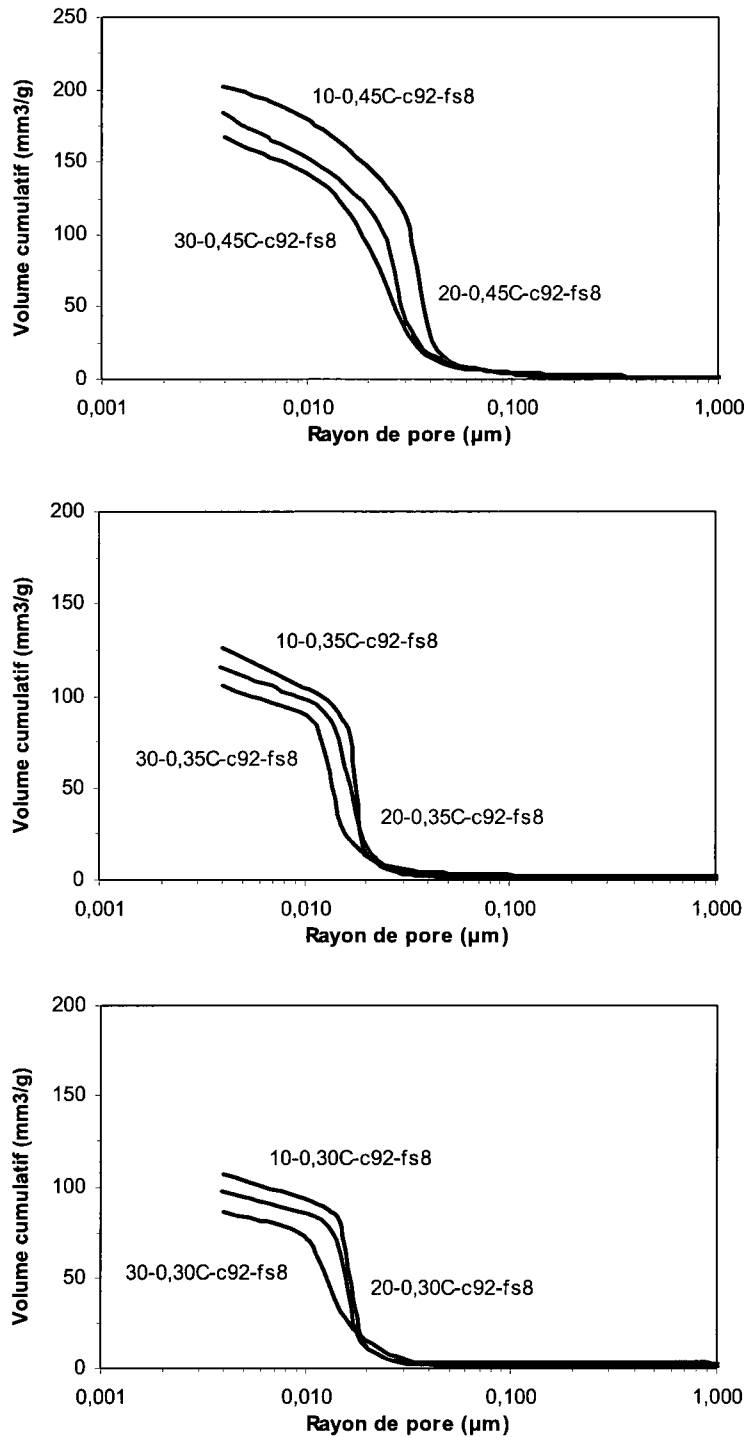


Figure A. 8 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (T = 10, 20 et 30°C)

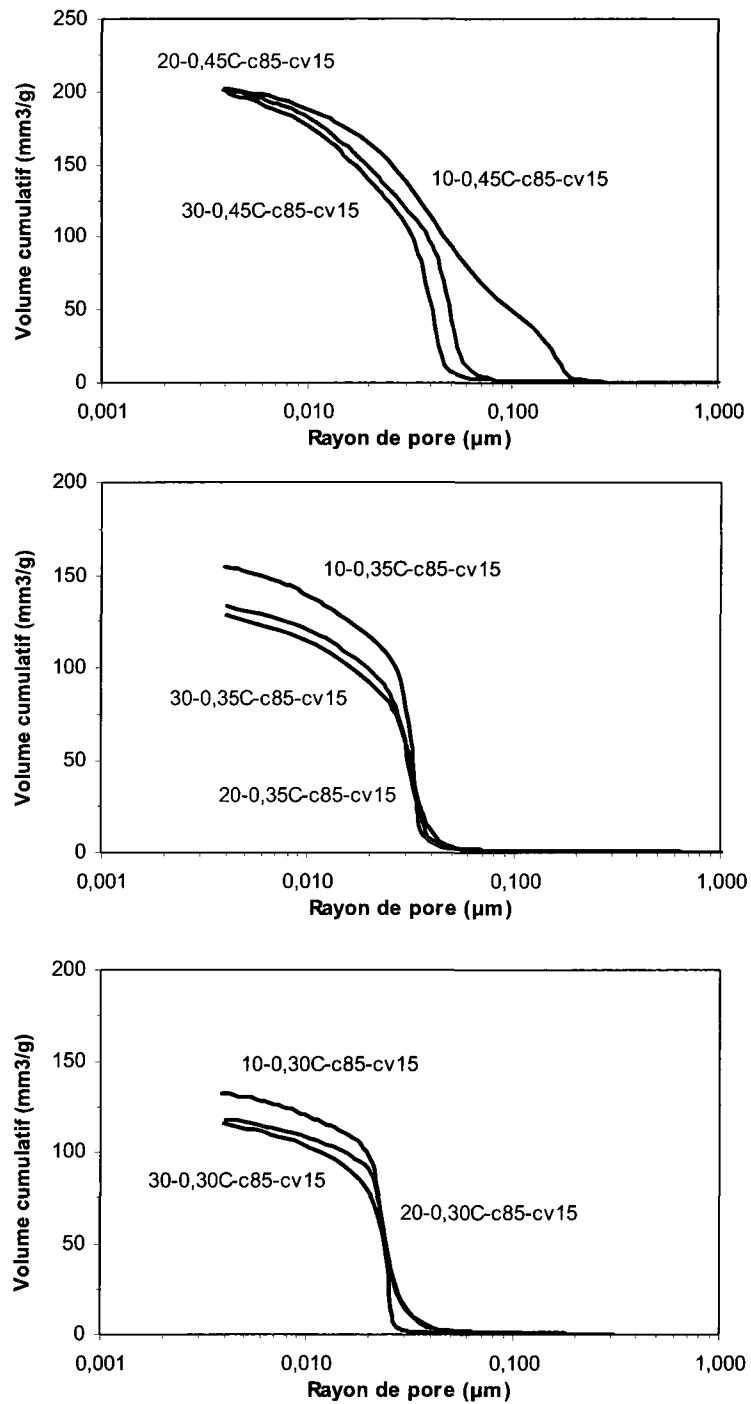


Figure A. 9 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°C)

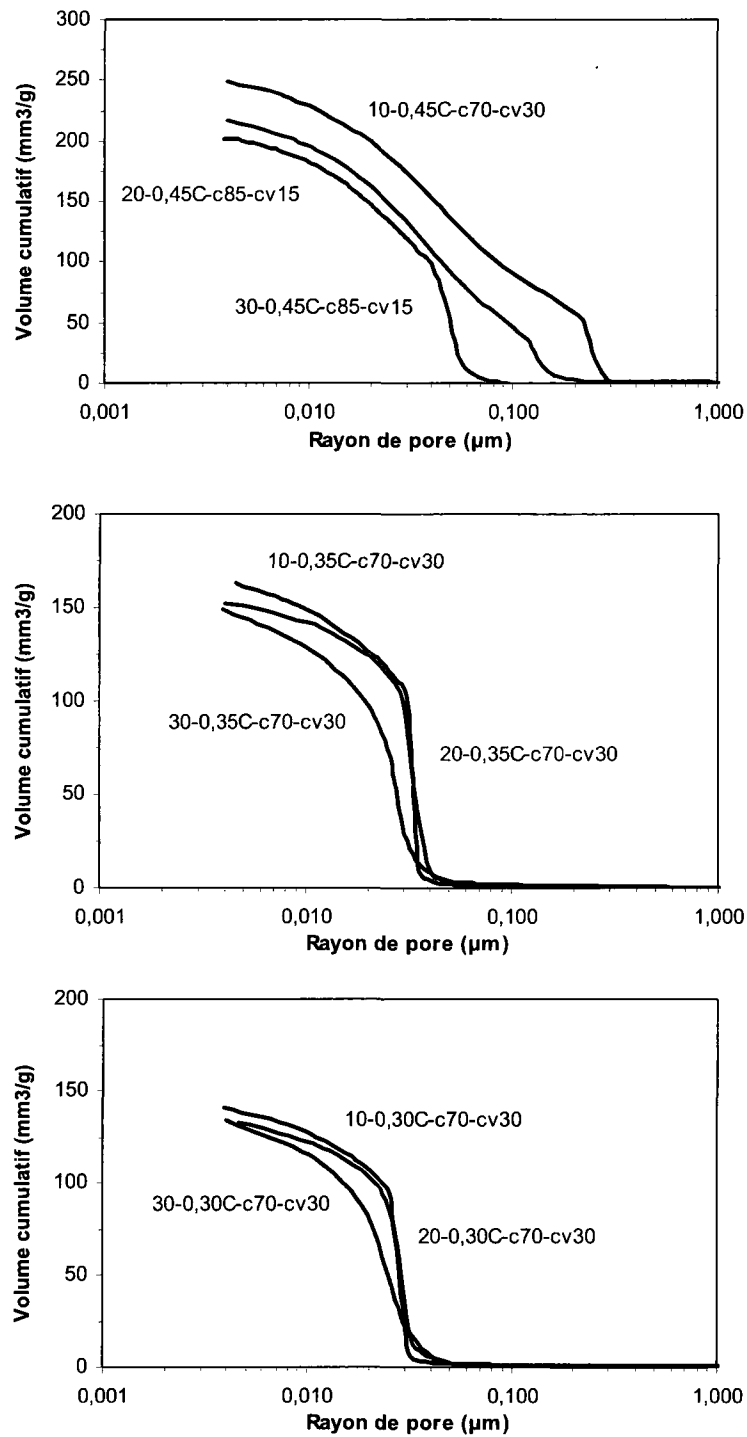


Figure A. 10 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°C)

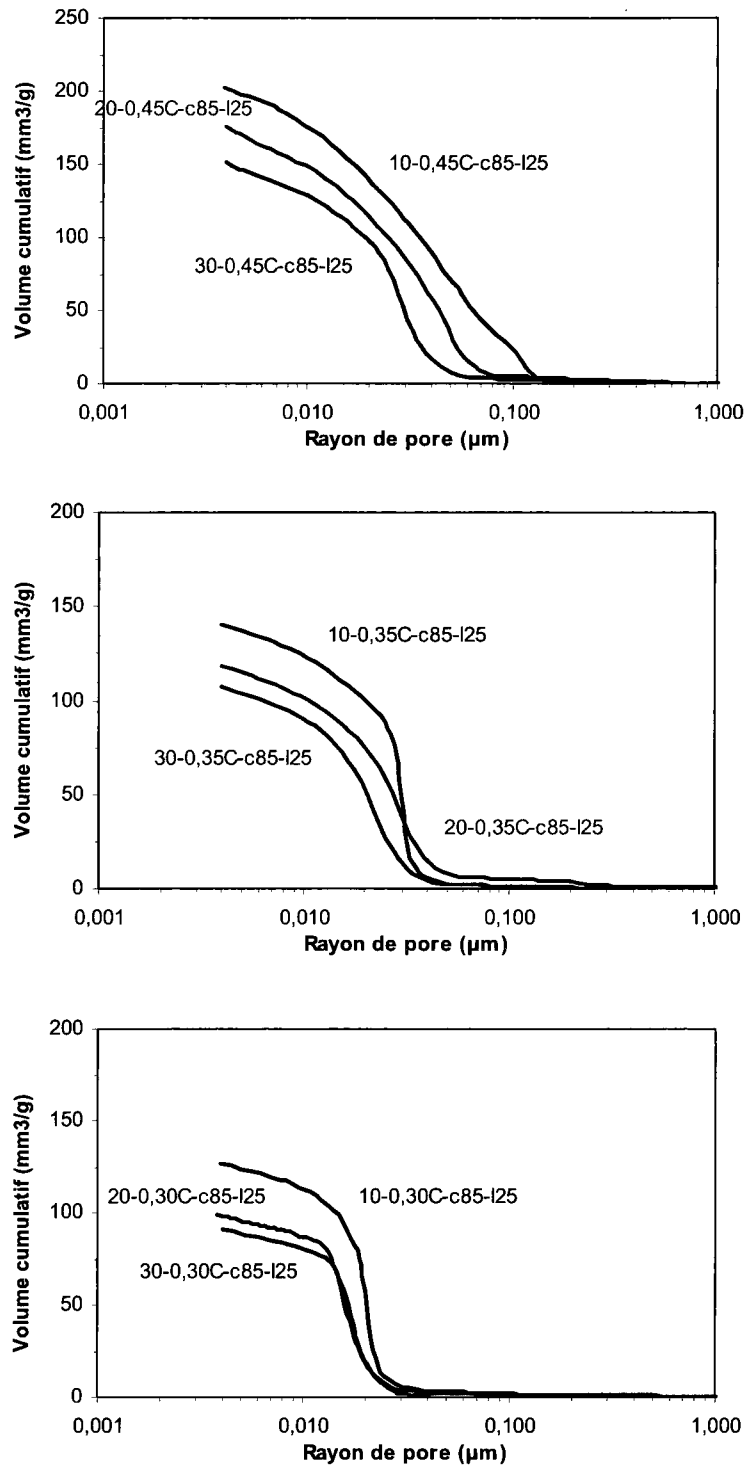


Figure A. 11 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 25% de laitier (T = 10, 20 et 30°C)

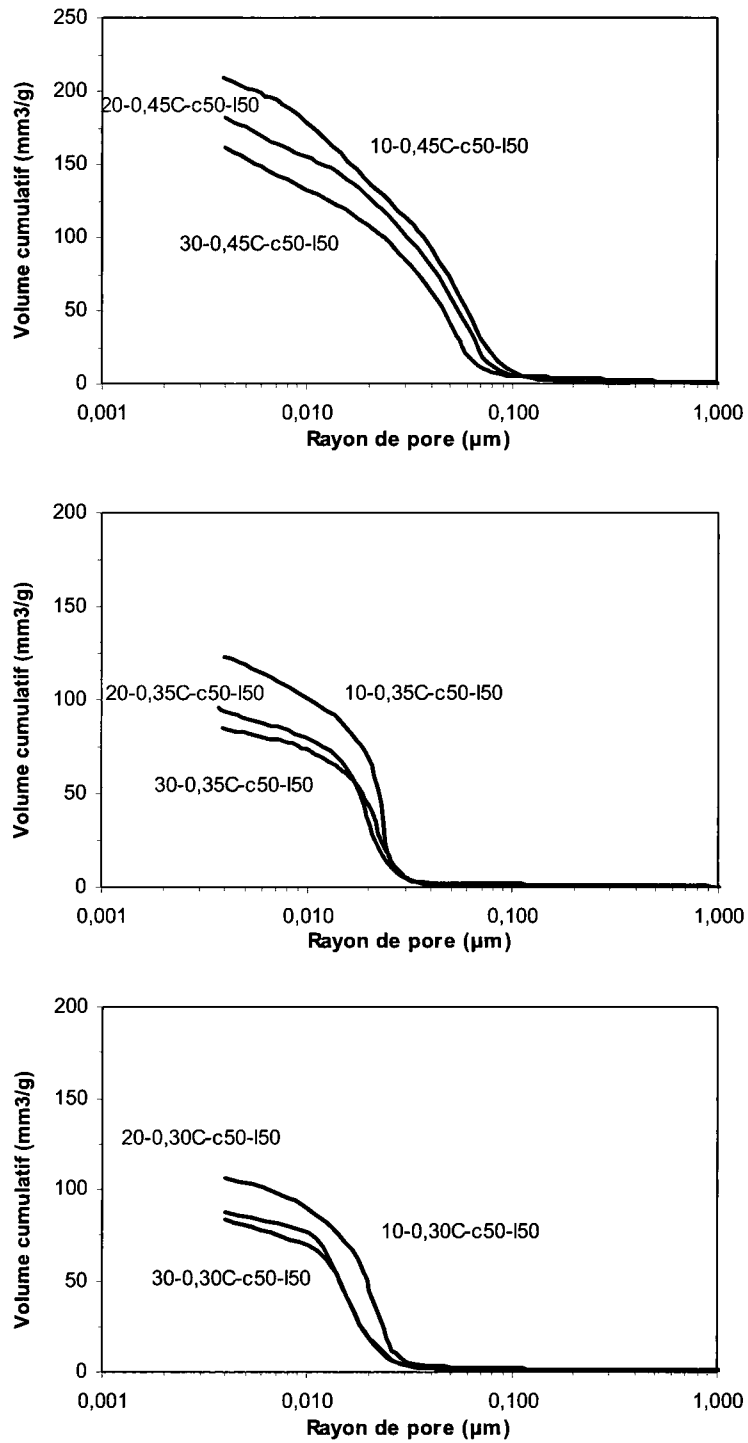


Figure A. 12 – Volumes cumulatifs des pores dans les coulis avec 50% de laitier (T = 10, 20 et 30°C)

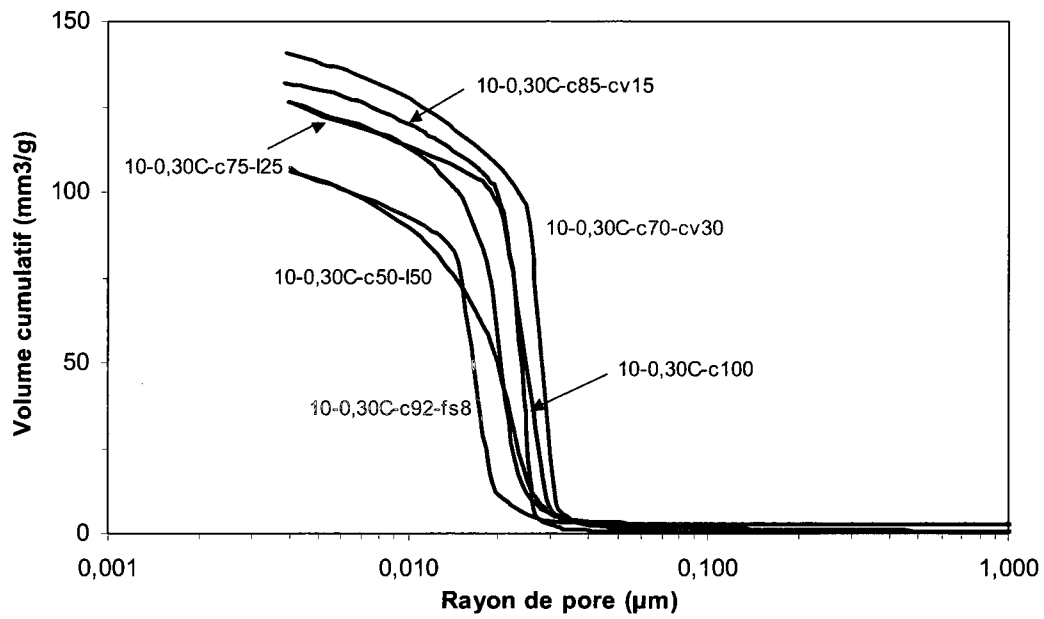


Figure A. 13 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 10°C

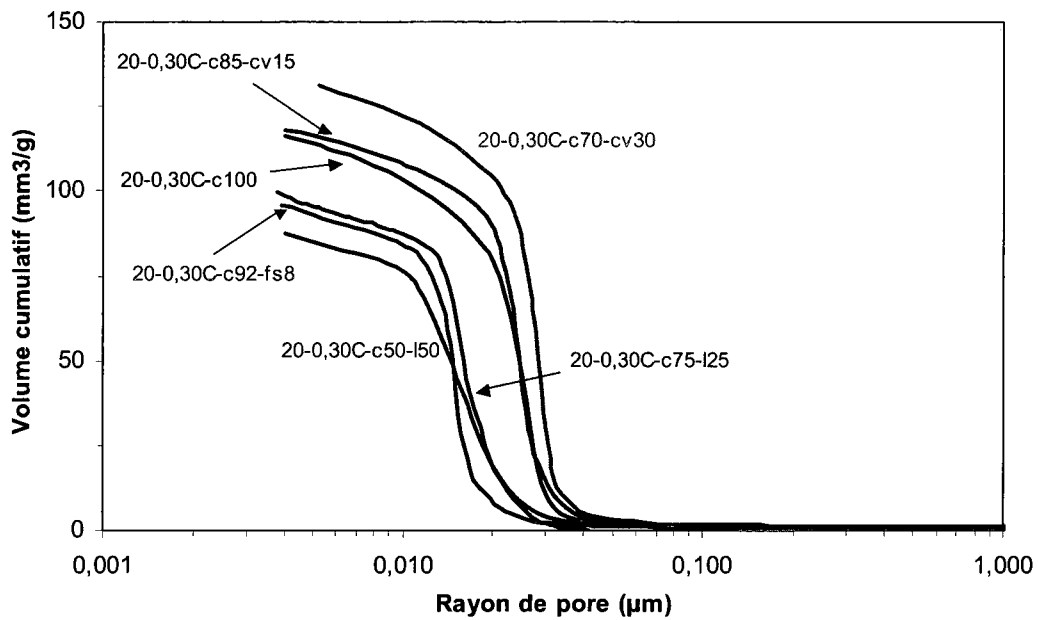
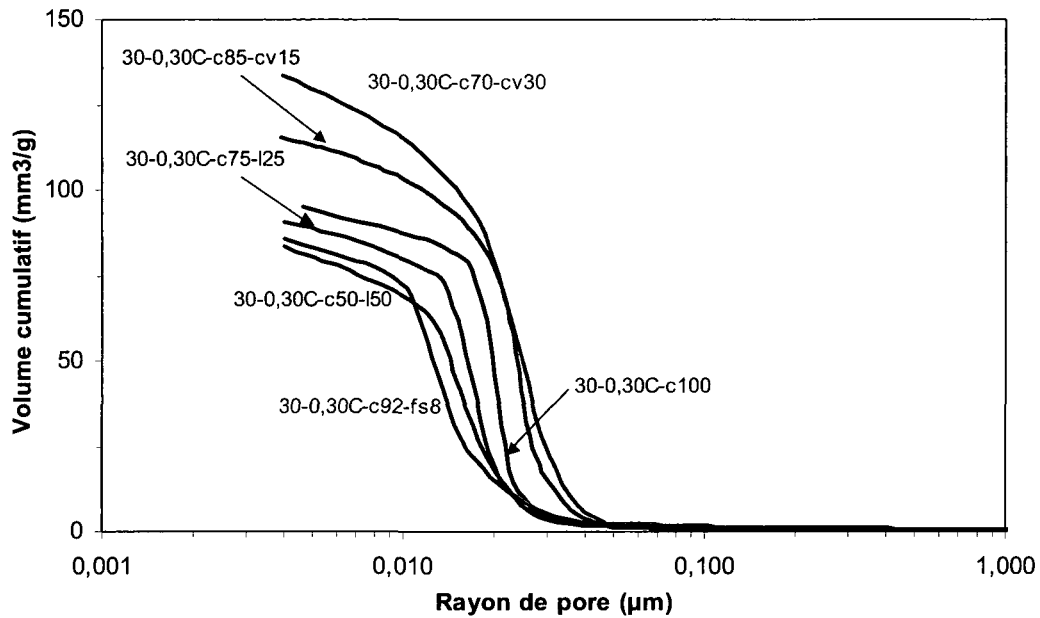
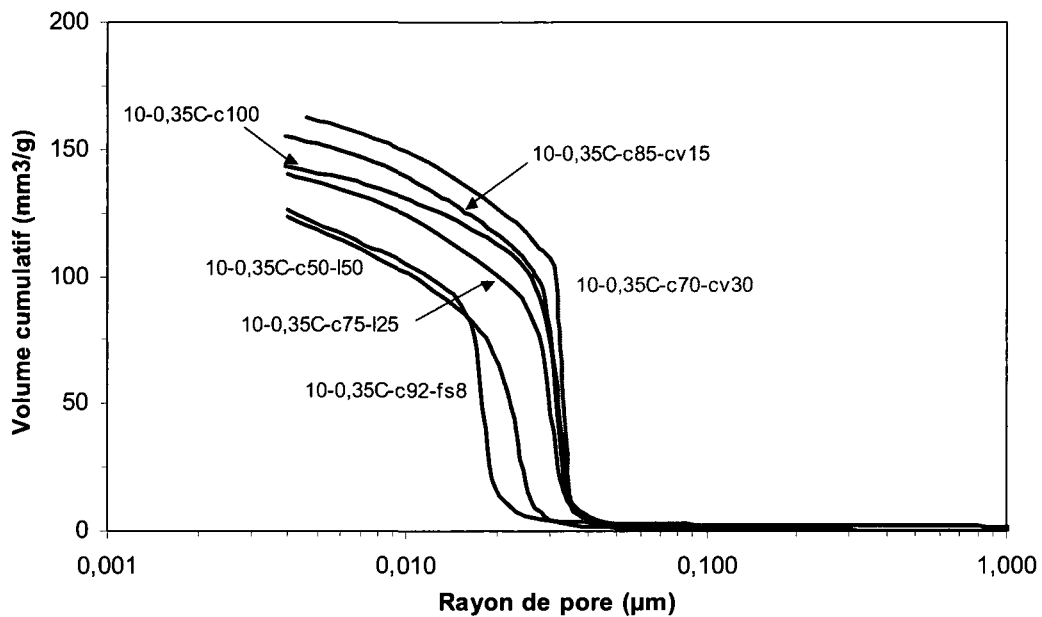


Figure A. 14 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, E/L = 0,30 et T = 20°C

Figure A. 15 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, $E/L = 0,30$ et $T = 30^{\circ}\text{C}$ Figure A. 16 – Volume cumulatif des pores de tous les coulis, $E/L = 0,35$ et $T = 10^{\circ}\text{C}$

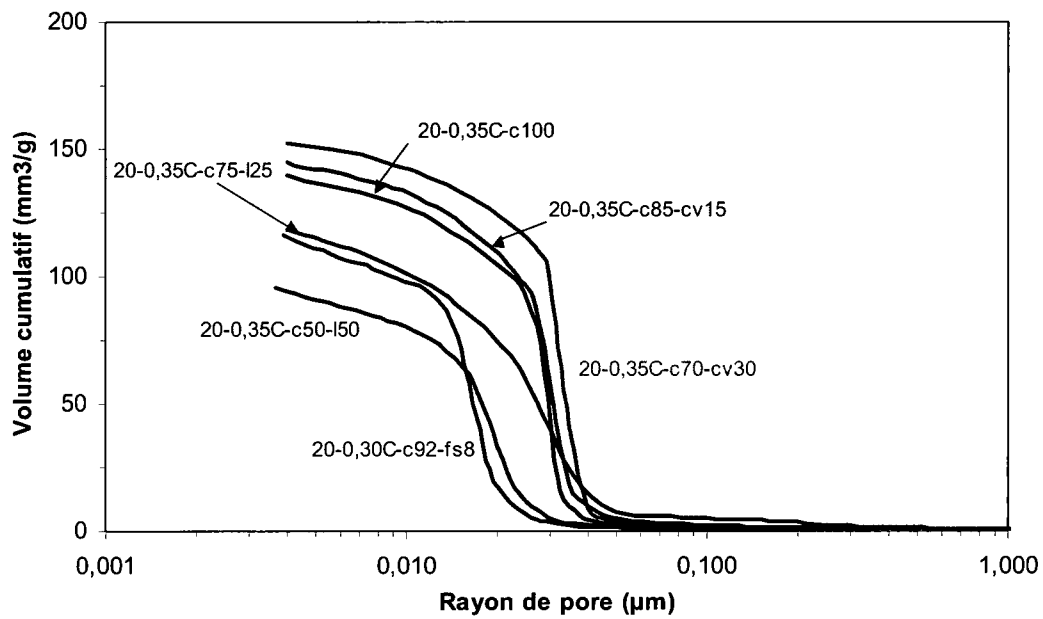


Figure A. 17 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 20°C

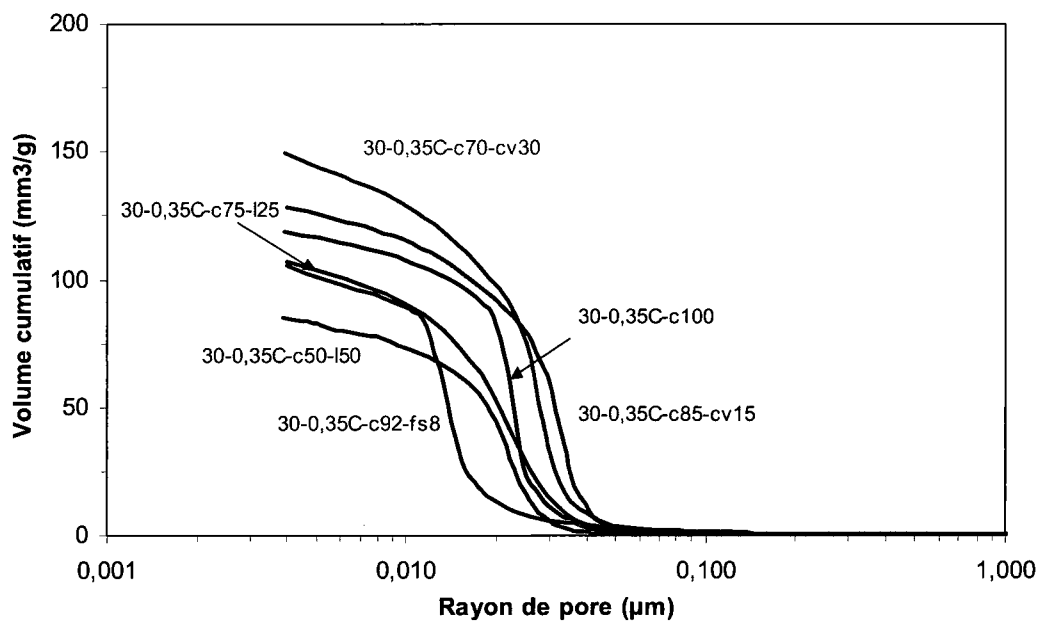
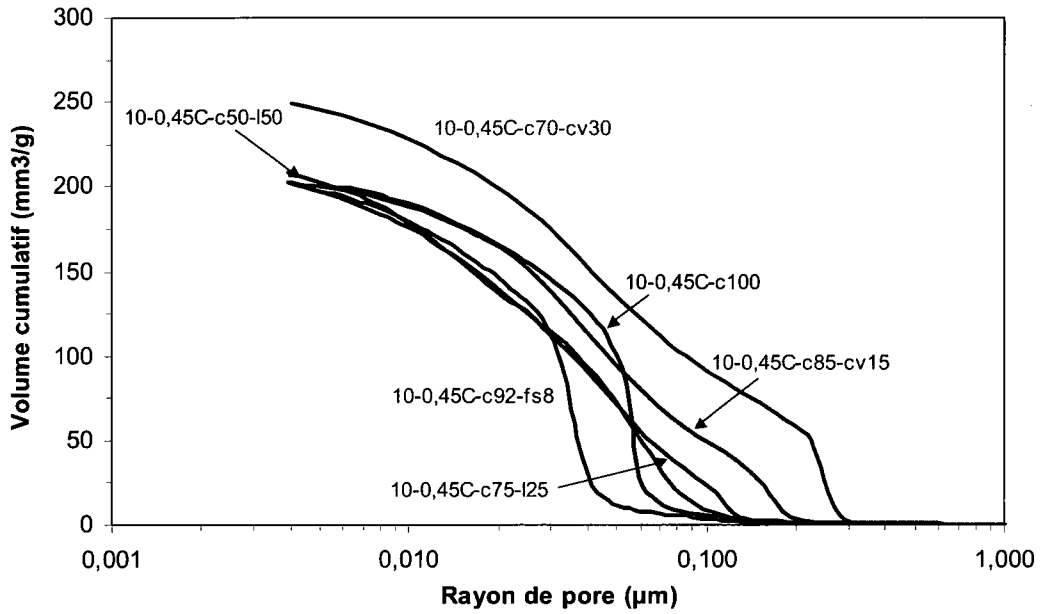
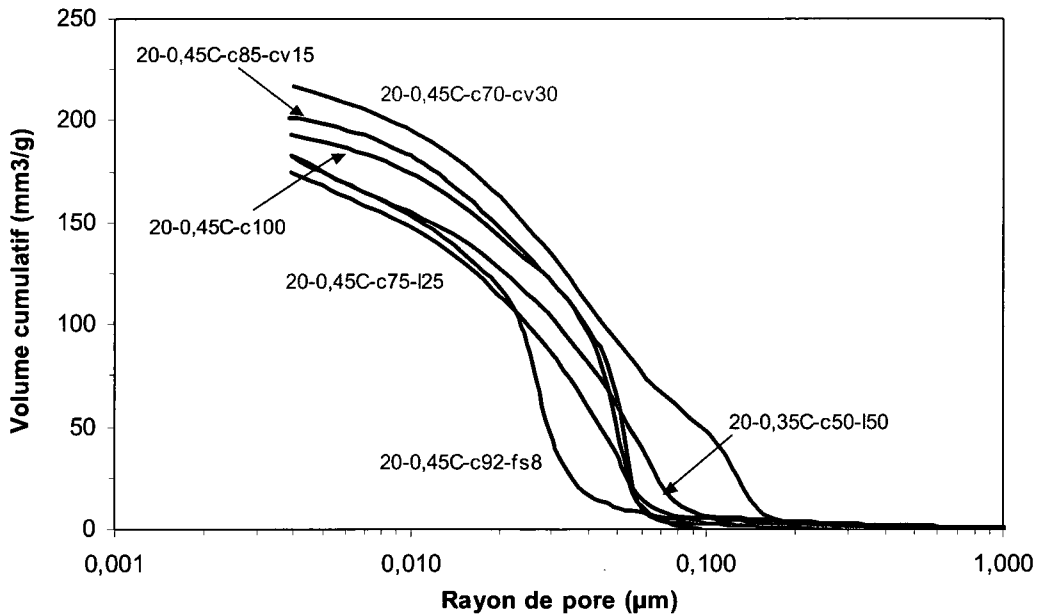


Figure A. 18 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, E/L = 0,35 et T = 30°C

Figure A. 19 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, $E/L = 0,45$ et $T = 10^{\circ}\text{C}$ Figure A. 20 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, $E/L = 0,45$ et $T = 20^{\circ}\text{C}$

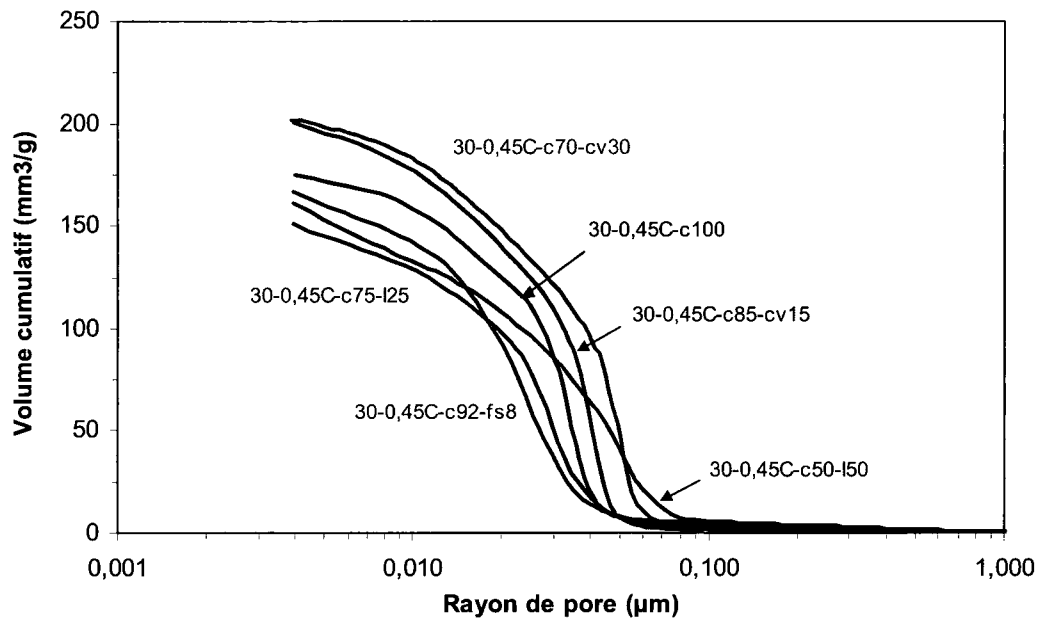


Figure A. 21 – Volume cumulé des pores de tous les coulis, E/L = 0,45 et T = 30°C

ANNEXE B

Distribution des pores dans les coulis

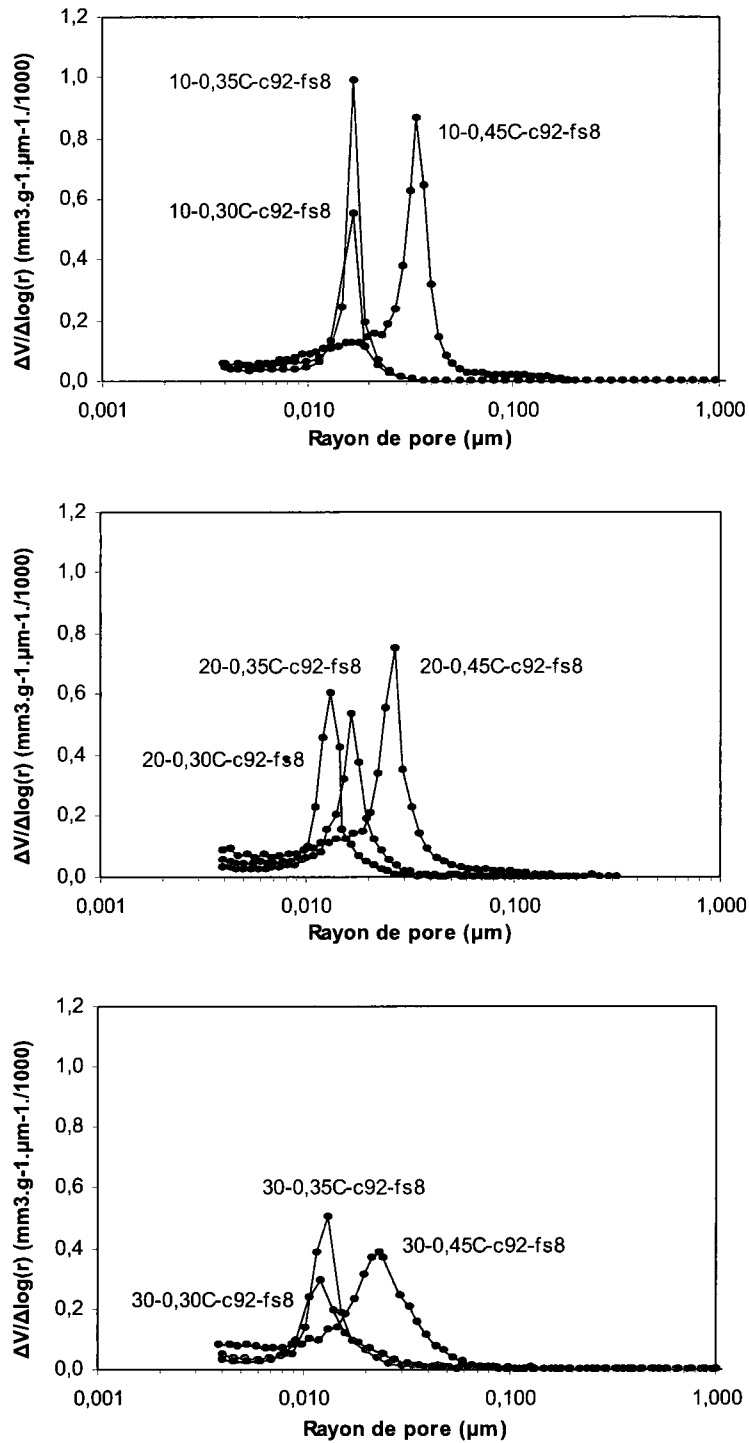


Figure B. 1 – Distribution des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

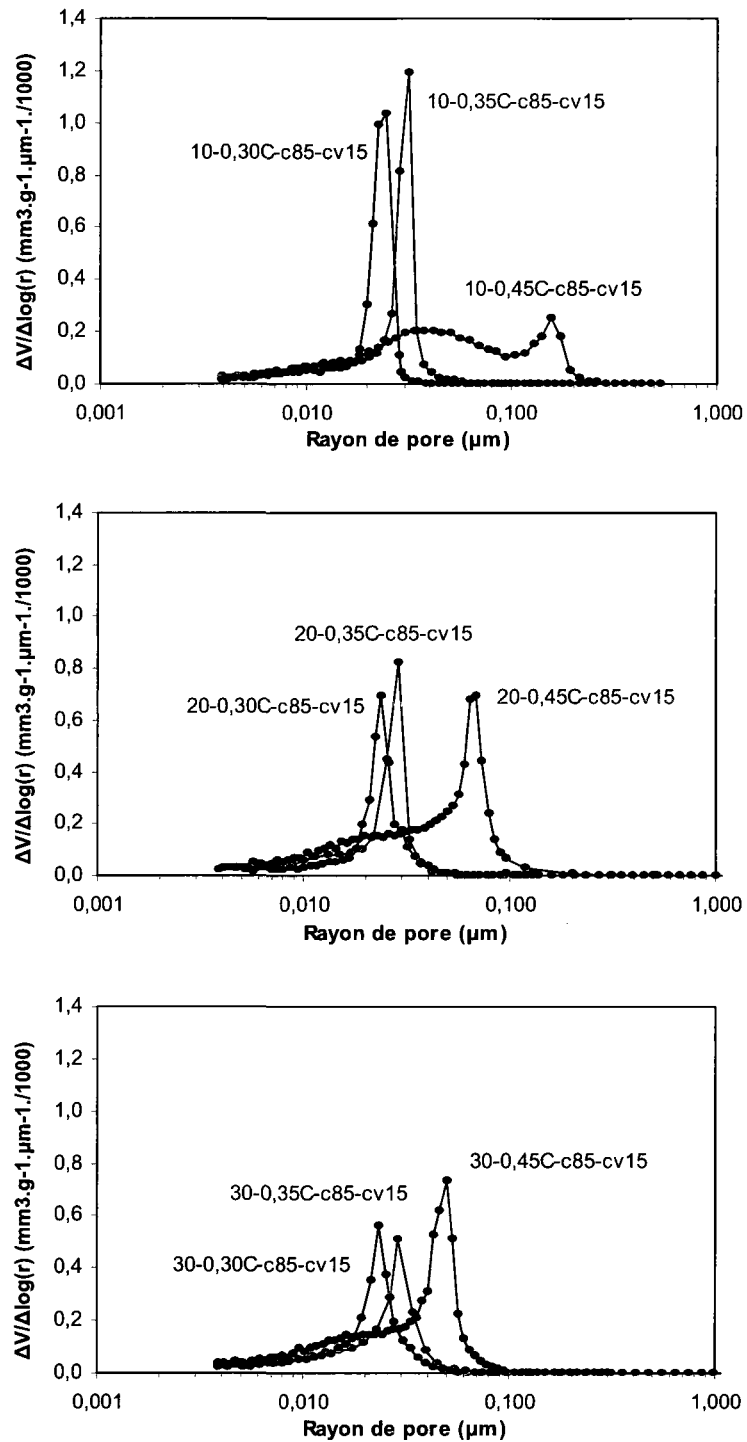


Figure B. 2 – Distribution des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

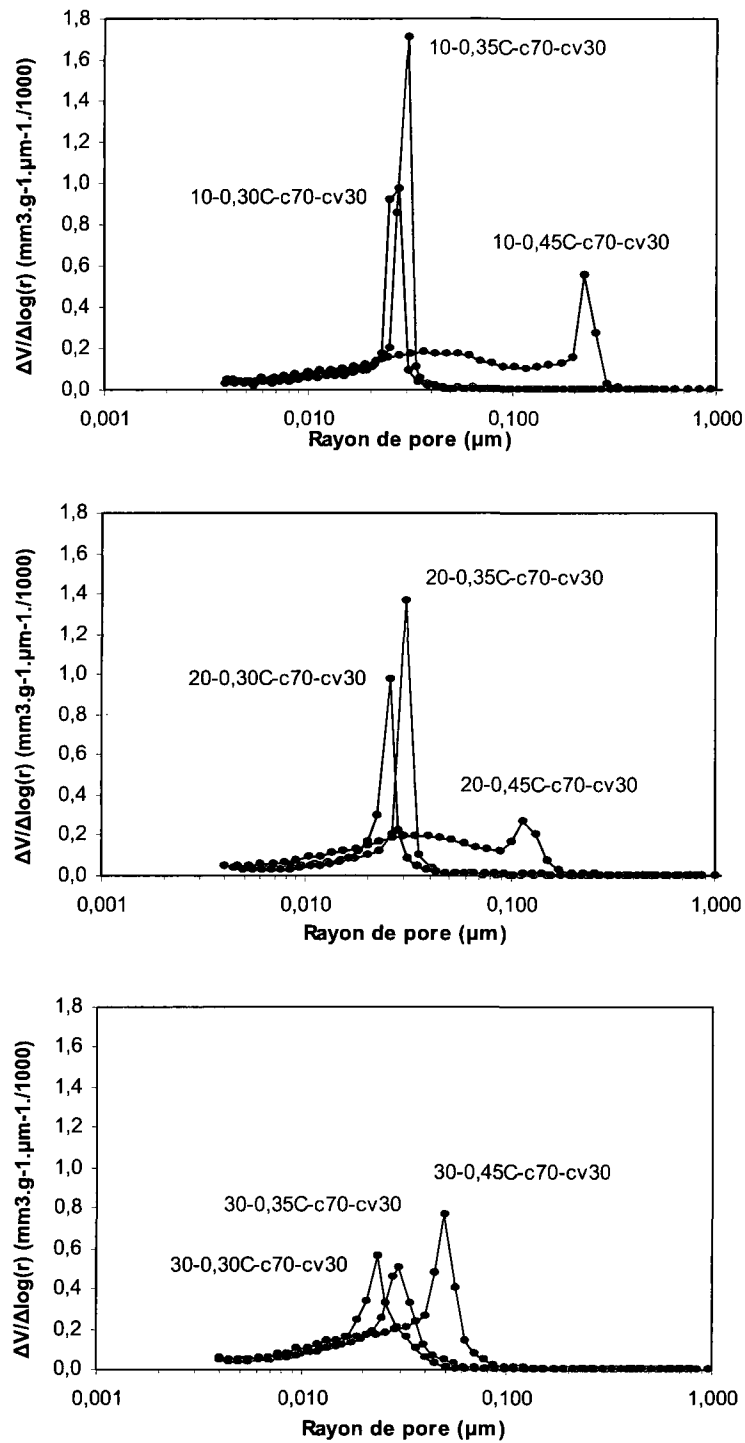


Figure B. 3 – Distribution des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

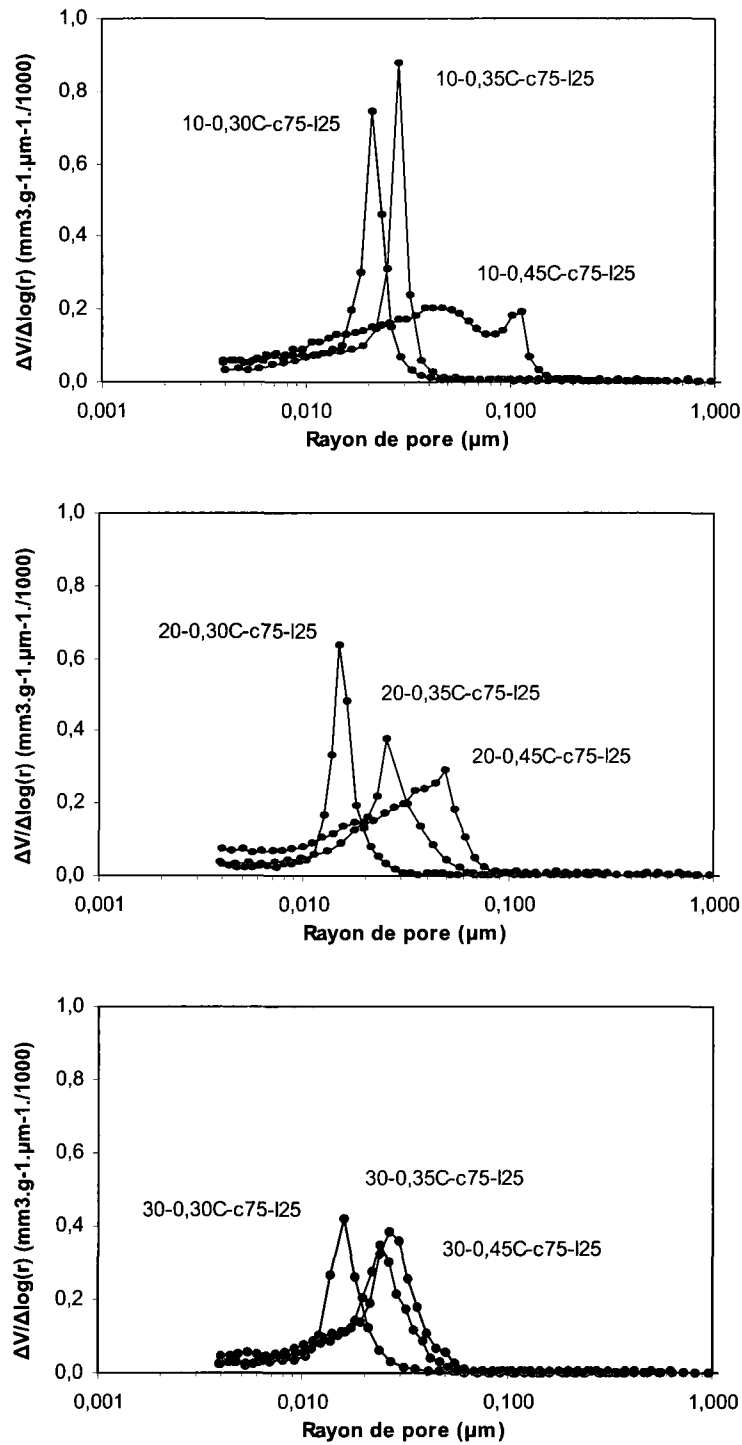


Figure B. 4 – Distribution des pores dans les coulis avec 25% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

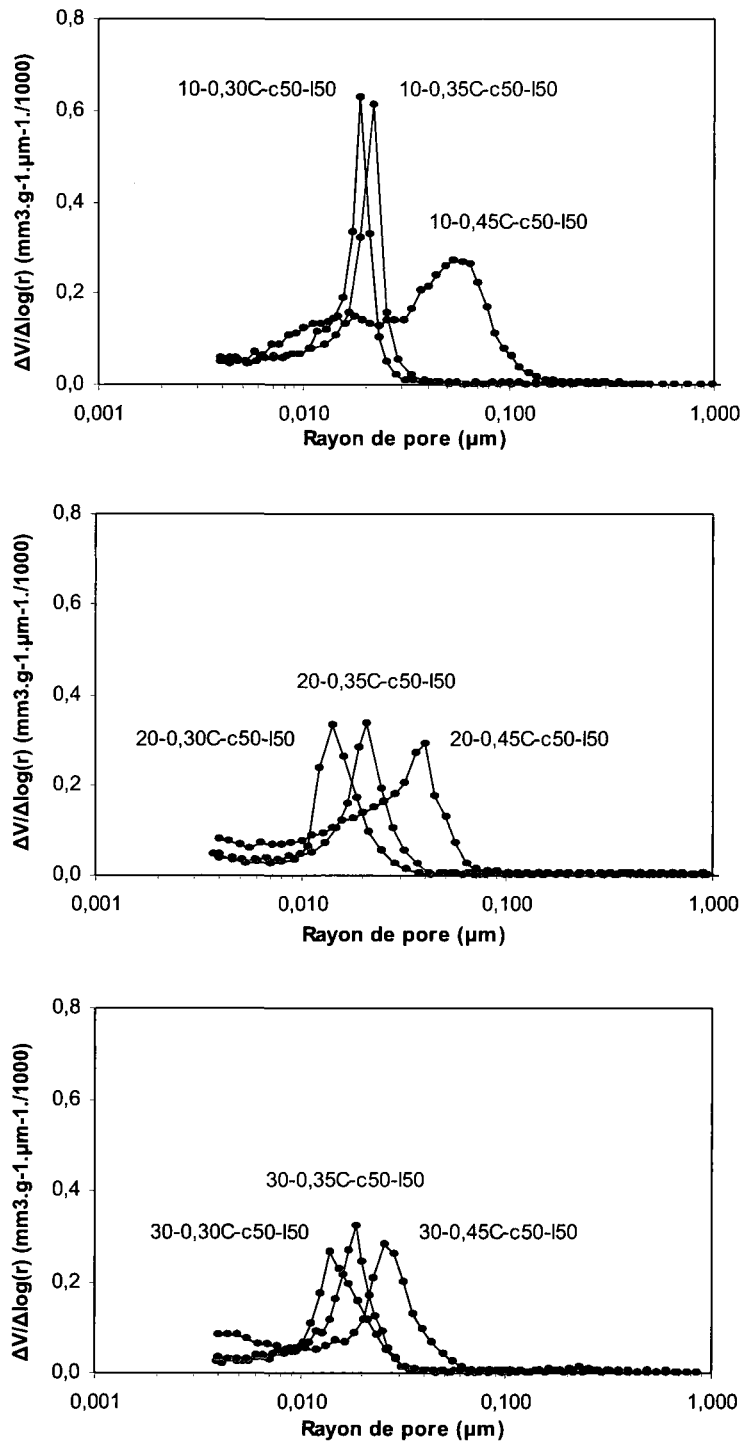


Figure B. 5 – Distribution des pores dans les coulis avec 50% de laitier (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

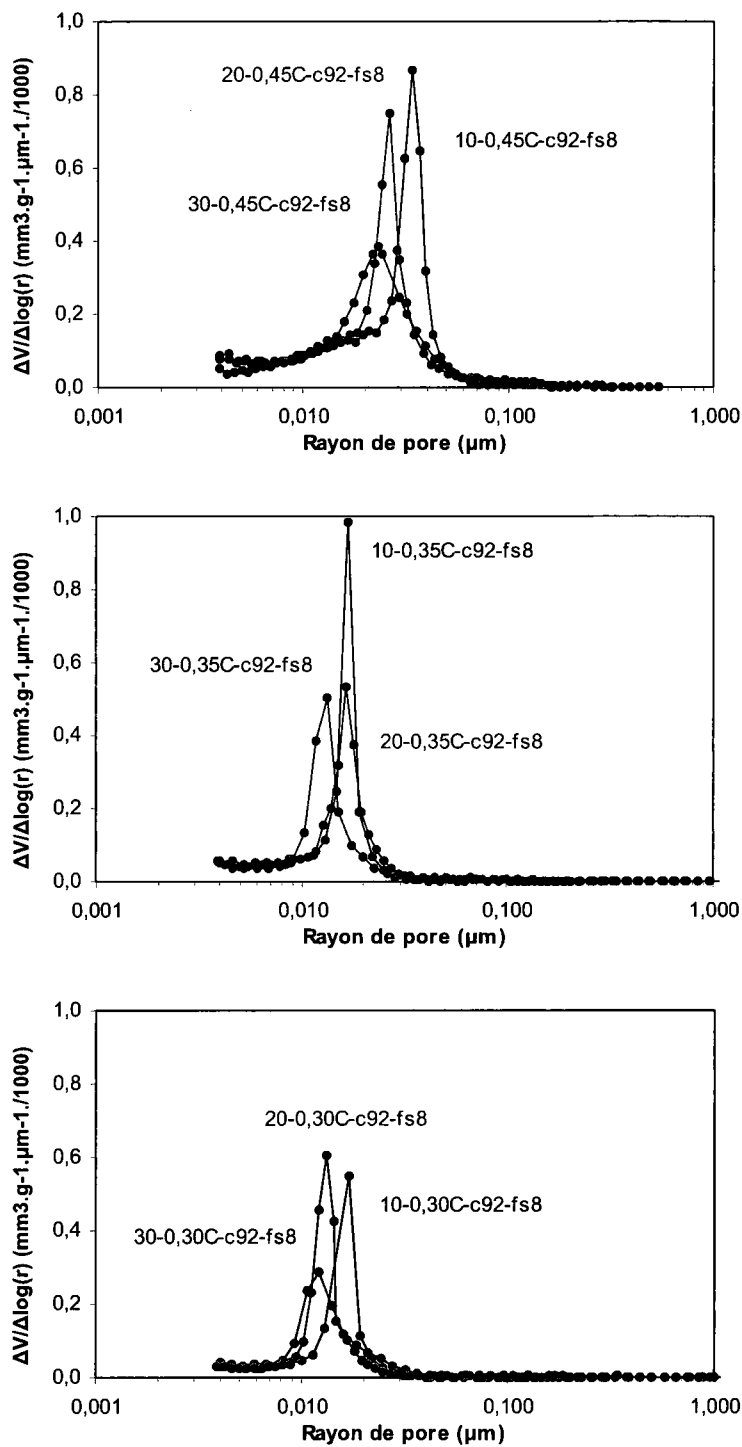


Figure B. 6 – Distribution des pores dans les coulis avec 8% de fumée de silice (T = 10, 20 et 30°C)

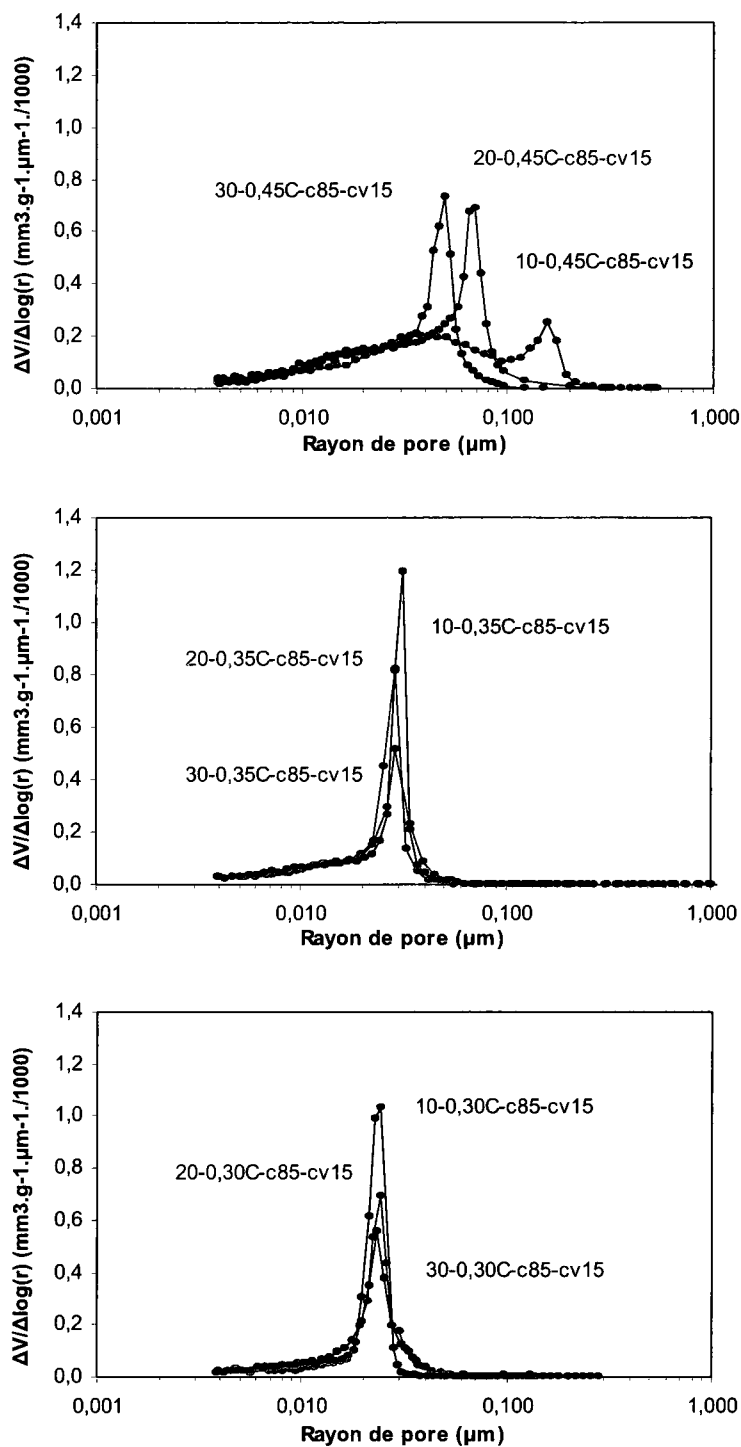


Figure B. 7 – Distribution des pores dans les coulis avec 15% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°C)

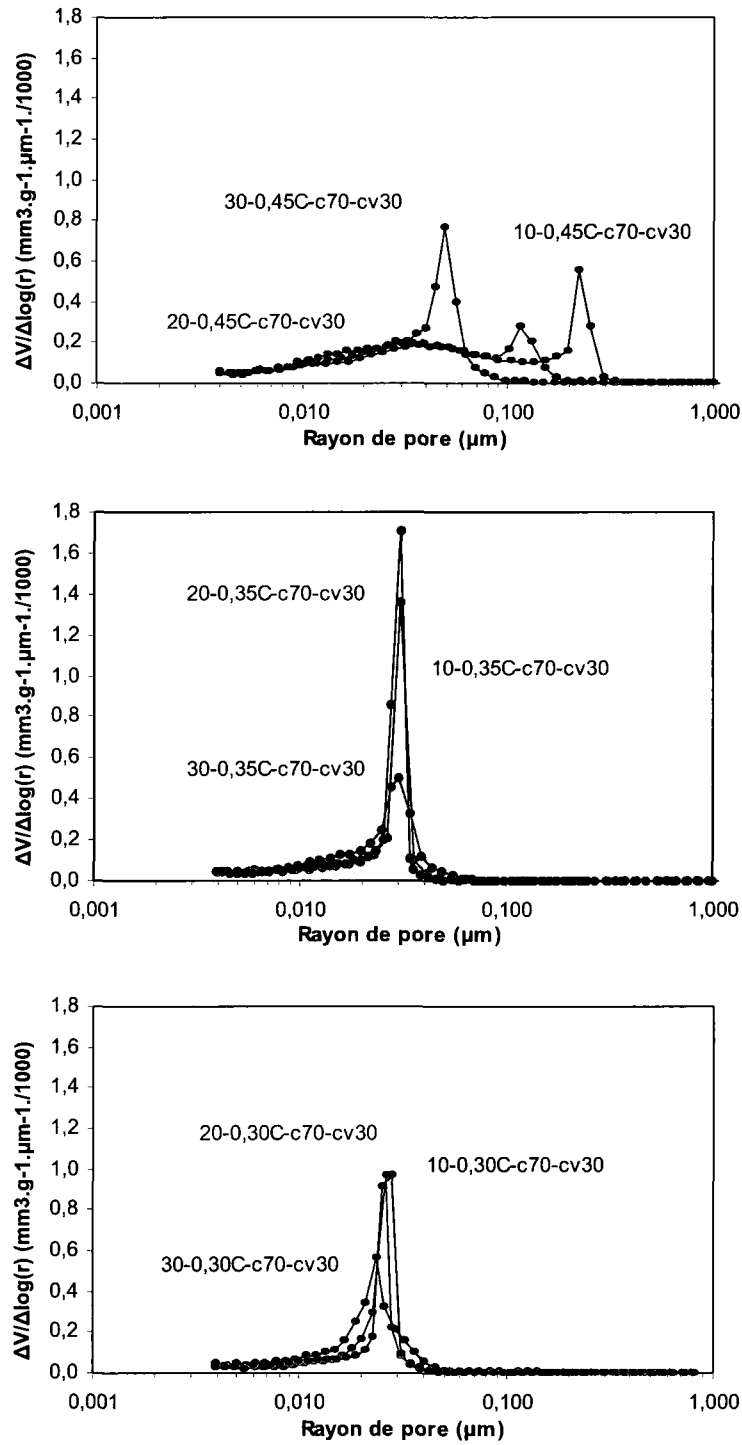


Figure B. 8 – Distribution des pores dans les coulis avec 30% de cendre volante (T = 10, 20 et 30°)

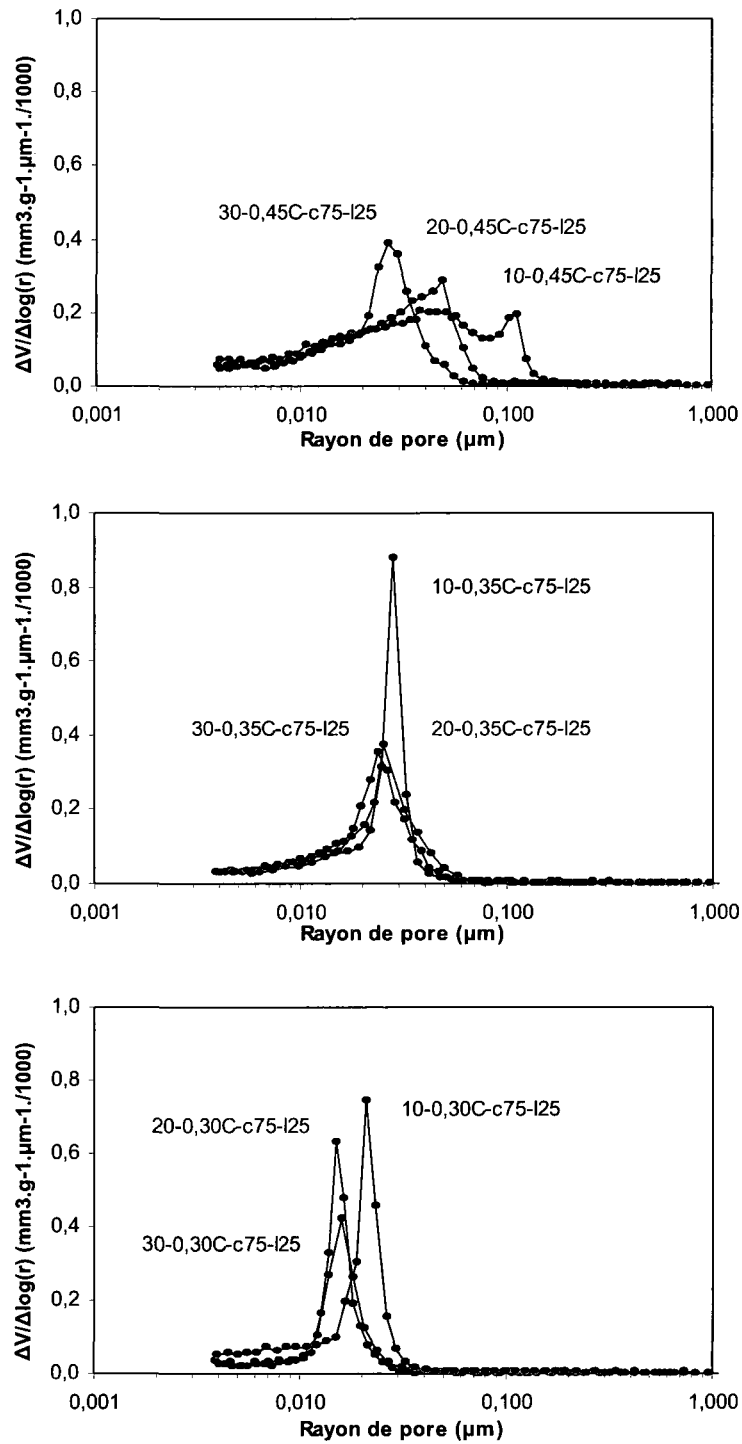


Figure B. 9 – Distribution des pores dans les coulis avec 25% de laitier (T = 10, 20 et 30°C)

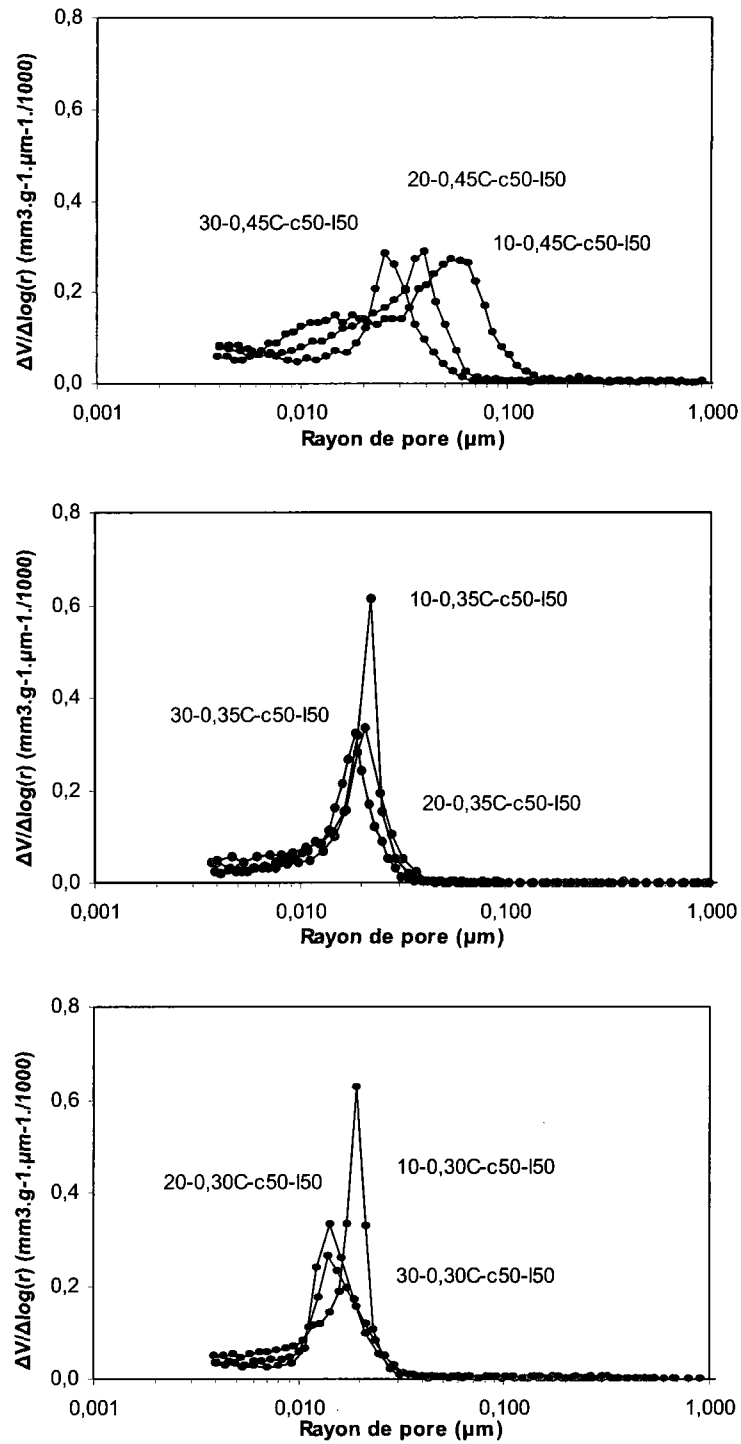


Figure B. 10 – Distribution des pores dans les coulis avec 50% de laitier (T = 10, 20 et 30°C)

ANNEXE C

Courbes de retrait interne des coulis

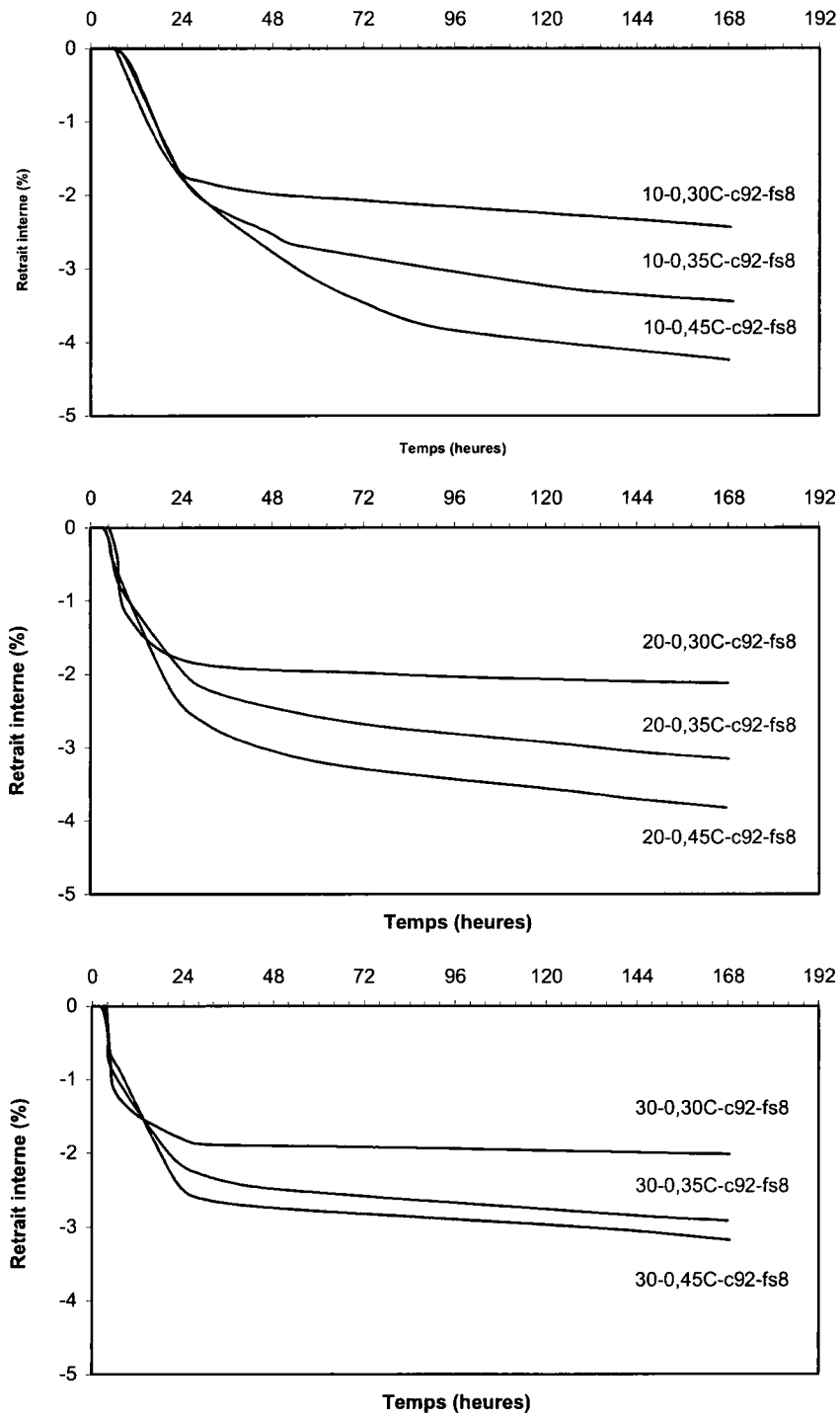


Figure C. 1 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

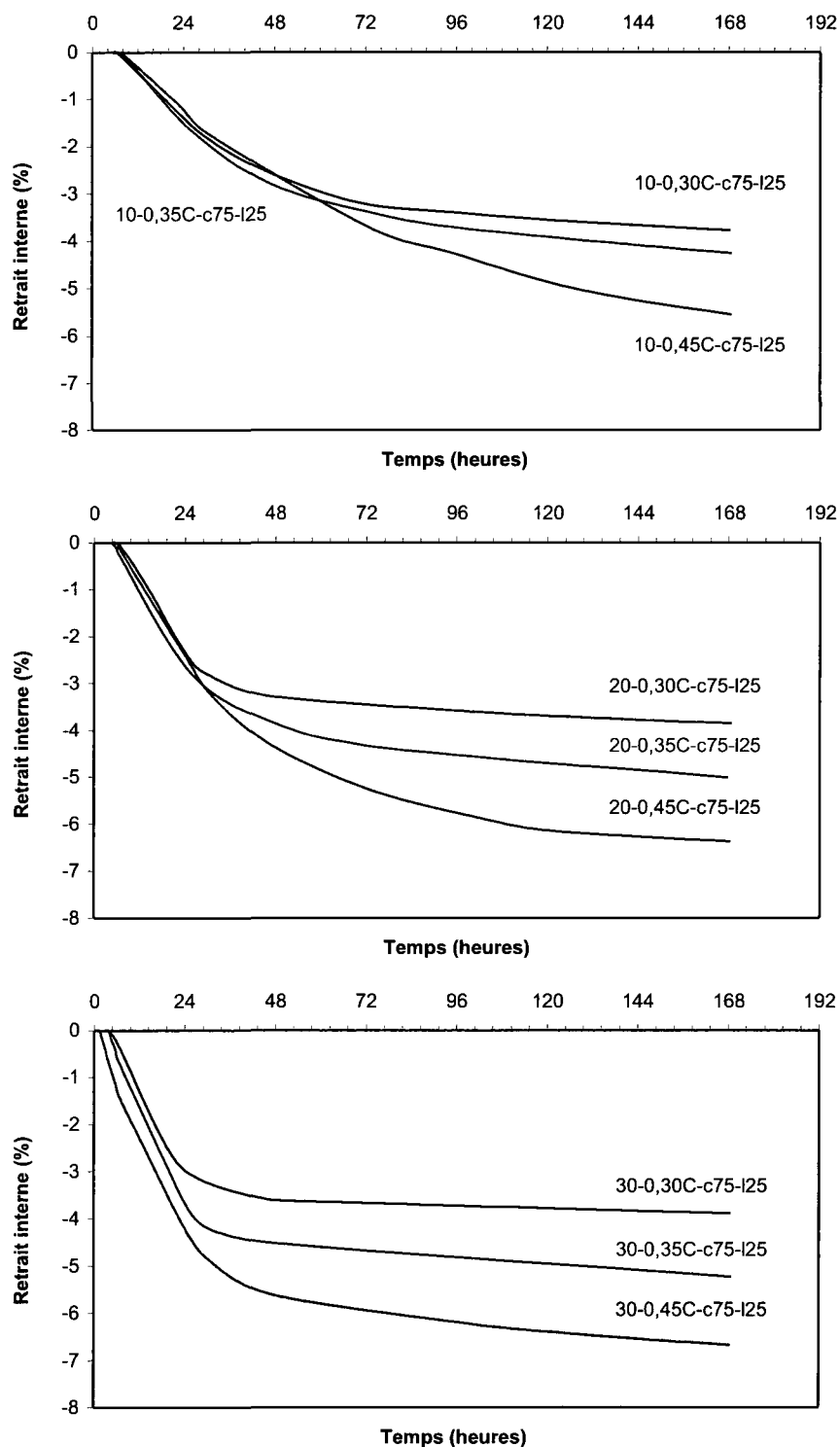


Figure C. 2 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

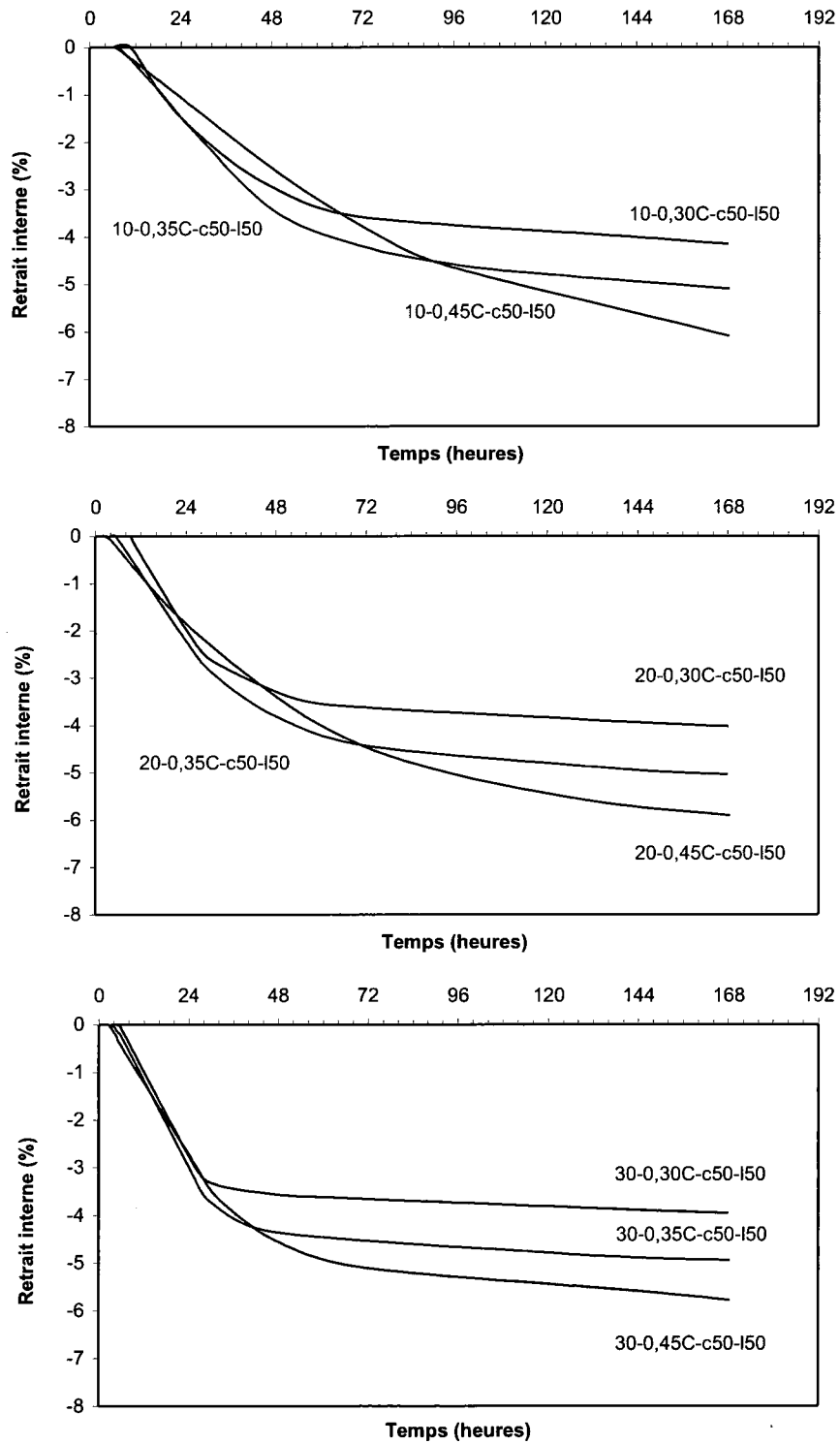


Figure C. 3 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

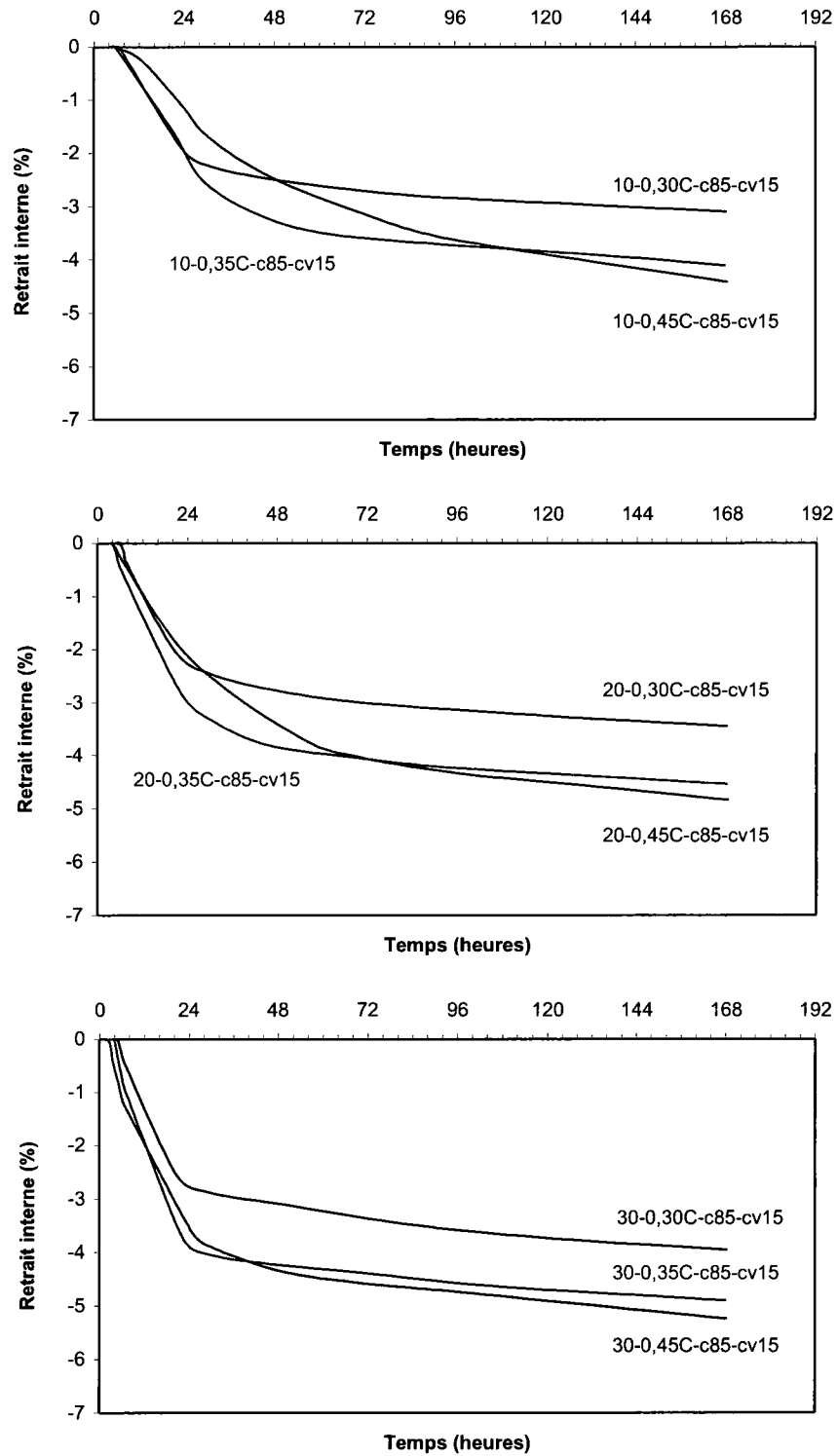


Figure C. 4 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

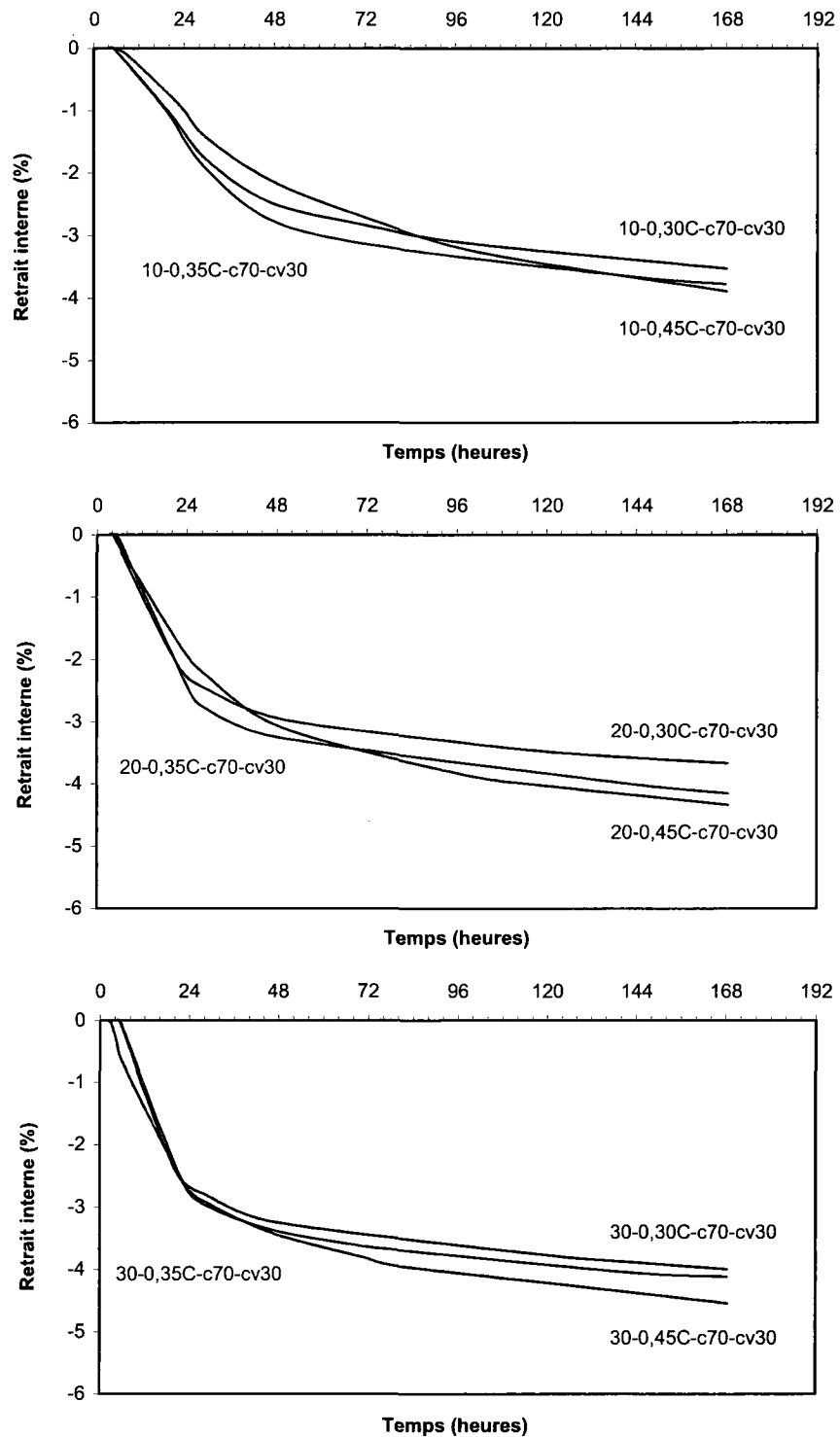


Figure C. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

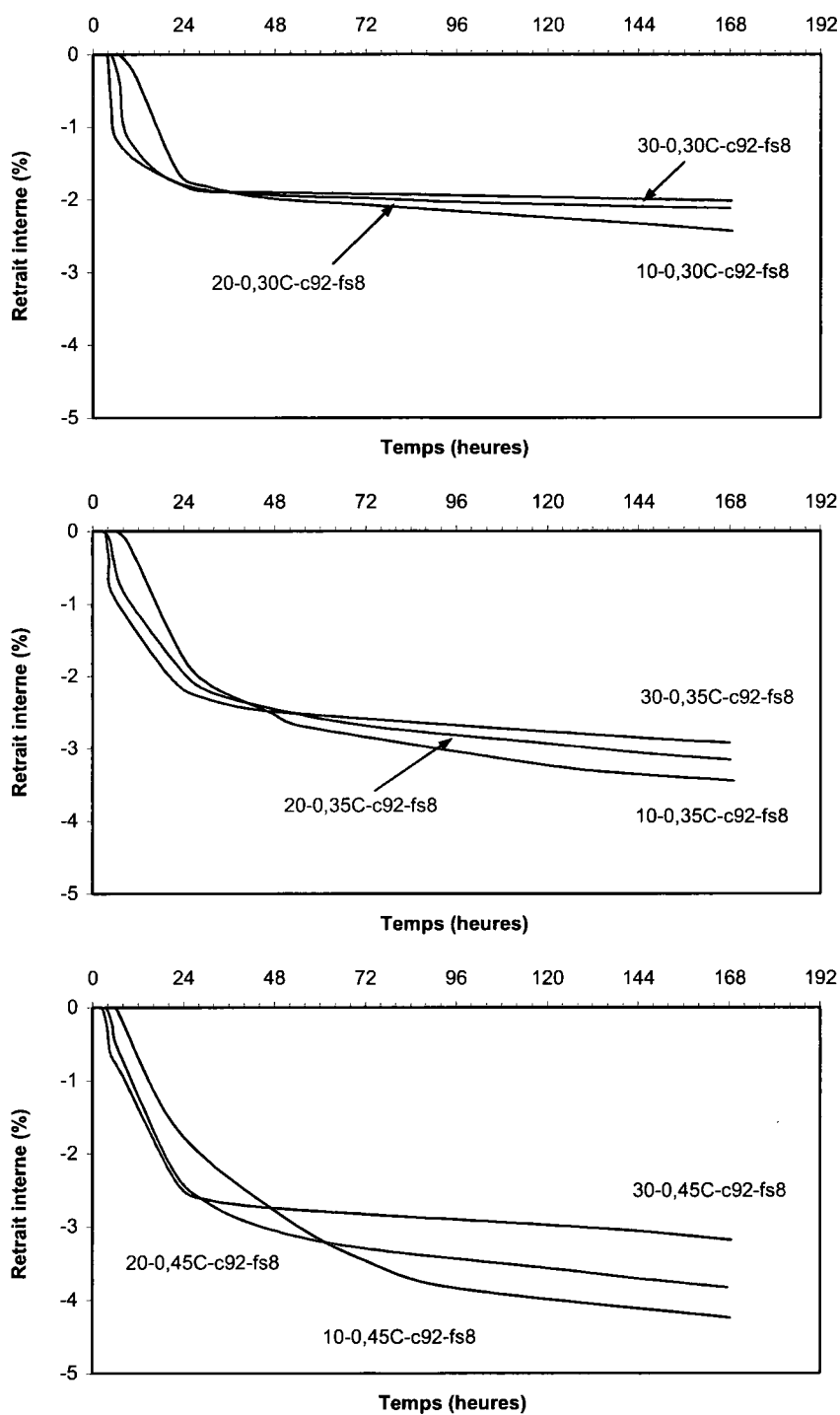


Figure C. 6 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

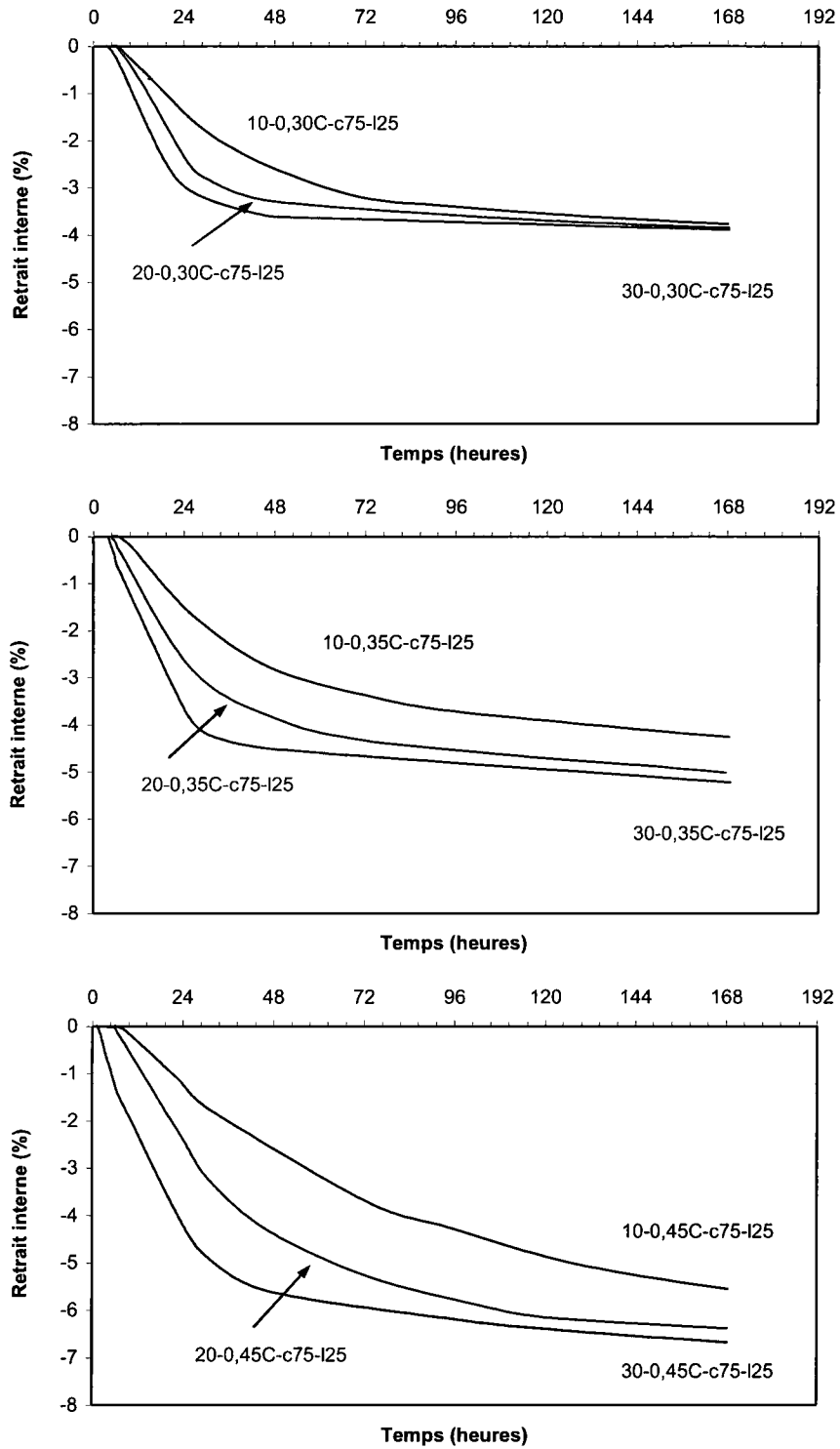


Figure C. 7 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

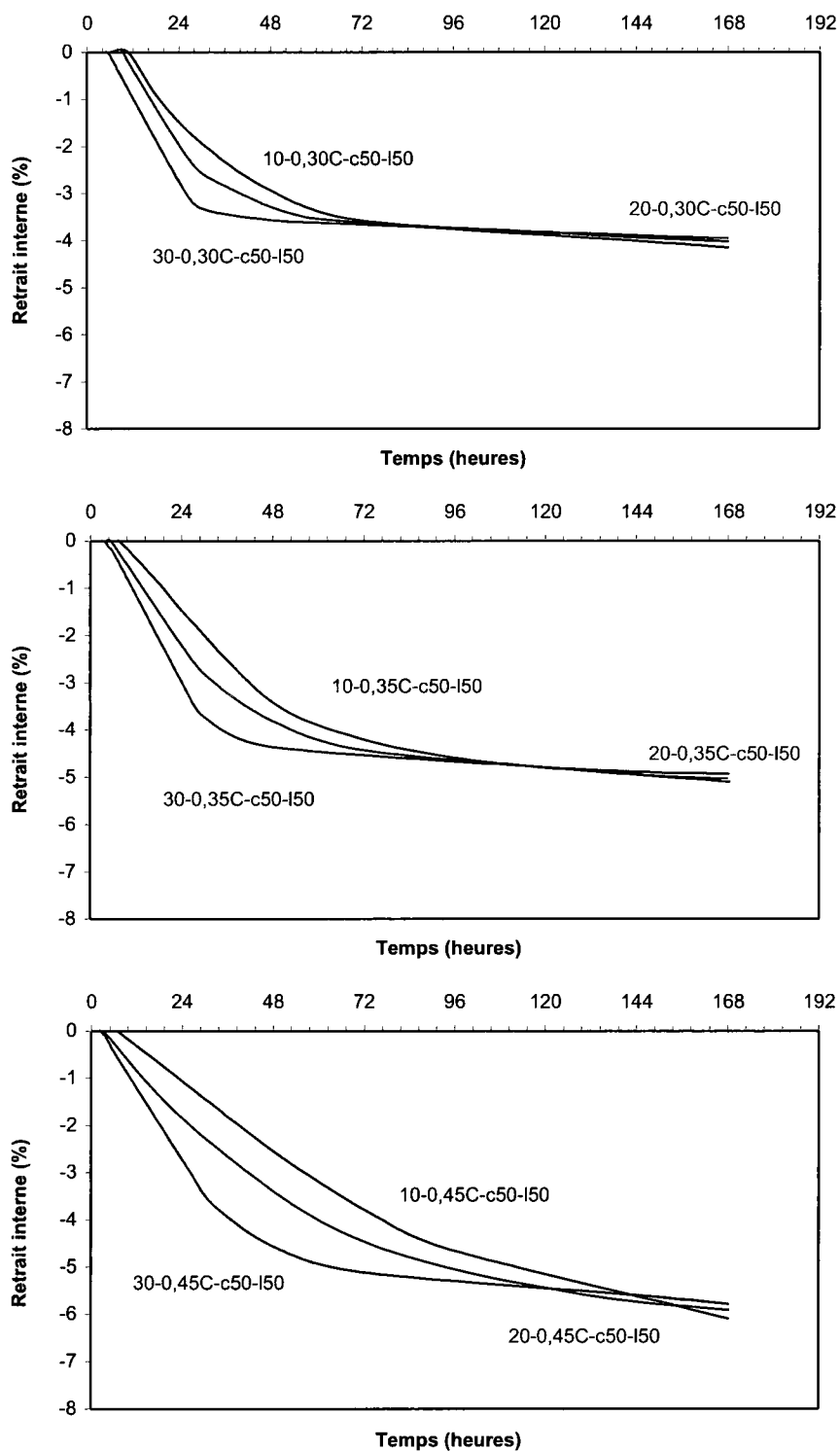


Figure C. 8 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

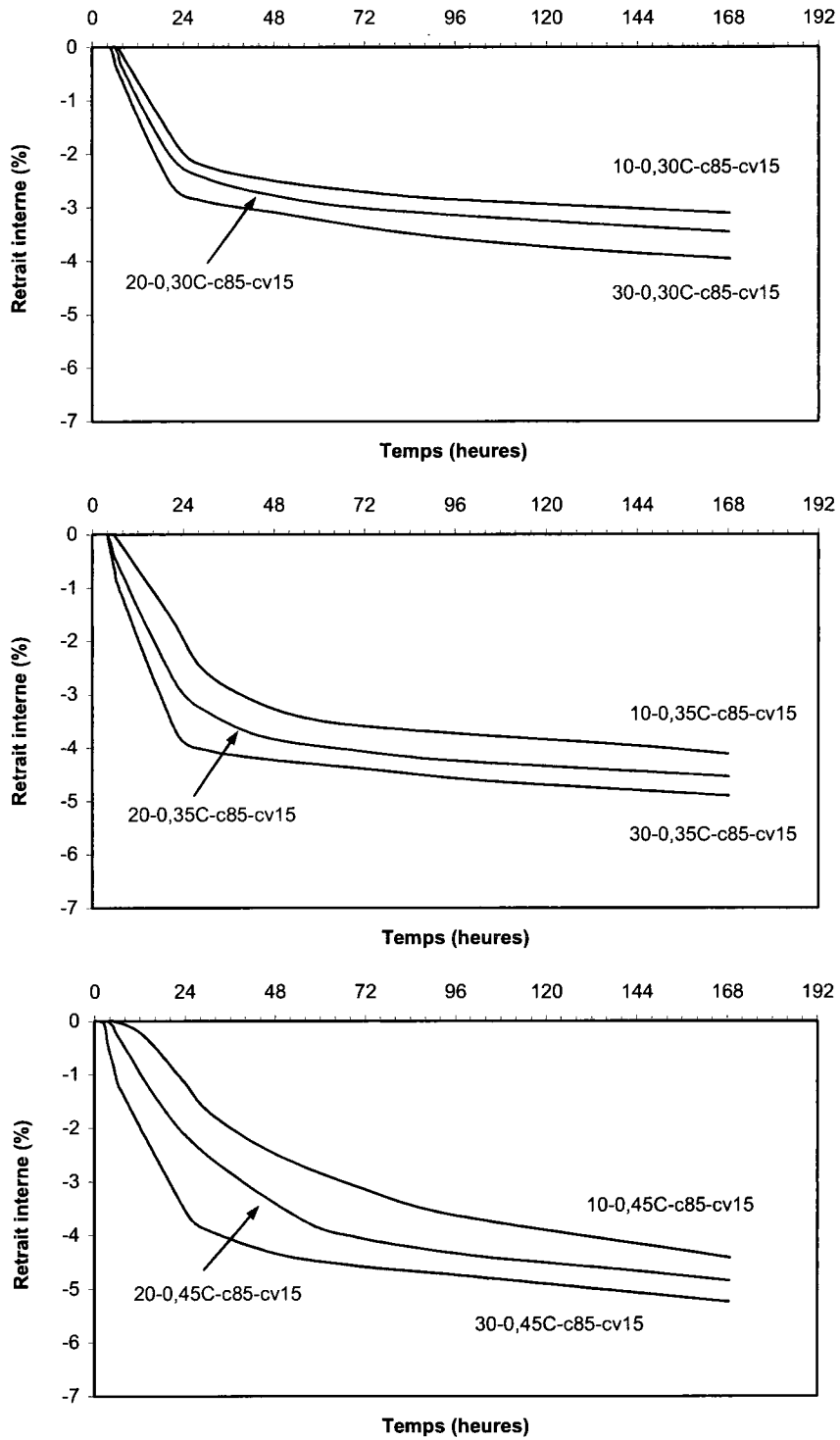


Figure C. 9 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

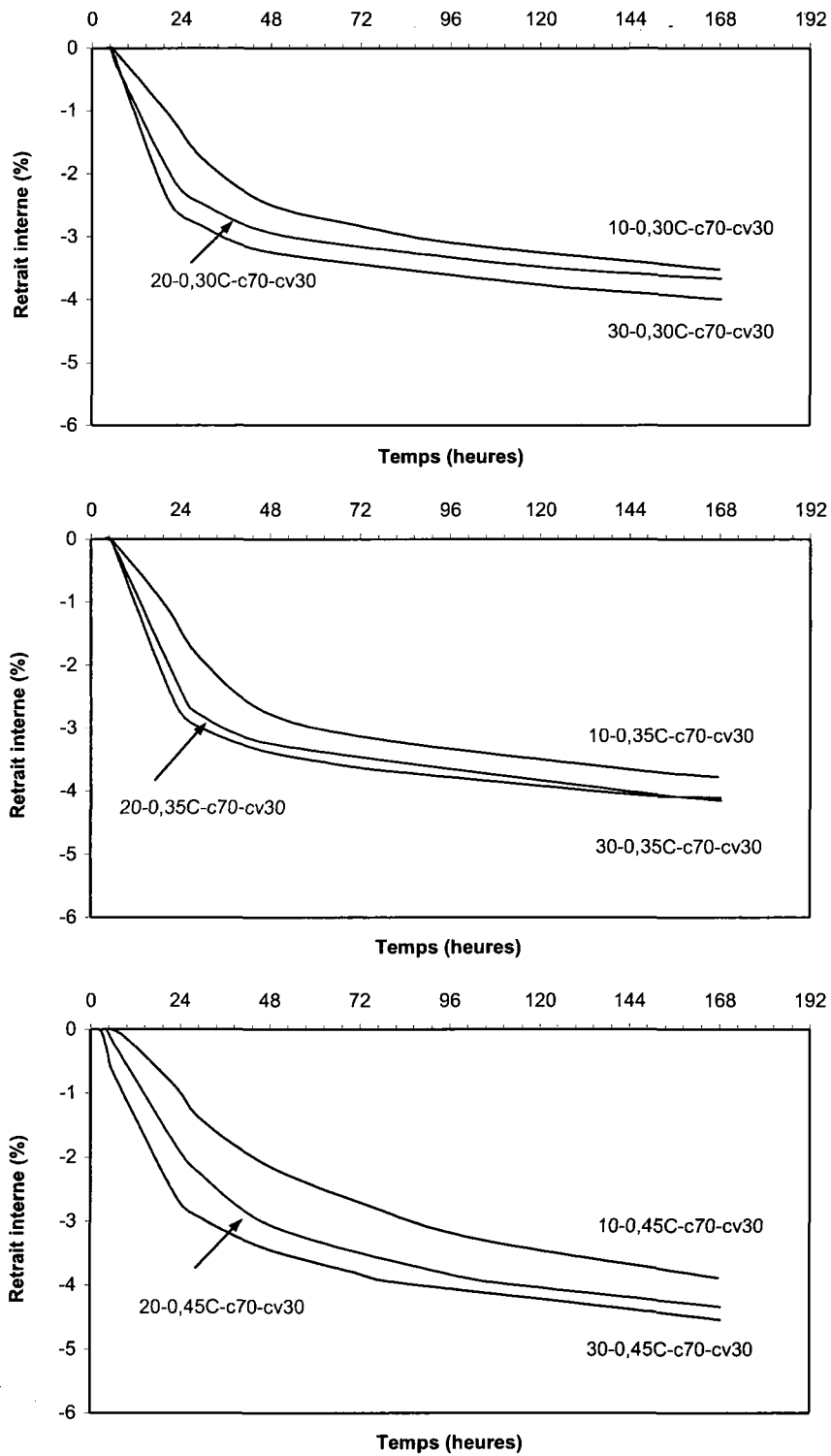


Figure C. 10 – Effet de la température sur les courbes du retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

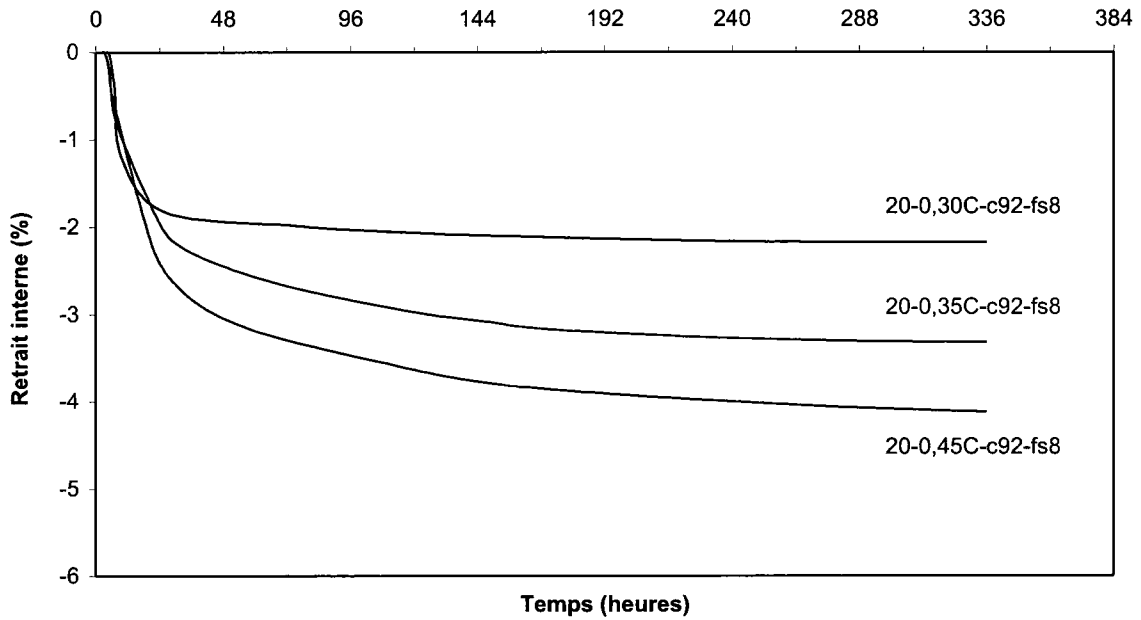


Figure C. 11 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 14 jours

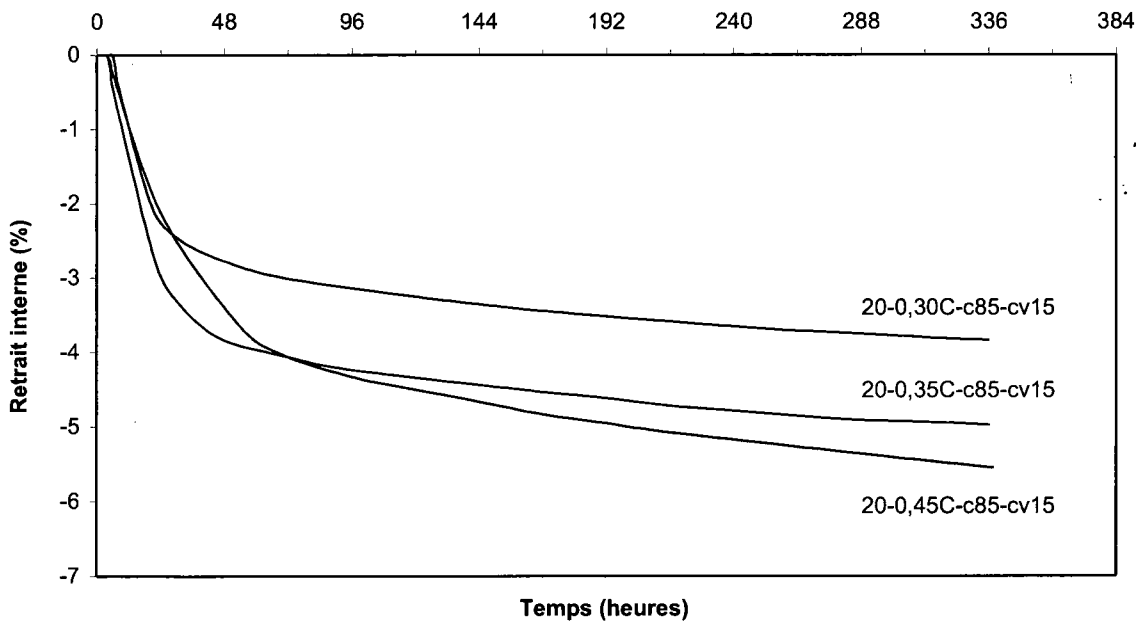


Figure C. 12 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 14 jours

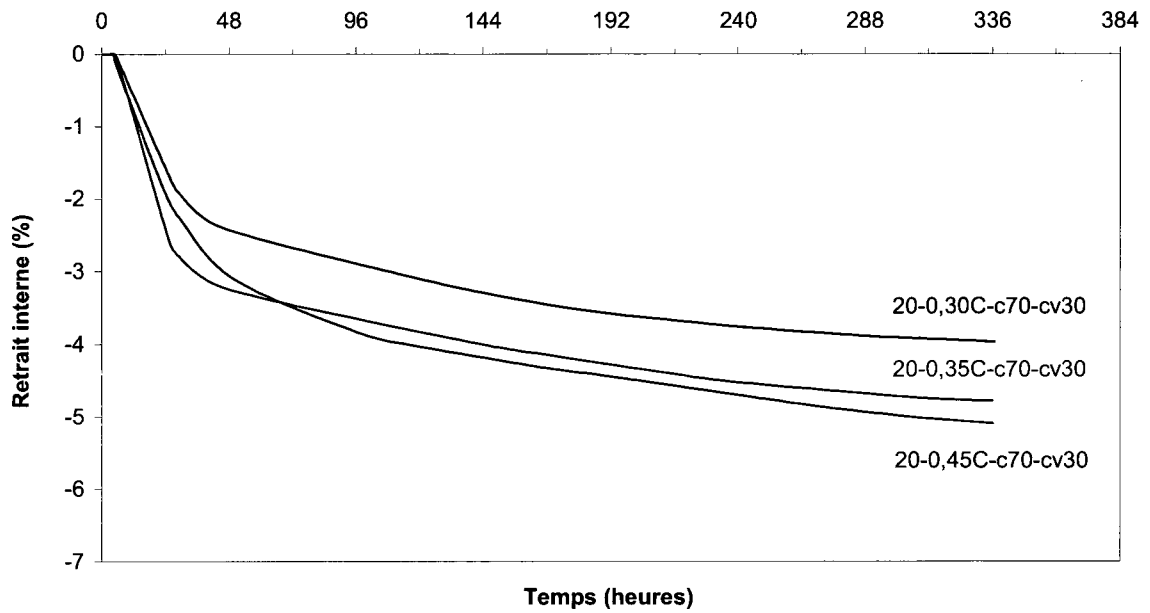


Figure C. 13 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 14 jours

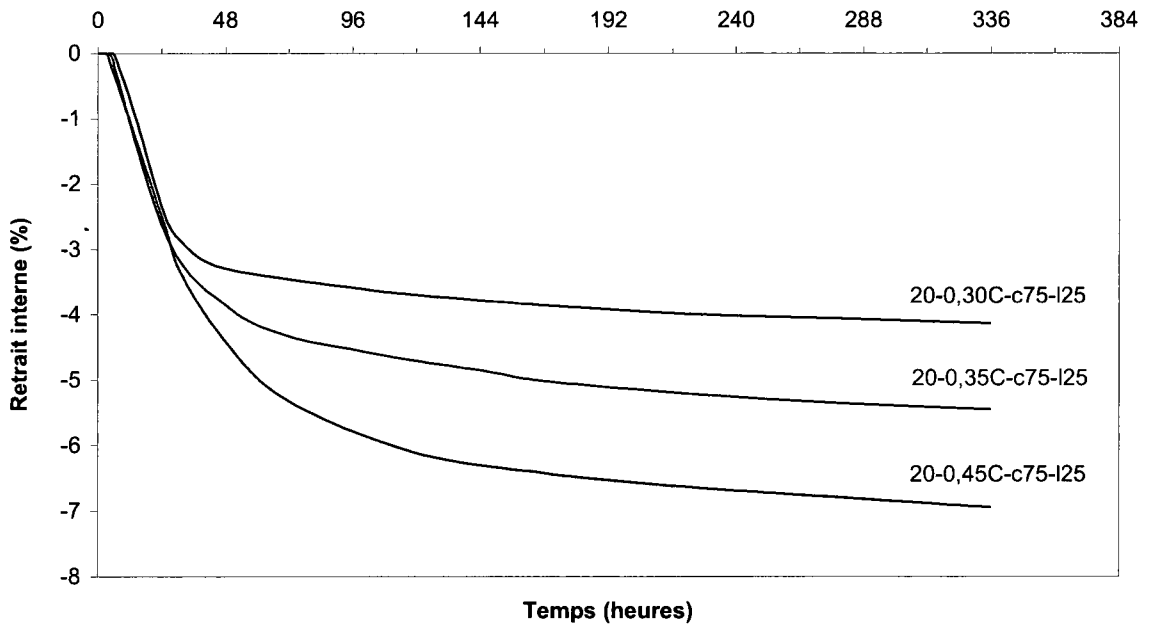


Figure C. 14 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait interne des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 14 jours

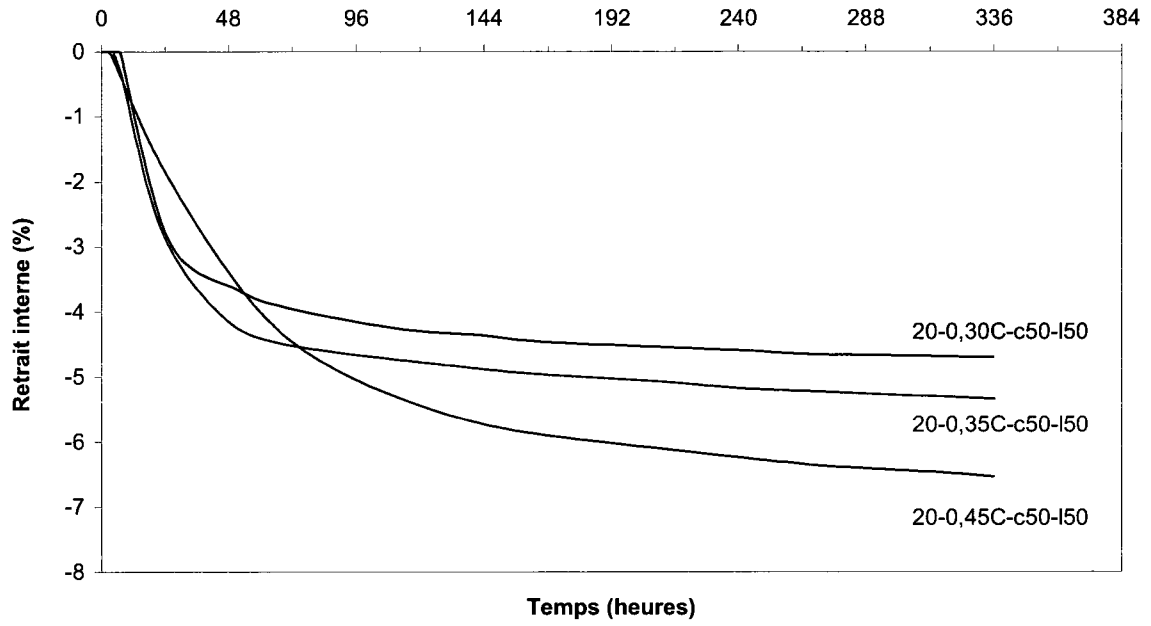


Figure C. 15 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait interne des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 14 jours

ANNEXE D

Courbes de retrait externe des coulis

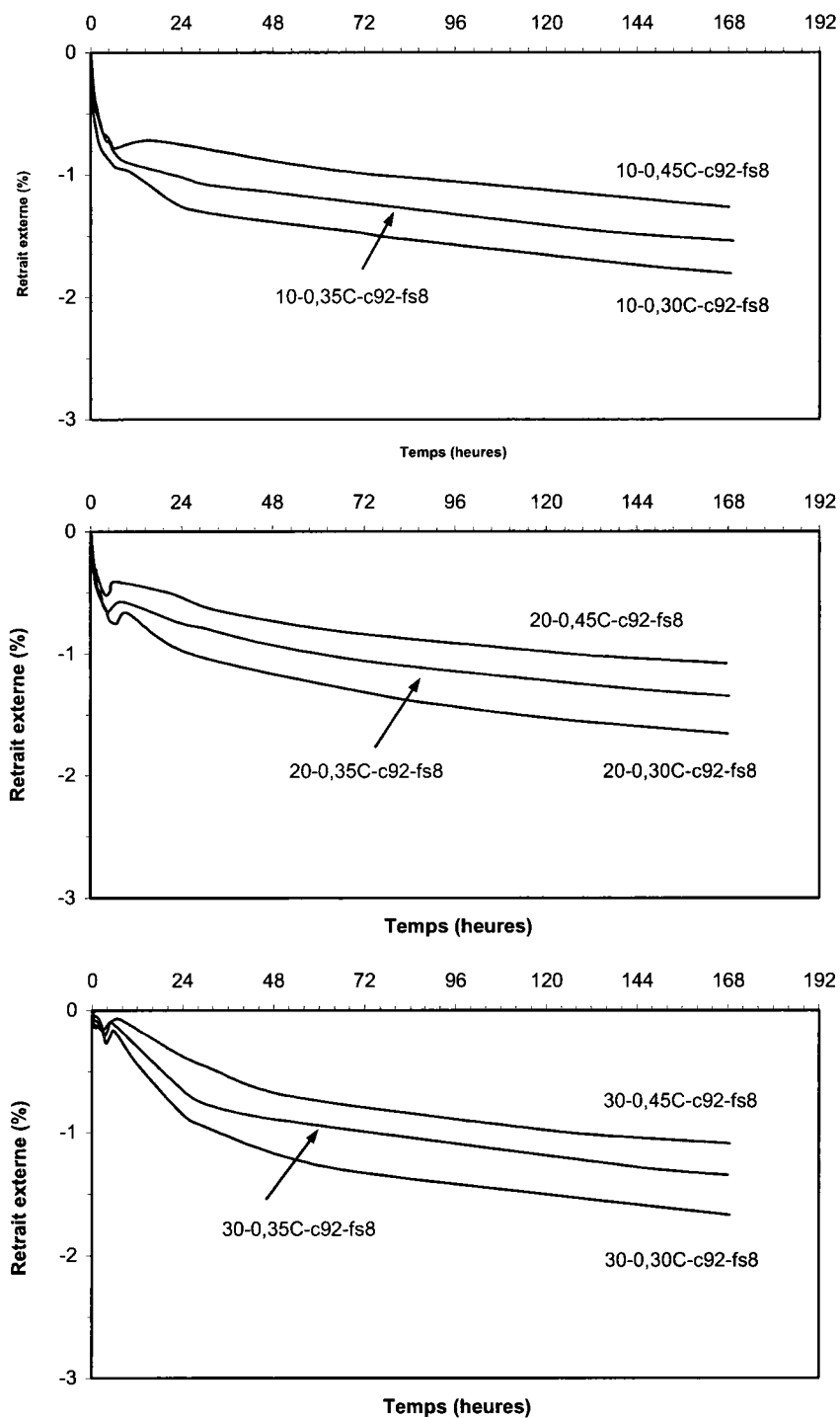


Figure D. 1 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

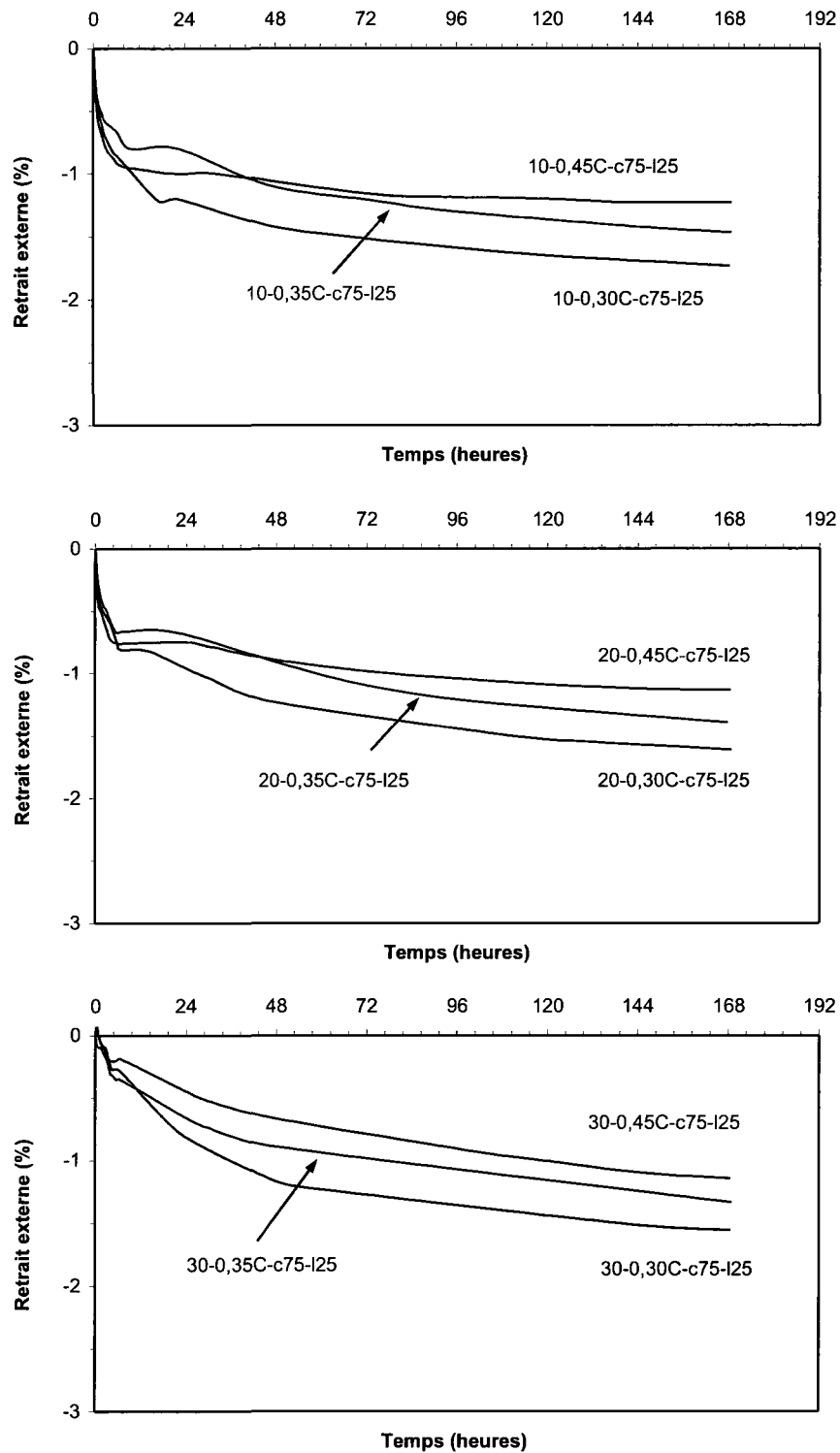


Figure D. 2 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

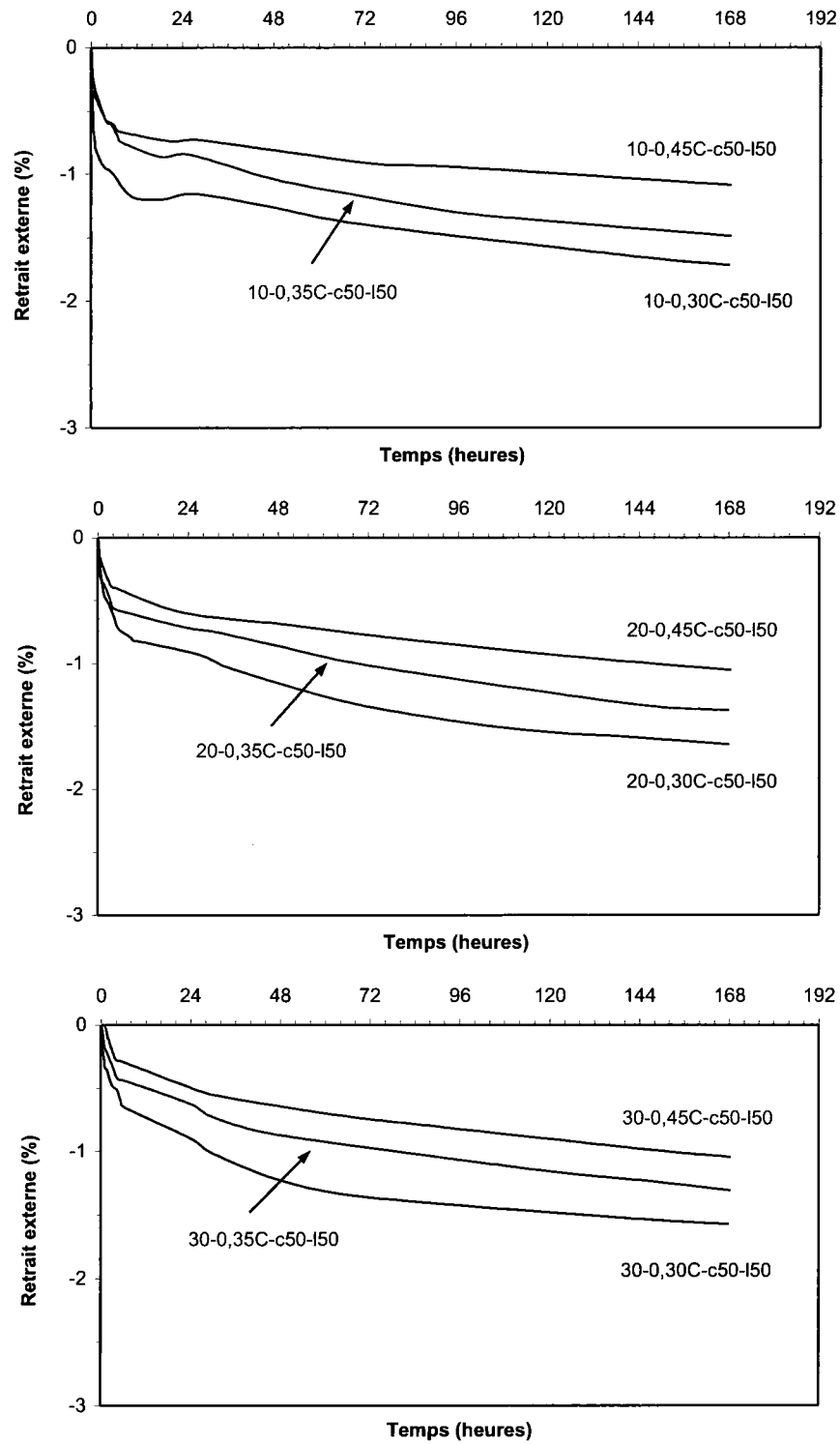


Figure D. 3 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

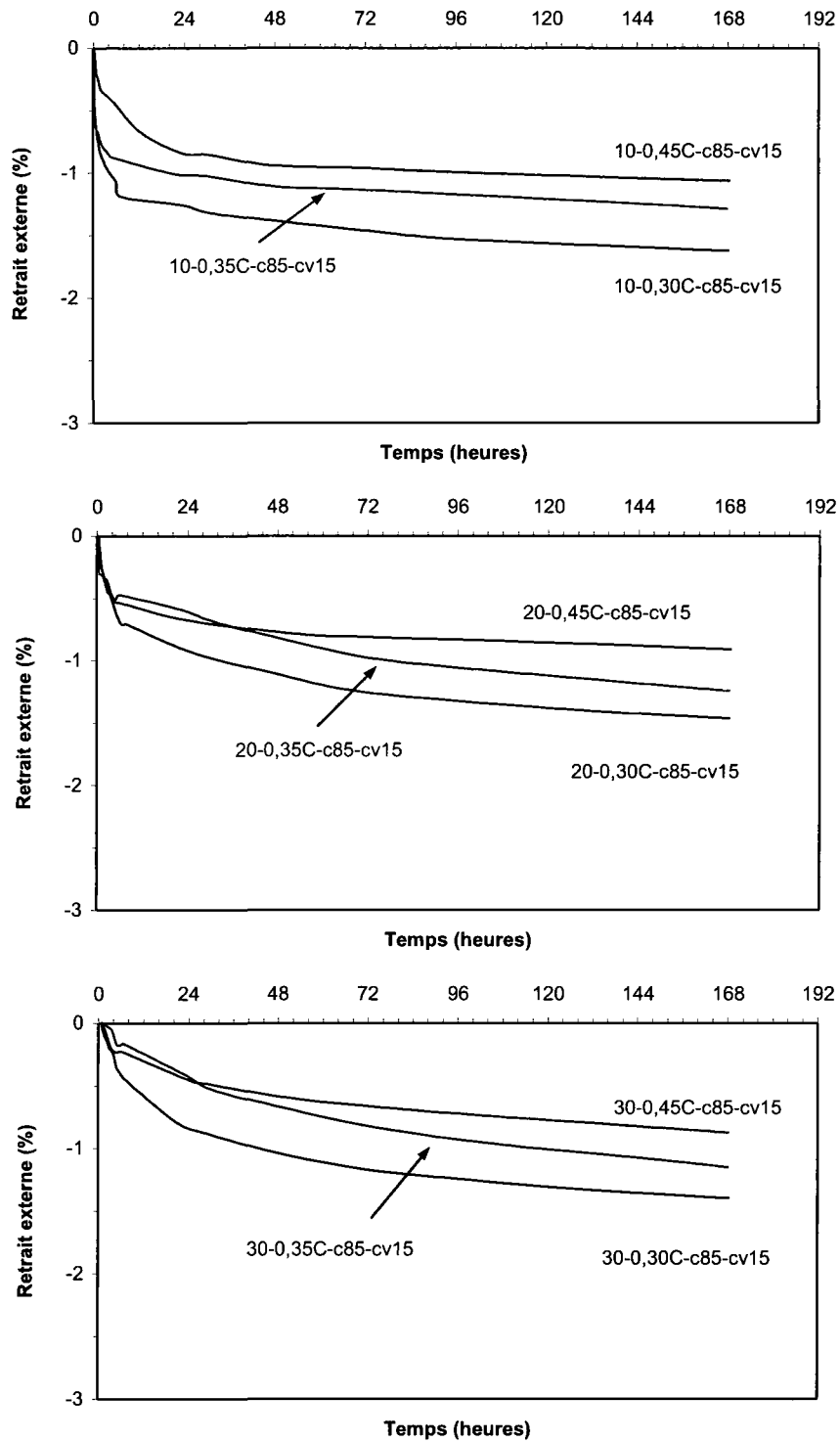


Figure D. 4 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

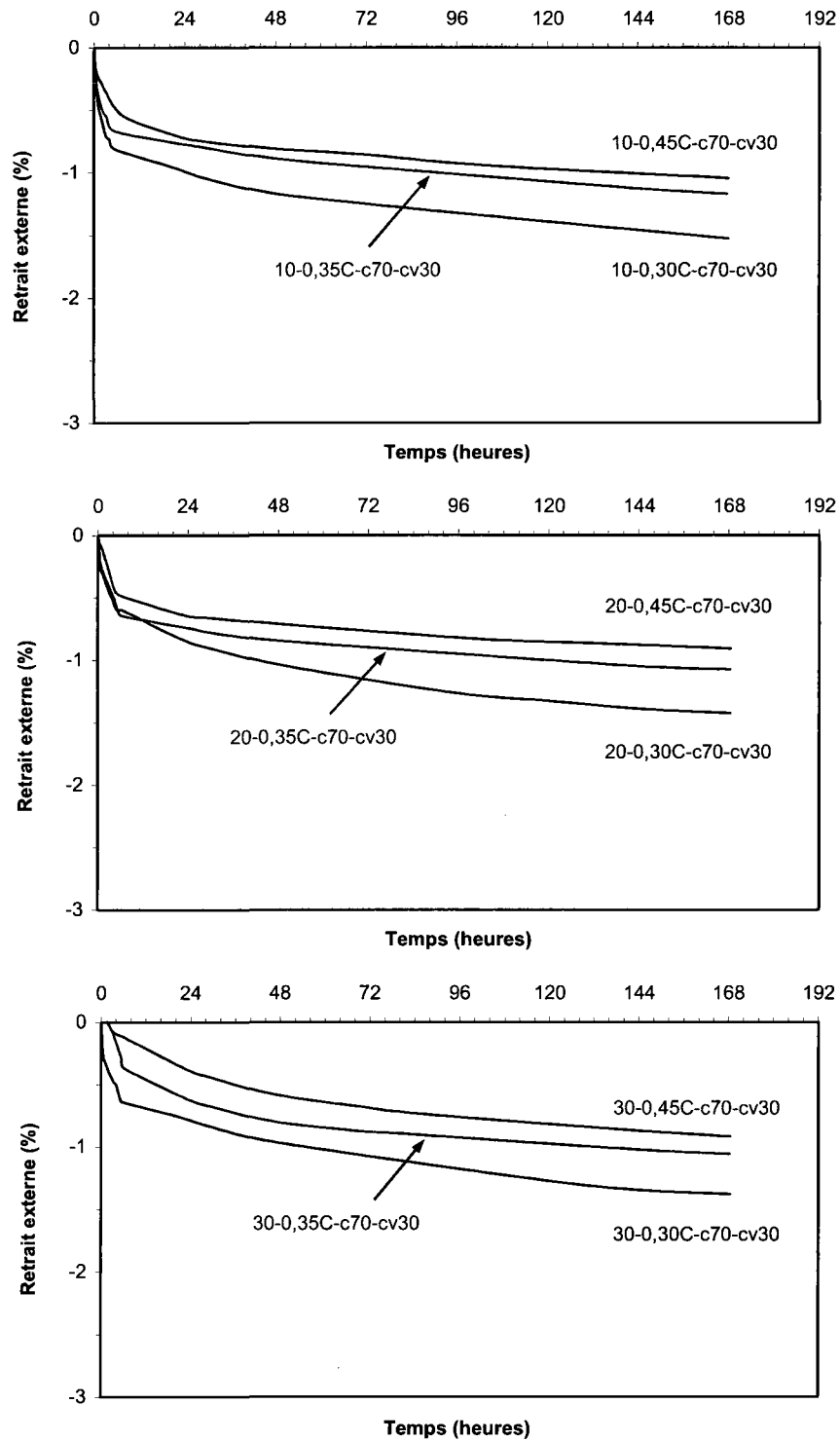


Figure D. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

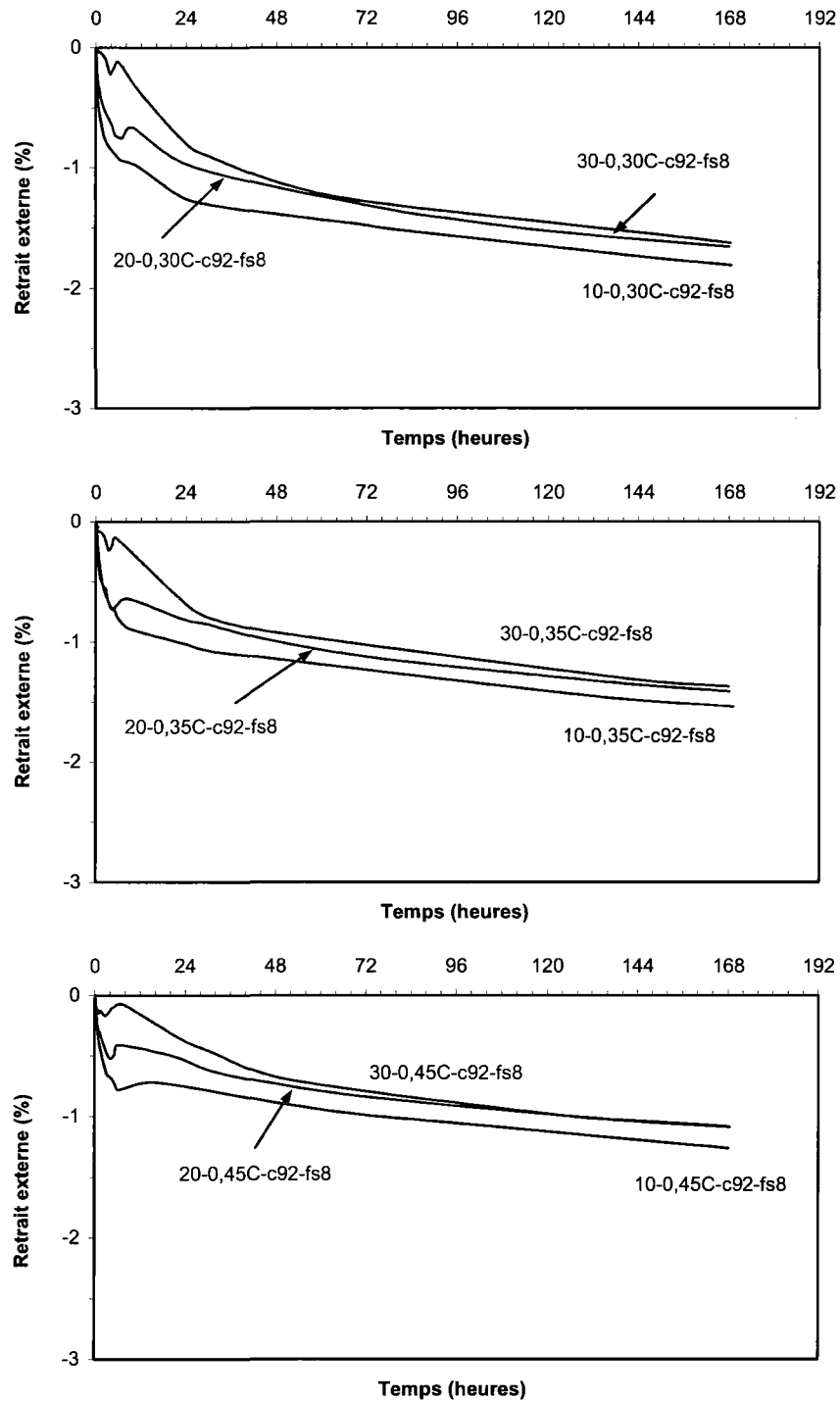


Figure D. 6 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

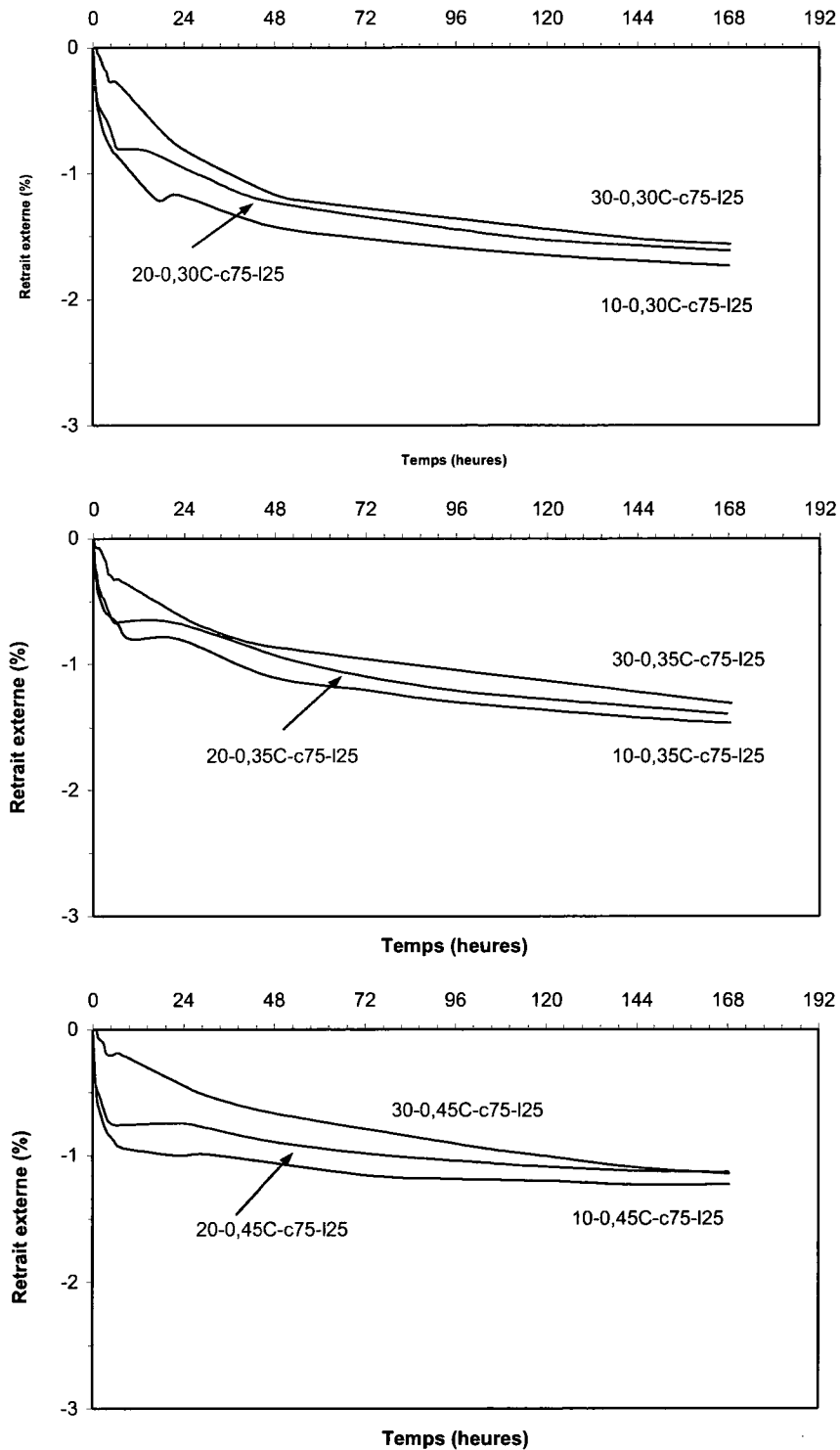


Figure D. 7 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

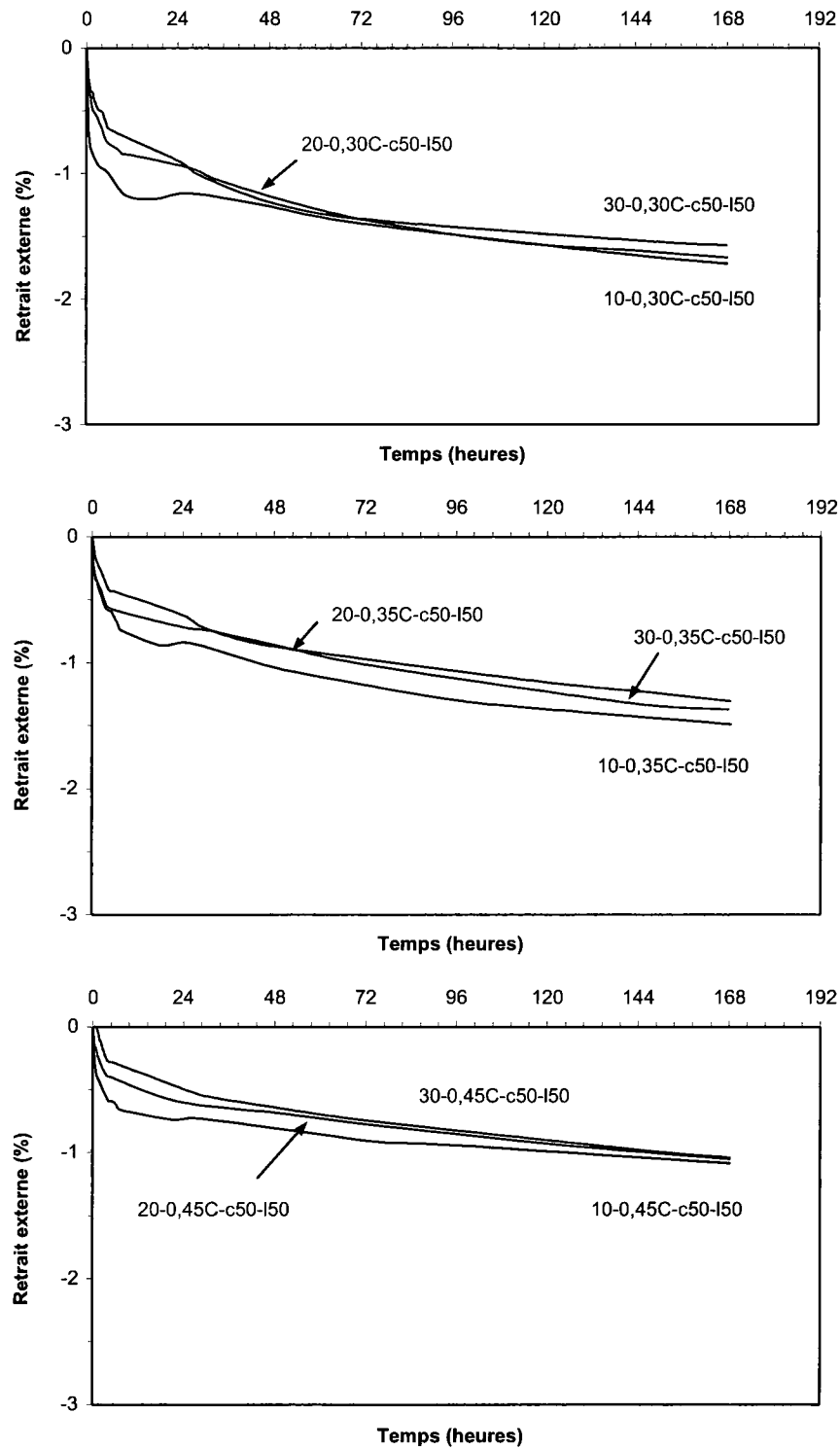


Figure D. 8 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

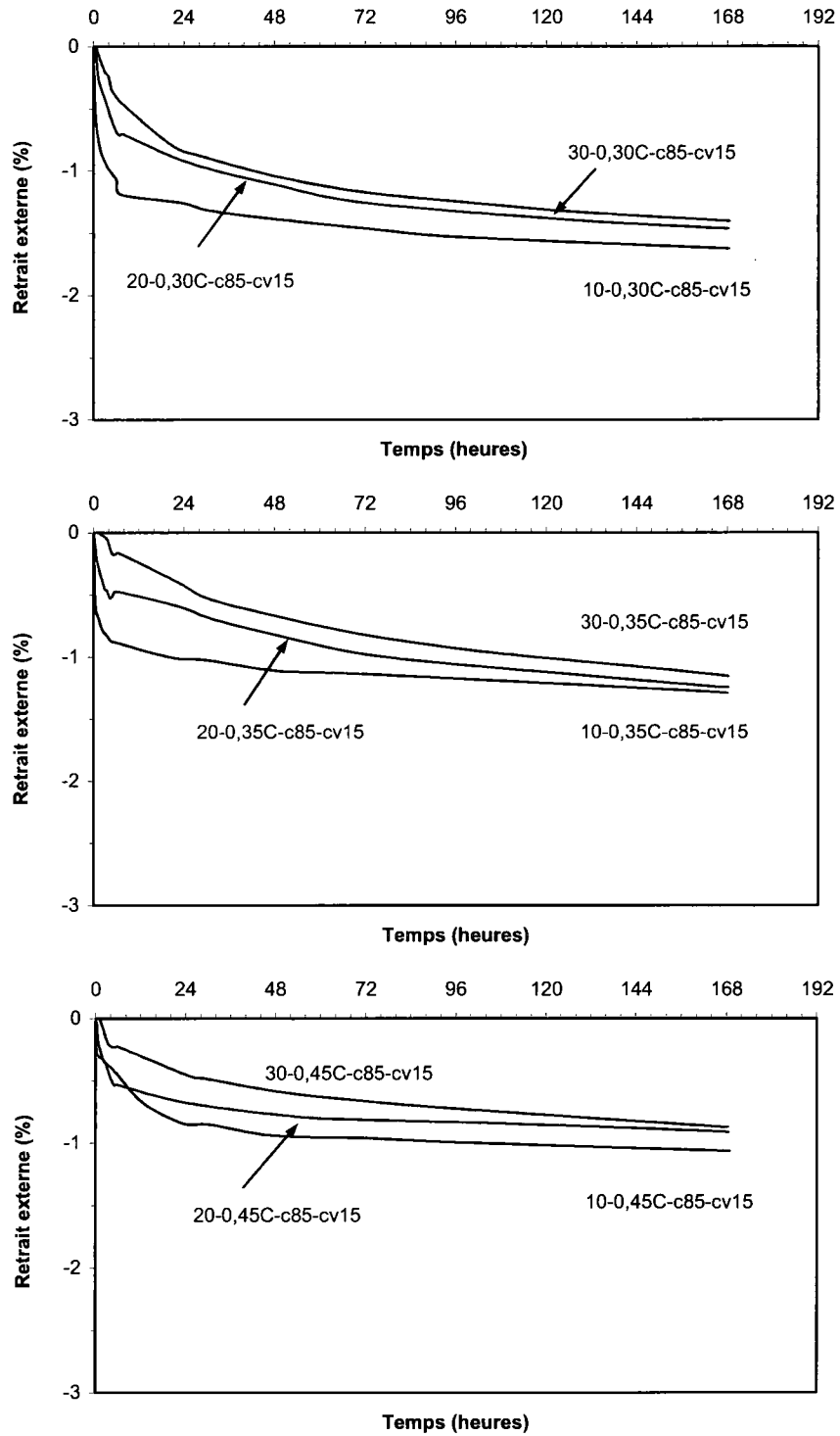


Figure D. 9 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

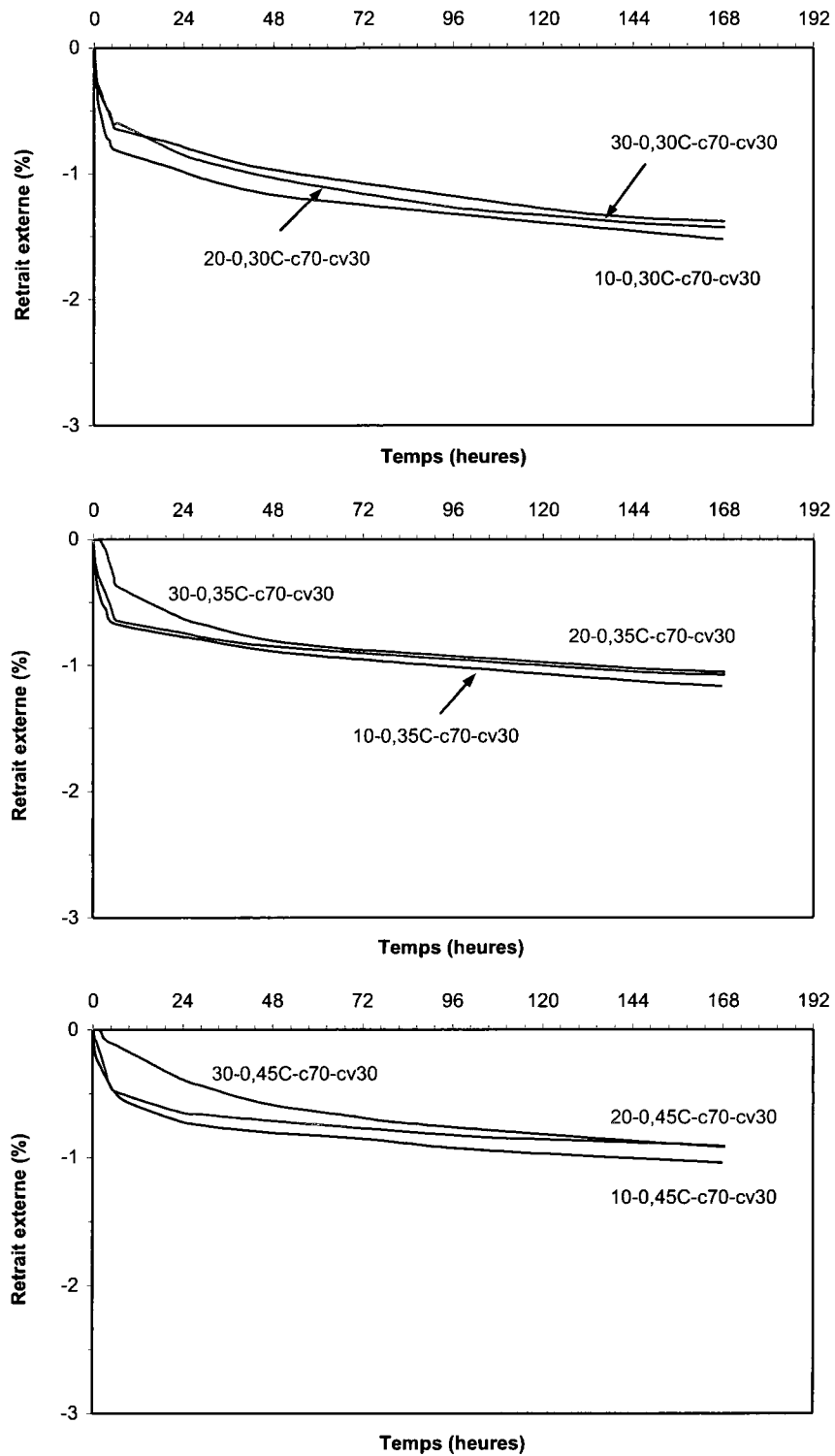


Figure D. 10 – Effet de la température sur les courbes de retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

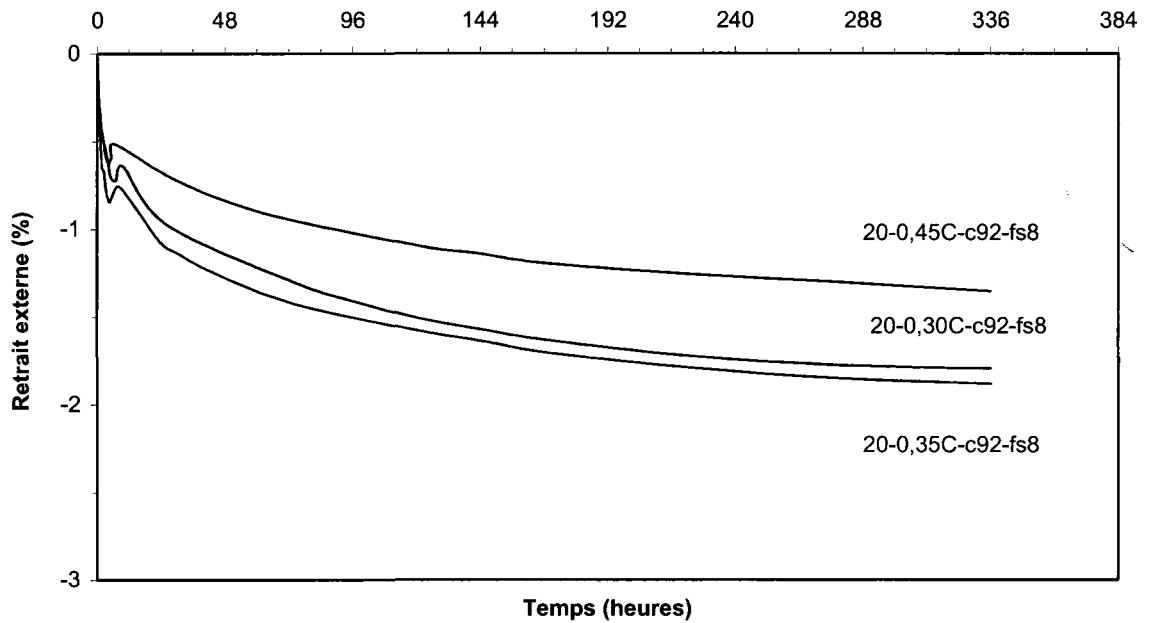


Figure D. 11 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 14 jours

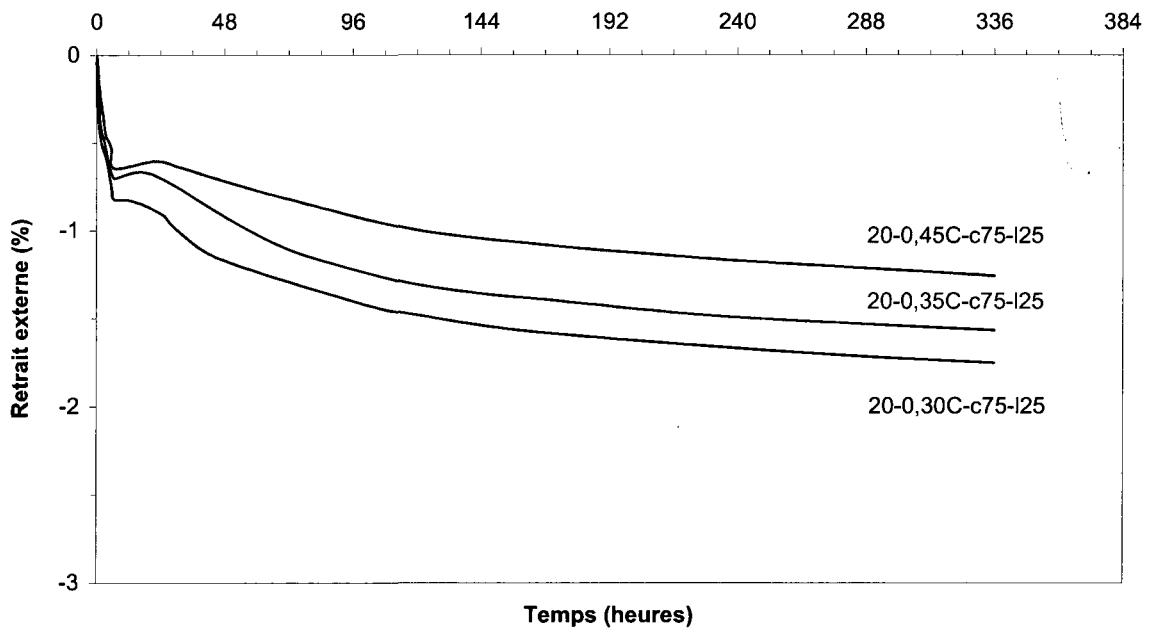


Figure D. 12 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 14 jours

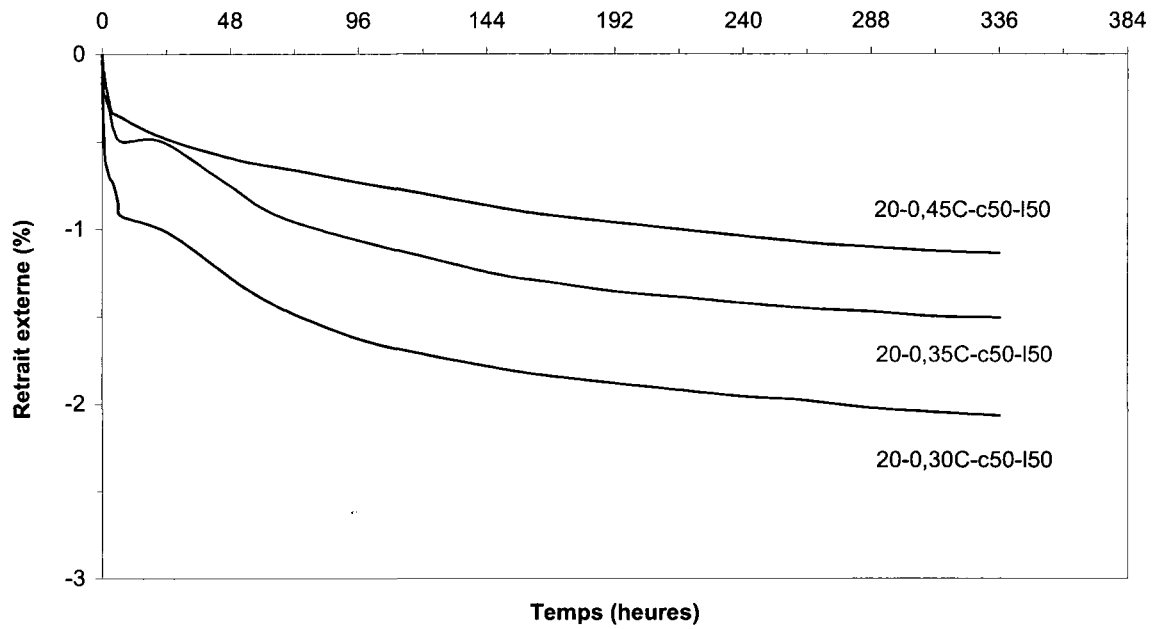


Figure D. 13 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 14 jours

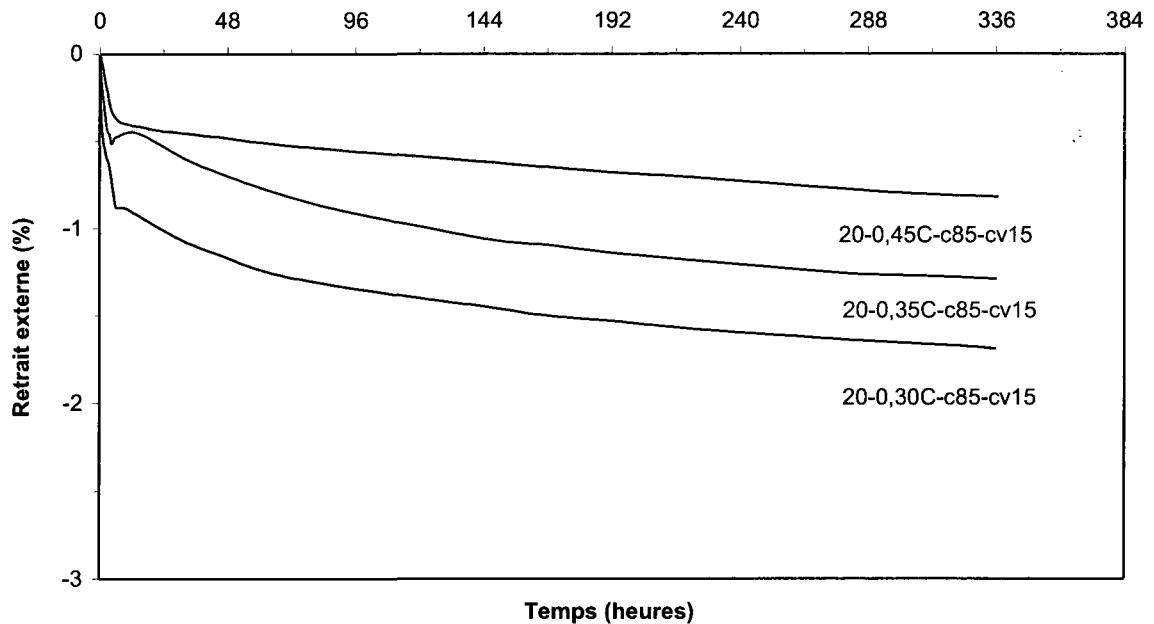


Figure D. 14 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 14 jours

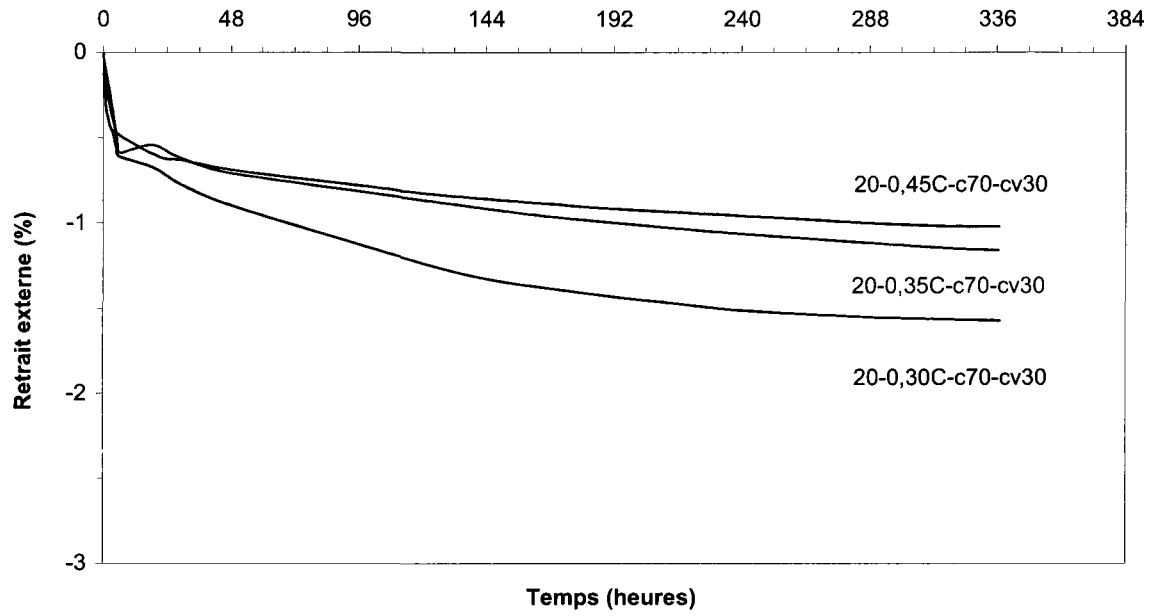


Figure D. 15 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait externe des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 14 jours

ANNEXE E

Courbes de retrait total des coulis

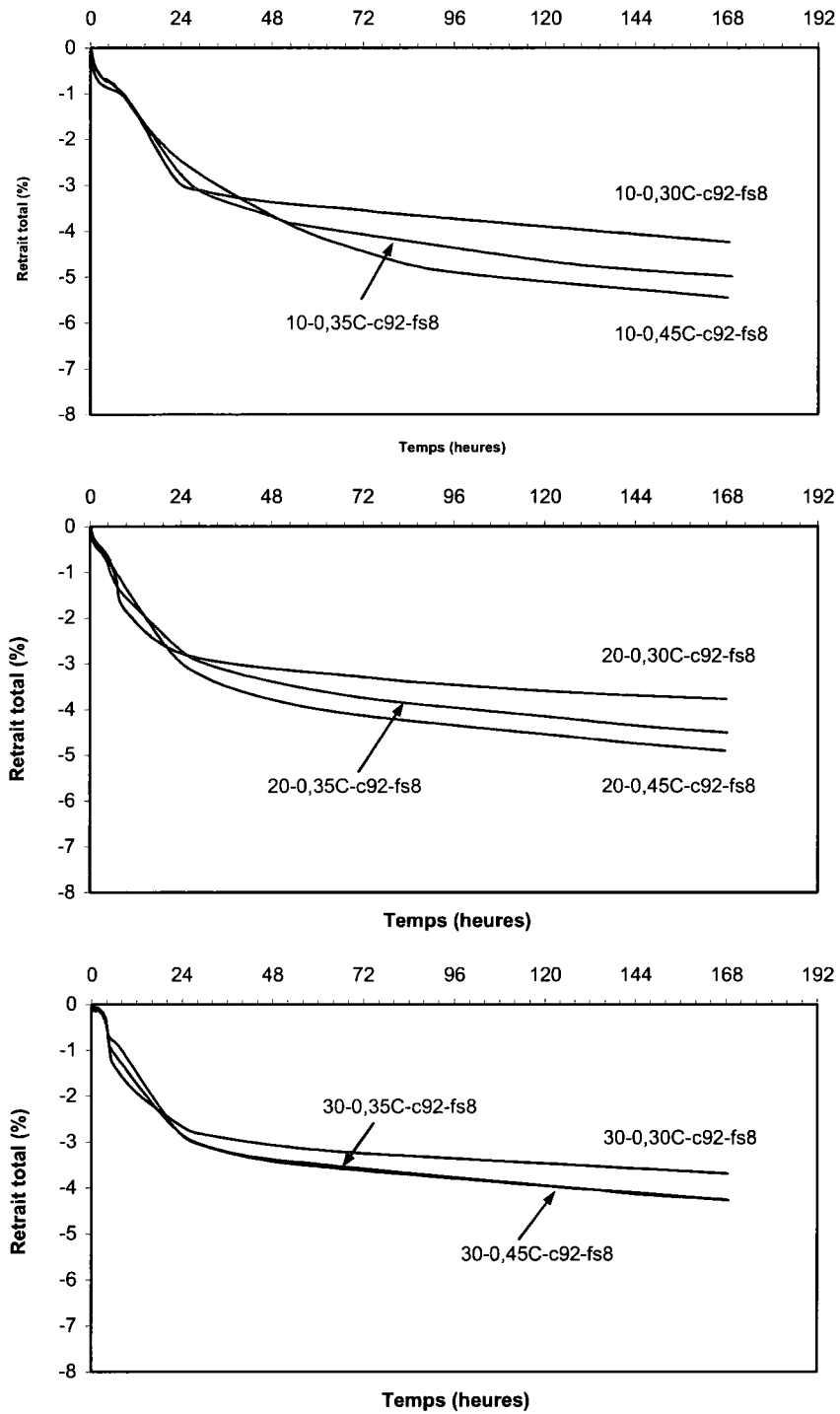


Figure E. 1 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

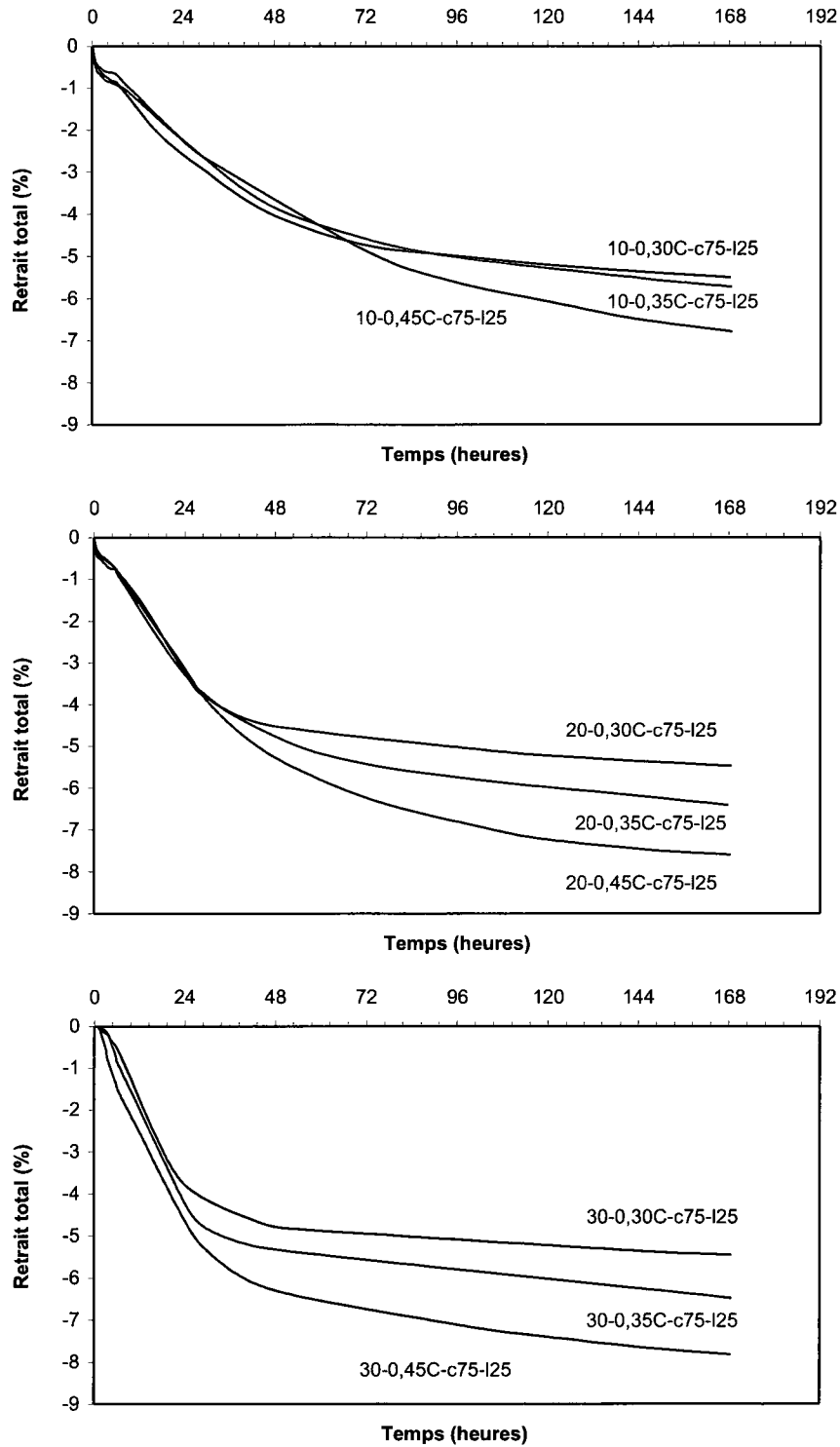


Figure E. 2 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

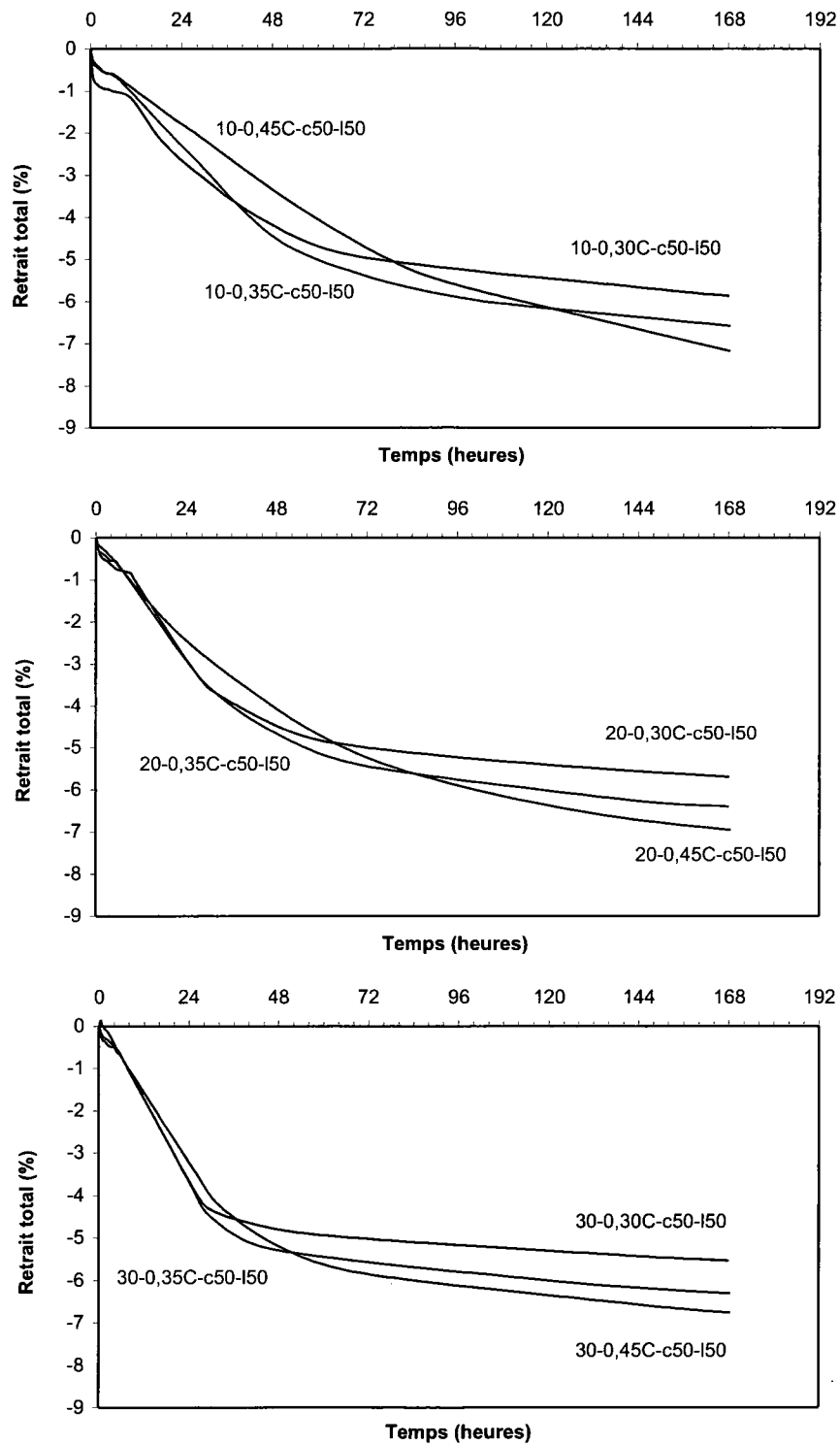


Figure E. 3 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

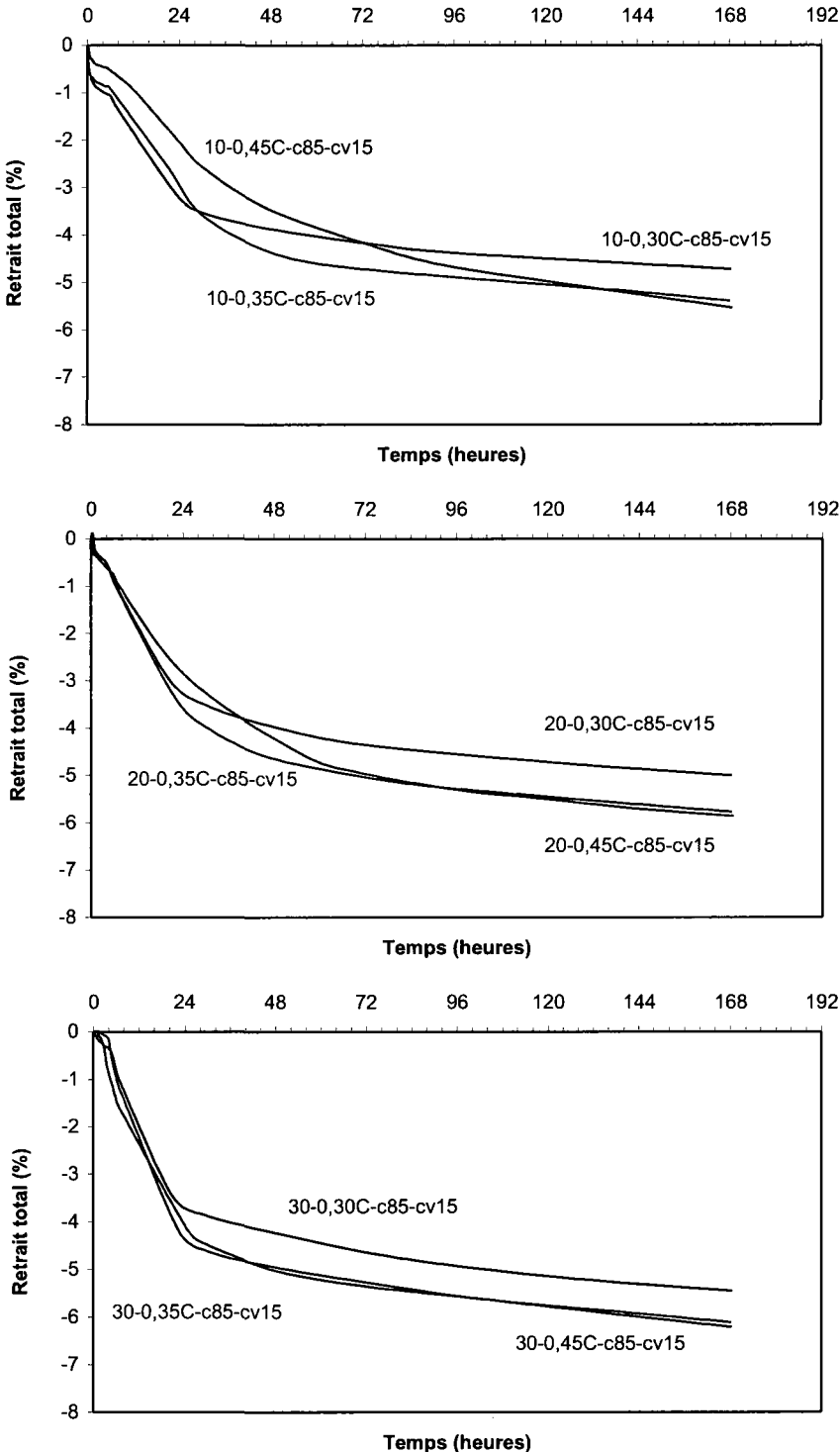


Figure E. 4 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (T = 10, 20 et 30°C)

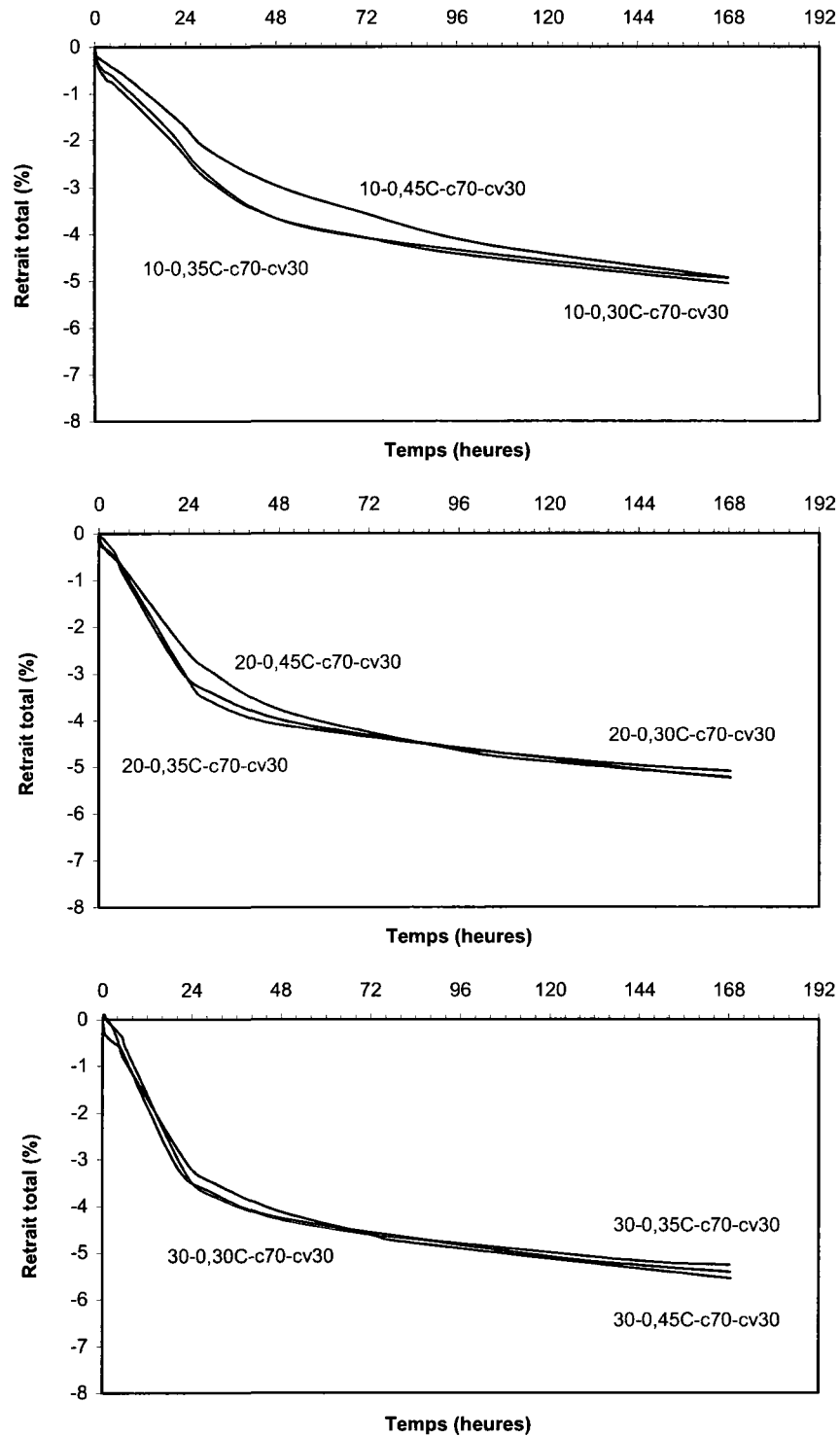


Figure E. 5 – Effet du rapport E/L sur les courbes de retrait total des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($T = 10, 20$ et 30°C)

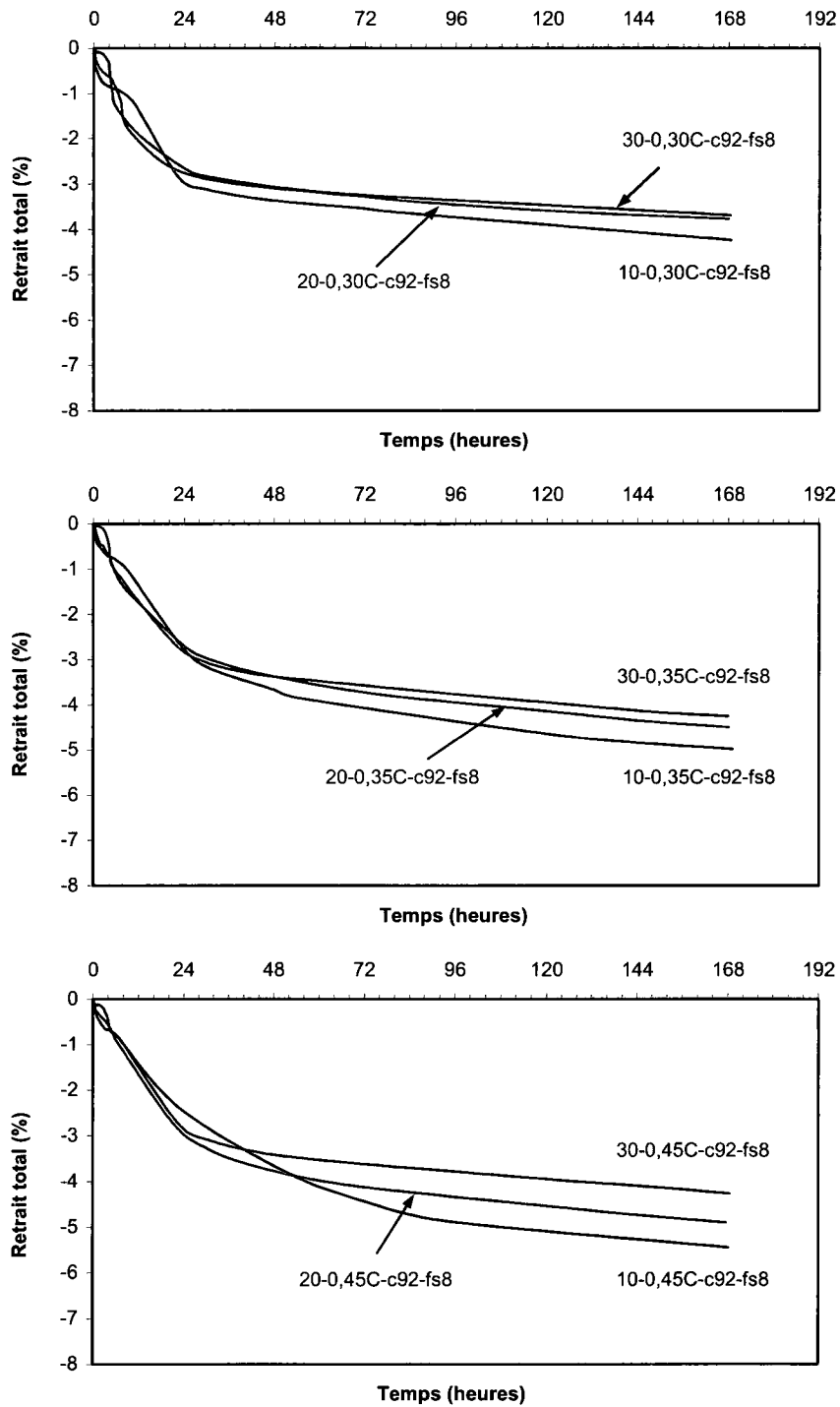


Figure E. 6 – Effet de la température sur les courbes de retrait total des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

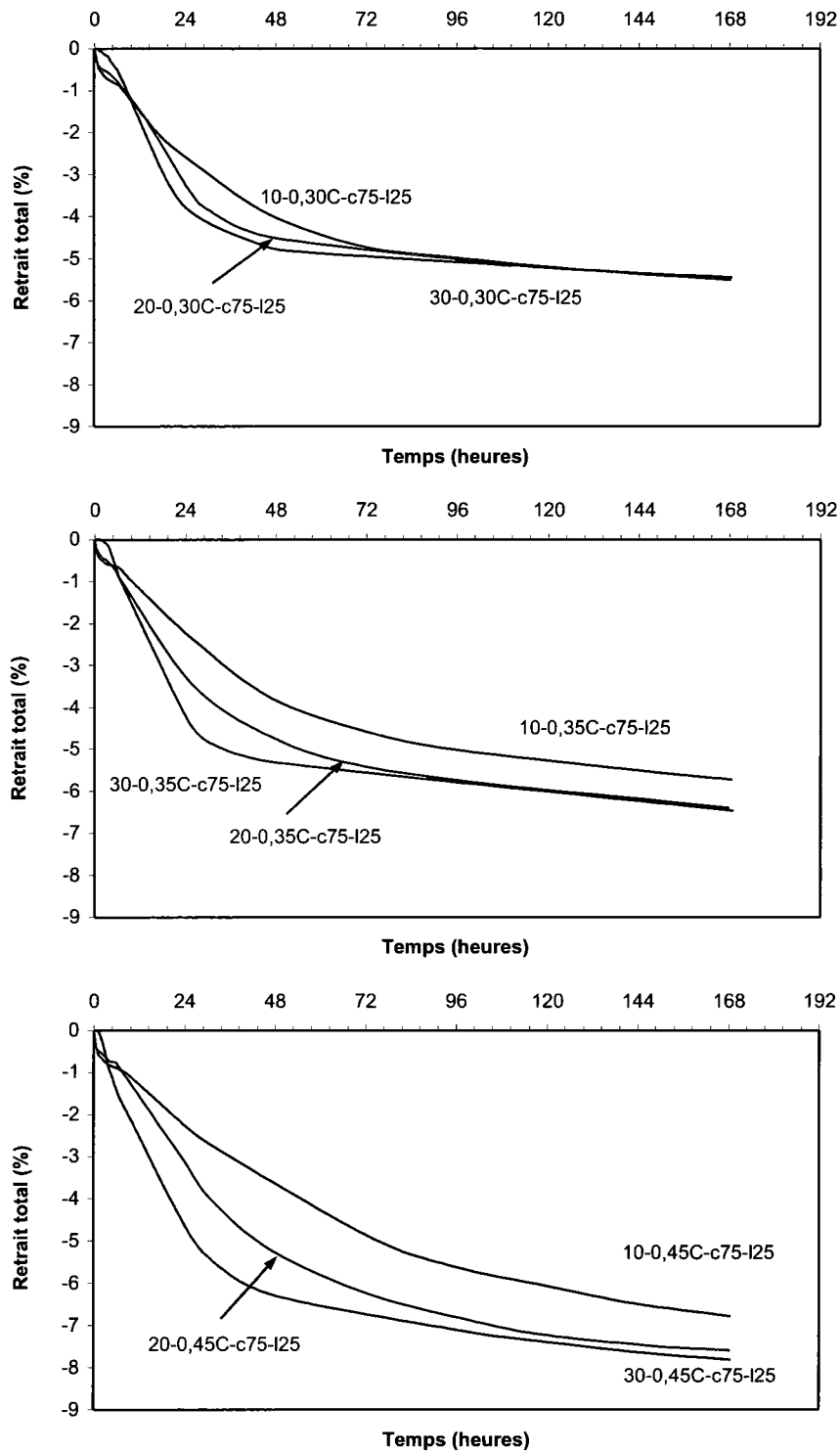


Figure E. 7 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

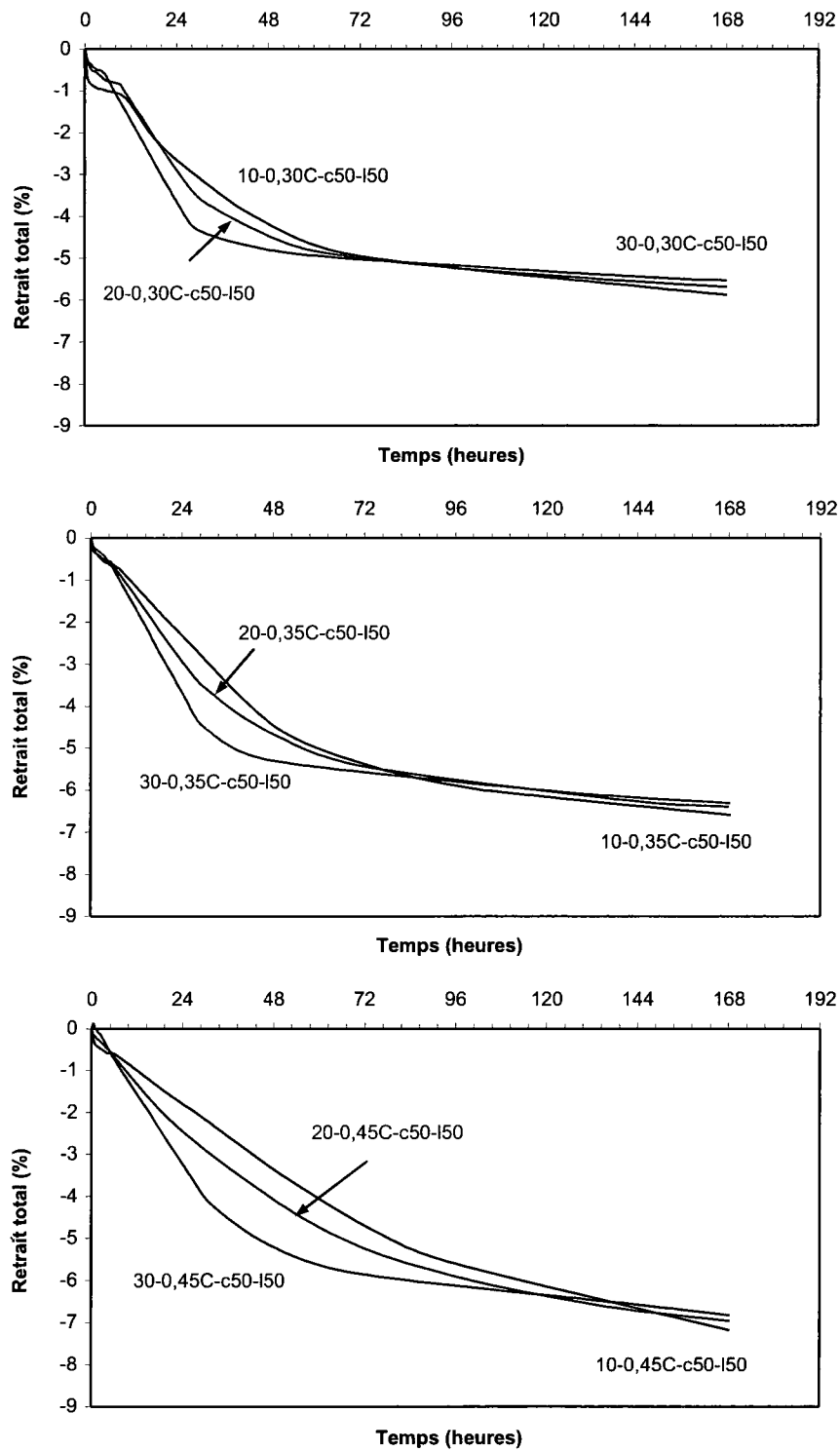


Figure E. 8 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

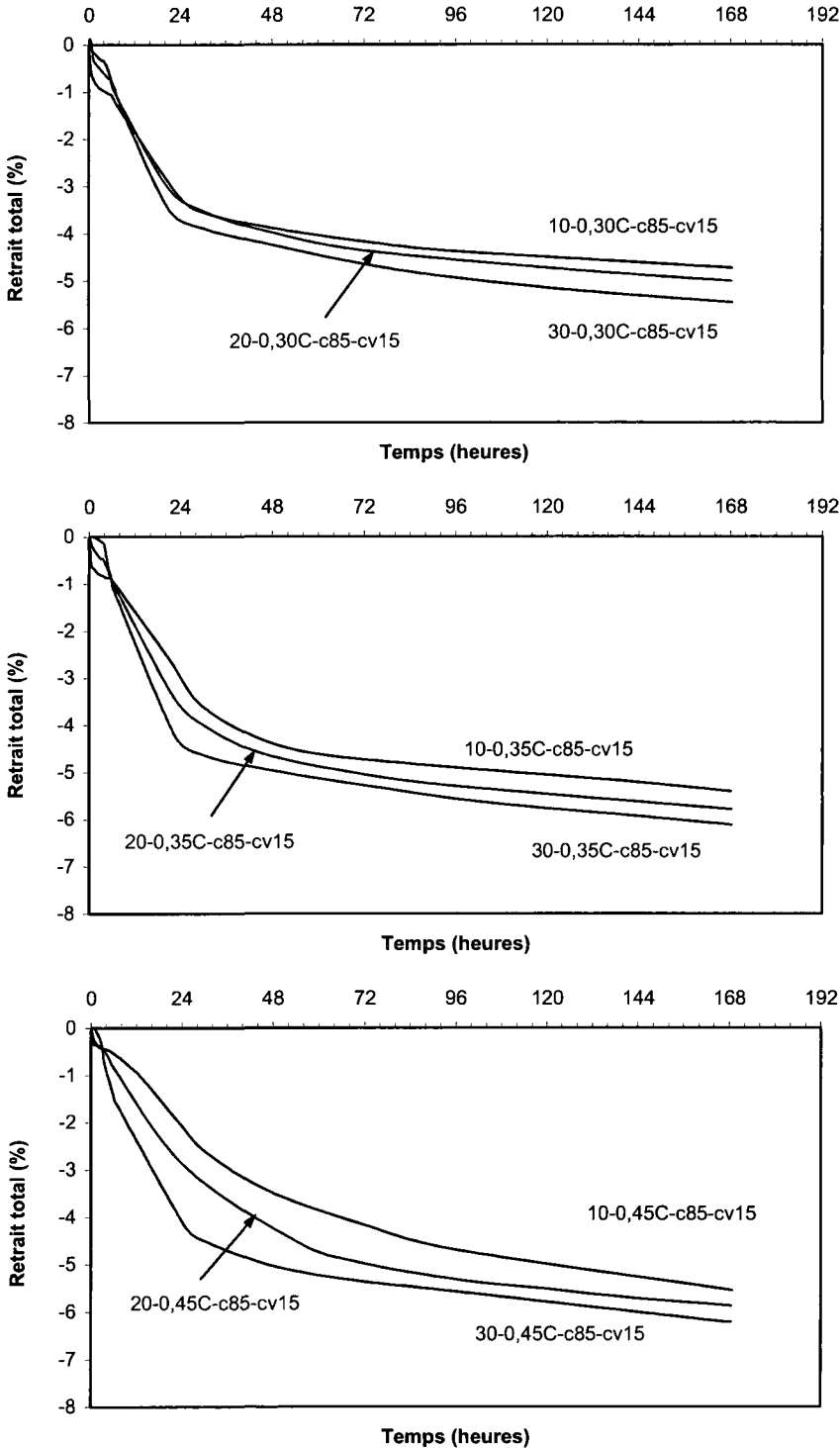


Figure E. 9 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 7 jours (E/L = 0,30, 0,35 et 0,45)

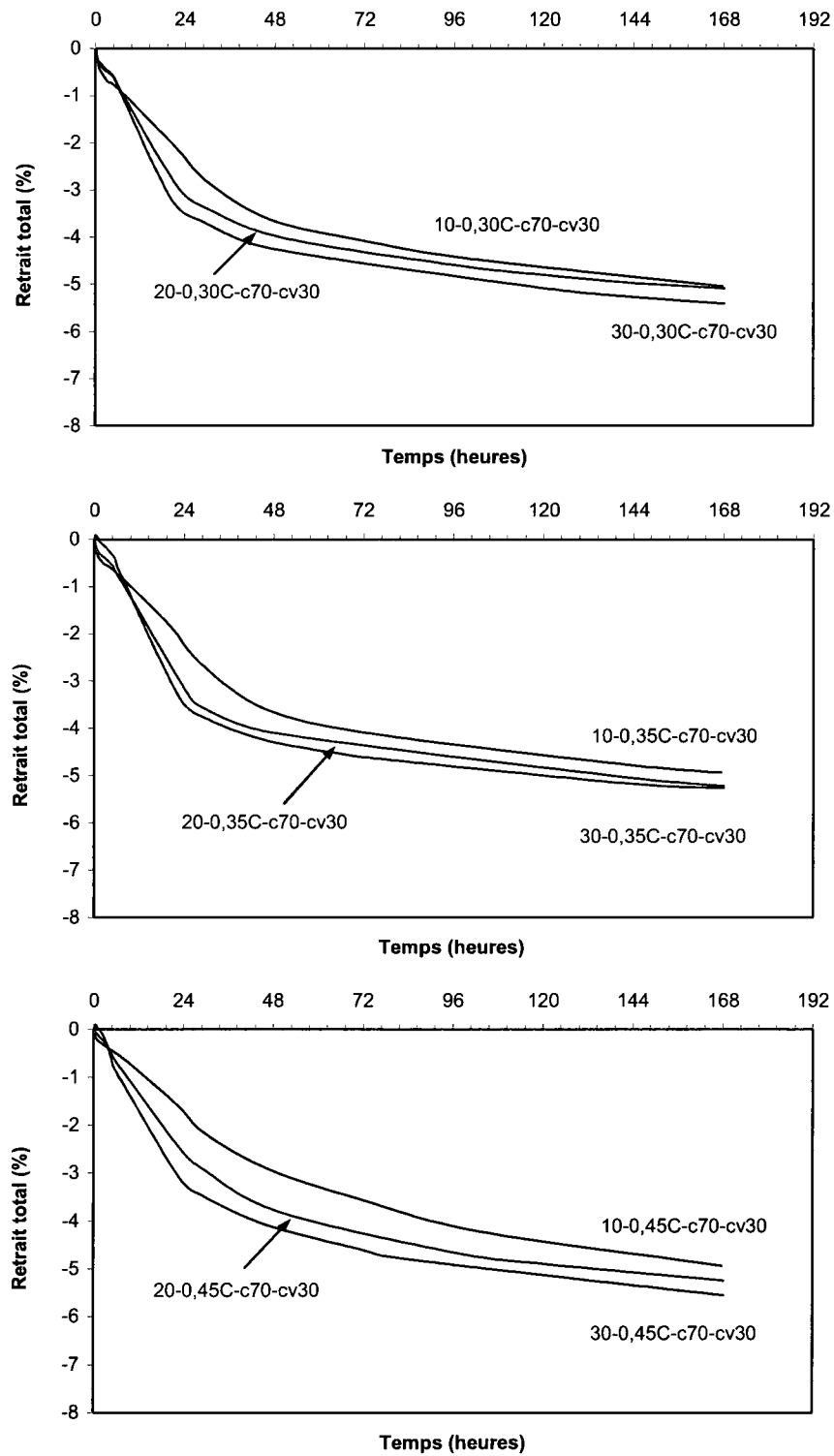


Figure E. 10 – Effet de la température sur les courbes du retrait total des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 7 jours ($E/L = 0,30, 0,35$ et $0,45$)

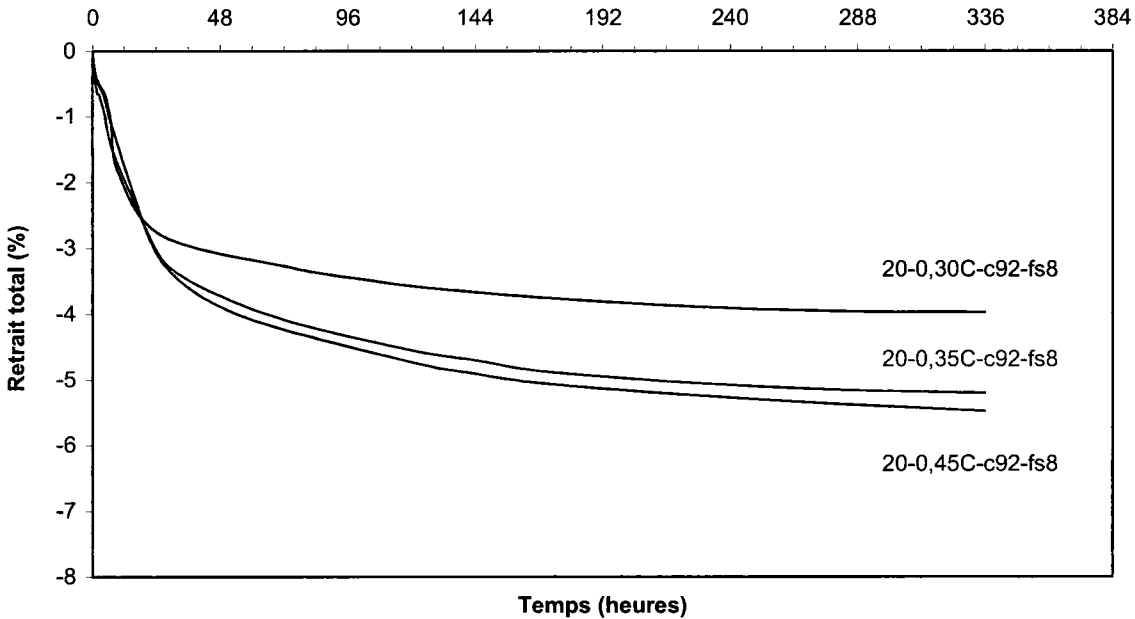


Figure E. 11 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 8% de fumée de silice mesuré pendant 14 jours

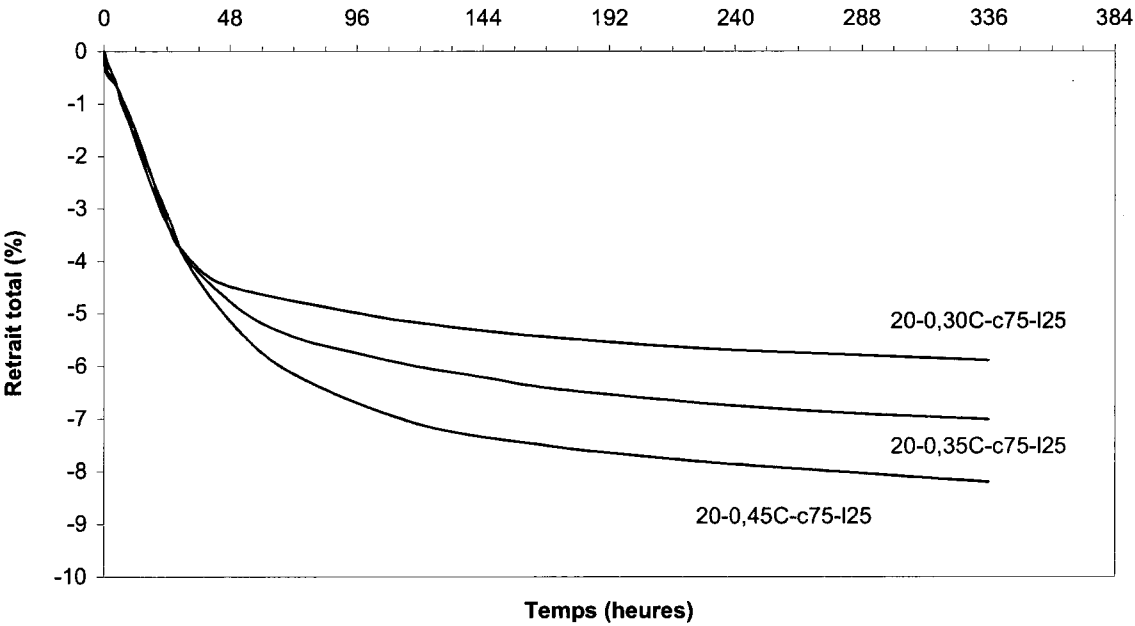


Figure E. 12 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 25% de laitier mesuré pendant 14 jours

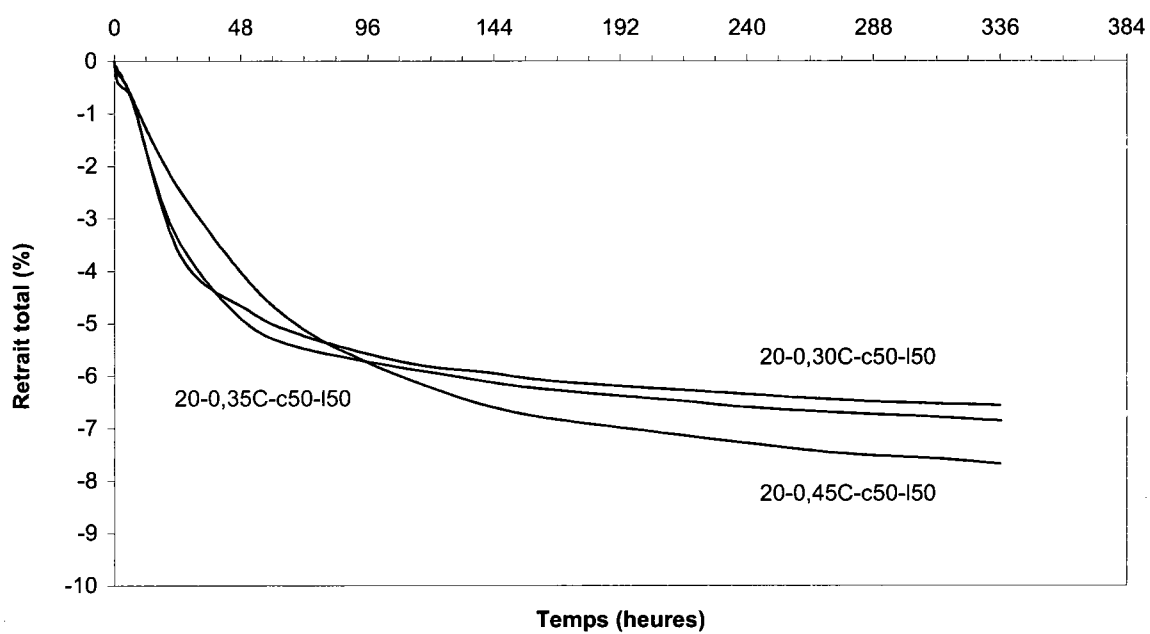


Figure E. 13 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 50% de laitier mesuré pendant 14 jours

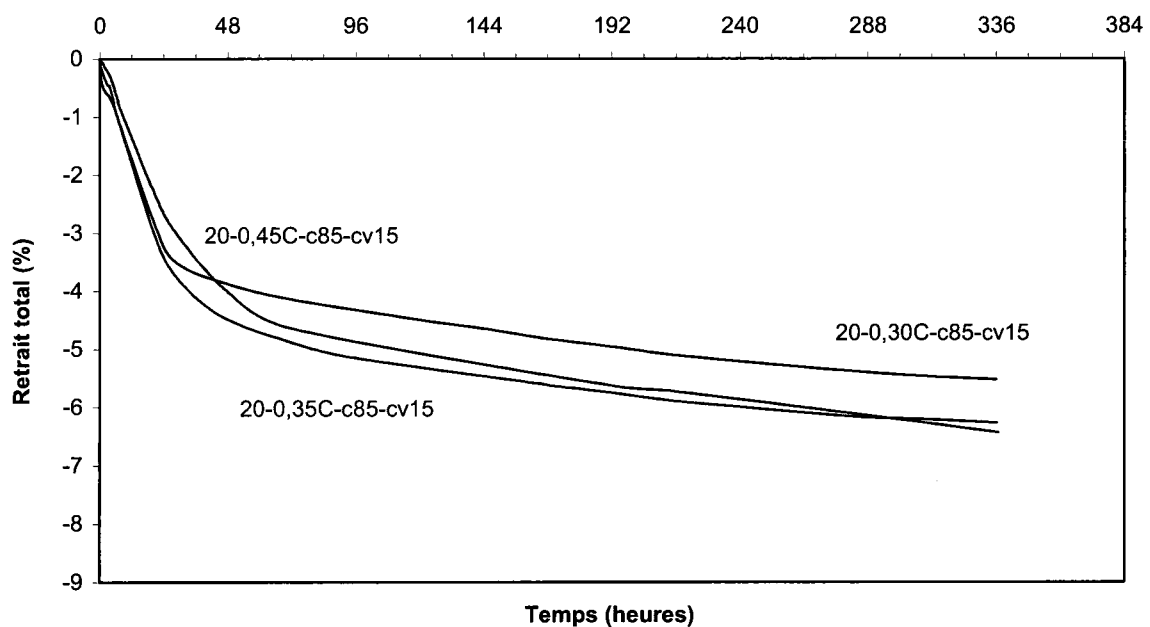


Figure E. 14 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 15% de cendre volante mesuré pendant 14 jours

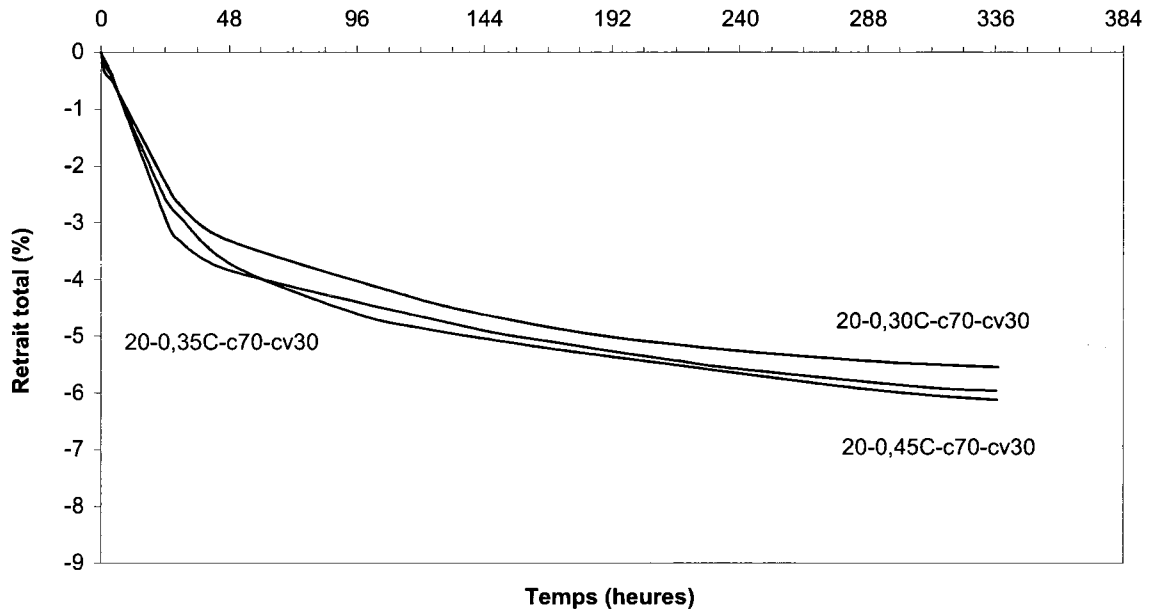


Figure E. 15 – Effet du rapport E/L sur les courbes du retrait total des coulis avec 30% de cendre volante mesuré pendant 14 jours