

Effets des différents types d'agents expansifs et des adjuvants réducteurs de retrait sur le retrait des mortiers élaborés à base de sables recyclés (en ce compris une introduction à la méthodologie de la recherche)

Auteur : Barzaq, Yasmine

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26163>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège × Université Laval

Faculté des sciences appliquées

**Effets des différents types d'agents
expansifs et des adjuvants réducteurs de
retrait sur le retrait des mortiers élaborés
à base de sables recyclés**

Travail de fin d'études rédigé par

BARZAQ Yasmine

en vue de l'obtention du grade de

Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil
engineering"

Membres du jury :

BERTRAND François (ULiège)

FANARA Arthur (ULiège)

Promoteur :

COURARD Luc (ULiège)

Co-promoteur :

BISSONNETTE Benoît (ULaval)

Année académique 2025–2026

Résumé (FR)

Menées en collaboration entre l'Université de Liège et l'Université Laval au Québec, les recherches réalisées par Barzaq Yasmine, sous la supervision des professeurs Luc Courard (ULiège) et Benoît Bissonnette (ULaval) contribuent au développement de formulations alternatives de mortiers à base de sables recyclés.

De nos jours, les mortiers occupent une place essentielle dans le secteur de la construction. Parmi leurs constituants principaux, le sable joue un rôle majeur. Toutefois, bien qu'il soit présent en grande quantité à la surface de la Terre, le sable exploitable dans les matériaux cimentaires tend à devenir une ressource de plus en plus limitée. En effet, tous les types de sable ne possèdent pas les caractéristiques requises pour être utilisés dans ce domaine. Dans un contexte marqué par la croissance démographique, l'augmentation des besoins en logements et la diminution rapide des ressources naturelles, l'exploitation intensive du sable soulève aujourd'hui plusieurs enjeux environnementaux, économiques et sociaux.

Une des solutions envisagées afin de remédier à cette problématique consiste à développer des mortiers incorporant des sables recyclés, afin de valoriser les déchets issus de la construction et de la démolition (CDW) et de s'inscrire dans une logique d'économie circulaire. Cette étude porte sur la substitution partielle et totale du sable naturel par des sables recyclés, avec des taux de remplacement de 50 % et 100 %. Trois types de sables sont considérés : un sable naturel canadien (NS), un sable recyclé canadien (RS1), et un sable recyclé belge (RS2).

Cependant, les sables recyclés présentent certaines limites, notamment une porosité élevée et une forte absorption d'eau, pouvant accroître le retrait du mortier et donc le risque de fissuration. Pour y remédier, différentes formulations intégrant des agents expansifs de type K, de type G et à base de MgO, ainsi que des combinaisons avec des SRA (Shrinkage Reducing Admixtures), sont étudiées. Ces adjuvants sont comparés afin d'identifier les solutions les plus efficaces pour limiter le retrait et la fissuration, tout en essayant de conserver des performances proches de celles des mortiers conventionnels.

Enfin, cette étude s'inscrit dans la **continuité des travaux réalisés par Thibault Mettlen en 2025**. L'optimisation des formulations, notamment pour mieux maîtriser l'expansion des mortiers, ainsi que l'absence de norme officielle encadrant spécifiquement l'utilisation des sables recyclés, renforcent l'intérêt scientifique et technique de cette thématique pour l'avenir de la construction durable.

Abstract (EN)

Conducted in collaboration between the University of Liège (Belgium) and Laval University (Quebec, Canada), the research carried out by Barzaq Yasmine under the supervision of Professors Luc Courard (ULiège) and Benoît Bissonnette (ULaval) contributes to the development of alternative mortar formulations incorporating recycled sands.

Nowadays, mortars play a fundamental role in the construction industry. Among their main constituents, sand is an essential component. Although sand is abundant on the Earth's surface, suitable sand resources for cementitious materials are becoming increasingly limited, as not all types of sand possess the required properties for such applications. In a context characterized by population growth, increasing housing demands, and the rapid depletion of natural resources, intensive sand extraction raises significant environmental, economic, and social concerns.

One promising solution to this issue is the development of mortars incorporating recycled sands, thereby promoting the valorization of construction and demolition waste (CDW) within a circular economy framework. This study investigates the partial and total replacement of natural sand with recycled sands at substitution rates of 50% and 100%. Three types of sand are considered : a Canadian natural sand (NS), a Canadian recycled sand (RS1), and a Belgian recycled sand (RS2).

However, recycled sands exhibit certain limitations, including high porosity and elevated water absorption capacity, which may increase mortar shrinkage and consequently the risk of cracking. To address these challenges, various formulations incorporating K-type, G-type, and MgO-based expansive agents, as well as combinations with Shrinkage Reducing Admixtures (SRAs), were investigated. These admixtures were compared in order to identify the most effective solutions for reducing shrinkage and cracking while trying to maintain performance levels comparable to those of conventional mortars.

Finally, **this study builds upon the work previously conducted by Thibault Mettlen in 2025**. The optimization of mortar formulations, particularly to better control expansion, together with the absence of specific standards governing the use of recycled sands, highlights the scientific and technical relevance of this research for the future development of sustainable construction practices.

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, le professeur Luc Courard, pour m’avoir offert l’opportunité de réaliser cet échange avec l’Université Laval au Canada, ainsi que pour son accompagnement tout au long de ce projet. Cette expérience a été particulièrement marquante et restera à jamais gravée dans ma mémoire.

J’adresse aussi mes plus sincères remerciements à mon co-promoteur, le professeur Benoît Bissonnette, sans qui ce séjour n’aurait pas été possible. Son encadrement, ses précieux conseils, sa bienveillance et sa patience m’ont profondément touchée. La réalisation de ce travail à ses côtés a constitué pour moi une véritable source d’apprentissage, tant sur le plan scientifique que personnel.

Je remercie chaleureusement les autres membres du groupe de recherche CRIB de l’Université Laval pour leur aide, leur disponibilité et leurs conseils. Je tiens plus particulièrement à remercier Andreia Rodrigues pour son assistance lors des travaux en laboratoire, ainsi que Rodolfo Castillo pour ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour le temps et l’intérêt qu’ils consacreront à la lecture et à l’évaluation de ce travail, qui marque l’aboutissement de ces longues années d’études.

Je remercie également mes amis, qui ont rendu mes journées à l’Université de Liège plus joyeuses et plus agréables. J’adresse un merci particulier à Loubna Said, Mariam Mouhtadi et Simon Badot pour leurs encouragements, leur soutien et leur présence tout au long de mon parcours universitaire. Je remercie également Axel Millard, avec qui j’ai passé une grande partie de mon temps au laboratoire afin de mener à bien ce projet commun.

Mes remerciements vont également à ma famille, et plus particulièrement à mes frères, Barzaq Ayoub et Barzaq Sami, pour leur soutien durant cette période.

Enfin, je **dédie ce travail et cet accomplissement à mes parents, Barzaq Mohamed et Ichen Amina**, qui m’ont soutenue sans relâche tout au long de mes études universitaires et qui ont consenti de nombreux sacrifices pour moi. **Cet accomplissement n’est pas uniquement le mien, il est aussi le leur.**

Note sur l'usage de l'Intelligence Artificielle (IA)

L'intelligence artificielle a été utilisée de manière très limitée dans le cadre de ce travail de recherche. Son intervention s'est strictement restreinte à la correction de l'orthographe, de la grammaire et de la syntaxe, afin d'améliorer la clarté rédactionnelle et la qualité linguistique du document. Aucun contenu, aucune idée, aucune analyse ni aucune information scientifique n'a été générée par l'IA. L'ensemble des recherches, des réflexions, de la structure, des résultats et des conclusions présentés dans ce travail provient exclusivement de l'auteur et de ses résultats expérimentaux obtenus au laboratoire.

Il est essentiel de rappeler que l'usage de l'intelligence artificielle pour produire du contenu académique, rédiger des sections entières ou générer des idées constitue une pratique strictement interdite dans le cadre de la recherche. Toute forme de plagiat, qu'elle soit humaine ou assistée par des outils numériques, est considérée comme une faute grave. En conséquence, toute utilisation abusive de l'IA ou toute appropriation de contenus non originaux pourra entraîner des sanctions sévères conformément aux règlements en vigueur.

Cette précision vise ainsi à garantir la transparence et le respect des règles éthiques qui encadrent la production scientifique.

Table des matières

Résumé (FR)	i
Abstract (EN)	ii
Remerciements	iii
Usage de l'Intelligence Artificielle (IA)	iv
1 Introduction	1
2 Objectif et questions de recherche	3
3 État de l'art	4
3.1 Préface	4
3.2 Les sables	4
3.2.1 Les sables naturels	4
3.2.2 Les enjeux de la pénurie du sable naturel	5
3.2.3 Les concepts d'économie circulaire et de valorisation des déchets . . .	10
3.2.4 Les sables recyclés	14
3.3 Les mortiers	16
3.3.1 Les composantes et propriétés d'un mortier	16
3.3.2 Le rapport E/L	17
3.3.3 Les domaines et exigences d'application des mortiers conventionnels .	18
3.4 Les Agents de compensation et de réduction du retrait	20
3.4.1 Les agents expansifs	20
3.4.2 Les adjuvants réducteurs de retrait (SRA)	23
3.5 Le retrait des mortiers	26
3.5.1 Le retrait autogène	26
3.5.2 Le retrait de séchage	26
3.5.3 Le retrait plastique	27
3.5.4 Le retrait thermique	27
3.5.5 Le retrait chimique	27
3.5.6 Le retrait lié à la carbonatation	28
4 Méthodologie	29
4.1 Préface	29
4.2 Les Matériaux	30

4.2.1	Le ciment	30
4.2.2	Les agents expansifs	31
4.2.3	Les adjuvants réducteurs de retrait : SRA	33
4.2.4	Les sables	33
4.3	Analyse de la granulométrie	34
4.3.1	Procédure expérimentale	34
4.3.2	Caractérisation du sable naturel : NS	37
4.3.3	Caractérisation du sable recyclé 1 : RS1	38
4.3.4	Caractérisation du sable recyclé 2 : RS2	39
4.3.5	Comparaison des différentes granulométries	40
4.4	Evaluation de l'absorption d'eau des différents granulats	42
4.4.1	Absorption d'eau des différents sables	42
4.5	Préparation des mortiers	44
4.5.1	Mélanges de calibration	44
4.5.2	Essai de consistance sur le mortier frais : <i>Slump Test</i>	46
4.5.3	Détermination du rapport E/L et teneur en eau	47
4.5.4	Description des mélanges finaux étudiés	47
4.6	Evaluation du retrait libre	50
4.6.1	Procédure expérimentale	50
4.6.2	Mode opératoire	51
4.6.3	Conditionnement spécifique : barettes sous cycles mouillage/séchage	55
4.6.4	Calcul du retrait libre	56
4.7	Essais de caractérisation mécaniques	57
4.7.1	Essai de résistance à la compression	58
4.7.2	Essai de résistance à la traction indirecte par fendage	59
4.7.3	Evaluation du module de Young	61
4.8	Essai d'absorption	62
4.8.1	Description de l'essai	62
4.9	Essai du <i>German Angle</i>	64
4.9.1	Procédure expérimentale	65
4.9.2	Variante A :	66
5	Analyse et interprétation des résultats	68
5.1	Analyse du retrait des barettes	68
5.1.1	Les mélanges sans agent expansif	69
5.1.2	Les mélanges de type MgO	72
5.1.3	Les mélanges de type SRA	74
5.1.4	Les mélanges de type MgO avec SRA	77
5.1.5	Les mélanges de type K avec SRA	79
5.1.6	Les mélanges de type G avec SRA	82

5.1.7	Analyse du retrait sur les cycles séchage/mouillage	85
5.2	Les propriétés mécaniques	88
5.2.1	Résistance à la compression des éprouvettes à 28 jours	88
5.2.2	Résistance à la traction indirecte par fendage des éprouvettes à 28 jours	96
5.2.3	Détermination du module de Young	100
5.2.4	L'essai d'absorption des éprouvettes à 28 jours	102
5.2.5	L'essai du retrait restreint : German Angle	104
6	Évaluation de l'aptitude des mortiers à base de sables recyclés pour des applications de maçonnerie	108
6.1	Comparaison avec les normes existantes	108
7	Analyse du cycle de vie	110
8	Conclusion et perspectives	113
A	Annexes	115
A.1	Fiches techniques du sable naturel : NS	115
A.1.1	Rapport d'examen Pétrographique du sable naturel par Englobe	115
A.2	Fiches techniques des agents expansifs	120
A.2.1	Fiche agent de type K : Komponent	120
A.2.2	Fiche agent de type MgO : SikaControl SC	122
A.2.3	Fiche agent de type M : SikaControl NS	125
A.2.4	Fiche agent de type G : Conex NF	128
A.3	Données et résultats de la caractérisation des sables (granulométrie et absorption)	130
A.4	Graphiques issus du suivi du retrait	131
A.5	Graphiques issus du suivi des cycles séchage/mouillage	135
A.6	Données et graphiques issus des tests de compression à 28j	140
A.6.1	Graphiques obtenus à partir des valeurs expérimentales	140
A.6.2	Données brutes	142
A.7	Annexe : données et graphiques issus des tests de fendage à 28j	143
A.7.1	Graphiques obtenus à partir des valeurs expérimentales	143
A.7.2	Données brutes	146
A.7.3	Sections observées des échantillons après fendage	147
A.8	Données et graphiques issus des tests d'absorption	148
A.8.1	Données brutes	151
A.9	Données et graphiques issus des tests pour évaluer le module de Young	152
A.9.1	Courbes contrainte-déformation ($\sigma - \varepsilon$) obtenues lors des cycles de chargement et de déchargement pour l'ensemble des mélanges étudiés	152
A.9.2	Valeurs moyennes calculées pour le module de Young selon les différentes méthodes	156

A.10 German Angle	158
A.10.1 Mélanges à base de sable naturel (NS)	158
A.10.2 Mélanges à base de sable recyclé canadien (RS1)	160
A.10.3 Mélanges à base de sable recyclé belge (RS2)	164
A.10.4 Mélanges à base de sable naturel et de sable recyclé (50% NS - 50% RS1)	166
Bibliographie	168

Table des figures

1	Demande mondiale de sable naturel (millions de tonnes) [2]	6
2	Prédiction de la demande mondiale et du prix (US\$/tonne) de sable naturel d'ici 2100 [3]	6
3	Conséquences de l'extraction intensive du sable naturel sur la rivière Umngi (Bangladesh)	8
4	Les principes d'une économie circulaire (EC) [7]	10
5	Filières de gestion des déchets de construction et de démolition en Wallonie .	11
6	Origine des déchets inertes issus de la déconstruction en Wallonie	12
7	Origine des déchets inertes issus de la déconstruction en Flandre	12
8	Économie circulaire dans le domaine de la construction et la production de sables recyclés	13
9	Source : SMA BTP (2025), Schéma granulats de recyclage	14
10	Production des types de granulats en Europe (2019)	15
11	Illustration de la présence de SRA dans la matrice cimentaire [16]	24
12	Images microscopiques d'un mélange incorporant des SRA [16]	25
13	Les différents types de fissuration observables sur une structure	28
14	Certificat d'analyse du ciment de type GU utilisé	30
15	Exigences mécaniques et physiques définies en valeurs caractéristiques selon la norme EN 197-1	31
16	Lavage des échantillons de sable	35
17	Ro-Tap : Système de tamisage	37
18	Pesée des fractions retenues après tamisage à sec	37
19	Courbe granulométrique du sable naturel - NS	38
20	Courbe granulométrique du sable recyclé canadien - RS1	39
21	Courbe granulométrique du sable recyclé belge - RS2	40
22	Courbes granulométriques des trois sables étudiés	41
23	Matériel nécessaire pour atteindre (à droite) et vérifier (à gauche) l'état SSS	43
24	Malaxeur manuel utilisé pour la préparation des mélanges	45
25	Table à secousse standardisée	46
26	Comparteur de longueur avec tige de référence	51
27	Moules pour la fabrication des éprouvettes	52
28	Goujons de jauge H-3260	52
29	Relevé régulier des informations de masse et de longueur des éprouvettes . .	54
30	Stockage des éprouvettes après cure humide	55
31	Norme ASTM C490 : Longueur de référence considérée	57

32	Presse hydraulique Instron	59
33	Essai de résistance à la traction : dispositif sur la presse (INSTRON)	60
34	Dispositif module de Young (INSTRON)	61
35	Mise en ébullition des échantillons.	63
36	Mesure de la masse déjàugée à l'aide d'un dispositif relié à la balance.	64
37	Essai du German Angle (Emmons et al., 2000).	65
38	Dimensions du profilé V	67
39	Vue du profilé V	67
40	Tendance générale de l'évolution du retrait	68
41	Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges sans agent expansif	69
42	Variations de la masse (moyennes) des mélanges sans agent expansif	70
43	Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type MgO	72
44	Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type MgO	74
45	Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type SRA	75
46	Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type SRA	76
47	Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type MgO+SRA	77
48	Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type MgO+SRA	78
49	Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type K+SRA	79
50	Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type K+SRA	81
51	Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type G+SRA	82
52	Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type G+SRA	84
53	Valeurs moyennées des résistances à la compression (28j) des mélanges	88
54	Influence du taux de substitution du NS par le RS1	90
55	Valeurs moyennées des résistances à la traction (28j) des mélanges	96
56	Influence du taux de substitution du NS par le RS1	97
57	Module de Young : courbes contrainte-déformation ($\sigma - \epsilon$) pour RS1 sans agent	101
58	Absorptions moyennes des mélanges après 28j	102
59	Cartographie de la fissuration observée pour le mélange RS1 sans agent expansif	104
60	Fissuration visible pour le mélange RS1 sans agent expansif	105
61	Résistances minimales requises selon les domaines d'application considérés (Belgique)	108
62	Etapes d'une ACV (ISO 14040, 1997)	110
63	Diagramme des flux pour l'ACV pour la production de granulats recyclés	111
64	Fiche technique fournie par Amrize : NS	115
65	Fiche technique fournie par CTS Cement Manufacturing Corp. : Komponent	121
66	Fiche technique fournie par Sika : SikaControl SC	124
67	Fiche technique fournie par Sika : SikaControl NS	127
68	Fiche technique fournie par Euclid Chemical : Conex NF	129

69	Données de l'analyse granulométrique du RS1	130
70	Données de l'analyse granulométrique du RS2	130
71	Données de l'analyse granulométrique du NS	131
72	Données de l'essais d'absorption des trois sables étudiés	131
73	Retrait mélange NS+MgO	132
74	Retrait mélange RS1+MgO	132
75	Retrait mélange NS+RS1 MgO	132
76	Retrait mélange RS2+MgO	132
77	Retrait mélange NS MgO+SRA	132
78	Retrait mélange RS1 MgO+SRA	132
79	Retrait mélange NS+RS1 MgO+SRA	133
80	Retrait mélange RS2 MgO+SRA	133
81	Retrait mélange NS+SRA	133
82	Retrait mélange RS1+SRA	133
83	Retrait mélange NS-RS1 +SRA	133
84	Retrait mélange RS2+SRA	133
85	Retrait mélange NS K+SRA	134
86	Retrait mélange RS1 K+SRA	134
87	Retrait mélange NS-RS1 K+SRA	134
88	Retrait mélange RS2 K+SRA	134
89	Retrait mélange NS G+SRA	134
90	Retrait mélange RS1 G+SRA	134
91	Retrait mélange NS-RS1 G+SRA	135
92	Retrait mélange RS2 G+SRA	135
93	Retrait mélange NS	135
94	Retrait mélange RS1	135
95	Retrait mélange NS+RS1	135
96	NS SRA : cycle 1	136
97	NS SRA : cycle 2	136
98	NS SRA : cycle 3	136
99	RS1 SRA : cycle 1	136
100	RS1 SRA : cycle 2	136
101	RS1 SRA : cycle 3	137
102	NS K+SRA : cycle 1	137
103	NS K+SRA : cycle 2	137
104	NS K+SRA : cycle 3	137
105	RS1 K+SRA : cycle 1	138
106	RS1 K+SRA : cycle 2	138
107	RS1 K+SRA : cycle 3	138
108	NS : cycle 1	138

109	NS : cycle 2	138
110	NS : cycle 3	139
111	RS1 : cycle 1	139
112	RS1 : cycle 2	139
113	RS1 : cycle 3	139
114	Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type MgO	140
115	Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type MgO+SRA	140
116	Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type SRA	141
117	Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type K+SRA	141
118	Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type G+SRA	141
119	Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges sans agent expansif	142
120	Données brutes issues des tests de compression	142
121	Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type MgO	143
122	Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type MgO+SRA	143
123	Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type SRA	144
124	Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type K+SRA	144
125	Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type G+SRA	145
126	Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges sans agent expansif	145
127	Données brutes issues des tests de traction	146
128	Mélanges de type MgO	147
129	Mélanges de type MgO+SRA	147
130	Mélanges de type SRA	147
131	Mélanges de type K+SRA	147
132	Mélanges de type G+SRA	147
133	Mélanges sans agent expansif	147
134	Histogramme des absorptions pour les mélanges de type MgO	148
135	Histogramme des absorptions pour les mélanges de type MgO+SRA	148
136	Histogramme des absorptions pour les mélanges de type SRA	149
137	Histogramme des absorptions pour les mélanges de type K+SRA	149
138	Histogramme des absorptions pour les mélanges de type G+SRA	150

139	Histogramme des absorptions pour les mélanges sans agent expansif	150
140	Données brutes issues des tests d'absorption	152
141	Mélange NS	152
142	Mélange NS+MgO	152
143	Mélange NS MgO+SRA	153
144	Mélange NS+SRA	153
145	Mélange NS G+SRA	153
146	Mélange NS K+SRA	153
147	Mélange RS1	153
148	Mélange RS1+MgO	153
149	Mélange RS1 MgO+SRA	154
150	Mélange RS1+SRA	154
151	Mélange RS1 G+SRA	154
152	Mélange RS1 K+SRA	154
153	Mélange RS1+MgO	154
154	Mélange RS2 MgO+SRA	154
155	Mélange RS2+SRA	155
156	Mélange RS2 G+SRA	155
157	Mélange RS2 K+SRA	155
158	Mélange NS-RS1	155
159	Mélange NS-RS1 + MgO	155
160	Mélange NS-RS1 MgO+SRA	156
161	Mélange NS-RS1 + SRA	156
162	Mélange NS-RS1 G+SRA	156
163	Mélange NS-RS1 K+SRA	156
164	Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 1	156
165	Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 2	157
166	Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 3	157
167	Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 4	157
168	Evolution de la fissuration du mélange NS (après 60j)	158
169	Evolution de la fissuration du mélange NS+ MgO (après 60j)	158
170	Evolution de la fissuration du mélange NS MgO+SRA (après 60j)	159
171	Evolution de la fissuration du mélange NS+SRA (après 60j)	159
172	Evolution de la fissuration du mélange NS G+SRA (après 60j)	159
173	Evolution de la fissuration du mélange NS K+SRA (après 60j)	160
174	Evolution de la fissuration du mélange RS1 (après 60j)	160
175	Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 (après 60j)	160
176	Evolution de la fissuration du mélange RS1+ MgO (après 60j)	161
177	Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 + MgO (après 60j)	161
178	Evolution de la fissuration du mélange RS1 MgO+SRA (après 60j)	161

162figure.caption.204

180	Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 + SRA (après 60j) . . .	162
181	Evolution de la fissuration du mélange RS1 G+SRA (après 60j)	162
182	Evolution de la fissuration du mélange RS1 K+SRA (après 60j)	163
183	Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 K+SRA (après 60j) . .	163
184	Evolution de la fissuration du mélange RS2+ MgO (après 60j)	164
185	Evolution de la fissuration du mélange RS2 MgO+SRA (après 60j)	164
186	Evolution de la fissuration du mélange RS2+SRA (après 60j)	165
187	Evolution de la fissuration du mélange RS2 G+SRA (après 60j)	165
188	Evolution de la fissuration du mélange RS2 K+SRA (après 60j)	165
189	Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 (après 60j)	166
190	Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 + MgO (après 60j)	166
191	Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 MgO+SRA (après 60j) . . .	167
192	Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 + SRA (après 60j)	167
193	Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 G+SRA (après 60j)	167
194	Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 K+SRA (après 60j)	168

Liste des tableaux

1	Caractéristiques des fines retenues des différents sables	36
2	Distribution granulométrique du sable naturel	38
3	Distribution granulométrique du sable recyclé 1	39
4	Distribution granulométrique du sable recyclé 2	40
5	Comparaison des distributions granulométriques des sables NS, RS1 et RS2 .	41
6	Résultats moyens des propriétés physiques des sables	44
7	Mélanges avec agent expansif type MgO	48
8	Mélanges avec agent expansif type MgO+SRA	48
9	Mélanges avec adjuvant réducteur de retrait type SRA	48
10	Mélanges avec agent expansif type K+SRA	49
11	Mélanges avec agent expansif type G+SRA	49
12	Mélanges de référence	50
13	Synthèse des mélanges soumis aux cycles de séchage/mouillage	56
14	Paramètres suivis durant l'essai	66
15	Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable (sans agent)	71
16	Comparaison des valeurs de retrait final selon les deux analyses	71
17	Comparaison des valeurs de retrait final avec et sans agent expansif de type MgO	73
18	Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable (MgO)	74
19	Comparaison des valeurs de retrait final de type SRA et sans agent expansif	75
20	Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable (SRA)	76
21	Comparaison des valeurs de retrait final entre les formulations MgO+SRA, MgO et sans agent expansif	78
22	Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable	79
23	Comparaison des valeurs de retrait final pour le type K	80
24	Comparaison des valeurs de retrait final pour le type G	83
25	Influence du sable recyclé sur la résistance à la compression à 28 jours par rapport à un sable naturel	89
26	Influence du SRA sur la résistance à la compression à 28 jours	91
27	Influence de l'agent expansif K combiné à des SRA sur la résistance à la compression à 28 jours	92
28	Influence de l'agent expansif G combiné à des SRA sur la résistance à la compression à 28 jours	93

29	Influence de l'agent expansif MgO seul et MgO combiné à des SRA sur la résistance à la compression à 28 jours	94
30	Comparaison des résistances moyennes à la compression à 28 jours pour les formulations de type K et K+SRA	95
31	Comparaison des résistances moyennes à la compression à 28 jours pour les formulations de type G et G+SRA	95
32	Résistances moyennes à la traction à 28 jours et variation par rapport aux mélanges de référence NS	96
33	Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations contenant uniquement un SRA	98
34	Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations K+SRA	98
35	Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations G+SRA	98
36	Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations à base de MgO	98
37	Comparaison des résistances moyennes à la traction indirecte à 28 jours pour les formulations K et K+SRA	99
38	Comparaison des résistances moyennes à la traction indirecte à 28 jours pour les formulations G et G+SRA	100
39	Synthèse des observations de fissuration lors de l'essai German Angle	107
40	Résistance à la compression des mélanges (28j)	109

1. Introduction

Le sable est un matériau omniprésent dans notre quotidien, qu'il soit utilisé à l'état naturel ou incorporé à d'autres matériaux, notamment dans la fabrication des mortiers. Cependant, d'après Hubert et al. (2024), les matériaux sableux sont fortement sollicités à l'échelle mondiale pour répondre aux besoins du secteur de la construction, avec une demande en croissance d'environ 5 % par an, tandis que la disponibilité des ressources tend à diminuer malgré leur apparente abondance.

Il est important de souligner que tous les types de sable ne sont pas adaptés aux applications dans le domaine de la construction. Par exemple, le captage et le traitement du sable marin présentent des contraintes techniques et environnementales importantes : la présence de sels et de chlorures nécessite des traitements supplémentaires afin d'éviter les risques de corrosion des armatures et la dégradation des performances du béton. De plus, son extraction intensive peut entraîner des perturbations des écosystèmes marins, l'érosion des zones côtières ainsi qu'une modification des équilibres sédimentaires. À l'inverse, le sable désertique possède une granulométrie généralement trop fine ainsi que des grains arrondis et lisses, issus de l'érosion éolienne, ce qui limite l'adhérence avec la pâte cimentaire et réduit les performances mécaniques des mortiers (Bendixen et al., 2019).

Contrairement à une idée largement répandue, le sable n'est donc pas une ressource infinie. Selon l'UNEP (2022), près de cinquante milliards de tonnes de sable seraient extraites chaque année, soit environ 18 kilogrammes par personne par jour. Cette pression devrait encore augmenter puisque près de 75 % des infrastructures nécessaires d'ici 2050 ne sont pas encore construites, tandis que la population urbaine mondiale devrait passer de 56 % en 2020 à environ 68 % en 2050. Ces éléments soulignent la nécessité de développer des solutions durables pour limiter l'exploitation des ressources naturelles.

Dans ce contexte, une alternative consiste à produire du sable recyclé à partir de matériaux issus de la construction, de la rénovation et de la démolition d'ouvrages (CDW)¹ est largement utilisée dans la littérature scientifique pour désigner les déchets de construction et de démolition.. Cette approche vise à réduire la dépendance aux ressources naturelles tout en favorisant une gestion plus durable des matériaux. Le potentiel de valorisation de ces déchets est considérable puisqu'en région wallonne, les CDW sont estimées entre 5,143 et 6,972 millions de tonnes par an (PWD-R., 2025). À l'échelle européenne, près de 820 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition sont générées chaque année (Waskow et al., 2021). Au Canada, plusieurs millions de tonnes de déchets minéraux provenant du secteur de la construction sont également produites annuellement, soulignant l'importance

1. L'abréviation CDW (Construction and Demolition Waste)

croissante du recyclage et de la valorisation de ces matériaux (Gouvernement du Canada, 2024).

Ainsi, dans une logique d'économie circulaire, le but est donc de valoriser ces déchets afin de les réintroduire dans le cycle de production et de limiter mais surtout, de ralentir l'exploitation intensives des ressources naturelles. Cette approche s'inscrit dans une démarche de recyclage en "boucle ouverte" (open-loop recycling), visant à transformer des matériaux en fin de vie en nouvelles ressources utilisables dans le secteur de la construction, tout en conservant un niveau de performance élevé pour les matériaux recyclés.

L'utilisation de sables recyclés dans les mortiers soulève toutefois une problématique importante liée à leur variabilité intrinsèque. En effet, l'un de leurs principaux inconvénients réside dans une porosité plus élevée que dans un sable naturel, ce qui augmente la capacité d'absorption d'eau des grains et favorise les phénomènes de retrait et de fissuration. Dès lors, une première question de recherche consiste à comprendre dans quelle mesure cette variabilité influence le comportement et les performances des mortiers, afin d'évaluer la faisabilité de leur utilisation dans des applications de construction.

Par ailleurs, la maîtrise des phénomènes de retrait constitue un enjeu majeur pour assurer la durabilité et la stabilité des mortiers incorporant des sables recyclés. . L'introduction d'adjuvants compensateurs apparaît comme une solution prometteuse, mais leurs effets sur le mûrissement interne, la microstructure et les mécanismes de fissuration restent encore à clarifier. Une analyse comparative des différents agents expansifs combinés à des adjuvants réducteurs de retrait (SRA)² permettra ainsi d'identifier leur rôle dans la compensation du retrait et d'évaluer leur efficacité globale au sein des formulations développées, constituant ainsi la base de la seconde question de recherche.

Au-delà des aspects techniques liés aux propriétés physiques et mécaniques des mortiers, cette démarche s'inscrit dans une logique de construction durable. Ces enjeux occupent aujourd'hui une place centrale dans le secteur de la construction, confronté à la raréfaction des ressources et à la nécessité de limiter son impact environnemental.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des recherches menées par Thibault Mettlen (2025) sur le développement de mortiers à base de sables recyclés issus de la déconstruction. L'objectif commun est d'évaluer le potentiel de substitution des sables naturels par ces matériaux recyclés, tout en maintenant des performances compatibles avec les exigences des mortiers conventionnels.

Il a été mené dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Liège et l'Université Laval (Québec), intégrée au programme de recherche Mitacs Globalink. À cette occasion, plusieurs laboratoires et équipements de l'Université Laval ont été mis à disposition afin de réaliser la campagne expérimentale et d'assurer le bon déroulement du projet.

2. SRA désigne l'acronyme de "Shrinkage Reducing Admixture".

2. Objectif et questions de recherche

L'objectif principal de ce travail consiste à développer des formulations de mortiers intégrant une substitution partielle (50%) ou complète (100%) du sable naturel par du sable recyclé, puis à étudier l'influence de différentes solutions de compensation du retrait, notamment les agents expansifs de type K, MgO et G, ainsi que les adjuvants réducteurs de retrait (SRA). Une attention particulière sera portée aux effets individuels et combinés de ces constituants sur l'apparition de fissures ainsi que sur les performances globales des mortiers à l'état frais et durci.

Dans le cadre de ce travail, trois questions principales de recherche peuvent être formulées :

- Comment la variabilité intrinsèque des trois types de sable étudiés (NS, RS1 et RS2¹) influence-t-elle le comportement des mortiers ainsi que leurs performances mécaniques ?
- Quels sont les effets des différents agents compensateurs de retrait étudiés, notamment les agents expansifs de type K, MgO et G, sur les phénomènes de retrait ainsi que sur les risques de fissuration ?
- Dans quelle mesure la combinaison d'adjuvants réducteurs de retrait (SRA) et d'agents expansifs permet-elle de limiter les phénomènes de retrait des mortiers, et quels sont les effets associés sur les performances globales du matériau ?

En complément de ces questions principales, plusieurs objectifs secondaires peuvent également être étudiés afin d'apporter des éléments supplémentaires quant au développement de cette solution :

- Quel est le dosage optimal des constituants (taux de substitution, agents compensateurs, rapport E/L et teneur en liant) permettant d'obtenir un compromis entre performances mécaniques et limitation du retrait des mortiers à base de sables recyclés ?
- Jusqu'à quel taux de substitution les sables recyclés permettent-ils de maintenir des performances comparables à celles des mortiers conventionnels, tels que des mortiers de maçonnerie ?

1. NS = sable naturel (Canada), RS1 = sable recyclé canadien et RS2 = sable recyclé belge. Les caractéristiques détaillées de ces sables sont présentées dans les sections suivantes.

3. État de l'art

3.1 Préface

Ce chapitre propose un rappel des principaux concepts théoriques nécessaires à la compréhension des analyses développées dans ce travail. Il vise à poser un contexte et à synthétiser l'ensemble des éléments clés, tout en mettant en évidence les enjeux liés à l'utilisation intensive des sables naturels.

Par ailleurs, une introduction précise est accordée sur les agents expansifs ainsi que sur les adjuvants réducteurs de retrait (SRA).

3.2 Les sables

3.2.1 Les sables naturels

Le sable est l'une des ressources naturelles les plus exploitées au monde après l'eau, principalement en raison de son utilisation comme granulat fin dans le béton, les mortiers et autres applications. Nous avons tous une image bien précise de ce qu'est un sable, et pourtant selon un rapport de l'UNEP (2022), une définition précise d'un sable est difficile à déterminer. En effet, selon les normes utilisées à travers le monde ainsi que le vocabulaire divers variant d'industrie en industrie et de région en région, il n'est pas évident de se mettre d'accord sur une définition bien précise de ce qu'est un sable. [1]

En théorie, le sable désigne un matériau granulaire minéral non cohésif dont les particules présentent une taille comprise entre 63 μm et 2 mm (selon la norme ISO), ou entre 75 μm et 4,75 mm (selon la norme ASTM). Selon les normes européennes (EN), un sable correspond à un sol minéral naturel non cohésif dont plus de 50 % des particules possèdent une taille inférieure à 2 mm.

Il existe plusieurs catégories de sables naturels dont les propriétés varient en fonction de leur origine géologique et de leur composition minéralogique. Ces variations influencent directement certaines caractéristiques physiques et chimiques telles que la granulométrie, la forme des grains ou la porosité, et impactent ainsi leurs domaines d'application dans l'industrie de la construction. Parmi les principaux types de sables naturels, on retrouve notamment les sables de rivière, les sables marins, les sables désertiques, ainsi que les sables siliceux.

- **Le sable de rivière** : provient de l'érosion et du transport naturel des roches par les cours d'eau. Grâce à leur granulométrie relativement régulière et à leur faible teneur en sels, ces sables constituent l'une des principales sources de granulats fins utilisés dans les bétons et mortiers.
- **Le sable marin** : provient des dépôts côtiers et marins tels que les plages, fonds marins, baies ou estuaires. Bien qu'il représente une source importante de granulats fins, son utilisation dans les matériaux cimentaires peut être limitée par la présence de sels, notamment les chlorures, pouvant favoriser la corrosion des armatures. Un traitement de lavage est donc souvent nécessaire avant utilisation.
- **Le sable désertique** : issu de l'érosion éolienne dans les environnements arides. Ses grains, généralement très fins, arrondis et lisses, présentent une faible adhérence avec la pâte cimentaire, ce qui limite son utilisation dans les mortiers et bétons et peut réduire leurs performances mécaniques.
- **Le sable siliceux** : désigne des sables riches en silice (SiO_2) et faiblement chargés en impuretés chimiques. Ces matériaux sont principalement utilisés dans des applications nécessitant une forte pureté, comme la fabrication de verre par exemple.

Cependant, comme mentionné précédemment, tous les types de sables ne sont pas adaptés aux applications dans le domaine de la construction. Par ailleurs, l'extraction des sables exploitables entraîne d'importants impacts environnementaux, notamment la dégradation des écosystèmes, l'érosion de certaines zones naturelles ainsi que la perturbation des milieux aquatiques.

Dans ce contexte, une question centrale se pose : comment limiter les risques de pénurie tout en réduisant les impacts environnementaux liés à l'exploitation des sables naturels ?

3.2.2 Les enjeux de la pénurie du sable naturel

D'après Hubert et al. (2024), les estimations indiquent une croissance annuelle d'environ 5 % de la consommation de ce matériau, alors même que les ressources naturelles disponibles deviennent progressivement plus limitées. Cette évolution met en évidence un déséquilibre croissant entre l'augmentation des besoins liés au développement des infrastructures et la disponibilité des ressources. Comme illustré à la Figure 1, les besoins en sable ont connu une forte augmentation au cours des quinze dernières années. Les États-Unis et la Chine figurent parmi les principaux consommateurs mondiaux, en raison de l'ampleur de leurs activités industrielles et de leurs besoins importants en infrastructures. Les projections futures suggèrent par ailleurs que cette tendance devrait se poursuivre.

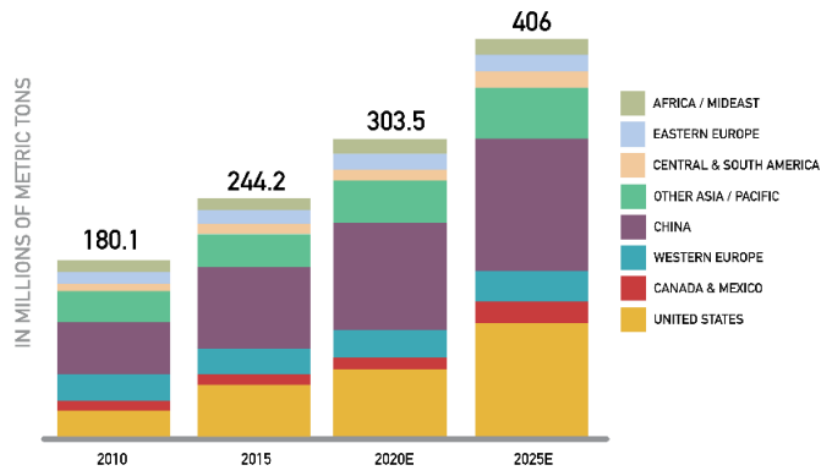


FIGURE 1 – Demande mondiale de sable naturel (millions de tonnes) [2]

Selon le rapport publié par M. Bendixen intitulé *Time is Running Out for Sand* (2019), la Figure 2 met également en évidence l'écart croissant entre la disponibilité naturelle du sable et la demande mondiale projetée jusqu'en 2100. Cette étude montre que la demande dépassera largement les capacités naturelles de renouvellement des ressources, entraînant une augmentation significative des coûts d'exploitation.

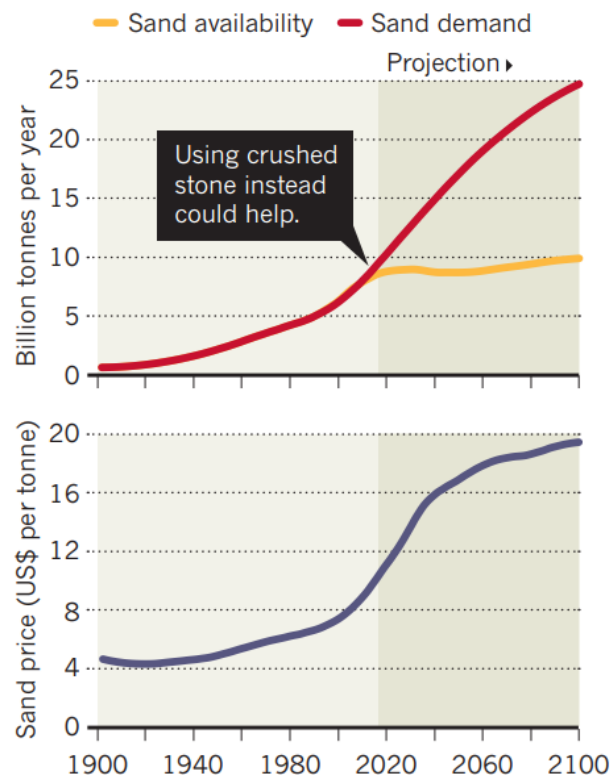


FIGURE 2 – Prédiction de la demande mondiale et du prix (US\$/tonne) de sable naturel d'ici 2100 [3]

Plusieurs autres sources officielles viennent renforcer ce constat. Selon l'UNEP (2022), près

de 50 milliards de tonnes de sable sont extraites chaque année à l'échelle mondiale, ce qui correspond à environ 18 kilogrammes par personne et par jour. Cette pression sur les ressources devrait encore s'intensifier au cours des prochaines décennies, notamment en raison de l'urbanisation croissante et du développement des infrastructures.

En effet, près de 75 % des infrastructures nécessaires à l'horizon 2050 ne sont pas encore construites, tandis que la population urbaine mondiale devrait passer d'environ 56 % en 2020 à près de 68 % en 2050 [4]. Ces projections mettent en évidence la nécessité de développer des solutions plus durables afin de réduire l'exploitation des ressources naturelles en sable. Dans ce contexte, le recours à des matériaux alternatifs, tels que la roche concassée ou les sables recyclés, apparaît comme une solution pertinente pour limiter les risques de pénurie et réduire les impacts environnementaux associés à l'extraction des sables naturels.

Les enjeux environnementaux

De nombreux travaux de la littérature mettent aujourd'hui en évidence les conséquences environnementales majeures liées à l'exploitation intensive du sable naturel à l'échelle mondiale.

Selon Bendixen et al. (2019), l'extraction mondiale de sable et de gravier destinée à la production de béton, de verre ou encore de composants électroniques dépasse désormais les capacités naturelles de renouvellement des sédiments. Les auteurs soulignent qu'à l'horizon du milieu du XXI^e siècle, la demande mondiale pourrait excéder les ressources exploitables disponibles. Cette problématique est d'autant plus préoccupante que le sable principalement utilisé dans le secteur de la construction provient des rivières, des deltas et des zones côtières, environnements qui représentent moins de 1 % des surfaces terrestres mondiales.

La Figure 3 illustre notamment les conséquences observées sur la rivière Umngi, située au nord du Bangladesh, à partir d'images satellites présentées dans l'article. Les observations montrent une accélération importante de l'érosion des berges ainsi qu'une modification significative de la morphologie du cours d'eau à la suite de l'extraction des sédiments. En 2017, après le prélèvement d'une grande partie du sable présent dans le lit de la rivière, une augmentation marquée de la hauteur d'eau et des vitesses d'écoulement a été observée, augmentant ainsi les risques d'inondation et les perturbations hydrauliques dans les zones avoisinantes.

SHIFTING SANDS

Satellite images of the Umngi River in northern Bangladesh reveal the dramatic impact of sand extraction.

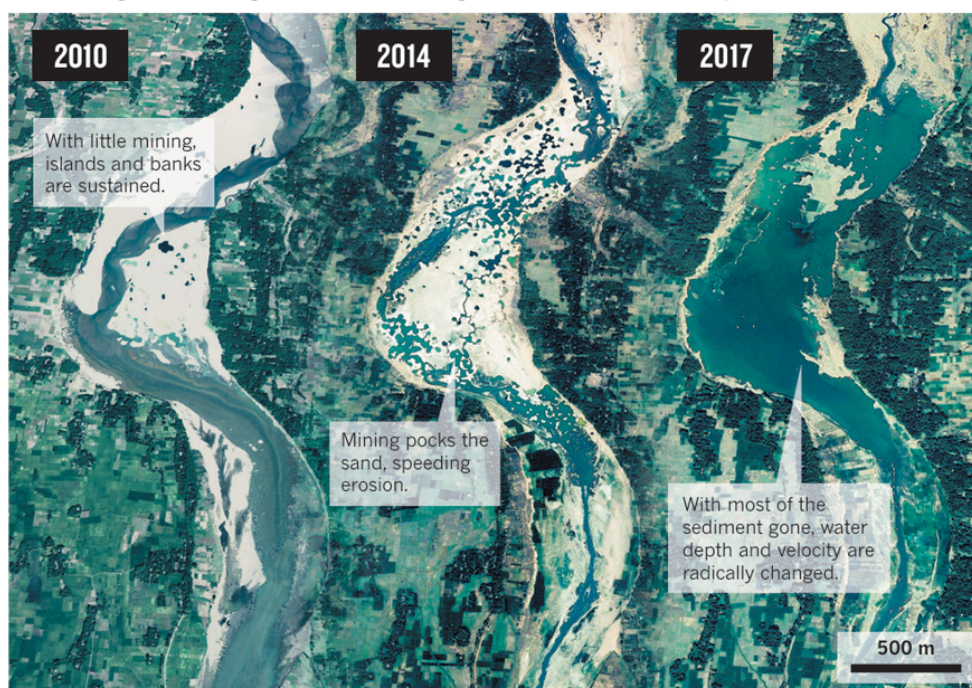


FIGURE 3 – Conséquences de l'extraction intensive du sable naturel sur la rivière Umngi (Bangladesh)

D'autres exemples de dégradations environnementales sont également rapportés dans plusieurs régions du monde. En Chine, l'exploitation du sable dans la rivière des Perles (*Zhujiang*) aurait contribué à l'abaissement des nappes phréatiques, à l'aggravation de l'érosion des lits fluviaux ainsi qu'à la fragilisation de certaines infrastructures, notamment des ponts.

Dans le delta du Mékong, près de 500 000 personnes pourraient être contraintes de se déplacer en raison de l'effondrement progressif des berges lié à l'extraction excessive des sédiments. En effet, au-delà de son importance économique, le sable joue également un rôle écologique essentiel. Il participe à la stabilisation des deltas, à la protection des côtes contre l'érosion et les tempêtes, ainsi qu'à la préservation des nappes phréatiques face aux phénomènes de salinisation. Les plages et les dunes constituent également des barrières naturelles importantes contre l'élévation du niveau des mers. Or, environ 70 % des plages mondiales seraient déjà touchées par des phénomènes d'érosion. L'extraction intensive du sable dans les systèmes dynamiques tels que les rivières, les deltas et les zones côtières perturbe ainsi énormément les flux sédimentaires naturels et accentue ces vulnérabilités. [3]

Le sable naturel constitue également un habitat fondamental pour de nombreuses espèces aquatiques et fluviales. D'après le RNRf (Renewable Natural Resources Foundation, 2017), l'érosion des rives du Gange menace notamment les habitats du gavia (*Gavialis gangeticus*), une espèce aujourd'hui classée en danger critique d'extinction, dont il ne resterait qu'environ 200 individus adultes à l'état sauvage en Inde et au Népal. [5]

En somme, l'exploitation intensive de cette ressource représente clairement un enjeu environnemental majeur, affectant à la fois les écosystèmes, les milieux naturels, les infrastructures et les populations humaines.

Les enjeux socio-économiques

Le commerce international du sable demeure aujourd'hui largement sous-déclaré à l'échelle mondiale. D'après Bendixen et al. (2019), entre 2006 et 2016, moins de 4 % des 80 millions de tonnes de sédiments que Singapour déclarait avoir importées du Cambodge ont été officiellement enregistrées comme exportées par ce dernier. Les auteurs indiquent également que l'extraction illégale de sable est désormais signalée dans près de 70 pays, mettant en évidence les difficultés de contrôle et de gouvernance associées à cette ressource.

Le sable constitue par ailleurs une ressource stratégique pour certains pays fortement urbanisés ou exposés aux effets du changement climatique. Singapour, par exemple, utilise massivement le sable dans ses projets d'extension territoriale ainsi que dans les infrastructures de protection contre l'élévation du niveau des mers. Cette forte dépendance a engendré d'importantes tensions avec plusieurs pays exportateurs, notamment l'Indonésie, le Cambodge et la Malaisie. Face à l'épuisement progressif de leurs ressources et aux impacts environnementaux liés à l'extraction intensive des sédiments, certains de ces pays ont été contraints de limiter, voire d'interdire temporairement, leurs exportations de sable vers la cité-État.

Comme énoncé précédemment, la demande mondiale en granulats de construction continue d'augmenter fortement, ce qui soulève la question de l'évolution future de leur disponibilité et de leur coût. D'après R. Zope (Persistence Market Research, 2026), le marché mondial des granulats était estimé à environ 556,0 milliards de dollars américains en 2026 et pourrait atteindre près de 875,4 milliards de dollars américains d'ici 2033, ce qui correspond à un taux de croissance annuel composé (TCAC) d'environ 6,7 %. [6]

L'étude souligne également que la région Asie-Pacifique représente près de 60 % du marché mondial des granulats, portée notamment par les besoins considérables en construction observés en Chine et en Inde. À elle seule, la Chine aurait consommé près de 29 milliards de tonnes de granulats en 2025.

Plusieurs rapports économiques indiquent également que l'augmentation continue de la demande mondiale pourrait accentuer les tensions sur l'approvisionnement en sable et en granulats naturels au cours des prochaines décennies. Cette situation pourrait entraîner une hausse des coûts liés à l'extraction, au transport et à l'approvisionnement de ces matériaux.

Ces enjeux ne concernent pas uniquement les régions les plus fortement touchées par l'exploitation intensive des sédiments. La Belgique, et plus largement l'Europe, ne sont pas non plus à l'abri de ces tensions, notamment en raison de leur dépendance aux ressources naturelles, aux importations et aux chaînes d'approvisionnement.

Sans amélioration des politiques de gouvernance, des mécanismes de surveillance et du développement de solutions de substitution, l'exploitation non durable des sédiments pourrait également renforcer les tensions socio-économiques à l'échelle mondiale.

Dans ce contexte, plusieurs études mettent en évidence un intérêt croissant pour les granulats recyclés et les matériaux alternatifs. Cette évolution est notamment favorisée par le renforcement des réglementations environnementales, les objectifs de réduction des émissions de CO₂ ainsi que le développement des principes d'économie circulaire dans le secteur de la construction.

3.2.3 Les concepts d'économie circulaire et de valorisation des déchets

Le concept d'économie circulaire (EC) est largement soutenu par l'Union européenne et de nombreux gouvernements dans le cadre des politiques de développement durable. Il désigne un modèle socio-économique visant à optimiser l'utilisation des ressources et de l'énergie tout en limitant la consommation de matières premières vierges et la production de déchets, notamment grâce au recyclage et à la réutilisation des matériaux.

D'après Korhonen et al. (2017), l'économie actuelle repose principalement sur un modèle linéaire de type « extraire–produire–consommer–jeter », générant des flux unidirectionnels de matière et d'énergie. Les auteurs soulignent notamment qu'environ 75 % de la production mondiale d'énergie dépend encore de ressources fossiles non renouvelables. Face à ce constat, l'économie circulaire propose ainsi un modèle cyclique visant à préserver les ressources et à maximiser la valeur des produits et des matériaux grâce à la réutilisation, la réparation, le reconditionnement et le recyclage, comme illustré à la Figure 4.

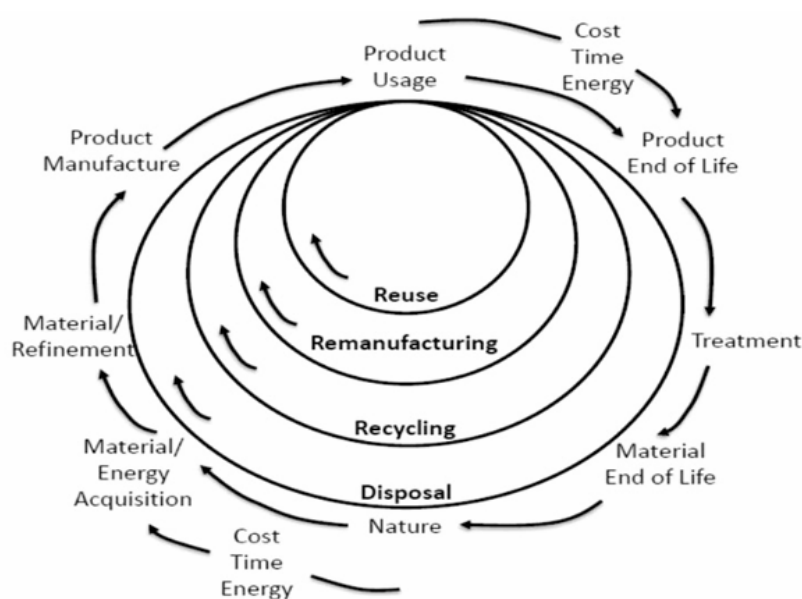


FIGURE 4 – Les principes d'une économie circulaire (EC) [7]

Dans le cadre de ce travail, les aspects liés à la réutilisation et au recyclage des matériaux présentent un intérêt central. En effet, les déchets inertes issus de la déconstruction d'infrastructures et de la démolition (CDW) pourraient constituer une solution durable face à cette problématique.

En effet, la valorisation des CDW occupe aujourd'hui une place de plus en plus importante dans les politiques environnementales, surtout en Europe. Face à l'augmentation des quantités de déchets générés et à la diminution progressive des ressources naturelles disponibles, les réglementations européennes et régionales imposent désormais des exigences de plus en plus strictes en matière de tri des matériaux. Dès lors, les matériaux provenant de la déconstruction peuvent être récupérés, triés puis transformés afin de produire de nouveaux granulats recyclés.

En Belgique, et plus particulièrement en Région wallonne, cette volonté s'est notamment traduite par l'adoption du *3^e Plan wallon des déchets* en mars 2018. Ce programme regroupe plus de 700 actions visant à renforcer la prévention, le recyclage et la valorisation des déchets, avec une attention particulière portée aux déchets inertes issus du secteur de la construction. Ces derniers comprennent notamment :

- Les terres excavées
- Les déchets issus des travaux de voirie
- Les déchets provenant de la démolition, de la construction et de la rénovation d'ouvrages publics ou industriels et privés.

La Figure 5 illustre les principales filières wallonnes de gestion des déchets de construction et de démolition. Elle présente notamment les centres de tri et de recyclage des déchets inertes, ainsi que les centrales à béton autorisées à incorporer ces matériaux recyclés dans leur production.

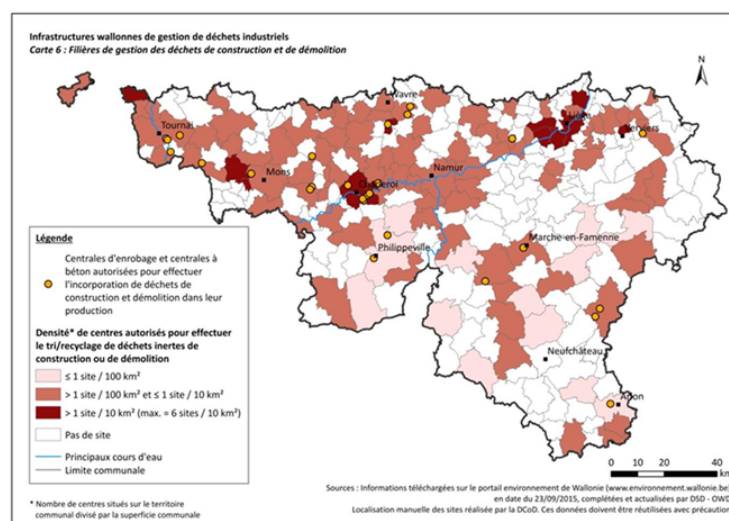


FIGURE 5 – Filières de gestion des déchets de construction et de démolition en Wallonie

En Région wallonne, entre 5 et 7 millions de tonnes de déchets inertes de construction et de démolition sont générées chaque année, auxquels s'ajoutent environ 10 millions de tonnes de terres excavées. Ces déchets sont principalement composés de béton, briques, mortiers et matériaux bitumineux (cf. Figure 6). [8]

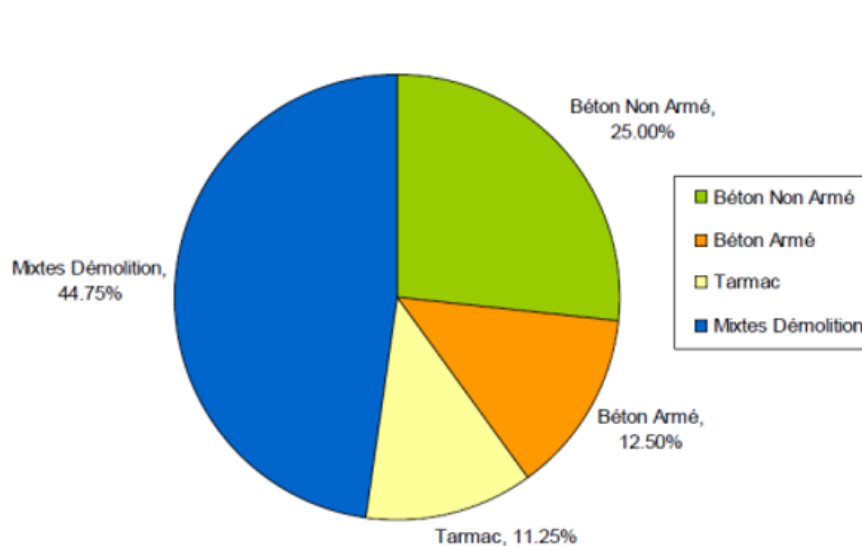


FIGURE 6 – Origine des déchets inertes issus de la déconstruction en Wallonie

En Flandre, environ 15 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition ont été produites en 2014. Le taux de recyclage des déchets inertes atteint environ 95 % (OVAM, 2016).

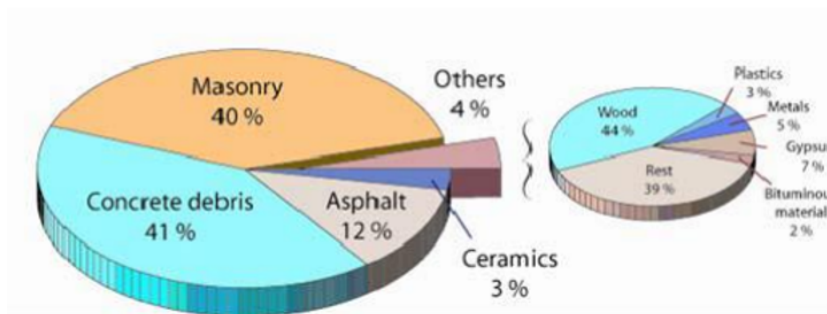


FIGURE 7 – Origine des déchets inertes issus de la déconstruction en Flandre

Ainsi, en Belgique, au total près de 22,5 millions de tonnes de déchets provenaient de ce secteur, dont environ 18,5 millions de tonnes de déchets inertes en 2018. Le pays figure aujourd'hui parmi les pays européens les plus avancés en matière de recyclage des CDW, avec un taux de recyclage supérieur à 90 %.

À l'autre extrémité du globe, le Canada, et plus particulièrement le Québec, s'inscrit également dans une démarche de transition vers une économie verte et une meilleure valorisation des ressources. La politique québécoise de gestion des matières résiduelles vise notamment à

réduire le gaspillage en favorisant la réutilisation, le recyclage et la valorisation des matériaux issus de différents secteurs d'activité.

Selon RECYC-QUÉBEC (2021), près de 1,85 million de tonnes de déchets provenant de la construction, de la rénovation et de la démolition sont acheminées chaque année vers les centres de tri et de recyclage de la province. À l'échelle canadienne, plusieurs millions de tonnes de déchets sont générées annuellement, principalement sous forme de béton, d'asphalte et d'autres matériaux minéraux. [9]

En 2015, l'humanité a consommé environ 92,8 Gt de matériaux, dont seulement 8,4 Gt provenaient du recyclage. Malgré le développement de l'économie circulaire, les progrès restent donc encore limités. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de développer des formulations fiables et maîtrisées permettant d'intégrer davantage ce type de granulats dans les matériaux de construction.

La Figure 8, reprise de l'article du groupe CEREMA intitulé *Vers des sables alternatifs issus de la déconstruction des bâtiments* (2021), illustre bien cette démarche. Celle-ci repose notamment sur le principe de « boucler la boucle » et de favoriser ainsi une économie plus circulaire. [10]



FIGURE 8 – Économie circulaire dans le domaine de la construction et la production de sables recyclés

Cependant, certains auteurs mettent également en évidence certaines limites de ce modèle [7]. En effet, le recyclage nécessite des apports énergétiques importants et demeure inévitablement associé à des pertes de matière. Les bénéfices environnementaux peuvent aussi être atténués par les effets rebond, la croissance continue de la consommation ou le transfert des impacts vers d'autres régions. D'autres difficultés concernent les verrouillages technologiques, la coordination entre les différents acteurs ainsi que l'absence d'une définition uniforme des

flux de déchets et de matériaux recyclés.

3.2.4 Les sables recyclés

On définit généralement un sable recyclé comme un granulat fin obtenu à partir de déchets issus de la construction, de la rénovation ou de la démolition d'ouvrages. Ces déchets peuvent notamment provenir de bétons déconstruits, de retours de production en centrale à béton, de maçonneries ou d'autres matériaux minéraux. Après collecte, les matériaux sont triés, traités et concassés afin d'obtenir différentes fractions granulaires pouvant être réutilisées dans la fabrication de nouveaux matériaux cimentaires.

L'un des principaux défis liés à l'utilisation des sables recyclés réside dans leur porosité et leur capacité d'absorption d'eau généralement plus élevées que celles des sables naturels. Cette particularité s'explique principalement par la présence de pâte de ciment adhérente à la surface des granulats recyclés, héritée du matériau d'origine, tel qu'illustré à la Figure 9. Cette matrice cimentaire résiduelle présente une structure poreuse capable d'absorber une quantité importante d'eau. De plus, malgré les opérations de tri et de traitement, les granulats recyclés peuvent encore contenir certains composants secondaires indésirables, tels que des fragments de briques, de céramiques, de plâtre, de bois, de verre, etc., qui n'ont pas été totalement séparés lors des étapes de concassage et de recyclage. La présence de ces constituants peut entraîner une plus grande variabilité des propriétés des granulats et influencer le comportement des mortiers à l'état frais comme à l'état durci également.



FIGURE 9 – Source : SMA BTP (2025), Schéma granulat de recyclage

Malgré ces limitations, les sables recyclés constituent une alternative particulièrement intéressante dans une démarche d'économie circulaire. Leur utilisation fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches visant à mieux comprendre leur comportement et à développer des solutions permettant de compenser leurs effets potentiellement défavorables, notamment en matière de retrait et de durabilité. C'est également dans cette optique que s'inscrit le présent travail de recherche.

D'après le rapport concernant le plan Wallon des déchets (2018), en Wallonie, environ 4 millions de tonnes de granulats recyclés sont produites chaque année. Ces matériaux sont

principalement utilisés dans les travaux routiers, les fondations et les sous-fondations, bien que les réglementations récentes visent à favoriser leur intégration dans des applications à plus forte valeur ajoutée, notamment le béton.

Selon un autre rapport publié par Hubert et al.(2024), à l'échelle européenne, les granulats recyclés occupent une place encore relativement limitée dans la production totale de granulats. En 2019, les granulats naturels (sables, graviers et roches concassées) représentaient près de 87 % de la production, tandis que les granulats recyclés et réemployés ne comptaient que pour environ 9,3 %.

La production de granulats recyclés est toutefois très concentrée géographiquement. La Belgique, le Royaume-Uni, les Pays-Bas, l'Allemagne et la France assurent à eux seuls près de 90 % de la production européenne de granulats recyclés (Figure 10).

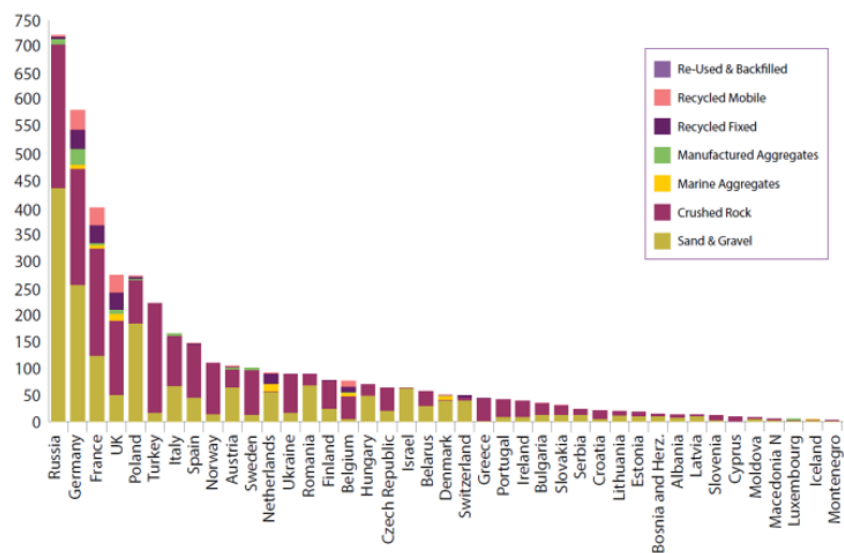


FIGURE 10 – Production des types de granulats en Europe (2019)

Contrairement à l'Europe, les statistiques relatives à la production de granulats recyclés demeurent limitées au Canada. Néanmoins, l'Ontario (Canada) constitue l'un des principaux producteurs du pays. Selon le *State of the Aggregate Resource in Ontario Study* (2010), environ 13 millions de tonnes de granulats recyclés étaient produites annuellement en Ontario, soit près de 7 % des 184 millions de tonnes de granulats consommées dans la province. Cette production a plus que doublé entre 1991 et 2006, passant d'environ 6 à 13 millions de tonnes par an, principalement grâce au recyclage du béton et des enrobés bitumineux issus des travaux de construction et de réhabilitation routière. Malgré cette progression, les granulats recyclés demeurent encore minoritaires par rapport aux granulats naturels, ce qui laisse entrevoir un potentiel de développement important pour cette filière au Canada. [11]

3.3 Les mortiers

3.3.1 Les composantes et propriétés d'un mortier

Le mortier est un matériau composite constitué principalement d'un liant, d'un granulat fin, d'eau et, selon les applications recherchées, d'adjuvants ou d'additions minérales spécifiques.

Le liant constitue l'élément actif du mortier responsable du développement des propriétés mécaniques après prise et durcissement. Dans le cadre de ce travail, le liant utilisé est un ciment hydraulique de type Portland. Développé au XIX^e siècle par Joseph Aspdin, ce ciment est obtenu par broyage d'un clinker produit à environ 1450 °C à partir d'un mélange de calcaire et d'argile, auquel est ajouté du gypse afin de réguler le temps de prise.

Comme présenté dans le cours *Matériaux de construction : Composition des bétons* du Professeur Luc Courard, le clinker Portland est principalement constitué de quatre phases minérales : les silicates tricalciques (C_3S), les silicates bicalciques (C_2S), les aluminates tricalciques (C_3A) et les ferroaluminates tétracalciques (C_4AF). Les phases C_3S contribuent principalement aux résistances mécaniques à jeune âge, tandis que les phases C_2S participent davantage au développement des résistances à moyen et long terme. Les aluminates C_3A influencent principalement les réactions initiales d'hydratation, les dégagements thermiques et les temps de prise, alors que les phases C_4AF jouent un rôle plus modéré dans les propriétés mécaniques du ciment.

Lorsque l'eau est ajoutée au ciment, plusieurs réactions d'hydratation se développent progressivement. Ces réactions exothermiques conduisent principalement à la formation d'un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), ainsi que d'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$). Le gel C-S-H formé progressivement entraîne une densification de la microstructure et assure le développement des propriétés mécaniques du matériau.

Les granulats fins, généralement constitués de sable naturel ou recyclé, représentent une part importante du volume total du mortier. Leur fonction principale est de constituer un squelette granulaire limitant les déformations volumétriques, réduisant les coûts et influençant directement les propriétés mécaniques ainsi que la maniabilité du mélange. Les caractéristiques telles que la granulométrie, la forme des grains, la rugosité ou encore la porosité jouent un rôle majeur sur les performances finales.

L'eau possède une double fonction essentielle. Elle participe d'une part aux réactions chimiques d'hydratation du ciment et assure d'autre part la mise en œuvre du matériau en améliorant son ouvrabilité. Cependant, la quantité d'eau doit être soigneusement contrôlée puisqu'un excès augmente la porosité capillaire après durcissement tandis qu'un déficit peut compromettre l'hydratation complète du ciment et réduire la maniabilité.

Dans certaines applications, différents adjuvants peuvent être incorporés afin de modifier

certaines propriétés spécifiques du mortier. Il peut notamment s'agir de superplastifiants, d'accélérateurs, de retardateurs, d'entraîneurs d'air ou encore d'agents compensateurs de retrait.

Les propriétés du mortier peuvent être distinguées selon son état frais ou son état durci. À l'état frais, les caractéristiques les plus importantes sont la maniabilité, l'ouvrabilité, la consistance, et la rétention d'eau. Ces propriétés conditionnent directement la capacité du matériau à être transporté et coulé sur site correctement.

À l'état durci, les principales propriétés recherchées concernent la résistance à la compression, la résistance en traction, le module élastique, la durabilité, l'adhérence, la perméabilité ainsi que les déformations différées telles que le retrait ou le fluage. Ces paramètres conditionnent directement les performances à long terme des ouvrages et leur résistance face aux sollicitations mécaniques et environnementales.

Afin d'assurer une reproductibilité des essais mécaniques, la norme EN 196-1 définit une formulation de mortier normalisé composée de 450 g de ciment, 1350 g de sable normalisé CEN et 225 g d'eau, correspondant à un rapport ciment/sable de 1 :3 et à un rapport eau/ciment de 0,50. Cette formulation (RILEM) constitue une référence largement utilisée dans les travaux de recherche et les essais de caractérisation des matériaux cimentaires.

3.3.2 Le rapport E/L

Le rapport eau/liant (E/L), souvent assimilé au rapport eau/ciment (E/C) dans les formulations conventionnelles, représente la quantité d'eau incorporée relativement à la masse de liant utilisée dans un mélange cimentaire. Ce paramètre constitue l'un des éléments fondamentaux dans la conception des bétons et des mortiers, puisqu'il influence directement de nombreuses propriétés du matériau, aussi bien à l'état frais qu'après durcissement.

Lors de la mise au point d'une formulation, l'objectif n'est pas uniquement d'assurer une réaction d'hydratation suffisante du ciment, mais également d'obtenir un équilibre entre ouvrabilité, performances mécaniques et durabilité. La quantité d'eau introduite dans le mélange joue alors un rôle central dans cet équilibre. En effet, une partie de cette eau agit principalement comme une sorte de lubrifiant entre les particules solides afin d'améliorer la maniabilité du mélange.

Toutefois, une augmentation excessive de la teneur en eau n'est pas sans conséquence. L'eau non consommée lors des réactions d'hydratation finit par s'évaporer au cours du durcissement, laissant derrière elle un réseau de pores capillaires. L'augmentation de cette porosité entraîne généralement une diminution des performances mécaniques, une augmentation de la perméabilité du matériau ainsi qu'une sensibilité accrue aux phénomènes de retrait.

À l'inverse, une réduction trop importante de la quantité d'eau peut limiter les réactions d'hydratation du ciment et dégrader fortement l'ouvrabilité du matériau frais. Un mélange

trop sec devient plus difficile à mettre en œuvre, à compacter et à homogénéiser, ce qui peut engendrer des défauts internes, tels que des vides ou une mauvaise répartition des constituants. Ces imperfections peuvent ensuite affecter négativement les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau durci.

Toujours d'après le cours *Matériaux de construction – Composition des bétons* du Professeur Luc Courard, les formulations traditionnelles présentent généralement un rapport E/C compris entre 0,4 et 0,5, intervalle permettant d'atteindre un compromis satisfaisant entre ouvrabilité et performances mécaniques.

Les caractéristiques recherchées varient selon l'application visée et dépendent notamment des conditions environnementales, des dimensions de l'élément considéré, ou encore des sollicitations auxquelles il sera exposé durant sa durée de vie.

Dans le cas des mortiers incorporant des sables recyclés, la détermination du rapport E/L optimal devient encore plus complexe. En effet, comme énoncé dans le paragraphe précédent, les propriétés intrinsèques des granulats influencent fortement les besoins en eau du mélange. La granulométrie joue notamment un rôle important : une augmentation de la finesse des particules entraîne une hausse de la surface spécifique totale, ce qui accroît généralement la demande en eau, contrairement aux sables naturels. La nature même du granulats intervient également.

Par conséquent, une fraction de l'eau introduite dans le mélange peut être absorbée par les granulats et ne plus être directement disponible pour l'hydratation du ciment ou pour assurer la maniabilité souhaitée. Cette particularité constitue un enjeu important dans la formulation des matériaux incorporant des granulats recyclés et nécessite une adaptation spécifique des rapports E/L afin de maintenir des propriétés comparables à celles obtenues avec des granulats naturels.

Dans le cadre de cette étude, les rapports eau/liant retenus ne sont pas identiques pour l'ensemble des formulations étudiées et ont été adaptés en fonction des caractéristiques propres à chaque mélange. Les différents rapports E/L adoptés pour chacune des formulations sont présentés dans les paragraphes suivants (voir Chapitre 4 - Méthodologie).

3.3.3 Les domaines et exigences d'application des mortiers conventionnels

Les mortiers de maçonnerie

Les mortiers de maçonnerie sont utilisés pour assurer l'assemblage des éléments de construction tels que les briques, les blocs de béton ou les pierres naturelles. Ainsi, leur fonction principale consiste à garantir la liaison entre les unités maçonnées, à répartir les contraintes mécaniques et à compenser les irrégularités géométriques des éléments assemblés. Contraire-

ment aux matériaux structuraux classiques, une résistance mécanique très élevée n'est pas systématiquement recherchée, car le mortier doit conserver une certaine capacité de déformation afin d'absorber les mouvements différentiels et limiter l'apparition de concentrations locales de contraintes. Selon la norme NBN EN 998-2, les mortiers de maçonnerie courants sont classés selon les catégories de résistance à la compression M5 ou M10, correspondant à des résistances minimales supérieures ou égales à 5 ou 10 MPa après 28 jours. Outre cette résistance, d'autres propriétés telles que l'adhérence, la rétention d'eau, la durabilité ainsi que la résistance aux cycles de gel-dégel constituent également des paramètres essentiels lors de la formulation. [12] [13]

Les mortiers d'enduit

Les mortiers d'enduit sont principalement appliqués sur les surfaces des murs et des façades afin d'assurer des fonctions de protection, d'étanchéité partielle et d'amélioration esthétique. Leur rôle est notamment de protéger les ouvrages contre les agressions environnementales telles que l'humidité, les infiltrations d'eau, les variations thermiques ou les cycles de gel-dégel. Contrairement aux mortiers de maçonnerie, les exigences mécaniques ne se limitent pas à l'obtention d'une résistance élevée. Une résistance excessive peut même s'avérer défavorable en augmentant le risque de fissuration lié au retrait ou aux incompatibilités de déformation avec le support. Les propriétés recherchées concernent davantage l'adhérence au substrat, la capacité de déformation, la perméabilité à la vapeur d'eau ainsi que la résistance à la fissuration. D'après la norme EN 998-1, les mortiers d'enduit sont classés selon des catégories allant de CS I à CS IV. Par exemple, un mortier d'enduit extérieur de type CS III, une résistance à la compression comprise approximativement entre 3,5 MPa et 7,5 MPa est attendue.[13] [14]

Les mortiers de réparation

Les mortiers de réparation sont utilisés pour restaurer des structures détériorées ou réparer des éléments ayant subi des dégradations mécaniques, chimiques ou environnementales. Ils interviennent notamment dans les travaux de réparation des structures en béton affectées par la corrosion des armatures, les phénomènes de fissuration, les éclatements superficiels ou les dégradations liées aux cycles environnementaux. [13] Contrairement aux autres catégories de mortiers, ils doivent satisfaire à des exigences particulièrement élevées afin d'assurer une compatibilité avec le matériau existant et garantir la pérennité de la réparation. Selon la norme EN 1504-3, les mortiers de réparation sont répartis en classes R1 à R4. Les classes R3 et R4, généralement utilisées pour les réparations structurelles, imposent des résistances minimales à la compression respectives de 25 MPa et 45 MPa après 28 jours. En complément des performances mécaniques, ces matériaux doivent présenter une excellente adhérence au support, une faible sensibilité au retrait, une durabilité élevée ainsi qu'une bonne résistance aux sollicitations environnementales. [15]

3.4 Les Agents de compensation et de réduction du retrait

3.4.1 Les agents expansifs

Les agents expansifs, sont des adjuvants ou additions minérales incorporés dans les mortiers ou les bétons afin de limiter ou compenser les déformations de retrait susceptibles d'apparaître durant l'hydratation et le durcissement des matériaux cimentaires.

Le mécanisme d'action des agents compensateurs de retrait repose donc principalement sur la formation de produits d'hydratation expansifs. Ainsi, l'objectif principal de ces agents n'est pas de provoquer une augmentation permanente du volume du matériau, mais de créer une expansion initiale suffisante pour compenser les pertes volumétriques futures liées au retrait. Lorsque cette expansion est correctement contrôlée, elle permet de réduire les contraintes de traction internes responsables de l'apparition de fissures précoces, améliorant la durabilité et les performances mécaniques des matériaux cimentaires.

L'efficacité des agents compensateurs dépend fortement de plusieurs paramètres, notamment leur nature chimique, leur dosage, la finesse des particules, la composition du liant, le rapport eau/ciment ainsi que les conditions de cure. Cependant, c'est surtout le dosage qui sera un paramètre clé. En effet, un dosage excessif peut entraîner une expansion trop importante et provoquer des désordres structurels ou une baisse des performances mécaniques. À l'inverse, un dosage insuffisant peut ne pas produire d'effet compensatoire significatif.

Les agents compensateurs de retrait sont aujourd'hui largement étudiés dans les bétons à hautes performances, les bétons à retrait compensé, les matériaux à faible rapport eau/liant ainsi que dans les formulations intégrant des matériaux recyclés, où les risques de retrait et de fissuration sont généralement accentués.

Plusieurs études ont montré que les agents expansifs peuvent réduire significativement le retrait et ainsi limiter les phénomènes de fissuration précoce au sein des matériaux cimentaires. Leur utilisation présente un intérêt particulier dans le cadre de cette étude, puisque comme énoncé précédemment, les mortiers incorporant des sables recyclés sont généralement plus sensibles aux phénomènes de retrait en raison de leur porosité plus élevée.

Différents types d'agents compensateurs de retrait ont été développés et sont aujourd'hui utilisés selon les performances recherchées et les mécanismes d'expansion souhaités.

L'agent de type K

L'agent expansif de type K repose principalement sur la formation d'ettringite au cours de l'hydratation du ciment. Ce mécanisme met en jeu des composés alumineux, généralement issus d'un clinker sulfoalumineux, du sulfate de calcium ainsi que de la chaux. En présence

d'eau, ces constituants réagissent pour former de l'ettringite, dont la formule peut être notée $3C_6A\bar{S}3H32$.

La réaction simplifiée peut s'écrire sous la forme suivante :



où $C_4A_3\bar{S}$ correspond au sulfoaluminate de calcium, $C\bar{S}H_2$ au gypse, CH à la portlandite et $C_6A\bar{S}3H32$ à l'ettringite. La présence de chaux favorise la disponibilité en ions calcium, nécessaires à la formation et à la stabilisation de cette phase expansive.

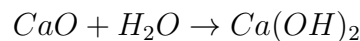
La formation d'ettringite s'accompagne d'une augmentation de volume liée à la croissance de cristaux au sein de la matrice cimentaire. Lorsque cette réaction se produit au jeune âge, alors que la matrice est encore peu rigide, elle permet de générer une expansion contrôlée capable de compenser une partie du retrait. En revanche, si cette expansion se poursuit dans une matrice déjà durcie, elle peut induire des contraintes internes importantes et favoriser l'apparition de fissures. Le dosage et la cinétique de réaction de l'agent expansif doivent donc être maîtrisés.

L'agent de type K présente généralement une cinétique d'expansion intermédiaire. Il est notamment utilisé dans des applications où la maîtrise du retrait et de la fissuration est recherchée, comme les dalles industrielles, les réservoirs ou certains ouvrages nécessitant une bonne étanchéité.

L'agent de type M

L'agent expansif de type M est un agent expansif dont le mécanisme repose principalement sur l'hydratation de composés riches en chaux libre. Contrairement aux systèmes expansifs basés principalement sur la formation d'ettringite comme le type K, l'expansion générée par les agents de type M provient essentiellement de la formation de produits hydratés dont le volume est supérieur à celui des composés initiaux.

L'un des mécanismes associés peut être représenté par l'hydratation de l'oxyde de calcium :



Cette réaction conduit à la formation de portlandite, accompagnée d'une augmentation de volume capable de générer une expansion interne au sein du matériau cimentaire. Cette expansion est recherchée afin de compenser les déformations volumétriques causées par le retrait autogène ou le retrait de séchage.

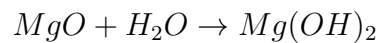
L'expansion produite intervient principalement au jeune âge, lorsque la matrice cimentaire

est encore suffisamment déformable pour permettre le développement de contraintes de compression internes. Celles-ci s'opposent ensuite aux contraintes de traction induites par les phénomènes de retrait, contribuant ainsi à réduire le risque de fissuration précoce.

L'efficacité des agents expansifs de type M dépend fortement de plusieurs paramètres tels que le dosage utilisé, la disponibilité en eau, la finesse des particules, les conditions de cure ainsi que la composition globale du matériau cimentaire. Un dosage excessif peut conduire à une expansion trop importante et provoquer des effets indésirables tels qu'une perte de performances mécaniques ou des désordres dimensionnels.

L'agent de type MgO

L'agent expansif de type MgO repose principalement sur l'hydratation de l'oxyde de magnésium, également appelé magnésie réactive. La réaction chimique associée peut être exprimée de manière simplifiée comme suit :



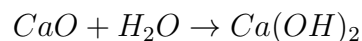
où $Mg(OH)_2$, appelé brucite, est le produit formé lors de l'hydratation. Cette transformation s'accompagne d'une augmentation de volume significative liée à la différence de densité entre l'oxyde de magnésium et l'hydroxyde de magnésium.

Contrairement aux agents expansifs de type K, l'expansion générée par le type M est généralement plus lente et progressive, car elle dépend fortement de la réactivité du MgO, elle-même influencée par sa température de cuisson et sa finesse. Cette expansion différée permet de compenser les déformations de retrait à moyen ou long terme (retrait de séchage) car la cinétique d'expansion associée à ce type d'agent est assez lente.

Aussi, l'efficacité de cet agent est conditionnée par les conditions de cure et la disponibilité en eau. Une hydratation insuffisante du MgO peut limiter l'expansion attendue, tandis qu'une réactivité trop élevée peut entraîner une expansion précoce mal contrôlée.

L'agent de type G

L'agent expansif de type G est principalement basé sur l'utilisation de chaux calcinée, également appelée chaux vive. Celle-ci est obtenue par traitement thermique du carbonate de calcium ($CaCO_3$), au cours duquel une réaction de décarbonatation libère du dioxyde de carbone (CO_2) et conduit à la formation d'oxyde de calcium (CaO), constituant majoritaire de cet agent. Lors de son hydratation, le CaO réagit avec l'eau selon la réaction suivante :



Cette transformation, fortement exothermique, s'accompagne d'une augmentation de volume liée à la formation d'hydroxyde de calcium, $Ca(OH)_2$, également appelé portlandite. L'expansion générée apparaît généralement à un âge précoce, ce qui peut contribuer à compenser une partie du retrait initial du matériau. En effet, la cinétique d'expansion de l'agent de type G est très rapide, en raison de l'hydratation quasi immédiate de la chaux vive, CaO , au contact de l'eau.

Toutefois, la chaux vive ne constitue pas un matériau parfaitement pur. Sa composition dépend notamment de la nature du calcaire d'origine et des conditions de calcination. Outre le CaO , elle peut contenir de faibles proportions d'oxyde de magnésium, MgO , issu de la décomposition du carbonate de magnésium, $MgCO_3$, ainsi que des impuretés minérales telles que la silice, SiO_2 , l'alumine, Al_2O_3 , ou encore l'oxyde de fer, Fe_2O_3 . Une fraction résiduelle de carbonate de calcium non décomposé, $CaCO_3$, peut également subsister en cas de calcination incomplète. Ces constituants secondaires, bien que minoritaires, peuvent influencer la réactivité globale de l'agent expansif et sa cinétique d'hydratation. Par conséquent, l'efficacité de l'agent expansif de type G dépend non seulement de son dosage, mais également de la composition précise de la chaux utilisée et des conditions de mise en œuvre.

Il est également important de préciser que l'agent de type G est fortement sensible aux conditions d'humidité. Une quantité d'eau insuffisante peut limiter l'hydratation complète du CaO et donc réduire l'expansion attendue. À l'inverse, un apport en eau important ou prolongé peut favoriser la poursuite de l'hydratation et accentuer l'expansion du matériau. La maîtrise de l'eau disponible dans le mélange constitue donc un paramètre essentiel pour contrôler l'effet expansif de ce type d'agent.

L'agent de type S

Le type S, principalement constitué d'aluminate tricalcique et de sulfate de calcium, constitue une autre catégorie d'agent expansif historiquement utilisée dans certains bétons à retrait compensé. Son mécanisme d'expansion est assez similaire à celui de l'agent de type K, toutefois, ce type d'agent est aujourd'hui moins étudié dans la littérature récente, où les recherches se concentrent davantage sur compositions à base de type K, M et G.

3.4.2 Les adjuvants réducteurs de retrait (SRA)

Les adjuvants réducteurs de retrait, plus connus sous le nom de *Shrinkage-Reducing Admixtures* (SRA), ont été développés au Japon au début des années 1980, notamment à travers les travaux de Goto et al. (1982), Sato et al. (1983) et Tomita et al. (1983). Leur objectif principal est de limiter les variations dimensionnelles des matériaux cimentaires, responsables de l'apparition précoce de fissures et d'une diminution de la durabilité des ouvrages.

Il convient de rappeler qu'un mortier présente naturellement des hétérogénéités internes,

même avant l'application d'un chargement mécanique. Des microfissures peuvent notamment apparaître au niveau de la zone de transition interfaciale, ou Interfacial Transition Zone (ITZ), située entre les granulats et la pâte cimentaire. Cette zone, généralement plus poreuse et plus fragile que le reste du matériau, constitue souvent un site préférentiel d'initiation et de propagation des fissures.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour limiter ces phénomènes. Les fibres permettent d'améliorer le comportement en traction et de freiner l'ouverture des fissures, tandis que les agents expansifs compensent une partie des déformations par une expansion contrôlée. Les SRA, quant à eux, agissent selon un mécanisme différent, en intervenant directement sur les phénomènes capillaires à l'origine d'une part importante du retrait.

Ces adjuvants sont des composés organiques tensioactifs, souvent à base d'alcools, de dérivés glycols ou de molécules amphiphiles. Certaines formulations commerciales contiennent notamment des dérivés de polyéthylène glycol ou de polypropylène glycol. Leur structure moléculaire comprend généralement une tête hydrophile polaire et une chaîne hydrophobe apolaire, leur permettant d'agir à l'interface eau-air présente dans le réseau poreux, comme illustré à la Figure 11.

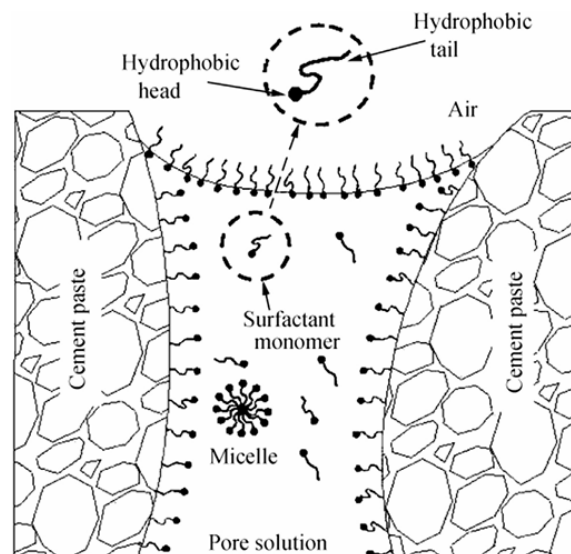


FIGURE 11 – Illustration de la présence de SRA dans la matrice cimentaire [16]

Lors du séchage, le degré de saturation des pores capillaires diminue progressivement. Des interfaces eau-air se forment alors, donnant naissance à des ménisques. Sous l'effet de la tension superficielle de la solution interstitielle, ceux-ci génèrent des pressions capillaires qui exercent des contraintes internes sur la pâte cimentaire. L'accumulation de ces contraintes, en particulier dans les pores de très petites dimensions, constitue l'un des mécanismes majeurs du retrait de séchage et peut également contribuer au retrait autogène.

L'action principale des SRA consiste à abaisser la tension superficielle de la solution contenue

dans les pores. En s'adsorbant à l'interface eau-air, leurs molécules réduisent l'intensité des pressions capillaires développées lors du séchage. Les contraintes internes étant moins importantes, les déformations dimensionnelles du matériau sont alors limitées.

À faible concentration, les molécules de SRA sont essentiellement présentes sous forme de monomères dissous dans la solution poreuse. Au-delà d'un certain seuil, elles peuvent s'organiser en micelles afin de réduire les interactions défavorables entre les chaînes hydrophobes et l'eau. Cette organisation dépend notamment de la nature chimique de l'adjuvant et de sa concentration.

Bien que leur efficacité soit reconnue pour limiter le retrait, les SRA peuvent également modifier certaines propriétés des matériaux cimentaires. Leur présence peut influencer la cinétique d'hydratation, les résistances mécaniques à jeune âge ou encore l'évolution de la microstructure. Leur dosage doit donc être optimisé afin de trouver un compromis entre la réduction des variations dimensionnelles, le maintien des performances mécaniques et la durabilité du matériau.

La Figure 12 illustre l'effet des SRA sur la microstructure d'un mortier.

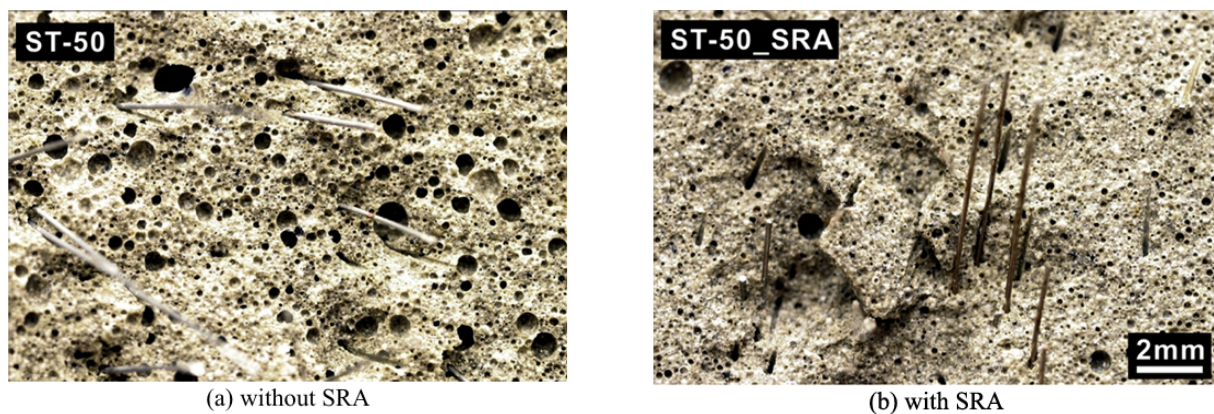


FIGURE 12 – Images microscopiques d'un mélange incorporant des SRA [16]

Les alternatives de maîtrise du retrait

D'autres solutions de réduction du retrait sont également rencontrées dans la littérature. Les polymères superabsorbants (SAP) constituent une méthode de cure interne largement étudiée. Ces matériaux ont la capacité d'absorber une grande quantité d'eau lors du malaxage puis de la restituer progressivement durant l'hydratation, permettant ainsi de limiter l'autodessiccation et de réduire le retrait autogène.

Certaines fibres cellulosiques commerciales, telles que les fibres de type Filocell, peuvent également contribuer à limiter les phénomènes de fissuration et certaines formes de retrait grâce à leur capacité de rétention d'eau et à leur effet de renforcement local de la matrice.

Des granulats ou matériaux à relargage d'eau, tels que certains granulats biosourcés ou recyclés

pré-saturés (GBR), sont également étudiés pour leur capacité à favoriser un mûrissement interne du matériau et réduire les contraintes induites par le retrait.

La littérature mentionne également d'autres stratégies complémentaires visant à réduire le retrait telles que l'utilisation d'agents expansifs, de granulats légers pré-humidifiés, de fibres synthétiques ou métalliques, ainsi que différentes techniques de cure interne. Dans le cadre de cette étude, des combinaisons d'agents expansifs avec des adjuvants réducteurs de retrait sont étudiées.

3.5 Le retrait des mortiers

Avant même d'être soumis à des sollicitations mécaniques externes, le béton peut développer des fissures résultant principalement de phénomènes de retrait différentiel ou d'un retrait excessif du matériau. Ces déformations volumiques engendrent des contraintes internes qui, lorsqu'elles dépassent la résistance en traction du matériau, conduisent à l'apparition de fissures. Plusieurs mécanismes de retrait sont généralement distingués dans la littérature, parmi lesquels figurent le retrait autogène, le retrait de séchage, le retrait plastique, le retrait chimique, le retrait thermique ainsi que le retrait lié à la carbonatation.

3.5.1 Le retrait autogène

Le retrait autogène correspond à une diminution de volume du matériau cimentaire sans échange d'humidité avec l'environnement extérieur. Il est principalement lié à l'hydratation du ciment, qui consomme progressivement l'eau présente dans les pores capillaires. Cette consommation entraîne une baisse de l'humidité relative interne, appelée auto-dessiccation, générant des pressions capillaires responsables du retrait. Contrairement au retrait de séchage, il s'agit donc d'un phénomène interne, pouvant se produire même en l'absence d'évaporation.

Ce retrait est particulièrement marqué dans les matériaux à faible rapport eau/liant, comme les bétons et mortiers à haute performance. Les teneurs élevées en liant, la fumée de silice ou certaines additions minérales peuvent également accentuer ce phénomène. Dans les mortiers incorporant des sables recyclés, il peut être influencé par leur forte capacité d'absorption. Selon leur état de saturation, ces granulats peuvent agir comme des réservoirs d'eau internes et modifier l'évolution de l'humidité au sein de la matrice.

3.5.2 Le retrait de séchage

Le retrait de séchage résulte de l'évaporation progressive de l'eau contenue dans les pores vers l'environnement extérieur. Lorsque l'humidité relative ambiante est inférieure à celle du matériau, l'eau migre vers l'extérieur, ce qui génère des pressions capillaires et entraîne la contraction de la matrice cimentaire.

Son amplitude dépend notamment du rapport eau/liant, du volume de pâte, de la porosité, de l'humidité ambiante, des dimensions de l'élément et de la nature des granulats. Ces derniers jouent un rôle important, car ils limitent en partie les déformations de la pâte cimentaire. Dans le cas de mortiers à base de sables recyclés, ce type de retrait est le plus susceptible de se produire.

3.5.3 Le retrait plastique

Le retrait plastique apparaît durant les premières heures suivant la mise en place du mortier, avant son durcissement complet. Il se produit lorsque l'évaporation de l'eau en surface devient plus rapide que la remontée d'eau depuis l'intérieur du matériau. Une dépression capillaire se forme alors dans le matériau frais, provoquant une contraction.

Ce phénomène est fortement influencé par les conditions environnementales, notamment la température, l'humidité relative, le vent et l'exposition au soleil. Les fissures associées sont généralement superficielles et parallèles, mais elles peuvent constituer des zones préférentielles de pénétration pour les agents agressifs, affectant ainsi la durabilité du matériau.

3.5.4 Le retrait thermique

Le retrait thermique est lié aux variations de température du matériau cimentaire. Au jeune âge, l'hydratation du ciment produit de la chaleur, entraînant une augmentation de la température interne. Lorsque le matériau se refroidit, il se contracte. Si cette contraction est empêchée, des contraintes de traction peuvent apparaître et provoquer des fissures.

Ce phénomène est particulièrement important dans les ouvrages où les gradients thermiques peuvent être significatifs.

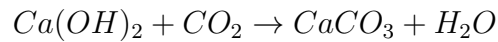
3.5.5 Le retrait chimique

Le retrait chimique correspond à la réduction du volume total des produits formés lors de l'hydratation du ciment. En effet, le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes initiaux du ciment et de l'eau consommée. Ce phénomène se produit dès les premiers instants de l'hydratation.

Il constitue l'un des mécanismes à l'origine de l'auto-dessiccation et participe donc indirectement au développement du retrait autogène. Bien qu'il soit peu observable à l'échelle macroscopique, il joue un rôle important dans les mécanismes précoces de déformation et de fissuration.

3.5.6 Le retrait lié à la carbonatation

Le retrait lié à la carbonatation résulte de la réaction entre le dioxyde de carbone présent dans l'air et certains produits d'hydratation du ciment, principalement l'hydroxyde de calcium, $Ca(OH)_2$. Cette réaction forme du carbonate de calcium, $CaCO_3$, selon l'équation suivante :



Cette transformation modifie la microstructure poreuse du matériau et peut entraîner une légère réduction volumique. Le phénomène dépend principalement de l'humidité relative, de la porosité et de la perméabilité du matériau. Bien que généralement plus lent et moins important que les autres formes de retrait, il peut contribuer à la fissuration et affecter la durabilité, notamment en diminuant le pH de la solution interstitielle, ce qui peut favoriser la corrosion des armatures.

La Figure 13, issue du cours de *Maintenance, repair and reinforcement of constructions* donné par le professeur Courard [13], illustre ces phénomènes de retrait observables sur une structure réelle.

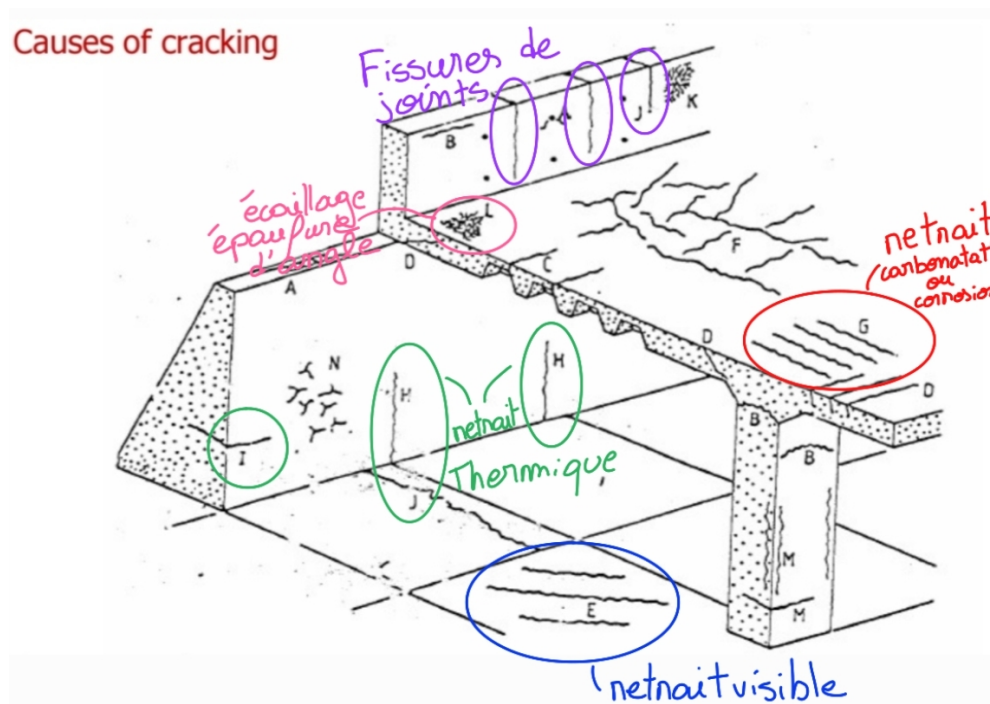


FIGURE 13 – Les différents types de fissuration observables sur une structure

4. Méthodologie

4.1 Préface

Cette section du rapport a pour objectif de présenter de manière détaillée la méthodologie adoptée ainsi que les différentes étapes expérimentales mises en œuvre au laboratoire de l'Université Laval (Québec, Canada) pour ce travail de recherche.

Depuis la formulation des mélanges jusqu'à la réalisation des essais, une succession d'étapes rigoureuses a été suivie. Celles-ci comprennent notamment la conception et la calibration des formulations finales, les conditions de préparation des éprouvettes, ainsi que la réalisation d'essais sur mortier à l'état frais et à l'état durci. L'ensemble de ces étapes intermédiaires est indispensable afin de garantir la qualité, la reproductibilité ainsi que la fiabilité des échantillons obtenus.

Les essais décrits dans les sections suivantes ont été réalisés conformément aux normes en vigueur pour chaque type de test, avec certaines adaptations lorsque c'était nécessaire. Ces ajustements méthodologiques ont été effectués de manière rigoureuse afin de conserver la pertinence scientifique des résultats obtenus.

Il convient également de préciser que cette partie du rapport est **commune** aux travaux de BARZAQ Yasmine et MILLARD Axel. En effet, la procédure expérimentale étant identique pour les deux études, une collaboration étroite a été mise en place, notamment lors de la conception et de la fabrication des éprouvettes. Cette approche conjointe a permis d'assurer une cohérence méthodologique entre les deux travaux.

La distinction entre les deux études réside principalement dans la composition des mélanges ainsi que dans certains paramètres expérimentaux spécifiques. Les axes de recherche propres à chacun sont présentés ci-dessous :

BARZAQ Yasmine étudie :

- L'effet de différents agents expansifs combinés à des adjuvants réducteurs de retrait (SRA).
- L'influence des cycles de mouillage et de séchage des éprouvettes sur leur comportement au retrait.
- Dans le cadre de l'essai du *German Angle* (cf. §4.9 Essai du *German Angle* et §4.9.2 Variante A), l'évolution de la déformation du mortier dans des profilés métalliques en V (cornières).

MILLARD Axel étudie :

- L'effet d'un agent expansif de type K à différent dosage combiné à des superplastifiants.
- Le retrait autogène grâce à des éprouvettes scellées.
- Dans le cadre de l'essai du *German Angle*, l'évolution de la déformation du mortier dans des profilés métalliques en C (Variante B).

4.2 Les Matériaux

4.2.1 Le ciment

Dans le cadre de cette recherche, un ciment de type GU (*General Use*) a été utilisé. Ce ciment, fourni par l'Université Laval (Québec, Canada), est un ciment Portland à usage général dont les caractéristiques minéralogiques et mécaniques sont présentées à la Figure 14, issue de la fiche technique du fabricant (Ciment Québec).

Ciment à usage général type

GU

Sept. 2025

Essais physiques

Analyses chimiques (%)

Temps de prise Vicat (minutes)

Initial..... 145

Final..... 280

Finesse

Blaine (m²/kg)..... 380

Retenu 45 µm (%)..... 5

Expansion

à l'autoclave (%)..... 0.06

Teneur en air (%)..... 5

Résistance à la compression (MPa)

3 jours..... 28.8

7 jours..... 33.7

28 jours (Août '25)..... 40.2

Expansion des barres de mortier

à 14 jours (%)..... 0.012

Densité (g/mL)..... 3.09

SiO₂ 19.7

Al₂O₃ 4.8

Fe₂O₃ 3.4

CaO 62.0

CaO libre..... 1.5

MgO..... 2.7

SO₃ 4.0

Perte au feu 2.4

Insolubles 0.6

Alcalis (équivalent Na₂O)..... 0.96

Composition Minéralogique

C₃S 54.5

C₂S 15.3

C₃A 6.9

C₄AF 10.3

Par la présente, nous certifions que le ciment livré est conforme aux exigences de la norme CSA A3000-23 section A3001-23, type GU.

FIGURE 14 – Certificat d'analyse du ciment de type GU utilisé

Selon la classification canadienne, le ciment GU est conforme aux exigences de la norme CSA A3000-23, section A3001-23. Il est donc destiné à des applications courantes sans exigences spécifiques et peut être assimilé à un ciment de type CEM I selon la norme EN 197-1, également utilisé pour des usages généraux.

D'un point de vue composition, un ciment de type CEM I (Belgique) est constitué d'au moins 95 % de clinker, un matériau hydraulique obtenu par cuisson à haute température d'un mélange de calcaire et d'argile, et est principalement composé de silicates et d'aluminates de calcium (notamment C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF), responsables des propriétés mécaniques du ciment (EN 197-1 :2011). Les 5 % restants sont des constituants secondaires, principalement

des sulfates de calcium (gypse, anhydrite) ainsi que d'éventuels constituants mineurs tel que le calcaire.

L'analyse chimique du ciment GU (Canada) par le fabricant (cf. Figure 14) met en évidence une composition caractéristique d'un ciment Portland, dominée par l'oxyde de calcium (CaO) (62 %), suivi du dioxyde de silicium (SiO_2) (19,7 %), de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) (4,8 %) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) (3,4 %). Sur le plan minéralogique, la forte proportion de silicate tricalcique (C_3S) (54,5 %) et de silicate dicalcique (C_2S) (15,3 %) favorise un développement rapide des résistances mécaniques.

Les résultats mécaniques fournis par le certificat d'analyse indiquent des résistances à la compression de 28,8 MPa à 3 jours, 33,7 MPa à 7 jours et 40,2 MPa à 28 jours pour le ciment GU.

En se référant à la classification définie par la norme EN 197-1, ce niveau de performance situe le ciment GU dans une plage intermédiaire, compatible avec les classes de résistance CEM I 32,5 R et 42,5 R (cf. Figure 15). Néanmoins, la résistance mesurée à 28 jours (40,2 MPa) demeure inférieure au seuil minimal requis pour la classe 42,5 R.

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps de début de prise	Stabilité (expansion)	
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L ^a	-	≥16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L ^a	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				

^a Classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III.

^a Classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III.

FIGURE 15 – Exigences mécaniques et physiques définies en valeurs caractéristiques selon la norme EN 197-1

En l'absence d'essais réalisés selon les protocoles européens normalisés, il apparaît donc plus rigoureux d'adopter une classification conservatrice, en rapprochant ce ciment d'un CEM I 32,5 R.

4.2.2 Les agents expansifs

Ce travail de recherche s'intéresse aux agents expansifs de type K, G et MgO. Les mécanismes d'action de ces différents produits ont déjà été présentés dans le Chapitre 3 consacré à l'état de l'art.

Les principales caractéristiques de ces agents sont issues des fiches techniques fournies par les fabricants et sont reprises en Annexe A.2.

Agent de type K (Komponent)

Ce matériau est fourni par la société CTS *Cement Manufacturing Corporation* (Canada).

Selon le fabricant, l'agent expansif de type K doit être incorporé à un dosage compris entre 5 % et 17 % en substitution du liant total. Un rapport eau/liant compris entre 0,40 et 0,55 est également recommandé afin d'assurer des conditions d'hydratation optimales. Dans le cadre de cette étude, un dosage de 15 % a été retenu afin de faciliter la comparaison avec les travaux de Mettlen (2025), qui utilisaient le même taux de substitution.

Agent de type MgO (SikaControl SC)

Ce matériau est fourni par la société Sika Canada.

Le fabricant recommande un dosage compris entre 2 % et 7 % du liant total. Afin de rester cohérent avec les travaux antérieurs et de maximiser l'effet expansif recherché, un dosage de 5 % a été retenu dans cette étude.

Agent de type MgO combiné à des SRA (SikaControl NS)

Ce produit appartient à la même famille d'agents expansifs que le SikaControl SC, mais se distingue par l'incorporation d'adjuvants réducteurs de retrait (SRA) sous forme poudreuse. Il constitue ainsi un système hybride combinant un mécanisme de compensation du retrait par expansion et un mécanisme de réduction du retrait par diminution des tensions capillaires.

L'association de ces deux mécanismes vise à limiter les déformations de retrait ainsi que les risques de fissuration associés. Ce matériau est également fourni par Sika Canada. Afin de permettre une comparaison directe avec le SikaControl SC, le même dosage de 5 % a été retenu.

Agent de type G (Conex NF)

Ce matériau est fourni par la société *Euclid Chemical* (Canada).

Selon le fabricant, l'agent expansif Conex NF doit être incorporé à un dosage compris entre 1,3 % et 6,5 % du liant total. Un rapport eau/liant inférieur à 0,60 est également recommandé afin de garantir un développement adéquat des réactions d'expansion.

Dans le cadre de cette étude, un dosage de 10 % a néanmoins été retenu afin de conserver une cohérence avec les travaux de Mettlen (2025) et de faciliter la comparaison des résultats obtenus.

4.2.3 Les adjuvants réducteurs de retrait : SRA

Les SRA utilisés dans cette étude proviennent également de la société *Euclid Chemical*. Il s'agit d'adjuvants réducteurs de retrait de nature alcoolique, commercialisés sous les dénominations EUCON SRA-XT ou EUCON SRA FLOOR. Ces produits sont fournis sous forme liquide prête à l'emploi et ont pour objectif de réduire le retrait de séchage ainsi que le risque de fissuration associé dans les matériaux cimentaires.

Leur mode d'action repose principalement sur la diminution de la tension superficielle de l'eau présente dans les pores de la matrice cimentaire. Cette réduction permet de limiter les contraintes capillaires responsables d'une partie des déformations de retrait. Selon les recommandations du fabricant, le dosage préconisé est de 2 % par rapport à la masse de ciment.

4.2.4 Les sables

Les éprouvettes de mortier sont élaborées à partir de trois types de sables distincts :

- (a) **Un sable naturel (Sablière de ST-GABRIEL-DE-BRANDON, Canada), noté NS, (fiche technique en Annexe A.1)**

Le matériau de référence retenu pour cette étude est un sable naturel extrait d'un gisement situé à ST-GABRIEL-DE-BRANDON. Ce sable, fourni par l'entreprise *Amrize* et caractérisé par le laboratoire *Englobe*, présente une granulométrie très fine, comprise entre 10 mm et 80 μ m. Il répond par ailleurs aux exigences de la norme CSA A23.1 relatives aux granulats destinés au béton. Son utilisation comme matériau de référence permettra ainsi d'établir une base de comparaison avec les sables recyclés étudiés.

- (b) **Un sable recyclé d'origine canadienne (Montréal, Canada), noté RS1**

Le sable recyclé a été fourni par la société *Lafarge* (Montréal, Canada). Il provient notamment de matériaux issus de retours d'usine, initialement destinés à des chantiers mais refusés en raison de non-conformités ou de dommages. Ces bétons n'ayant jamais été mis en service ni exposés à des conditions environnementales extérieures, ils ont été réintroduits dans le circuit de production pour être concassés et valorisés sous forme de granulats recyclés. En l'absence de documentation technique détaillée, une phase de caractérisation préalable a été mise en œuvre au laboratoire de l'Université Laval. Celle-ci a notamment porté sur la détermination de la distribution granulométrique et de la capacité d'absorption du matériau (cf. §4.3 Analyse de la granulométrie).

- (c) **Un sable recyclé d'origine belge (Wanty, Belgique), noté RS2**

Ce sable recyclé étudié provient de la déconstruction d'infrastructures. Avant son utilisation, le sable recyclé RS2 a été soumis à un traitement de carbonatation au

laboratoire de l'Université de Liège. Les informations disponibles sur les caractéristiques granulométriques, étant également limitées, une phase de caractérisation expérimentale a été réalisée au laboratoire (cf. §4.3 Analyse de la granulométrie).

Le choix de ces matériaux permet de comparer le comportement de sables d'origines et de natures différentes, notamment entre sable naturel et sables recyclés.

4.3 Analyse de la granulométrie

Dans ce paragraphe, une analyse granulométrique des trois sables utilisés est présentée. La granulométrie constitue en effet un paramètre essentiel dans la formulation des mortiers, car elle influence directement leurs propriétés à l'état frais et durci. Un sable très fin présente une surface spécifique importante, ce qui tend à augmenter la demande en eau nécessaire à la mise en œuvre du mortier. À l'inverse, un sable plus grossier ou plus poreux, notamment dans le cas de certains sables recyclés, peut également entraîner un besoin accru en eau en raison de sa capacité d'absorption plus élevée. Une granulométrie mal adaptée peut ainsi affecter la compacité, la cohésion et les performances mécaniques du mortier.

Il est donc nécessaire de vérifier l'adéquation de la distribution granulométrique avec l'application visée, afin d'optimiser l'empilement des grains, de limiter la porosité et d'améliorer les performances mécaniques du mortier. Une granulométrie bien adaptée permet également de réduire la quantité d'eau requise et d'assurer une meilleure ouvrabilité du mélange.

4.3.1 Procédure expérimentale

Bien que des analyses granulométriques préalables aient été réalisées pour certains matériaux, notamment pour le sable naturel (NS) par le fabricant, ainsi que pour le sable recyclé RS2 en Belgique selon la norme NBN EN 933-1 (« Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la distribution granulométrique – Tamisage à sec »), une caractérisation complémentaire a été effectuée pour l'ensemble des sables dans le cadre de cette étude.

La granulométrie des trois sables a été systématiquement déterminée au laboratoire de l'Université Laval, selon les normes du Bureau de Normalisation du Québec (BNQ) suivantes :

- BNQ 2501-025 : « Granulats – Analyse granulométrique des granulats fins et grossiers – Tamisage »
- BNQ 2560-040 : « Bétons – Granulats – Définitions, exigences et méthodes d'essai »

Cette approche permet non seulement de comparer les résultats obtenus pour le sable RS2

avec ceux issus de la norme européenne, mais également d'établir une base méthodologique commune à l'ensemble des matériaux étudiés.

Lavage des sables et détermination de la teneur en fines

Dans un premier temps, les échantillons ont été séchés en étuve à 110 ± 5 °C jusqu'à obtention d'une masse constante, puis subdivisés par quartage afin d'assurer leur représentativité. Une masse initiale a ensuite été mesurée avec précision à l'aide d'une balance analytique.

Chaque échantillon a ensuite été soumis à un lavage à travers un tamis de 80 μm , sous un flux d'eau claire, jusqu'à ce que les particules fines ne soient plus entraînées à travers le tamis (cf. Figure 16). Cette étape permet d'éliminer les fractions les plus fines, qui pourraient autrement obstruer les tamis lors du tamisage à sec.



FIGURE 16 – Lavage des échantillons de sable

Après lavage, les échantillons ont été de nouveau séchés à 110 ± 5 °C jusqu'à stabilisation de leur masse, puis pesés pour obtenir la masse finale. La masse des fines est alors déterminée par différence entre la masse initiale et la masse finale corrigée, à laquelle on additionne la masse passant à travers le tamis de 80 μm lors du tamisage à sec.

La teneur en fines est finalement calculée en rapportant la masse de fines à la masse initiale de l'échantillon :

$$\text{Teneur en fines} = \frac{M_{\text{fines}}}{M_{\text{initiale}}}$$

La teneur en fines calculée pour chacun des sables est reprise dans le Tableau 1 :

TABLE 1 – Caractéristiques des fines retenues des différents sables

Types de sable	Teneur en fines (%)
RS1	6,23
RS2	2,17

Les résultats obtenus apparaissent globalement cohérents avec les valeurs rapportées dans la littérature, notamment celles issues des travaux de Thibault Mettlen (2025). En effet, ce dernier a mesuré une teneur en fines de 7,79 % pour le sable RS1, contre 6,23 % dans le cadre de la présente étude. De manière similaire, les analyses réalisées au laboratoire de l'Université de Liège indiquent une valeur moyenne de 3,44 % pour le sable RS2, alors que la valeur obtenue ici est de 2,17 %.

Les écarts observés, bien que notables, restent du même ordre de grandeur et peuvent s'expliquer par les incertitudes expérimentales associées aux opérations de lavage et de tamisage, ainsi que par la variabilité inhérente aux matériaux recyclés. Ces différences n'altèrent donc pas la cohérence globale des résultats, mais soulignent l'importance des conditions de mise en œuvre dans la détermination de la teneur en fines.

Tamisage à sec des différents sables

La détermination de la distribution granulométrique définie par la norme BNQ 2501-025 a ainsi été réalisée selon la procédure, qui repose sur une séparation des particules par tamisage à sec, à l'aide de tamis normalisés conformes à la norme ASTM E11, couvrant une plage adaptée aux granulats fins (de 5 mm à 80 μm).

Préalablement à l'essai, les échantillons ont été séchés en étuve à 110 ± 5 °C jusqu'à stabilisation de leur masse, puis réduits par quartage afin d'assurer leur représentativité.

Le matériau a ensuite été soumis à une action mécanique de tamisage à l'aide d'un appareil de type Ro-Tap (cf. Figure 17), combinant agitation latérale et impulsions verticales. Ce dispositif est particulièrement adapté aux granulats recyclés, dont la morphologie anguleuse peut limiter l'efficacité d'un tamisage classique. La durée de l'essai a été fixée à 7 minutes.



FIGURE 17 – Ro-Tap : Système de tamisage

À l'issue du tamisage, la masse de matériau retenue sur chaque tamis a été déterminée, tel qu'illustré sur la Figure 18, permettant d'établir la répartition des fractions granulaires. Ces données ont ensuite été exploitées pour tracer les courbes granulométriques des différents sables étudiés (cf. A.3).



FIGURE 18 – Pesée des fractions retenues après tamisage à sec

4.3.2 Caractérisation du sable naturel : NS

La distribution granulométrique, obtenue sur base de la fiche technique (cf. Annexe A.1), du sable naturel étudié est présentée à la Figure 19. Et les résultats détaillés de l'analyse granulométrique du sable naturel sont présentés dans le Tableau 2.

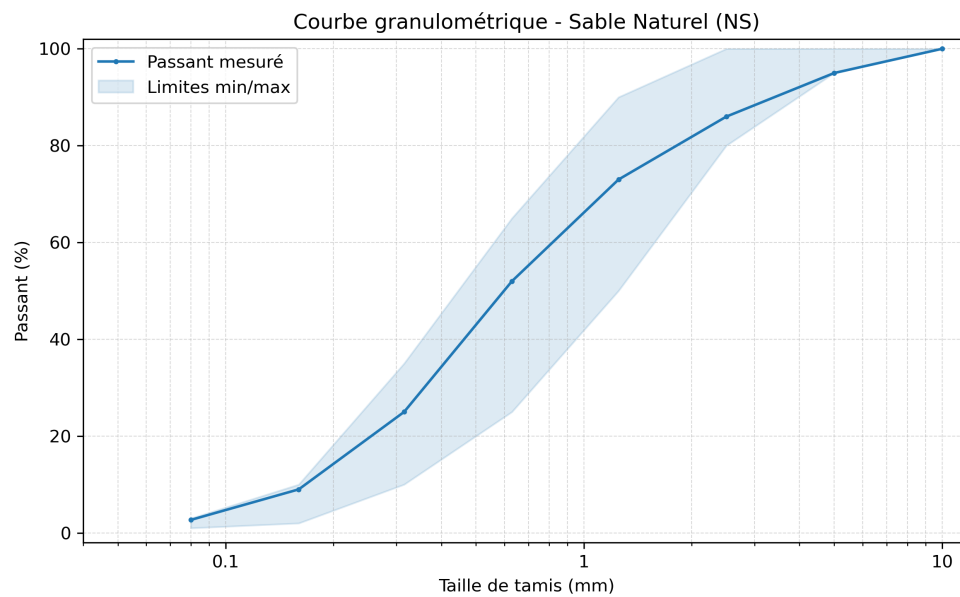


FIGURE 19 – Courbe granulométrique du sable naturel - NS

TABLE 2 – Distribution granulométrique du sable naturel

Ouverture de tamis [mm]	Passant [%]
10	100,00
5	95,00
2,5	86,00
1,25	73,00
0,63	52,00
0,315	25,00
0,16	9,00
0,08	2,70

4.3.3 Caractérisation du sable recyclé 1 : RS1

La distribution granulométrique, obtenue en laboratoire, du sable recyclé canadien est présentée à la Figure 20.

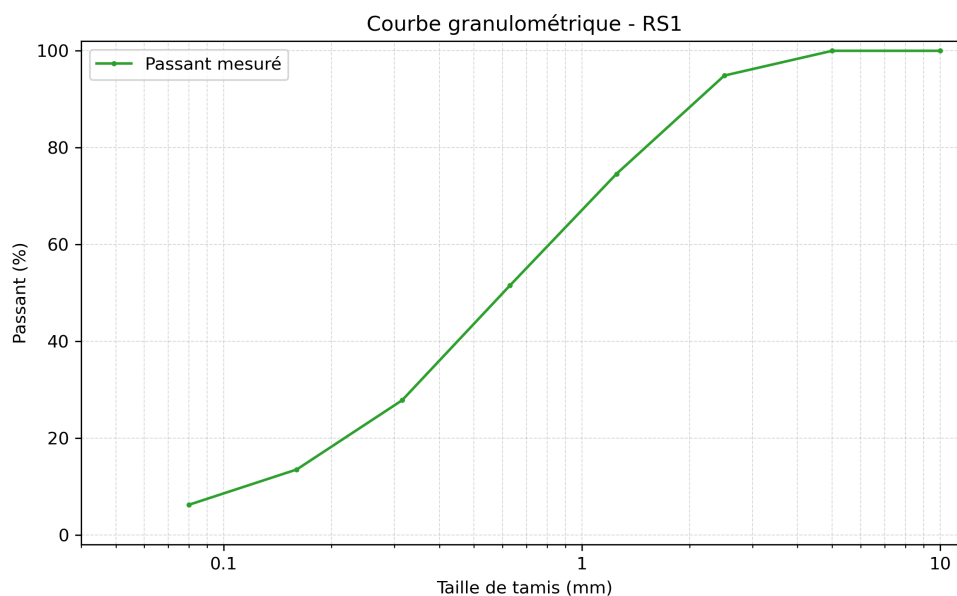


FIGURE 20 – Courbe granulométrique du sable recyclé canadien - RS1

Les résultats détaillés de l'analyse granulométrique du sable recyclé RS1 sont présentés dans le Tableau 3 suivant :

TABLE 3 – Distribution granulométrique du sable recyclé 1

Ouverture de tamis [mm]	Passant [%]
10	100
5	100
2,5	94,89
1,25	74,59
0,63	51,53
0,315	27,82
0,16	13,52
0,08	6,23

4.3.4 Caractérisation du sable recyclé 2 : RS2

La distribution granulométrique, obtenue en laboratoire, du sable recyclé belge est présentée à la Figure 21.

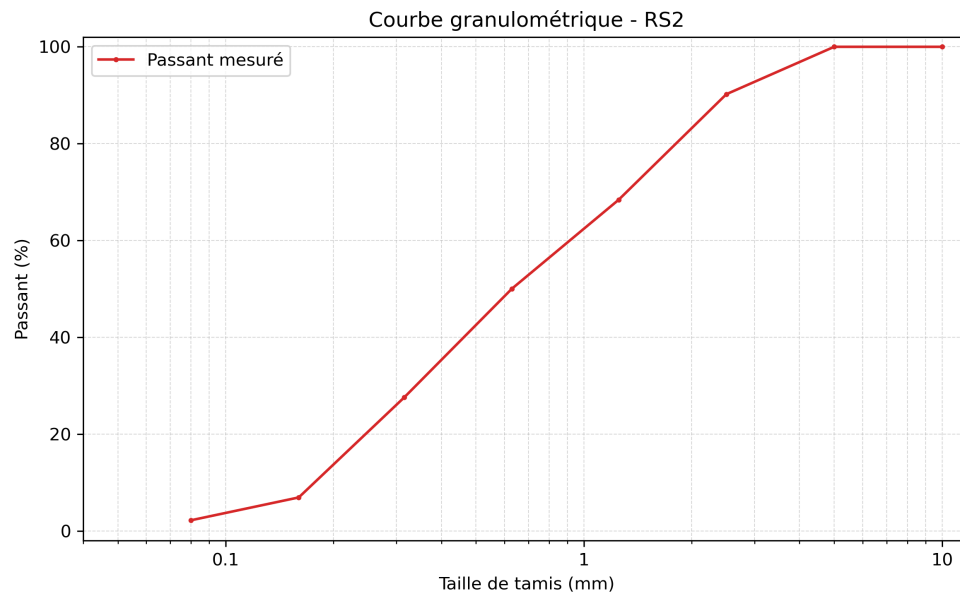


FIGURE 21 – Courbe granulométrique du sable recyclé belge - RS2

Les résultats détaillés de l'analyse granulométrique du sable recyclé RS2 sont présentés dans le Tableau 4 suivant :

TABLE 4 – Distribution granulométrique du sable recyclé 2

Ouverture de tamis [mm]	Passant [%]
10	100
5	100
2,5	90,21
1,25	68,38
0,63	50,04
0,315	27,56
0,16	6,92
0,08	2,2

4.3.5 Comparaison des différentes granulométries

Dans une optique de comparaison, les courbes granulométriques des différents sables ont été regroupées sur un même graphique (cf. Figure 22), représentant le pourcentage cumulé passant en fonction de l'ouverture des tamis, sur une échelle logarithmique. Les courbes présentées correspondent aux distributions granulométriques moyennes, établies à partir de l'ensemble des essais de caractérisation pour chaque matériau.

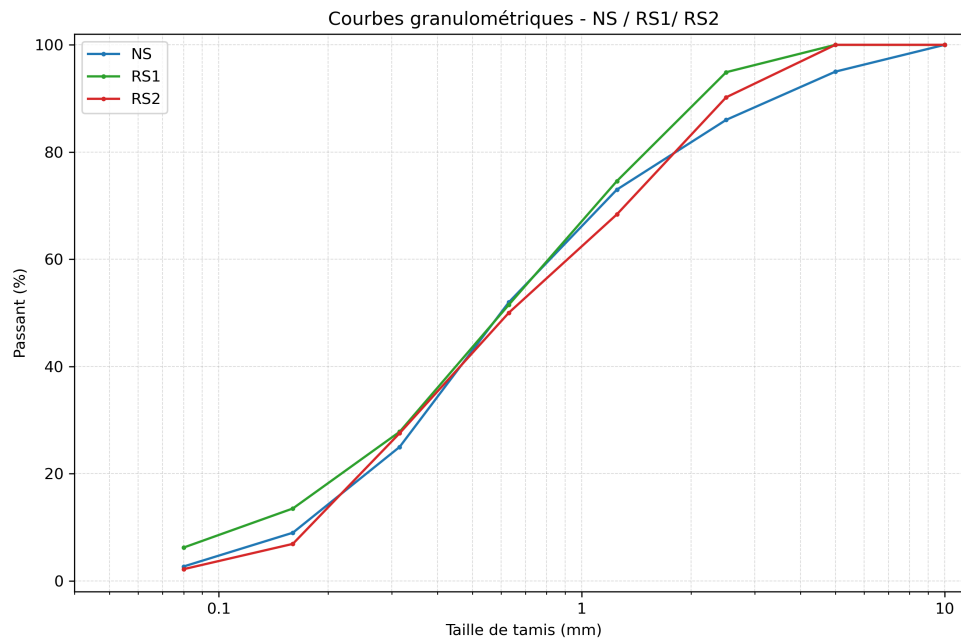


FIGURE 22 – Courbes granulométriques des trois sables étudiés

La superposition des courbes met en évidence les écarts de distribution entre le sable naturel (NS) et les sables recyclés (RS1 et RS2), tout en permettant d’apprécier leurs caractéristiques respectives en termes de finesse et de dispersion granulométrique.

TABLE 5 – Comparaison des distributions granulométriques des sables NS, RS1 et RS2

Ouverture [mm]	NS [%]	RS1 [%]	RS2 [%]
10	100	100	100
5	95,00	100	100
2,5	86,00	84,89	90,21
1,25	73,00	74,59	68,38
0,63	52,00	51,53	50,04
0,315	25,00	27,82	27,56
0,16	9,00	13,52	6,92
0,08	2,70	6,23	2,2

D’après le Tableau 5, l’analyse comparative des distributions granulométriques met en évidence des différences entre le sable naturel (NS) et les sables recyclés (RS1 et RS2), bien que celles-ci restent globalement modérées.

Le sable naturel présente une proportion plus importante de particules dans les fractions intermédiaires (notamment entre 0,315 mm et 0,63 mm), traduisant une granulométrie plus étalée. À l’inverse, les sables recyclés montrent une distribution légèrement plus orientée vers les fractions grossières, avec un effet plus marqué pour le RS1.

Par ailleurs, le RS1 se distingue par une teneur plus élevée en fines (passant à 0,16 mm et 0,08 mm), probablement liée à la présence de résidus cimentaires ou à l'effet du concassage. Le RS2 adopte un comportement intermédiaire, avec une distribution proche de celle du RS1 mais moins riche en fines puisque le sable a été lavé au préalable à Liège.

Bien que ces écarts puissent influencer certaines propriétés des mortiers, telles que la demande en eau, la compacité ou le retrait, les distributions restent relativement proches. Cette similarité suggère un comportement globalement comparable des sables du point de vue granulométrique, hypothèse qui sera vérifiée à travers les résultats expérimentaux présentés par la suite.

4.4 Evaluation de l'absorption d'eau des différents granulats

4.4.1 Absorption d'eau des différents sables

L'absorption d'eau des sables a été déterminée afin d'évaluer leur aptitude à retenir l'eau dans leur porosité interne. Cette propriété est particulièrement importante pour les sables recyclés, dont la structure plus irrégulière et plus poreuse peut modifier sensiblement le comportement hydrique du mélange. Cette caractéristique permet d'évaluer la qualité et la stabilité du matériau.

Dans cette étude, la même démarche expérimentale a été appliquée à l'ensemble des sables afin d'assurer une comparaison cohérente entre les matériaux. Les essais ont été réalisés selon la norme BNQ 2560-065, qui encadre la caractérisation des granulats fins à l'état saturé et superficiellement sec (SSS). Elle nous permet de déduire la densité brute, apparente et le taux d'absorption.

Principe de l'essai

Le sable est d'abord saturé par immersion jusqu'à ce que ses pores accessibles soient remplis d'eau. Il est ensuite ramené à l'état SSS, c'est-à-dire sans eau libre en surface, mais avec une humidité interne maintenue dans les pores. La masse de l'échantillon à cet état, comparée à sa masse sèche après étuvage, permet de calculer son absorption en eau.

Procédure expérimentale

1. Un échantillon de 1000 g de sable sec est immergé dans l'eau à 23 °C pendant 24 h afin de permettre la saturation progressive des grains.
2. Après immersion, l'excès d'eau est retiré délicatement, puis l'échantillon est séché à l'aide d'un sèche-cheveux en surface jusqu'à l'obtention de l'état saturé et superficiellement sec (SSS).

3. L'atteinte de cet état est vérifiée à l'aide de la méthode du cône tronqué : une quantité de sable est introduite dans un cône tronqué, compactée grâce à 25 coups de tige appliqués à 1 cm de la surface du sable, puis le cône est retiré verticalement. Si le sable conserve sa forme tout en présentant un léger affaissement, l'état SSS est considéré comme atteint.

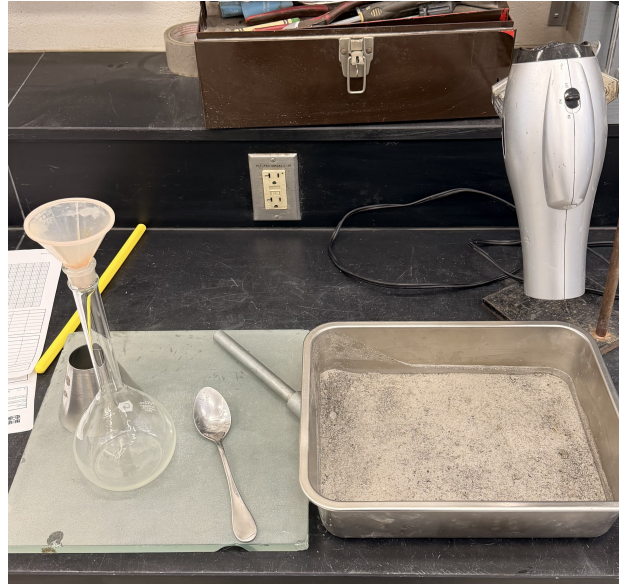


FIGURE 23 – Matériel nécessaire pour atteindre (à droite) et vérifier (à gauche) l'état SSS

4. 500g de sable à l'état SSS est ensuite introduite dans un pycnomètre propre et sec à l'aide d'un entonnoir.
5. Le pycnomètre est partiellement rempli d'eau à $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$, puis agité doucement afin de libérer les bulles d'air emprisonnées entre les grains.
6. Une fois le dégazage terminé, le remplissage est complété jusqu'au trait de jauge.
7. L'extérieur du pycnomètre est soigneusement essuyé avant la pesée.
8. Enfin, l'échantillon est vidé du pycnomètre, séché à l'étuve ($110 \pm 5^\circ\text{C}$) jusqu'à masse constante, puis pesé à nouveau afin d'obtenir la masse sèche réelle.

Calcul de l'absorption

L'absorption d'eau est obtenue à partir de la masse de l'échantillon à l'état SSS et de sa masse sèche selon l'expression suivante :

$$A = \frac{m_{\text{SSS}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100 \quad (4.1)$$

où :

- A représente l'absorption d'eau en %;

- m_{SSS} est la masse de l'échantillon à l'état saturé et superficiellement sec dans notre cas 500 g ;
- m_{sec} est la masse de l'échantillon après séchage à l'étuve.

Résultats

TABLE 6 – Résultats moyens des propriétés physiques des sables

Propriété	Sable naturel	RS1	RS2
Densité brute (kg/m ³)	2628	1875	2247
Densité brute SSS (kg/m ³)	2661	2162	2393
Densité apparente (kg/m ³)	2718	2628	2631
Absorption (%)	0,65	15,29	6,50

Le Tableau 6 met en évidence les différences de comportement hydrique entre les sables étudiés. Le sable naturel présente une absorption nettement plus faible (0,57 %), tandis que le sable recyclé RS1 affiche une absorption beaucoup plus élevée (15,29 % contre 12,50 % pour T. Mettlen), en raison de sa porosité accrue. Le sable recyclé RS2 présente quant à lui un comportement intermédiaire entre ces deux extrêmes (6,50 % contre 5,88 % pour T. Mettlen).

Ces résultats sont essentiels pour ajuster la quantité d'eau à incorporer dans les formulations de mortier et pour interpréter correctement les performances à l'état frais et à l'état durci.

Il convient toutefois de noter que les valeurs obtenues diffèrent légèrement de celles rapportées par T. Mettlen. Dans le cas du RS2, l'absorption avait été déterminée selon un essai belge, ce qui peut expliquer l'écart observé en raison de différences de procédure. Pour le RS1, il est important de rappeler que la détermination de l'état SSS repose en partie sur une appréciation visuelle de l'opérateur, ce qui introduit une certaine variabilité expérimentale.

Plus généralement, la détermination précise du coefficient d'absorption des sables recyclés demeure complexe. En effet, les normes belges et canadiennes sont principalement adaptées aux granulats naturels et ne prennent pas pleinement en compte les spécificités des granulats recyclés (Courard & Bissonnette, 2025).

4.5 Préparation des mortiers

4.5.1 Mélanges de calibration

Une phase préliminaire de mise au point a été réalisée avant la production des mélanges définitifs. Cette étape a consisté à effectuer des formulations de calibration afin de valider les rapports eau/ciment (E/C) initialement définis, mais aussi à ajuster les dosages en adjuvants.

Plus précisément, les proportions de SRA (travaux de Barzaq Yasmine) et de superplastifiants (travaux de Millard Axel) ont été adaptées afin d'obtenir une consistance conforme aux exigences normatives.

Les mélanges ont été réalisés sur la base des mortiers de type RILEM (1350 g de sable, 450 g de ciment et 225 g d'eau). Les dosages ont également été établis en s'appuyant sur le document *Dosage et contrôle des mélanges de béton* (Kosmatka, S. H., et Wilson, M. L., 2016).

La fabrication des mortiers s'inscrit globalement dans le cadre des recommandations de la norme CSA A23.2-2C-04, tout en intégrant des adaptations liées aux contraintes expérimentales. En particulier, l'utilisation de sables à granulométrie étendue (0/4 mm) s'est révélée incompatible avec les malaxeurs mécaniques disponibles au laboratoire, conçus pour des matériaux plus fins. Afin de garantir un mélange adéquat, un malaxage manuel s'est imposé. Le mélange a ainsi été réalisé à l'aide d'un malaxeur manuel, présenté à la Figure 24.



FIGURE 24 – Malaxeur manuel utilisé pour la préparation des mélanges

L'ensemble des formulations a été préparé selon une procédure identique, afin de limiter les variations expérimentales et d'assurer la reproductibilité des essais.

Le protocole de malaxage adopté comprend les étapes suivantes :

- (a) Préparation des matériaux et du matériel ;
- (b) Introduction des constituants secs dans le récipient de mélange ;
- (c) Homogénéisation à sec pendant 2 minutes ;
- (d) Ajout de l'eau de gâchage avec l'incorporation des SRA/Superplastifiants dans celle-ci ;

(e) Malaxage pendant 5 minutes jusqu'à obtention d'une pâte homogène.

4.5.2 Essai de consistance sur le mortier frais : *Slump Test*

La consistance du mortier à l'état frais constitue un paramètre déterminant, car elle conditionne sa mise en œuvre, notamment sa capacité de mise en place, de compactage et d'adhérence aux supports. Elle influe également sur l'homogénéité du matériau et, par conséquent, sur ses performances mécaniques finales. L'évaluation de cette propriété est donc essentielle dans le cadre de la formulation des mortiers.

La consistance des mélanges a été caractérisée au moyen d'un essai d'étalement conforme à la norme ASTM C1437, réalisé à l'aide d'une table d'écoulement répondant aux spécifications de la norme ASTM C230/C230M. Ce dispositif permet de provoquer l'écoulement du mortier frais par l'application de chocs répétés, afin d'en apprécier la fluidité.

Le mortier frais est initialement placé dans un moule tronconique (100 mm à la base, 70 mm au sommet et une hauteur de 50 mm) positionné au centre de la table d'essai, dont la surface circulaire présente un diamètre de 254 ± 2 mm et est soumise à des chutes verticales de 12,5 mm.

Après remplissage en deux couches avec compactage intermédiaire (20 coups/couche), le moule est retiré, permettant au matériau de se déformer librement sous l'effet des sollicitations mécaniques. L'application de 25 chutes successives entraîne un étalement radial du mortier, dont l'amplitude reflète directement sa consistance.



(a) Avant les 25 chutes



(b) Après les 25 chutes

FIGURE 25 – Table à secousse standardisée

L'étalement obtenu est quantifié par la mesure du diamètre final du mortier, relevé selon

deux directions orthogonales. La valeur moyenne de ces mesures constitue l'indicateur retenu pour caractériser l'ouvrabilité des mélanges. Pour que l'essai soit considéré conforme aux objectifs de formulation, une valeur cible d'étalement de 200 mm est recherchée, avec une tolérance admissible de ± 5 mm.

4.5.3 Détermination du rapport E/L et teneur en eau

L'ajustement du rapport eau/liant (E/L) a fait l'objet d'une phase expérimentale réalisée par T. Mettlen. (2025), vérifiée et reprise cette année afin de conserver le même paramètre pour permettre des comparaisons, en raison de son rôle déterminant sur la maniabilité des mortiers.

En effet, l'introduction de sables recyclés a modifié de manière significative le comportement des mélanges. Ces éléments ont conduit à des différences marquées en termes de maniabilité, rendant nécessaire une adaptation du rapport E/L pour chaque type de formulation. L'objectif poursuivi est d'obtenir une consistance équivalente entre les mélanges, évaluée à partir de l'essai d'étalement présenté précédemment.

Les valeurs retenues à l'issue de cette phase sont les suivantes :

- Mortiers à base de sable naturel (100 % NS) : $E/L = 0,40$ à $0,50$;
- Mortiers mixtes (50 % NS – 50 % RS1) : $E/L = 0,45$ à $0,55$;
- Mortiers à base de sable recyclé (100 % RS1/RS2) : $E/L = 0,60$.

Un point particulièrement complexe a été la variabilité de la teneur en eau du RS1. En effet, les conditions de stockage (à l'extérieur en hiver) ont entraîné une humidité supplémentaire non maîtrisée. La teneur en eau a été mesurée chaque semaine et variait entre 15 et 17 %. Le sable était donc le plus souvent saturé, nécessitant un ajustement de la quantité d'eau ajoutée. Aucune information n'est disponible sur la teneur en eau du RS1 utilisé par Thibault Mettlen à part qu'il venait d'être livré et était plutôt sec.

4.5.4 Description des mélanges finaux étudiés

Les compositions des mélanges finaux ainsi que leur consistance sont regroupés par type de mélange dans les Tableaux 7 à 11. Les formulations retenues intègrent l'ensemble des ajustements issus des phases de calibration réalisées en laboratoire et correspondent donc aux conditions définitives utilisées pour la fabrication des éprouvettes finales.

TABLE 7 – Mélanges avec agent expansif type MgO

Mélanges type MgO	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	6,77	-	-	2,7
Masse sable RS1 [kg]	-	5,85	-	2,7
Masse sable RS2 [kg]	-	-	4,43	-
Masse ciment GU [kg]	2,14	1,85	1,40	1,71
Masse agent M [kg]	0,113	0,097	0,74	0,090
Volume d'eau [mL]	1155	1144	1102	963
Absorption [mL]	39	886	288	424
Consistance [mm]	205	200	205	195-200

TABLE 8 – Mélanges avec agent expansif type MgO+SRA

Mélanges type MgO+SRA	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	6,77	-	-	2,7
Masse sable RS1 [kg]	-	5,85	-	2,7
Masse sable RS2 [kg]	-	-	4,43	-
Masse ciment GU [kg]	2,14	1,85	1,40	1,71
Masse agent M+SRA [kg]	0,113	0,097	0,74	0,090
Volume d'eau [mL]	1155	1144	1102	963
Absorption [mL]	39	886	288	424
Consistance [mm]	200-205	205	205	200

TABLE 9 – Mélanges avec adjuvant réducteur de retrait type SRA

Mélanges type SRA	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	6,77	-	-	2,7
Masse sable RS1 [kg]	-	5,85	-	2,7
Masse sable RS2 [kg]	-	-	4,43	-
Masse ciment GU [kg]	2,26	1,95	1,47	1,79
Masse SRA [kg]	0,0451	0,039	0,0295	0,0359
Volume d'eau [mL]	1108	1011	1072	906
Absorption [mL]	39	886	288	424
Consistance [mm]	205	205	205	200

TABLE 10 – Mélanges avec agent expansif type K+SRA

Mélanges type K+SRA	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	6,77	-	-	2,7
Masse sable RS1 [kg]	-	5,85	-	2,7
Masse sable RS2 [kg]	-	-	4,43	-
Masse ciment GU [kg]	1,92	1,66	1,25	1,53
Masse agent K [kg]	0,338	0,292	0,221	0,269
Masse SRA [kg]	0,0451	0,039	0,0295	0,0359
Volume d'eau [mL]	1108	1011	1072	906
Absorption [mL]	39	886	288	424
Consistance [mm]	200	195	205	195-200

TABLE 11 – Mélanges avec agent expansif type G+SRA

Mélanges type G+SRA	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	6,77	-	-	2,7
Masse sable RS1 [kg]	-	5,85	-	2,7
Masse sable RS2 [kg]	-	-	4,43	-
Masse ciment GU [kg]	2,03	1,75	1,33	1,62
Masse agent G [kg]	0,226	0,195	0,147	0,179
Masse SRA [kg]	0,0451	0,039	0,0295	0,0359
Volume d'eau [mL]	1108	1011	1072	906
Absorption [mL]	39	886	288	424
Consistance [mm]	200-205	195-200	205-210	205

Mélanges finaux de référence [METTLLEN.T (2025)]

Les compositions des mélanges de référence, issues des travaux de Thibault Mettlen (2025), ainsi que leur consistance, sont présentées dans le Tableau 12. Ces formulations servent de base de comparaison pour l'analyse des effets des différents agents et adjuvants.

TABLE 12 – Mélanges de référence

Mélanges type standard	NS	RS1	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	6,61	-	2,62
Masse sable RS1 [kg]	-	5,71	2,62
Masse ciment GU [kg]	2,20	1,90	1,74
Volume d'eau [mL]	1127	1067	936
Absorption [mL]	38	865	412
Consistance [mm]	200	200	200

4.6 Evaluation du retrait libre

La variation dimensionnelle des mortiers durcis résulte de plusieurs mécanismes combinés, notamment la consommation d'eau lors des réactions d'hydratation, les échanges d'humidité avec l'environnement et l'évolution de la structure poreuse. Le suivi de l'évolution dimensionnelle des éprouvettes constitue un indicateur pertinent pour évaluer la stabilité du mortier au cours du temps.

4.6.1 Procédure expérimentale

Le suivi du retrait libre a été réalisé en quantifiant l'évolution de la longueur d'éprouvettes au cours du temps dans des conditions de séchage maîtrisées. Cette approche, basée sur les recommandations de la norme ASTM C157, permet d'accéder à une estimation fiable des déformations différées des matériaux cimentaires.

Bien que les phénomènes de retrait se développent dans les trois directions de l'espace, seule la composante longitudinale a été suivie. Ce choix repose sur le fait que la dimension principale de l'éprouvette amplifie les variations mesurées dans cette direction, rendant leur détection plus fiable et leur interprétation plus pertinente.

Les variations de longueur ont été mesurées à l'aide d'un dispositif de type comparateur, permettant de relever avec précision les écarts dimensionnels entre différentes échéances. L'appareil illustré sur la Figure 26 repose sur une structure rigide assurant la stabilité des mesures, associée à un système de lecture de haute précision et à une barre de référence en Invar utilisée pour l'étalonnage. Avant chaque série de mesures, le dispositif est calibré à l'aide de cette tige de référence, dont la longueur constante est de 303,124 mm, garantissant ainsi la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus.



FIGURE 26 – Comparateur de longueur avec tige de référence

4.6.2 Mode opératoire

Préparation et huilage des moules

Le choix des dimensions des éprouvettes résulte d'un compromis entre les exigences de précision des mesures de retrait et les contraintes liées à la disponibilité des matériaux. Des barrettes de section 25×25 mm et de longueur 285 mm, conforme à la norme ASTM C490/C490M, ont ainsi été retenues, cette configuration permettant de mesurer efficacement les variations longitudinales tout en optimisant la quantité de matériau utilisée. Cette contrainte s'est révélée particulièrement importante pour certains sables recyclés, notamment le RS2, dont les volumes disponibles étaient limités.

Avant le coulage, les moules ont été préparés par application d'un agent de démoulage non réactif, en l'occurrence une huile de coffrage disponible au laboratoire de l'Université Laval. Cette étape vise à faciliter l'extraction des éprouvettes tout en préservant leur intégrité géométrique, notamment au niveau des arêtes.

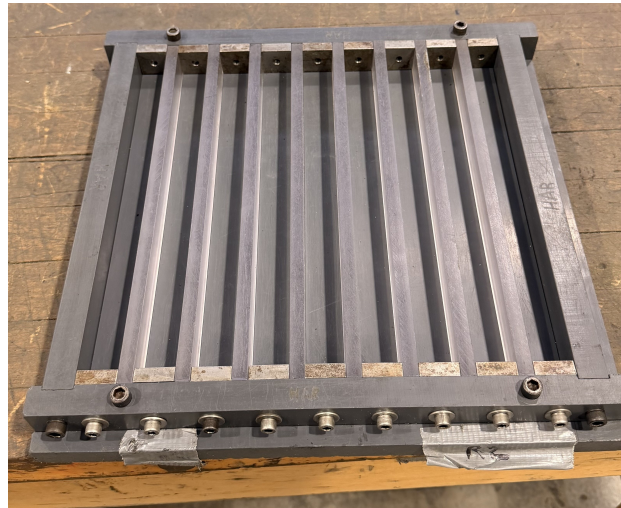


FIGURE 27 – Moules pour la fabrication des éprouvettes

Des goujons de jauge en acier inoxydable (type H-3260) ont également été intégrés à chaque extrémité des éprouvettes lors du coulage. Ces éléments sont préalablement vissés manuellement dans les moules, à chaque extrémité (cf. Figure 27 et Figure 28), afin d'assurer leur positionnement correct. Ils constituent des points de référence normalisés pour les mesures de longueur.

En effet, l'utilisation de ce type de goujons permet d'assurer un appui constant et défini, qui contribuent à réduire les erreurs de lecture et à renforcer la fiabilité du suivi des déformations au cours du temps.

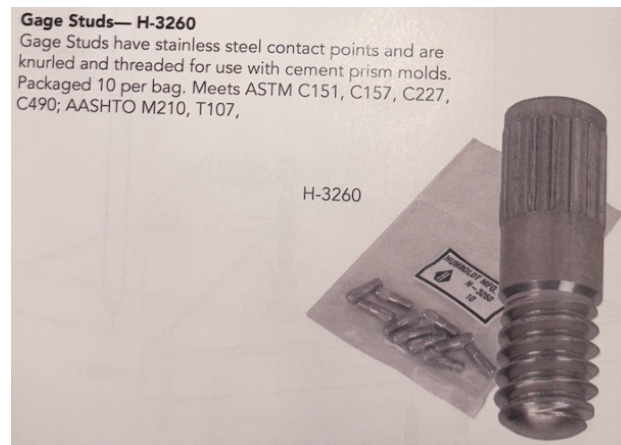


FIGURE 28 – Goujons de jauge H-3260

Moulage des éprouvettes

Après validation de la consistance du mélange final au moyen de l'essai d'étalement, le remplissage des moules a été réalisé de manière progressive selon les étapes suivantes :

- (a) Le mortier a été introduit en deux phases successives de volume similaire, chacune suivie d'un compactage manuel à l'aide d'une tige. Cette opération permet de limiter la présence d'air et d'assurer une bonne homogénéité du matériau.
- (b) Une fois le moule entièrement rempli, la surface a été soigneusement lissée à l'aide d'un outil rigide, afin d'obtenir une surface plane.
- (c) Immédiatement après le moulage, les éprouvettes ont été protégées afin de limiter les pertes d'humidité. À cet effet, elles ont été recouvertes d'un tissu humide, puis d'un film plastique étanche, assurant ainsi des conditions favorables à la prise initiale du mortier.

Démoulage des éprouvettes

L'extraction des éprouvettes hors des moules a été réalisée à un stade précoce de durcissement, avec des délais différenciés selon la nature des formulations :

- Environ **8 heures** pour les mélanges contenant des agents expansifs ;
- Environ **9 à 10 heures** pour ceux intégrant des superplastifiants, certains mélanges vont même jusqu'à **17 heures**.

Ces délais ont été définis de manière à garantir une résistance suffisante pour la manipulation des éprouvettes. Ils permettent également d'initier les premières mesures à un stade précoce, afin de capter l'évolution des phénomènes liés aux différents constituants sans perte significative d'information.

NB : En raison de la faible cohésion du matériau à jeune âge, certaines éprouvettes ont pu présenter des défauts lors du démoulage, allant dans certains cas jusqu'à la rupture. Néanmoins, ces occurrences sont restées limitées et n'ont pas compromis la validité du programme expérimental, le nombre d'échantillons exploitables demeurant suffisant pour garantir la fiabilité des résultats.

Période de cure humide

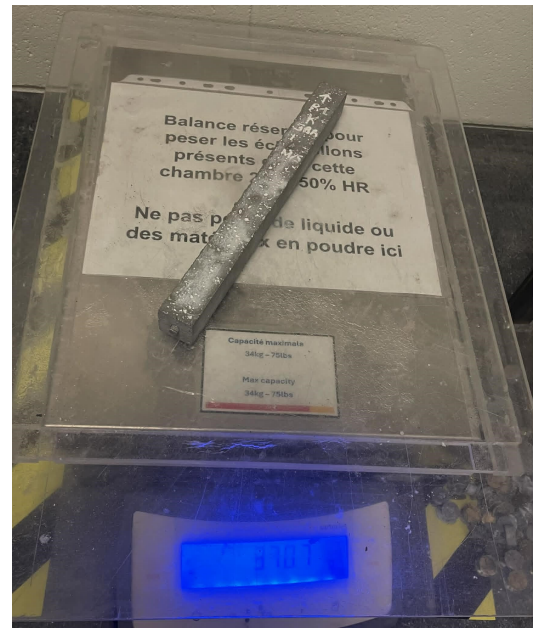
Afin de favoriser la réaction des agents expansifs et de limiter les effets de dessiccation précoce, les éprouvettes ont été maintenues en environnement saturé pendant une durée de sept jours. Cette phase a été réalisée dans des contenants hermétiques remplis d'eau de chaux saturée, eux-mêmes placés dans une enceinte régulée à une humidité relative d'environ 50 ± 4 % et à une température de 23 ± 2 °C. Ce dispositif permet de créer un milieu favorable à la poursuite des réactions chimiques du liant, tout en réduisant les gradients d'humidité au sein du matériau.

Un suivi temporel a été mis en place dès les premières heures suivant le démoulage, avec des relevés de longueur (Figure 29a) et de masse (Figure 29b) effectués à des échéances rapprochées (jour 0, puis jours 1, 3 et 7, avec ajustements si nécessaire).

L'objectif de ce suivi est de caractériser les évolutions précoces du matériau, en captant à la fois les déformations et les échanges hydriques.



(a) Mesure du retrait d'une éprouvette



(b) Pesée d'une éprouvette

FIGURE 29 – Relevé régulier des informations de masse et de longueur des éprouvettes

L'analyse conjointe de ces mesures met en évidence des phénomènes transitoires caractéristiques des premiers âges. D'une part, une prise de masse peut être observée, traduisant l'absorption d'eau dans un milieu saturé. D'autre part, certains mélanges présentent une augmentation de volume, liée à l'action des agents expansifs. Ces derniers génèrent, lors de leur hydratation, des contraintes internes susceptibles de provoquer une expansion mesurable, particulièrement marquée dans un environnement riche en eau.

Période de séchage et suivi du retrait libre

Le passage d'un environnement saturé à un milieu non saturé marque le début de la phase de séchage, caractérisée par l'apparition progressive du retrait de dessiccation.

Après sept jours de cure humide, les éprouvettes ont été retirées de leur milieu de conservation et exposées à l'air dans une pièce maintenue à une humidité relative de $50 \pm 4 \%$ et à une température de $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tel qu'illustré sur la Figure 30. Ce changement de conditions impose un gradient hydrique entre le matériau et son environnement, à l'origine des transferts d'eau responsables des déformations observées.



FIGURE 30 – Stockage des éprouvettes après cure humide

Afin de suivre ces évolutions, un calendrier de mesures a été établi avec des relevés réalisés à des échéances régulières (1, 3, 7, 14 et 28 jours, avec ajustements si nécessaire). À chaque étape, la déformation longitudinale a été déterminée à l'aide du comparateur de longueur, après étalonnage du dispositif, tandis que la masse des éprouvettes a été simultanément mesurée à l'aide d'une balance.

L'analyse croisée de ces données permet de mettre en relation les pertes de masse, associées aux flux d'humidité vers l'extérieur, et les contractions dimensionnelles du matériau. Cette approche contribue à mieux comprendre les mécanismes gouvernant le retrait en conditions de séchage.

4.6.3 Conditionnement spécifique : barettes sous cycles mouillage/séchage

En complément du protocole de suivi standard, un sous-ensemble d'éprouvettes, identifié dans le Tableau 13, a été soumis à un conditionnement cyclique alternant des phases de saturation et de séchage.

TABLE 13 – Synthèse des mélanges soumis aux cycles de séchage/mouillage

Mélange	Sable	Agent/Adjuvant	Condition
M-0.5-NS-SRA	NS	SRA	Cycles S/M
M-0.5-RS1-SRA	RS1	SRA	Cycles S/M
M-0.5-NS-K100/SRA	NS	K100 + SRA	Cycles S/M
M-0.5-RS1-K100/SRA	RS1	K100 + SRA	Cycles S/M
M-0.5-NS-NE	NS	Aucun	Cycles S/M
M-0.5-RS1-NE	RS1	Aucun	Cycles S/M

Après démoulage, ces éprouvettes ont d’abord été conservées en immersion dans l’eau de chaux pendant sept jours, conformément au protocole appliqué aux éprouvettes de référence. Elles ont ensuite été transférées en ambiance contrôlée (humidité relative de $50 \pm 4 \%$, température d’environ $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$) pour une durée équivalente de sept jours. Ce cycle a été répété tout au long de la période expérimentale.

Ce type de conditionnement vise à reproduire des variations hydriques plus représentatives de conditions réelles d’exposition, où les matériaux sont soumis à des cycles induisant des contraintes internes liées aux phases successives de gonflement (lors de l’absorption d’eau) et de contraction (lors du séchage), susceptibles d’amplifier les phénomènes de fissuration.

L’intérêt de ce protocole réside dans l’évaluation de la stabilité dimensionnelle des mortiers soumis à des sollicitations hydriques répétées, ainsi que dans l’analyse de l’efficacité des agents expansifs dans des conditions plus sévères que celles d’un séchage monotone. Il permet ainsi d’appréhender le comportement du matériau dans des situations proches de celles rencontrées en service, notamment en termes de durabilité et de résistance aux dégradations induites par les cycles environnementaux.

4.6.4 Calcul du retrait libre

Le retrait libre correspond à la déformation longitudinale du matériau au cours du temps, traduisant une variation dimensionnelle liée aux phénomènes physico-chimiques internes.

Afin de rendre les résultats comparables, cette déformation est exprimée relativement à une longueur de référence fixée à 250 mm (cf. Figure 31), conformément aux recommandations des normes ASTM C490 & C157. Ce mode de normalisation permet d’éliminer l’influence des dimensions réelles des éprouvettes sur les résultats.

Une réduction de la longueur de l’éprouvette se traduit par une valeur négative, caractéristique d’un retrait, tandis qu’une augmentation de longueur correspond à une valeur positive, indiquant un phénomène d’expansion.

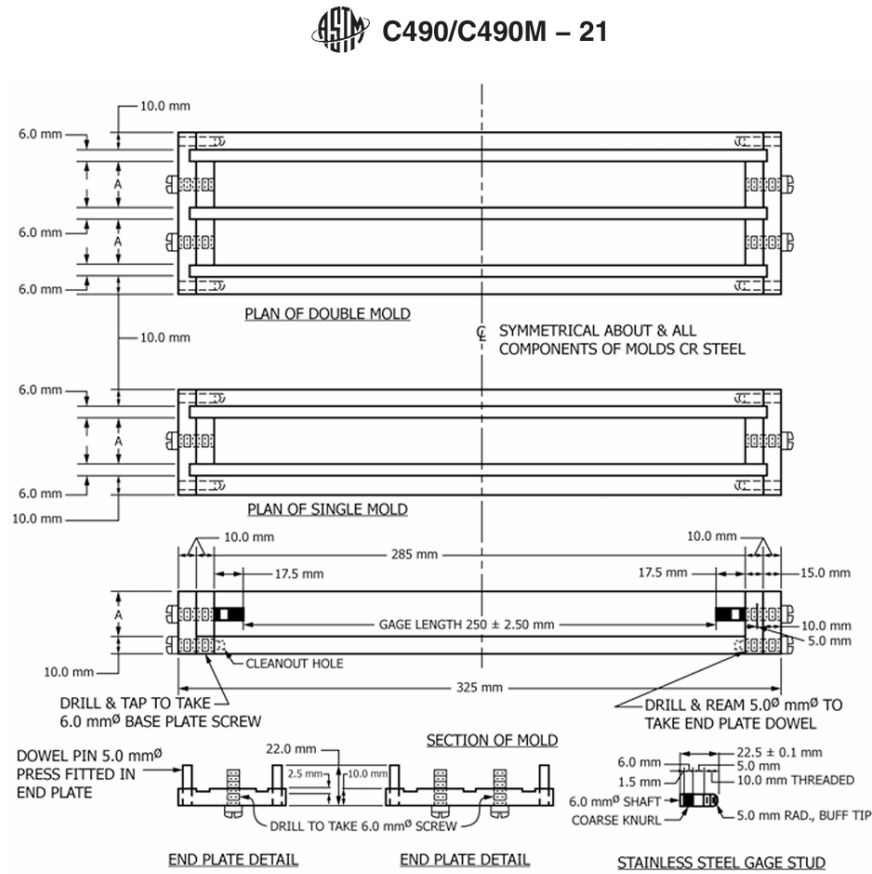


FIGURE 31 – Norme ASTM C490 : Longueur de référence considérée

L'expression du retrait peut être déterminée via la formule suivante :

$$\text{Retrait} = \frac{L_t - L_0}{250} \cdot 10^6 [\mu\text{m}/\text{m}]$$

avec L_0 la longueur initiale de l'éprouvette après démoulage et L_t la longueur mesurée à un instant donné t . Le facteur 10^6 permet de convertir la déformation en micromètres par mètre, unité couramment utilisée pour ce type de mesure.

4.7 Essais de caractérisation mécaniques

Les performances mécaniques des différents mélanges ont été évaluées au moyen d'essais permettant de déterminer la résistance à la compression, la résistance en traction indirecte par fendage et le module de Young.

L'essai de compression a été réalisé conformément à la norme ASTM C109, l'essai de traction indirecte selon la norme ASTM C496, et le module de Young a été déterminé à partir d'une adaptation de la norme ASTM C469, en raison de l'absence du matériel requis. Ces essais ont fourni des informations essentielles sur le comportement des mortiers durcis.

Par ailleurs, afin de limiter la consommation de matériau, les essais présentés dans la suite ont été réalisés sur les plus petites éprouvettes compatibles avec les exigences normatives. Cette approche visait également à optimiser l'utilisation des matériaux disponibles, notamment dans le cas du sable RS2, dont la quantité était limitée.

4.7.1 Essai de résistance à la compression

L'évaluation de la résistance à la compression des mortiers a été réalisée conformément à la norme ASTM C109 (*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*), qui définit la méthode d'essai applicable aux mortiers de ciment hydraulique au moyen d'éprouvettes cubiques de 50 mm de côté. Cette norme précise les conditions de préparation, de moulage, de conservation et d'essai nécessaires à l'obtention de résultats fiables en compression.

Avant le coulage, une attention particulière a été portée à la préparation des moules. Ceux-ci ont été soigneusement nettoyés, puis légèrement huilés sur leurs parois internes afin de faciliter le démoulage après durcissement, sans modifier la géométrie ni l'état de surface des éprouvettes. Le mortier a ensuite été introduit dans les moules en deux couches successives, chacune faisant l'objet d'un compactage conforme au protocole de damage prescrit par la norme. Chaque couche a ainsi reçu huit coups de compactage, répartis en deux rangées de quatre coups afin d'assurer une densification homogène du matériau. Un vibrage manuel a également été appliqué afin de favoriser le dégazage du mélange. Après le moulage, les éprouvettes ont été immédiatement recouvertes d'un tissu humide, puis enveloppées dans un film plastique afin de limiter les pertes d'eau par évaporation durant les premières heures de prise. Une fois démoulés, les cubes ont été conservés dans des barils remplis d'eau saturée en chaux, jusqu'à l'âge de 28 jours. Après cette période, les arêtes ont été légèrement limées afin de limiter les concentrations de contraintes au moment de l'essai, et d'avoir des faces planes.

L'essai de compression consiste ensuite à appliquer une charge axiale croissante à l'aide d'une presse hydraulique, illustré à la figure 32, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance en compression est calculée en rapportant la charge maximale mesurée à la surface chargée de l'échantillon, puis exprimée en mégapascals (MPa).



FIGURE 32 – Presse hydraulique Instron

4.7.2 Essai de résistance à la traction indirecte par fendage

L'essai de traction indirecte a été réalisé conformément à la norme ASTM C496 (*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*). Il s'agit d'un essai de fendage, fondé sur l'application d'une charge diamétrale croissante sur une éprouvette cylindrique placée horizontalement entre les plateaux de la presse. Cette sollicitation engendre une traction transversale à l'origine d'une fissuration longitudinale, à partir de laquelle la résistance en traction du matériau peut être estimée de manière indirecte.

Dans ce travail, des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur ont été utilisées. Ce choix correspond à un rapport hauteur/diamètre de 2 :1, compatible avec les recommandations de la norme ASTM C496, qui préconise un rapport compris entre 1,8 et 2,2 afin de limiter les effets parasites liés au flambement ou à des concentrations de contraintes.

Avant le moulage, une fine couche d'huile de décoffrage a été appliquée sur les parois internes des moules, dans le but de faciliter le démoulage après la prise. Le moulage a ensuite été effectué en deux couches, chacune ayant été compactée de manière homogène à l'aide d'une tige, 20 coups par couche, puis complété par une vibration manuelle afin de réduire la présence de bulles d'air susceptibles d'influencer les résultats.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans des barils d'eau saturée en chaux jusqu'à l'âge d'essai de 28 jours. Cette phase de cure est essentielle pour permettre une hydratation adéquate du liant.

Avant l'essai, les surfaces d'appui du cylindre ont été soigneusement préparées de manière à

être planes et perpendiculaires à l'axe longitudinal, afin de réduire les effets de flexion et d'éviter une répartition irrégulière des contraintes. Lors de l'essai, l'éprouvette est disposée horizontalement entre deux bandes de chargement souples (ici MDF), qui favorisent une transmission plus uniforme de l'effort et limitent les concentrations locales de contraintes. Une charge croissante est ensuite appliquée à l'aide d'une presse de compression jusqu'à la rupture. La figure 33 illustre le dispositif utilisé pour l'essai de traction indirecte par fendage. L'éprouvette est disposée horizontalement dans un système de maintien métallique assurant un positionnement stable et précis. Cette configuration permet de reproduire les conditions normalisées de l'essai tout en assurant une sollicitation régulière du matériau.



FIGURE 33 – Essai de résistance à la traction : dispositif sur la presse (INSTRON)

La résistance en traction par fendage est calculée à partir de la charge maximale atteinte au moment de la rupture selon l'expression suivante :

$$T = \frac{2F}{\pi LD} \quad (4.2)$$

où :

- T représente la résistance en traction indirecte [MPa] ;
- F est la charge maximale appliquée [N] ;
- L est la longueur de l'éprouvette [mm] ;
- D est le diamètre du cylindre[mm].

La norme ASTM C496 permet d'estimer indirectement la résistance en traction des matériaux cimentaires sur base d'hypothèse à partir d'un essai de fendage, et elle demeure pertinente pour comparer différents mélanges lorsque les conditions de préparation et de mise en charge sont rigoureusement contrôlées.

4.7.3 Evaluation du module de Young

Le module de Young des différents mélanges a été déterminé à partir d'une adaptation de la norme ASTM C469 (*Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*), qui décrit la méthode de mesure du module d'élasticité des cylindres de béton soumis à compression. Dans le cadre de ce travail, les mêmes éprouvettes cylindriques que celles utilisées pour l'essai de traction indirecte ont été employées, soit des cylindres de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur. Leur préparation est donc identique à celle décrite à la section 4.7.2.

Selon le principe de la norme, l'essai repose sur l'application d'une charge de compression contrôlée sur l'éprouvette, tout en mesurant simultanément sa déformation longitudinale à l'aide d'une cage d'extensométrie. La courbe contrainte-déformation obtenue permet ensuite de calculer la pente de la portion linéaire, laquelle correspond au module de Young du matériau.

Cependant, la cage d'extensométrie nécessaire à l'application stricte de la norme n'étant pas disponible au laboratoire pour des cylindres de 50×100 mm, l'essai a été adapté en utilisant la presse de compression, comme illustré à la figure 34. Les éprouvettes ont été soumises à trois cycles de chargement jusqu'à 40 % de la résistance en compression (obtenu grâce à l'essai de la section 4.7.1), afin d'obtenir une réponse représentative du comportement élastique du matériau.



FIGURE 34 – Dispositif module de Young (INSTRON)

Cette approche permet d'établir une comparaison entre les modules d'élasticité des différents mélanges. Néanmoins, les valeurs absolues obtenues doivent être interprétées avec prudence, puisque le déplacement mesuré correspond à celui du système de la presse complet et ne reflète pas uniquement la déformation réelle de l'éprouvette. De plus, l'essai a été réalisé sur un seul

échantillon afin de ne pas compromettre l'intégrité des autres éprouvettes nécessaires à l'essai de fendage. Les résultats demeurent donc principalement pertinents dans une perspective comparative entre les formulations étudiées.

Les trois chargements ont permis d'obtenir des courbes contrainte-déformation. Il est toutefois apparu rapidement que le premier chargement introduisait une part importante de déplacements parasites, cette courbe a donc été exclue du calcul de la moyenne. Le module de Young a ainsi été déterminé à partir de la moyenne des modules obtenus lors des chargements 2 et 3, selon la formule proposée par la norme ASTM C469 :

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (4.3)$$

où :

- E = module d'élasticité, en MPa ;
- S_2 = contrainte correspondant à 40 % de la charge ultime ;
- S_1 = contrainte correspondant à une déformation longitudinale ϵ_1 de 50 millionnièmes ;
- ϵ_2 = déformation longitudinale produite par la contrainte S_2 .

Il est à noter que 3 autres méthodes de calcul du module ont été testées avant de valider l'utilisation de celle de la norme :

- la méthode par moyenne des n pentes locales,
- la tangente locale calculée au voisinage de 50 % de la contrainte appliquée,
- et la tangente locale calculée au voisinage de 90 % de la contrainte appliquée.

4.8 Essai d'absorption

4.8.1 Description de l'essai

L'absorption à l'état durci a été déterminée à partir d'une adaptation de la norme ASTM C642 (*Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*), qui permet la mesure de la masse volumique, de l'absorption et des vides perméables dans le béton durci. Dans le cadre de cette étude, le même principe a été appliqué à des mortiers afin d'évaluer leur comportement hydrique après durcissement.

Les éprouvettes utilisées pour cet essai étaient des cylindres de 50×100 mm, d'une masse d'environ 400 g. Bien que ce format soit inférieur aux dimensions recommandées par la norme ASTM C642 pour le béton (350 cm^3), leur dimension reste suffisante pour appliquer

l'essai de manière pertinente à des mortiers. Cette adaptation se justifie donc par la nature même du matériau étudié.

En pratique, les éprouvettes de 50 mm de diamètre ont été retenues afin d'assurer une manipulation aisée et d'éviter une consommation excessive de matériau, notamment pour les mélanges dont la quantité disponible était limitée.

Le principe de l'essai consiste à comparer la masse de l'échantillon à l'état sec et sa masse après saturation en eau, de manière à déterminer la quantité d'eau absorbée par le matériau. Cette mesure fournit une indication indirecte de la porosité accessible à l'eau et permet de comparer le comportement hydrique des différents mortiers durcis. Tout cela est obtenu grâce aux formules suivante :

$$A = \text{masse sèche après étuvage à } 110\text{ }^{\circ}\text{C jusqu'à masse constante} \quad (4.4)$$

$$B = \text{masse saturée surface-sèche après immersion de 48 h} \quad (4.5)$$

$$C = \text{masse saturée surface-sèche après ébullition de 5 h} \quad (4.6)$$

$$D = \text{masse immergée de l'éprouvette saturée après ébullition} \quad (4.7)$$

Procédure expérimentale

- (a) **Étuver les échantillons** à $110 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ce que la variation de masse soit inférieure à 0,1 % sur 24 h, afin d'obtenir la masse sèche A ;
- (b) **Immerger les échantillons** pendant au moins 48 h dans de l'eau à environ $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, puis les essuyer en surface avant de mesurer la masse saturée surface-sèche B ;
- (c) **Faire bouillir les échantillons** pendant 5 h dans l'eau, puis les laisser refroidir pendant au moins 14 h avant de les essuyer et de mesurer la masse saturée surface-sèche C ;



FIGURE 35 – Mise en ébullition des échantillons.

- (d) **Mesurer la masse immergée** en suspendant l'échantillon saturé après ébullition à

l'aide d'un fil dans de l'eau à environ 21 °C, afin d'obtenir la masse déjaugée D .



FIGURE 36 – Mesure de la masse déjaugée à l'aide d'un dispositif relié à la balance.

Les différentes masses mesurées au cours de l'essai permettent de déterminer plusieurs paramètres caractéristiques des mélanges :

$$\text{Absorption par immersion} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (4.8)$$

$$\text{Absorption après ébullition} = \frac{C - A}{A} \times 100 \quad (4.9)$$

$$\text{Densité sèche} = \frac{A}{C - D} \times 1000 \quad (4.10)$$

$$\text{Densité apparente} = \frac{B}{B - D} \times 1000 \quad (4.11)$$

$$\text{Teneur en vides} = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (4.12)$$

Ces indicateurs fournissent une estimation du comportement hydrique du matériau à l'état durci, notamment sa capacité d'absorption et sa porosité accessible à l'eau. Ils permettent également de comparer l'influence des différentes formulations sur la compacité et la structure interne des mortiers.

4.9 Essai du *German Angle*

Afin d'évaluer la sensibilité à la fissuration des matériaux soumis à une contrainte de retrait, l'essai du *German Angle* a été retenu. Développé à l'Université de Aachen, cet essai de retrait restreint permet de reproduire la situation dans laquelle un matériau se rétracte tout en étant maintenu par un support rigide, ce qui engendre des contraintes de traction susceptibles de provoquer l'apparition de fissures. Cet essai appartient aux méthodes de retrait restreint par support rigide, visant à reproduire le comportement de matériaux liés à un substrat rigide (béton ou acier).

Le dispositif repose sur un profilé métallique en cornière, dont les dimensions sont présentées à la Figure 37. Et dont le ratio section mortier/ section acier est : $\frac{A_{mortier}}{A_{acier}} = \frac{1984.5}{931} = 2,13$

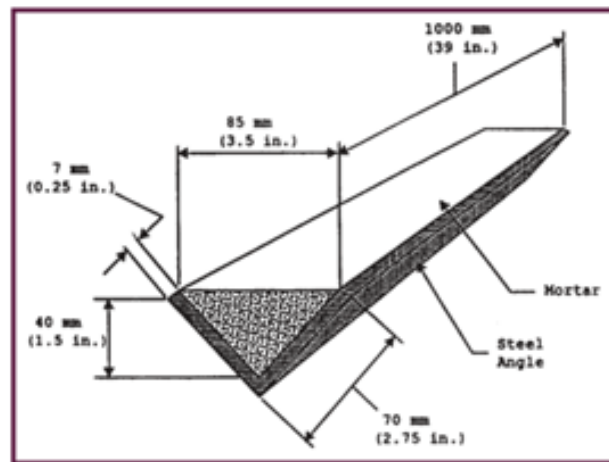


FIGURE 37 – Essai du German Angle (Emmons et al., 2000).

L'éprouvette consiste en une cornière en acier remplie de matériau, l'acier jouant le rôle de support de retenue. Le suivi des éprouvettes a été réalisé pendant 90 jours afin d'observer l'apparition de fissures, leur nombre, leur largeur moyenne et maximale. La largeur maximale admissible a été fixée à 0,1 mm.

Afin d'adapter l'essai aux contraintes expérimentales du laboratoire, les dimensions du profilé ont été réduites. Cette modification vise à faciliter la manipulation et le stockage des éprouvettes, tout en conservant une représentativité suffisante du comportement mécanique du système.

Deux variantes de profilés ont été étudiées au laboratoire : une cornière de mêmes caractéristiques géométriques mais de dimensions réduites, ainsi qu'un profilé en C (traité dans ce travail). L'objectif est de vérifier si l'adaptation de la méthode permet d'évaluer correctement le retrait restreint et le comportement fissurant des mélanges.

4.9.1 Procédure expérimentale

Préparation des profilés métalliques

La préparation des profilés a d'abord consisté à sabler la surface interne, c'est-à-dire la zone en contact avec le mortier, afin d'améliorer l'adhérence entre les deux matériaux. Des plots en laiton ont ensuite été collés sous les ailes du profilé à l'aide d'une colle époxy, dans le but de permettre le suivi des déformations.

Cette étape a toutefois mis en évidence une difficulté : les plots n'ont pas résisté à l'immersion dans l'eau de chaux. Une amélioration possible serait d'utiliser une colle plus résistante ou de mieux préparer la surface de collage. Enfin, afin d'assurer l'étanchéité du moule et d'éviter

les pertes de mortier aux extrémités, du ruban adhésif de type *duck tape* a été appliqué. Celui-ci est resté en place pendant toute la période de séchage afin de limiter les échanges d'humidité à ces endroits.

Coulage et compactage du mortier

Le profilé a ensuite été rempli avec le mortier frais. Le compactage a été réalisé à l'aide d'une tige métallique, par 20 coups répartis en deux séries de 10 le long de l'éprouvette. Une vibration manuelle a également été appliquée afin de favoriser le débullage et d'assurer une meilleure mise en place du matériau.

Immédiatement après le remplissage, les éprouvettes ont été recouvertes d'un tissu humide, puis enveloppées dans un film plastique, de manière à limiter les pertes d'eau par évaporation durant les premières heures de prise.

Cure humide et suivi des mesures

Les éprouvettes ont été immergées pendant 7 jours dans une eau saturée en chaux, selon le même protocole que celui utilisé pour les éprouvettes de retrait libre. Les mesures ont été réalisées aux mêmes échéances, soit à 0, 1, 3, 7, 14 et 28 jours.

Des photographies ont été prises à chaque étape afin de suivre l'apparition des fissures, leur nombre et leur ouverture. Après la période de cure, les éprouvettes ont été placées à 50 % HR afin de poursuivre le suivi de la fissuration.

Paramètres mesurés

TABLE 14 – Paramètres suivis durant l'essai

Paramètre	Méthode
Variation de masse	Pesée
Déformation	Jauge extensométrique (plots)
Présence de fissures	Photographie et analyse visuelle
Ouverture des fissures	Photographie et mesure

4.9.2 Variante A :

Pour la variante étudiée dans ce travail, le profilé métallique retenu est un profilé en V de *type bar size angle*, de dimensions $1\frac{1}{4} \times 1\frac{1}{4} \times 1\frac{1}{8}$, fourni par *Canada Steel*, et d'une longueur de 285 mm. Les dimensions en millimètres sont présentées à la Figure 38, tandis que la Figure 39 illustre l'aspect du profilé avec du mortier.

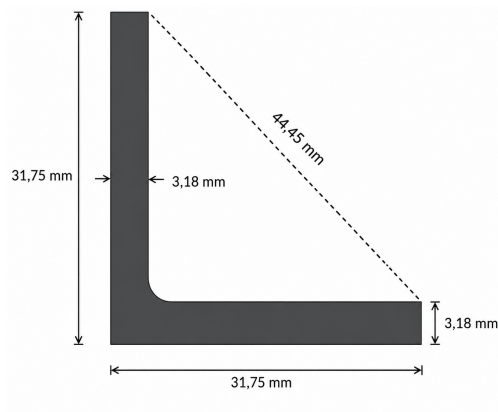


FIGURE 38 – Dimensions du profilé V

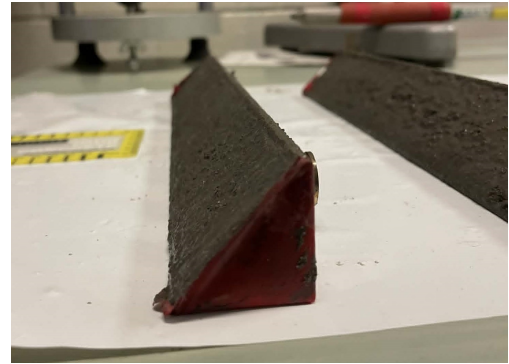


FIGURE 39 – Vue du profilé V

Le rapport entre la section de mortier et la section d'acier est ici de

$$\frac{A_{\text{mortier}}}{A_{\text{acier}}} = \frac{408,12245}{191,8176} = 2,128 \approx 2,13$$

Le même rapport que celui obtenu lors de l'essai de référence est ainsi retrouvé, ce qui indique que le protocole mis en œuvre dans le cadre de cette étude est représentatif pour l'observation et le suivi du développement des fissures au sein des échantillons testés.

5. Analyse et interprétation des résultats

5.1 Analyse du retrait des barettes

Les données relatives au retrait ont été obtenues conformément à la procédure décrite à la section 4.6 du chapitre 4 - Méthodologie.

La première mesure, effectuée au jour 0, constitue une donnée essentielle, car elle permet de définir un état de référence fiable pour le suivi de l'évolution du retrait au cours du temps. C'est pour cette raison qu'un temps de prise limité à 8 h a été adopté avant le démoulage, afin de commencer le suivi expérimental le plus tôt possible et de recueillir un maximum d'informations sur la phase d'expansion initiale.

Des mesures ont ensuite été réalisées quotidiennement afin d'observer la tendance générale du comportement au retrait des différents mélanges. Les résultats obtenus montrent que l'évolution observée pour l'ensemble des 23 formulations suit globalement la tendance présentée à la Figure 40.

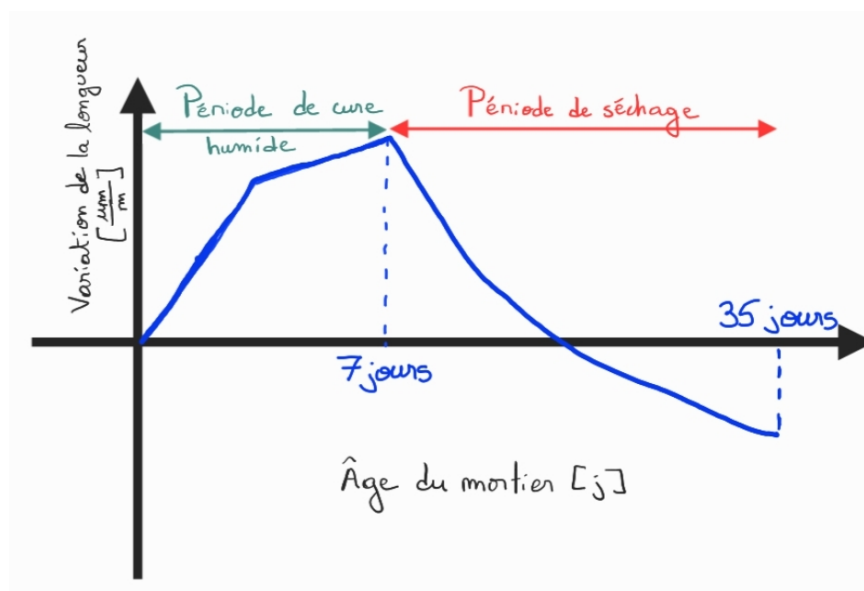


FIGURE 40 – Tendance générale de l'évolution du retrait

Une corrélation entre la variation de masse et le retrait sera également étudiée dans les sections suivantes afin d'évaluer le lien entre la perte d'eau des éprouvettes et leur variation dimensionnel.

Il convient également de préciser que les données brutes et graphiques de retraits par échantillon sont présentées à l'Annexe A.4.

Il est important de rappeler que les résultats sont issus de mesures expérimentales. Ils peuvent donc être influencés par certaines incertitudes, notamment liées à la calibration des appareils, aux conditions de mesure ou aux manipulations réalisées au cours de l'essai.

5.1.1 Les mélanges sans agent expansif

L'analyse de la Figure 41 montre que les formulations sans agent expansif présentent une phase d'expansion relativement faible durant les sept premiers jours de cure dans l'eau de chaux. Cette phase est ensuite suivie d'un retrait plus prononcé au cours de la période de séchage.

En comparant les différents types de sables¹, il apparaît clairement que les formulations à base de sable RS1 sont celles qui présentent le retrait final le plus important, avec une diminution de l'ordre de $-3000 \frac{\mu m}{m}$, après 35 jours. À l'inverse, le mélange à base de sable naturel NS présente le retrait le plus faible, soit environ $-768 \frac{\mu m}{m}$. Les mélanges composés de 50 % de NS et de 50 % de RS1 présentent quant à eux un comportement intermédiaire, avec un retrait de l'ordre de $-1540 \frac{\mu m}{m}$.

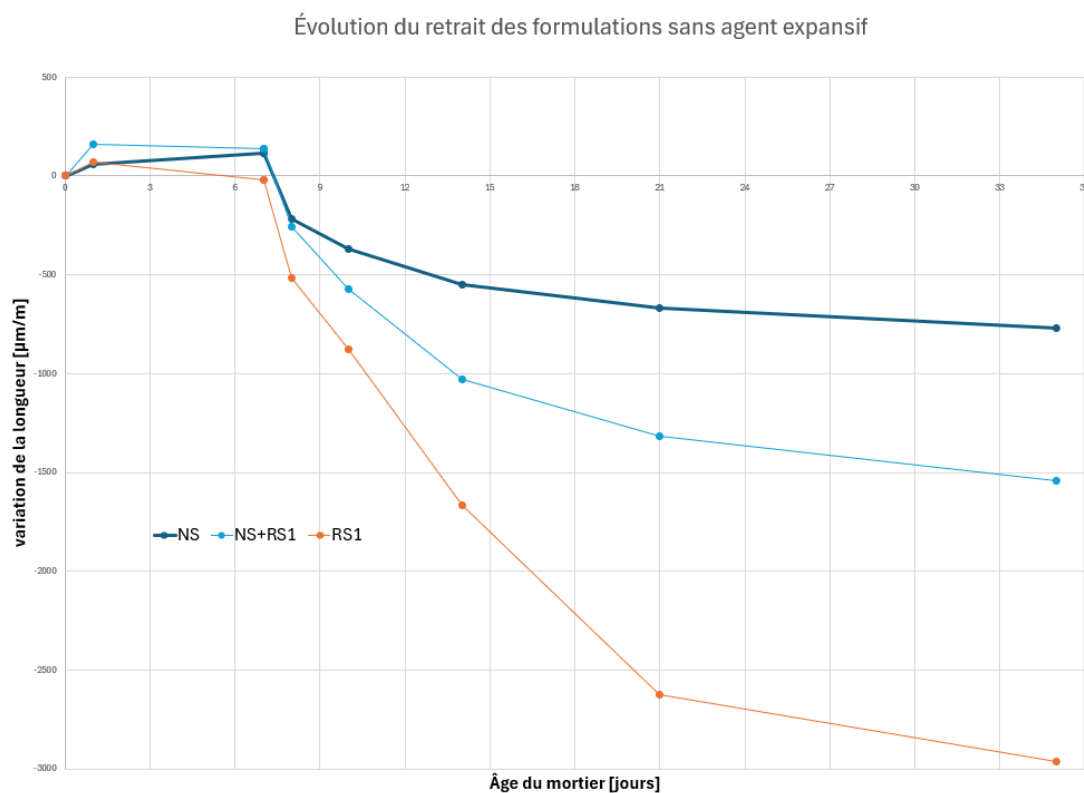


FIGURE 41 – Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges sans agent expansif

1. Aucune formulation de mélange sans agent compensateur de retrait n'a pu être réalisée pour le sable RS2 en raison de la quantité limitée de matériau disponible, insuffisante pour la fabrication d'éprouvettes supplémentaires.

Cette évolution reste cohérente avec l'interprétation physique du phénomène. En effet, en l'absence d'agent expansif, le retrait dominant observé après la période de cure correspond principalement au retrait de séchage. Durant les sept premiers jours de cure humide, les éprouvettes restent en milieu saturé, ce qui limite les pertes d'eau et permet la poursuite de l'hydratation du ciment GU. Cette hydratation conduit à la formation d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H), et de portlandite ($Ca(OH)_2$). Cela permet de justifier la légère augmentation du volume observée au début.

Lorsque les éprouvettes sont ensuite placées en conditions de séchage, l'eau présente dans les pores capillaires et au sein de la matrice cimentaire s'évapore progressivement. Cette perte d'eau entraîne le développement de tensions capillaires ainsi qu'une réorganisation du gel C-S-H, pouvant conduire au rapprochement des feuillets, à une densification locale de la microstructure et, par conséquent, à une contraction du matériau.

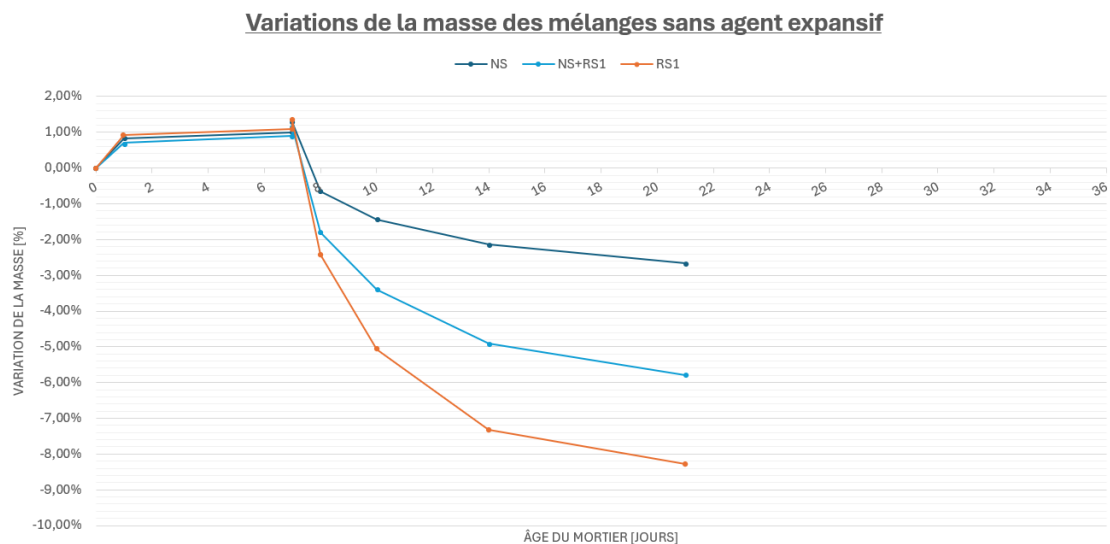


FIGURE 42 – Variations de la masse (moyennes) des mélanges sans agent expansif

La comparaison entre les variations de masse présentées à la Figure 42 et l'évolution du retrait permet un lien direct entre le séchage des éprouvettes et leur variation dimensionnelle. Durant la cure humide, les variations restent limitées : une légère prise de masse, proche du pourcent, est observée, accompagnée d'une faible expansion. Ce comportement peut être attribué à la saturation progressive des pores et à la poursuite de l'hydratation du liant.

Après le 7^e jour, une perte de masse marquée est observée, liée à l'évaporation de l'eau contenue dans le réseau poreux. Cette perte hydrique s'accompagne d'un retrait plus important, dont l'intensité varie selon la nature du sable utilisé.

De la même manière, un parallèle peut être établi avec la porosité des mélanges. En effet, plus un sable est poreux (caractéristique propre aux sables recyclés), plus sa capacité d'absorption d'eau est élevée. Cette absorption accrue peut modifier la disponibilité en eau au sein de la matrice cimentaire et favoriser un retrait plus marqué, augmentant ainsi le risque de

fissuration.

Ce comportement est donc cohérent avec les résultats obtenus précédemment, notamment ceux issus de l'analyse granulométrique présentée dans l'Annexe A.3, puisque les mélanges à base de sable RS1, identifié comme le sable le plus poreux parmi les trois sables, présentent le retrait le plus élevé.

Les variations de masse observées sont reprise dans le Tableau 15.

TABLE 15 – Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable (sans agent)

Type de sable	Δm [%]
NS	-2,66
RS1	-8,27
50 % NS – 50 % RS1	-5,79

Une comparaison peut être établie avec les résultats obtenus par T. Mettlen [17]. Les tendances observées dans ses travaux sont globalement similaires à celles présentées aux Figures 41 et 42, tant pour l'évolution du retrait que pour les variations de masse. Quelques différences apparaissent toutefois au niveau des valeurs finales de retrait, comme le montre le Tableau 16.

TABLE 16 – Comparaison des valeurs de retrait final selon les deux analyses

Mélange	Retrait Mettlen [$\frac{\mu m}{m}$]	Retrait mesuré [$\frac{\mu m}{m}$]	Δ [$\frac{\mu m}{m}$]
NS	-870	-768	+102
RS1	-2106,7	-3000	-893,3
50 % NS – 50 % RS1	-1468	-1540	-72

Ces écarts peuvent s'expliquer par la variabilité des matériaux utilisés. Dans le cas du sable naturel, les deux études ne reposent pas sur la même source d'approvisionnement, les sables provenant de carrières différentes. Le sable naturel utilisé par T. Mettlen présentait une absorption d'eau plus élevée, soit 1,34 %, contre 0,57 % dans le cadre de cette étude. Cette différence peut expliquer le retrait légèrement plus important observé dans ses résultats pour les mélanges à base de NS.

Concernant le sable RS1, plusieurs facteurs peuvent également intervenir. D'une part, l'absorption d'eau déterminée dans cette étude est supérieure à celle rapportée par T. Mettlen. D'autre part, le sable RS1 utilisé ici présentait une teneur en eau initiale importante, en raison de ses conditions de stockage, contrairement au sable utilisé par T. Mettlen, qui était plus sec au moment de son incorporation. Cette différence d'état hydrique initial peut

influencer la quantité d'eau disponible dans la matrice cimentaire, les transferts hydriques durant le séchage et, par conséquent, l'amplitude du retrait mesuré.

Les mélanges composés de 50 % de NS et de 50 % de RS1 présentent quant à eux des valeurs intermédiaires, ce qui reste cohérent avec les observations précédentes. Ainsi, malgré certaines différences quantitatives, les deux études conduisent à une conclusion similaire : les formulations présentant les pertes de masse les plus importantes sont également celles qui développent les retraits les plus élevés.

5.1.2 Les mélanges de type MgO

L'incorporation d'un agent expansif de type MgO dans les formulations conduit à une évolution globalement similaire à celle observée pour les mélanges sans agent expansif, comme l'illustre la Figure 43. Une légère phase d'expansion est observée au jeune âge, suivie d'un retrait plus marqué durant la période de séchage.

La principale différence réside donc dans l'amplitude de l'expansion initiale, entre le jour 0 et le jour 3, qui apparaît légèrement plus importante en présence de MgO. Cette expansion précoce peut être attribuée à l'hydratation progressive de l'oxyde de magnésium, conduisant à la formation de brucite, $Mg(OH)_2$, phase associée à une légère augmentation de volume. Toutefois, dans les conditions étudiées, cette expansion reste limitée et ne permet pas de compenser entièrement le retrait développé lors du séchage.

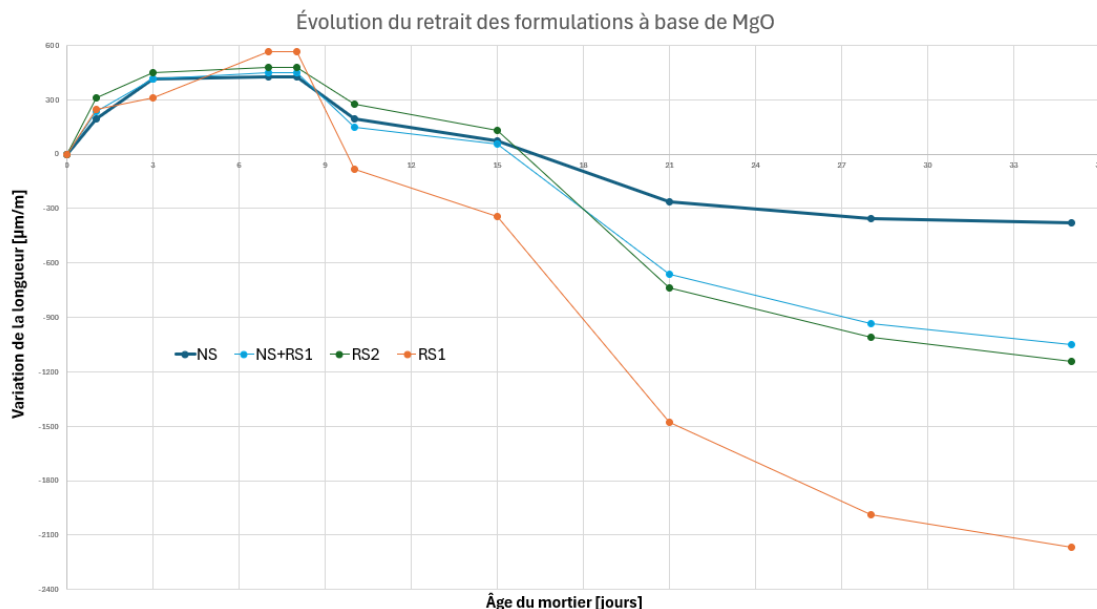


FIGURE 43 – Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type MgO

La Figure 43 montre également que l'incorporation de l'agent expansif de type MgO permet de réduire le retrait final des éprouvettes par rapport aux formulations sans agent expansif. Cette tendance est particulièrement visible au début de la phase de séchage, où les courbes présentent une pente moins marquée. Cela indique que la vitesse de développement du retrait

est plus faible en présence de MgO. Une pente faible est également synonyme d'une cinétique d'expansion lente.

TABLE 17 – Comparaison des valeurs de retrait final avec et sans agent expansif de type MgO

Mélange	Retrait avec MgO [$\frac{\mu m}{m}$]	Retrait sans agent [$\frac{\mu m}{m}$]	Δ [$\frac{\mu m}{m}$]
NS	-441	-768	+327
RS1	-2318	-3000	+682
RS2	-1242	-	-
50 % NS - 50 % RS1	-1155	-1540	+385

Les travaux de S. Essalik (2020) [18], portant également sur des formulations incorporant du MgO, conduisent à une conclusion similaire : l'ajout de cet agent expansif permet de limiter le retrait au cours du séchage. Toutefois, certaines différences apparaissent entre ses résultats et ceux obtenus dans cette étude.

Les phases d'expansion initiale présentent des ordres de grandeur comparables, mais les valeurs de retrait final rapportées par S. Essalik sont plus faibles. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs paramètres. Le premier concerne le dosage en MgO : dans le cadre de ce travail, un dosage de 5 % a été utilisé, tandis que S. Essalik a employé un dosage de 7 %. Une augmentation du dosage peut donc favoriser une expansion plus importante et une meilleure compensation du retrait mais toujours insuffisante pour compenser totalement celui-ci.

Un second facteur concerne la nature des matériaux étudiés. Les travaux de S. Essalik portent principalement sur des bétons conventionnels à base de sables naturels, tandis que les formulations étudiées ici incorporent des sables recyclés. Or, comme discuté précédemment, ces derniers présentent généralement une porosité et une capacité d'absorption d'eau plus élevées, ce qui favorise les transferts hydriques durant le séchage et peut conduire à des retraits plus importants. Ainsi, les écarts observés entre les deux études semblent cohérents avec les différences de dosage en MgO et de nature des granulats utilisés.

La Figure 44 montre que les variations de masse des mélanges contenant du MgO suivent globalement les mêmes tendances que celles observées pour les formulations sans agent expansif. Une augmentation de la masse est observée durant la cure humide, au moment où les échantillons absorbent l'eau, suivie d'une perte plus marquée lors du séchage, liée à l'évaporation progressive de l'eau contenue dans les pores.

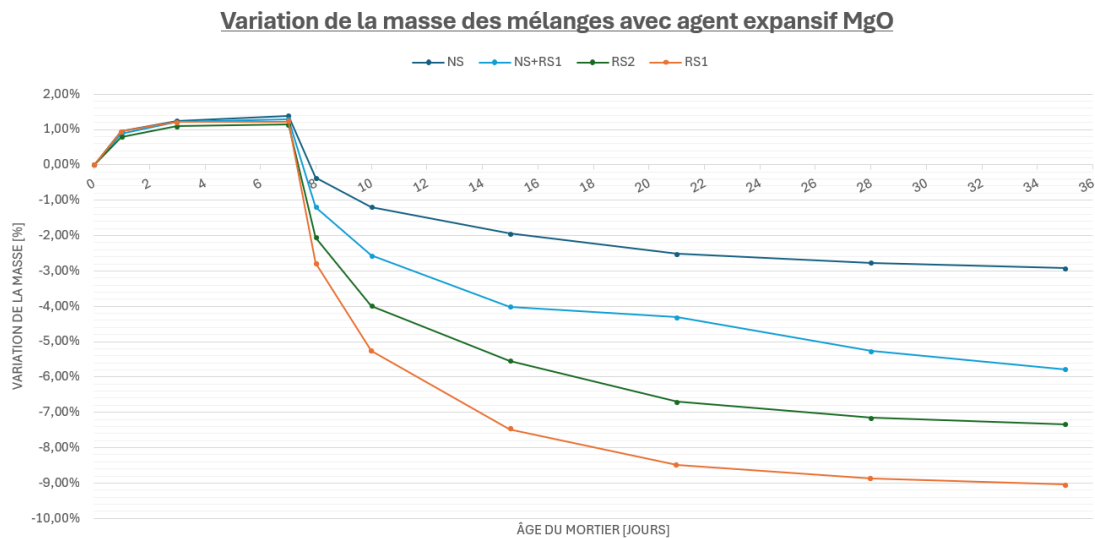


FIGURE 44 – Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type MgO

Les résultats finaux liés à la perte de masse sont repris dans le Tableau 18 ci-dessous :

TABLE 18 – Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable (MgO)

Type de sable	Δm [%]
NS	-2,91
RS1	-9,04
RS2	-7,34
50 % NS – 50 % RS1	-5,78

5.1.3 Les mélanges de type SRA

Les courbes de retrait des formulations contenant uniquement un SRA sont présentées à la Figure 45. Contrairement aux agents expansifs, les SRA n'ont normalement pas pour rôle de provoquer une expansion du matériau. Leur action est principalement attendue lors de la phase de séchage, puisqu'ils réduisent la tension superficielle de l'eau présente dans les pores et limitent ainsi les contraintes capillaires responsables du retrait.

L'apparition d'un pic positif au jeune âge, comme observé sur la figure 45, doit donc être interprétée avec prudence. Il pourrait s'agir d'un gonflement temporaire lié à l'absorption d'eau durant la cure humide plutôt que d'une véritable expansion chimique. Ce phénomène peut être accentué par la présence de sables recyclés, dont la porosité plus élevée favorise l'entrée et la rétention d'eau dans la matrice cimentaire.

D'autres facteurs expérimentaux peuvent également contribuer à cette variation, notamment l'état hydrique initial des éprouvettes, la précision de la mesure au jour 0, le démoulage précoce ou encore les conditions de cure. Ainsi, le pic observé ne doit pas être directement attribué à une action expansive du SRA.

L'effet principal du SRA reste donc à analyser durant la phase de séchage.

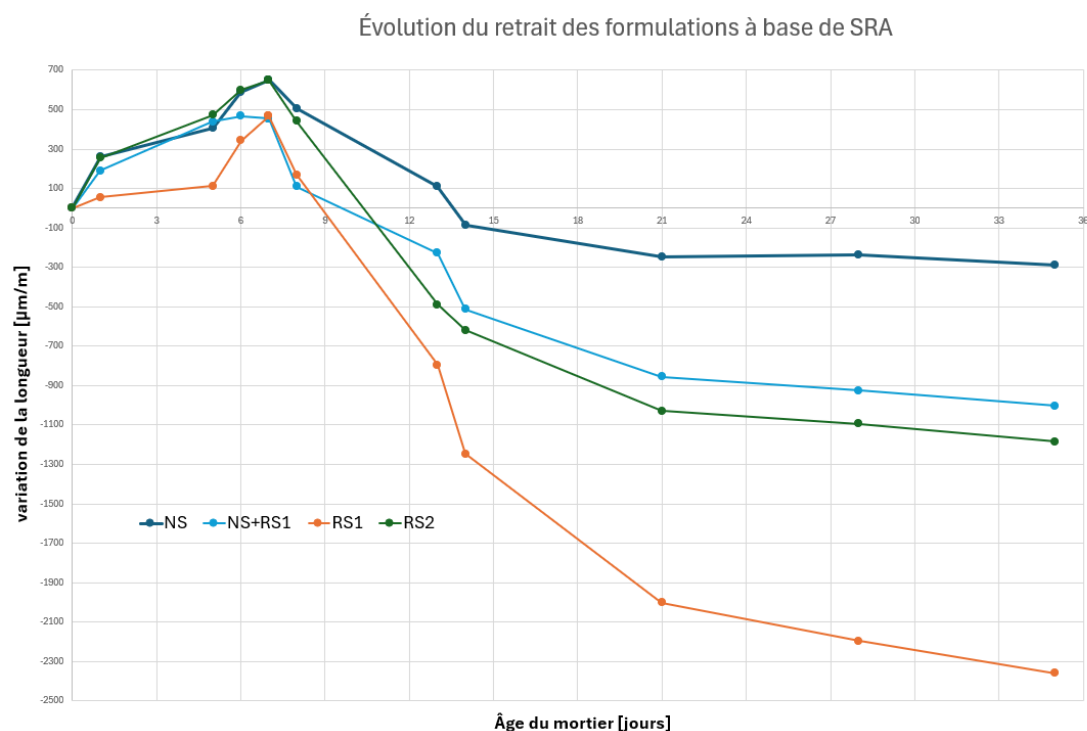


FIGURE 45 – Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type SRA

La comparaison des valeurs de retrait final entre les formulations contenant un SRA et les mélanges sans agent expansif est présentée au Tableau 19. Les résultats montrent que l'incorporation du SRA permet de réduire le retrait final pour l'ensemble des formulations comparables.

TABLE 19 – Comparaison des valeurs de retrait final de type SRA et sans agent expansif

Mélange	Retrait avec SRA [$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$]	Retrait sans agent [$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$]	Δ [$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$]
NS	-290	-768	+478
RS1	-2360	-3000	+640
RS2	-1185	-	-
50 % NS – 50 % RS1	-1003	-1540	+537

Cette diminution est particulièrement visible pour les mélanges NS, RS1 et 50 % NS - 50 % RS1, ce qui confirme l'effet bénéfique du SRA durant la phase de séchage. Pour le mélange RS2, aucune comparaison directe ne peut être établie, puisqu'aucune formulation de référence sans agent expansif n'a été réalisée. Toutefois, les résultats obtenus montrent que les formulations à base de RS2 présentent souvent un comportement proche de celui des mélanges 50 % NS - 50 % RS1, ce qui permet d'apporter un élément de comparaison qualitatif.

Par ailleurs, les constatations relatives à l'influence du type de sable restent inchangées. Malgré l'ajout du SRA, les mélanges à base de RS1 demeurent ceux qui présentent le retrait le plus important.

Ces observations permettent de formuler une hypothèse supplémentaire : l'incorporation d'un SRA seul contribue bien à réduire le retrait, mais son action reste insuffisante pour compenser entièrement les déformations de séchage à lui seul. Il apparaît donc pertinent d'étudier l'effet d'une combinaison entre un SRA et un agent expansif, afin d'évaluer si l'association des deux mécanismes permet une meilleure maîtrise du retrait.

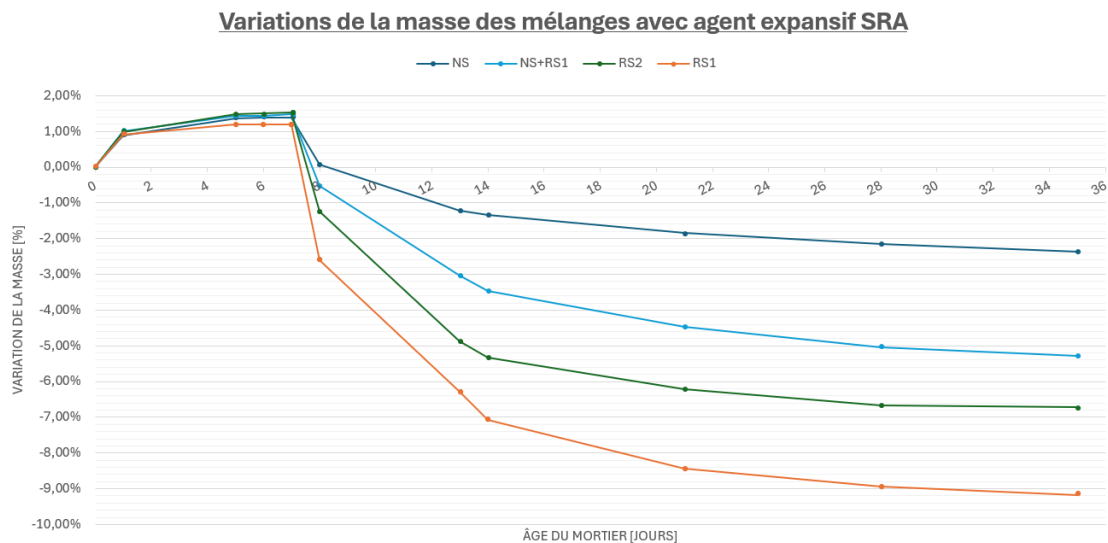


FIGURE 46 – Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type SRA

Du point de vue des variations de masse, les résultats obtenus sont cohérents avec l'hypothèse formulée précédemment pour les mélanges sans agent expansif. En effet, une diminution du retrait devrait s'accompagner d'une perte de masse plus limitée.

Cette tendance est bien observée dans le cas des formulations contenant un SRA. Le Tableau 20 présente les valeurs de perte de masse mesurées pour ces mélanges, qui restent globalement inférieures à celles relevées pour les formulations sans agent, présentées au Tableau 15. Ces résultats renforcent donc l'idée d'une corrélation entre la perte hydrique et le retrait : plus la perte de masse est limitée, plus le retrait final est réduit.

TABLE 20 – Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable (SRA)

Type de sable	Δm [%]
NS	-2,36
RS1	-9,17
RS2	-6,72
50 % NS – 50 % RS1	-5,29

5.1.4 Les mélanges de type MgO avec SRA

L'effet d'une première combinaison d'adjuvants, associant l'agent expansif de type MgO et le SRA, est ensuite analysé. Au regard des résultats présentés précédemment, cette combinaison pourrait théoriquement permettre une meilleure limitation du retrait, en associant l'expansion générée par le MgO à la réduction des contraintes capillaires induite par le SRA.

La Figure 47 met effectivement en évidence l'apparition d'un pic d'expansion au jeune âge. Celui-ci peut être attribué à l'hydratation progressive du MgO et à la formation de brucite, $Mg(OH)_2$, qui génère une augmentation de volume au sein de la matrice cimentaire. Par la suite, durant la phase de séchage, le retrait se développe plus lentement, comme l'indique la pente relativement faible des courbes.

Ainsi, la combinaison MgO+SRA semble permettre de retarder l'apparition du retrait et d'en réduire l'intensité. Toutefois, cette compensation reste partielle : le retrait n'est pas entièrement supprimé, mais son développement est ralenti par l'action conjointe de l'expansion liée au MgO et de la diminution des contraintes capillaires apportée par le SRA.

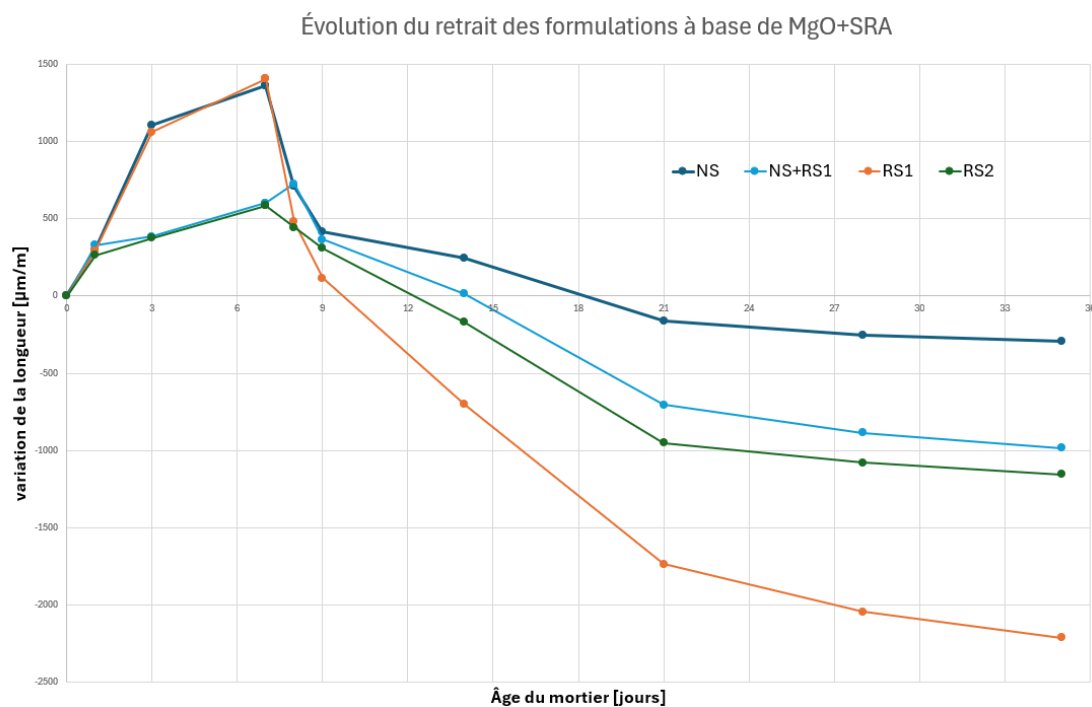


FIGURE 47 – Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type MgO+SRA

L'analyse des données présentées au Tableau 21 permet de comparer les valeurs de retrait final obtenues pour la formulation MgO+SRA avec celles des formulations contenant uniquement du MgO, ainsi qu'avec les mélanges sans agent expansif.

TABLE 21 – Comparaison des valeurs de retrait final entre les formulations MgO+SRA, MgO et sans agent expansif

Mélange	MgO+SRA [$\frac{\mu m}{m}$]	MgO [$\frac{\mu m}{m}$]	sans AE [$\frac{\mu m}{m}$]
NS	-291	-441 (+150)	-768 (+477)
RS1	-2211	-2318 (+107)	-3000 (+789)
RS2	-1154	-1242 (+88)	-
50 % NS - 50 % RS1	-984	-1155 (+171)	-1540 (+556)

Les données montrent que la combinaison MgO+SRA présente un effet plus favorable que l'utilisation du MgO seul. Pour l'ensemble des mélanges comparables, les valeurs de retrait final sont moins élevées lorsque les deux adjuvants sont associés.

Ce type de combinaison pourrait ainsi être intéressant pour des applications où une limitation du risque de fissuration est recherchée, sans nécessiter une compensation complète du retrait. Cela peut concerner, par exemple, des mortiers de maçonnerie ou encore des applications intérieures exposées à des conditions environnementales modérées.

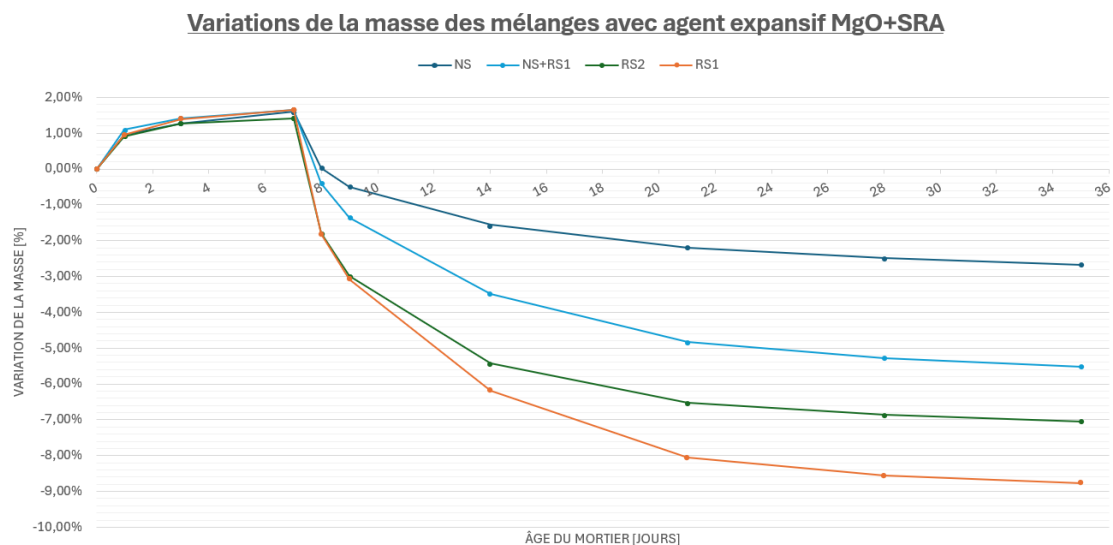


FIGURE 48 – Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type MgO+SRA

Du point de vue des pertes massiques, l'association MgO+SRA devrait théoriquement aussi conduire à des valeurs plus faibles que celles observées pour les mélanges contenant uniquement du MgO. Cette tendance est effectivement confirmée par les résultats présentés au Tableau 22 puisque le retrait observé est moindre.

TABLE 22 – Perte de masse observée des éprouvettes en fonction du type de sable

Type de sable	Δm [%]
NS	-2,67
RS1	-8,76
RS2	-7,04
50 % NS – 50 % RS1	-5,51

5.1.5 Les mélanges de type K avec SRA

L'évolution du retrait des formulations intégrant un agent expansif de type K associé à des SRA est présentée à la Figure 49.

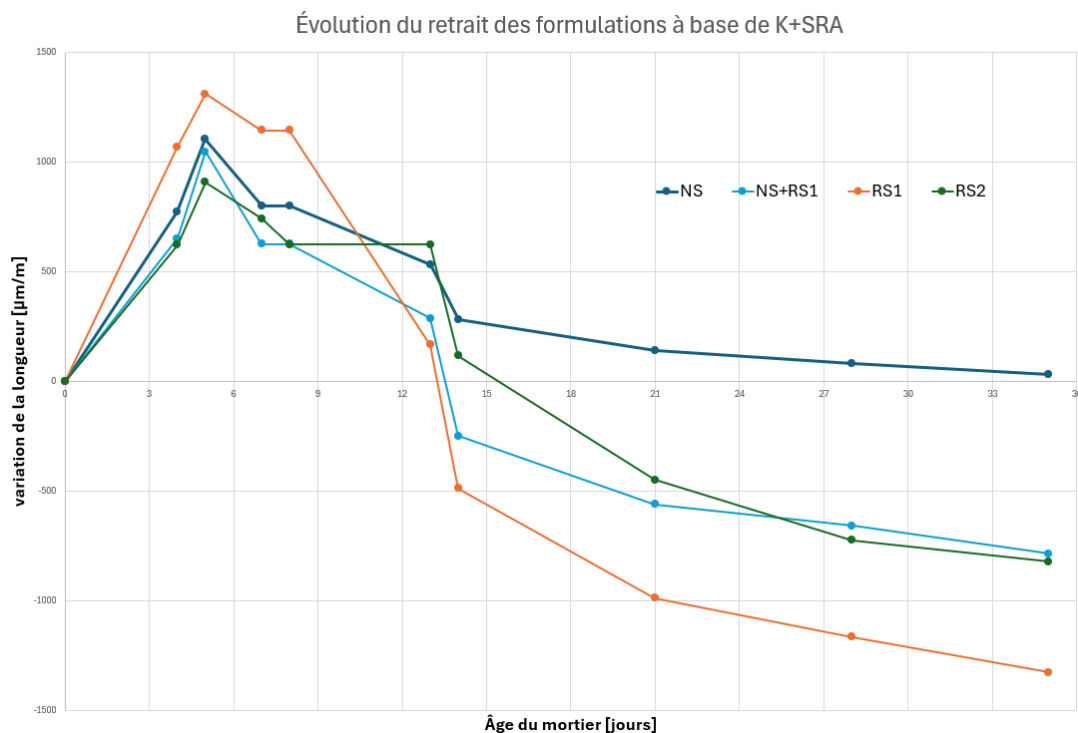


FIGURE 49 – Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type K+SRA

La Figure 49 met en évidence l'effet bénéfique des formulations K+SRA sur le comportement dimensionnel des mortiers. Par rapport aux mélanges sans agent expansif, ces formulations développent une expansion plus importante durant la cure humide (encore plus importante que pour les mélanges MgO) et présentent ensuite un retrait plus limité lors du séchage. Le mélange RS1 K+SRA se distingue par l'expansion la plus élevée (environ +1310 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$), ce qui peut être associé à la capacité d'absorption plus importante de ce sable recyclé.

L'action de l'agent expansif de type K repose principalement sur la formation d'ettringite. Cette phase hydratée, caractérisée par une structure cristalline aciculaire, se développe dans la matrice cimentaire et occupe un volume supérieur à celui des composés initiaux. Sa

croissance génère donc une poussée expansive interne, particulièrement visible durant les premiers jours de cure humide.

Cependant, l'expansion obtenue au jeune âge n'est pas intégralement maintenue au cours du temps. Une partie de cette dilatation peut être absorbée par la microstructure du mortier, notamment par réarrangement local de la pâte cimentaire et redistribution des contraintes internes. De plus, la poursuite de la formation d'ettringite nécessite la présence d'eau. Lorsque les éprouvettes sont placées en conditions de séchage, la disponibilité en eau diminue progressivement, ce qui limite l'effet expansif résiduel.

La phase de séchage introduit alors un mécanisme opposé : l'évaporation de l'eau contenue dans les pores capillaires entraîne une contraction de la matrice cimentaire. Ce retrait vient partiellement annuler l'expansion générée lors de la cure humide, c'est ce qui est observé à partir du jour 5. Ainsi, même si l'agent de type K permet de réduire significativement le retrait par rapport aux formulations témoins, il ne permet pas toujours d'obtenir une compensation complète. Le bilan dimensionnel final peut donc rester négatif, mais avec une amplitude de retrait nettement réduite.

Dans le même contexte, l'effet spécifique du SRA peut être discuté à partir d'une comparaison avec les formulations contenant uniquement l'agent expansif de type K étudiées par T. Mettlen (2025) [17]. Les tendances observées sont globalement similaires : une expansion importante se développe durant la cure humide, suivie d'un retrait plus marqué lors de la phase de séchage. Toutefois, les valeurs finales obtenues dans cette étude pour les mélanges K+SRA sont nettement moins négatives que celles rapportées par T. Mettlen pour les mélanges contenant uniquement l'agent de type K, comme le montre le Tableau 23.

TABLE 23 – Comparaison des valeurs de retrait final pour le type K

Mélange	Retrait Mettlen [$\frac{\mu m}{m}$]	Retrait mesuré [$\frac{\mu m}{m}$]	$\Delta[\frac{\mu m}{m}]$
NS	-1044	+31	+1075
RS1	-2116	-1325	+791
RS2	-1663	-820	+843
50 % NS – 50 % RS1	-1622,7	-783	+839,7

Ces résultats suggèrent que l'ajout du SRA permet de mieux conserver l'expansion initiale générée par l'agent de type K et de limiter les déformations de séchage.

L'effet est particulièrement marqué pour le mélange NS, qui présente même un bilan final légèrement positif. Pour les mélanges contenant des sables recyclés, le retrait reste négatif, mais son amplitude est fortement réduite par rapport aux résultats de référence. Cela met donc en évidence l'intérêt de combiner un agent expansif de type K avec un SRA afin d'améliorer

la maîtrise du retrait, même si la compensation complète n'est pas systématiquement atteinte pour les formulations à base de sables recyclés.

La Figure 50 permet de relier l'évolution de la masse à celle du retrait pour les mortiers contenant l'agent expansif de type K associé à un SRA. Durant la cure humide, les variations massiques restent relativement faibles, avec un gain compris entre +1 % et +2 %. Cet apport d'eau est néanmoins suffisant pour favoriser la formation d'ettringite, responsable de l'expansion observée au jeune âge.

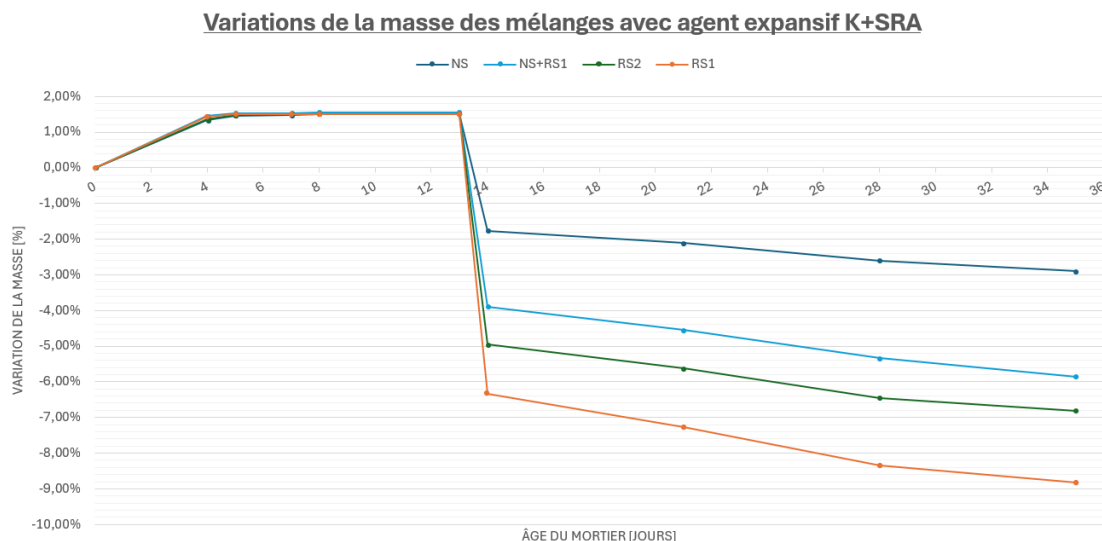


FIGURE 50 – Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type K+SRA

À partir du 4^e jour, les courbes de masse tendent à se stabiliser jusqu'à la fin de la cure, prolongée ici jusqu'à 13 jours², ce qui marque l'état saturé des barettes.

Le changement de conditions de conservation marque ensuite une rupture nette dans le comportement des éprouvettes. Dès leur exposition à l'air libre, une diminution rapide de la masse est observée, traduisant le départ progressif de l'eau contenue dans les pores. Cette perte hydrique entraîne une contraction de la matrice cimentaire et réduit donc une partie de l'expansion développée pendant la cure humide.

L'influence du type de sable apparaît clairement. La formulation RS1 K+SRA présente la perte de masse la plus élevée, proche de -9 %, et développe également le retrait le plus important. Le mélange mixte présente un comportement intermédiaire, traduisant l'effet modérateur apporté par la présence de sable naturel.

À l'inverse, le mélange NS K+SRA conserve un bilan dimensionnel positif sur l'ensemble de la période étudiée, malgré une perte de masse d'environ -3 %. Cette différence peut s'expliquer par une structure moins poreuse, limitant l'évaporation rapide de l'eau et permettant de mieux préserver l'expansion initialement générée par l'agent de type K.

2. Pour ces formulations, la cure humide a été maintenue au-delà de 7 jours pour des raisons logistiques liées au fonctionnement du laboratoire, notamment les fermetures et les jours fériés.

Ainsi, les résultats montrent que l'efficacité de l'agent expansif de type K ne dépend pas uniquement de la formation d'ettringite. Elle dépend également de la capacité du mortier à conserver l'eau nécessaire au maintien de cette expansion et à limiter les pertes hydriques lors du séchage. Le retrait final résulte donc d'un équilibre entre l'expansion créée pendant la cure humide et la contraction induite par le retrait de séchage.

5.1.6 Les mélanges de type G avec SRA

Contrairement aux autres formulations, ces mélanges ne présentent pas une évolution progressive du retrait, mais plutôt une forte variation dimensionnelle dès le jeune âge. Après cette expansion initiale, les courbes tendent à se stabiliser, aussi bien durant la cure humide que pendant la phase de séchage. La Figure 51 met en évidence ce comportement particulier propre aux mortiers contenant de l'agent expansif de type G combiné avec des SRA.

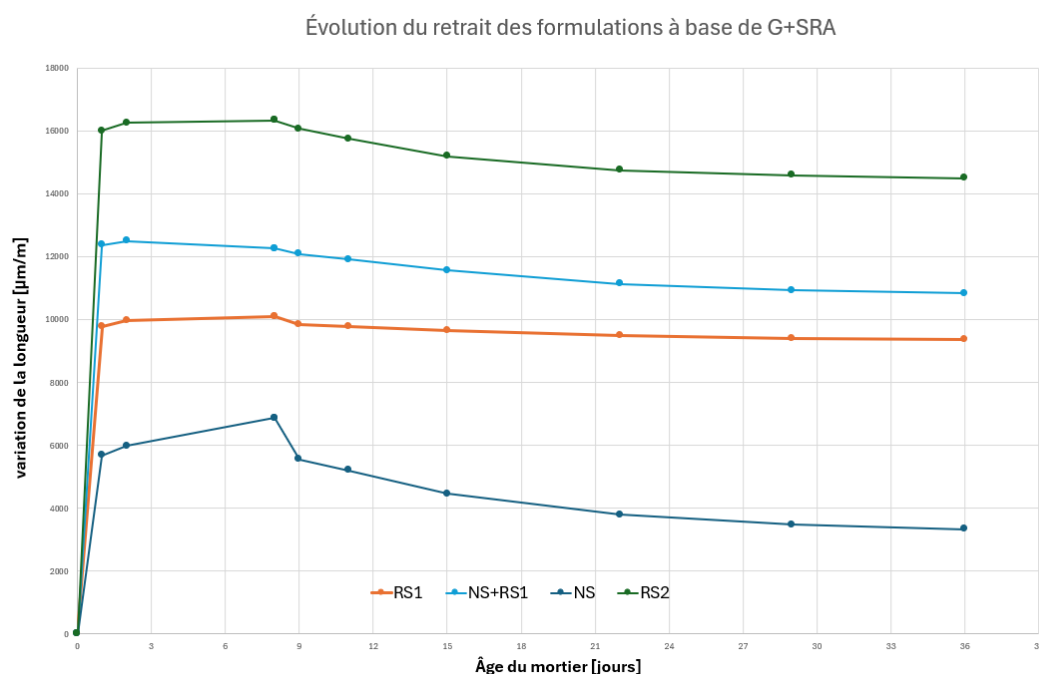


FIGURE 51 – Courbes de retrait (moyennes) pour les mélanges de type G+SRA

Cette évolution s'explique par la réactivité élevée de l'agent expansif de type G. Celui-ci est principalement composé d'oxyde de calcium non hydraté (CaO), qui réagit rapidement avec l'eau pour former de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Cette transformation s'accompagne d'un accroissement volumique important, ce qui explique l'expansion marquée observée dans les premières 48 h suivant le démoulage³.

La présence de sables recyclés peut accentuer cet effet. Leur porosité plus importante leur permet de retenir davantage d'eau, qui peut rester disponible localement et alimenter la

3. Pour ce type de mélange, un temps de prise de 6 h était plus adapté. En effet, après 8 h, le démoulage des barrettes et des cylindres devenait difficile, voire impossible, en raison de l'expansion rapide du matériau.

réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Cependant, l'analyse de la Figure 51 montre que cette relation n'est pas uniquement gouvernée par la porosité du sable. En effet, bien que le sable RS1 soit identifié comme le plus poreux, les mélanges à base de RS2 présentent ici les expansions les plus élevées, suivis des mélanges composés de 50 % NS - 50 % RS1, puis des mélanges à base de RS1 et de NS.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que l'expansion liée à l'agent de type G dépend aussi de la disponibilité effective de l'eau dans la pâte cimentaire, de la distribution des pores et de la teneur en fines. Ainsi, une forte porosité peut retenir une partie de l'eau dans les granulats sans nécessairement la rendre immédiatement disponible pour l'hydratation de la chaux vive. À l'inverse, un sable présentant une porosité plus accessible, une granulométrie différente ou une teneur en fines plus élevée peut favoriser une hydratation plus efficace de l'agent expansif et conduire à une expansion plus importante. Cela décrit ce qui est observé par le RS2 à la Figure 51.

Cette tendance rejoint partiellement les observations de T. Mettlen (2025), qui avait également mis en évidence des expansions importantes pour les mélanges mixtes NS-RS1 ainsi que pour les formulations contenant du RS2.

L'effet des SRA peut également être discuté à partir d'une comparaison avec les formulations contenant uniquement l'agent expansif de type G étudiées par T. Mettlen (2025) [17]. Les résultats sont présentés au Tableau 24.

TABLE 24 – Comparaison des valeurs de retrait final pour le type G

Mélange	Retrait Mettlen [$\frac{\mu m}{m}$]	Retrait mesuré [$\frac{\mu m}{m}$]	$\Delta[\frac{\mu m}{m}]$
NS	+2914	+3327	+413
RS1	+4281,3	+9358	+5076,7
RS2	+4658,7	+14513	+9854,3
50 % NS - 50 % RS1	+5396	+10846	+5450

Ces résultats suggèrent que l'association de l'agent expansif de type G avec un SRA conduit à une expansion finale plus importante. L'écart est relativement limité pour le mélange NS, mais devient beaucoup plus marqué pour les formulations contenant des sables recyclés, en particulier RS2 et le mélange 50 % NS - 50 % RS1.

Cette différence montre que le comportement des mélanges G+SRA ne peut pas être interprété uniquement comme une simple réduction du retrait. Dans ce cas, le comportement dimensionnel est fortement dominé par l'hydratation rapide de la chaux vive. La présence du SRA peut modifier les transferts hydriques internes et contribuer à maintenir une certaine disponibilité en eau dans la matrice, ce qui pourrait favoriser la poursuite de l'hydratation

de l'agent expansif. Toutefois, cet effet doit être interprété avec prudence, car d'autres paramètres peuvent également intervenir, notamment le rapport eau/liant, la porosité des sables recyclés, leur état hydrique initial et la cinétique de réaction du type G.

Ainsi, contrairement aux formulations MgO+SRA ou K+SRA, pour lesquelles le SRA contribue principalement à limiter le retrait de séchage, les mélanges G+SRA présentent surtout un bilan fortement expansif. Cette combinaison apparaît donc efficace, mais elle doit être maîtrisée afin d'éviter une expansion excessive, susceptible de générer des contraintes internes ou des microfissures à long terme.

La Figure 52 met en évidence une variation massique en deux temps pour les mortiers contenant l'agent expansif de type G associé à des SRA. Dans un premier temps, durant la cure humide, les éprouvettes présentent un léger gain de masse (entre 2% et 4% selon le type de sable). Cette évolution traduit à la fois l'entrée d'eau dans le réseau poreux et la réaction précoce de l'agent expansif.

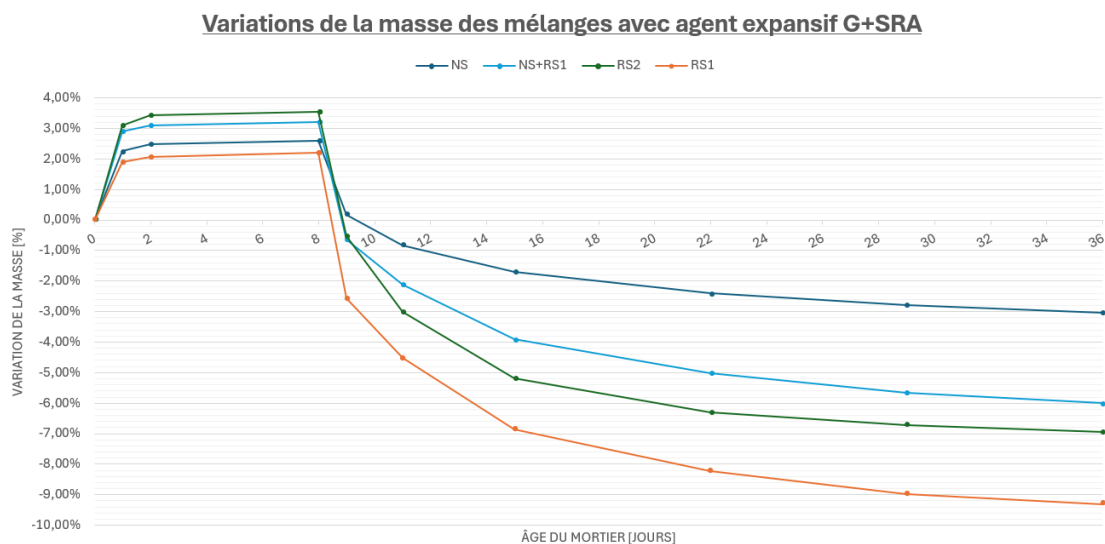


FIGURE 52 – Variations de la masse (moyennes) des mélanges de type G+SRA

Après les premières 24 h, les variations de masse deviennent limitées. Cette stabilisation suggère que la réaction rapide de l'agent expansif de type G s'est en grande partie déjà produite et que les pores accessibles tendent vers un état de saturation.

Lors du passage en phase de séchage, une diminution de masse est observée, liée à l'évaporation progressive de l'eau contenue dans les pores. Cette perte hydrique pourrait théoriquement réduire une partie de l'expansion acquise durant la cure humide. Cependant, dans le cas des formulations G+SRA, cette diminution dimensionnelle reste très limitée, les courbes présentant une évolution presque stable durant la période de séchage. Cela suggère que l'expansion initiale générée par l'hydratation du CaO est globalement conservée, malgré la perte de masse mesurée.

Le comportement final des mortiers G+SRA résulte donc d'un équilibre entre l'expansion

précoce produite par l'hydratation du CaO et les déformations de séchage qui peuvent apparaître par la suite. L'analyse ne peut ainsi pas être limitée à la seule nature du sable utilisé, mais doit considérer l'ensemble du système formulation sable-adjuvants.

5.1.7 Analyse du retrait sur les cycles séchage/mouillage

Dans cette section, une analyse des cycles de séchage/mouillage (S/M) est réalisée. Comme indiqué précédemment, ces cycles permettent d'évaluer le comportement des mortiers dans des conditions plus proches de celles rencontrées en situation réelle, où les matériaux peuvent être soumis à des alternances d'humidification et de séchage.

Cette analyse présente également un intérêt particulier pour l'étude d'une éventuelle réactivation des mécanismes expansifs. En effet, l'eau joue un rôle essentiel dans l'hydratation et l'activation des agents expansifs. L'alternance entre les phases de mouillage et de séchage permet donc d'évaluer si ces agents conservent une activité à plus long terme ou si leur effet expansif est principalement limité aux premiers jours de cure.

Les cycles appliqués dans le cadre de cette étude sont constitués de 7 jours de cure humide suivis de 7 jours de séchage. Trois cycles complets ont été réalisés durant la période du stage, soit une durée totale de 42 jours, pour les formulations sélectionnées.

Un quatrième cycle a été lancé à la fin du séjour, et les mesures associées continuent d'être mises à jour. Les graphiques relatifs aux cycles S/M sont présentés en Annexe A.5.

Résultats observés pour les mélanges sans agent

- NS (cycle 1) : expansion initiale de $+318,6 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 (cycle 1) : expansion initiale de $+398,6 \frac{\mu m}{m}$

- NS (cycle 2) : expansion de $+410,6 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+11,4 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 (cycle 2) : expansion de $+1522,6 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+1204 \frac{\mu m}{m}$

- NS (cycle 3) : expansion de $+417,3 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+6,7 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 (cycle 3) : expansion de $+1562,7 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+40,1 \frac{\mu m}{m}$

Résultats observés pour les mélanges de type K+SRA

- NS K+SRA (cycle 1) : expansion initiale de $+114 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 K+SRA (cycle 1) : expansion initiale de $+981,3 \frac{\mu m}{m}$

- NS K+SRA (cycle 2) : expansion de $+353 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+239 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 K+SRA (cycle 2) : expansion de $+1206 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+224,7 \frac{\mu m}{m}$
- NS K+SRA (cycle 3) : expansion de $+342 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $-11 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 K+SRA (cycle 3) : expansion de $+1214 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow \Rightarrow$ augmentation de $+8 \frac{\mu m}{m}$

Résultats observés pour les mélanges de type SRA

- NS SRA (cycle 1) : expansion initiale de $+212 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 SRA (cycle 1) : expansion initiale de $+664 \frac{\mu m}{m}$
- NS SRA (cycle 2) : expansion de $+581 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+369 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 SRA (cycle 2) : expansion de $+987 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+323 \frac{\mu m}{m}$
- NS SRA (cycle 3) : expansion de $+294 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+82 \frac{\mu m}{m}$
- RS1 SRA (cycle 3) : expansion de $+1303 \frac{\mu m}{m} \Rightarrow$ augmentation de $+316 \frac{\mu m}{m}$

Conclusion

L'analyse des résultats met en évidence que les phases de mouillage en eau de chaux entraînent une reprise de l'expansion pour l'ensemble des mélanges étudiés. Ce comportement peut s'expliquer par le réapport en eau au sein de la matrice cimentaire, qui favorise la reprise de certaines réactions d'hydratation encore incomplètes. L'eau de chaux fournit également des ions calcium, Ca^{2+} , et hydroxydes, OH^- , maintenant un milieu fortement alcalin favorable à la stabilité des hydrates formés.

Dans le cas des formulations contenant un agent expansif de type K, cette remise en présence d'eau peut favoriser la formation supplémentaire d'ettringite, à condition que des aluminates et des sulfates soient encore disponibles dans la matrice. La précipitation de cette ettringite dans le réseau poreux peut alors générer des pressions de cristallisation et expliquer une partie du gonflement observé lors des cycles de mouillage.

Un résultat particulier concerne toutefois la formulation NS K+SRA, pour laquelle une légère diminution de longueur est observée après trois cycles. Cette valeur doit être interprétée avec prudence. Elle pourrait être liée soit à une incertitude expérimentale, soit à une erreur de mesure ou à une variabilité propre au suivi dimensionnel. Une autre hypothèse, plus physico-chimique, serait que le potentiel expansif de l'agent de type K ait été en grande partie consommé au cours des premiers cycles. Dans ce cas, la poursuite des cycles pourrait

favoriser une relaxation des contraintes internes ou l'apparition de microfissures internes, entraînant une perte partielle de l'expansion accumulée. Toutefois, étant donné la faible amplitude de la variation observée, l'hypothèse d'une incertitude de mesure semble la plus probable à ce stade.

Les résultats montrent également que les mélanges à base de RS1 présentent une expansion nettement plus importante que ceux à base de NS, avec des valeurs pouvant être environ trois à quatre fois plus élevées. Cette différence peut être reliée à la porosité plus élevée du sable RS1 et à sa forte capacité d'absorption d'eau. Lors des phases de mouillage, ce sable recyclé peut retenir davantage d'eau et la rendre disponible localement, ce qui favorise la reprise des réactions d'hydratation et accentue les variations dimensionnelles.

Enfin, la présence de SRA semble conduire à des variations dimensionnelles légèrement plus faibles que celles observées pour les formulations sans SRA. Cette observation ne signifie toutefois pas que le SRA agit directement sur les réactions expansives. En effet, son rôle principal reste associé à la réduction des contraintes capillaires lors du séchage, et non à l'activation des agents expansifs.

Dans le cadre des cycles séchage/mouillage, l'effet du SRA doit donc être interprété de manière indirecte. En limitant le retrait lors des phases de séchage, le SRA pourrait modifier l'état dimensionnel et hydrique du matériau avant le cycle de mouillage suivant. La reprise d'expansion observée lors du remouillage peut alors apparaître moins marquée, car une partie des déformations de séchage a déjà été limitée. Ainsi, les différences observées entre les mélanges avec et sans SRA relèvent davantage d'un effet sur les transferts hydriques et sur le bilan dimensionnel global que d'une action directe sur les réactions expansives.

Toutes ces hypothèses sont donc à vérifier sur le long terme.

5.2 Les propriétés mécaniques

Dans le cadre de cette étude, seuls les essais de compression à 28 jours ont été réalisés. Ce choix s'explique tout d'abord par la quantité limitée de certains matériaux disponibles, notamment le sable recyclé belge RS2, qui ne permettait pas la fabrication d'un nombre suffisant d'éprouvettes pour réaliser des essais à plusieurs échéances. Par ailleurs, les contraintes temporelles associées au projet ont nécessité de concentrer les ressources expérimentales sur l'âge de référence le plus représentatif.

En effet, la résistance à 28 jours constitue l'indicateur de performance mécanique le plus couramment utilisé dans le domaine des matériaux cimentaires. C'est à cet âge que sont généralement définies les classes de résistance des ciments, mortiers et bétons dans les normes de référence. Bien que les résistances à jeune âge (7 jours) puissent fournir des informations sur la cinétique d'hydratation et le développement précoce des performances, elles restent moins représentatives du comportement mécanique final du matériau.

5.2.1 Résistance à la compression des éprouvettes à 28 jours

Les résultats des essais de compression à 28 jours sont obtenus conformément à la procédure décrite à la Section 4.7.1 du Chapitre 4 - Méthodologie.

Ainsi, les résultats sont synthétisés à la Figure 53, où les résistances moyennes sont regroupées selon les différentes familles de mélanges. Cela permet d'identifier plus aisément l'effet des agents expansifs et des adjuvants réducteurs de retrait sur les performances en compression, tout en facilitant l'analyse comparative entre les formulations étudiées. Les graphiques détaillés correspondant à chaque famille de mélanges sont repris en Annexe A.6.

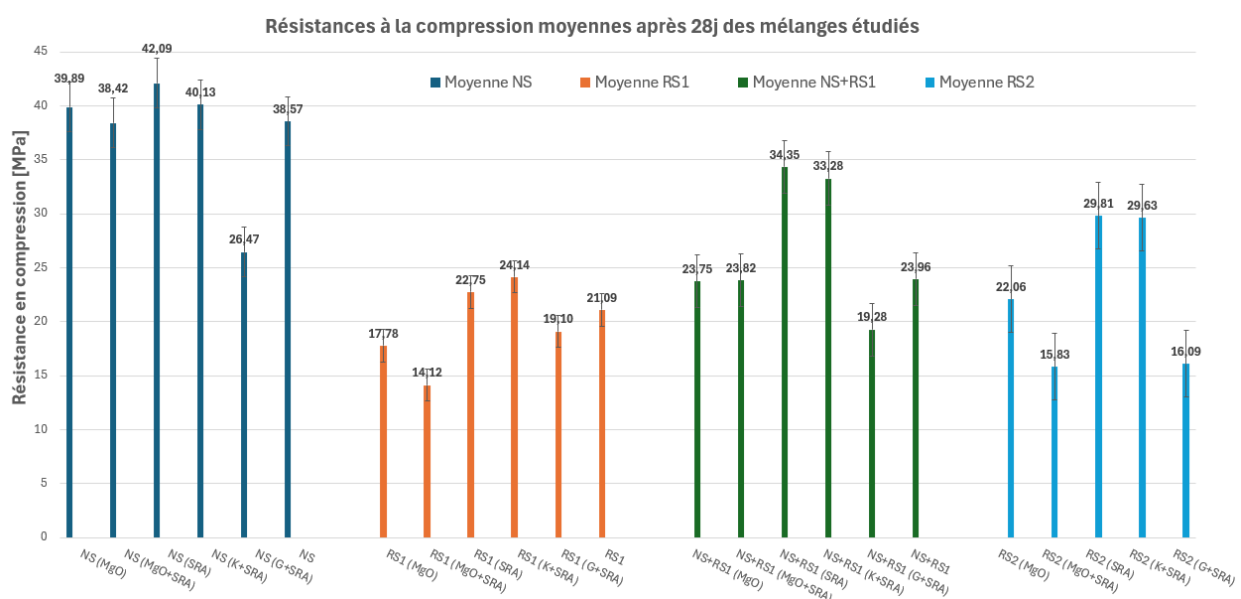


FIGURE 53 – Valeurs moyennées des résistances à la compression (28j) des mélanges

Influence de la nature du sable sur la résistance en compression :

TABLE 25 – Influence du sable recyclé sur la résistance à la compression à 28 jours par rapport à un sable naturel

Mélange	NS [MPa]	RS1 [MPa]	NS+RS1 [MPa]	RS2 [MPa]
MgO	39.89	17.78 (-55.4%)	23.75 (-40.5%)	22.06 (-44.7%)
MgO+SRA	38.42	14.12 (-63.3%)	23.82 (-38.0%)	15.83 (-58.8%)
SRA	42.09	22.75 (-46.0%)	34.35 (-18.4%)	29.81 (-29.2%)
K+SRA	40.13	24.14 (-39.9%)	33.28 (-17.1%)	29.63 (-26.2%)
G+SRA	26.47	19.10 (-27.8%)	19.28 (-27.2%)	16.09 (-39.2%)
Sans agent expansif	38.57	21.09 (-45.3%)	23.96 (-37.9%)	—

En analysant les données présentées à la Figure 53 et au Tableau 25, on constate que les mélanges composés à 100 % de sable naturel (NS) présentent globalement les meilleures performances en compression, à l'exception des formulations contenant l'agent expansif de type G+SRA. Le comportement particulier observé pour les mélanges à base d'agent G+SRA sera discuté plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Les résistances obtenues pour les mélanges à base de NS sont comprises entre 38 et 42 MPa. Ces résultats témoignent ainsi d'une bonne compacité du squelette granulaire et d'une microstructure relativement dense. Cette performance peut être attribuée à la faible teneur en fines du sable naturel, à sa faible absorption d'eau (0,57 %) ainsi qu'au rapport eau/liant de 0,50 utilisé pour ces formulations, limitant ainsi le volume de pores capillaires au sein de la matrice cimentaire.

À l'inverse, les mélanges incorporant 100 % de sable recyclé canadien (RS1) présentent les résistances les plus faibles de l'ensemble des formulations étudiées. Ce comportement peut s'expliquer par la forte absorption d'eau de ce sable (15,42 %), ainsi que par sa teneur élevée en fines (6,23%) (cf. Annexe A.3). La présence de pâte de ciment adhérente aux grains recyclés augmente la porosité globale du matériau et modifie la disponibilité de l'eau dans le mélange. Une partie de l'eau de gâchage est en effet absorbée par les granulats, ce qui peut perturber l'hydratation du ciment et favoriser le développement d'une microstructure plus poreuse. De plus, la forte porosité des granulats recyclés et de la zone de transition interfaciale (ITZ) favorise l'initiation et la propagation de microfissures sous chargement, ce qui contribue à diminuer les performances mécaniques observées.

Les mélanges formulés avec 100 % de sable recyclé belge (RS2) présentent quant à eux des résistances intermédiaires. Bien que leurs performances demeurent inférieures à celles des mélanges à base de sable naturel, elles sont généralement supérieures à celles obtenues avec le RS1. Cette différence peut être attribuée à une absorption d'eau plus faible et à une qualité

intrinsèque plus favorable du sable RS2, limitant partiellement les effets négatifs liés à la porosité et à la présence de pâte cimentaire résiduelle. Les résultats obtenus suggèrent ainsi que les caractéristiques propres au sable recyclé, notamment son absorption d'eau, sa teneur en fines et sa porosité, jouent un rôle déterminant dans le développement des résistances mécaniques des mortiers.

Finalement, les mélanges composés de 50 % de NS et de 50 % de RS1 présentent des résistances intermédiaires, proches de celles obtenues pour les mélanges à base de RS2. Cette observation reste cohérente avec les résultats de retrait présentés précédemment, où ces deux types de formulations présentaient une évolution comparable, bien que légèrement plus marquée dans le cas du mélange combinant sable naturel et sable recyclé.

Influence du taux de substitution en sable recyclé :

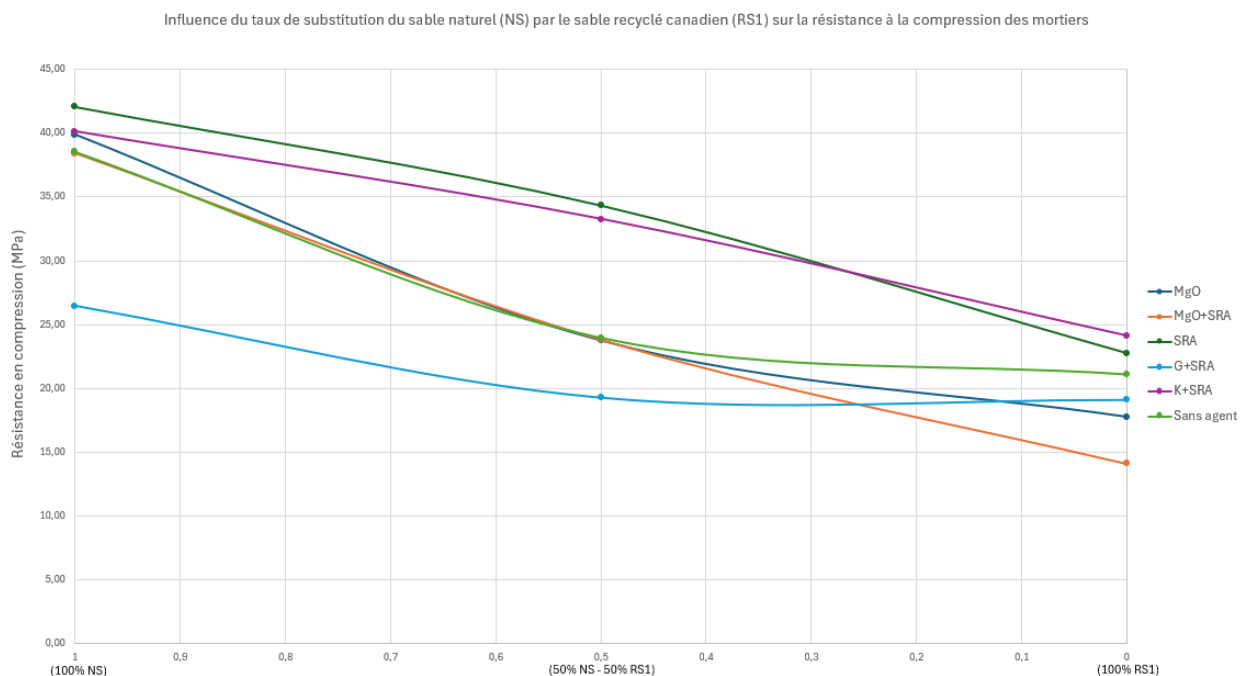


FIGURE 54 – Influence du taux de substitution du NS par le RS1

L'analyse de la Figure 54⁴ met clairement en évidence une diminution progressive de la résistance en compression lorsque le sable naturel (NS) est remplacé par du sable recyclé canadien (RS1). Cette tendance est cohérente avec les observations discutées précédemment concernant la forte absorption d'eau et la porosité plus élevée des granulats recyclés. En effet, l'augmentation de la teneur en RS1 tend à dégrader la compacité de la matrice cimentaire et à favoriser le développement d'une microstructure plus poreuse, ce qui se traduit par une diminution des performances mécaniques.

4. Aucune substitution du NS par du RS2 n'a pu être réalisée, la quantité de matériau disponible étant insuffisante pour la fabrication d'éprouvettes supplémentaires. Seules les substitutions utilisant le RS1 ont pu être effectuées.

Les résultats présentés au Tableau 25 montrent qu'un remplacement total du sable naturel par du RS1 entraîne généralement une perte de résistance comprise entre 40 et 60 % selon la formulation considérée. À l'inverse, un taux de substitution de 50 % conduit à une diminution plus modérée, généralement de l'ordre de 20 à 40 %. Ces observations suggèrent qu'un remplacement partiel permet de conserver une partie des bénéfices associés au sable naturel tout en intégrant une quantité significative de matériau recyclé, ce qui pourrait constituer une première base encourageante pour l'utilisation de sables recyclés dans le domaine de la construction.

Influence des agents expansifs et des adjuvants réducteurs de retrait (SRA) :

En analysant la Figure 53, on constate que les formulations contenant uniquement un adjuvant réducteur de retrait (SRA) présentent les meilleures résistances en compression parmi les mélanges étudiés. Ce comportement peut s'expliquer par l'action du SRA sur les tensions capillaires générées lors du séchage. En réduisant ces tensions, l'adjuvant limite le développement de microfissures au sein de la matrice cimentaire et de la zone de transition interfaciale (ITZ), préservant ainsi l'intégrité du matériau. Cette amélioration pourrait également être liée à une meilleure répartition de l'eau dans le système cimentaire et à une diminution des phénomènes de microfissuration précoce. Dans le cadre de cette étude, ces effets semblent compenser les éventuels ralentissements de l'hydratation parfois rapportés dans la littérature pour certains SRA.

Si l'on compare ces résultats à ceux des mélanges standards, c'est-à-dire ne contenant aucun agent compensateur de retrait, les gains de résistance observés sont listés dans le Tableau 26⁵ :

TABLE 26 – Influence du SRA sur la résistance à la compression à 28 jours

Type de sable	Sans agent [MPa]	Avec SRA [MPa]	Gain de résistance
NS	38.57	42.09	+9.1%
RS1	21.09	22.75	+7.9%
NS+RS1	23.96	34.35	+43.4%

Ces résultats mettent en évidence l'effet bénéfique des SRA sur les performances mécaniques des mortiers étudiés. La réduction des tensions capillaires et des phénomènes de microfissuration semble permettre une meilleure préservation de la microstructure du matériau, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance en compression. Les gains observés suggèrent ainsi que l'utilisation de SRA constitue une piste intéressante pour améliorer

5. Aucune formulation de mélange sans agent compensateur de retrait n'a pu être réalisée pour le sable RS2 en raison de la quantité limitée de matériau disponible, insuffisante pour la fabrication d'éprouvettes supplémentaires.

les performances mécaniques des mortiers, en particulier lorsqu'ils incorporent des sables recyclés.

Une autre observation peut être formulée à partir des résultats obtenus. Les mélanges contenant l'agent expansif de type K combiné à un adjuvant réducteur de retrait (SRA) présentent des résistances en compression relativement élevées par rapport aux formulations de référence. Toutefois, ces performances demeurent légèrement inférieures à celles observées pour les mélanges contenant uniquement du SRA.

TABLE 27 – Influence de l'agent expansif K combiné à des SRA sur la résistance à la compression à 28 jours

Type de sable	Sans agent [MPa]	Avec K+SRA [MPa]	Gain de résistance
NS	38.57	40.13	+4.0%
RS1	21.09	24.14	+14.5%
NS+RS1	23.96	33.28	+38.9%

Ce comportement peut s'expliquer par les mécanismes d'action respectifs de ces deux additifs. Les SRA agissent principalement en réduisant les tensions capillaires au sein de la matrice cimentaire, limitant ainsi le développement de microfissures susceptibles d'affecter les performances mécaniques. À l'inverse, les agents expansifs de type K compensent le retrait par la formation de produits expansifs, principalement de l'ettringite. Bien que cette expansion soit bénéfique pour limiter les déformations de retrait, elle peut également engendrer localement des contraintes internes ou une légère augmentation de la porosité lorsque l'expansion n'est pas parfaitement confinée. Ainsi, une partie du gain mécanique apporté par le SRA pourrait être partiellement compensée par les effets associés à la réaction expansive de l'agent K.

Néanmoins, les résultats obtenus montrent que la combinaison SRA + K permet de conserver des résistances mécaniques élevées tout en offrant un potentiel intéressant pour la réduction du retrait. Cette association apparaît donc particulièrement prometteuse dans le cadre du développement de mortiers à base de sables recyclés.

À l'inverse, les résultats mettent clairement en évidence l'effet défavorable des formulations contenant l'agent expansif de type G+SRA sur les performances mécaniques. Quelle que soit la nature du sable utilisé, ces mélanges présentent systématiquement les résistances en compression les plus faibles parmi les formulations étudiées. Le Tableau 28 met en évidence l'impact négatif de l'agent expansif de type G sur les performances mécaniques. La perte de résistance la plus importante est observée pour les mélanges à base de sable naturel, avec une diminution d'environ 31 % par rapport au mélange de référence. Les formulations incorporant du sable recyclé présentent également une baisse des résistances, bien que celle-ci soit moins marquée. Ces résultats confirment que l'incorporation de l'agent G, malgré son

intérêt potentiel pour la compensation du retrait, s'accompagne d'une dégradation notable des performances en compression.

TABLE 28 – Influence de l'agent expansif G combiné à des SRA sur la résistance à la compression à 28 jours

Type de sable	Sans agent [MPa]	Avec G+SRA [MPa]	Gain de résistance
NS	38.57	26.47	-31.4%
RS1	21.09	19.10	-9.4%
NS+RS1	23.96	19.28	-19.5%

Ce comportement peut être attribué au mécanisme d'expansion propre aux agents de type G, généralement à base de chaux vive (CaO). Lors de l'hydratation, le CaO se transforme en portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), une réaction accompagnée d'une augmentation volumique importante. Lorsque cette expansion n'est pas parfaitement contrôlée ou répartie uniformément dans la matrice cimentaire, elle peut engendrer des contraintes internes locales, favoriser le développement de microfissures et augmenter la porosité du matériau. Ces phénomènes ont tendance à affecter négativement les performances mécaniques, en particulier la résistance en compression.

Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus lors des essais de retrait présentés à la Figure 51. En effet, les formulations contenant l'agent G présentent les plus faibles déformations de retrait ainsi qu'une expansion significative, traduisant une compensation importante des phénomènes de contraction. Cependant, cette réduction du retrait semble s'accompagner d'une diminution des résistances mécaniques, ce qui suggère un compromis entre l'efficacité de la compensation du retrait et les performances en compression. Les résultats obtenus montrent ainsi que si l'agent G apparaît particulièrement efficace pour limiter les déformations de retrait, son utilisation peut également entraîner des effets défavorables sur l'intégrité microstructurale du matériau et, par conséquent, sur ses propriétés mécaniques.

Si l'on se concentre maintenant sur l'agent expansif de type MgO , plusieurs observations peuvent être formulées. Tout d'abord, les mélanges incorporant du MgO présentent généralement des résistances inférieures à celles obtenues avec l'agent de type K, mais restent supérieures à celles des formulations contenant l'agent de type G. Cette tendance peut s'expliquer par le mécanisme d'hydratation plus lent du MgO , dont l'expansion est généralement plus progressive que celle des agents de type K. Ainsi, à 28 jours, l'effet bénéfique potentiel du MgO sur la compensation du retrait n'est pas nécessairement pleinement développé. Dans le cas des mélanges à base de RS1, les performances plus faibles peuvent être liées à la forte absorption d'eau et à la porosité élevée de ce sable recyclé, qui peuvent perturber l'hydratation du liant et accentuer l'hétérogénéité de la matrice cimentaire.

L'effet de l'ajout de SRA dans les formulations contenant du MgO semble également défavorable du point de vue de la résistance en compression. En effet, les résultats montrent une légère diminution des performances lorsque le SRA est combiné au MgO, et ce pour l'ensemble des types de mélanges étudiés. Ce comportement pourrait s'expliquer par une interaction entre le SRA et le mécanisme d'hydratation du MgO. Les SRA agissent principalement en réduisant les tensions capillaires, mais peuvent également modifier la cinétique d'hydratation du ciment et influencer le développement de la microstructure à jeune âge. Combinés au MgO, ces effets peuvent ralentir le développement des produits d'hydratation et limiter le gain de résistance à 28 jours.

Un tableau comparatif des performances mécaniques peut dès lors être établi :

TABLE 29 – Influence de l'agent expansif MgO seul et MgO combiné à des SRA sur la résistance à la compression à 28 jours

Type de sable	Sans agent [MPa]	Avec MgO [MPa]	Avec MgO+SRA [MPa]
NS	38.57	39.89 (+3.4%)	38.42 (-0.4%)
RS1	21.09	17.78 (-15.7%)	14.12 (-33.0%)
NS+RS1	23.96	23.75 (-0.9%)	23.82 (-0.6%)
RS2	—	22.06	15.83 (-28.2%)

Concernant le RS2, aucune formulation de référence n'étant disponible, seule l'influence de l'ajout du SRA sur le mélange contenant du MgO a pu être évaluée. Les résultats montrent une diminution de la résistance de l'ordre de 28 %, ce qui confirme la tendance observée pour les autres formulations, à savoir une baisse des performances mécaniques lorsque le SRA est combiné au MgO.

Comparaison des résultats expérimentaux avec les données de la littérature :

Selon les travaux de T. Mettlen (2025) [17], une comparaison des résistances à la compression à 28 jours peut être réalisée afin d'évaluer l'influence éventuelle des SRA lorsqu'ils sont combinés à des agents expansifs. Dans les paragraphes précédents, l'hypothèse a été formulée qu'en présence d'agent expansif, l'ajout de SRA pourrait contribuer à diminuer les résistances mécaniques de certains mélanges. Les Tableaux 30 et 31 permettent de comparer les résistances moyennes obtenues pour les formulations de type K et G avec celles mesurées dans cette étude pour les formulations K+SRA et G+SRA.

TABLE 30 – Comparaison des résistances moyennes à la compression à 28 jours pour les formulations de type K et K+SRA

Mélange	K [MPa]	K+SRA [MPa]	Δ [MPa]
NS	45,03	40,13	-4,90
RS1	25,91	24,14	-1,77
RS2	38,58	29,63	-8,95
50 % NS - 50 % RS1	34,32	33,28	+3,66

Dans le cas des formulations de type K, l'ajout de SRA ne conduit pas à une augmentation systématique de la résistance à la compression. Les mélanges NS, RS1 et RS2 présentent des valeurs inférieures à celles obtenues par T. Mettlen pour les formulations contenant uniquement l'agent de type K. En revanche, le mélange 50 % NS – 50 % RS1 montre un gain d'environ 3,66 MPa. Ce résultat indique que l'effet du SRA dépend fortement de la nature du sable et de l'équilibre entre porosité, absorption d'eau, compacité de la matrice et développement des hydrates.

TABLE 31 – Comparaison des résistances moyennes à la compression à 28 jours pour les formulations de type G et G+SRA

Mélange	G [MPa]	G+SRA [MPa]	Δ [MPa]
NS	37,44	26,47	-10,98
RS1	20,77	19,10	-1,67
RS2	26,83	16,09	-9,85
50 % NS - 50 % RS1	27,36	19,28	-8,08

Pour les formulations de type G, les résistances mesurées avec l'association G+SRA sont inférieures à celles obtenues par T. Mettlen avec l'agent de type G seul. Cette diminution peut être liée à l'expansion très importante générée par l'agent de type G, qui peut modifier la microstructure du mortier et favoriser l'apparition de microfissures internes lorsque l'expansion n'est pas suffisamment maîtrisée. La présence du SRA ne semble donc pas compenser cette perte de performance mécanique dans le cas des mélanges G+SRA.

Ainsi, l'hypothèse selon laquelle les SRA diminuent systématiquement les résistances à la compression semble être plausible. Leur effet peut être favorable dans certaines formulations, comme le mélange 50 % NS – 50 % RS1 avec l'agent de type K, mais il dépend fortement du type d'agent expansif utilisé, de la nature du sable et du niveau d'expansion généré au jeune âge.

5.2.2 Résistance à la traction indirecte par fendage des éprouvettes à 28 jours

Les résultats des essais de fendage (résistance à la traction) à 28 jours sont obtenus conformément à la procédure décrite à la Section 4.7.2 du chapitre 4 - Méthodologie.

Ainsi, les résultats sont synthétisés à la Figure 55 permettent d'identifier plus aisément l'effet des agents expansifs et des adjuvants réducteurs de retrait sur les performances en traction, tout en facilitant l'analyse comparative entre les formulations étudiées. Les graphiques détaillés correspondant à chaque famille de mélanges sont repris en Annexe A.7.

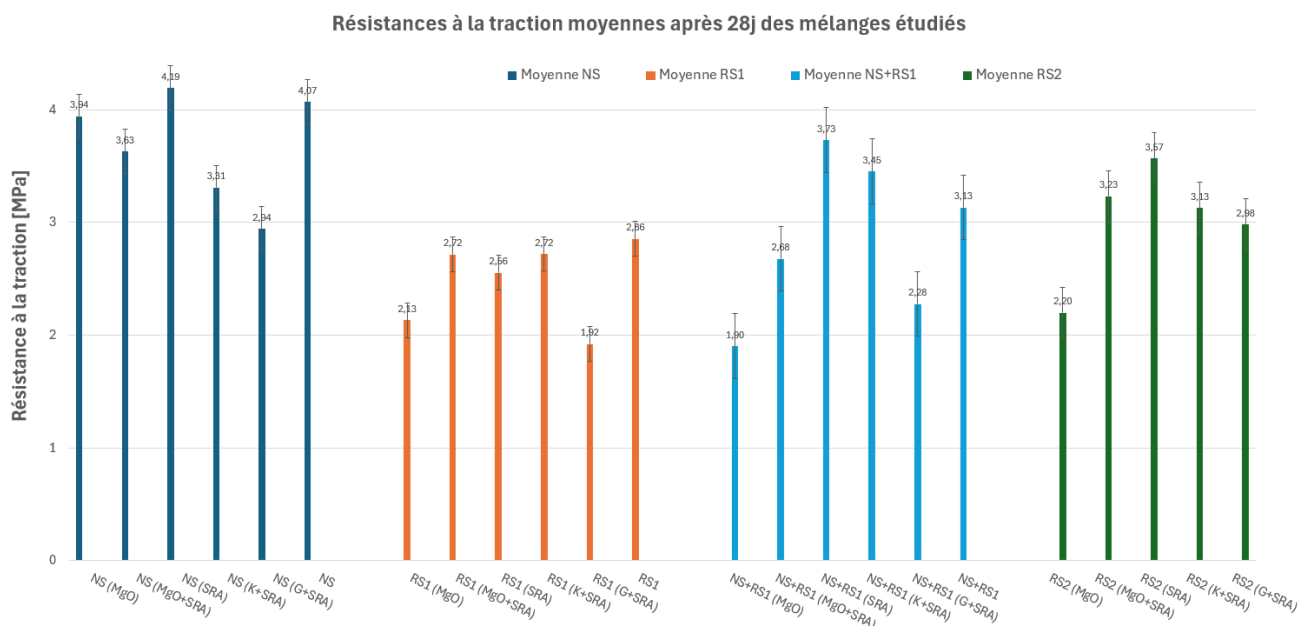


FIGURE 55 – Valeurs moyennées des résistances à la traction (28j) des mélanges

Influence de la nature du sable sur la résistance en traction :

TABLE 32 – Résistances moyennes à la traction à 28 jours et variation par rapport aux mélanges de référence NS

Mélange	NS [MPa]	RS1 [MPa]	NS+RS1 [MPa]	RS2 [MPa]
MgO	3.94	2.13 (-45.9%)	1.90 (-51.8%)	2.20 (-44.2%)
MgO+SRA	3.63	2.72 (-25.1%)	2.68 (-26.2%)	3.23 (-11.0%)
SRA	4.19	2.56 (-38.9%)	3.73 (-11.0%)	3.57 (-14.8%)
K+SRA	3.31	2.72 (-17.8%)	3.45 (+4.2%)	3.13 (-5.4%)
G+SRA	2.94	1.92 (-34.7%)	2.28 (-22.4%)	2.98 (+1.4%)
Sans agent expansif	4.07	2.86 (-29.7%)	3.13 (-23.1%)	—

L'analyse de la Figure 55 et du Tableau 32 montre que les résultats en traction suivent globalement les mêmes observations que celles en compression. Les formulations à base de

sable naturel NS présentent les meilleures performances, tandis que celles contenant 100 % de RS1 affichent les résistances les plus faibles.

Les mélanges composés de 50 % de NS et de 50 % de RS1 présentent, quant à eux, des valeurs intermédiaires, proches de celles obtenues avec le sable RS2.

On remarque cependant un gain de résistance en traction pour les mélanges NS-RS1 K+SRA et RS2 G+SRA.

Influence du taux de substitution en sable recyclé :

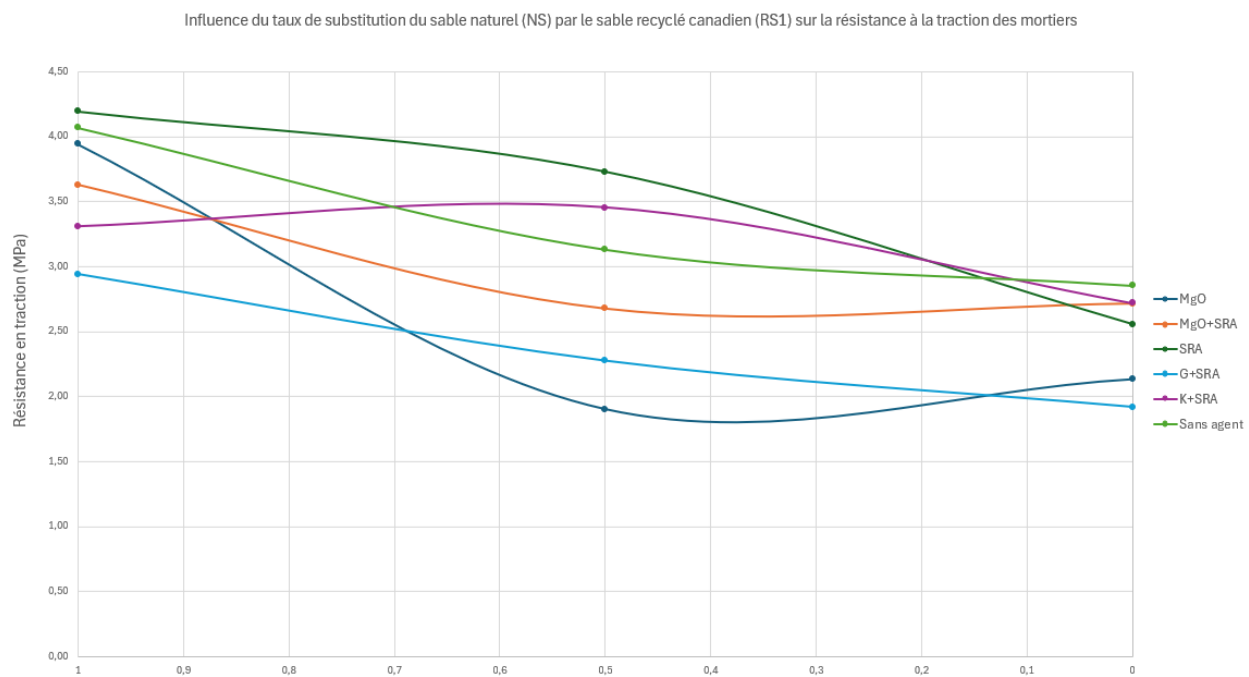


FIGURE 56 – Influence du taux de substitution du NS par le RS1

De même que précédemment, l'analyse de la Figure 56 met clairement en évidence une diminution progressive de la résistance en traction lorsque le sable naturel (NS) est remplacé par du sable recyclé canadien (RS1).

Les résultats présentés au Tableau 32 montrent qu'un remplacement total du sable naturel par du RS1 entraîne généralement une perte de résistance comprise entre 20 et 46 % selon la formulation considérée. À l'inverse, un taux de substitution de 50 % conduit à une diminution plus modérée, généralement de l'ordre de 10 à 25 % en moyenne, à quelques exceptions près.

Influence des agents expansifs et des adjuvants réducteurs de retrait (SRA) :

En analysant les tableaux comparatifs 33 à 36, plusieurs observations peuvent être mises en évidence :

TABLE 33 – Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations contenant uniquement un SRA

Type de sable	Sans agent	SRA	Gain de résistance
NS	4.07	4.19	+2.9%
RS1	2.86	2.56	-10.5%
NS+RS1	3.13	3.73	+19.2%
RS2 ⁶	–	3.57	–

TABLE 34 – Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations K+SRA

Type de sable	Sans agent	K+SRA	Gain de résistance
NS	4.07	3.31	-18.7%
RS1	2.86	2.72	-4.9%
NS+RS1	3.13	3.45	+10.2%
RS2 ⁷	–	3.13	–

TABLE 35 – Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations G+SRA

Type de sable	Sans agent	G+SRA	Gain de résistance
NS	4.07	2.94	-27.8%
RS1	2.86	1.92	-32.9%
NS+RS1	3.13	2.28	-27.2%
RS2 ⁸	–	2.98	–

TABLE 36 – Comparaison des résistances à la traction à 28 jours entre les mélanges standards et les formulations à base de MgO

Type de sable	Standard	MgO	MgO+SRA
NS	4.07	3.94 (-3.2%)	3.63 (-10.8%)
RS1	2.86	2.13 (-25.5%)	2.72 (-4.9%)
NS+RS1	3.13	1.90 (-39.3%)	2.68 (-14.4%)
RS2 ⁹	–	2.20	3.23 (+46.8%)

- L'ajout de SRA seul semble avoir un effet favorable sur la résistance à la traction des mélanges NS et NS–RS1, avec des gains respectifs de 2,9 % et 19,2 %. En revanche, une

diminution est observée pour le mélange RS1, ce qui confirme l'hypothèse suivante : l'effet du SRA dépend fortement du type de sable utilisé.

- Pour les formulations K+SRA, le gain de résistance est principalement observé pour le mélange NS-RS1. Les autres formulations présentent des résistances inférieures à celles des mélanges standards, ce qui indique que l'association entre l'agent de type K et le SRA ne conduit pas systématiquement à une amélioration mécanique en traction.
- Les mélanges G+SRA présentent une diminution marquée des résistances à la traction pour l'ensemble des formulations comparables. Cette baisse pourrait également être liée à l'expansion importante générée par l'agent de type G lorsque celle-ci n'est pas suffisamment maîtrisée.
- Les formulations à base de MgO présentent globalement des résistances plus faibles que les mélanges standards. Toutefois, l'association MgO+SRA permet de limiter cette perte de résistance, notamment pour les mélanges RS1, NS-RS1 et RS2.

De manière générale, les résultats obtenus en traction confirment les tendances déjà observées en compression : l'incorporation d'un adjuvant ne conduit pas nécessairement à une amélioration des performances mécaniques. Son efficacité dépend de plusieurs paramètres, notamment de sa capacité à limiter le retrait sans générer une expansion excessive, mais aussi de la porosité du sable, de l'état de la microstructure et des éventuelles microfissurations induites au jeune âge.

Comparaison des résultats expérimentaux avec les données de la littérature :

De la même manière que précédemment, les résultats issus des travaux de T. Mettlen (2025) [17] peuvent être comparés aux valeurs obtenues dans cette étude pour les formulations combinant un agent expansif et un SRA. Cette comparaison permet d'évaluer l'influence potentielle du SRA sur les résistances à la traction indirecte à 28 jours. Les Tableaux 37 et 38 présentent respectivement les résultats pour les formulations de type K et de type G.

TABLE 37 – Comparaison des résistances moyennes à la traction indirecte à 28 jours pour les formulations K et K+SRA

Mélange	K [MPa]	K+SRA [MPa]	Δ [MPa]
NS	4,53	3,31	-1,22
RS1	3,45	2,72	-0,73
RS2	3,78	3,13	-0,65
50 % NS - 50 % RS1	3,53	3,45	-0,08

TABLE 38 – Comparaison des résistances moyennes à la traction indirecte à 28 jours pour les formulations G et G+SRA

Mélange	G [MPa]	G+SRA [MPa]	Δ [MPa]
NS	3,54	2,95	-0,59
RS1	2,70	1,92	-0,78
RS2	3,13	2,99	-0,15
50 % NS -50 % RS1	3,75	2,28	-1,47

Les résultats montrent que l'ajout du SRA ne conduit pas ici à une amélioration systématique des résistances en traction. Pour les formulations K+SRA, les valeurs restent proches de celles obtenues avec le type K seul, en particulier pour le mélange 50 % NS - 50 % RS1, où l'écart est très faible. En revanche, les formulations G+SRA présentent globalement des résistances plus faibles que les formulations de type G étudiées par T. Mettlen. Cette diminution peut être liée à l'expansion importante générée par l'agent de type G, susceptible de modifier la microstructure ou de favoriser une microfissuration interne lorsque l'expansion n'est pas suffisamment maîtrisée.

Ces résultats suggèrent donc que l'effet du SRA sur la résistance à la traction dépend fortement du type d'agent expansif utilisé et de la nature du sable. Le SRA peut contribuer à limiter le retrait, mais son influence sur les performances mécaniques n'est pas nécessairement positive et doit être interprétée en lien avec la microstructure, la porosité et le niveau d'expansion développé au jeune âge.

5.2.3 Détermination du module de Young

Les modules d'élasticité déterminés à partir de la pente de la partie linéaire des courbes contrainte-déformation, obtenus conformément à la procédure décrite à la Section 4.7.3 du chapitre 4, sont présentés à la Figure 57 pour la formulation de référence composée à 100 % de sable recyclé canadien (RS1) et ne contenant aucun agent compensateur de retrait, à titre d'exemple. Cette procédure a ensuite été appliquée de manière identique aux 23 autres formulations testées. Les courbes et résultats correspondantes sont présentées en Annexe A.9.

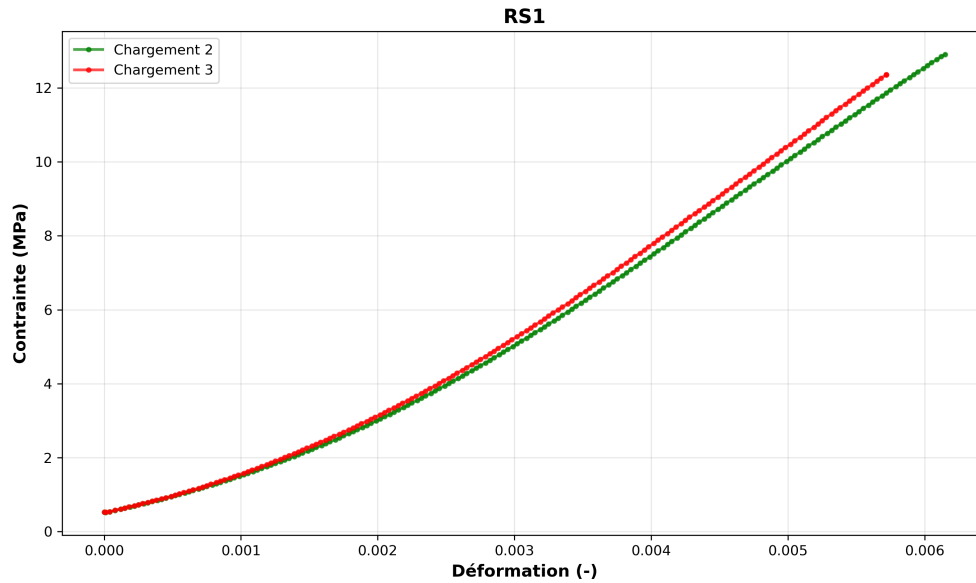


FIGURE 57 – Module de Young : courbes contrainte-déformation ($\sigma - \epsilon$) pour RS1 sans agent

Le module de Young a ainsi été déterminé à partir de la moyenne des modules obtenus lors des chargements 2 et 3¹⁰, selon la formule proposée par la norme ASTM C469 :

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (5.1)$$

où :

- E = module d'élasticité, en MPa
- S_2 = contrainte correspondant à 40 % de la charge ultime
- S_1 = contrainte correspondant à une déformation longitudinale ϵ_1 de 50 millionièmes
- ϵ_2 = déformation longitudinale produite par la contrainte S_2

Pour le mélange de référence composé à 100% de sable recyclé canadien (RS1) sans agent compensateur de retrait, un module d'élasticité de 2054,6 MPa a été obtenu. Cette valeur apparaît toutefois largement inférieure aux valeurs généralement rapportées dans la littérature pour des mortiers cimentaires conventionnels, dont le module d'élasticité se situe habituellement entre 10,000 et 30,000 MPa. De manière générale, l'ensemble des modules d'élasticité calculés dans cette étude sont compris entre 2,000 et 3,000 MPa (voir Annexe A.9), soit environ un ordre de grandeur inférieur aux valeurs attendues.

Ces résultats suggèrent que la méthodologie expérimentale utilisée n'a pas permis d'obtenir

10. Le chargement 1 a été exclu de l'analyse en raison de l'écart important observé entre ce chargement et les chargements 2 et 3. Son intégration aurait fortement influencé la moyenne et risqué de fausser les résultats. Cette exclusion est justifiée graphiquement par la comparaison présentée en Annexe A.9.

une estimation fiable du module d'élasticité réel des mortiers étudiés. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cet écart important. Tout d'abord, la cage de mesure dédiée à l'essai n'étant pas disponible, le module a été déterminé à partir des déplacements enregistrés lors d'un essai de compression sur cylindre. Cette approche est nettement moins précise, puisque les déformations mesurées ne correspondent pas uniquement à celles de l'éprouvette.

Par ailleurs, les faces des cylindres présentaient certaines irrégularités de surface, susceptibles d'introduire des déformations parasites lors de l'application de la charge. De plus, les déplacements enregistrés par la machine incluent non seulement la déformation du mortier, mais également celle de l'ensemble du système d'essai (plateaux, bâti, vérins et mécanismes internes de la presse hydraulique). Ces déformations additionnelles conduisent à une surestimation des déplacements et, par conséquent, à une sous-estimation importante du module d'élasticité calculé.

Enfin, la précision limitée des capteurs de déplacement disponibles sur l'Instron ainsi que l'ancienneté de l'équipement constituent également des sources potentielles d'erreur. Pour ces raisons, les valeurs absolues de module d'élasticité obtenues doivent être interprétées avec prudence. Dans le cadre de ce travail, les résultats sont donc davantage utilisés à titre comparatif entre les différentes formulations qu'à des fins de caractérisation absolue du module de Young des mortiers étudiés.

5.2.4 L'essai d'absorption des éprouvettes à 28 jours

Résultats expérimentaux obtenus :

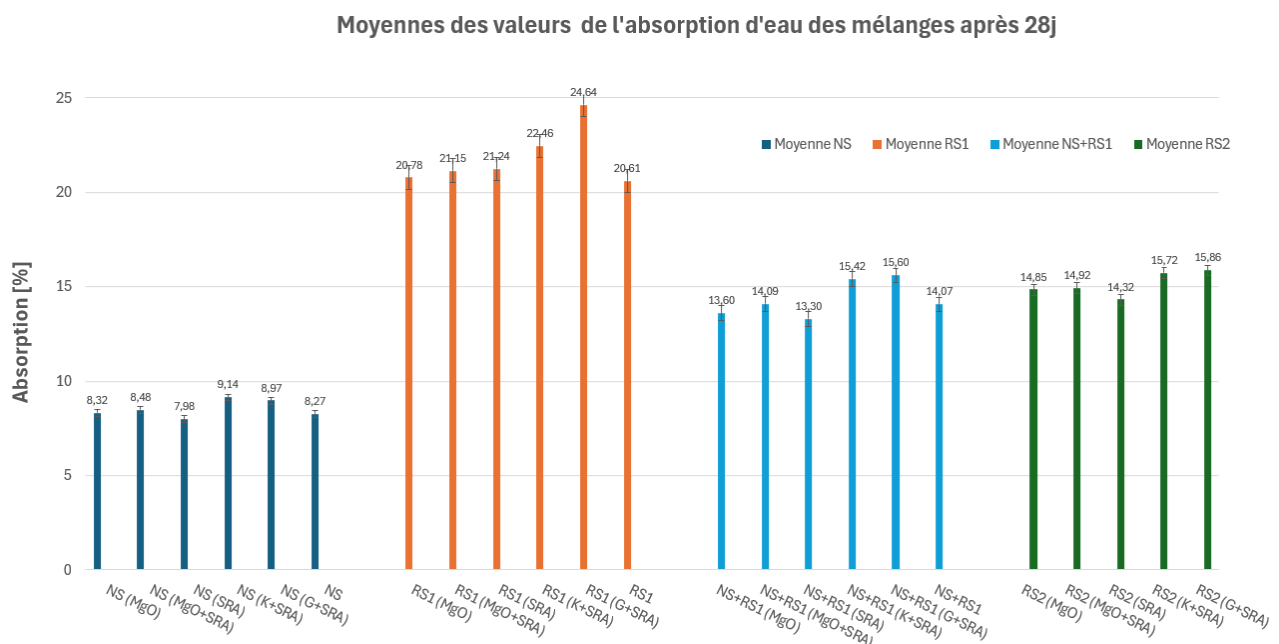


FIGURE 58 – Absorptions moyennes des mélanges après 28j

L'analyse de la Figure 58 montre que les mélanges présentant les absorptions les plus élevées sont, sans surprise, ceux contenant du sable RS1. Cette tendance est cohérente avec les résultats obtenus lors de la caractérisation initiale des sables, où RS1 avait déjà été identifié comme le sable le plus absorbant.

Les mélanges composés de 50 % de sable naturel et de 50 % de RS1 présentent quant à eux des valeurs d'absorption proches de celles obtenues pour les mélanges à base de RS2. Ces deux familles de formulations se situent donc dans un ordre de grandeur similaire.

À l'inverse, les mélanges à base de sable naturel NS présentent les absorptions les plus faibles. Ce résultat reste logique, puisque le sable naturel possède une porosité plus faible et une capacité d'absorption d'eau inférieure à celles des sables recyclés étudiés.

Discussion sur la durabilité des mortiers à base de sable recyclés

L'absorption d'eau constitue un indicateur indirect de la porosité accessible d'un matériau. De manière générale, une absorption élevée traduit la présence d'un réseau poreux plus développé, susceptible de faciliter la pénétration d'agents agressifs tels que l'eau, les chlorures, les sulfates ou encore le dioxyde de carbone. Cette plus grande perméabilité peut accélérer certains mécanismes de dégradation, tels que la corrosion des armatures, les attaques sulfatiques, la carbonatation ou encore les dommages liés aux cycles de gel-dégel.

Un mortier présentant une absorption d'eau plus faible sera généralement considéré comme plus durable, puisqu'il offrira une meilleure résistance à la pénétration des agents extérieurs et conservera plus longtemps ses performances au cours du temps. À l'inverse, les matériaux fortement absorbants (sables recyclés) peuvent être plus vulnérables aux phénomènes de vieillissement et nécessitent donc une attention particulière lors de leur conception.

Ainsi, un des principaux freins à l'utilisation des sables recyclés dans les mortiers demeure leur forte porosité. Les essais d'absorption montrent que les mélanges à base de RS1 atteignent environ 20 %, tandis que ceux contenant du RS2 ou un mélange NS-RS1 présentent encore des valeurs proches de 15 %, malgré l'ajout d'agents expansifs et de SRA. À titre de comparaison, les mortiers à base de sable naturel présentent une absorption moyenne d'environ 9 %.

Ces résultats indiquent que les agents expansifs et les SRA ne permettent pas, à eux seuls, de réduire significativement la porosité liée aux granulats recyclés. Des solutions complémentaires pourraient donc être envisagées, notamment l'optimisation des étapes de concassage et de traitement des CDW afin de limiter la quantité de pâte cimentaire adhérente aux grains. D'autres pistes, comme la carbonatation accélérée des granulats recyclés ou l'utilisation d'additions minérales fines, pourraient également permettre de densifier la microstructure et d'améliorer la durabilité des mortiers.

5.2.5 L'essai du retrait restreint : German Angle

Les résultats présentés dans cette section sont issus de la procédure expérimentale décrite précédemment à la section 4.9 du chapitre 4. Pour rappel, l'essai du German Angle consiste à couler le mortier entre des profilés métalliques, qui imposent une restriction partielle aux variations dimensionnelles du matériau. Ce dispositif permet ainsi d'évaluer la sensibilité des formulations à la fissuration sous retrait empêché. Les éprouvettes ont d'abord été conservées en cure humide, puis exposées à l'air libre afin de suivre l'évolution de la fissuration au cours du séchage.

L'essai a permis de mettre en évidence plusieurs observations importantes. Tout d'abord, durant la période d'observation réalisée au cours du séjour, seules les formulations contenant 100 % de sable RS1 ont présenté une fissuration visible. Les autres mélanges, notamment ceux à base de NS, de RS2 ou de combinaisons NS-RS1, ne présentaient pas encore de fissures transversales observables à ce stade. Il convient toutefois de rappeler que la durée d'observation recommandée pour l'essai du German Angle est généralement plus longue, de l'ordre de 90 jours. Dans le cadre de ce travail, le suivi a été réalisé sur une période plus courte, ce qui ne permet pas d'exclure l'apparition éventuelle de fissures à plus long terme pour les autres formulations. Les éprouvettes ont donc été conservées à l'Université Laval afin de poursuivre leur suivi dans le cadre de travaux ultérieurs. L'ensemble des photographies utilisées pour suivre l'évolution de la fissuration est présenté à l'Annexe A.10.

Une deuxième observation concerne la forme et la répartition des fissures observées sur le mélange RS1 sans agent expansif, pour lequel la fissuration était la plus marquée. Les fissures apparaissent majoritairement parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe longitudinal des profilés métalliques. De plus, un nombre similaire de fissures est observé sur les deux éprouvettes, ce qui suggère que leur apparition n'est pas totalement aléatoire, mais résulte d'un mécanisme de retrait empêché relativement répétable. La Figure 59 présente la cartographie de la fissuration observée pour ce mélange. On y distingue notamment une fissure principale, située approximativement au centre de chaque éprouvette, dont l'ouverture est estimée entre 0,1 et 0,25 mm. Celle-ci est accompagnée de fissures secondaires plus fines, d'ouverture inférieure à 0,1 mm, également orientées de manière parallèle.

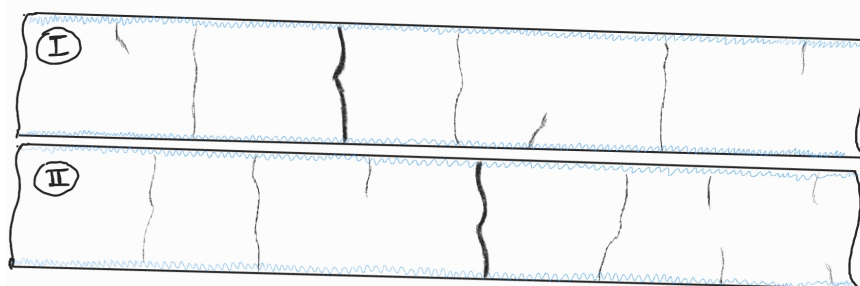


FIGURE 59 – Cartographie de la fissuration observée pour le mélange RS1 sans agent expansif

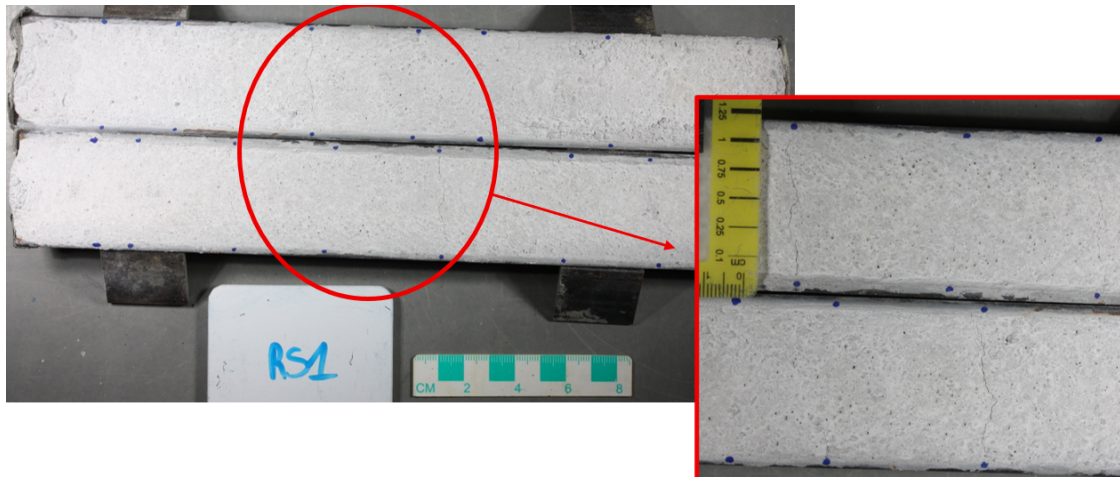


FIGURE 60 – Fissuration visible pour le mélange RS1 sans agent expansif

Cette fissuration peut être expliquée par plusieurs mécanismes complémentaires. Le premier est lié au retrait de séchage du mortier. Lorsque l'eau contenue dans les pores s'évapore, la matrice cimentaire tend à se contracter. Cependant, dans l'essai du German Angle, cette contraction est partiellement empêchée par les profilés métalliques. Cette restriction génère alors des contraintes de traction internes dans le mortier. Lorsque ces contraintes dépassent la résistance en traction du matériau, des fissures apparaissent. Ce phénomène est particulièrement critique pour les mélanges à base de RS1, dont la porosité et la capacité d'absorption d'eau plus élevées favorisent des variations hydriques plus importantes.

Une autre hypothèse concerne le comportement du mortier durant la cure humide. À la sortie de l'eau de chaux, un léger gonflement de la surface du mortier a été observé. Ce gonflement peut être lié à l'absorption d'eau, à la saturation progressive des pores accessibles ou encore à la poursuite de l'hydratation du liant. Dans un système libre, cette expansion pourrait se produire sans contrainte majeure. En revanche, dans le dispositif du German Angle, les parois métalliques limitent partiellement les déformations, ce qui peut générer des contraintes supplémentaires dans le matériau. La succession d'une phase de gonflement en cure humide puis d'une phase de retrait au séchage peut donc accentuer les sollicitations internes et favoriser la fissuration.

D'autres facteurs peuvent également intervenir, tels que la forte teneur en fines du sable RS1, l'hétérogénéité de la microstructure, la qualité de l'interface entre la pâte cimentaire ou les grains recyclés. Ces éléments peuvent créer localement des concentrations de contraintes et faciliter l'initiation des fissures, en particulier dans les zones où le retrait est le plus fortement empêché.

Enfin, une dernière observation concerne l'apparition de marques longitudinales le long des lèvres des profilés métalliques, visibles pour l'ensemble des mélanges et représentées en bleu sur la Figure 59. Ces marques ne doivent toutefois pas être interprétées directement comme des fissures structurelles. En effet, après la sortie des éprouvettes de l'eau de chaux, un léger

dépôt blanchâtre était présent sur plusieurs échantillons. Il est donc possible que ces traces correspondent en partie à des dépôts de chaux séchée ou à une fissuration très superficielle de surface, plutôt qu'à une fissuration profonde du mortier.

Afin de confirmer la nature de ces marques, des observations complémentaires seraient nécessaires. Une analyse au microscope optique ou à la loupe binoculaire permettrait d'évaluer plus précisément l'ouverture et la continuité des fissures. Des coupes transversales pourraient également être réalisées afin de vérifier leur profondeur. Enfin, des essais par pénétration de colorant, par observation au microscope numérique ou par tomographie pourraient permettre de déterminer si ces marques correspondent à de simples dépôts superficiels, à un début de décollement à l'interface mortier-profilé métallique ou à de véritables fissures traversantes. À ce stade, l'absence de fissuration transversale sur les autres mélanges suggère toutefois que ces marques longitudinales ne traduisent pas nécessairement une fissuration significative du matériau.

Effet des différents agents expansif sur le retrait restreint

La présence d'agents expansifs combinés à des SRA ne permet pas d'éliminer totalement le risque de fissuration. En effet, l'analyse des photos présentées en Annexe [A.10](#) montre que des fissures apparaissent tout de même pour certains mélanges, en particulier ceux contenant du RS1. Toutefois, cette fissuration semble être retardée par rapport aux formulations sans agent compensateur ou contenant uniquement des SRA.

Les éprouvettes contenant les combinaisons G+SRA et K+SRA présentent globalement une fissuration moins marquée. Cette observation rejoint les résultats obtenus lors du suivi du retrait des barrettes, où les agents de type G et K avaient montré une capacité importante à compenser les déformations de retrait, sans toutefois les supprimer complètement. Un parallèle peut donc être établi entre la réduction du retrait mesurée expérimentalement et le retard d'apparition des fissures observé lors de l'essai.

Tableau récapitulatif de la fissuration apparue pour les différents mélanges

Le Tableau 39 représente un résumé global de ce qui a été observée :

TABLE 39 – Synthèse des observations de fissuration lors de l'essai German Angle

Mélange	Date d'apparition	Nb. fissures	Ouverture
RS1 + MgO	13/04/2026	4	$< 0,1$ mm
RS1 + MgO + SRA	14/04/2026	2 à 3	$\leq 0,1$ mm
RS1 + SRA	21/04/2026	3	0,1 mm max.
RS1 + K+SRA	09/04/2026	1	< 1 mm
RS1 + G+SRA	None	None	None
RS1	10/04/2026	8	0,1 mm à 0,25 mm
NS + MgO	None	None	None
NS + MgO + SRA	None	None	None
NS + SRA	None	None	None
NS + K+SRA	30/04/2026	1	$< 0,1$ mm
NS + G+SRA	None	None	None
NS	None	None	None
NS+RS1 + MgO	None	None	None
NS+RS1 + MgO+SRA	None	None	None
NS+RS1 + SRA	None	None	None
NS+RS1 + K+SRA	None	None	None
NS+RS1 + G+SRA	None	None	None
NS+RS1	None	None	None
RS2 + MgO	None	None	None
RS2 + MgO+SRA	None	None	None
RS2 + SRA	28/04/2026	1	$< 0,1$ mm
RS2 + K+SRA	None	None	None
RS2 + G+SRA	None	None	None

6. Évaluation de l'aptitude des mortiers à base de sables recyclés pour des applications de maçonnerie

6.1 Comparaison avec les normes existantes

L'objectif de cette partie est de situer les résistances à la compression obtenues expérimentalement par rapport aux exigences minimales associées aux mortiers de maçonnerie. En Belgique, la référence la plus directement liée à cette application est la norme NBN EN 998-2 :2016, qui définit les prescriptions relatives aux mortiers de maçonnerie, notamment à travers des classes de résistance à la compression.

Au Canada, les mortiers de maçonnerie sont notamment encadrés par la norme CSA A179, *Mortar and Grout for Unit Masonry*. Celle-ci distingue une approche par proportions, dans laquelle les performances sont supposées atteintes par le respect d'une formulation prescrite, et une approche par propriétés, qui impose des résistances minimales à respecter.

La Figure 61 synthétise les valeurs minimales de résistance à la compression considérées pour les différentes applications.

Type de mortier	Norme	Classe	Résistance à la compression (MPa) à 28 jours
Mortier de maçonnerie courant (M5)	EN 998-2	M5	≥ 5 MPa
Mortier de maçonnerie courant (M10)	EN 998-2	M10	≥ 10 MPa
Mortier de pose pierre ou béton armé	EN 998-2	M15	≥ 15 MPa
Mortier d'enduit extérieur (CS III)	EN 998-1	CS III	3,5 – 7,5 MPa
Mortier de réparation structurale	EN 1504-3	Classe R3	≥ 25 MPa
Mortier de réparation haute performance	EN 1504-3	Classe R4	≥ 45 MPa

FIGURE 61 – Résistances minimales requises selon les domaines d'application considérés (Belgique)

Dans le cadre de cette étude, les formulations développées ne s'inscrivent pas strictement dans le cadre normatif actuel, notamment en raison des taux élevés de substitution par des sables recyclés. En Belgique, l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons reste encadrée par des exigences spécifiques, notamment en matière de qualité, d'absorption d'eau et de taux de substitution. À titre d'exemple, certains granulats recyclés de haute qualité peuvent

être limités à des taux de substitution de l’ordre de 20 à 30 % selon les applications, tandis que les granulats présentant une absorption d’eau plus élevée nécessitent des précautions supplémentaires.

Les résultats obtenus montrent toutefois que les résistances à la compression mesurées restent globalement compatibles avec plusieurs niveaux d’exigence associés aux mortiers de maçonnerie. Les valeurs de résistances expérimentales relevées à 28 jours pour les mélanges contenant les sables recyclés sont listées dans le tableau 40.

TABLE 40 – Résistance à la compression des mélanges (28j)

Mélange	RS1 [MPa]	NS+RS1 [MPa]	RS2 [MPa]
MgO	17.78	23.75	22.06
MgO+SRA	14.12	23.82	15.83
SRA	22.75	34.35	29.81
K+SRA	24.14	33.28	29.63
G+SRA	19.10	19.28	16.09
Sans agent expansif	21.09	23.96	–

Ainsi, malgré certaines limites liées à l’utilisation de sables recyclés en forte proportion, les résistances obtenues suggèrent que ces mortiers recyclés pourraient être envisagés sans problème pour certaines applications de maçonnerie, sous réserve d’une validation plus complète de leur durabilité et de leur comportement à long terme.

L’ajout d’un agent expansif de type K apparaît particulièrement intéressant, car il permet de limiter le retrait tout en conservant de bonnes performances mécaniques.

Comme énoncé lors de l’analyse de l’absorption des mélanges, la durabilité constitue également un critère essentiel pour envisager l’utilisation de ces mortiers. Les conditions environnementales d’exposition peuvent imposer des exigences supplémentaires liées notamment à la porosité, à l’absorption d’eau, au rapport eau/liant et à la résistance aux agressions extérieures. Alors que la norme européenne définit six classes d’exposition, le complément belge NBN B 15-001 :2024 les décline en treize classes environnementales. Ainsi, même si les résistances obtenues semblent compatibles avec certaines applications de maçonnerie, une étude complémentaire de durabilité serait nécessaire afin de vérifier l’adéquation des formulations développées avec la classe d’exposition visée.

7. Analyse du cycle de vie

Au cours du séjour à l'Université Laval, la question de l'analyse du cycle de vie (ACV) est apparue particulièrement pertinente dans le cadre de cette recherche. En effet, au-delà des performances mécaniques et du comportement au retrait, l'intérêt des mortiers à base de sables recyclés réside également dans leur potentiel de réduction des impacts environnementaux associés à l'exploitation des ressources naturelles.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée d'évaluation environnementale définie par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Elle vise à quantifier les inputs (matières premières, énergie, eau) et les outputs (émissions, déchets, rejets) associés à un produit, un procédé ou un service tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie. Cette approche permet ainsi d'identifier les étapes les plus contributrices aux impacts environnementaux et de comparer différentes solutions remplissant une même fonction. Les normes ISO définissent quatre étapes principales : la définition des objectifs et du périmètre de l'étude, l'inventaire du cycle de vie (ICV), l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) et l'interprétation des résultats.

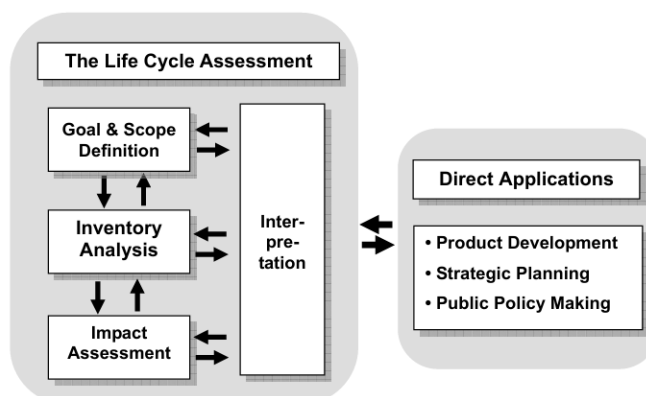


FIGURE 62 – Etapes d'une ACV (ISO 14040, 1997)

Dans une étude d'ACV, la première étape consiste généralement à élaborer un diagramme des flux (flow diagram). Celui-ci représente l'ensemble des processus intervenant dans le système étudié ainsi que les flux de matières, d'énergie et de transport qui les relient. Le diagramme des flux constitue la base de l'inventaire du cycle de vie puisqu'il permet de définir clairement les frontières du système, d'identifier les données à collecter et de visualiser les interactions entre les différentes étapes du procédé.

Dans ce contexte, un cours de quatre heures consacré à l'analyse du cycle de vie a été dispensé par le Professeur Charles Breton, spécialiste du domaine au Département de génie civil de l'Université Laval. Cette formation a permis d'acquérir les notions fondamentales

nécessaires à la réalisation d'une première réflexion environnementale appliquée aux mortiers à base de sables recyclés développés dans le cadre de ce travail.

Sur la base des données disponibles dans les bases de données environnementales ainsi que des informations recueillies sur les matériaux étudiés, le diagramme des flux présenté à la Figure 63 a pu être élaboré.

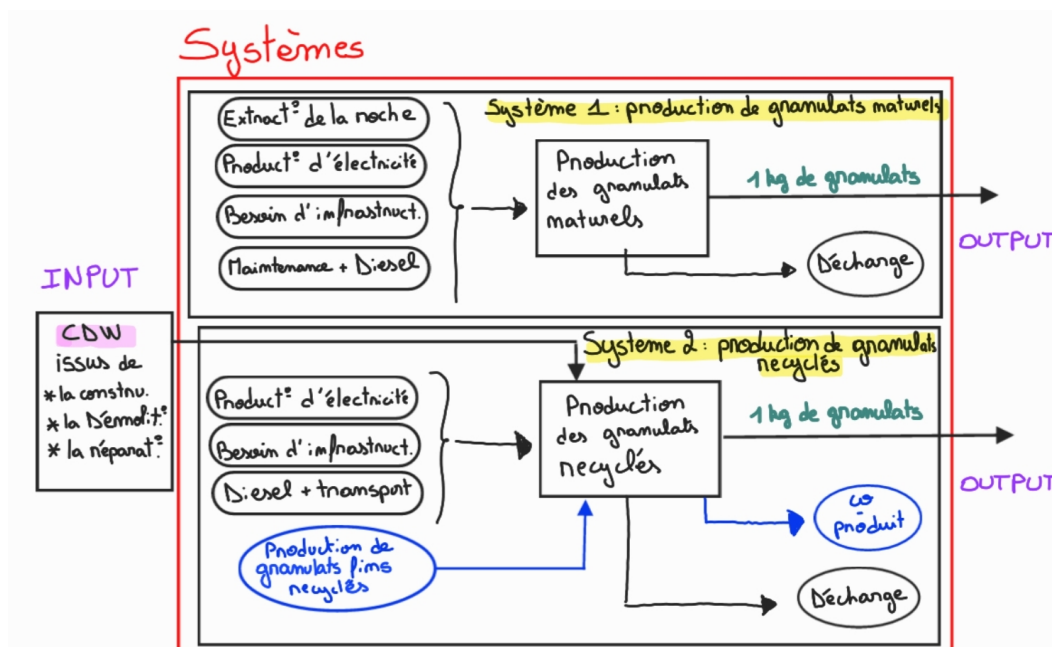


FIGURE 63 – Diagramme des flux pour l'ACV pour la production de granulats recyclés

Ce diagramme met en évidence les principales étapes du cycle de vie des mortiers étudiés, notamment l'extraction et la production des matières premières, le recyclage et le traitement des déchets de construction et de démolition, les opérations de transport. Il permet également d'identifier les postes susceptibles de contribuer le plus aux impacts environnementaux, le transport des matériaux ou encore les opérations de concassage et de traitement des granulats recyclés. Une telle approche constitue un outil pertinent pour évaluer le potentiel environnemental des mortiers à base de sables recyclés et pour orienter le développement de formulations plus durables.

Il convient toutefois de préciser qu'il constitue une représentation simplifiée du système étudié. De nombreuses données nécessaires à la réalisation d'une ACV complète n'ont pas pu être intégrées dans le cadre de ce travail, notamment celles disponibles dans des bases de données spécialisées telles que ecoinvent ou d'autres inventaires environnementaux. Par conséquent, ce schéma doit être considéré comme un outil de visualisation permettant d'identifier les principaux flux de matières et d'énergie plutôt que comme une modélisation exhaustive du cycle de vie du mortier.

Dans le cas des sables recyclés, l'ACV débute généralement par la collecte des déchets, suivie de leur transport vers une installation de recyclage. Les matériaux y sont ensuite

triés, concassés, criblés et éventuellement lavés afin d'obtenir une fraction fine réutilisable comme sable recyclé. Ces étapes nécessitent des apports en énergie, notamment sous forme d'électricité et de carburant, et peuvent également générer des refus de traitement envoyés en décharge.

Ainsi, l'intérêt environnemental des sables recyclés réside dans le fait qu'ils permettent de valoriser une partie des déchets de déconstruction tout en limitant l'extraction de sables/roches naturels. Dans une ACV, cette substitution peut donc être associée à des impacts évités, liés à la réduction de l'exploitation des ressources naturelles et à la diminution des volumes de déchets enfouis et au développement de co-produits, tels que des fines recyclées. Toutefois, le bilan environnemental final dépend fortement de plusieurs paramètres, tels que la distance de transport, l'efficacité du procédé de recyclage, la qualité du sable obtenu et les traitements nécessaires pour le rendre utilisable dans les mortiers.

8. Conclusion et perspectives

Ce travail de recherche peut être considéré comme une étape supplémentaire dans la compréhension et le développement de mortiers incorporant des sables recyclés. Pour rappel, l'objectif principal était d'évaluer la faisabilité d'une substitution partielle (50 %) ou totale (100 %) du sable naturel par des sables recyclés, tout en étudiant l'influence de différentes stratégies de compensation du retrait basées sur l'utilisation d'agents expansifs de type K, MgO et G, seuls ou combinés à des adjuvants réducteurs de retrait (SRA). Les résultats obtenus permettent d'apporter plusieurs éléments de réponse aux questions de recherche formulées initialement.

Concernant l'influence de la variabilité intrinsèque des sables étudiés, les résultats montrent clairement que la nature du sable constitue le paramètre le plus influent sur les performances globales des mortiers. Le sable naturel (NS) présente systématiquement les meilleures performances mécaniques, les plus faibles absorptions d'eau ainsi que les retraits les plus limités. À l'inverse, le sable recyclé canadien (RS1) est caractérisé par une forte absorption d'eau, une teneur importante en fines et une porosité élevée, ce qui se traduit par une diminution significative des résistances mécaniques et une plus grande sensibilité au retrait et à la fissuration. Le sable recyclé belge (RS2) présente un comportement intermédiaire, avec des performances généralement supérieures à celles du RS1 mais restant inférieures à celles obtenues avec le sable naturel. Ces observations confirment que les propriétés intrinsèques des granulats recyclés, notamment la présence de pâte cimentaire adhérente et leur capacité d'absorption d'eau, ont un rôle significatif.

Concernant les agents compensateurs de retrait, les résultats montrent que les agents de type K et G sont les plus efficaces pour réduire les déformations de retrait observées sur les barrettes. Cette réduction se traduit également par une diminution de la fissuration observée lors de l'essai German Angle. Toutefois, les deux agents présentent des comportements différents vis-à-vis des performances mécaniques. L'agent de type K permet généralement de maintenir des résistances satisfaisantes tout en réduisant fortement le retrait, alors que l'agent de type G, malgré son efficacité sur la compensation du retrait, entraîne souvent une diminution plus marquée des résistances mécaniques. L'agent de type MgO présente quant à lui un comportement intermédiaire. Son effet compensateur apparaît moins prononcé à 28 jours, probablement en raison d'une cinétique d'hydratation plus lente, mais il permet néanmoins une réduction partielle du retrait.

L'ajout de SRA a montré un effet particulièrement intéressant sur plusieurs formulations. Utilisés seuls, les SRA ont permis d'améliorer les résistances mécaniques de certaines formulations, notamment celles contenant un mélange NS+RS1. Lorsqu'ils sont combinés aux agents

expansifs, ils contribuent généralement à retarder l'apparition des fissures et à réduire leur ampleur. Les résultats montrent cependant que cette combinaison ne permet pas d'éliminer totalement les phénomènes de fissuration, en particulier pour les formulations contenant 100 % de RS1. Les observations réalisées sur les éprouvettes German Angle confirment néanmoins que les combinaisons K+SRA et G+SRA présentent les comportements les plus favorables vis-à-vis de la fissuration, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus lors des essais de retrait.

L'analyse globale des résultats montre que les formulations contenant 50 % de sable recyclé constituent le compromis le plus intéressant parmi celles étudiées. Elles permettent de réduire l'utilisation de sable naturel tout en conservant des performances mécaniques satisfaisantes. En particulier, l'association d'un taux de substitution de 50 %, d'un agent expansif de type K et d'un SRA semble offrir le meilleur équilibre entre résistance, limitation du retrait et maîtrise de la fissuration.

Ces résultats doivent toutefois être considérés comme une première étape. Les dosages étudiés ont été choisis pour permettre la comparaison avec les travaux antérieurs, mais ils ne constituent pas nécessairement des formulations optimales. Une optimisation plus poussée du rapport E/L, de la teneur en liant et des dosages en agents compensateurs pourrait permettre d'améliorer encore les performances.

Enfin, une substitution partielle de 50 % apparaît réaliste pour des applications courantes de maçonnerie, sous réserve d'une formulation adaptée et d'une étude approfondie de la durabilité à long terme. Une substitution totale reste envisageable, mais elle nécessite encore des améliorations, notamment pour réduire l'absorption d'eau, la porosité et les risques de retrait. Les sables recyclés constituent donc une alternative crédible aux sables naturels, mais leur utilisation à grande échelle demande encore des validations complémentaires.

Les résultats obtenus ouvrent ainsi plusieurs perspectives pour la suite de ce travail. Il serait pertinent d'améliorer la qualité des sables recyclés, en particulier en réduisant leur absorption d'eau et la quantité de pâte cimentaire adhérente aux grains, par exemple à l'aide de traitements mécaniques, chimiques ou par carbonatation accélérée. Finalement, des essais complémentaires de durabilité à long terme, tels que la carbonatation, le gel-dégel ou la pénétration des chlorures, ainsi qu'une analyse du cycle de vie complète, permettraient de mieux évaluer le potentiel réel de ces mortiers comme alternative durable aux mortiers conventionnels.

A. Annexes

A.1 Fiches techniques du sable naturel : NS

FICHE TECHNIQUE									
		LABORATOIRE : AMRIZE ST-GABRIEL-DE-BRANDON 1811 CHEMIN ST-CLÉOPHAS, ST-GABRIEL-DE-BRANDON							
		SITE DE PRODUCTION : 3530 AMRIZE SABLIERE ST-GABRIEL-DE-BRANDON							
		1811 CHEMIN ST-CLÉOPHAS, ST-GABRIEL-DE-BRANDON							
		SITE DE DISTRIBUTION : 3530 AMRIZE SABLIERE ST-GABRIEL-DE-BRANDON							
		1811 CHEMIN ST-CLÉOPHAS, ST-GABRIEL-DE-BRANDON							
		PRODUIT : 9071 SG,SABLE À BÉTON							
		RÉSERVE : 2025							
SMQ ISO 9001:2015 FORMULAIRE : FICHE TECHNIQUE,20250625									
ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE				RÉSULTATS DES ESSAIS PHYSIQUES					
NORME :	CSA A23.2-2A			IDENTIFIANT DE LA NORME		RÉSULTATS	SPEC	RÉALISÉ PAR	DATE
SPEC :	NQ2560-114-2014 (R2024)			CSA A23.2-1A ÉCHANTILLONNAGE				Amrize	18 aout 2025
TAMIS	MOYENNE	FUSEAU	E-TYPE	CSA A23.2-2A ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE				Amrize	18 aout 2025
MM	300			CSA A23.2-3A MOTTES D'ARGILE		0,16		Amrize	18 aout 2025
	250			CSA A23.2-4A PARTICULES LÉGÈRES		0	Max: 0,5%	Artelia	5 sept. 2025
	200			CSA A23.2-5A PERTE AU 80µM		2,3		Amrize	18 aout 2025
	150			CSA A23.2-6A DENSITÉ GRANULAT FIN (BRUT)		2,676		Amrize	18 aout 2025
	112			CSA A23.2-6A DENSITÉ GRANULAT FIN (SSS)		2,692		Amrize	18 aout 2025
	80			CSA A23.2-6A DENSITÉ GRANULAT FIN (APP)		2,718		Amrize	18 aout 2025
	56			CSA A23.2-6A ABSORPTION GRANULAT FIN		0,57		Amrize	18 aout 2025
	40			CSA A23.2-7A INDICE COLORIMÉTRIQUE		1		Amrize	18 aout 2025
	31,5			CSA A23.2-9A MGSO4		5,6		Artelia	5 sept. 2025
	28			CSA A23.2-10A MASSE VOLUMIQUE (NON-TASSÉE)		1410,1	HUM:0,71	Amrize	18 aout 2025
	20			CSA A23.2-10A MASSE VOLUMIQUE (TASSÉE)		1550,6		Amrize	18 aout 2025
	14			CSA A23.2-14A RÉACTION ALCALIS-GRANULATS		0,018		Englobe	8 mai 2025
	10	100	100-100	CSA A23.2-15A ANALYSE PÉTROGRAPHIQUE METH. A				Englobe	15 avr. 2025
	5	95	95-100	CSA A23.2-23A MICRO DEVAL GRANULAT FIN		6		Amrize	18 aout 2025
µm	2,5	86	80-100	LC 21-080 FRIABILITÉ DES GRANULATS FINS		15,1		Amrize	18 aout 2025
	1,25	73	50-90	LC 21-101 MICRO DEVAL GRANULATS FINS		20,8		Amrize	18 aout 2025
	630	52	25-65	LC 31-228 MATIÈRES ORGANIQUES		0,07 %	Max: 0,8 %	Artelia	5 sept. 2025
	315	25	10-35	LC 21-255 VALEUR AU BLEU DE MÉTHYLÈNE		0,05 (ml/g)	Max: 0,20(ml/g)	Artelia	5 sept. 2025
	160	9	2-10						
80	2,7	1-3							
Module de finesse CSA A23.1		2,68							

Préparé par : *Sabrina Blouin*

Technicien Qualité sabrina.blouin@amrize.com

Approuvé par : *Stéphane Brunet*

Superviseur Qualité Granulat & Asphalte GMA
stephane.brunet@amrize.com

Fiche Technique, 15 mai 2020

FIGURE 64 – Fiche technique fournie par Amrize : NS

A.1.1 Rapport d'examen Pétrographique du sable naturel par Englobe

Client :	Lafarge Canada inc.	Dossier :	02401384.000-0100-0101
Projet :	Prestation d'essais de laboratoire	Date :	2025-04-15
		Échantillon n°:	44
Endroit :			Page 1 de 2

RAPPORT D'EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE

Norme:	CSA A23.2-15A, méthode A
Provenance:	3S30 Sablière St-Gabriel-de-Brandon
Calibre :	9071 SG, Sable à béton
Usage projeté:	Béton de ciment
Prélevé par :	Le client, le 2025-04-01
Réf. client :	(GMA-25) ENG-001 - 4501859196

ANALYSE PÉTROGRAPHIQUE DU GRANULAT**Généralités**

L'échantillon à l'étude est un gravier naturel. Les fractions 10, 5, 2,5 et 1,25 mm, 630, 315, 160 et 80 µm ont été identifiées à l'aide d'un microscope binoculaire possédant un pouvoir de grossissement de 125x. Des analyses chimiques ont été réalisées afin de déterminer le soufre total ainsi que les sulfates. Aucune lame mince ni analyse par diffraction aux rayons X n'ont été réalisées. De ce fait, certaines descriptions peuvent être considérées comme provisoires.

Géologie du granulat

Le granulat provient de l'érosion des unités géologiques appartenant à la province de Grenville. L'échantillon est constitué de 39 % de roche intrusive et de gneiss, de 21 % de feldspaths, de 1 % d'oxydes de fer et minéraux ferromagnésiens et de traces de micas.

Qualité pétrographique

Conformément aux méthodes usuelles dans l'industrie du génie des agrégats, le granulat ne présente pas de particule friable ainsi qu'aucune altération significative. Tel que stipulé dans la norme CSA A23.2-15A, le granulat fin ne possède aucun NP (nombre pétrographique).

Réactivité alcalis-granulats

Si le granulat n'a pas déjà fait l'objet d'une évaluation aux réactions alcalis-granulats conformément aux méthodes d'essais et aux critères prescrits par la norme CSA A23.1, il est recommandé de procéder à une telle évaluation.

Analyses chimiques

L'analyse chimique a démontré un taux de soufre total de moins de 0,01 % et un taux de sulfate de 0,001 %. À ce sujet, l'annexe P de la norme CSA A23.1 stipule que la teneur en soufre total des granulats pour béton ne devrait pas dépasser 1 %, sauf en présence de pyrrhotite alors la teneur en soufre total devrait être réduite à 0,15 % maximum.

Résumé

Selon l'examen pétrographique macroscopique, les propriétés physiques et mécaniques des phases minéralogiques observées sont vraisemblablement bonnes et correspondent à une bonne qualité physique et mécanique pour la production du béton. Cependant, il est essentiel que le matériau satisfasse les critères spécifiés à l'article 4.2.3.1 de la norme CSA A23.1. D'un point de vue chimique, il est recommandé de faire une évaluation aux réactions alcalis-granulats.

Remarque :

Les commentaires et les observations dans ce rapport sont basés sur l'analyse pétrographique effectuée selon la norme CSA A23.2-15A, méthode A. Les conclusions sont donc une opinion professionnelle qui tient compte des résultats d'un examen visuel, de la reconnaissance des phases minérales en microscopie, de l'expérience acquise par histoires de cas et de l'état actuel de la pratique.

Myriam St-Louis, géo.
Réalisé par

Tania Bélisle, tech.
Vérifié par

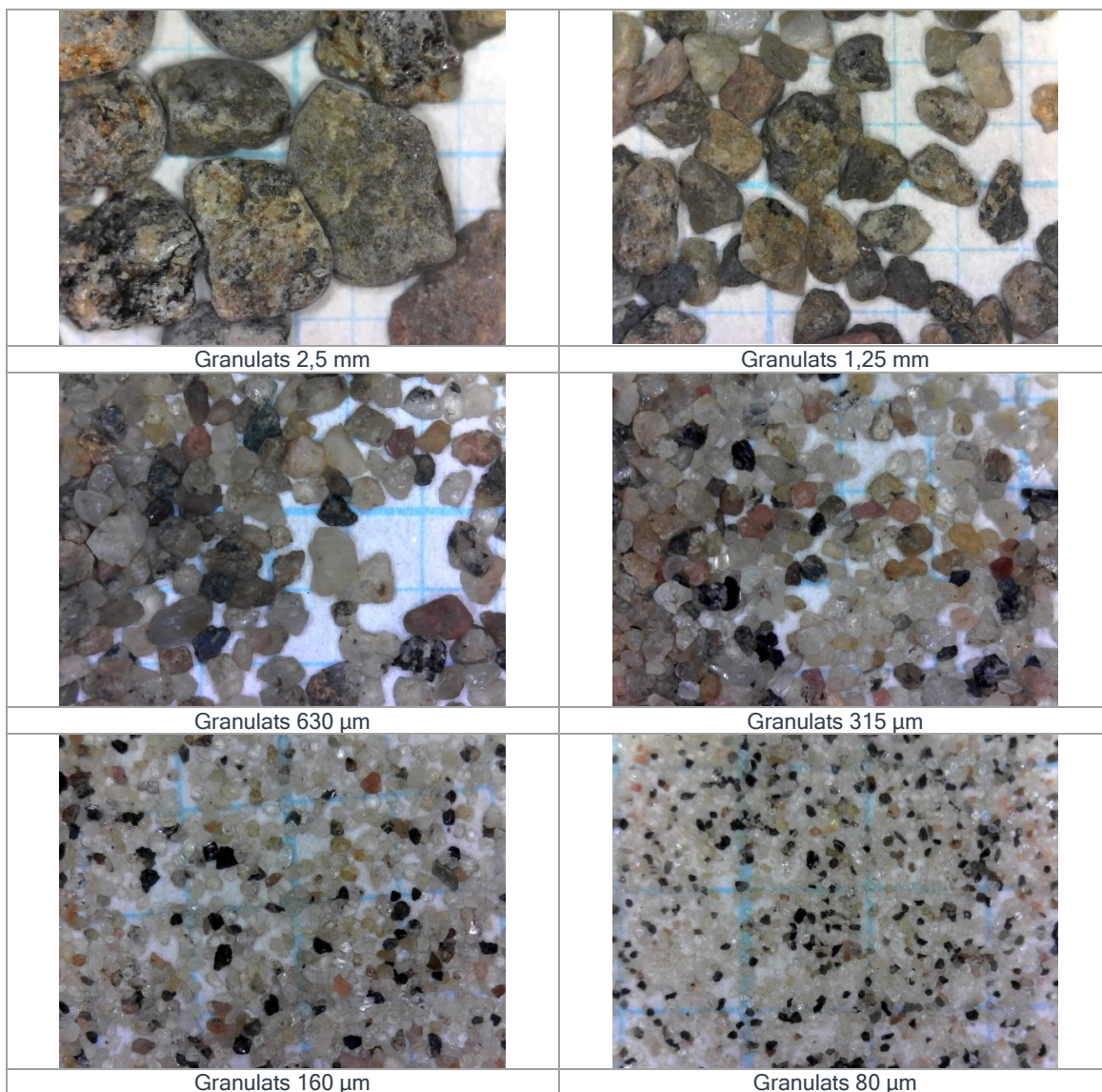
Myriam St-Louis, géo.
Approuvé par



Client :	Lafarge Canada inc.	Dossier :	02401384.000-0100-0101
Projet :	Prestation d'essais de laboratoire	Date :	2025-04-15
		Échantillon n°:	44
Endroit :			Page 2 de 2

RAPPORT D'EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE

Photos des granulats



Myriam St-Louis, géo.
Réalisé par

Tania Bélisle, tech.
Vérifié par

Myriam St-Louis, géo.
Approuvé par



Client	:	Lafarge Canada inc.	Date	:	2025-04-08
Réf. client	:	(GMA-25) ENG-001 - 4501859196	Dossier	:	02101384.000-0100-0101
Projet	:	Prestation d'essais de laboratoire	Éch. n°	:	44

Norme : *Détermination du nombre pétrographique (CSA A23.2-15A, méthode A)*

Échantillon : 3S30 Sablière St-Gabriel-de-Brandon
9071 SG, Sable à béton

Échantillon

	% passant 14 mm	% passant 5 mm	% passant 2,5 mm	% passant 1,25 mm	% passant 630 µm	% passant 315 µm	% passant 160 µm
	% retenu 5 mm	% retenu 2,5 mm	% retenu 1,25 mm	% retenu 630 µm	% retenu 315 µm	% retenu 160 µm	% retenu 80 µm
Proportion granulométrique (%)	8	9	14	21	23	16	6
Masse de la prise d'essai (g)	466,4	129,4	89,9	138,9	161,5	99,2	42,5
% pondéré de la fraction	8,2	9,3	14,4	21,6	23,7	16,5	6,2

Tableau synoptique

Faciès pétrographique	Facteur	% retenu 5 mm	N.P.	% retenu 2,5 mm	N.P.	% retenu 1,25 mm	N.P.	% retenu 630 µm	N.P.	% retenu 315 µm	N.P.	% retenu 160 µm	N.P.	% retenu 80 µm	N.P.
Roche intrusive et gneiss	-	100	-	99	-	95	-	29	-	4	-	-	-	-	-
Quartz	-	-	-	-	-	2	-	40	-	50	-	80	-	85	-
Feldspaths	-	-	-	1	-	3	-	30	-	45	-	18	-	8	-
Oxydes de fer et minéraux ferromagnésiens	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	2	-	7	-
Micas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nombres pétrographiques cumulatifs		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nombre pétrographique -

Remarques : Proportions :
Roche intrusive : 39 %
Quartz : 39 %
Feldspaths : 21 %
Oxydes de fer et minéraux ferromagnésiens : 1 %
Micas : traces

Le prélèvement, le transport, ainsi que l'analyse granulométrique de l'échantillon ont été effectués par un représentant du client.

Myriam St-Louis, géo.

Réalisé par

Tania Bélisle, tech.

Vérifié par

Myriam St-Louis, géo.

Approuvé par



Département
des génies civil,
géologique
et des mines (CGM)

**Laboratoire de Géo-ingénierie -
Géochimie Analytique**

Adresse civique
Campus de
l'Université de Montréal
2900, Édouard-Montpetit
École Polytechnique
2500, chemin de Polytechnique
H3T 1J4

Adresse postale
C.P. 6079, succ. Centre-ville
Montréal (Québec) Canada
H3C 3A7
Téléphone : (514) 340-4257
Courriel : cgm@polymtl.ca
Télécopieur : (514) 340-3981

École affiliée à
l'Université de Montréal

Englobe Corp.

100, rue Jean-Coutu, Bureau 101
Varenes (Québec) J3X 0E1
Tél.: (450) 641-2059

À l'attention de **Jonathan Robichaud**

courriel: jonathan.robichaud@englobecorp.com

Bon de commande No :

79815 (2/3)

Échantillon #	Labo #	S (total) exprimé en S %m*	Sulfate hydrosoluble exprimé en SO ₄ ²⁻ %m*
02101384.000-0100-0101 #44	LGC251078	< 0,01	0,001

*%m = 1g/100g

Réf.: **BNQ** 2560-500/2022

S par LECO CS744

Sulfates hydrosolubles par turbidimétrie selon *standard methods*

Laboratoire de Géo-ingénierie - Géochimie Analytique

Jérôme Leroy, Technicien en chimie analytique

Tél.: (514) 340-4711 poste 2199

jerome.leroy@polymtl.ca

Zohra Laimeche, Technicienne en chimie analytique

Tél.: (514) 340-4711 poste 4789

zohra.laimeche@polymtl.ca

10 avril 2025



A.2 Fiches techniques des agents expansifs

A.2.1 Fiche agent de type K : Komponent

KOMPONENT®

Shrinkage-Compensating Cement Powder Admixture



PRODUCT DATASHEET

DESCRIPTION: KOMPONENT® is a calcium sulfoaluminate (CSA) cement-based powder admixture used to create shrinkage-compensating concretes and grouts. It is engineered to prevent negative volume change and drying shrinkage cracking by creating controlled expansion during placement and cure. The designed expansion overcomes the inherent shrinkage of portland and blended cement concretes. KOMPONENT is combined with local ASTM C150 portland cement, ASTM C595 portland limestone or other blended cements to produce an ASTM C845 Type K shrinkage-compensating cement. Concretes and grouts made with KOMPONENT reduce permeability, provide up to 60% increased abrasion resistance, prevent slab curling and dominant joints, improve sulfate resistance, and help maintain dimensional stability.

USES: Use KOMPONENT to make Type K shrinkage-compensating concretes and grouts. It can also be used in low shrinkage concretes and grouts. KOMPONENT is ideal for use in industrial slabs, concrete containment structures, parking structures, bridge decks, topping slabs, composite decks, post-tensioned and chemically prestressed structures, architectural concrete, polished concrete, mat foundations, underground structures, and other cast-in-place concrete applications. Use anywhere improved dimensional stability, durability, aesthetics, and structural behavior are required.

ENVIRONMENTAL ADVANTAGES: Use KOMPONENT to reduce your carbon footprint and lower your environmental impact. Contact your CTS representative for EPD, LEED values and other sustainability information.

APPLICATION: Use KOMPONENT to replace approximately 5–17% of total cementitious content in the mix design. Mix designs vary depending on application and other mix design constituents. All mix designs must be qualified per ASTM C878 or C806 and verified by trial batching by the producer. Shrinkage-compensated materials made with KOMPONENT are produced at the batch plant by conventional production equipment and installation practices. Protect freshly placed concrete from premature drying and excessive cold or hot temperatures. Use standard industry best practices for hot and cold weather concreting. Protect concrete from freezing temperatures for 7 days after placement. Review the KOMPONENT Shrinkage-Compensating Concrete Technical Manual for design and installation considerations. Contact your CTS Komponent Representative for project support.

BATCHING & MIXING: KOMPONENT is added at the batch plant using industry standard bulk cement batching and mixing equipment and incorporation methods. Ensure thorough mixing and dispersion. When using bagged units for smaller projects, alternate portable concrete batching solutions are available. Contact a CTS Komponent Representative for more information. Approved mix designs use a lab qualified dosage of KOMPONENT to replace an equivalent weight of total cementitious content per cubic yard. For mix design guidelines and batching and mixing instructions, refer to the Komponent Shrinkage-Compensating Concrete Technical Manual for details.

WATER/CEMENT RATIO: Water/cement ratios between 0.40 and 0.55 are recommended. For lower water/cement ratio designs, contact your CTS Komponent Representative for project support.

CURING: For general applications, wet curing is required. Refer to the Komponent Shrinkage-Compensating Concrete Technical Manual and current ACI 223 guidelines for additional information.

COLD WEATHER: Environmental and material temperatures below 70°F (21°C), relative humidity, wind speed and solar radiation may affect setting time and the rate of strength gain. Lower temperatures will have a more pronounced effect. Thinner sections will be more significantly affected. To compensate for cold temperatures, keep material warm, use heated mix water and follow ACI 306 Procedures for Cold Weather Concreting. When average high and low temperature is expected to fall below 40°F (4°C) for three successive days, maintain delivered concrete mixture temperature within the temperature range required by ACI 301. Do not use frozen materials or materials containing ice or snow. Do not place concrete on frozen subgrade or on subgrade containing frozen materials.

OVERVIEW

Highlights:

- Prevent drying shrinkage cracking
- Prevent curling
- Reduce joints by up to 95%
- Eliminate dominant joints
- Reduce reinforcement
- Improve abrasion resistance up to 60%
- Increase durability and lower permeability
- Improve sulfate resistance
- Maximize placement sizes and minimize mobilizations
- Eliminate pour/delay strips
- Increase load capacity and reduce slab thickness
- Maintain dimensional stability
- Maintain long-term FF/FL
- Improve long-term structural behavior

Tested in accordance with:

ASTM: C845, C806, C878

MasterFormat® 2020

- | | |
|----------|---|
| 03 31 00 | Cast-in-Place Concrete |
| 03 31 19 | Shrinkage-Compensating Structural Concrete |
| 03 33 00 | Architectural Concrete - Cast-In-Place Concrete |
| 03 37 13 | Shotcrete |
| 03 47 00 | Site-Cast Concrete |
| 03 48 00 | Precast Concrete Specialties |
| 03 49 00 | Glass-Fiber-Reinforced Concrete |
| 03 53 19 | Concrete Overlayment |
| 03 61 00 | Cementitious Grouting |
| 03 62 13 | Non-Metallic Non-Shrink Grouting |
| 03 64 00 | Injection Grouting |
| 03 70 00 | Mass Concrete |

Manufacturer:

CTS Cement Manufacturing Corp.
12442 Knott St.
Garden Grove, CA 92841
Tel: 800-929-3030 | Fax: 714-379-8270
Web: www.CTScement.com/Komponent
E-mail: info@CTScement.com



KOMPONENT® Shrinkage-Compensating Cement Additive

WARM WEATHER: Environmental and material temperatures above 70°F (21°C), relative humidity, wind speed and solar radiation may affect setting time and the rate of strength gain. Higher temperatures will have a more pronounced effect. To compensate for warm temperatures, keep material cool, use chilled mix water and follow ACI 305 Procedures for Hot Weather Concreting.

PACKAGING & AVAILABILITY: KOMPONENT is available in bulk delivered by rail or tanker, 50 lb (22.7 kg) polyethylene-lined bags and 2000 lb (907 kg) bulk bags.

SHELF LIFE: KOMPONENT bagged units have a shelf life of 12 months from date of purchase when stored properly in a dry location, protected from moisture, out of direct sunlight, and in an undamaged package. Sealed bulk storage containers extend the shelf life of KOMPONENT up to 2 years when stored properly and protected from adverse environmental conditions.

USER RESPONSIBILITY: Before using CTS products, read current technical data sheets, bulletins, product labels and safety data sheets at www.CTScement.com/Komponent. It is the user's responsibility to review instructions and warnings for any CTS products prior to use.

TECHNICAL SUPPORT: CTS Cement Manufacturing Corp. provides contractors, engineers, and project owners with professional technical services on any KOMPONENT application. For detailed information on use and applications of KOMPONENT, refer to the Komponent Shrinkage-Compensating Concrete Technical Manual or contact your CTS Engineering representative for project support at 1-800-929-3030.

WARNING: DO NOT BREATHE DUST. AVOID CONTACT WITH SKIN AND EYES. Use material in well-ventilated areas only. Exposure to cement dust may irritate eyes, nose, throat, and the upper respiratory system/lungs. Silica exposure by inhalation may result in the development of lung injuries and pulmonary diseases, including silicosis and lung cancer. Seek medical treatment if you experience difficulty breathing while using this product. The use of a NIOSH/MSHA-approved respirator (P-, N- or R-95) is recommended to minimize inhalation of cement dust. Eat and drink only in dust-free areas to avoid ingesting cement dust. Skin contact with dry material or wet mixtures may result in bodily injury ranging from moderate irritation and thickening/cracking of skin to severe skin damage from chemical burns. If irritation or burning occurs, seek medical treatment. Protect eyes with goggles or safety glasses with side shields. Cover skin with protective clothing. Use chemical resistant gloves and waterproof boots. In case of skin contact with cement dust, immediately wash off dust with soap and water to avoid skin damage. In case of skin contact with wet cement, wash exposed skin areas with cold running water as soon as possible. In case of eye contact with cement dust, flush immediately and repeatedly with clean water, and consult a physician. If wet cement splashes into eyes, rinse eyes with clean water for at least 15 minutes and go to the hospital for further treatment.

Please refer to the SDS and www.CTScement.com for additional safety information regarding this material.

LIMITED WARRANTY: CTS CEMENT MANUFACTURING CORP. (CTS) warrants its materials to be of good quality and, at its option, will replace or refund the purchase price of any material proven to be defective within one (1) year from date of purchase. The above remedies shall be the limit of CTS' responsibility. Except for the foregoing, all warranties expressed or implied, including merchantability and fitness for a particular purpose, are excluded. CTS shall not be liable for any consequential, incidental, or special damages arising directly or indirectly from the use of the materials.

⚠ WARNING

CANCER and REPRODUCTIVE HARM - www.P65Warnings.ca.gov

TYPICAL PHYSICAL DATA

The mix designs provided here are EXAMPLES of slab-on-grade and grout mixes when using KOMPONENT. Contact a CTS Komponent Representative for assistance developing project specific mix designs or for specialty use applications. All mixes should be tested in a qualified lab using methods designed for shrinkage-compensating cements (i.e., ASTM C878, ASTM C806) to confirm suitability for the required application and verify dosage with regional materials.

Trial batching is necessary to verify actual performance of the mix. The project engineer, contractor, and concrete producer are responsible for ensuring the mix design properties are appropriate for the application and anticipated environmental conditions.

TYPE K CONCRETE made with KOMPONENT

Portland cement, portland limestone cement, or other blended cements	464 lb (210.5 kg)
KOMPONENT	100 lb (45.4 kg)
Fine Aggregate ASTM C33	1214 lb (550.7 kg)
Coarse Aggregate ASTM C33	1935 lb (877.7 kg)
Water	282 lb (127.9 kg)
Hydration Stabilizer ASTM C494	Minimum 2oz/ctw (0.06kg/ctw)
Water Reducer ASTM C494	17 oz (0.48 kg)

Performance

Slump (+/-1.5") ASTM C143	5.75 in (146mm)
Expansion, 7 days ASTM C878	0.041 %
Compressive Strength, 7 days ASTM C39	3283 psi (22.6 MPa)
Compressive Strength, 28 days ASTM C39	5120 psi (35.3 MPa)
Specific Gravity, KOMPONENT	2.87

NON-SHRINK GROUT made with KOMPONENT

Portland cement, portland limestone cement, or other blended cements	846 lb (383.7 kg)
KOMPONENT	100 lb (45.4 kg)
Fine Aggregate ASTM C33	2640 lb (1197.5 kg)
Water	434 lb (196.9 kg)
Hydration Stabilizer ASTM C494	Minimum 2oz/ctw (0.06kg/ctw)
Water Reducer ASTM C494	24 oz (0.68 kg)

Performance

Expansion, 7 days ASTM C878	0.045 %
Compressive Strength, 7 days ASTM C109 Mod.	4800 psi (33.1 MPa)
Compressive Strength, 28 days ASTM C109 Mod.	7250 psi (49.6 MPa)
Specific Gravity, KOMPONENT	2.87



USGBC and related logo is a trademark owned by the U.S. Green Building Council and is used by permission.

CTS Cement Manufacturing Corp. | 12442 Knott St., Garden Grove, CA 92841 | 800-929-3030 | www.CTScement.com

FIGURE 65 – Fiche technique fournie par CTS Cement Manufacturing Corp. : Komponent

A.2.2 Fiche agent de type MgO : SikaControl SC

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

SikaControl® SC

ADJUVANT RÉDUCTEUR ET COMPENSATEUR DE RETRAIT

DESCRIPTION DU PRODUIT

SikaControl® SC est un adjuvant compensateur de retrait utilisé pour produire un béton haute performance à faible potentiel de contraction par retrait séchage, de fissuration et de gauchissement.

DOMAINES D'APPLICATION

SikaControl® SC peut être utilisé dans tous les types de béton coffré au chantier ou dans les bétons préfabriqués / précontraints, coulis, mortiers ou tout autre mélange cimentaire. Parmi les applications du SikaControl® SC, on compte les suivantes :

- Planchers de béton coulé au chantier, afin de compenser la fissuration par retrait séchage, l'augmentation de l'espacement des joints et pour contrôler le gauchissement.
- Chapes minces, pour minimiser la différence du retrait entre la nouvelle chape et le substrat existant.
- Éléments en béton où la résistance au retrait est contrôlée
- Tabliers de ponts et structures de stationnement
- Structures nécessitant des bétons de masse telles que les fondations en béton, barrages et autres structures nécessitant des épaisseurs de béton supérieures à 1 m (3 pi).
- Production de béton durable pour les applications en milieux marins
- Production de béton étanche pour la construction de réservoirs, d'usines d'assainissement des eaux et des barrages.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Réduit le risque de fissuration lié au retrait séchage et au retrait autogène
- Réduit le risque de gauchissement des dalles et permet un espacement plus important des joints.
- Procure une réduction de la porosité et par conséquent une meilleure durabilité du béton.

HOMOLOGATIONS / NORMES

SikaControl® SC répond aux exigences des normes ASTM C494 / AASHTO M194 Type S et NSF/ANSI Standard 61.

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

DCC MasterFormat®	03 05 00 APPLICATIONS SPÉCIALES
Conditionnement	Sac soluble de 11,34 kg (25 lb) et conteneur souple de 907 kg (2000 lb).

Fiche technique du produit
SikaControl® SC
Novembre 2023, Édition 01.01
021403041000000034

Durée de conservation	1 an, lorsqu'entreposé au sec.
Conditions d'entreposage	Entreposer dans un endroit sec. Remarque : Lorsqu'exposé ou non protégé de l'humidité, le produit absorbera l'humidité et le dioxyde de carbone dans l'air ce qui aura pour conséquence de réduire la performance du produit).
Aspect / Couleur	Poudre blanchâtre / brun clair
Densité	Environ 3,35

MODE D'EMPLOI

Dosage recommandé	Le dosage recommandé du SikaControl® SC se situe entre 2 % et 7 % par poids de masse cimentaire pour les bétons, mortiers et coulis. Lorsque des gâchées d'essai sont réalisées pour valider le mélange final, il faudra s'assurer que tous les matériaux utilisés sont représentatifs de ceux qui seront utilisés dans la production finale du béton. Pour de plus amples informations sur le dosage optimal en fonction du mélange de béton, contacter Sika Canada.
Malaxage	SikaControl® SC peut être ajouté au béton avec les autres composants en poudre ou une fois que tous les autres ingrédients du mélange ont été chargés dans le malaxeur de la centrale à béton ou du camion. Si le produit est ajouté après tous les ingrédients, un malaxage adéquat devra être effectué. Les sacs solubles de 11,34 kg (25 lb) sont conçus pour se dissoudre sous l'effet combiné du mouillage et du cisailage lors du malaxage. Pour maximiser la performance du produit, il est recommandé de suivre les méthodes de cure préconisées par ACI 308 ou aux spécifications du projet. Combinaison avec les ajouts cimentaires et autres adjuvants : SikaControl® SC est compatible avec les ajouts cimentaires conventionnels et les autres adjuvants Sika®. Ne pas prémélanger le produit avec d'autres adjuvants.

VALEURS DE BASE DU PRODUIT

Toutes les valeurs indiquées dans cette Fiche technique du produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

RESTRICTIONS

- Ne pas introduire les sacs solubles dans les mélanges de béton à basse teneur en eau et à granulats de petite taille puisque ces types de mélanges ne généreront pas l'énergie suffisante pour dissoudre les sacs. Il est important d'évaluer la manière dont le sac va se dissoudre en testant au préalable les formulations et le séquençage des gâchées.
- Le fait de ne pas respecter les méthodes de cure adéquates entraînera une diminution de l'efficacité globale de l'adjuvant.
- SikaControl® SC offrira les meilleurs résultats en suivant les méthodes de cure par voie humide.
- L'utilisation de produits de cure et de scellement réduira l'efficacité globale de l'adjuvant.

ENVIRONNEMENT, SANTÉ ET SÉCURITÉ

L'utilisateur doit lire les fiches de données de sécurité (FDS) correspondantes les plus récentes avant d'utiliser tout produit. La FDS fournit des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination sécuritaire des produits chimiques et contient des données physiques, écologiques, toxicologiques et d'autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter qu'en raison de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la fiche technique du produit local pour connaître les données exactes du produit.

Fiche technique du produit
SikaControl® SC
Novembre 2023, Édition 01.01
021403041000000034



INFORMATIONS LÉGALES

Les informations contenues dans le présent document et tout autre conseil sont donnés de bonne foi sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika concernant les produits lorsqu'ils sont correctement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales conformément aux recommandations de Sika. Les informations s'appliquent uniquement aux applications et aux produits expressément mentionnés dans le présent document et sont basées sur des tests de laboratoire qui ne remplacent pas les tests pratiques. En cas de modification des paramètres de l'application, tels que les changements de substrats, etc., ou en cas d'application différente, consultez le service technique de Sika avant d'utiliser les produits Sika. Les informations contenues dans le présent document ne dispensent pas l'utilisateur des produits de les tester pour l'application et l'usage prévus. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos conditions de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent toujours se référer à la version la plus récente de la fiche technique locale du produit concerné, dont des copies seront fournies sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Autres sites:

Boisbriand (Québec)
Brantford; Cambridge
Sudbury; Toronto (Ontario)
Edmonton (Alberta)
Surrey (Colombie-Britannique)

Sika Canada Inc.

Siège social
601, avenue Delmar
Pointe-Claire, Québec
H9R 4A9
1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Fiche technique du produit

SikaControl® SC
Novembre 2023, Édition 01.01
021403041000000034

3 / 3

SikaControlSC-fr-CA-(11-2023)-1-1.pdf

**BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE**

FIGURE 66 – Fiche technique fournie par Sika : SikaControl SC

A.2.3 Fiche agent de type M : SikaControl NS

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

SikaControl® NS

ADJUVANT RÉDUCTEUR ET COMPENSATEUR DE RETRAIT

DESCRIPTION DU PRODUIT

SikaControl® NS est un adjuvant réducteur et compensateur de retrait. L'effet du double mécanisme de contrôle du retrait permet de produire un béton haute performance à faible potentiel de contraction par retrait de séchage, de fissuration et de gauchissement.

DOMAINES D'APPLICATION

SikaControl® NS peut être utilisé avec n'importe quel type de béton coffré au chantier ou avec des bétons préfabriqués / précontraints, coulis, mortiers ou tout autre mélange cimentaire. Parmi les applications du SikaControl® NS, on compte :

- Planchers en béton, afin de compenser la contraction par retrait de séchage, la fissuration, l'augmentation de l'espacement des joints et pour contrôler le gauchissement du plancher.
- Chapes minces, pour minimiser la différence du retrait entre la nouvelle chape et le substrat existant.
- Éléments en béton où la résistance au retrait est contrôlée.
- Tabliers de ponts et structures de stationnement.
- Structures demandant des bétons de masse tels que les fondations en béton, barrages et autres structures demandant des épaisseurs de béton supérieures à 1 m.
- Production de béton durable dans le cadre d'applications en milieux marins.
- Production de béton étanche destiné à la construction de réservoirs, des usines d'assainissement des eaux et des barrages.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Double mécanisme de contrôle sur le retrait du béton permettant d'obtenir des résultats prévisibles et reproductibles.
- Mécanisme d'expansion contrôlé donnant une stabilité volumétrique au béton.
- Réduit le risque de fissuration retrait endogène du béton.
- Réduit le risque de gauchissement des dalles et permet un espacement plus important des joints.
- Procure une réduction de la porosité et de la perméabilité et par conséquent une durabilité améliorée du béton.
- Réduit les forces de contraction interne minimisant ainsi les risques de fissuration non-désirés et à long terme liés au séchage du béton.

HOMOLOGATIONS / NORMES

SikaControl® NS répond aux exigences des normes suivantes :

- ASTM C494, Type S
- NSF/ANSI 61

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

DCC MasterFormat®	03 05 00
Conditionnement	Sac soluble de 11,34 kg (25 lb) et conteneur souple de 907 kg (2000 lb)

Fiche technique du produit
SikaControl® NS
Mai 2023, Édition 01.01
021403041000000033

Durée de conservation	1 an, lorsqu'entreposé dans un environnement sec
Conditions d'entreposage	Entreposer dans un environnement sec ; lorsqu'exposé ou non protégé de l'humidité, le produit absorbera l'humidité et le dioxyde de carbone dans l'air ce qui aura pour conséquence de réduire la performance du produit).
Aspect / Couleur	Poudre blanchâtre/brun clair
Densité	Environ 2,71

MODE D'EMPLOI

Dosage recommandé	Le dosage recommandé pour le SikaControl® NS se situe entre 2 % et 7 % par poids de ciment pour les bétons, mortiers ou coulis. Le SikaControl® NS ajouté à un dosage de 5 % a démontré une réduction importante des fissures causées par le retrait lors des essais en laboratoire. Lorsque des gâchées d'essai sont réalisées pour valider le mélange final, il faudra s'assurer que tous les matériaux utilisés soient représentatifs de ceux qui seront utilisés dans la production définitive du béton. Pour de plus amples informations sur le dosage optimal de la recette de béton, communiquer avec Sika Canada.
Malaxage	Malaxage : Le SikaControl® NS peut être ajouté au béton avec les autres composants en poudre ou après que tous les autres ingrédients du mélange aient été chargés dans le malaxeur de la centrale à béton ou dans celui du camion. Si le produit est ajouté après tous les ingrédients, un malaxage adéquat devra être effectué. Les sacs de 11,34 kg (25 lb) sont conçus pour se dissoudre sous l'effet combiné du mouillage et du cisailage lors du malaxage. Remarques : - Ne pas introduire les sacs solubles dans les mélanges de béton à basse teneur en eau et agrégats de petite taille. Ces types de mélanges ne généreront pas l'énergie suffisante au malaxage pour dissoudre les sacs. Il est important d'évaluer la manière dont le sac va se dissoudre en testant au préalable les formulations et le séquençage des gâchées. - Ne pas prémélanger le produit avec d'autres adjuvants. Cure : La performance du SikaControl® NS va dépendre de l'utilisation des méthodes de cure appropriées. Pour maximiser les effets de réduction et de compensation du retrait, il est recommandé de suivre les méthodes de cure par voie humide préconisées par l'ACI 308.
Compatibilité	SikaControl® NS est compatible avec les ajouts cimentaires (AC) conventionnels et les autres adjuvants Sika®.

VALEURS DE BASE DU PRODUIT

Toutes les valeurs indiquées dans cette Fiche technique du produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

sécurité des produits chimiques et contient des données physiques, écologiques, toxicologiques et d'autres données relatives à la sécurité.

ENVIRONNEMENT, SANTÉ ET SÉCURITÉ

L'utilisateur doit lire les fiches de données de sécurité (FDS) correspondantes les plus récentes avant d'utiliser tout produit. La FDS fournit des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination

Fiche technique du produit
SikaControl® NS
Mai 2023, Édition 01.01
021403041000000033

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter qu'en raison de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la fiche technique du produit local pour connaître les données exactes du produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations contenues dans le présent document et tout autre conseil sont donnés de bonne foi sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika concernant les produits lorsqu'ils sont correctement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales conformément aux recommandations de Sika. Les informations s'appliquent uniquement aux applications et aux produits expressément mentionnés dans le présent document et sont basées sur des tests de laboratoire qui ne remplacent pas les tests pratiques. En cas de modification des paramètres de l'application, tels que les changements de substrats, etc., ou en cas d'application différente, consultez le service technique de Sika avant d'utiliser les produits Sika. Les informations contenues dans le présent document ne dispensent pas l'utilisateur des produits de les tester pour l'application et l'usage prévus. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos conditions de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent toujours se référer à la version la plus récente de la fiche technique locale du produit concerné, dont des copies seront fournies sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Autres sites:

Boisbriand (Québec)
Brantford; Cambridge
Sudbury; Toronto (Ontario)
Edmonton (Alberta)
Surrey (Colombie-Britannique)

Sika Canada inc.

Siège social
601, avenue Delmar
Pointe-Claire, Québec
H9R 4A9
1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Fiche technique du produit

SikaControl® NS
Mai 2023, Édition 01.01
021403041000000033

3 / 3

SikaControlNS-fr-CA-{05-2023}-1-1.pdf

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



FIGURE 67 – Fiche technique fournie par Sika : SikaControl NS

A.2.4 Fiche agent de type G : Conex NF

ADJUVANTS DE SPÉCIALITÉ

Format principal n° : 03 30 00 03 40 00 03 70 00

CONEX® NF

ADJUVANT COMPENSATEUR DE RETRAIT



EUCLID CHEMICAL

INFORMATION SUR LE PRODUIT

EMBALLAGE

Seau de 22,7 litres contenant 3 sacs solubles de 6,5 kg

DURÉE DE CONSERVATION

Un an dans son emballage d'origine non ouvert

SPÉCIFICATIONS/ CONFORMITÉS

ASTM C494, Type S

DONNÉES TECHNIQUES

pH : ~ 12,5 à 13

Densité relative : ~ 3,13 à 3,16

Apparence : poudre beige fine

DESCRIPTION

CONEX NF est un adjuvant en poudre concentré utilisé pour compenser et réduire globalement le retrait net total du béton à base de ciment Portland. Son mécanisme d'action consiste à former une composante expansive. CONEX NF est une composante expansive de Type G, qui produit un système cristallin de plaquettes d'hydroxyde de calcium, comme spécifié dans la norme ACI 223. CONEX NF ne contient pas de produits chimiques ou d'ions de chlorure ajoutés connus pour favoriser la corrosion de l'acier.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT

CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

- Les caractéristiques d'expansion de CONEX NF permettent la réduction du retrait net dans le béton
- Il entraîne une perte d'affaissement minimale
- Il peut être utilisé de pair avec d'autres adjuvants d'Euclid Chemical
- Il n'affecte pas les résistances mécaniques
- Il est compatible avec la majorité des ciments Portland
- Il a un effet minimal sur la teneur en air, le temps de prise ou d'autres caractéristiques du béton frais
- Il ne devrait pas affecter défavorablement les résistances aux cycles de gel/dégel et à l'écaillage dû au sel si un réseau de bulles d'air adéquat est présent
- Le processus d'expansion n'est pas causé par la formation d'ettringite

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton pour dalles
- Tabliers de ponts et structures de stationnements
- Applications intérieures/extérieures
- Dalles de patinoires/d'arénas
- Murs/parapets/réservoirs de stockage
- Constructions étanches
- Chapes
- Piliers

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- L'utilisation de ce produit exige une période de cure à l'eau d'une durée minimum de 48 heures; la performance maximale est atteinte après une période de cure de 7 jours. Pour une cure humide optimale, l'utilisation de couvertures de cure est recommandée.
- Dès que la période de cure humide est terminée, il est recommandé d'utiliser un agent de cure offert par The Euclid Chemical Company.
- Des essais préliminaires doivent être effectués pour déterminer le dosage optimal et confirmer qu'il y a dispersion adéquate de CONEX NF.
- CONEX NF est sensible à l'humidité, à l'eau libre et au CO₂, et doit être entreposé et manipulé de la même manière que le ciment Portland. Conserver le produit dans son emballage d'origine parfaitement scellé et dans un endroit sec.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

DONNÉES TECHNIQUES

Méthodes d'essai utilisées pour évaluer CONEX NF :

- ASTM C878
- ASTM C157 modifiée conformément au bulletin technique AD-06
- Cordes vibrantes installées dans le béton

Pour de plus amples renseignements, veuillez contacter votre représentant technique Euclid.

MODE D'EMPLOI

- Pour des résultats optimaux, utiliser CONEX NF dans un béton avec un rapport eau/liant inférieur à 0,60.
- CONEX NF peut être utilisé dans des applications faisant appel à du béton malaxé dans un camion-malaxeur ou en centrale de malaxage.
- **Pour un ajout pendant le mélange initial :** CONEX NF doit être ajouté avec le gros granulat.
- **Pour un ajout directement sur le béton dans un camion-malaxeur :** le béton doit avoir un affaissement maximal de 200 mm (8 po).
- **Pour un ajout directement sur un béton autoplaçant (BAP) dans un camion-malaxeur :** le béton doit avoir un affaissement maximal de 200 mm (8 po). L'étalement du mélange de BAP doit être ajusté avec un superplastifiant après un minimum de 60 secondes de malaxage suivant l'ajout de CONEX NF.
- Un béton contenant du CONEX NF doit être malaxé au moins 10 minutes, à vitesse de malaxage normale, après le dosage de tous les constituants du béton afin d'assurer une bonne dispersion de tous les matériaux.
- Le béton traité avec CONEX NF peut être fini et mis en place de la même manière que le béton classique.
- Dosages typiques : 1,3 à 6,5 % par poids de liant. Avant l'utilisation, effectuer des essais conformément à la norme ACI 223 afin de déterminer le dosage approprié.
- Il faut tenir compte de la sécurité de l'opérateur lors des opérations de manipulation de CONEX NF.
- Dans tous les cas, des essais préliminaires sont recommandés pour déterminer le dosage approprié et pour assurer une dispersion efficace de CONEX NF.

Révision : 7.23

La version anglaise de la présente fiche pourrait contenir de l'information plus récente.

GARANTIE : Euclid Canada, (Euclid), garantit uniquement et expressément que ses produits sont sans défauts de matériel ou de main-d'œuvre pendant un (1) an à partir de l'achat. À moins d'être autorisée par écrit par un responsable d'Euclid, aucune représentation ou déclaration verbale ou écrite par Euclid et ses représentants ne peut modifier cette garantie. EN RAISON DE LA GRANDE VARIABILITÉ DES CONDITIONS DE CHANTIER, EUCLID NE FAIT AUCUNE GARANTIE IMPLICITE OU EXPLICITE QUANT À LA QUALITÉ LOYALE ET MARCHANDE OU L'APTITUDE À REMPLIR UNE UTILISATION ORDINAIRE OU PARTICULIÈRE DE SES PRODUITS ET LES EXCLUT DE SA GARANTIE PAR LE FAIT MÊME. Si un produit Euclid ne rencontre pas la garantie, Euclid remplacera le produit, sans frais pour l'acheteur. Le remplacement du produit sera le seul et exclusif remède disponible et l'acheteur n'aura aucune autre compensation pour des dommages supplémentaires ou consécutifs. Toute réclamation doit être faite dans l'année qui suit l'infraction. Euclid n'autorise personne, en son nom, à faire des énoncés verbaux ou écrits qui modifient les renseignements et les instructions d'installation qui se trouvent sur les fiches techniques ou sur l'emballage. Tout produit Euclid qui n'est pas installé selon les renseignements et les instructions d'installation perd sa garantie. Les démonstrations de produits, s'il y en a, sont faites uniquement pour illustrer l'utilisation du produit. Elles ne constituent pas une garantie ou une variante à la garantie. L'acheteur sera l'unique responsable pour déterminer la pertinence des produits Euclid en fonction des utilisations qu'il veut en faire.

FIGURE 68 – Fiche technique fournie par Euclid Chemical : Conex NF

A.3 Données et résultats de la caractérisation des sables (granulométrie et absorption)

Granulométrie - Ro-Tap			Sable recyclé Canadien (RS1)						
Date	25-02-26	Date	25-02-26	Date	25-02-26	Date	25-02-26		
Masse initiale (g)	472,1	Masse initiale (g)	451,1	Masse initiale (g)	402,5	Masse initiale (g)	474,2		
Masse sèche initiale [g]	410,60	Masse sèche initiale [g]	392,30	Masse sèche initiale [g]	350,30	Masse sèche initiale [g]	412,50		
Masse finale [g]	391,60	Masse finale [g]	374,60	Masse finale [g]	335,20	Masse finale [g]	392,20		
(lavage et séchage étuve)		(lavage et séchage étuve)		(lavage et séchage étuve)		(lavage et séchage étuve)			
eau	34,42115056		33,34023		30,4758135		33,36835		
Tamis (mm)	Refus pot 1 [g]	Passant [%]	Refus pot 2 [g]	Passant [%]	Refus pot 3 [g]	Passant [%]	Refus pot 4 [g]	Passant [%]	MOYENNE :
5	0,00	100,00%	0,00	100,00%	0,00	100,00%	0,00	100,00%	100,00%
2,5	18,40	95,52%	18,90	95,18%	21,40	93,89%	20,80	94,96%	94,89%
1,25	100,00	75,65%	95,00	75,78%	99,90	71,48%	101,20	75,47%	74,59%
0,63	195,90	52,29%	184,90	52,87%	180,80	48,39%	195,70	52,56%	51,53%
0,315	295,40	28,06%	280,00	28,63%	259,30	25,98%	294,40	28,63%	27,82%
0,16	355,30	13,47%	337,70	13,92%	306,10	12,62%	354,40	14,08%	13,52%
0,08	385,90	6,02%	367,00	6,45%	330,00	5,80%	385,00	6,67%	6,23%
0	410,60	0,00%	392,30	0,00%	350,30	0,00%	412,50	0,00%	0,00%
Prend en compte les fines av. lavage									
Poids des fines [g]	24,70	Poids des fines [g]	25,30	Poids des fines [g]	20,30	Poids des fines [g]	27,50	MOYENNE :	Thibault
Pourcentage de fines [%]	6,02%	Pourcentage de fines [%]	6,45%	Pourcentage de fines [%]	5,80%	Pourcentage de fines [%]	6,67%	6,23%	7,79%
	pot 1	pot 2	pot 3	pot 4				24,45	
Masse humide [g]	472,1	451,1	402,5	474,2					
Masse sèche [g]	410,60	392,30	350,30	412,50	Moyenne				
Teneur en eau [%]	13,03%	13,03%	12,97%	13,01%	13,01%				

FIGURE 69 – Données de l'analyse granulométrique du RS1

Granulométrie - Ro-Tap			Sable recyclé Liège (RS2)				
Date	25-02-26	Date	25-02-26	Date	25-02-26		
Masse initiale [g]	391,60	Masse initiale [g]	340,00	Masse initiale [g]	368,30		
Masse finale [g]	377,00	Masse finale [g]	328,60	Masse finale [g]	356,40		
(lavage et séchage étuve)		(lavage et séchage étuve)		(lavage et séchage étuve)			
eau	5,460988152		4,349172553		4,494412503		
Tamis [mm]	Refus pot1 [g]	Passant [%]	Refus pot2 [g]	Passant [%]	Refus pot3 [g]	Passant [%]	MOYENNE :
5	0,00	100,00%	0,00	100,00%	0	100,00%	100,00%
2,5	37,60	90,26%	32,90	90,20%	35,80	90,16%	90,21%
1,25	122,30	75,65%	104,00	69,02%	117,20	67,78%	#VALEUR!
0,63	192,40	50,17%	164,80	50,90%	185,40	49,04%	50,04%
0,315	279,00	27,75%	240,60	28,32%	267,00	26,61%	27,56%
0,16	358,10	7,26%	312,20	6,99%	340,10	6,52%	6,92%
0,08	376,20	2,57%	328,70	2,07%	356,70	1,95%	2,20%
0	386,14	0,00%	335,65	0,00%	363,81	0,00%	0,00%
Poids des fines [g]	9,94	Poids des fines [g]	6,95	Poids des fines [g]	7,11	MOYENNE :	Moyenne liège
Pourcentage de fines [%]	2,54%	Pourcentage de fines [%]	2,04%	Pourcentage de fines [%]	1,93%	2,17%	3,44%
	ech 1	ech 2	ech 3				
Masse humide [g]	291,9	391,8	357,5				
Masse sèche [g]	287,3	385,4	352,1	Moyenne			
Teneur en eau [%]	1,58%	1,63%	1,51%	1,57%			

FIGURE 70 – Données de l'analyse granulométrique du RS2

Granulométrie		Sable Naturel (NS)	
Tamis [mm]	Passant mesuré (moyenne fiche) [%]	Passant limite inf[%]	Passant limite sup [%]
10	100,00%	100,00%	100,00%
5	95,00%	95,00%	100,00%
2,5	86,00%	80,00%	100,00%
1,25	73,00%	50,00%	90,00%
0,63	52,00%	25,00%	65,00%
0,315	25,00%	10,00%	35,00%
0,16	9,00%	2,00%	10,00%
0,08	2,70%	1,00%	3,00%
pot 1		pot 2	pot 3
Masse humide	386,3	305,7	457,5
Masse sèche	370,80	292,70	438,50
Teneur en eau	4,01%	4,25%	4,15%
			Moyenne
			4,14%

FIGURE 71 – Données de l'analyse granulométrique du NS

RS1			RS2			NS		
Masse pycnomètre	184,7	g	Masse pycnomètre	184,7	g	Masse pycnomètre	184,7	g
Masse pycnomètre eau	682,9	g	Masse pycnomètre eau	682,9	g	Masse pycnomètre eau	682,9	g
Masse eau	498,2	g	Masse eau	498,2	g	Masse eau	498,2	g
Masse sss+eau	767	g	Masse sss+eau	789,3	g	Masse sss+eau	810,3	g
Masse sss	500	g	Masse sss	500	g	Masse sss	500	g
Masse pan	186,4	g	Masse pan	172,7	g	Masse pan	183,5	g
Masse sèche	434,2	g	Masse sèche	469,5	g	Masse sèche	493,8	g
Densité brute	1,87802768	-	Densité brute	2,247486836	-	Densité brute	2,627993614	-
Densité brute sss	2,16262976	-	Densité brute sss	2,393489708	-	Densité brute sss	2,660989888	-
Densité apparente	2,62515115	-	Densité apparente	2,631726457	-	Densité apparente	2,717666483	-
Absorption	15,15%		Absorption	6,50%				
Absorption thibault	12,50%		Absorption liège	5,88%				
						Absorption	1,26%	
Masse volumique réell	2162,63	kg/m ³	Masse volumique réell	2393,49	kg/m ³	Fiche technique	0,65%	
						Absorption thibault	0,57%	
						Masse volumique réell	2692	kg/m ³
RS1								
Masse pycnomètre	184,7	g		1,875055327				
Masse pycnomètre eau	682,9	g		2,161695173				
Masse eau	498,2	g		2,62849295				
Masse sss+eau	766,8	g		15,29%				
Masse sss	500	g						
Masse pan	364,8	g						
Masse sèche	433,2	g						
Densité brute	1,87208297	-						
Densité brute sss	2,16076059	-						
Densité apparente	2,63183475	-						
Absorption	15,42%							
Absorption thibault	12,50%							

FIGURE 72 – Données de l'essais d'absorption des trois sables étudiés

A.4 Graphiques issus du suivi du retrait

Les données brutes issues de l'analyse du retrait des éprouvettes étant nombreuses, elles ont été regroupées dans le fichier Excel intitulé *Retrait TFE Yasmine.xlsx*. Ce fichier reprend l'ensemble des mesures nécessaires à l'interprétation des résultats présentés dans cette étude.

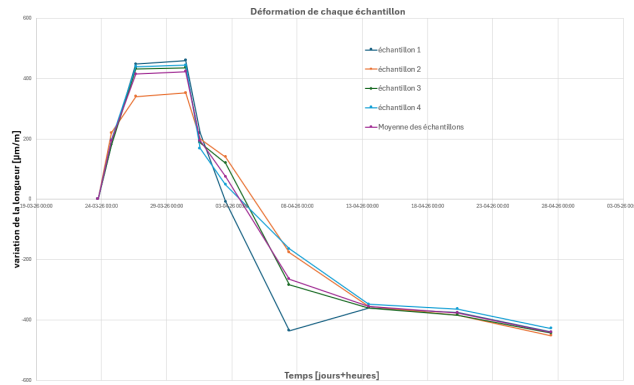


FIGURE 73 – Retrait mélange NS+MgO

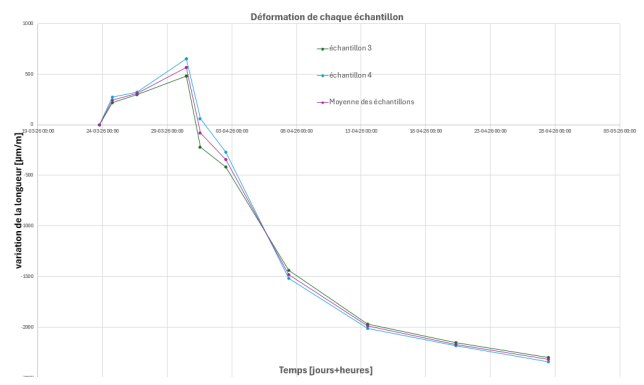


FIGURE 74 – Retrait mélange RS1+MgO

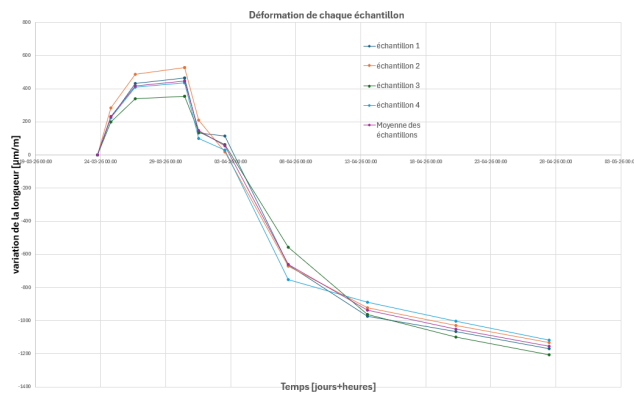
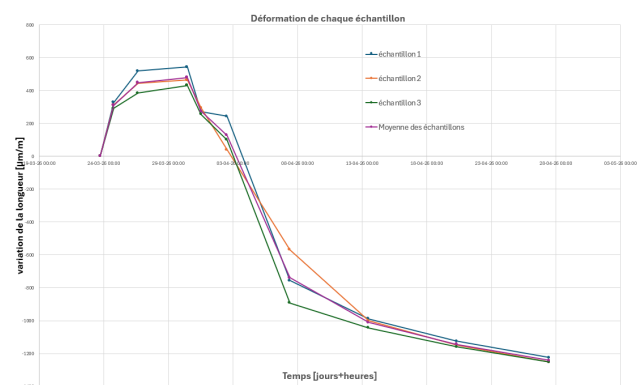
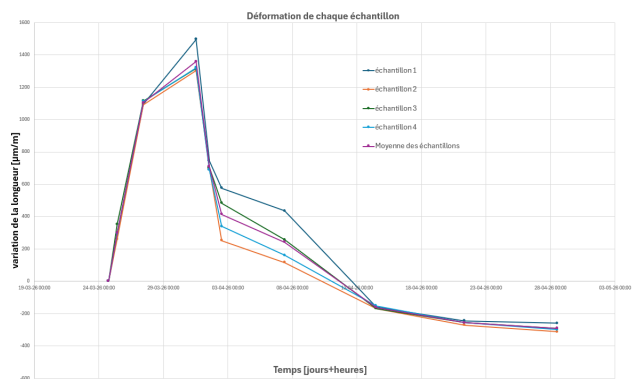
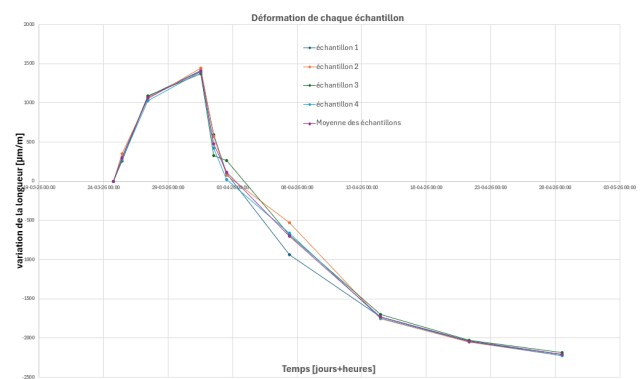
FIGURE 75 – Retrait mélange NS+RS1
MgO

FIGURE 76 – Retrait mélange RS2+MgO

FIGURE 77 – Retrait mélange NS
MgO+SRAFIGURE 78 – Retrait mélange RS1
MgO+SRA

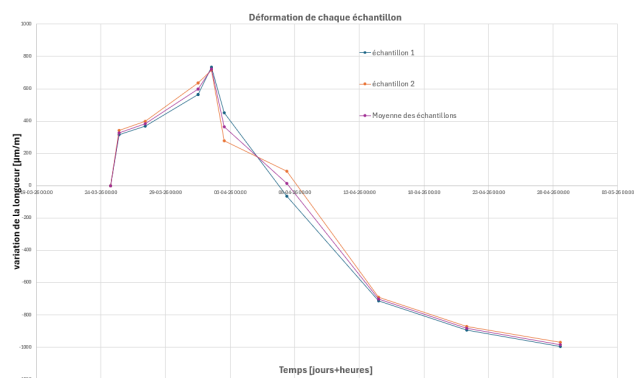
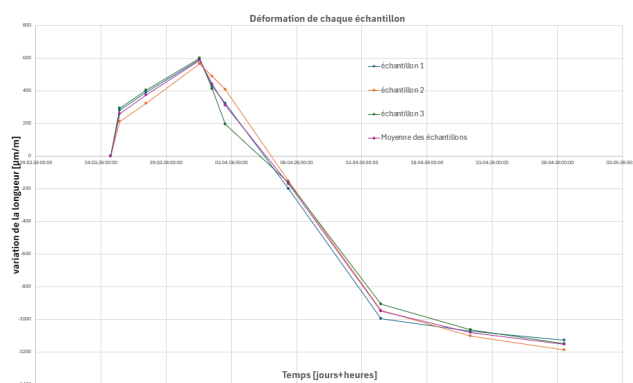
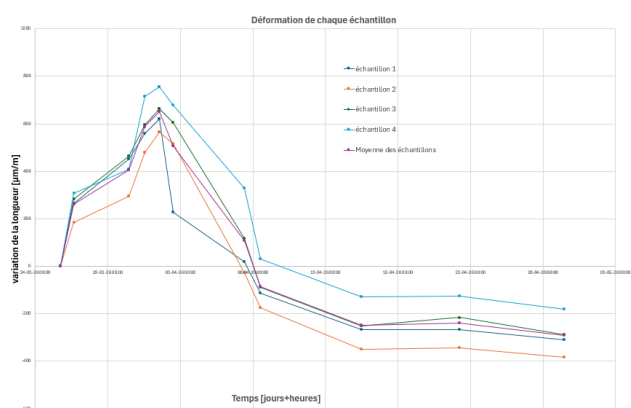
FIGURE 79 – Retrait mélange NS+RS1
MgO+SRAFIGURE 80 – Retrait mélange RS2
MgO+SRA

FIGURE 81 – Retrait mélange NS+SRA

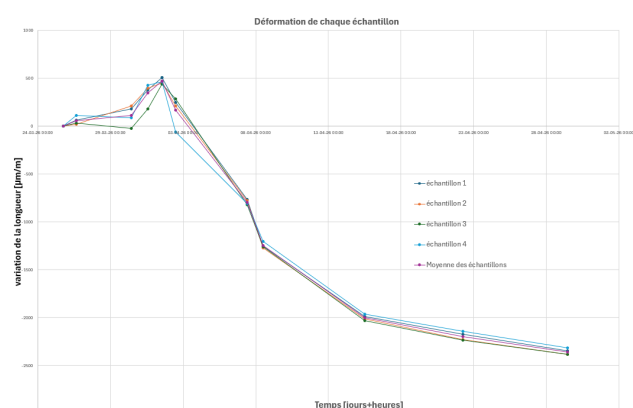


FIGURE 82 – Retrait mélange RS1+SRA

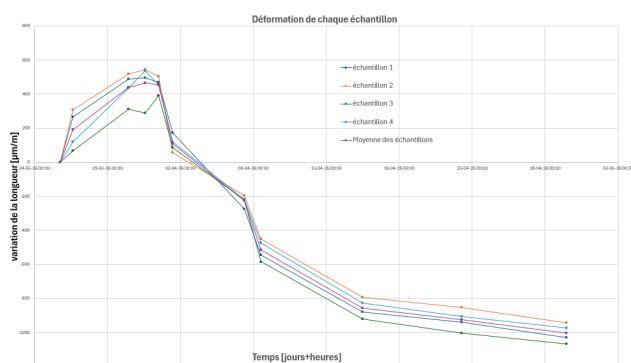
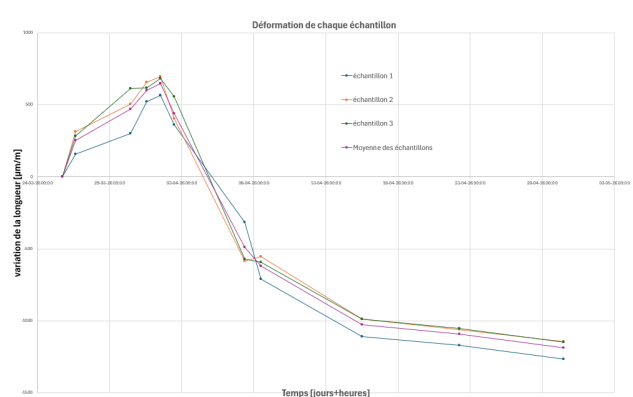
FIGURE 83 – Retrait mélange NS-RS1
+SRA

FIGURE 84 – Retrait mélange RS2+SRA

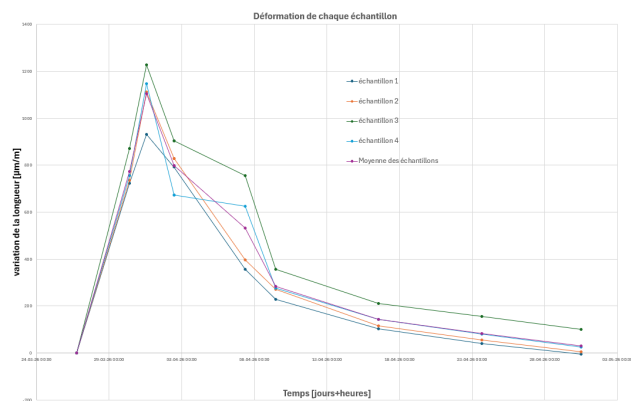


FIGURE 85 – Retrait mélange NS K+SRA

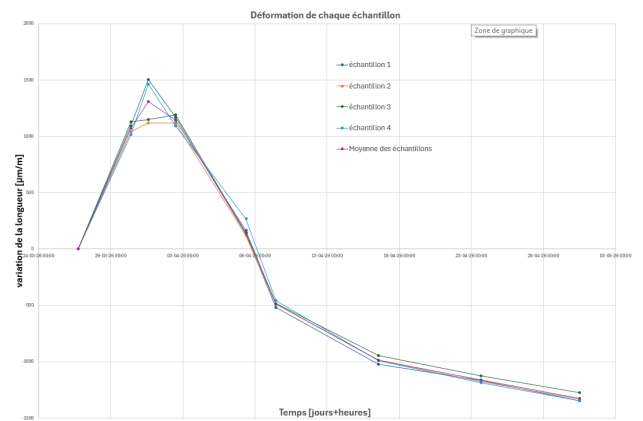


FIGURE 86 – Retrait mélange RS1 K+SRA

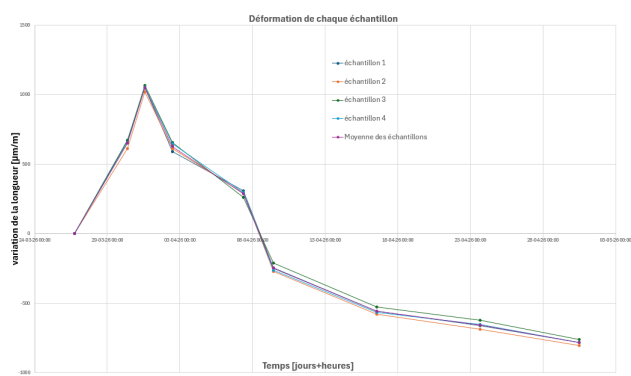
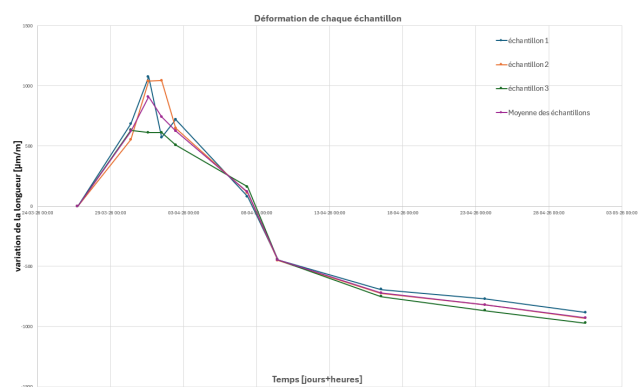
FIGURE 87 – Retrait mélange NS-RS1
K+SRA

FIGURE 88 – Retrait mélange RS2 K+SRA

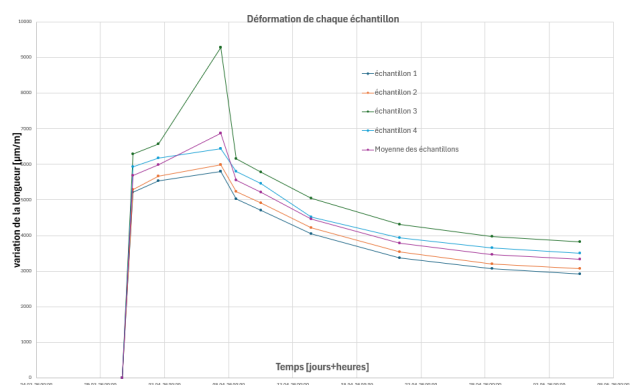


FIGURE 89 – Retrait mélange NS G+SRA

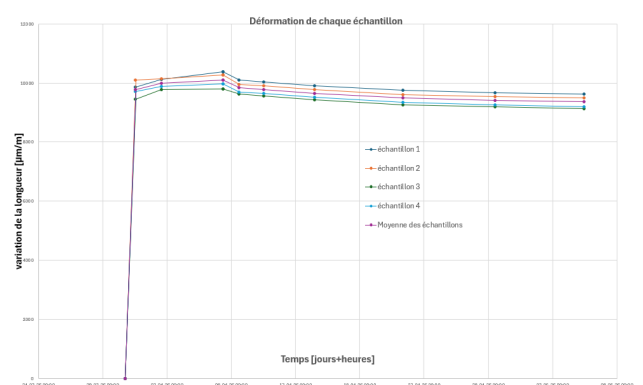


FIGURE 90 – Retrait mélange RS1 G+SRA

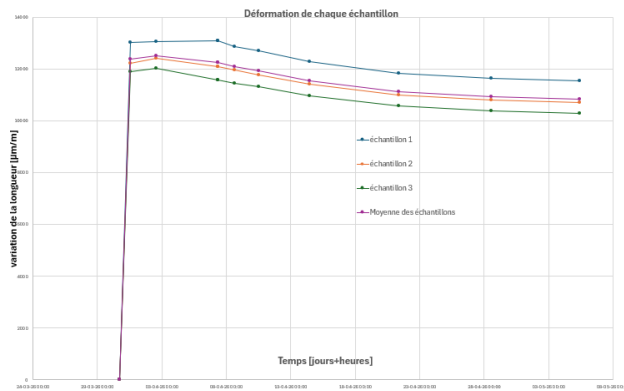
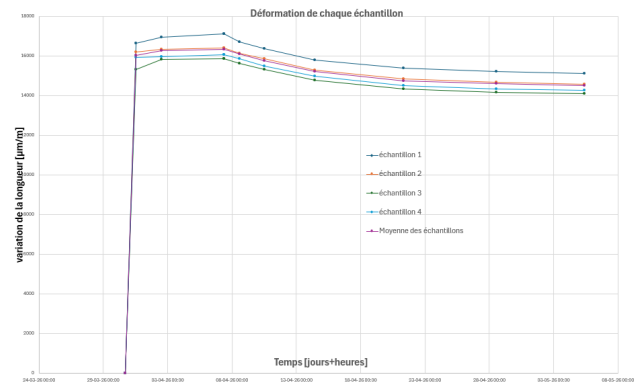
FIGURE 91 – Retrait mélange NS-RS1
G+SRA

FIGURE 92 – Retrait mélange RS2 G+SRA

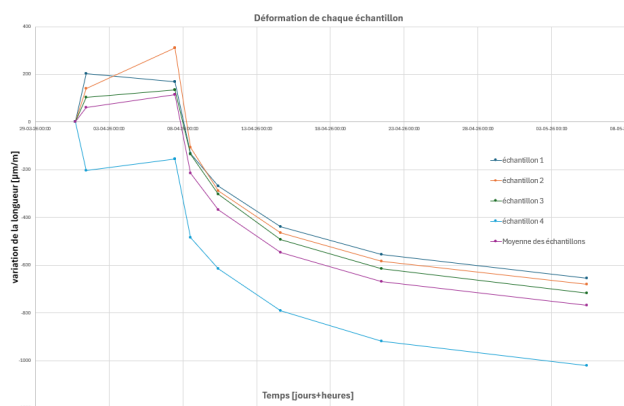


FIGURE 93 – Retrait mélange NS

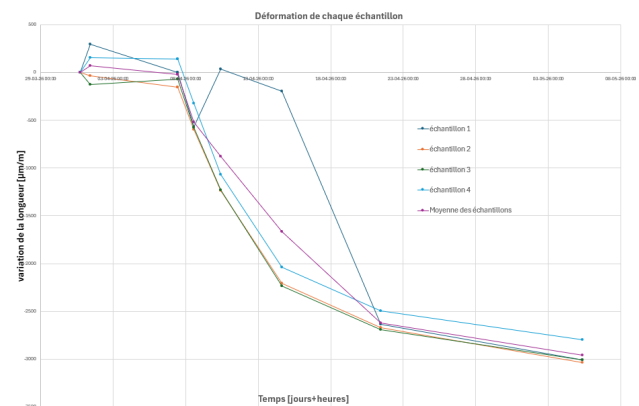


FIGURE 94 – Retrait mélange RS1

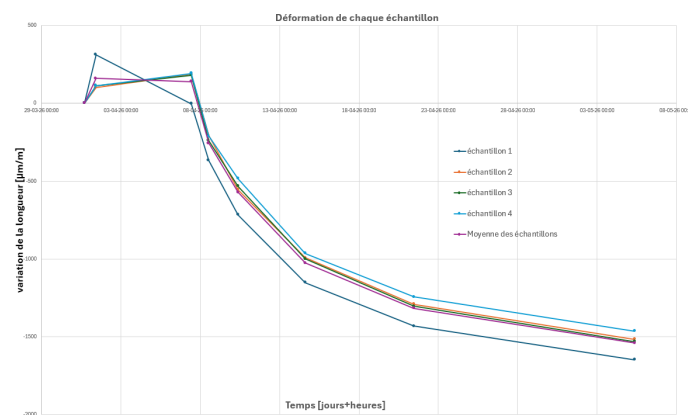


FIGURE 95 – Retrait mélange NS+RS1

A.5 Graphiques issus du suivi des cycles séchage/-mouillage

Les données brutes issues de l'analyse du retrait des éprouvettes étant nombreuses, elles ont été regroupées dans le fichier Excel intitulé *Retrait TFE Yasmine.xls*. Ce fichier reprend

l'ensemble des mesures nécessaires à l'interprétation des résultats présentés dans cette étude.

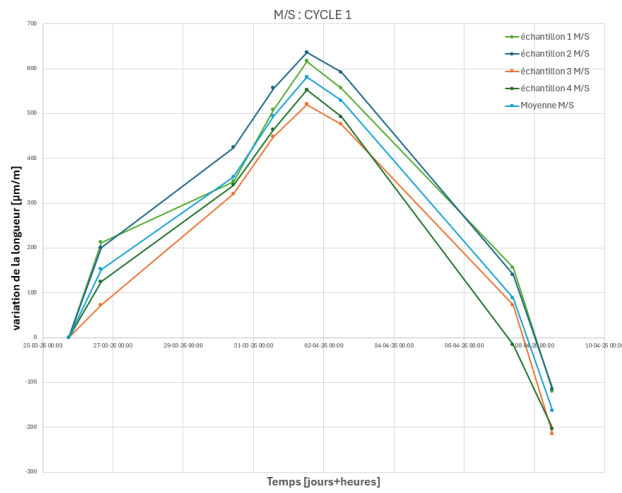


FIGURE 96 – NS SRA : cycle 1

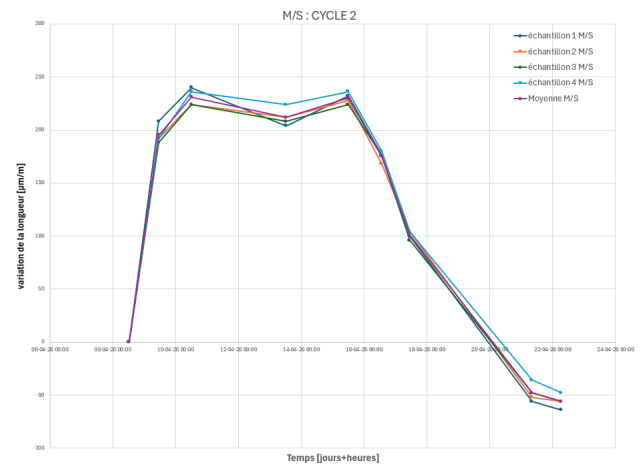


FIGURE 97 – NS SRA : cycle 2

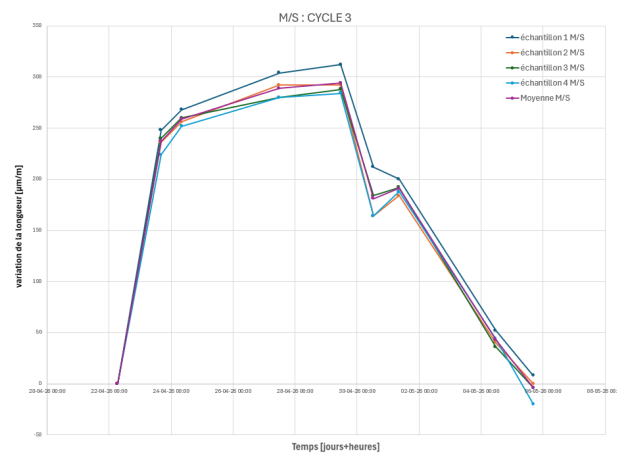


FIGURE 98 – NS SRA : cycle 3

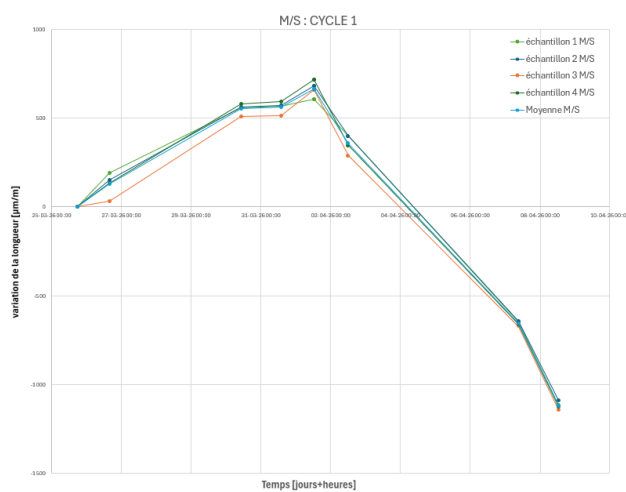


FIGURE 99 – RS1 SRA : cycle 1

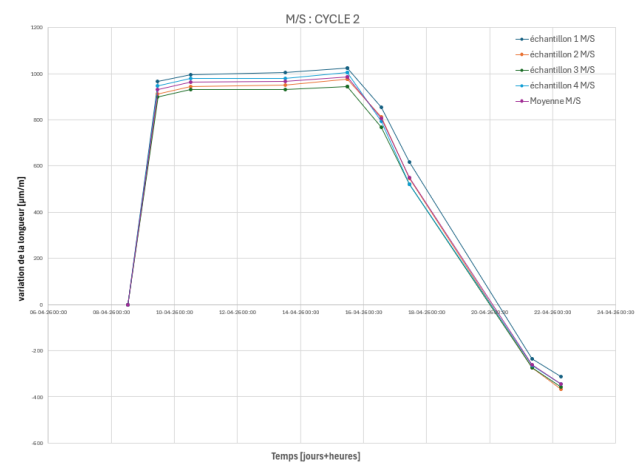


FIGURE 100 – RS1 SRA : cycle 2

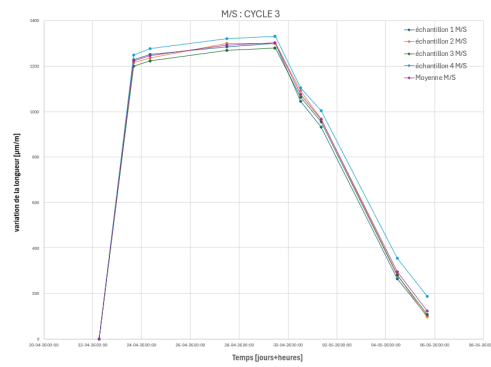


FIGURE 101 – RS1 SRA : cycle 3

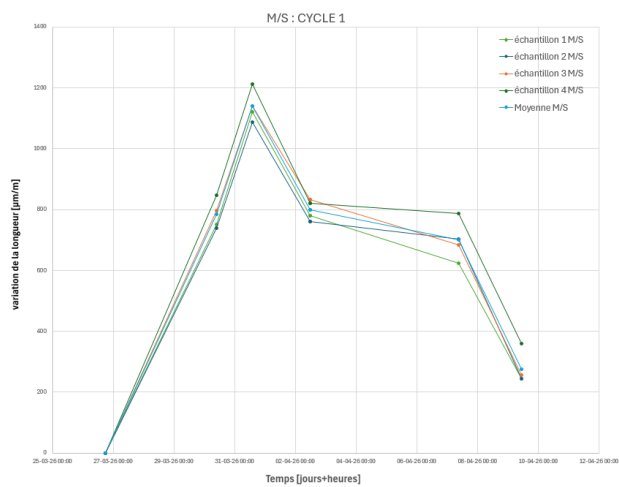


FIGURE 102 – NS K+SRA : cycle 1

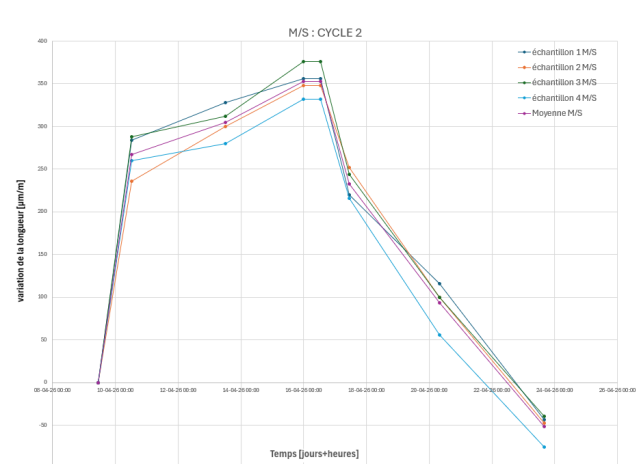


FIGURE 103 – NS K+SRA : cycle 2



FIGURE 104 – NS K+SRA : cycle 3

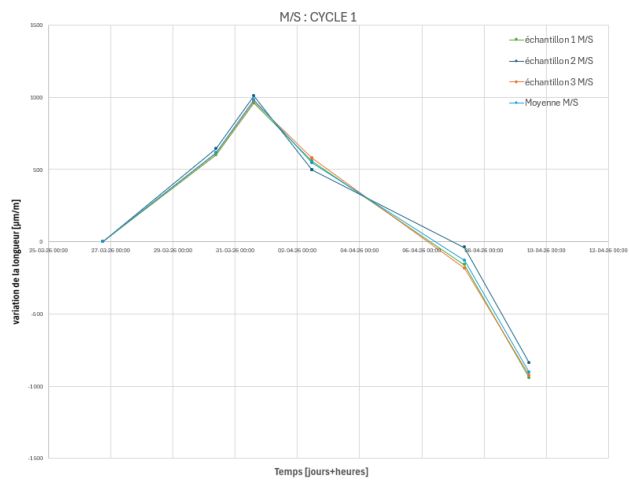


FIGURE 105 – RS1 K+SRA : cycle 1

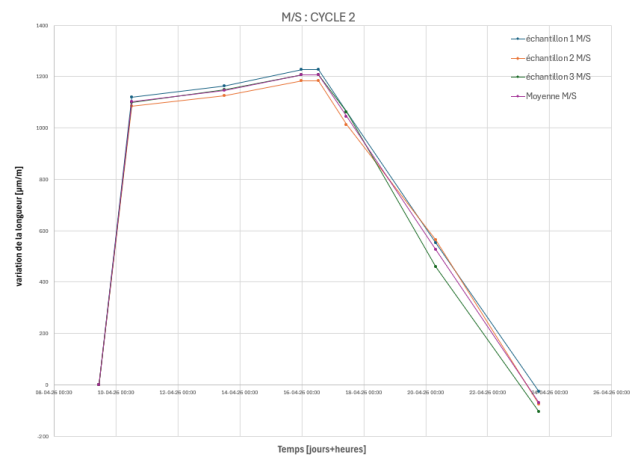


FIGURE 106 – RS1 K+SRA : cycle 2

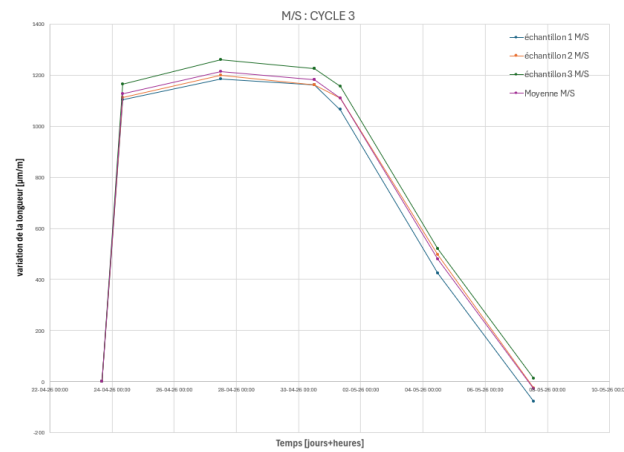


FIGURE 107 – RS1 K+SRA : cycle 3

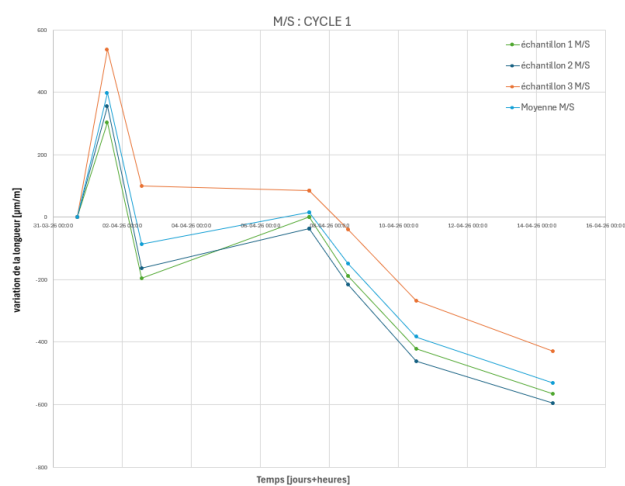


FIGURE 108 – NS : cycle 1

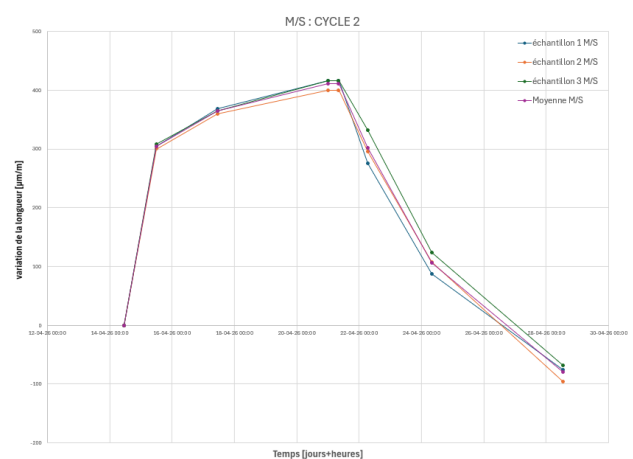


FIGURE 109 – NS : cycle 2

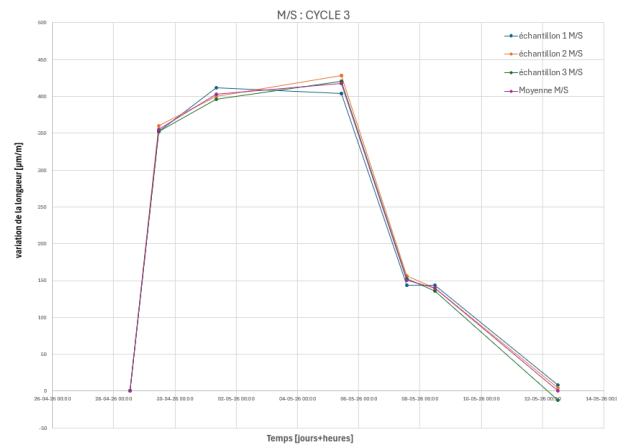


FIGURE 110 – NS : cycle 3



FIGURE 111 – RS1 : cycle 1

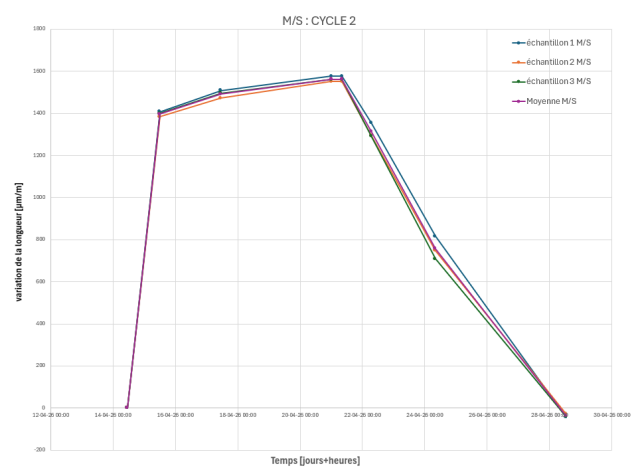


FIGURE 112 – RS1 : cycle 2

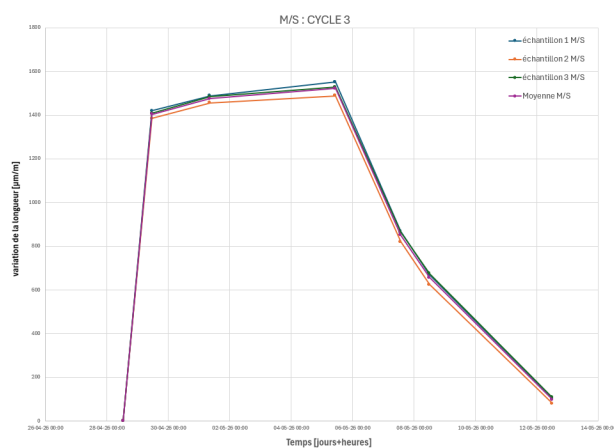


FIGURE 113 – RS1 : cycle 3

A.6 Données et graphiques issus des tests de compression à 28j

A.6.1 Graphiques obtenus à partir des valeurs expérimentales

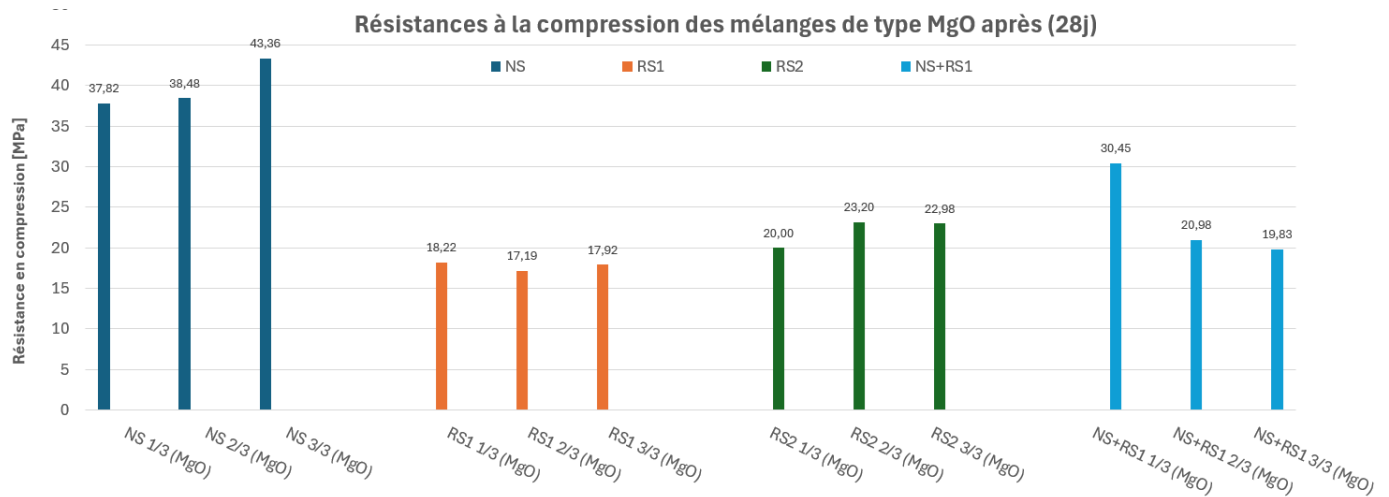


FIGURE 114 – Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type MgO

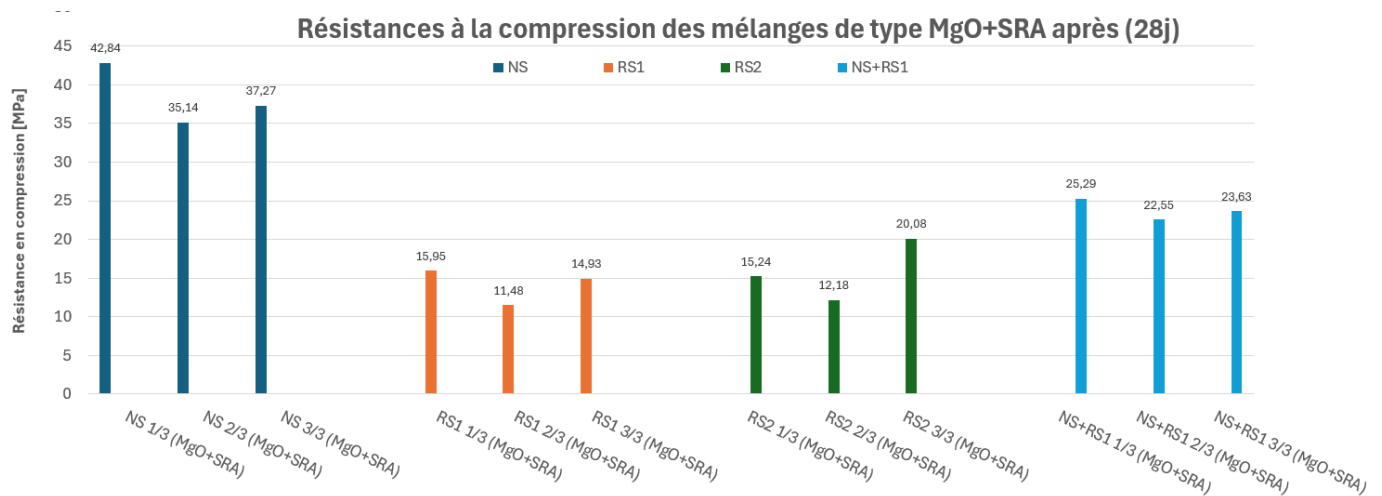


FIGURE 115 – Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type MgO+SRA

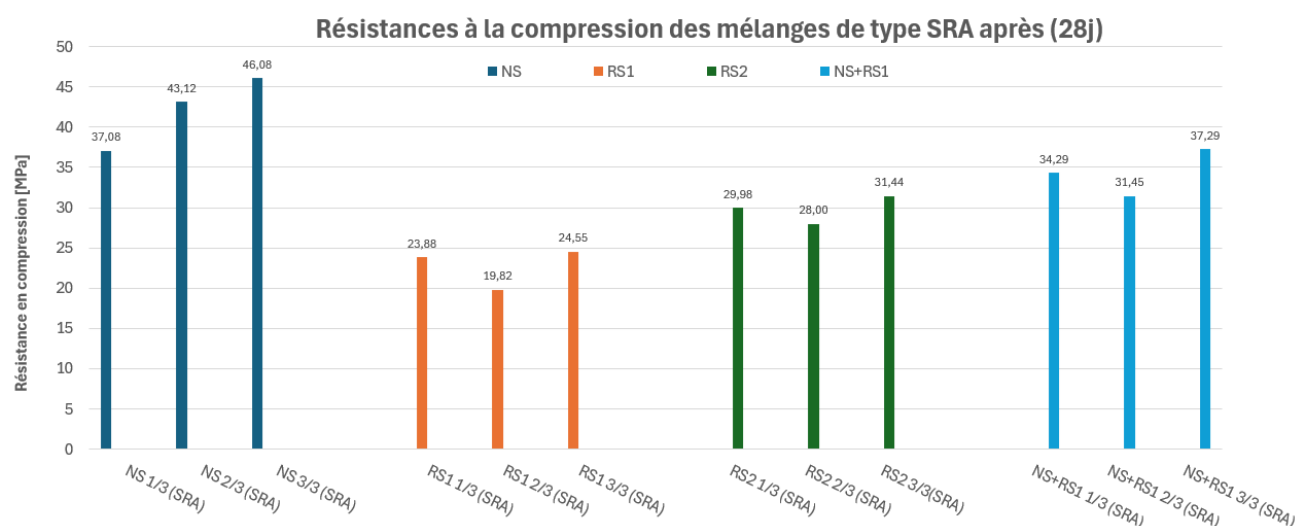


FIGURE 116 – Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type SRA

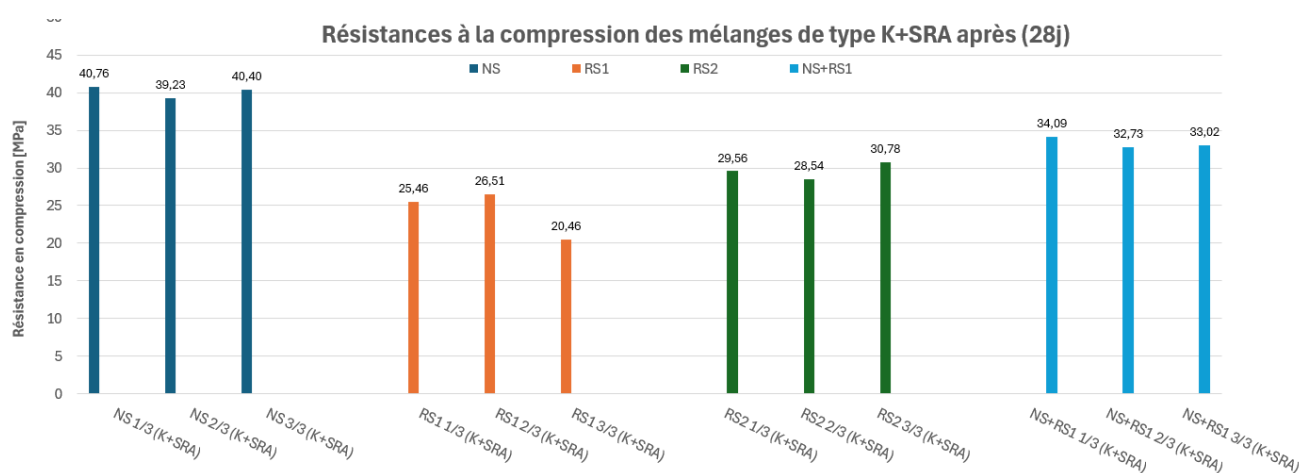


FIGURE 117 – Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type K+SRA

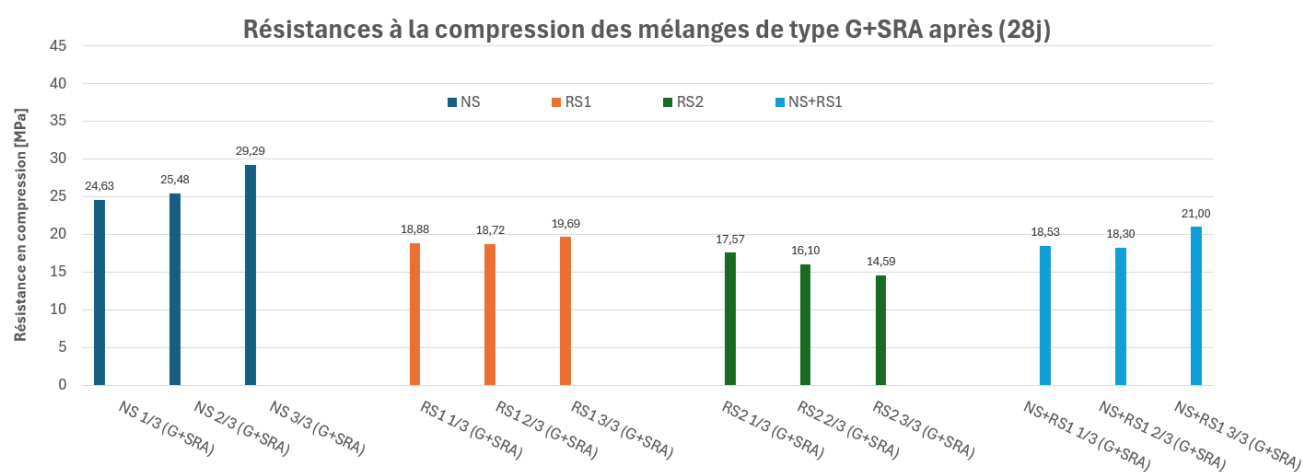


FIGURE 118 – Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges de type G+SRA

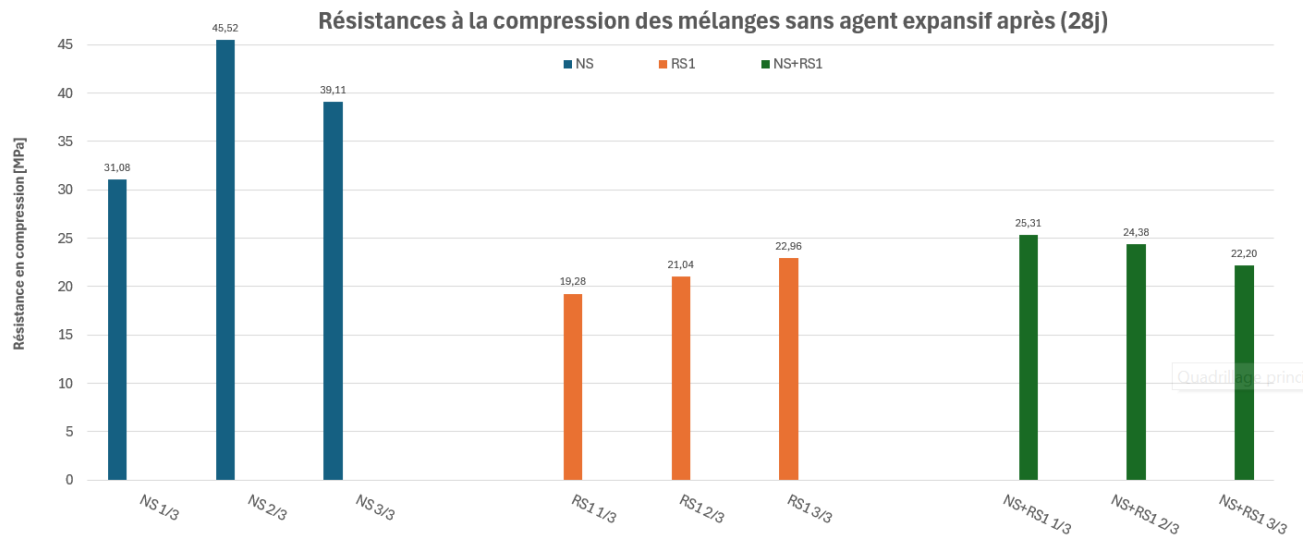


FIGURE 119 – Histogramme des résistances à la compression (28j) pour les mélanges sans agent expansif

A.6.2 Données brutes

Type MgO				Type SRA			
Heure de l'essai : 09:20:00		Heure de l'essai : 08:03:00		Heure de l'essai : 09:30:00		Heure de l'essai : 09:12:00	
Date de l'essai prévue	Cubes NS à 28j	Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Date de l'essai prévue	Cubes NS à 28j	Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 20 avril 2026	NS 4/6	94,54	37,816	mercredi 22 avril 2026	NS 4/6	92,7	37,08
lundi 20 avril 2026	NS 5/6	96,2	38,48	mercredi 22 avril 2026	NS 5/6	107,8	43,12
lundi 20 avril 2026	NS 6/6	106,4	43,36	mercredi 22 avril 2026	NS 6/6	115,2	46,08
Cubes NS+RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes NS+RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 20 avril 2026	NS+RS1 4/6	76,12	30,448	mercredi 22 avril 2026	NS+RS1 4/6	85,73	34,292
lundi 20 avril 2026	NS+RS1 5/6	52,45	20,98	mercredi 22 avril 2026	NS+RS1 5/6	78,63	31,452
lundi 20 avril 2026	NS+RS1 6/6	49,58	19,832	mercredi 22 avril 2026	NS+RS1 6/6	93,23	37,292
Cubes RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 20 avril 2026	RS1 4/6	45,55	18,22	mercredi 22 avril 2026	RS1 4/6	59,71	23,884
lundi 20 avril 2026	RS1 5/6	42,98	17,192	mercredi 22 avril 2026	RS1 5/6	49,55	19,82
lundi 20 avril 2026	RS1 6/6	44,91	17,924	mercredi 22 avril 2026	RS1 6/6	61,38	24,552
Cubes RS2 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes RS2 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 20 avril 2026	RS2 4/6	49,99	19,996	mercredi 22 avril 2026	RS2 4/6	196	29,984
lundi 20 avril 2026	RS2 5/6	58,01	23,204	mercredi 22 avril 2026	RS2 5/6	28,01	28,004
lundi 20 avril 2026	RS2 6/6	57,46	22,984	mercredi 22 avril 2026	RS2 6/6	78,61	31,444
Type MgO+SRA				Type K100+SRA			
Heure de l'essai : 09:30:00		Heure de l'essai : 09:12:00		Heure de l'essai : 09:55:00		Heure de l'essai : 13:39:00	
Date de l'essai prévue	Cubes NS à 28j	Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Date de l'essai prévue	Cubes NS à 28j	Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
mardi 21 avril 2026	NS 4/6	107,1	42,84	jeudi 23 avril 2026	NS 4/6	101,9	40,76
mardi 21 avril 2026	NS 5/6	87,86	35,144	jeudi 23 avril 2026	NS 5/6	98,07	39,228
mardi 21 avril 2026	NS 6/6	93,18	37,272	jeudi 23 avril 2026	NS 6/6	101	40,4
Cubes NS+RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes NS+RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
mardi 21 avril 2026	NS+RS1 4/6	63,22	25,288	jeudi 23 avril 2026	NS+RS1 4/6	85,23	34,092
mardi 21 avril 2026	NS+RS1 5/6	56,38	22,552	jeudi 23 avril 2026	NS+RS1 5/6	81,83	32,732
mardi 21 avril 2026	NS+RS1 6/6	59,07	23,628	jeudi 23 avril 2026	NS+RS1 6/6	87,54	35,016
Cubes RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
mardi 21 avril 2026	RS1 4/6	39,88	15,952	jeudi 23 avril 2026	RS1 4/6	63,64	25,456
mardi 21 avril 2026	RS1 5/6	28,69	11,476	jeudi 23 avril 2026	RS1 5/6	66,28	26,512
mardi 21 avril 2026	RS1 6/6	37,33	14,932	jeudi 23 avril 2026	RS1 6/6	51,15	20,46
Cubes RS2 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes RS2 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
mardi 21 avril 2026	RS2 4/6	38,1	15,240	jeudi 23 avril 2026	RS2 4/6	73,91	29,564
mardi 21 avril 2026	RS2 5/6	30,45	12,180	jeudi 23 avril 2026	RS2 5/6	71,35	28,54
mardi 21 avril 2026	RS2 6/6	50,19	20,076	jeudi 23 avril 2026	RS2 6/6	76,96	30,784
Type G+SRA				Type Thib			
Heure de l'essai : 09:55:00		Heure de l'essai : 13:39:00		Heure de l'essai : 13:39:00		Heure de l'essai : 13:39:00	
Date de l'essai prévue	Cubes NS à 28j	Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Date de l'essai prévue	Cubes NS à 28j	Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 27 avril 2026	NS 4/6	61,58	24,632	mardi 28 avril 2026	NS 4/6	77,89	31,076
lundi 27 avril 2026	NS 5/6	63,71	25,484	mardi 28 avril 2026	NS 5/6	113,8	45,520
lundi 27 avril 2026	NS 6/6	73,22	29,288	mardi 28 avril 2026	NS 6/6	97,78	39,112
Cubes NS+RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes NS+RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 27 avril 2026	NS+RS1 4/6	46,32	18,528	mardi 28 avril 2026	NS+RS1 4/6	63,28	25,312
lundi 27 avril 2026	NS+RS1 5/6	45,75	18,300	mardi 28 avril 2026	NS+RS1 5/6	60,94	24,376
lundi 27 avril 2026	NS+RS1 6/6	52,5	21,000	mardi 28 avril 2026	NS+RS1 6/6	55,5	22,200
Cubes RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes RS1 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 27 avril 2026	RS1 4/6	47,21	18,884	mardi 28 avril 2026	RS1 4/6	48,2	19,280
lundi 27 avril 2026	RS1 5/6	46,8	18,720	mardi 28 avril 2026	RS1 5/6	52,61	21,044
lundi 27 avril 2026	RS1 6/6	49,22	19,688	mardi 28 avril 2026	RS1 6/6	57,40	22,960
Cubes RS2 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]	Cubes RS2 à 28j		Résistance en [kN]	Résistance en [Mpa]
lundi 27 avril 2026	RS2 4/6	43,93	17,572	mardi 28 avril 2026	RS2 4/6		
lundi 27 avril 2026	RS2 5/6	40,24	16,096	mardi 28 avril 2026	RS2 5/6		
lundi 27 avril 2026	RS2 6/6	36,48	14,592	mardi 28 avril 2026	RS2 6/6		

FIGURE 120 – Données brutes issues des tests de compression

A.7 Annexe : données et graphiques issus des tests de fendage à 28j

A.7.1 Graphiques obtenus à partir des valeurs expérimentales

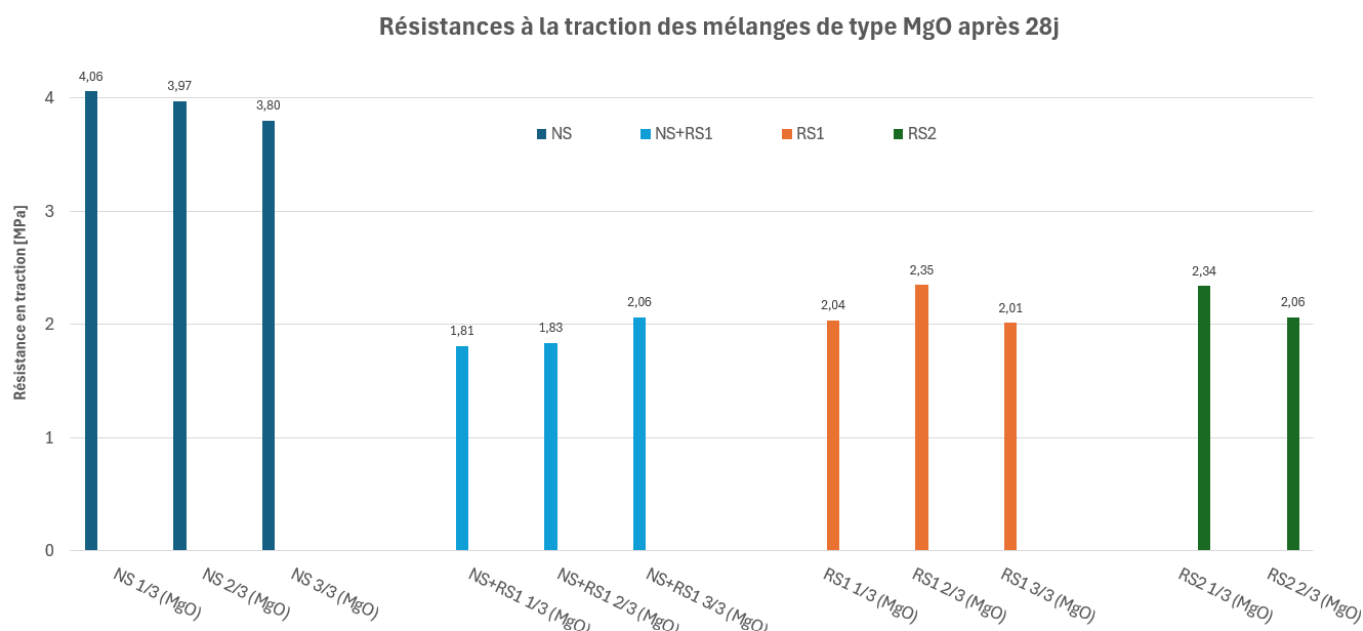


FIGURE 121 – Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type MgO

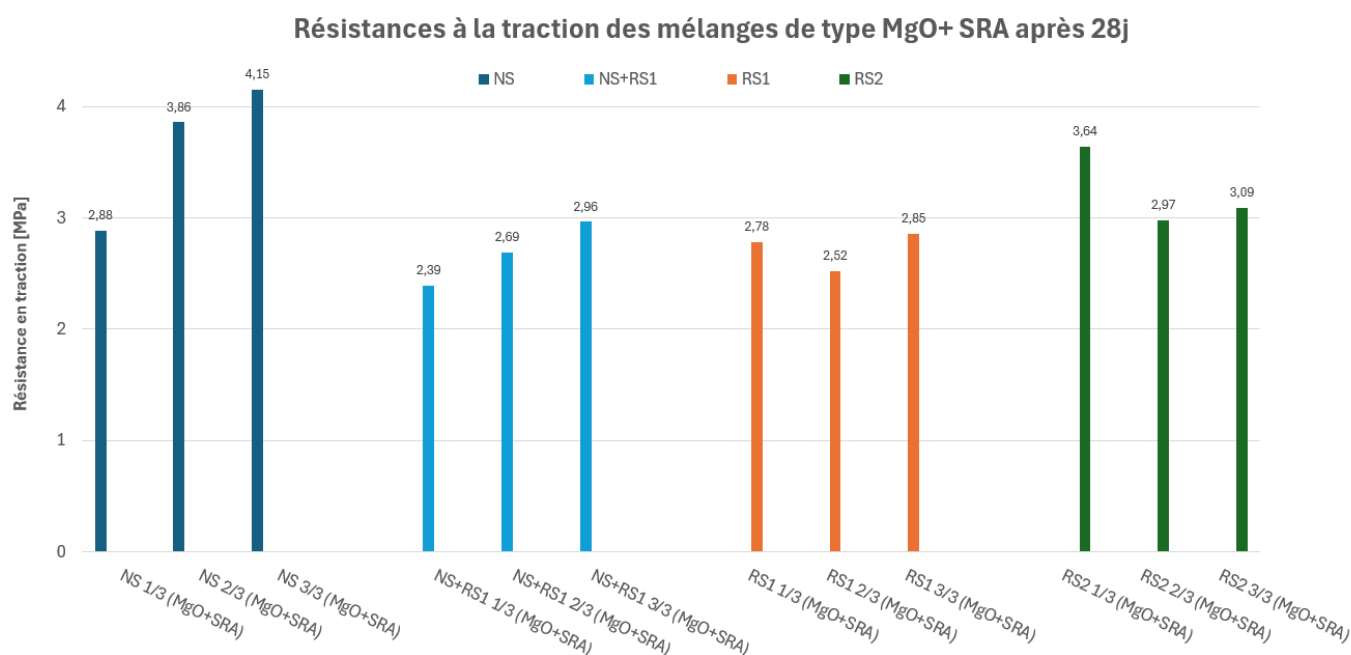


FIGURE 122 – Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type MgO+SRA

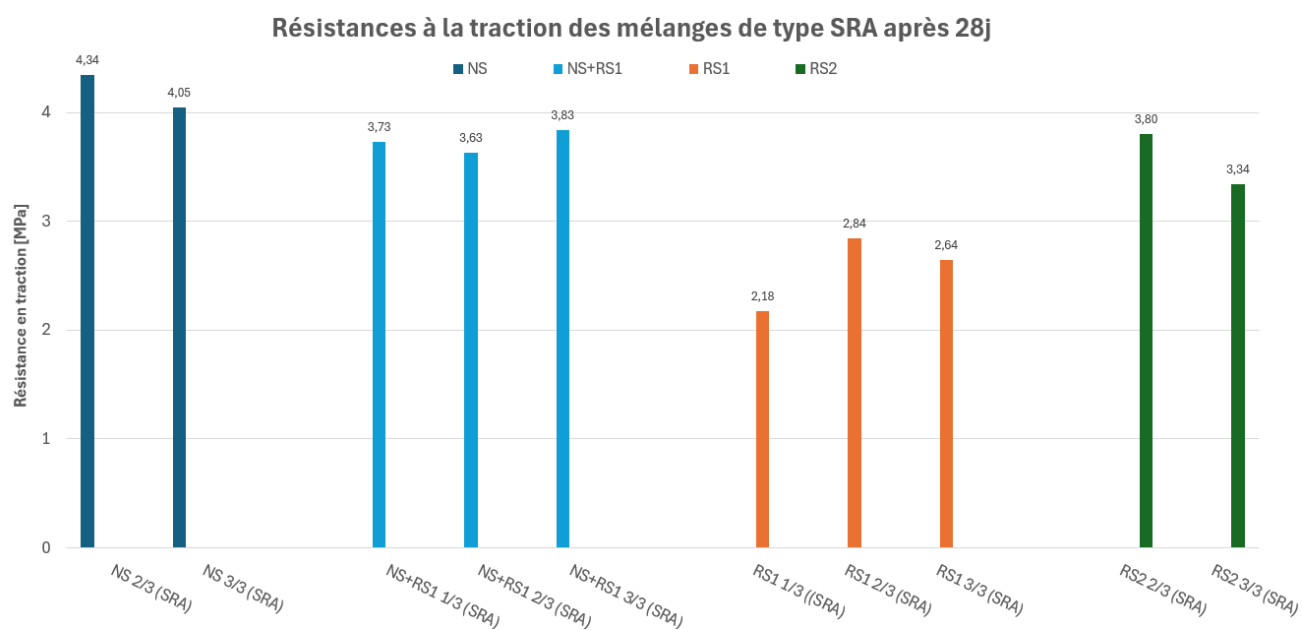


FIGURE 123 – Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type SRA

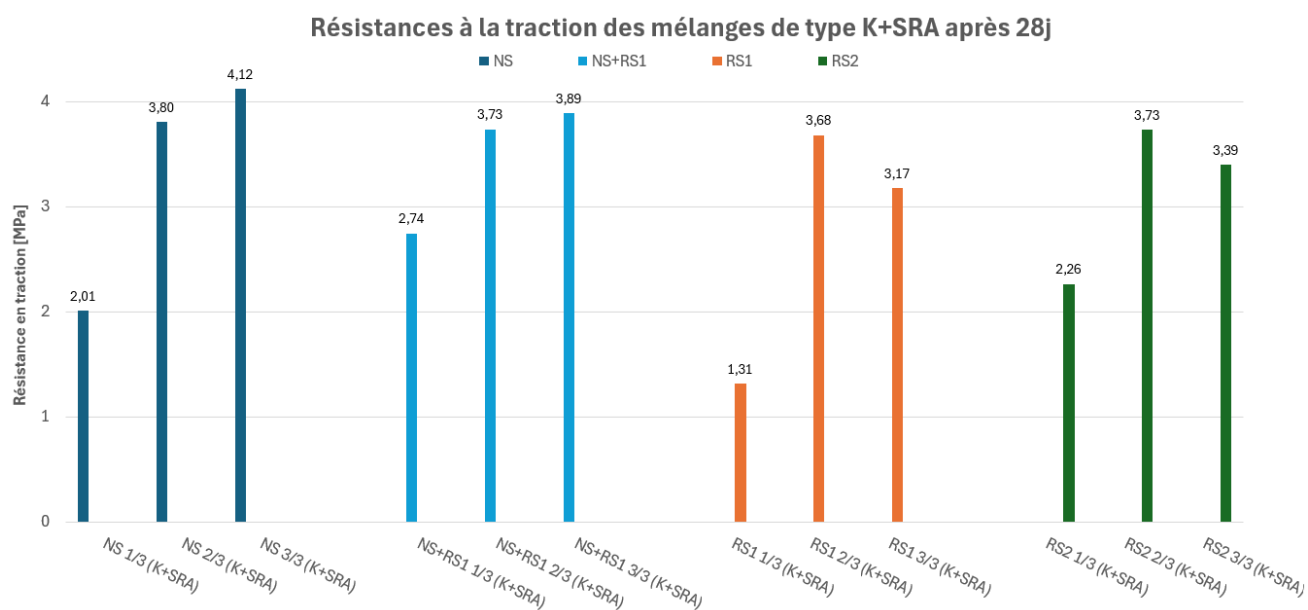


FIGURE 124 – Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type K+SRA

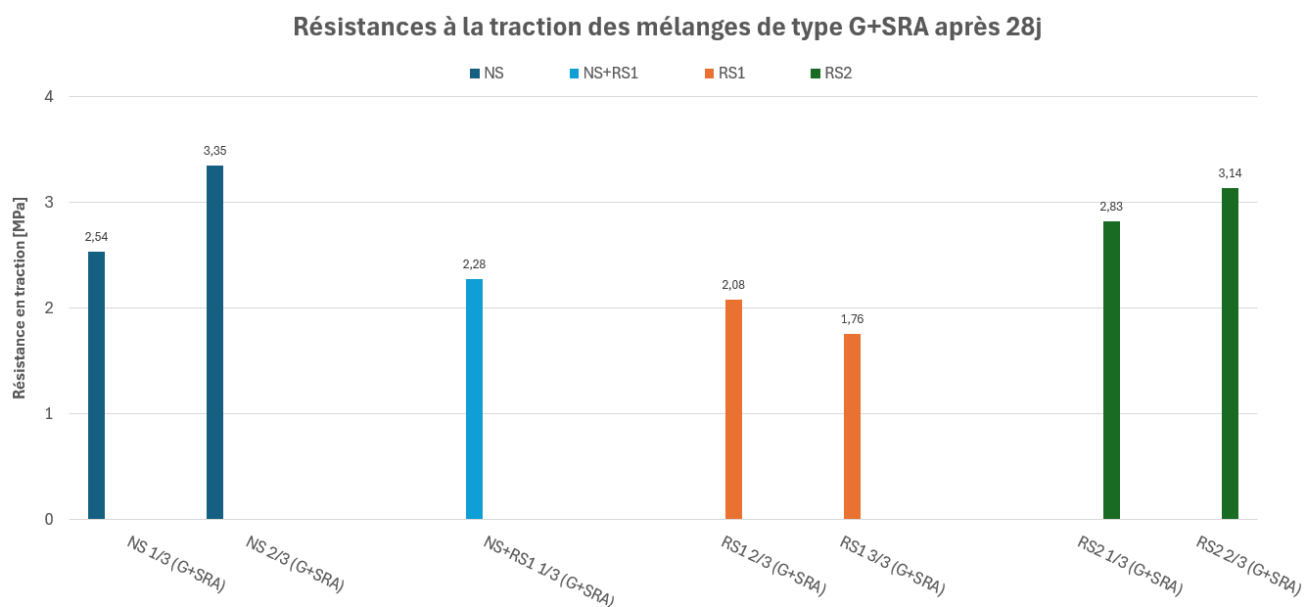


FIGURE 125 – Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges de type G+SRA

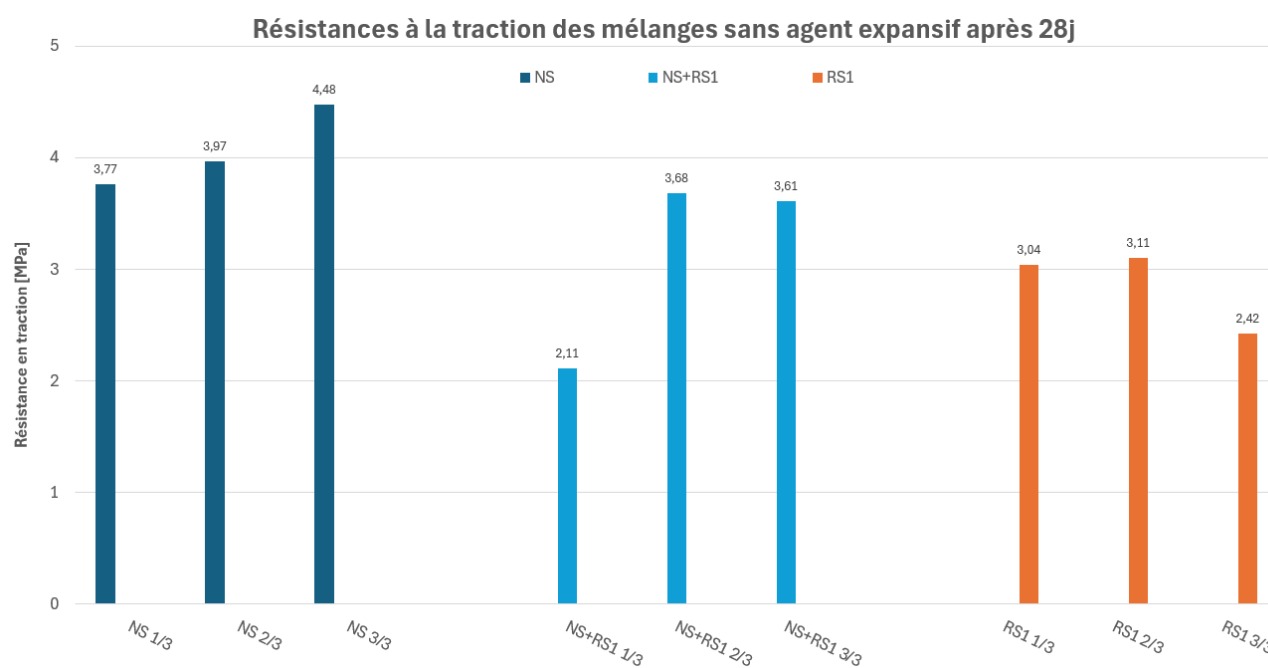


FIGURE 126 – Histogramme des résistances à la traction (28j) pour les mélanges sans agent expansif

A.7.2 Données brutes

Type MgO									
Mélange NS									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
20-avr-26	NS 13	100,59	51,84	51,88	51,82	51,85	33,368	4,057067973	3,94
20-avr-26	NS 33	101,84	52,27	52,27	52,28	52,27333333	31,797	3,798010265	
20-avr-26	NS 33	101,96	52,27	52,27	52,28	52,27333333	31,797	3,798010265	
Mélange NS+RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
20-avr-26	NS+RS1 13	101,62	52,35	52,36	52,38	52,36	5,162	1,80407073	1,902243401
20-avr-26	NS+RS1 23	104,81	51,99	51,98	52,00	51,99	15,975	1,832880227	
20-avr-26	NS+RS1 33	101,32	51,83	51,85	51,83	51,84	17,016	2,062432903	
Mélange RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
20-avr-26	RS1 13	101,95	52,17	52,15	52,18	52,17	16,568	2,035443395	2,1919377
20-avr-26	RS1 23	102,15	52,23	52,23	52,22	52,23	19,877	2,34810624	
20-avr-26	RS1 33	102,47	52,19	52,17	52,21	52,18	16,305	2,012385897	
Mélange RS2									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
20-avr-26	RS2 13	102,35	52,33	52,34	52,30	52,32	Broken	Broken	2,200357877
20-avr-26	RS2 23	103,03	52,15	52,14	52,16	52,15	19,739	2,33876856	
20-avr-26	RS2 33	105,47	52,31	52,34	52,32	52,32	17,874	2,061947107	
Type MgO+SRA									
Mélange NS									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
21-avr-26	NS 13	101,36	52,06	52,15	52,38	52,19	23,542	2,881287859	3,630330412
21-avr-26	NS 33	104,82	52,4	52,36	52,28	52,31	33,336	3,894065686	
21-avr-26	NS 33	101,75	52,25	52,17	52,17	52,19	34,635	4,151088997	
Mélange NS+RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
21-avr-26	NS+RS1 13	101,72	51,73	51,65	51,71	51,71	15,743	2,388234056	2,673950236
21-avr-26	NS+RS1 23	101,66	51,54	51,51	51,43	51,51	22,083	2,685746738	
21-avr-26	NS+RS1 33	104,12	52,54	52,53	52,53	52,53	26,433	2,962774626	
Mélange RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
21-avr-26	RS1 13	101,73	52,15	52,15	52,18	52,17	22,725	2,778686859	2,71775482
21-avr-26	RS1 23	101,3	52,44	52,45	52,53	52,47	21,07	2,520627423	
21-avr-26	RS1 33	101,53	52,44	52,41	52,45	52,44	23,35	2,39510624	
Mélange RS2									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
21-avr-26	RS2 13	102,34	52,11	52,15	52,17	52,14	30,521	3,641197371	3,233926823
21-avr-26	RS2 23	101,87	52,37	52,35	52,38	52,38	24,333	2,974897851	
21-avr-26	RS2 33	102,29	51,75	51,75	51,75	51,77	25,877	3,085665246	
Type SRA									
Mélange NS									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
22-avr-26	NS 13	101,41	51,87	51,89	51,87	51,87	Broken	Broken	4,194367621
22-avr-26	NS 33	102,07	52,14	52,13	52,34	52,19	32,133	4,13511005	
22-avr-26	NS 33	101,31	52,55	52,58	52,53	52,55333333	33,831	4,045222395	
Mélange NS+RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
22-avr-26	NS+RS1 13	101,97	51,85	51,89	51,9	51,88	30,381	3,728234045	3,731422409
22-avr-26	NS+RS1 23	102,11	52,24	52,22	52,27	52,24333333	30,427	3,161185626	
22-avr-26	NS+RS1 33	101,48	52,26	52,45	52,42	52,37666667	32,018	3,83487954	
Mélange RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
22-avr-26	RS1 13	105,55	52,37	52,39	52,42	52,39	18,913	2,177239888	2,955235552
22-avr-26	RS1 23	102,39	52,34	52,4	52,4	52,39	23,368	2,943958372	
22-avr-26	RS1 33	104,75	52,34	52,37	52,37	52,36	22,788	2,54481045	
Mélange RS2									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
22-avr-26	RS2 13	102,5	52,31	52,38	52,33	52,34	Broken	Broken	3,570302793
22-avr-26	RS2 23	105,68	52,3	52,31	52,25	52,29333333	33,103	3,75001853	
22-avr-26	RS2 33	103,31	52,37	52,38	52,39	52,38333333	28,406	3,34618033	
Type K100+SRA									
Mélange NS									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
23-avr-26	NS 13	101,55	51,5	51,58	51,59	51,53	15,519	2,065794107	3,309551314
23-avr-26	NS 23	102,74	52,32	52,31	52,28	52,30	32,117	3,804825553	
23-avr-26	NS 33	104,95	52,61	52,62	52,64	52,62	35,724	4,107934235	
Mélange NS+RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
23-avr-26	NS+RS1 13	102,45	52,45	52,41	52,48	52,45	23,141	2,74151052	3,454527568
23-avr-26	NS+RS1 23	105,15	52,66	52,61	52,65	52,64	32,46	3,73303802	
23-avr-26	NS+RS1 33	102,46	52,54	52,55	52,59	52,56	32,888	3,889017623	
Mélange RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
23-avr-26	RS1 13	105,51	52,55	52,56	52,57	52,53	11,521	1,53444658	2,721859544
23-avr-26	RS1 23	102,17	52,41	52,39	52,45	52,42	30,342	3,17620305	
23-avr-26	RS1 33	103,62	51,88	51,85	51,86	51,86	26,793	3,173930795	
Mélange RS2									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
23-avr-26	RS2 13	103,33	52,56	52,58	52,59	52,59	19,125	2,265897859	3,128392423
23-avr-26	RS2 23	103,33	52,52	52,54	52,58	52,84333333	24,33	2,56295378	
23-avr-26	RS2 33	103,22	52,27	52,29	52,28	52,28	28,777	3,394893902	
Type G+SRA									
Mélange NS									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
27-avr-26	NS 13	103,51	52,8	52,78	52,83	52,80333333	21,77	2,53566268	2,943673388
27-avr-26	NS 23	102,7	53,07	53,12	53,11	53,09666667	28,705	3,351640395	
27-avr-26	NS 33	106,54	53,07	53,15	53,17	53,10333333	Broken	Broken	
Mélange NS+RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
27-avr-26	NS+RS1 13	103,22	52,46	52,5	52,48	52,48	19,378	2,277358454	2,277358454
27-avr-26	NS+RS1 23	105,81	53,41	53,4	53,42	53,41	Broken	Broken	
27-avr-26	NS+RS1 33	106,63	53,15	53,25	53,19	53,18	Broken	Broken	
Mélange RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
27-avr-26	RS1 13	104,28	53,88	53,85	53,87	53,86	Broken	Broken	1,521902555
27-avr-26	RS1 23	105,45	53,79	53,79	53,79	53,79	18,923	2,061158897	
27-avr-26	RS1 33	105,29	53,76	53,79	53,79	53,78	16,705	1,762510044	
Mélange RS2									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
27-avr-26	RS2 13	103,33	52,56	52,58	52,59	52,59	19,125	2,265897859	3,128392423
27-avr-26	RS2 23	103,33	52,52	52,54	52,58	52,84333333	24,33	2,56295378	
27-avr-26	RS2 33	103,22	52,27	52,29	52,28	52,28	28,777	3,394893902	
Type Thisb									
Mélange NS									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
28-avr-26	NS 13	105,26	52,31	52,38	52,34	52,35666667	21,777	2,53566268	4,06804224
28-avr-26	NS 23	101,52	52,33	52,38	52,35	52,38333333	33,326	3,96795351	
28-avr-26	NS 33	104,75	52,26	52,27	52,24	52,26666667	36,432	4,176667768	
Mélange NS+RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
28-avr-26	NS+RS1 13	101,71	52,16	52,16	52,17	52,13333333	17,857	2,152388	3,13383759
28-avr-26	NS+RS1 23	101,82	52,16	52,15	52,14	52,16666667	30,707	3,880174367	
28-avr-26	NS+RS1 33	102,28	51,74	51,71	51,73	51,76666667	23,910	3,680395522	
Mélange RS1									
Date de l'essai prévue		Hauteur [mm]	Diamètre 1 [mm]	Diamètre 2 [mm]	Diamètre 3 [mm]	Moyenne Diamètre [mm]	Force appliquée [N]	Splitting Tensile Strength [Mpa]	Valeur Moyenne STS [Mpa]
28-avr-26	RS1 13	101,68	52,08	52,09	52,09	52,07	25,261	3,105205862	2,69570373
28-avr-26	RS1 23	101,76	51,94	51,95	51,93	51,94	25,761	3,105205862	
28-avr-26	RS1 33	101,61	51,94	51,95	51,93	51,94	25,761	3,105205862	

A.7.3 Sections observées des échantillons après fendage



FIGURE 128 – Mélanges de type MgO



FIGURE 129 – Mélanges de type MgO+SRA



FIGURE 130 – Mélanges de type SRA



FIGURE 131 – Mélanges de type K+SRA

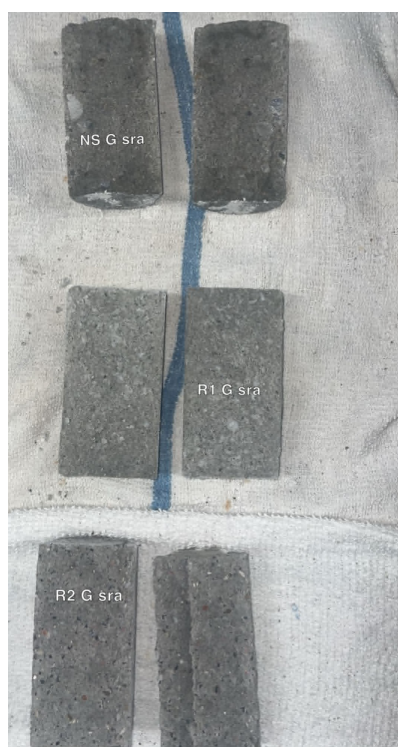


FIGURE 132 – Mélanges de type G+SRA



FIGURE 133 – Mélanges sans agent expansif

A.8 Données et graphiques issus des tests d'absorption

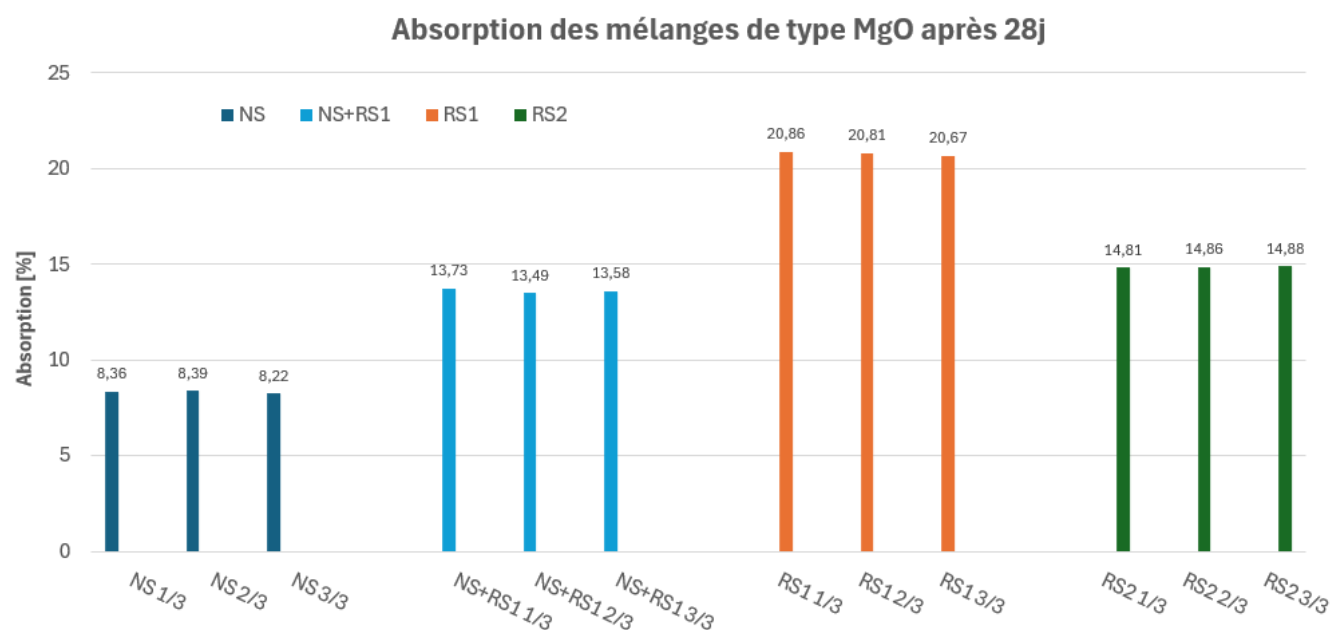


FIGURE 134 – Histogramme des absorptions pour les mélanges de type MgO

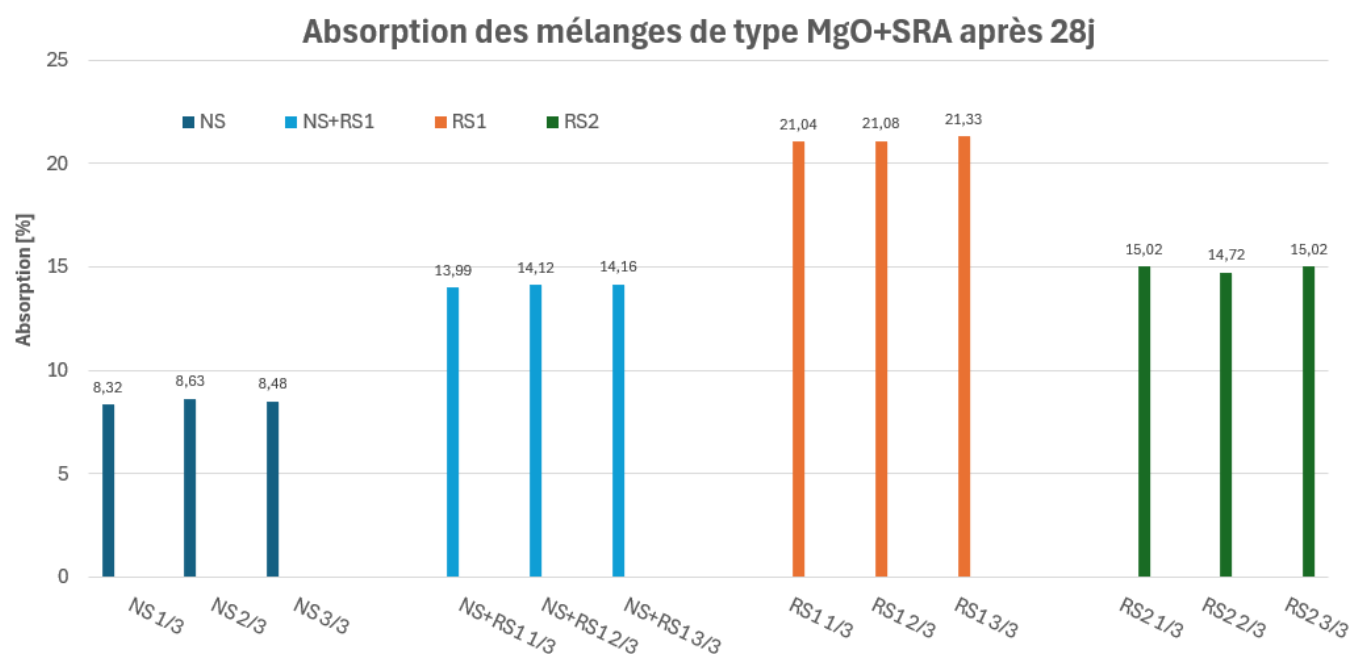


FIGURE 135 – Histogramme des absorptions pour les mélanges de type MgO+SRA

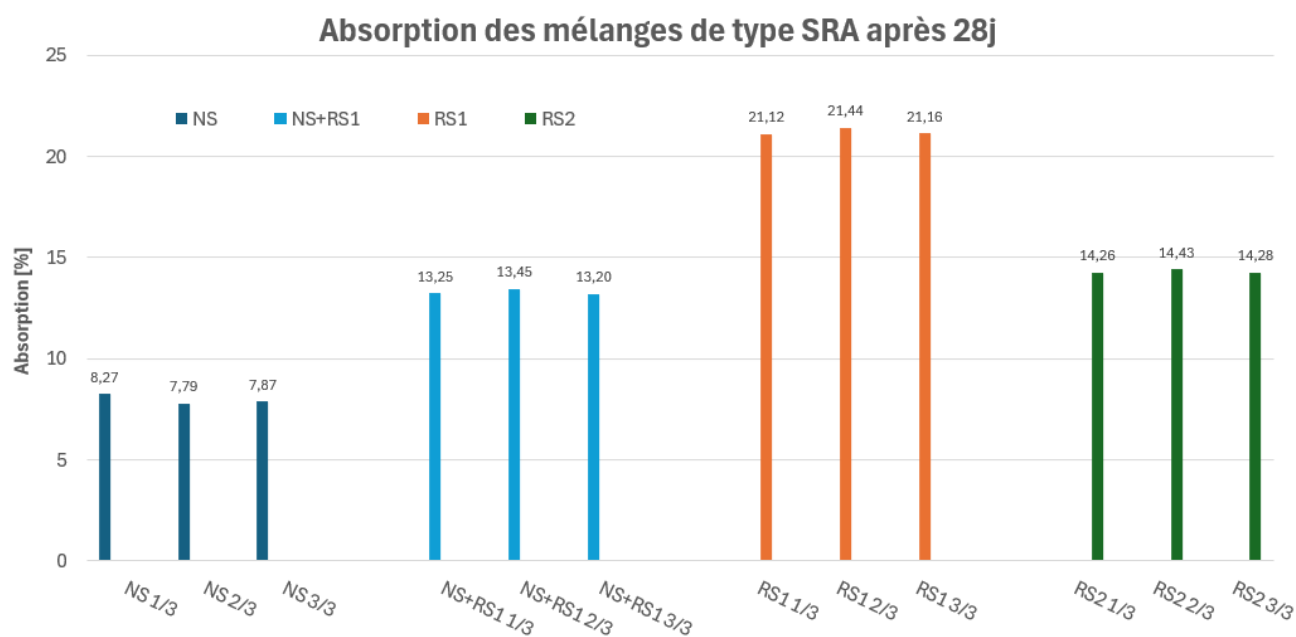


FIGURE 136 – Histogramme des absorptions pour les mélanges de type SRA

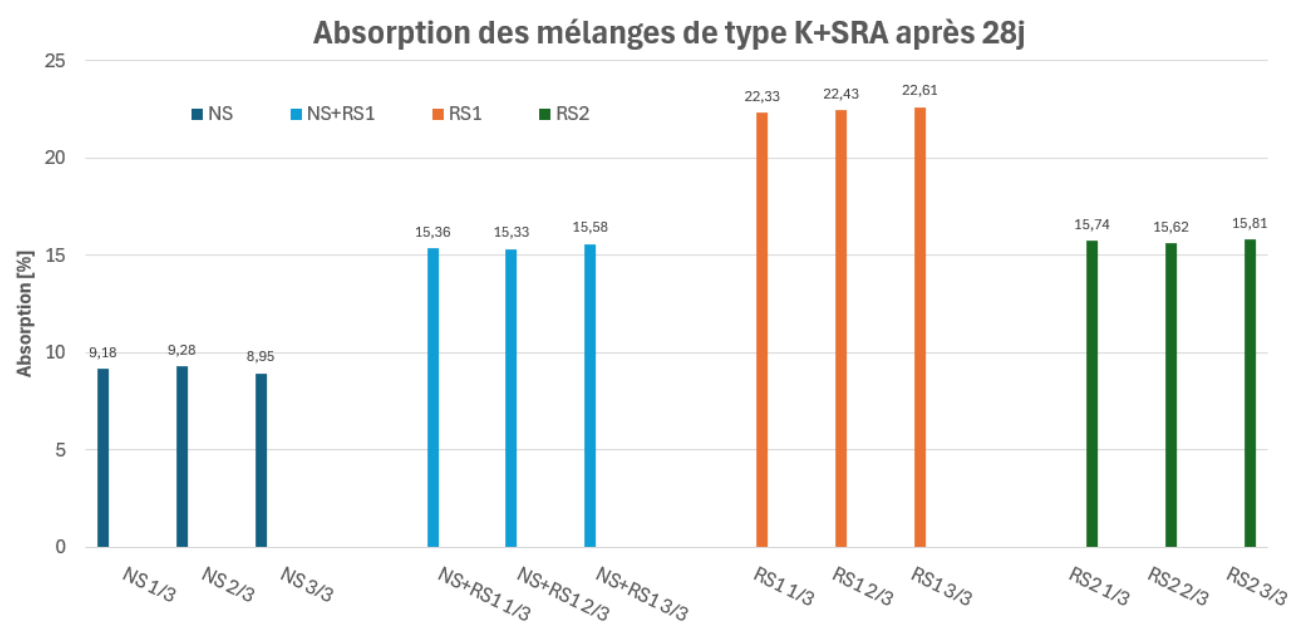


FIGURE 137 – Histogramme des absorptions pour les mélanges de type K+SRA

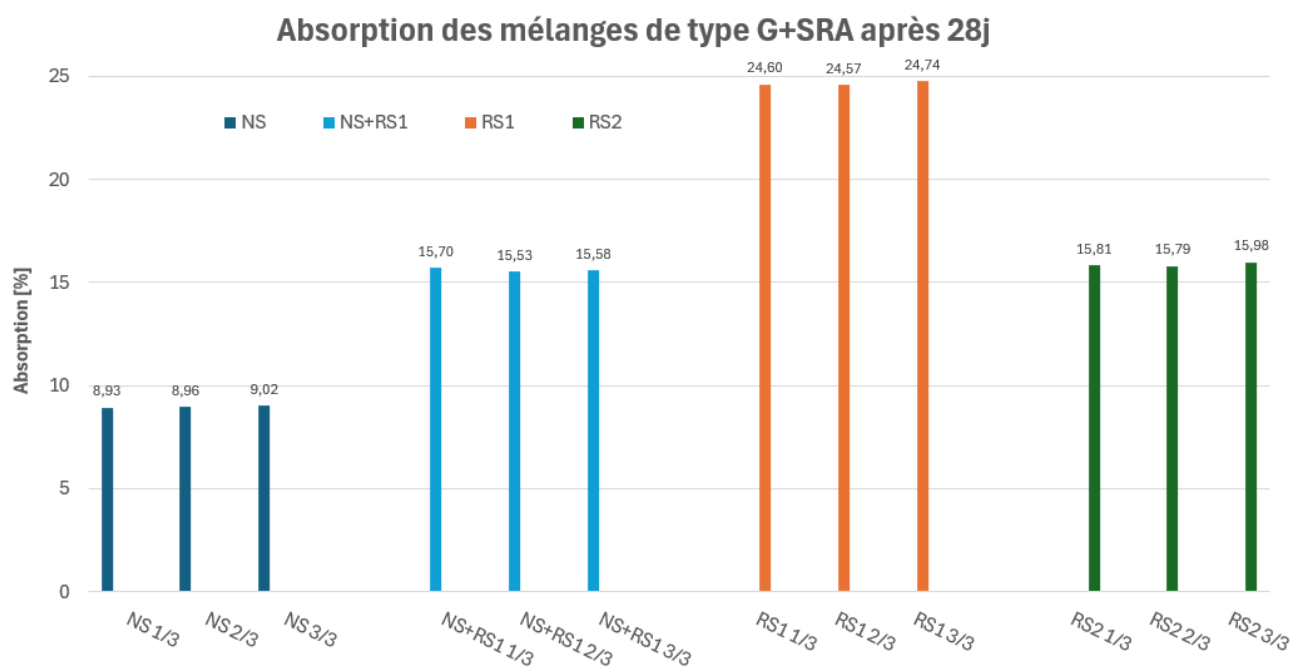


FIGURE 138 – Histogramme des absorptions pour les mélanges de type G+SRA

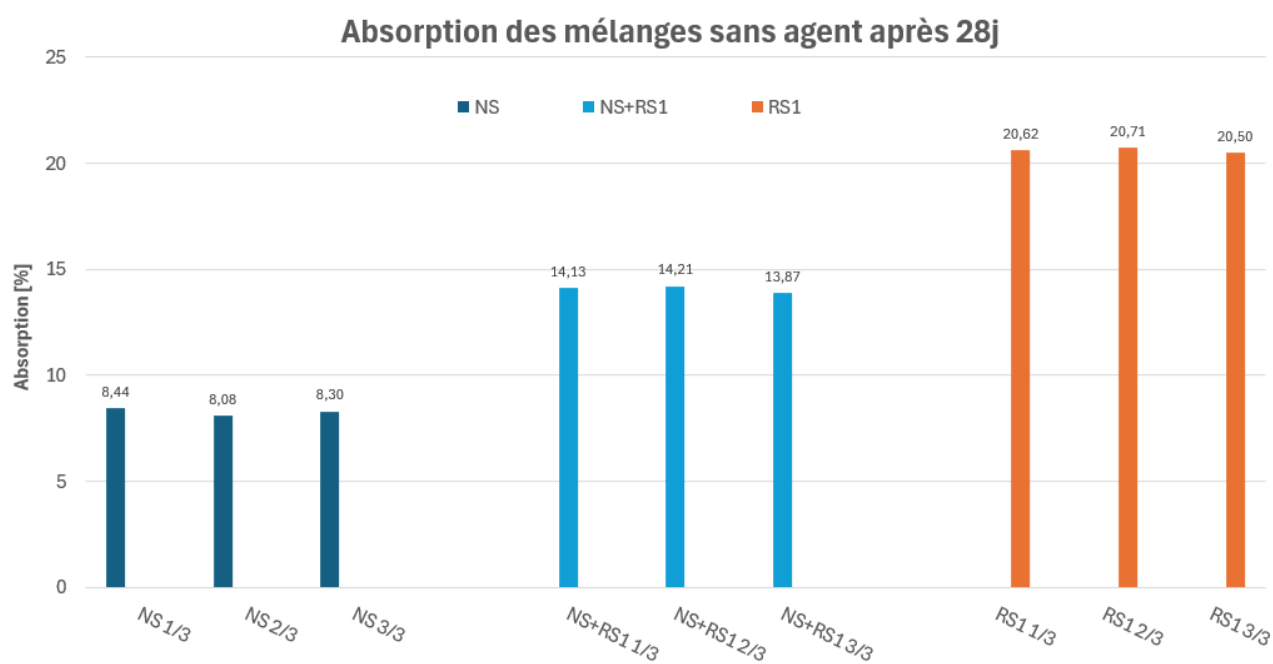


FIGURE 139 – Histogramme des absorptions pour les mélanges sans agent expansif

A.8.1 Données brutes

Type MgO										Heure de l'essai :
Mélange NS										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
20-avr-26 NS 1/3	461,3	500,5	499,7	280,2	8,36	8,18	2,104	2,542	17,22	
20-avr-26 NS 2/3	474,6	514,4	288,8	8,39	8,45	2,101	2,554	17,75		
20-avr-26 NS 3/3	462,1	500,1	499,7	280,8	8,22	8,14	2,111	2,549	17,18	
Moyenne					8,32	8,26	2,105	2,548	17,38	
Mélange NS+RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
20-avr-26 NS+RS1 1/3	471,5	469	468,3	241,6	13,73	13,60	1,818	2,426	25,088	
20-avr-26 NS+RS1 2/3	393,5	453,4	453,9	235,1	13,49	13,62	1,836	2,430	24,863	
20-avr-26 NS+RS1 3/3	394,6	448,2	448,4	231,1	13,58	13,63	1,821	2,422	24,821	
Moyenne					13,60	13,68	1,821	2,426	24,926	
Mélange RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
20-avr-26 RS1 1/3	342,2	413,6	415,3	197,1	20,86499123	21,5371128	1,563985375	2,358373535	33,68372943	
20-avr-26 RS1 2/3	344,1	415,7	418,3	198,8	20,80790468	21,56349838	1,567653759	2,368203716	33,80410023	
20-avr-26 RS1 3/3	321,7	388,2	390,8	184,6	20,67143301	21,47963942	1,56013579	2,346462436	33,51185422	
Moyenne					20,78144237	21,5267504	1,563924975	2,357673836	33,68632736	
Mélange RS2										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
20-avr-26 RS2 1/3	397,7	456,6	457	237,1	14,810	14,911	1,809	2,476	26,97	
20-avr-26 RS2 2/3	409,1	469,3	470,2	242,7	14,862	14,935	1,798	2,459	26,86	
20-avr-26 RS2 3/3	398,4	457,7	457,7	247,1	14,885	14,885	1,892	2,633	26,16	
Moyenne					14,852	14,910	1,833	2,532	27,33	
Type MgO+SRA										Heure de l'essai :
Mélange NS										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
21-avr-26 NS 1/3	458,7	494,7	494,5	274,8	8,32	8,28	2,079	2,511	17,21	
21-avr-26 NS 2/3	448,5	487,2	486,5	269,9	8,63	8,47	2,071	2,511	17,54	
21-avr-26 NS 3/3	468,1	507,6	507,5	281,9	8,48	8,42	2,075	2,514	17,46	
Moyenne					8,48	8,39	2,075	2,512	17,40	
Mélange NS+RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
21-avr-26 NS+RS1 1/3	388,2	442,5	443	227	13,99	14,12	1,797	2,408	25,37	
21-avr-26 NS+RS1 2/3	388,1	442,3	442,9	227,3	14,12	14,12	1,800	2,414	25,42	
21-avr-26 NS+RS1 3/3	396,1	452,2	452	231,7	14,16	14,11	1,798	2,409	25,37	
Moyenne					14,09	14,12	1,798	2,410	25,39	
Mélange RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
21-avr-26 RS1 1/3	338,4	409,6	413	193,7	21,04	22,04	1,543	2,339	34,02	
21-avr-26 RS1 2/3	345,4	418,2	421,5	198,9	21,08	22,03	1,552	2,358	34,19	
21-avr-26 RS1 3/3	348,4	422,7	427,1	200,8	21,33	22,59	1,540	2,360	34,78	
Moyenne					21,15	22,22	1,549	2,392	34,33	
Mélange RS2										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
21-avr-26 RS2 1/3	394,7	454	454	234,2	15,02	15,02	1,796	2,459	26,98	
21-avr-26 RS2 2/3	400,1	453	453,4	238,1	14,72	14,82	1,808	2,470	26,80	
21-avr-26 RS2 3/3	395,5	454,9	454,6	234,2	15,02	14,94	1,794	2,452	26,81	
Moyenne					14,92	14,93	1,799	2,460	26,86	
Type SRA										Heure de l'essai :
Mélange NS										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
22-avr-26 NS 1/3	458,6	494,6	494,6	276,2	8,274956217	8,318739054	2,089661482	2,523466622	17,38334858	
22-avr-26 NS 2/3	471,1	507,8	508,2	286,4	7,790278073	7,875185736	2,123985571	2,550622631	16,72678088	
22-avr-26 NS 3/3	462,4	498,8	499,1	277,8	7,871972318	7,936851211	2,089471306	2,504874506	16,58382288	
Moyenne					7,79068869	8,043532	2,10039454	2,528281553	16,89738411	
Mélange NS+RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
22-avr-26 NS+RS1 1/3	414,3	469,2	469,4	249,2	13,2512672	13,2995414	1,88147193	2,50938825	25,02270683	
22-avr-26 NS+RS1 2/3	394,1	447,1	447,5	236,1	13,44836336	13,54986044	1,86423841	2,494303797	25,26070293	
22-avr-26 NS+RS1 3/3	407,7	461,5	461,5	244,5	13,19597743	13,19597743	1,878801843	2,49861765	24,79262673	
Moyenne					13,298536	13,34845976	1,874837215	2,500617638	25,02516788	
Mélange RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
22-avr-26 RS1 1/3	362,3	438,8	439,6	216,2	21,11509795	21,30839803	1,622480967	2,47890839	34,57232423	
22-avr-26 RS1 2/3	368,5	447,5	448	220,4	21,43828323	21,57394844	1,619068541	2,48816388	34,52970123	
22-avr-26 RS1 3/3	357,3	432,3	433,6	214,4	21,15636308	21,41057935	1,626532361	2,500343635	34,86782183	
Moyenne					21,23735046	21,43094527	1,623360623	2,489447302	34,78934693	
Mélange RS2										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
22-avr-26 RS2 1/3	393,5	449,6	450,2	229,6	14,2566709	14,40914867	1,783771532	2,40854179	25,70262315	
22-avr-26 RS2 2/3	400,5	458,3	458,8	234,9	14,43196005	14,5568904	1,788744975	2,418478261	26,0384	
22-avr-26 RS2 3/3	400,6	457,8	458,6	236,1	14,27858213	14,47828258	1,800449438	2,435258359	26,06741573	
Moyenne					14,32240436	14,48141175	1,790988649	2,418196933	25,33615164	
Type K100+SRA										Heure de l'essai :
Mélange NS										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
23-avr-26 NS 1/3	473,9	517,4	517,9	290,6	9,17351572	9,200253238	2,088585528	2,59537916	19,1551344	
23-avr-26 NS 2/3	461,1	503,9	503,6	282,2	9,282151377	9,21089568	2,086556271	2,571471553	19,1802529	
23-avr-26 NS 3/3	461,5	502,8	503,6	282,7	9,94307309	9,122428869	2,089180625	2,581036197	19,05839748	
Moyenne					9,136794062	9,179323218	2,088807244	2,581237638	19,1586454	
Mélange NS+RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
23-avr-26 NS+RS1 1/3	403,1	465	465,1	245,5	15,3559107	15,38079881	1,8356102	2,557741117	28,2335118	
23-avr-26 NS+RS1 2/3	401,3	463,5	463,4	244,5	15,32719582	15,30231401	1,835938173	2,545367217	28,09502058	
23-avr-26 NS+RS1 3/3	406,3	469,6	469	246,5	15,57962097	15,43194684	1,82067416	2,542553191	28,17977528	
Moyenne					15,42093593	15,37168659	1,832558596	2,551220509	28,16931567	
Mélange RS1										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
23-avr-26 RS1 1/3	362,7	443,7	444,8	230,3	22,3325062	22,63578719	2,35672546	5,051532033	53,34632878	
23-avr-26 RS1 2/3	339,7	415,9	416,4	206,3	22,43155728	22,57874595	1,61684919	2,546476762	36,50645752	
23-avr-26 RS1 3/3	356,9	437,6	438,6	217,1	22,61197574	22,34760437	1,609833108	2,529532197	36,34181326	
Moyenne					22,45847373	22,72071249	1,61135731	3,383647185	42,26485585	
Mélange RS2										
Date de l'essai/prévue	Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebull	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides	
23-avr-26 RS2 1/3	402,2	465,5	465,3	241,3	15,73843859	15,8378516	1,795535714	2,50904554	28,4375	
23-avr-26 RS2 2/3	393,8	455,3	456	237,5	15,710645	15,79481971	1,80228833	2,519513756	28,46681922	
23-avr-26 RS2 3/3	395,2	457,7	458	238,4	15,81477733	15,89068826	1,799635701	2,520408163	28,5974439	
Moyenne					15,72342681	15,84113319	1,79515248	2,516322486	28,5005897	

Type G+SRA										Heure de l'essai:
Mélange NS										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
27-avr-26	NS 1/3	454,9	495,5	496,3	274,3	8,32503847	9,100901237	2,043093093	2,518826135	18,64864865
27-avr-26	NS 2/3	452,1	492,6	493,1	273,4	8,35819509	9,068790091	2,057806093	2,529338444	18,66181156
27-avr-26	NS 3/3	455,5	496,6	496,3	274,4	9,023051592	8,957183901	2,052726453	2,515184381	18,38660666
	Moyenne					8,368761717	9,042233763	2,053210551	2,52131652	18,56570636
Mélange NS+RS1										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
27-avr-26	NS+RS1 1/3	412,2	476,3	473,3	247,3	15,63626335	16,27850558	1,776724138	2,439636786	28,32241375
27-avr-26	NS+RS1 2/3	425,6	491,7	493,7	255,4	15,53101504	16,00933985	1,785984054	2,500587944	28,57742342
27-avr-26	NS+RS1 3/3	410,1	474	476,4	245,7	15,58156547	16,16678859	1,77783329	2,494525547	28,73862153
	Moyenne					15,60294815	16,14874467	1,780113827	2,496263959	28,74615293
Mélange RS1										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
27-avr-26	RS1 1/3	361,8	450,8	459,1	218,8	24,53922809	26,83331122	1,506617978	2,530069393	40,49105285
27-avr-26	RS1 2/3	362,2	451,2	458,2	218,8	24,57205364	26,50463354	1,512343033	2,525801953	40,10025063
27-avr-26	RS1 3/3	362,5	452,2	457,5	219,3	24,74482753	26,20683655	1,525673401	2,542075736	39,38316498
	Moyenne					24,63870444	26,5343671	1,514746805	2,532643206	40,39148949
Mélange RS2										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
27-avr-26	RS2 1/3	394,6	457	460,1	235,4	15,81348201	16,53908768	1,75611927	2,478643216	29,14997775
27-avr-26	RS2 2/3	395,1	457,5	460,3	235,3	15,79347001	16,50215135	1,756	2,472465582	28,97777778
27-avr-26	RS2 3/3	384,8	446,3	449,6	229,8	15,98232848	16,222235702	1,75624339	2,482580645	29,48134668
	Moyenne					15,86309335	16,420809431	1,75624339	2,477896481	29,20303407
Type Thib										Heure de l'essai:
Mélange NS										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
28-avr-26	NS 1/3	463,4	502,5	502,3	282,7	8,437634873	8,394475615	2,110200364	2,5844715	17,7140255
28-avr-26	NS 2/3	477,7	516,3	515,8	290,4	8,080385179	7,975716977	2,1034333	2,550453817	16,90328305
28-avr-26	NS 3/3	461,6	499,9	499,6	281,4	8,297227036	8,232235702	2,15490376	2,561538224	17,4152154
	Moyenne					8,271749029	8,200809431	2,115011377	2,55884118	17,34417465
Mélange NS+RS1										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
28-avr-26	NS+RS1 1/3	392,2	447,6	446,6	229	14,1254462	13,87047425	1,802389706	2,403186275	25
28-avr-26	NS+RS1 2/3	394,7	450,8	449,8	231	14,21332658	13,9593636	1,80393053	2,41117839	25,38281536
28-avr-26	NS+RS1 3/3	397,3	452,4	451,3	232,3	13,86861314	13,93174427	1,814155251	2,407878788	24,65753425
	Moyenne					14,06912864	13,80739604	1,806825162	2,40739432	24,3467832
Mélange RS1										
Date de l'essai prévue		Masses A	Masses B	Masses C	Masses D	Absorption immersion	Abs immersion ebul	Densité vol. sèche	Densité apparente	Teneur en vides
28-avr-26	RS1 1/3	358,8	432,8	432,7	211,5	20,62430323	20,53643255	1,625	2,442477876	33,4692023
28-avr-26	RS1 2/3	350,5	423,1	423,8	206,6	20,71326676	20,91238146	1,613720074	2,435719249	33,74789797
28-avr-26	RS1 3/3	353,6	426,1	426,7	209,3	20,50339367	20,67307692	1,62649494	2,45045045	33,62465501
	Moyenne					20,61365455	20,72749698	1,621738338	2,442882525	33,61365196

FIGURE 140 – Données brutes issues des tests d'absorption

A.9 Données et graphiques issus des tests pour évaluer le module de Young

A.9.1 Courbes contrainte-déformation ($\sigma - \varepsilon$) obtenues lors des cycles de chargement et de déchargement pour l'ensemble des mélanges étudiés

Mélanges à base de sable naturel (NS)

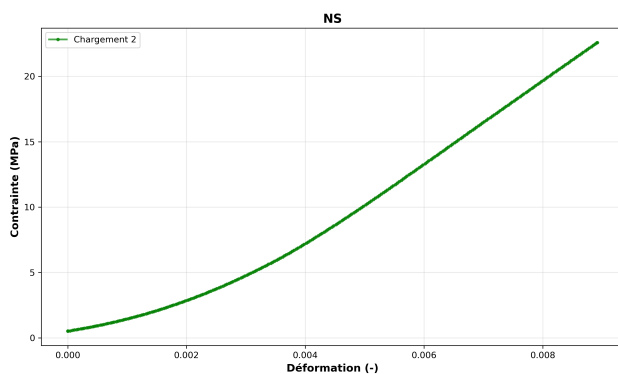


FIGURE 141 – Mélange NS

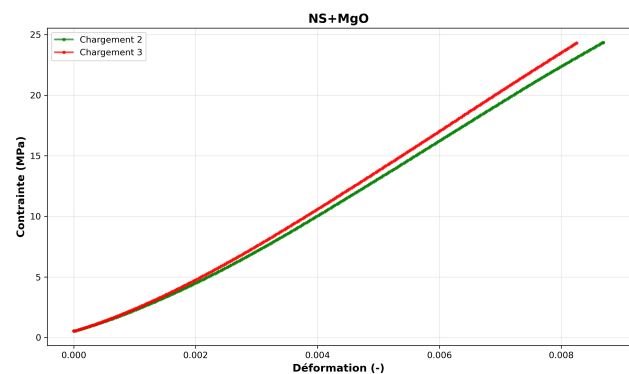


FIGURE 142 – Mélange NS+MgO

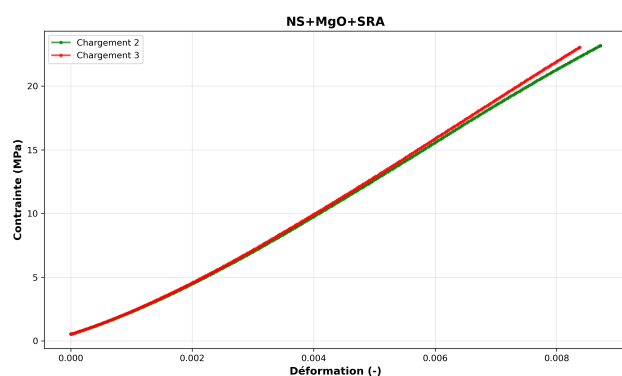


FIGURE 143 – Mélange NS MgO+SRA

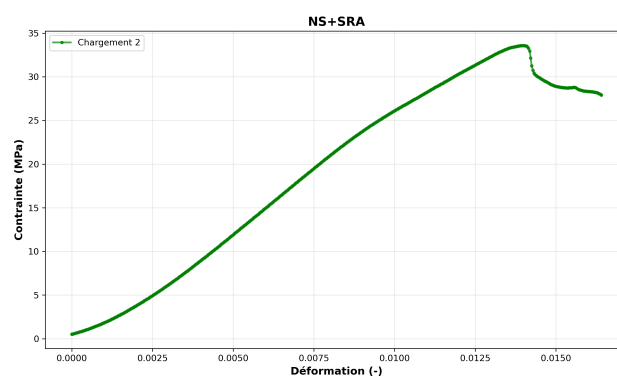


FIGURE 144 – Mélange NS+SRA

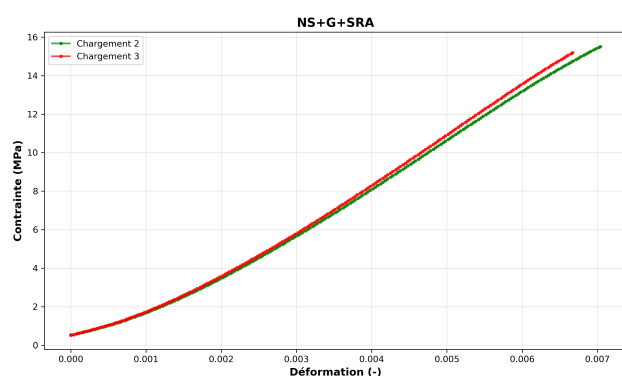


FIGURE 145 – Mélange NS G+SRA

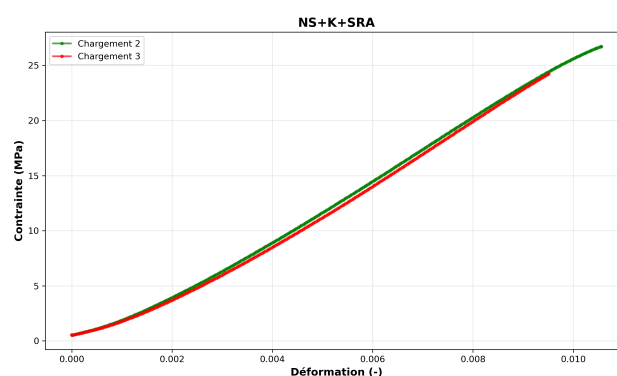


FIGURE 146 – Mélange NS K+SRA

Mélanges à base de sable recyclé canadien (RS1)

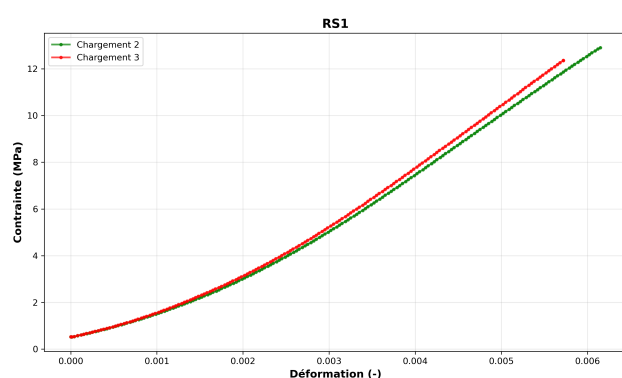


FIGURE 147 – Mélange RS1

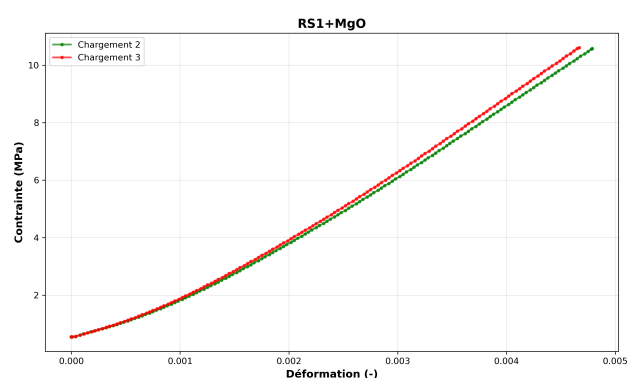


FIGURE 148 – Mélange RS1+MgO

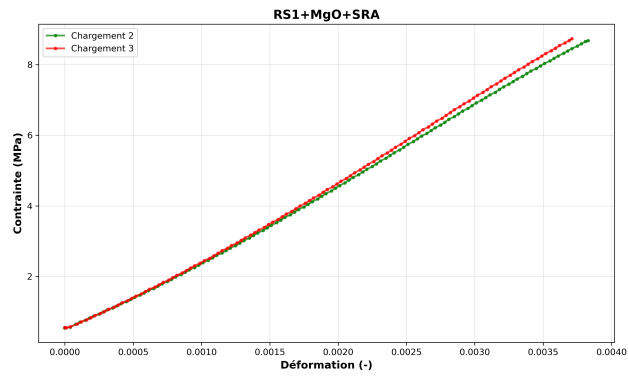


FIGURE 149 – Mélange RS1 MgO+SRA

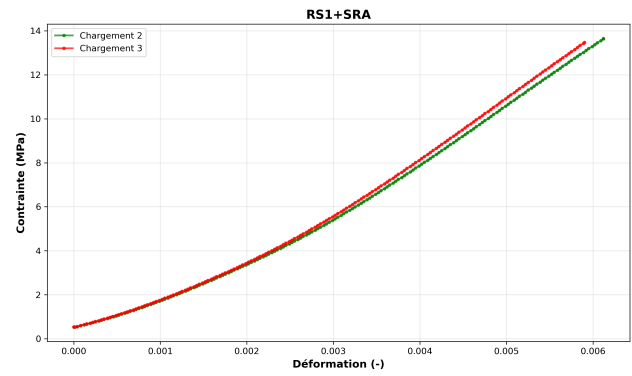


FIGURE 150 – Mélange RS1+SRA

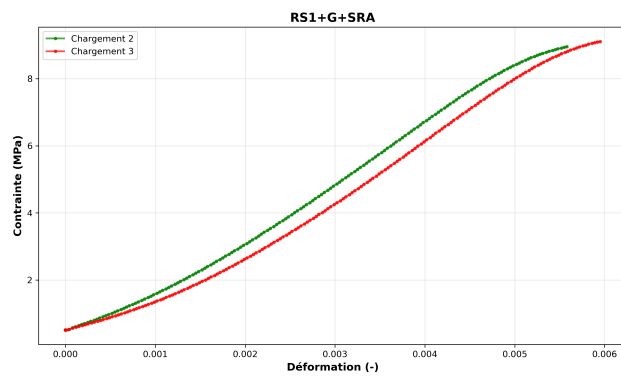


FIGURE 151 – Mélange RS1 G+SRA

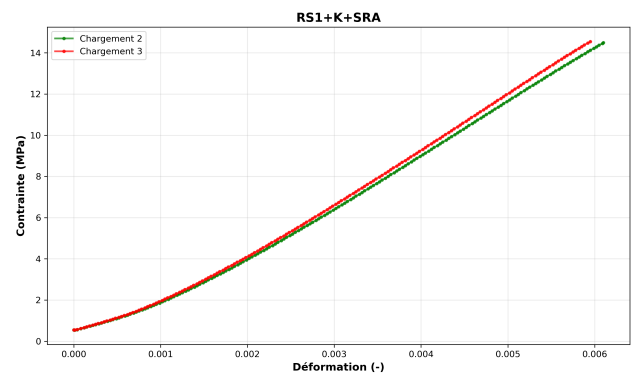


FIGURE 152 – Mélange RS1 K+SRA

Mélanges à base de sable recyclé canadien (RS2)

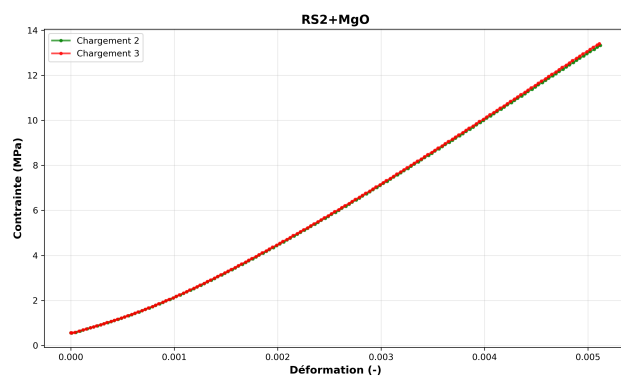


FIGURE 153 – Mélange RS1+MgO

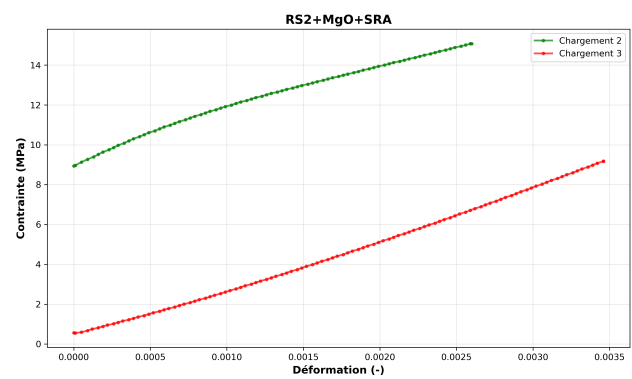


FIGURE 154 – Mélange RS2 MgO+SRA

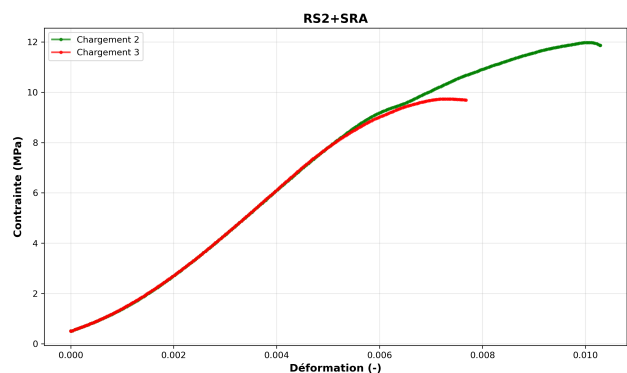


FIGURE 155 – Mélange RS2+SRA

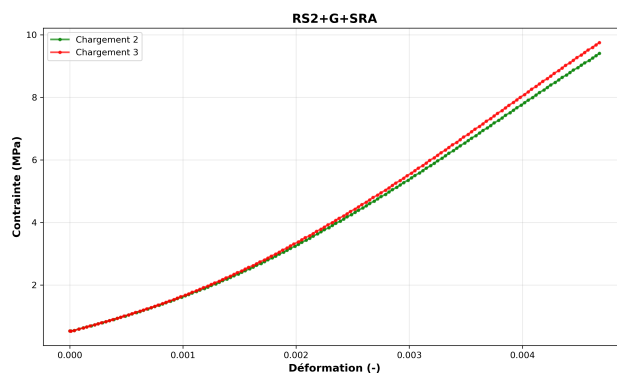


FIGURE 156 – Mélange RS2 G+SRA

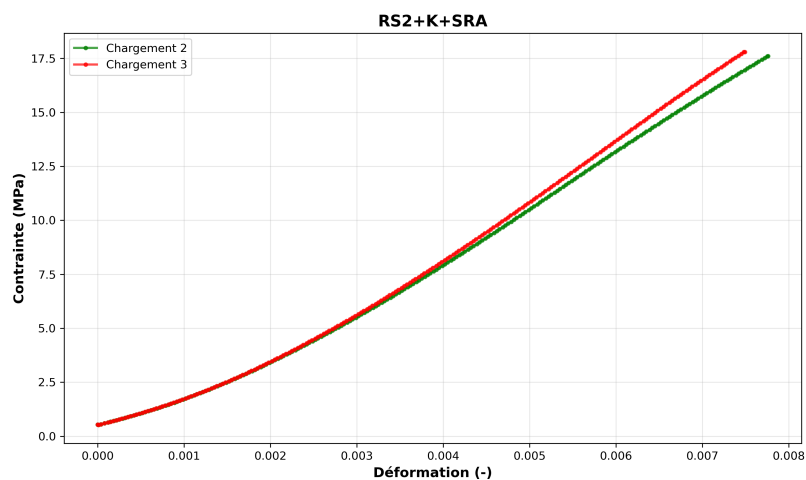


FIGURE 157 – Mélange RS2 K+SRA

Mélanges à base de sable naturel et de sable recyclé canadien (50% NS - 50% RS1)

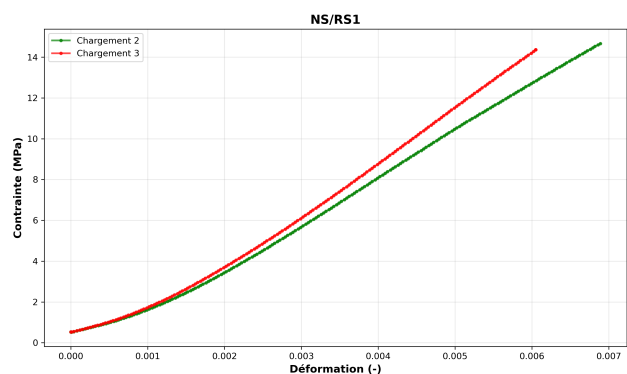


FIGURE 158 – Mélange NS-RS1

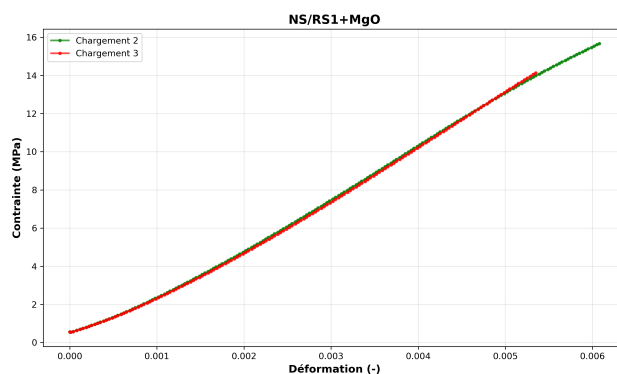


FIGURE 159 – Mélange NS-RS1 + MgO

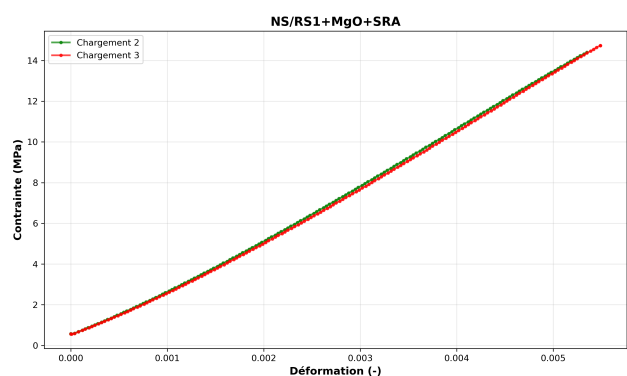


FIGURE 160 – Mélange NS-RS1 MgO+SRA

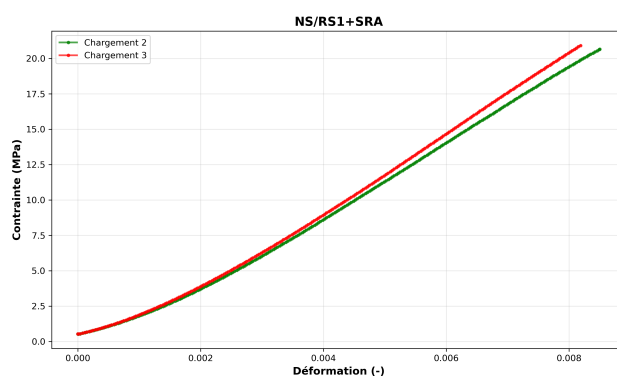


FIGURE 161 – Mélange NS-RS1 + SRA

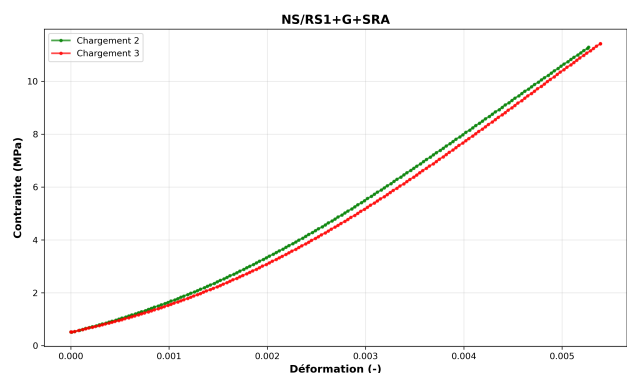


FIGURE 162 – Mélange NS-RS1 G+SRA

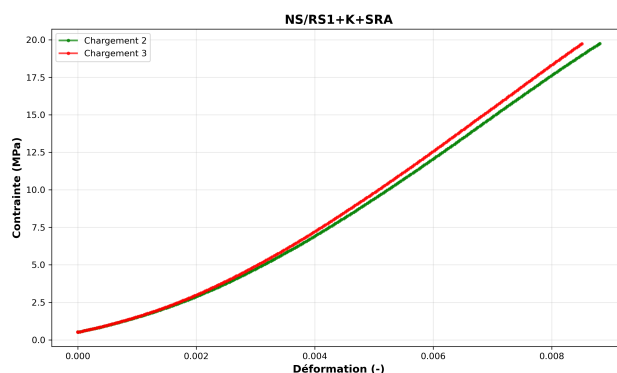


FIGURE 163 – Mélange NS-RS1 K+SRA

A.9.2 Valeurs moyennes calculées pour le module de Young selon les différentes méthodes

Méthode 1 : Méthode de la norme ASTM C469

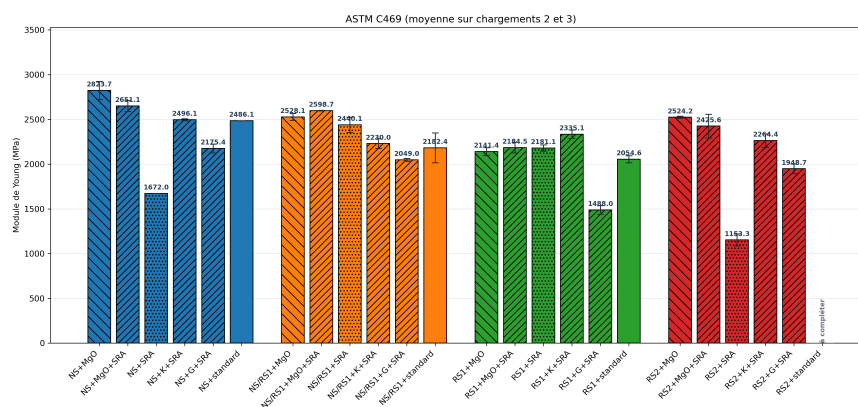


FIGURE 164 – Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 1

Méthode 2 : Méthode de la moyenne des n pentes locales

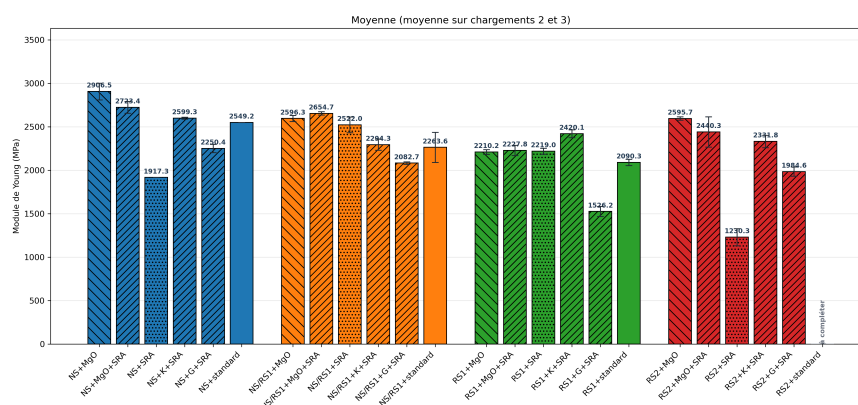


FIGURE 165 – Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 2

Méthode 3 : Méthode de la tangente locale calculée au voisinage de 50 % de la contrainte appliquée

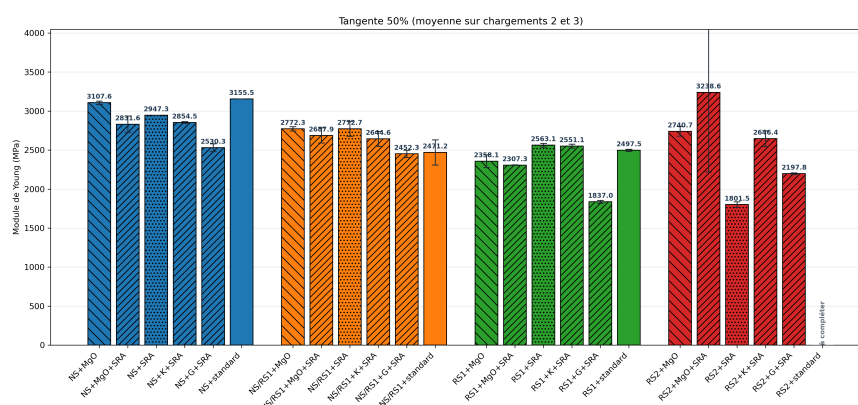


FIGURE 166 – Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 3

a méthode de la tangente locale calculée au voisinage de 90 % de la contrainte appliquée

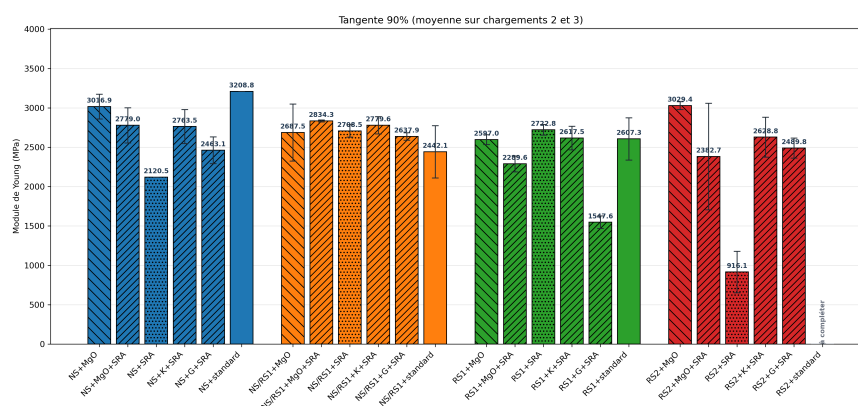


FIGURE 167 – Histogramme des valeurs moyennes pour E selon la méthode 4

A.10 German Angle

A.10.1 Mélanges à base de sable naturel (NS)

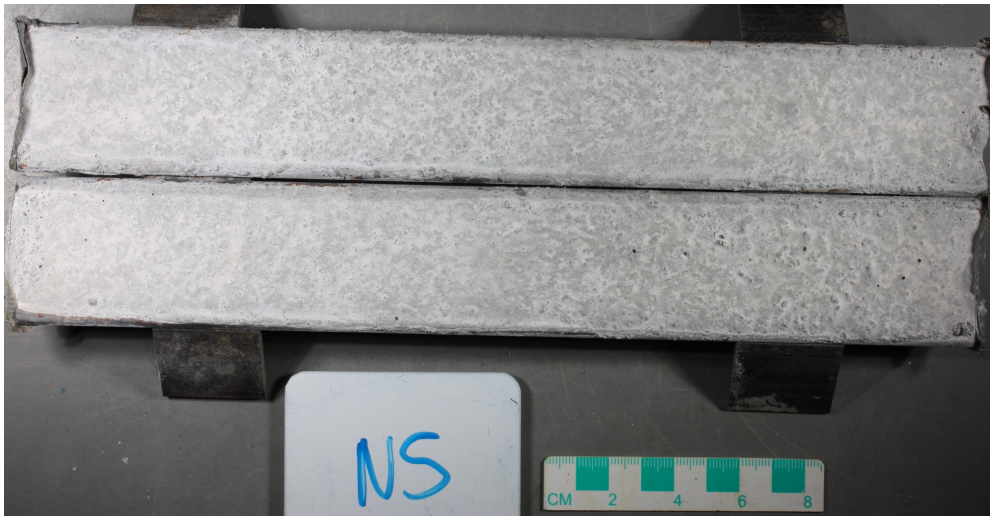


FIGURE 168 – Evolution de la fissuration du mélange NS (après 60j)

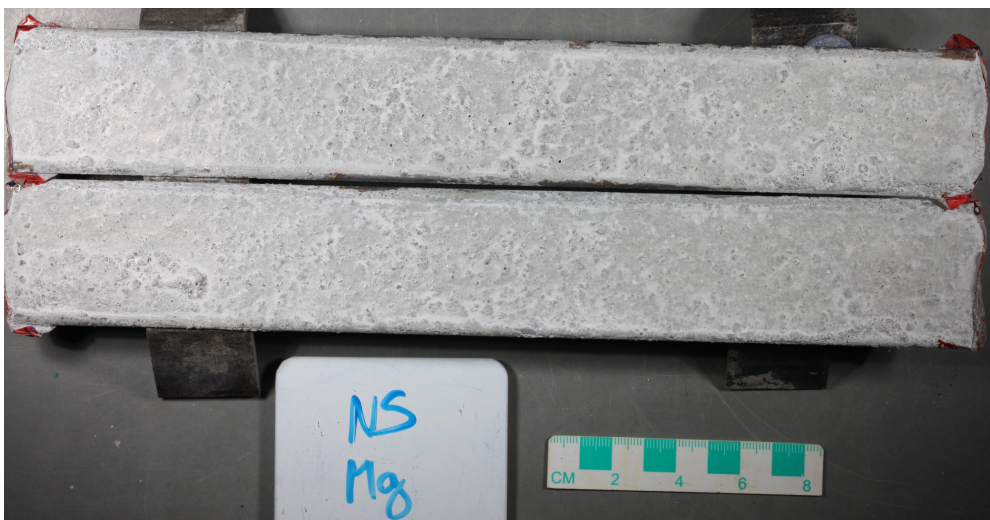


FIGURE 169 – Evolution de la fissuration du mélange NS+ MgO (après 60j)

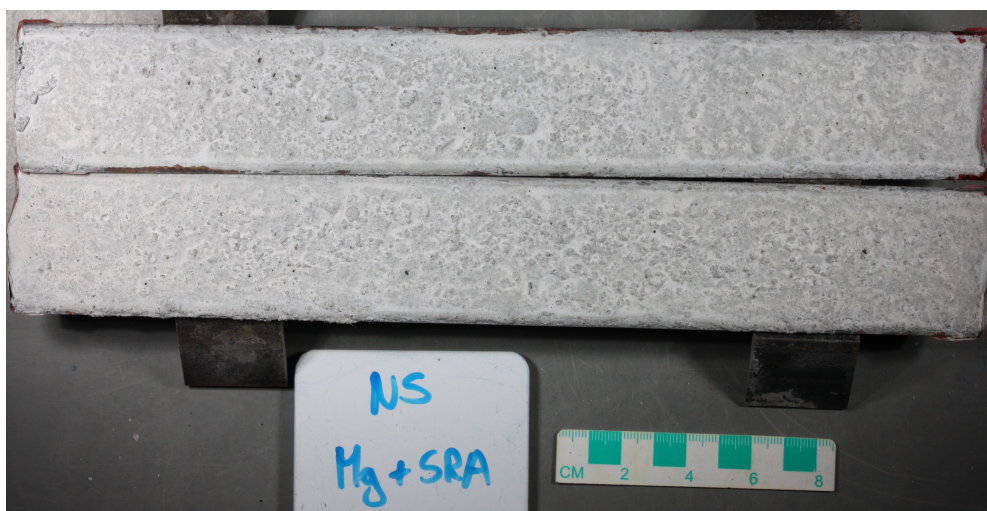


FIGURE 170 – Evolution de la fissuration du mélange NS MgO+SRA (après 60j)

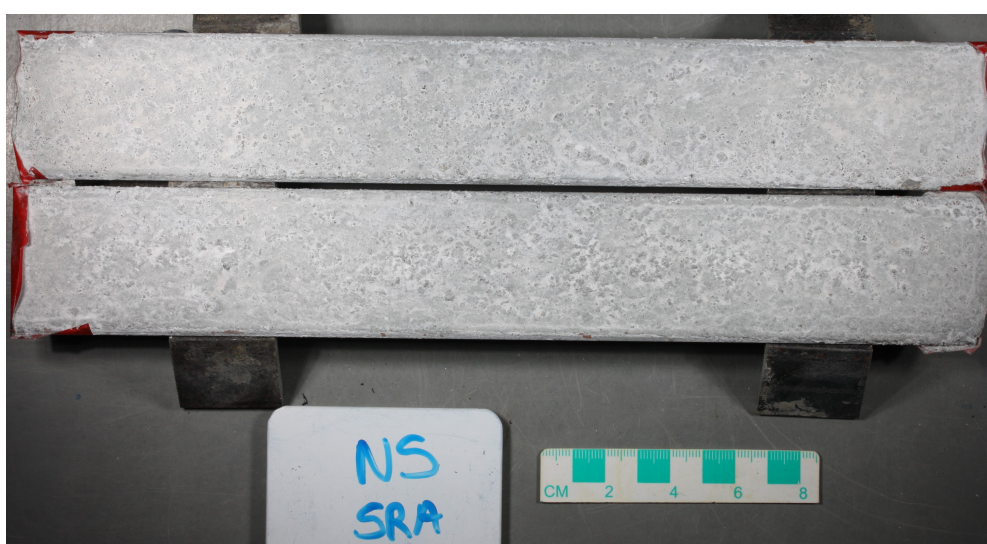


FIGURE 171 – Evolution de la fissuration du mélange NS+SRA (après 60j)



FIGURE 172 – Evolution de la fissuration du mélange NS G+SRA (après 60j)

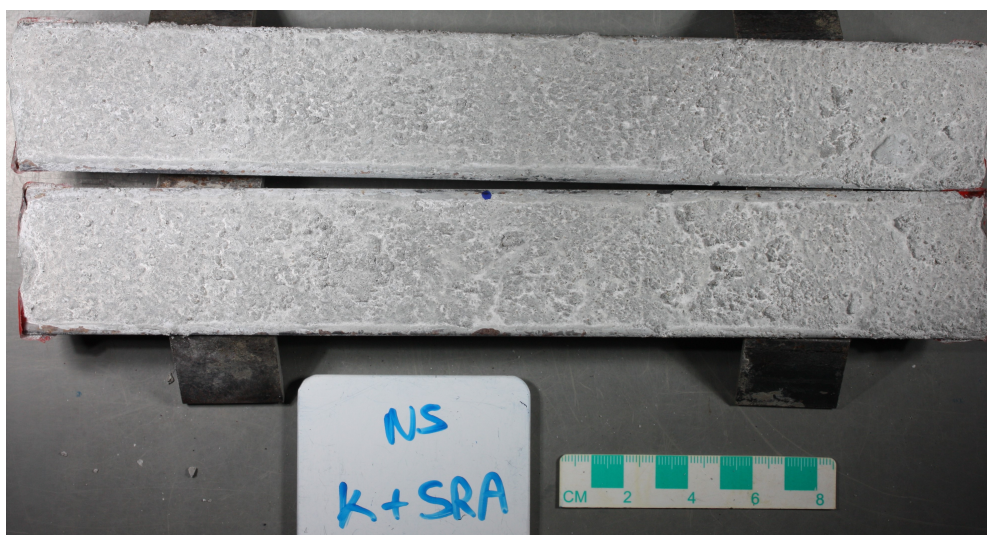


FIGURE 173 – Evolution de la fissuration du mélange NS K+SRA (après 60j)

A.10.2 Mélanges à base de sable recyclé canadien (RS1)

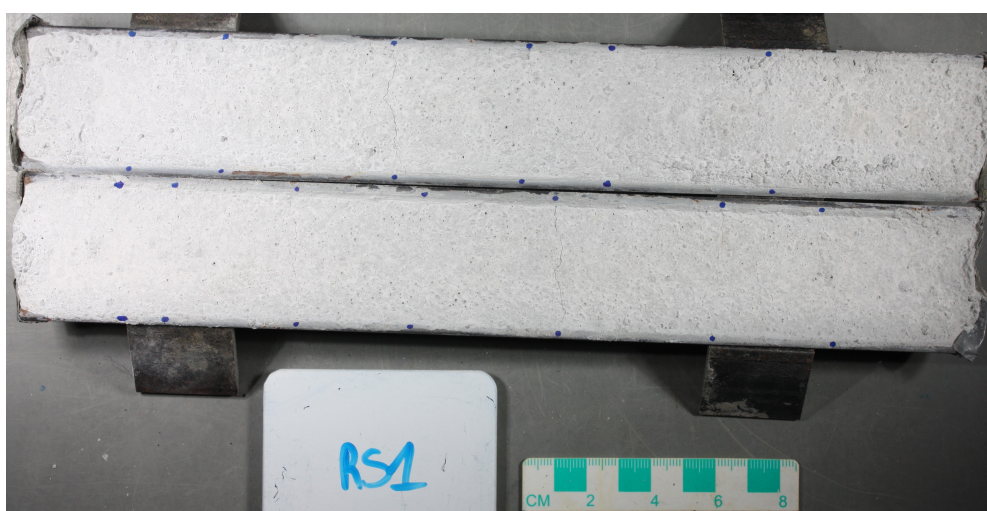


FIGURE 174 – Evolution de la fissuration du mélange RS1 (après 60j)

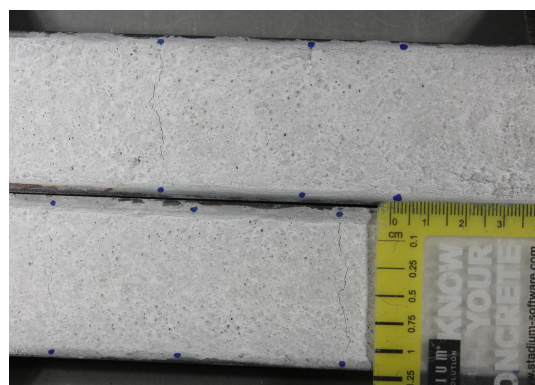


FIGURE 175 – Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 (après 60j)



FIGURE 176 – Evolution de la fissuration du mélange RS1+ MgO (après 60j)

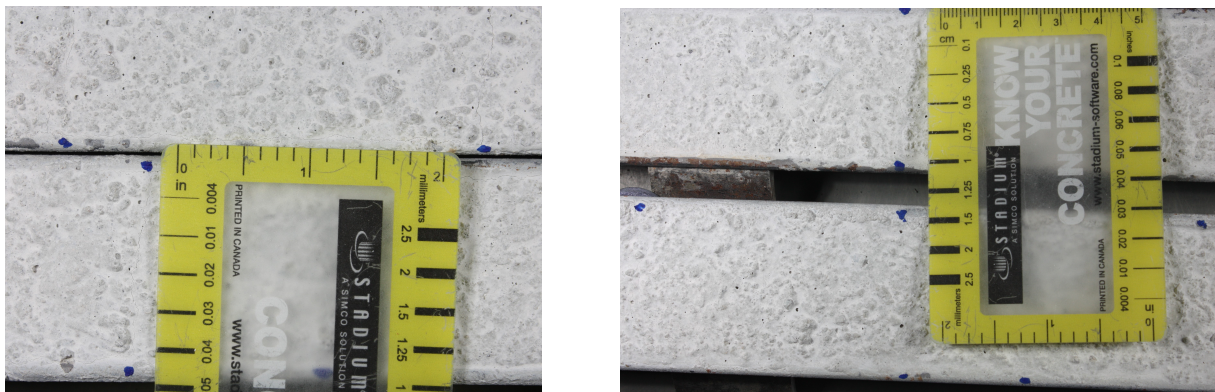


FIGURE 177 – Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 + MgO (après 60j)

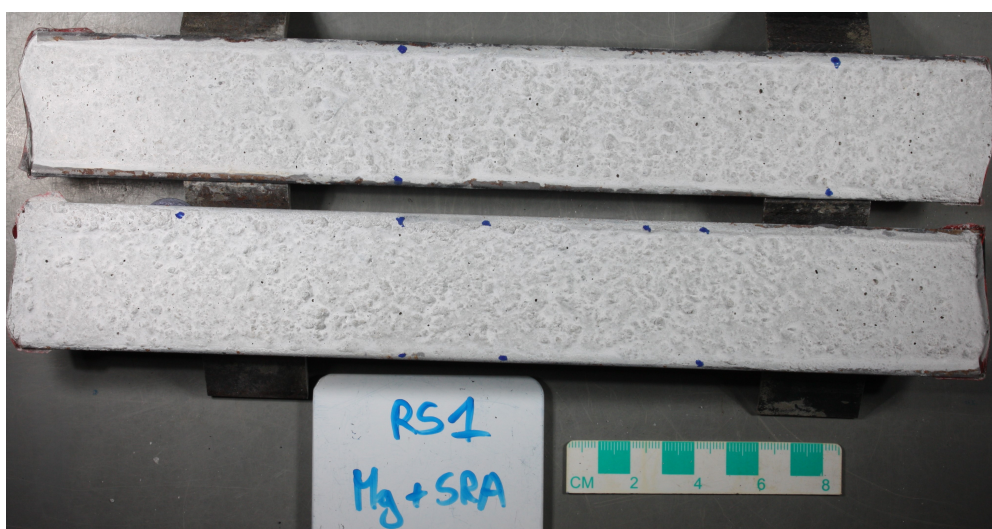


FIGURE 178 – Evolution de la fissuration du mélange RS1 MgO+SRA (après 60j)

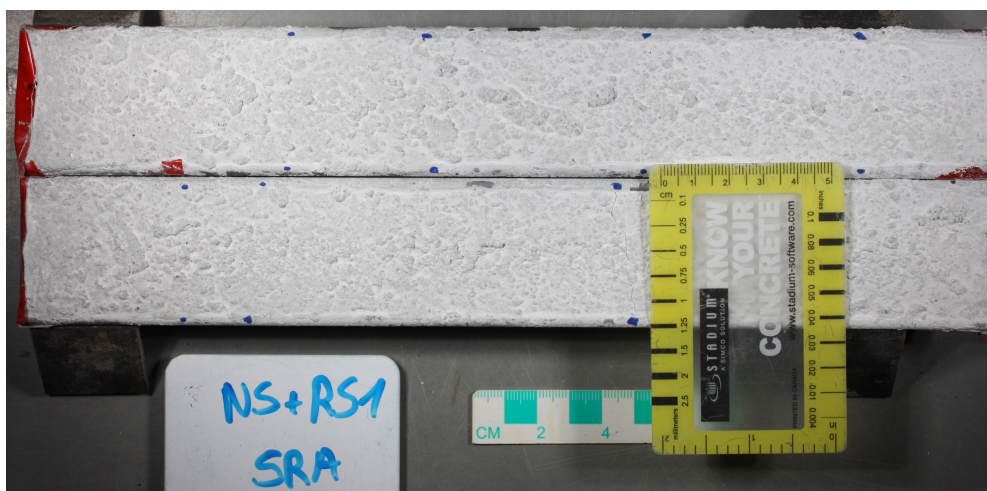


FIGURE 179 – Evolution de la fissuration du mélange RS1+SRA (après 60j) ¹

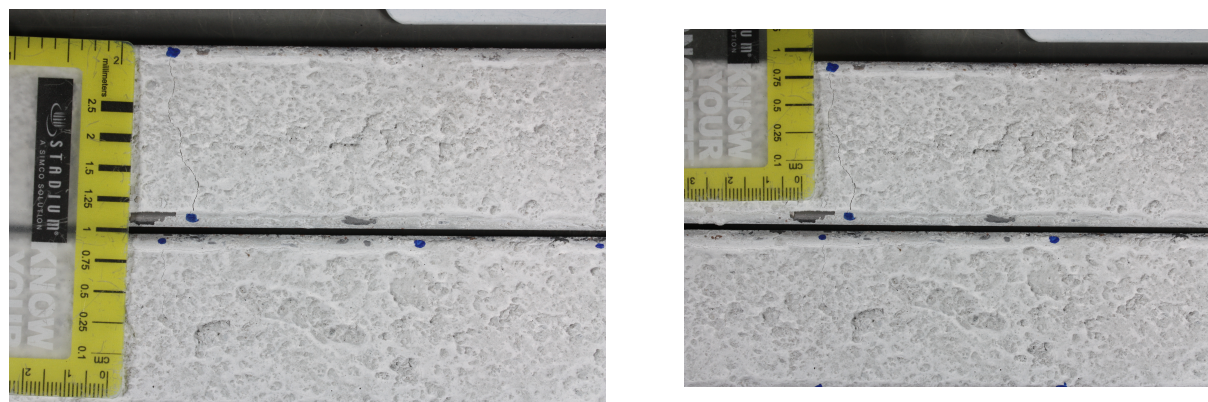


FIGURE 180 – Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 + SRA (après 60j)



FIGURE 181 – Evolution de la fissuration du mélange RS1 G+SRA (après 60j)

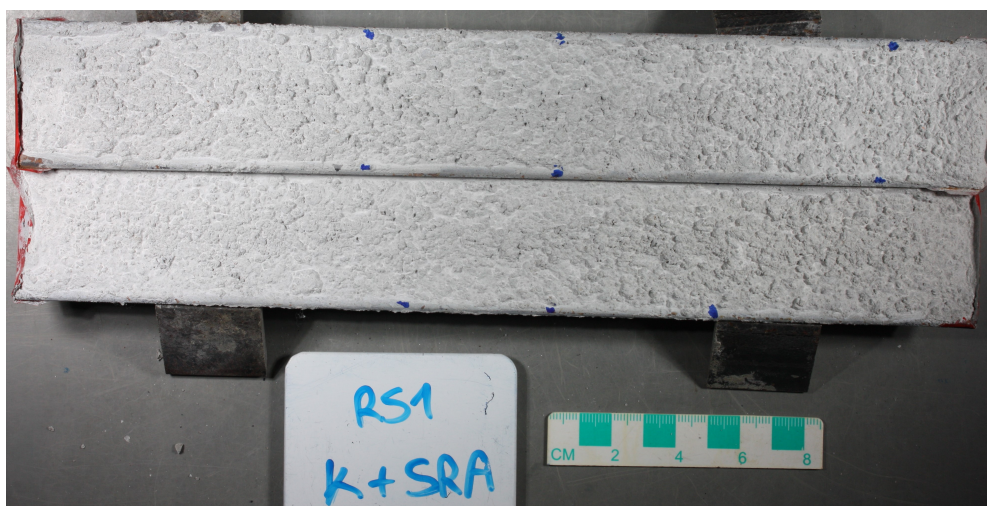


FIGURE 182 – Evolution de la fissuration du mélange RS1 K+SRA (après 60j)



FIGURE 183 – Fissuration observée à l'oeil nu pour le mélange RS1 K+SRA (après 60j)

A.10.3 Mélanges à base de sable recyclé belge (RS2)

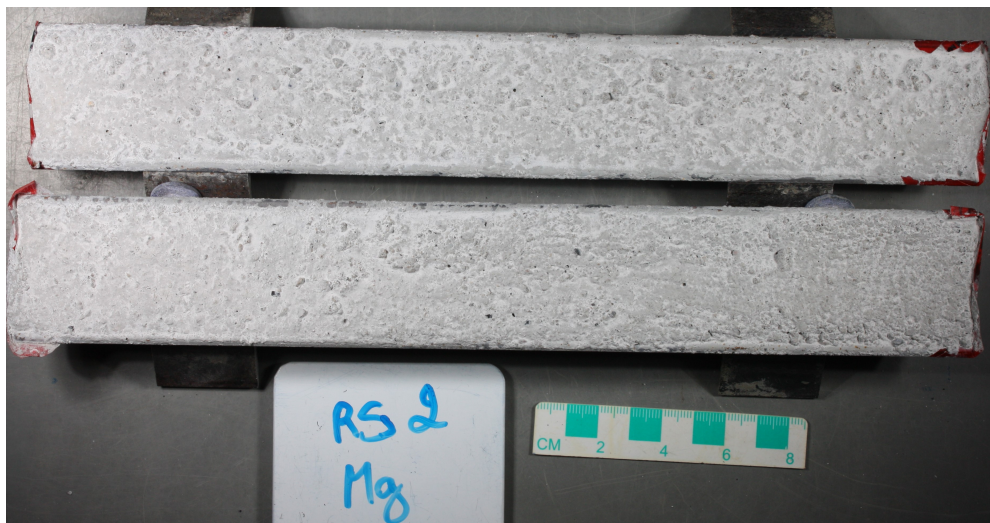


FIGURE 184 – Evolution de la fissuration du mélange RS2+ MgO (après 60j)

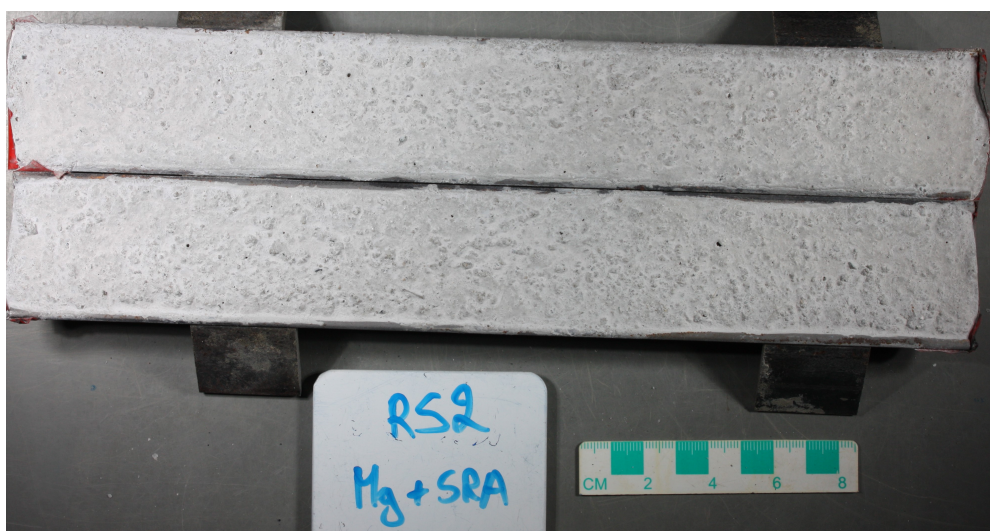


FIGURE 185 – Evolution de la fissuration du mélange RS2 MgO+SRA (après 60j)

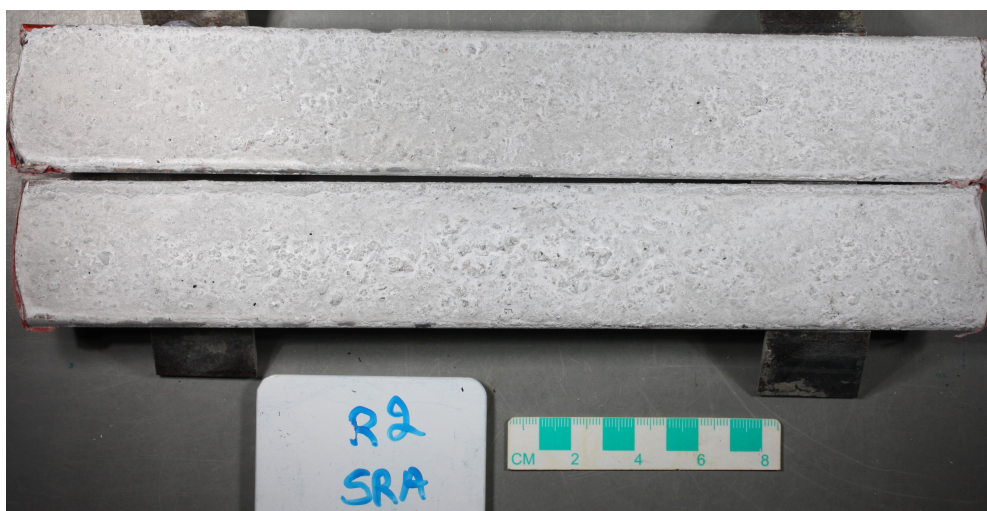


FIGURE 186 – Evolution de la fissuration du mélange RS2+SRA (après 60j)



FIGURE 187 – Evolution de la fissuration du mélange RS2 G+SRA (après 60j)

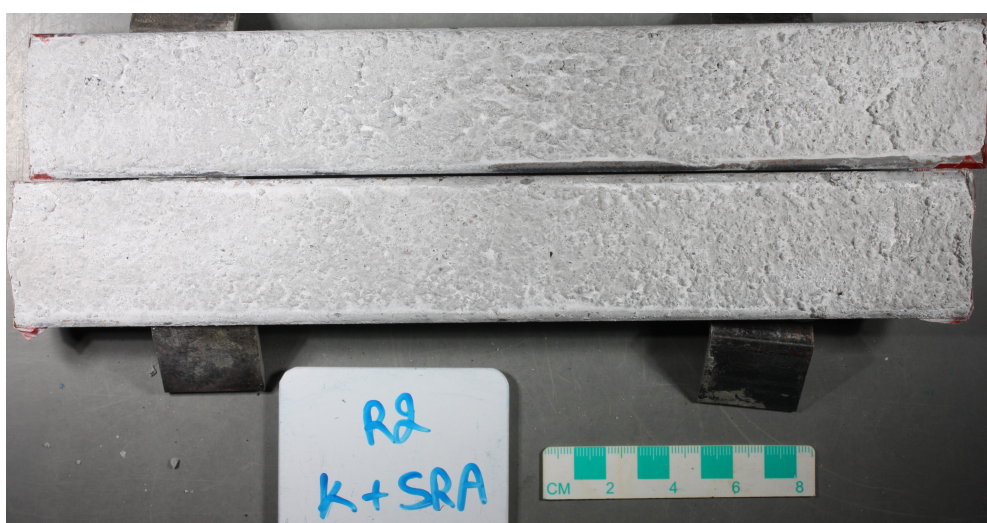


FIGURE 188 – Evolution de la fissuration du mélange RS2 K+SRA (après 60j)

A.10.4 Mélanges à base de sable naturel et de sable recyclé (50% NS - 50% RS1)

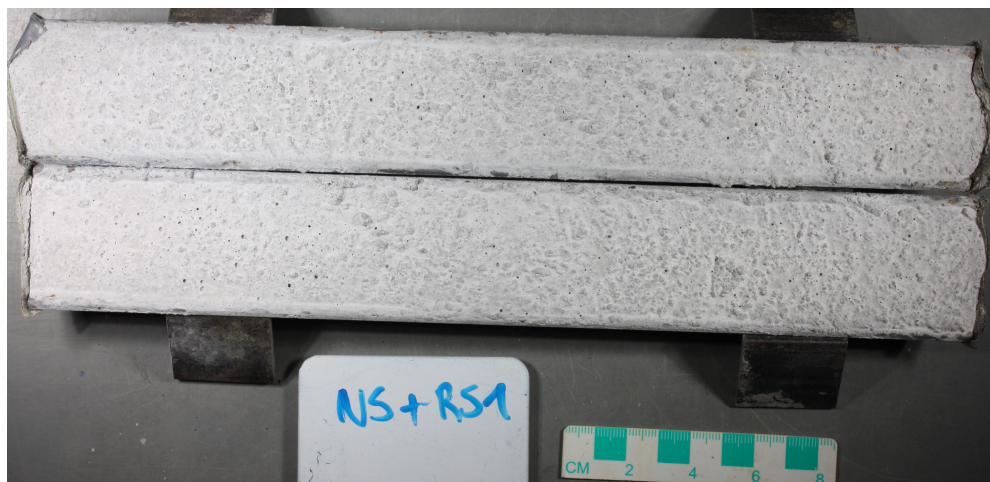


FIGURE 189 – Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 (après 60j)

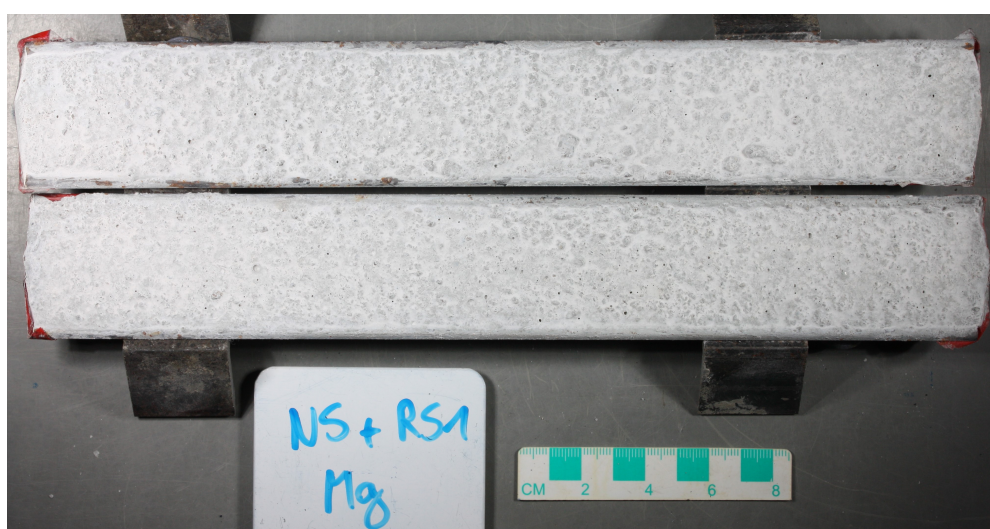


FIGURE 190 – Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 + MgO (après 60j)

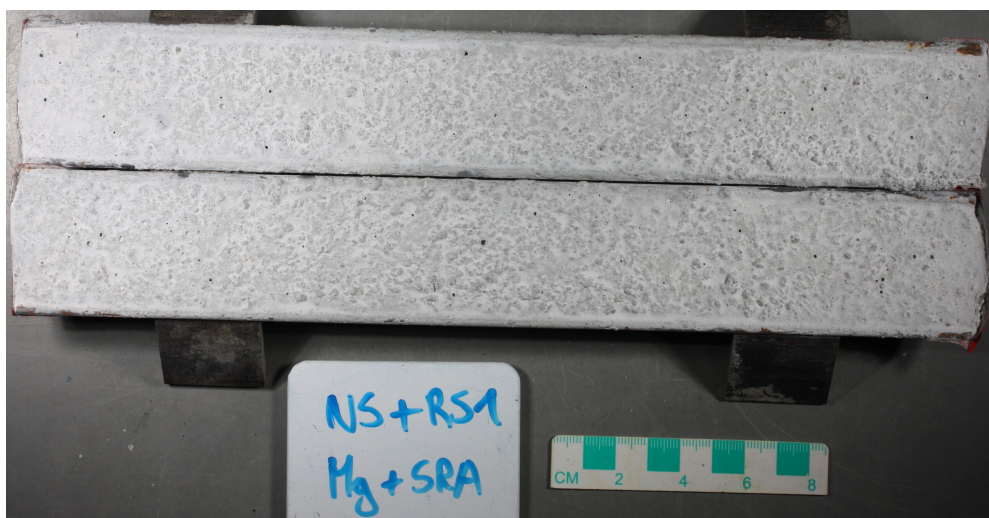


FIGURE 191 – Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 MgO+SRA (après 60j)

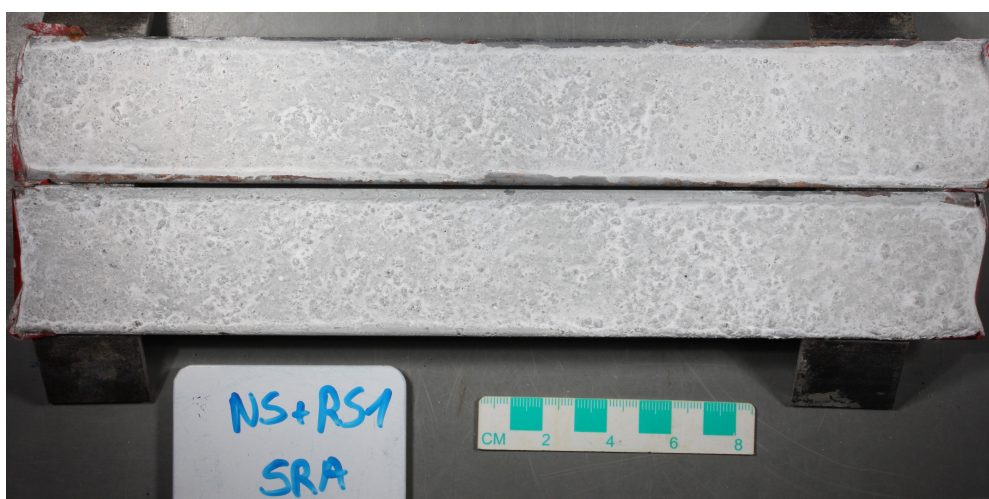


FIGURE 192 – Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 + SRA (après 60j)



FIGURE 193 – Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 G+SRA (après 60j)



FIGURE 194 – Evolution de la fissuration du mélange NS-RS1 K+SRA (après 60j)

Bibliographie

- [1] UNEP/GRID-GENEVA. *What is sand ? Result from a UNEP/GRID-Geneva expert discussion*. en. Rapp. tech. UNEP/GRID-Geneva, 2022. URL : <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:160291>.
- [2] Julien HUBERT, Frédéric MICHEL et Luc COURARD. « WP T1 - Activity 1 - Material flow / Territorial analysis, Sand resources inNWE ». In : (2024). URL : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/320465/1/WP%20T1.1%20-%20Sand%20resources%20in%20NWE.pdf>.
- [3] Bendixen METTE. « Time is running out for sand ». In : (2019). URL : https://www.researchgate.net/publication/334189490_Time_is_running_out_for_sand.
- [4] UNEP. « Sand and Sustainability : 10 strategic recommendations to avert a crisis ». In : (2022). URL : <https://www.unep.org/resources/report/sand-and-sustainability-10-strategic-recommendations-avert-crisis>.
- [5] RNRF. « The world is facing a global sand crisis ». In : (2017). URL : <https://rnrf.org/the-world-is-facing-a-global-sand-crises/>.
- [6] Rajat ZOPE. *Construction Aggregates Market Size & Trends 2033*. URL : <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/construction-aggregates-market.asp>.
- [7] Jouni KORHONEN, Antero HONKASALO et Jyri SEPPÄLÄ. « Circular Economy : The Concept and its Limitations ». In : (jan. 2018). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800916300325>.
- [8] GOHY DIDIER. « Plan Wallon des Déchets ». In : (2018). URL : <https://environnement.wallonie.be/files/eDocs%20Environnement/legis/dechets/planwallondechets.pdf>.
- [9] Gouv. QUÉBEC. *Construction and demolition waste Report*. 2021. URL : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2021-crd-english.pdf>.
- [10] CEREMA GROUP. « Vers des sables alternatifs issus de la déconstruction des bâtiments : le projet de recherche SAND ». In : (2021). URL : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/sables-alternatifs-issus-deconstruction-batiments-projet>.

- [11] Ontario Ministry of NATURAL RESOURCES. « State of the Aggregate Resource in Ontario Study ». In : (2010). URL : <https://files.ontario.ca/environment-and-energy/aggregates/aggregate-resource-in-ontario-study/286996.pdf>.
- [12] *NBN EN 998-2 :2016, Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie – Partie 2 : Mortiers de montage des éléments de maçonnerie*. 2016.
- [13] Luc COURARD. « Constructions : Matériaux et Pathologies ». In : (2026).
- [14] *EN 998-1 : Specification for mortar for masonry — Rendering and plastering mortar*. European Committee for Standardization, 2016.
- [15] *EN 1504-3 : Products and systems for the protection and repair of concrete structures*. European Committee for Standardization, 2005.
- [16] Zhi-hai He PEI-MIN ZHAN. « Application of shrinkage reducing admixture in concrete : A review ». In : (2019). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818332070?via%3Dihub>.
- [17] METTLEN THIBAUT. « Développement de mortiers à retrait compensé avec des sables de recyclage ». In : (2025). URL : https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/24543/9/R%C3%A9sum%C3%A9_TFE_ThibaultMETTLEN.pdf.
- [18] Samy-Joseph ESSALIK. « Nouveaux essais de caractérisation du comportement volumétrique des bétons à retrait compensé ». In : (2020). URL : <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/d25c4229-d521-45db-8197-ad36e76dc24c>.
- [19] *EN 998-2 : Specification for mortar for masonry — Masonry mortar*. European Committee for Standardization, 2016.
- [20] Regis WASKOW, Vinícius GONÇALVES MACIEL, Rejane TUBINO et Ana PASSUELLO. « Environmental performance of construction and demolition waste management strategies for valorization of recycled coarse aggregate ». In : (oct. 2021). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721011567>.
- [21] Matthieu COMBE. *La pénurie de sable, c'est pour bientôt ! (Infographie)*. Nov. 2018. URL : <https://www.natura-sciences.com/comprendre/penurie-sable.html>.
- [22] Julien BUEB. *Mondialisation et ressources. Géopolitique du sable : rareté, environnement et enjeux*. 2019. URL : <https://www.diploweb.com/Geopolitique-du-sable-Entre-rarete-consequences-environnementales-et-enjeux-diplomatiques.html>.

- [23] Gouv. QUÉBEC. *Lignes directrices relatives à la valorisation de résidus de béton, de brique d'enrobé bitumineux, du secteur de la pierre de taille et de la pierre concassée résiduelle*. 2026. URL : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/lignesdirectrices/beton-brique-asphalte.htm>.
- [24] UNEP. « Sand and Sustainability : Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources ». In : (2019). URL : <https://wedocs.unep.org/items/ffadb116-25c7-4ec1-9a13-96adbcf998c4>.
- [25] Aurora TORRES, Mark U. SIMONI, Jakob K. KEIDING, Daniel B. MÜLLER, Sophus O.S.E. ZU ERMGASSEN, Jianguo LIU, Jochen A.G. JAEGER, Marten WINTER et Eric F. LAMBIN. « Sustainability of the global sand system in the Anthropocene ». In : (mai 2021). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S259033222100230X>.
- [26] Arnold TUKKER, Paul BEHRENS, Sebastiaan DEETMAN, Mingming HU, Elizabeth Migoni ALEJANDRE, Marc VAN DER MEIDE, Xiaoyang ZHONG et Chunbo ZHANG. « Circular construction : Six key recommendations ». en. In : (nov. 2023). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590332223004967>.
- [27] Mette BENDIXEN, Lars L. IVERSEN, Jim BEST, Daniel M. FRANKS, Christopher R. HACKNEY, Edgardo M. LATRUBESSE et Lucy S. TUSTING. « Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals : Conflicts, synergies, and pathways forward ». In : (août 2021). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590332221004097>.
- [28] Regis MASSANT. « Sand and gravel extraction in the Belgian part of the North Sea ». In : (2020). URL : <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/396051.pdf>.
- [29] SMA BTP. « L'utilisation de granulats recyclés dans les travaux publics ». In : (2025). URL : <https://www.smabtp.fr/sma/assurance/infos-assurance/pathologie-et-prevention-batiment-et-tp/utilisation-granulats-recycles-travaux-publics>.
- [30] Maxime MORENCY. « Cracking sensitivity of cementitious repair materials : assessments and development of test methods ». In : (2013).
- [31] Benoît BISSONNETTE. « Chapitre 9 : Dosage des bétons conventionnels - Dosage et contrôle des mélanges de béton ». In : ().
- [32] Luc COURARD. « Matériaux de construction - Composition des bétons ». In : (2021-2022).

- [33] *ASTM C150-07 – Standard Specification for Portland Cement*. 2012.
- [34] *CSA A3000-18 – Cementitious Materials Compendium*. 2018.
- [35] *ASTM C109/C109M-20 – Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens*. 2020.
- [36] *ASTM C157/C157M-17 – Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. 2024.
- [37] *ASTM C469/C469M – Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression*. 2022.
- [38] *ASTM C642-21 – Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. 2021.
- [39] *ASTM C39-C39M – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 1999.
- [40] *ASTM C1437-20 – Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. 2020.
- [41] *ASTM C230/C230M-20 – Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. 2021.
- [42] *ASTM C496/C496M-17 – Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2017.
- [43] *CSA A23.1 :F19/CSA A23.2 :F19 – Béton : constituants et exécution des travaux / Procédures d’essai et pratiques normalisées pour le béton*. 2019.
- [44] *NBN EN 197-1, Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*. 2011.
- [45] *NBN EN 1097-6 :2022, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : Détermination de la masse volumique et du coefficient d’absorption d’eau*. 2022.
- [46] *NBN B 15-001 :2024, Béton – Spécifications, performances, production et conformité – Complément national à la NBN EN 206 :2013+A2 :2021*. 2024.
- [47] *NBN EN 1504-3 :2006, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : Réparation structurale et réparation non structurale*. 2006.