

Étude de l'interaction entre superplastifiant polycarboxylate et agent expansif de type CSA dans les mortiers à base de sable recyclé (en ce compris une introduction à la méthodologie de la recherche)

Auteur : Millard, Axel

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/2268.2/26191>

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
LAVAL

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des Sciences Appliquées

**ÉTUDE DE L'INTERACTION ENTRE
SUPERPLASTIFIANT POLYCARBOXYLATE ET
AGENT EXPANSIF DE TYPE CSA DANS LES
MORTIERS À BASE DE SABLE RECYCLÉ**

Travail de fin d'étude réalisé par

Axel Millard

en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil des constructions

Promoteur :

Luc Courard (ULiège)

Co-Promoteur :

Benoit Bissonnette (ULaval)

Membres du jury :

Arthur Fanara (ULiège)

Bertrand François (ULiège)

Année académique
2025 – 2026

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier tout particulièrement le Professeur Luc Courard de l'Université de Liège, qui m'a proposé ce sujet et m'a offert l'opportunité exceptionnelle de le réaliser à l'Université Laval au Québec. Son encadrement bienveillant, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet m'ont profondément aidé et guidé.

J'adresse également ma sincère gratitude au Professeur Benoît Bissonnette de l'Université Laval à Québec pour son accueil chaleureux, son soutien scientifique constant, sa grande disponibilité et ses orientations qui ont contribué à la qualité de ce travail et ont rendu cette expérience non seulement réalisable, mais véritablement inoubliable.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury, le Professeur Bertrand François et le Docteur Arthur Fanara de l'Université de Liège, pour l'attention portée à la lecture et à l'évaluation de ce travail.

Je souhaite remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide au quotidien lors de la réalisation expérimentale de ce projet. En particulier, Yasmine Barzaq pour sa collaboration tout au long des parties communes à nos deux projets, Andreia De Almeida Rodrigues, dont le soutien lors de la confection de l'ensemble des mélanges a été très précieux, ainsi que Rodolfo Castillo Araiza, pour ses conseils éclairés et son accompagnement tout au long de mes travaux et réflexions. Ma reconnaissance s'étend également à l'ensemble des techniciens du laboratoire CRIB à Québec, dont le savoir-faire et l'appui technique ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

À mes camarades de promotion, je témoigne toute mon amitié pour les moments de partage, d'entraide et de soutien mutuel qui ont jalonné ces années d'études.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Merci à ma maman pour m'avoir encouragé et soutenu sans relâche. Un immense merci à ma blonde, Gaëlle, pour sa présence constante, son soutien sans faille au fil des années, et sa manière de toujours me tirer vers le haut et tout particulièrement pour ses relectures attentives de ce travail, alors même que le sujet était, avouons-le, assez éloigné de ses centres d'intérêt. Merci enfin à tous mes amis et aux belles rencontres faites à l'Université et à Liège, qui ont contribué à faire de ces années une expérience humaine et intellectuelle inoubliable.

Résumé

Face à la raréfaction progressive des ressources en sable naturel et aux impératifs croissants d'économie circulaire, la valorisation des sables de recyclage constitue une voie prometteuse pour le secteur de la construction. Toutefois, ces granulats présentent des caractéristiques spécifiques (forte absorption, porosité élevée, pâte de ciment résiduelle) qui induisent un retrait important et une demande en eau accrue, rendant leur intégration dans des mortiers techniquement délicate.

Ce projet, mené en coopération entre l'Université de Liège et l'Université Laval de Québec, étudie l'interaction entre les superplastifiants de type polycarboxylate (PC) et les agents expansifs de type CSA (sulfoaluminate de calcium, type K) dans des mortiers à sables recyclés, en vue d'une application comme mortiers de réparation à retrait compensé. Deux sables recyclés d'origines différentes : un sable canadien issu de retours et pertes de béton de l'industrie (RS1) et un sable belge issu de démolition (RS2) ont été étudiés à des taux de substitution de 50 % et 100 %, et comparés à une référence à sable naturel. Les propriétés mécaniques, dimensionnelles et hydriques des mortiers ont été caractérisées, et le comportement sous retrait restreint a été évalué via un essai du *German Angle* adapté à un profilé en C.

Comme attendu, la substitution du sable naturel par des sables recyclés entraîne une augmentation significative du retrait libre et une dégradation des propriétés mécaniques. Les mortiers à 100 % de RS1 sont les plus affectés, avec des déformations libres atteignant jusqu'à trois fois celles des mortiers de référence, tandis que les mortiers à 100 % de RS2 présentent un comportement intermédiaire entre le sable naturel et le RS1. L'agent expansif de type K permet de compenser partiellement le retrait en cure immergée, à condition que le dosage soit suffisant. L'ajout d'un superplastifiant PC améliore les résistances mécaniques en réduisant le rapport eau/liant, mais pénalise simultanément l'efficacité de l'agent expansif en diminuant la quantité d'eau disponible pour la formation d'ettringite.

L'essai du *German angle* adapté s'est révélé fonctionnel et discriminant pour évaluer le retrait restreint : la fissuration est systématiquement associée aux formulations à base de RS1 pur, tandis que l'agent de type K permet d'éviter la fissuration pour les formulations à base de RS2 et pour celles à 50 % de substitution par du RS1, confirmant ainsi son efficacité pour ces granulats. Le RS2 apparaît comme le candidat le plus compatible avec une application en réparation structurelle, associé à un agent expansif de type K et à un superplastifiant en cure immergée.

Ce travail démontre ainsi qu'il est possible d'intégrer des sables recyclés dans des mortiers de réparation performants, à condition d'adapter soigneusement la formulation au type de granulat utilisé.

Abstract

As natural sand resources continue to decline and circular economy imperatives become increasingly urgent, the valorization of recycled sands emerges as a promising path for the construction sector. However, these aggregates exhibit specific characteristics (high water absorption, elevated porosity, attached mortar) that induce significant shrinkage and increased water demand, making their integration into mortars technically challenging.

This project, carried out in cooperation between the University of Liège and Université Laval in Québec, investigates the interaction between polycarboxylate-type superplasticizers (PC) and CSA expansive agents (calcium sulfoaluminate, type K) in recycled sand mortars, with a view to their application as shrinkage-compensated repair mortars. Two recycled sands of different origins : a Canadian sand from fresh concrete returns and industrial losses (RS1) and a Belgian sand from demolition waste (RS2) were studied at substitution rates of 50 % and 100 %, and compared to a natural sand reference. The mechanical, dimensional and hydraulic properties of the mortars were characterised, and the behaviour under restrained shrinkage was assessed using a German Angle test adapted to a C-shaped steel profile.

As expected, the substitution of natural sand by recycled sands leads to a significant increase in free shrinkage and a deterioration of mechanical properties. Mortars with 100 % RS1 are the most severely affected, with free deformations reaching up to three times those of the reference mortars, while mortars with 100 % RS2 exhibit an intermediate behaviour between natural sand and RS1. The type K expansive agent partially compensates shrinkage under immersed curing, provided the dosage is sufficient. The addition of a PC superplasticizer improves mechanical strengths by reducing the water-to-binder ratio, but simultaneously penalises the effectiveness of the expansive agent by reducing the amount of water available for ettringite formation.

The adapted German Angle test proved functional and discriminating for assessing restrained shrinkage : cracking is systematically associated with mortars based on 100 % RS1, while the type K agent prevents cracking in RS2-based formulations and in those with 50 % substitution by RS1, confirming its effectiveness for these aggregates. RS2 emerges as the most suitable candidate for structural repair applications, when combined with a type K expansive agent and a superplasticizer under immersed curing.

This work thus demonstrates that it is possible to incorporate recycled sands into high-performance repair mortars, provided that the mix design is carefully adapted to the type of aggregate used.

Table des matières

Table des matières	v
Table des figures	viii
Liste des tableaux	xii
Introduction	1
Etat de l’art	4
1.1 Le sable	4
1.1.1 Le matériau	4
1.1.2 Enjeux et contexte socio-environnementaux	6
1.1.3 Économie circulaire	8
1.2 Le retrait	10
1.2.1 Facteurs influençant le retrait	12
1.2.2 Essais	13
1.3 Les mortiers	15
1.3.1 Mortier à base de sable recyclé	15
1.3.2 Mortier à retrait compensé	17
1.3.3 Mortier haute performance	20
1.3.4 Mortier de réparation	22
Méthodologie et protocoles expérimentaux	24
2.1 Préface	24
2.2 Les matériaux	25
2.2.1 Le ciment	25
2.2.2 L’agent expansif de type K	26
2.2.3 Le superplastifiant de type PC	27
2.2.4 Les sables	27
2.3 Analyse de la granulométrie	28
2.3.1 Procédure expérimentale	29
2.3.2 Caractérisation des sables	32
2.4 Evaluation de l’absorption des granulats	36
2.4.1 Principe de l’essai	37
2.4.2 Procédure expérimentale	37
2.4.3 Calcul de l’absorption	38
2.4.4 Résultats	38
2.5 Préparation des mortiers	39
2.5.1 Mélanges de calibration	39
2.5.2 Essai de consistance sur le mortier frais : <i>Slump Test</i>	40

2.5.3	Détermination du rapport eau/liant et teneur en eau	41
2.5.4	Description des mélanges finaux étudiés	42
2.6	Evaluation du retrait libre	43
2.6.1	Procédure expérimentale	43
2.6.2	Mode opératoire	44
2.6.3	Conditionnement spécifique : barrettes scellées	48
2.6.4	Calcul du retrait libre	48
2.7	Essais de caractérisation mécaniques	49
2.7.1	Essai de résistance à la compression	50
2.7.2	Essai de résistance à la traction indirecte par fendage	51
2.7.3	Evaluation du module de Young	53
2.8	Essai d'absorption	54
2.8.1	Description de l'essai	54
2.9	Essai du <i>German Angle</i>	56
2.9.1	Procédure expérimentale	57
2.9.2	Adaptation de l'essai : profilé en C	58
Analyse des résultats		60
3.1	Préface	60
3.2	Analyse du retrait : barrettes non scellées	61
3.2.1	Comportement sans adjuvant	61
3.2.2	Effet du superplastifiant	64
3.2.3	Effet de l'agent expansif de type K	68
3.2.4	Effet de l'agent expansif type K combiné au superplastifiant	73
3.3	Analyse du retrait : barrettes scellées	78
3.4	Propriétés mécaniques	81
3.4.1	Résistance à la compression à 28 jours	82
3.4.2	Résistance à la traction indirecte à 28 jours	85
3.4.3	Module d'élasticité à 28 jours	86
3.5	Absorption sur matériau durci	88
3.6	Essai du <i>German angle</i>	91
3.6.1	Analyse des résultats	93
3.6.2	Conclusion sur l'adaptation du <i>German angle</i>	94
Application des mortiers formulés : conformité normative, durabilité et perspectives environnementales		95
4.1	Positionnement par rapport aux normes	95
4.2	Durabilité potentielle des mortiers formulés	97
4.3	Perspectives d'analyse du cycle de vie	97
Conclusion et perspectives		99

Références	101
Annexe A : Données brutes expérimentales	A.1
Annexe B : Résultats détaillés tests	B.1
Annexe C : Analyse graphiques supplémentaires	C.1
C.1 Analyse du retrait	C.1
C.2 Variation de la masse	C.4
C.3 Résistance à la compression – Échantillons individuels	C.6
C.4 Résistance à la traction indirecte – Échantillons individuels	C.9
C.5 Module de Young – Courbes contrainte-déformation	C.12
C.6 Absorption et porosité sur mortiers durcis	C.18
C.7 Comparaison des méthodes de calcul du module de Young	C.19
C.8 Photos finales de l'essai du <i>German angle</i>	C.21
Annexe D : Fiches techniques des matériaux	D.1
D.1 Fiche technique agent de type K : Komponent	D.1
D.2 Fiche technique superplastifiant PC	D.3
D.3 Fiche technique du sable naturel : NS	D.5
Annexe E : Mélanges finaux	E.1
E.1 Compositions des mélanges	E.1
E.2 Mélanges finaux de référence	E.3
E.3 Planning des mélanges	E.4
Annexe F : Formations réalisées	F.1

Table des figures

1	Utilisation du sable dans la construction (Pereira et al., 2025)	6
2	Taux de croissance annuel composé (TCAC) (Oxford Economics, 2023)	7
3	Comparaison de la situation de l'exutoire du lac Poyang en 1995 (gauche) et 2013 (droite) (NASA, 2016)	7
4	Echelle de Lansink (Circular Event Toolkit, s.d.)	8
5	Economie circulaire dans la construction : cycle de vie d'un bâtiment (European Investment Bank, 2024)	8
6	Phénomène de retrait (Courard, 2024)	11
7	Essai de l'anneau ASTM C1581 (Schleibinger, 2024)	14
8	Essai <i>German angle</i> (Emmons et al., 2000)	14
9	Résistances à la compression moyennées à 28 jours (Mettlen, 2025)	16
10	Variation dimensionnelle des différents mélanges (Mettlen, 2025)	17
11	Déformation d'un béton à retrait compensé (Certain, 2012)	18
12	Comportement d'un ciment avec superplastifiant (Courard, 2024)	20
13	Superplastifiant PC mécanisme (Ma et al., 2023)	21
14	Ouvrage béton dégradé : passerelle Saucy, Liège (photo personnelle)	22
15	Fissuration du mortier de réparation (Courard, 2025)	23
16	Décollement du mortier de réparation passerelle Saucy Liège (photo personnelle)	23
17	Certificat d'analyse du ciment de type GU utilisé	25
18	Exigences mécaniques et physiques définies en valeurs caractéristiques selon la norme EN 197-1	26
19	Lavage des échantillons de sable	30
20	Ro-Tap : Système de tamisage	31
21	Pesée des fractions retenues après tamisage à sec	32
22	Courbe granulométrique du sable naturel - NS	32
23	Courbe granulométrique du sable recyclé canadien - RS1	33
24	Courbe granulométrique du sable recyclé belge - RS2	34
25	Courbes granulométriques des trois sables étudiés	35
26	Matériel nécessaire pour atteindre (à droite) et vérifier (à gauche) l'état SSS . .	37
27	Malaxeur manuel utilisé pour la préparation des mélanges	40
28	Table à secousse standardisée	41
29	Comparateur de longueur avec tige de référence	43
30	Moules pour la fabrication des éprouvettes	44
31	Goujons de jauge H-3260	45
32	Relevé régulier des informations de masse et de longueur des éprouvettes	46
33	Stockage des éprouvettes après cure humide	47
34	Conditionnement des éprouvettes scellées dans la chambre humide	48
35	Norme ASTM C490 : Longueur de référence considérée	49
36	Presse hydraulique Instron	51

37	Essai de résistance à la traction : dispositif sur la presse (INSTRON)	52
38	Dispositif module de Young (INSTRON)	53
39	Mise en ébullition des échantillons	55
40	Mesure de la masse déjàugée à l'aide d'un dispositif relié à la balance	56
41	Essai du <i>German angle</i> (Emmons et al., 2000)	57
42	Dimensions du profilé C	59
43	Vue du profilé C	59
44	Variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs et sans superplas- tifiant	63
45	Variations massiques des mélanges sans agents expansifs et sans superplastifiant	64
46	Variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs et avec superplas- tifiant	66
47	Variations massiques des mélanges sans agents expansifs et avec superplastifiant	66
48	Comparaison des variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs, avec et sans superplastifiant	67
49	Variations dimensionnelles des mélanges avec agent expansif K à 100 % du dosage recommandé, sans superplastifiant	69
50	Comparaison des variations dimensionnelles K50 vs K100	72
51	Comparaison des variations dimensionnelles K100+SP vs K50+SP	74
52	Comparaison des variations dimensionnelles K100 vs K100+SP	77
53	Variations dimensionnelles des barrettes scellées	79
54	Comparaison des variations dimensionnelles : barrettes scellées vs barrettes non scellées	80
55	Résistance à la compression des mortiers à 28 jours	82
56	Résistance au fendage des mortiers à 28 jours	85
57	Courbes contrainte-déformation pour les chargements 2 et 3 — formulation NS+K100 (exemple illustratif de la non-linéarité)	87
58	Module de Young à 28 jours — méthode ASTM C469	88
59	Relation entre absorption en immersion et densité volumique sèche des mortiers durcis à 28 jours	89
60	Photographie d'un échantillon fissuré lors de l'essai du <i>German angle</i> (RS1+SP) à 35 jours	92
61	Granulométrie RS1	A.1
62	Granulométrie RS2	A.1
63	Absorption des sables	A.1
64	Variation de longueur – Mélanges K50	C.1
65	Variation de longueur – Mélanges K50+SP	C.2
66	Variation de longueur – Mélanges K100+SP	C.2
67	Variation de longueur – Mélanges K100+SP (deuxième série)	C.3
68	Comparaison K50 vs K50+SP	C.3

69	Variation de la masse – K50	C.4
70	Variation de la masse – K50+SP	C.4
71	Variation de la masse – K100	C.5
72	Variation de la masse – K100+SP	C.5
73	Résistance à la compression – Formulations de référence	C.6
74	Résistance à la compression – Mélanges SP	C.6
75	Résistance à la compression – Mélanges K50	C.7
76	Résistance à la compression – Mélanges K50+SP	C.7
77	Résistance à la compression – Mélanges K100	C.8
78	Résistance à la compression – Mélanges K100+SP	C.8
79	Résistance à la traction indirecte – Formulations de référence	C.9
80	Résistance à la traction indirecte – Mélanges SP	C.9
81	Résistance à la traction indirecte – Mélanges K50	C.10
82	Résistance à la traction indirecte – Mélanges K50+SP	C.10
83	Résistance à la traction indirecte – Mélanges K100	C.11
84	Résistance à la traction indirecte – Mélanges K100+SP	C.11
85	Courbe contrainte-déformation – Formulation NS	C.12
86	Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+SP	C.12
87	Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K50	C.13
88	Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K50+SP	C.13
89	Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K100	C.13
90	Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K100+SP	C.14
91	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1	C.14
92	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+SP	C.14
93	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+K50	C.15
94	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+K50+SP	C.15
95	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+K100	C.15
96	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+SP	C.16
97	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K50	C.16
98	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K50+SP	C.16
99	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K100	C.17
100	Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K100+SP	C.17
101	Absorption sur mortiers durcis	C.18
102	Densité volumique sèche	C.18
103	Porosité accessible à l'eau	C.19
104	Comparaison des chargements 1 vs 2-3	C.19
105	Histogramme – Méthode de la Moyenne	C.20
106	Histogramme – Méthode de la Tangente 50	C.20
107	Histogramme – Méthode de la Tangente 90	C.21
108	<i>German angle</i> – Formulation NS	C.21

109	<i>German angle</i> – Formulation NS+SP	C.22
110	<i>German angle</i> – Formulation NS+K50	C.22
111	<i>German angle</i> – Formulation NS+K50+SP	C.22
112	<i>German angle</i> – Formulation NS+K100	C.23
113	<i>German angle</i> – Formulation NS+K100+SP	C.23
114	<i>German angle</i> – Formulation RS1	C.23
115	<i>German angle</i> – Formulation RS1+SP	C.24
116	<i>German angle</i> – Formulation RS1+K50	C.24
117	<i>German angle</i> – Formulation RS1+K50+SP	C.24
118	<i>German angle</i> – Formulation RS1+K100	C.25
119	<i>German angle</i> – Formulation RS1+K100+SP	C.25
120	<i>German angle</i> – Formulation RS2+SP	C.25
121	<i>German angle</i> – Formulation RS2+K50	C.26
122	<i>German angle</i> – Formulation RS2+K50+SP	C.26
123	<i>German angle</i> – Formulation RS2+K100	C.26
124	<i>German angle</i> – Formulation RS2+K100+SP	C.27
125	<i>German angle</i> – Formulation NS/RS1	C.27
126	<i>German angle</i> – Formulation NS/RS1+SP	C.27
127	<i>German angle</i> – Formulation NS/RS1+K50	C.28
128	<i>German angle</i> – Formulation NS/RS1+K50+SP	C.28
129	<i>German angle</i> – Formulation NS/RS1+K100	C.28
130	<i>German angle</i> – Formulation NS/RS1+K100+SP	C.29
131	Fiche technique fournie par CTS Cement Manufacturing Corp. : Komponent . .	D.3
132	Fiche technique du superplastifiant PC	D.5
133	Fiche technique fournie par Amrize : NS	D.6
134	Planning des mélanges	E.4
135	Fit test masque	F.1
136	Formation – Poussière de silice	F.1
137	Formation – Port du masque	F.2

Liste des tableaux

1	Comparaison des propriétés physiques du sable naturel et du sable recyclé (Silva et al., 2014; Yaprak et al., 2011)	5
2	Caractéristiques des fines retenues des différents sables	30
3	Distribution granulométrique du sable naturel	33
4	Distribution granulométrique du sable recyclé 1	34
5	Distribution granulométrique du sable recyclé 2	35
6	Comparaison des distributions granulométriques des sables NS, RS1 et RS2 . . .	36
7	Résultats moyens des propriétés physiques des sables	38
8	Dosages en superplastifiant par type de mélange (ml/100 kg de liant)	42
9	Paramètres suivis durant l'essai	58
10	Notation des mélanges	60
11	Rapports E/L des mélanges finaux	60
12	Absorption et teneur en eau des sables	61
13	Comparaison des variations dimensionnelles : formulations de référence sans agent expansif vs K100	69
14	Effet du mûrissement sur les variations dimensionnelles des formulations K100 : immersion (ce travail) vs chambre humide Mettlen (2025)	71
15	Comparaison des variations dimensionnelles : K50 et K100	72
16	Variations dimensionnelles des formulations K100+SP et K50+SP	74
17	Comparaison des variations dimensionnelles : K50+SP et K100+SP	75
18	Comparaison des résultats selon le moment de démoulage : NS+K100+SP et RS1+K100+SP	76
19	Retrait autogène final à 35 jours : barrettes scellées	79
20	Comparaison des résistances à la compression des mélanges sans adjuvants à 28 jours : ce travail vs Mettlen (2025)	81
21	Effet du superplastifiant sur la résistance à la compression	83
22	Effet du superplastifiant sur l'absorption et la densité volumique sèche	90
23	Résultats de l'essai du <i>German angle</i>	92
24	Classement des formulations selon la résistance à la compression à 28 jours . . .	96
25	Inventaire des données disponibles et manquantes pour une ACV des mortiers formulé	B.2
26	Mélanges avec agent expansif type K : 100% du dosage recommandé	E.1
27	Mélanges avec agent expansif type K : 50% du dosage recommandé	E.1
28	Mélanges de référence avec ajout de superplastifiant	E.2
29	Mélanges avec agent expansif type K : 100% du dosage recommandé avec ajout de superplastifiant	E.2
30	Mélanges avec agent expansif type K : 50% du dosage recommandé avec ajout de superplastifiant	E.3
31	Mélanges de référence	E.3

Introduction

Le sable naturel, deuxième ressource la plus extraite au monde après l'eau, risque une pénurie d'ici les prochaines décennies, plaçant ce travail au cœur de la transition durable. La consommation mondiale de sable naturel a triplé en 20 ans pour atteindre environ 50 milliards de tonnes par an, son extraction dépasse déjà les capacités naturelles de régénération, qui laisse entrevoir une crise sur cette ressource d'ici 2100 (UNEP, 2022). Dans certaines régions, en particulier en Asie, cette surexploitation a déjà des conséquences socio-environnementales : érosion côtière massive, disparition progressive de deltas, montée du niveau marin, conflits locaux et essor d'un marché illégal alimenté par l'extraction dans les lits de rivières et les fonds marins (Torres et al, 2025).

Le secteur de la construction est de loin le premier consommateur de sable, et sa demande continue de croître rapidement. Portée surtout par l'Asie, l'activité de construction est appelée à augmenter d'environ 42% à l'échelle mondiale à l'horizon 2030, tandis que la part de la population vivant en milieu urbain pourrait atteindre 68% d'ici 2050 (Oxford Economics, 2023). Dans ce contexte, la pression sur la production de sable naturel va s'intensifier, d'autant que l'élaboration du béton/mortier représente, au sein du secteur, l'usage dominant de cette ressource. Pour limiter cette dépendance, s'orienter vers une économie circulaire, en valorisant des sables recyclés issus des déchets de la production de bétons ou de démolition, apparaît comme une première piste crédible. Le recyclage local réduit l'empreinte de l'extraction et du transport, mais les fines recyclées peinent à trouver des débouchés : réglementations strictes, propriétés physico-mécaniques variables et absence de marchés commerciaux. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, avec pour objectif de rendre l'utilisation de sable recyclé dans les mortiers de réparations techniquement viable et compatible avec les exigences.

L'usage des sables recyclés dans les mortiers présente des défis techniques majeurs. Leur densité apparente est plus faible et leur absorption en eau jusqu'à dix fois plus élevée, en raison de la pâte de ciment durcie. Ces caractéristiques entraînent une demande en eau accrue et une porosité élevée entraînant une chute des performances mécaniques au-delà de 20-30 % de substitution. L'effet du retrait est particulièrement critique pour les mortiers à sable recyclé, avec des déformations libres jusqu'à trois fois supérieures à celles des mortiers à sable naturel (Evangelista & de Brito, 2010). Ce qui menace directement la durabilité des mortiers de réparation avec un risque de fissuration et justifie le recours à des agents compensateurs.

Pour répondre à ces défis, le travail de Th. Mettlen (ULiège-ULaval, 2025) apporte une première réponse en incorporant deux agents expansifs : le sulfoaluminate de calcium (CSA, type K) et l'oxyde de calcium (type G) dans des mortiers à sables recyclés. Le CSA offre des performances mécaniques supérieures mais nécessite une immersion prolongée en eau de chaux ; le second est indépendant du curage, tous deux respectant les seuils normatifs pour un usage courant en construction. Ce travail pose ainsi les bases de l'utilisation de ces agents pour des mortiers à sable recyclé.

Ce travail de recherche, réalisé en collaboration entre l'Université de Liège et l'Université Laval au sein du Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), poursuit les travaux initiés par Th.Mettlen en intégrant un paramètre supplémentaire. L'objectif principal est d'étudier l'influence de superplastifiants de type polycarboxylate (PC) sur des mortiers à base de sable recyclé, en présence d'agents expansifs de type CSA. Cette démarche s'explique par la demande en eau plus élevée des sables recyclés, susceptible d'augmenter le rapport eau/liant et de réduire les performances mécaniques des mortiers. L'ajout d'un superplastifiant vise donc à limiter cette demande en eau, à réduire le rapport E/L et à améliorer la compacité de la matrice. Ces constats conduisent à plusieurs questions relatives à l'influence combinée des sables recyclés, du superplastifiant et de l'agent expansif sur le comportement des mortiers étudiés :

- La substitution du sable naturel par les sables recyclés a-t-elle un effet sur le comportement des mortiers ?
- Quel est l'effet des agents expansifs CSA sur le retrait en fonction du type de mûrissement et le dosage ?
- Les superplastifiants de type polycarboxylate (PC) réduisent-ils l'efficacité des agents expansifs CSA dans les mortiers à sables recyclés ?
- L'essai *German angle* est-il pertinent pour mettre en évidence l'effet de l'agent expansif de type CSA sur le retrait restreint ?
- Les mortiers testés respectent-ils les prescriptions pour un mortier de réparation ?

Ce travail contribue ainsi à fournir des données expérimentales permettant de juger de la pertinence technique de l'utilisation combinée de sables recyclés, d'agents expansifs CSA et de superplastifiant, dans une perspective de développement de mortiers de réparation à retrait auto-compensé plus durables et respectueux de l'environnement. Il est divisé en différents chapitres.

Le chapitre 1 définit les notions théoriques et les références nécessaires à ce travail, en présentant les matériaux constitutifs des mortiers (sables naturels et recyclés, adjuvants) ainsi que le mécanisme de retrait. Enfin, ce chapitre détaille les caractéristiques et le comportement des différentes compositions de mortiers et des mortiers de réparation.

Dans le chapitre 2 sont présentés les méthodes et protocoles expérimentaux retenus. La caractérisation des matériaux et des mortiers y est détaillée, notamment la granulométrie et l'absorption d'eau des sables, la formulation des mélanges, ainsi que les essais réalisés à l'état frais et à l'état durci.

Une analyse détaillée des résultats fait l'objet du chapitre 3. Il s'intéresse d'abord au comportement des mortiers de référence et des formulations incorporant des sables recyclés, afin d'évaluer l'influence de ces derniers sur le retrait, le comportement dimensionnel et les propriétés mécaniques. Il examine ensuite l'effet de l'agent expansif de type K, ainsi que leur interaction avec le superplastifiant, pour évaluer leur efficacité à limiter les déformations tout

en considérant leur impact sur la maniabilité et les performances mécaniques des mortiers à base de sables recyclés.

Enfin, le chapitre 4 rassemble les conclusions générales de l'étude et propose une discussion des formulations les plus pertinentes au regard des exigences normatives applicables en Belgique et au Canada pour des usages en réparation. Ce chapitre aborde le positionnement des mélanges vis-à-vis des normes, ainsi que des considérations liées à leur durabilité et aux paramètres nécessaires à une première analyse de leur cycle de vie.

Etat de l'art

1.1 Le sable

1.1.1 Le matériau

Pour le grand public, le sable apparaît comme une ressource inépuisable. Il est en effet omniprésent sur la surface du globe, que ce soit sur une grande partie des plages du monde ou dans des déserts immenses comme le Sahara, qui s'étend sur environ $9 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Cain, 2010). Pourtant, tous les sables ne sont pas directement utilisables, en particulier dans le secteur de la construction, qui en est le principal consommateur.

L'aptitude d'un sable à être valorisé en béton ou en mortier dépend de plusieurs paramètres, notamment son origine géologique, sa granulométrie, la forme de ses grains, sa composition chimique et, dans une moindre mesure, sa couleur. Cette diversité se traduit par une classification très variée (Prax, 1980) : les sables calcaires, issus de la dégradation de coquilles et de coraux en zones tropicales, sont relativement friables ; les sables gypseux, riches en sulfates de calcium (CaSO_4), sont typiques de régions comme White Sands aux États-Unis ; les sables volcaniques, plus sombres, sont riches en minéraux basaltiques ; les sables granitiques contiennent principalement du quartz, du mica et des feldspaths ; enfin, les sables quartz siliceux, composés presque exclusivement de SiO_2 , sont les plus prisés industriellement et représentent la majorité des usages en construction, en verrerie et en fonderie.

Cependant, l'utilisation du sable dans la construction est encadrée par des prescriptions normatives. Pour être apte à l'emploi dans le béton ou le mortier, il doit présenter une granulométrie adaptée et une teneur en silice suffisante. Une granulométrie bien maîtrisée permet d'optimiser la compacité du squelette granulaire, d'améliorer la maniabilité du mélange frais, de limiter la porosité du matériau durci et de réduire les besoins en ciment pour un niveau de performance donné. À l'inverse, les sables désertiques sont généralement trop fins, trop homogènes et trop arrondis ; leur granulométrie défavorable et la forme de leurs grains dégradent la fluidité du mélange, augmentent le retrait et peuvent conduire à des résistances mécaniques insuffisantes (Souchu, 2012).

Cette diversité explique l'existence de critères stricts pour les sables destinés au béton et au mortier. Un sable utilisable pour le béton doit notamment respecter une courbe granulométrique continue, généralement comprise entre 0 et 4 mm, ainsi qu'une teneur en silice d'au moins 98 % (Courard, 2022). Ces exigences visent à garantir un comportement satisfaisant à l'état frais comme à l'état durci. En pratique, la faible qualité de nombreux sables naturels disponibles impose souvent de recourir à des matériaux extraits de gisements alluvionnaires ou de carrières, ce qui engendre aujourd'hui d'importantes pressions environnementales.

Au-delà de ces considérations géologiques, le sable se distingue également par son mode

de production. Dans le cas du sable naturel, il s'agit le plus souvent de matériaux extraits de rivières ou de carrières. Les grains y sont globalement arrondis, peu abrasifs et faiblement absorbants. Le sable peut toutefois aussi être produit par concassage de roches massives : les grains sont alors plus anguleux, avec des faces rugueuses qui améliorent l'adhérence à la pâte cimentaire, un atout particulièrement intéressant pour les bétons structuraux soumis à des efforts importants.

Enfin, face aux enjeux socio-environnementaux, une troisième catégorie de sable émerge : le sable recyclé, obtenu à partir des fractions fines issues du concassage de déchets de démolition, de sous-produits de l'industrie du béton ou de refus de chantier (béton non conforme), les fractions grossières étant valorisées en granulats recyclés. Sa composition dépend fortement de son origine et des procédés de récupération, ce qui entraîne une variabilité importante de ses propriétés physiques et chimiques. Cette hétérogénéité constitue l'un des principaux freins à une utilisation plus large en construction (Tam et al., 2018). En pratique, les sables recyclés présentent souvent une masse volumique plus faible, une porosité plus élevée et une absorption d'eau plus importante que les sables naturels, en raison notamment de la présence résiduelle de pâte de ciment et de mortier durcis autour des grains. Ces caractéristiques, reprises dans le Tableau 1, peuvent compliquer leur comportement mécanique et hydraulique, et rendent le matériau moins homogène que le sable naturel. Leur valorisation reste donc limitée par des exigences normatives strictes, des propriétés fluctuantes ainsi que l'absence de marché commercial pour ces fractions fines.

TABLE 1 – Comparaison des propriétés physiques du sable naturel et du sable recyclé (Silva et al., 2014 ; Yaprak et al., 2011)

Propriétés	Sable naturel	Sable recyclé
Masse volumique	2 600–2 700 kg/m ³	1 970–2 140 kg/m ³
Porosité interne	Faible	Élevée
Absorption d'eau	0,2–2 %	3–10 %
Origine des particules	Alluvionnaire uniforme	Mélange de matériaux de construction (béton, etc.)
Rapport E/L	Modéré	Fort

Néanmoins, la pression croissante sur les gisements naturels et les impacts environnementaux liés à leur extraction rendent nécessaire une meilleure intégration de ces ressources secondaires dans une logique d'économie circulaire.

1.1.2 Enjeux et contexte socio-environnementaux

L'urbanisation et la croissance économique, surtout dans les pays émergents, ont fait tripler la consommation mondiale de sable en 20 ans, atteignant 50 milliards de tonnes/an, assez pour un mur de 27 m de haut/large autour de la Terre (UNEP, 2022 ; UN News, 2022). La population urbaine est passée à 56 % en 2020 et pourrait atteindre 68 % en 2050, une demande d'urbanisation surtout en Asie et en Afrique (UNEP, 2022). En Chine, la consommation de ciment a bondi de 438 % en deux décennies (NASA, 2016). Pour le sable naturel 85 % de sa consommation est destinée à la construction, en effet, il faut par exemple 200 t de sable pour construire une maison individuelle et jusqu'à 30000 t/km d'autoroute (Roos, 2019). Comme nous pouvons le voir sur la Figure 1 la consommation de sable dans le secteur de la construction est principalement dû à la production de béton et de mortier.



FIGURE 1 – Utilisation du sable dans la construction (Pereira et al., 2025)

L'augmentation du pouvoir d'achat de la classe moyenne et la croissance démographique stimulent la consommation de sable via la hausse des constructions résidentielles et des infrastructures. Selon Oxford Economics (2023), le marché mondial de la construction passera de 10,7 billions \$US (2020) à 15,2 billions \$US (2030), soit une croissance de 42 %, principalement tirée par l'Asie (+50 %). La Figure 2 illustre le taux de croissance annuel composé (TCAC) prévu pour certains pays entre 2020 et 2030.

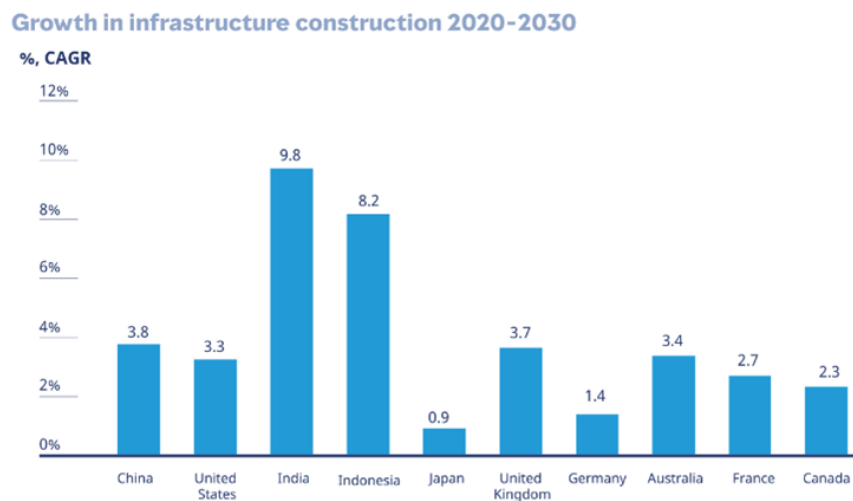


FIGURE 2 – Taux de croissance annuel composé (TCAC) (Oxford Economics, 2023)

Cette croissance pousse à la surexploitation des réserves de sables naturels, avec des impacts environnementaux majeurs. Par exemple, au lac Poyang en Chine, le dragage de 236 millions de tonnes par an (9 % de la production chinoise) en 2005 a élargi le chenal de 100 à 700 mètres comme illustré sur la Figure 3 qui compare la situation entre 1995 et 2013 (NASA, 2016).

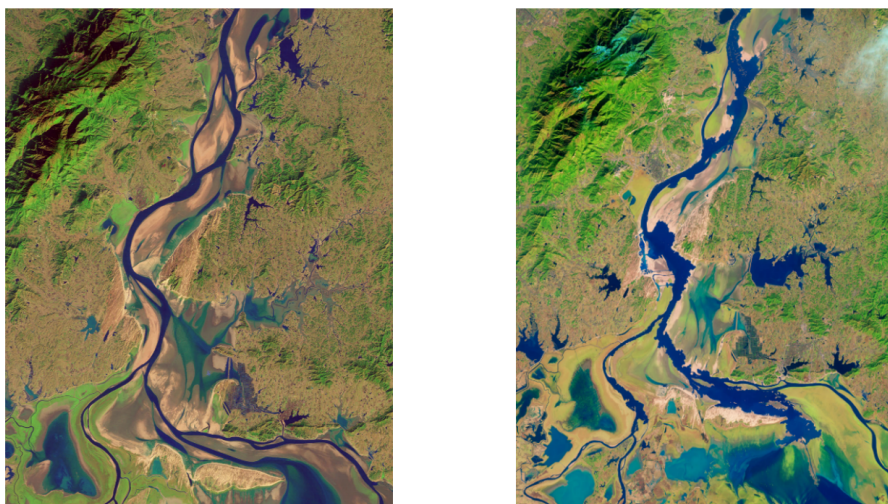


FIGURE 3 – Comparaison de la situation de l'exutoire du lac Poyang en 1995 (gauche) et 2013 (droite) (NASA, 2016)

Le Mékong au Cambodge illustre également les effets de cette pression : 50 îles ont disparu et 100 kilomètres de berges ont été érodées en seulement 15 ans. En Inde, sur la rivière Yamuna, les lits se sont affaissés de 3 à 10 mètres, ce qui a contribué à une augmentation considérable des inondations (Pearce, 2019).

Les sources terrestres de sable, qu'il s'agisse des carrières ou des lits de rivières, s'épuisent rapidement, l'extraction dépassant souvent la régénération naturelle. L'exploitation se tourne alors vers les fonds marins, aux coûts élevés et avec des impacts écosystémiques majeurs : altération des régimes d'écoulement, érosion côtière et riveraine accélérée, perte de deltas et de

biodiversité marine, menaces sur la sécurité de l'eau et de l'alimentation, ainsi que destruction des pêcheries et de l'agriculture.

Ces tensions géopolitiques et sociales, alimentées par le spectre d'une pénurie, rendent impérative l'adoption d'une économie circulaire, afin de promouvoir le sable recyclé comme alternative viable et durable au sable naturel pour les bétons et mortiers, et ainsi limiter la surexploitation des ressources.

1.1.3 Économie circulaire

L'économie circulaire rompt avec le modèle linéaire « extraire-produire-jeter » en privilégiant la réutilisation, le recyclage et le réemploi des ressources, dans le but de préserver les écosystèmes et de favoriser une meilleure équité sociale. Dans cette logique, l'échelle de Lansink classe les différentes options de gestion des déchets selon une hiérarchie allant de la prévention, car le meilleur déchet est celui qui n'est pas produit, jusqu'à la mise en décharge, en passant par le réemploi, la réparation et le recyclage (Circular Event Toolkit, s.d.). Les principes des 3R (*Réduire, Réutiliser, Recycler*) évoluent ainsi vers les 10R, comme illustré sur la Figure 4, en mettant davantage l'accent sur la responsabilité des fabricants et des consommateurs. Dans le secteur de la construction, cette approche implique une production plus intelligente des matériaux, le recours à l'*urban mining* et la déconstruction sélective afin de maximiser la valeur des ressources. Le schéma de la Figure 5 illustre le principe de l'économie circulaire appliqué à la construction ainsi que le cycle de vie d'un bâtiment.

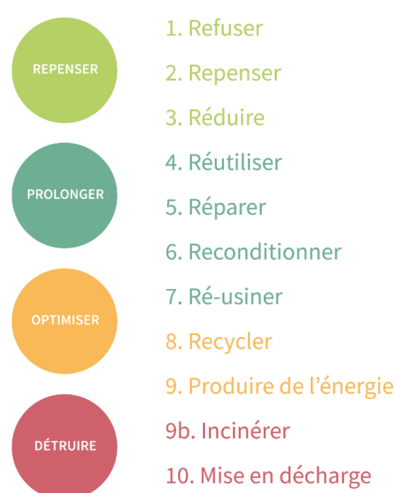


FIGURE 4 – Echelle de Lansink (Circular Event Toolkit, s.d.)

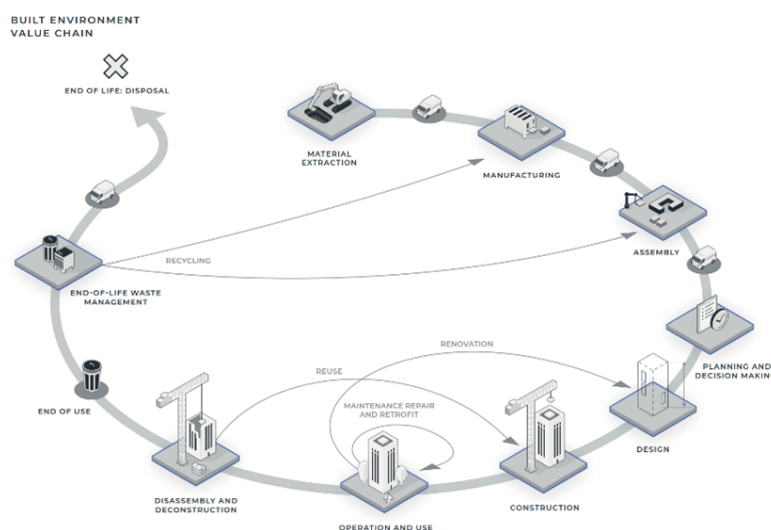


FIGURE 5 – Economie circulaire dans la construction : cycle de vie d'un bâtiment (European Investment Bank, 2024)

Le secteur de la construction représente déjà 33 % des émissions mondiales de CO₂, contre 20 % en 1995, et pourrait à lui seul épuiser le budget carbone compatible avec un réchauffement limité à +1,5 °C d'ici 2050 (Li et al., 2025). Par ailleurs, les déchets de construction et de démolition, ou CDW (*Construction and Demolition Waste*), constituent environ 30 % des déchets

mondiaux, soit plus de 2 milliards de tonnes par an (Ginga et al., 2021). En Europe, seulement 40 % de ces déchets sont réutilisés ou recyclés, le reste est principalement orienté vers le *downcycling*, c'est-à-dire un recyclage de moindre valeur où le matériau perd ses propriétés d'origine, ou finit directement en décharge. On estime d'ailleurs que 35 % des CDW sont encore enfouis dans le monde. L'Union européenne s'est fixé pour objectif d'atteindre 70 % de « récupération » des CDW d'ici 2020, en incluant le remblayage, puis 70 % de recyclage à proprement parler d'ici 2030, hors remblayage (Systems Change Lab, 2020).

Plusieurs leviers peuvent contribuer à cette transition, notamment la déconstruction sélective, qui consiste à démonter les éléments pièce par pièce plutôt qu'à recourir à une démolition massive, afin de préserver au mieux l'intégrité des matériaux. Le tri à la source sur chantier, joue également un rôle essentiel, tout comme les taxes sur l'enfouissement, les obligations d'incorporation de contenu recyclé dans les cahiers des charges publics, et plus largement les incitations économiques et réglementaires favorisant l'emploi de matériaux recyclés.

En Belgique, 62 millions de tonnes de déchets ont été produits en 2022, dont 42 % proviennent du secteur de la construction, et le pays atteint déjà un taux de recyclage des CDW supérieur à 90 %, mais essentiellement sous forme de *downcycling* (Statbel, 2024 ; Romnée et al., 2018). En Wallonie, plus de 95 % des déchets inertes sont valorisés et environ 6 millions de tonnes de granulats recyclés sont produits chaque année à partir de 5 à 7 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition, grâce à un réseau d'environ 360 centres de recyclage, ce qui fait de la région l'une des « bonnes élèves » européennes en matière de recyclage (FEREDECO, 2023).

Des outils politiques structurent cette transition, comme le Plan wallon des déchets-ressources (PWD-R) et le Plan Régional en Économie Circulaire (PREC), qui fixent des objectifs de réduction, de réemploi et de recyclage pour la construction. La norme NBN B 15-001 encadre l'utilisation des granulats recyclés en autorisant des taux de substitution de 20 à 50 % selon les classes d'exposition (Romnée & Vrijders, 2018 ; Kheffi et al., 2022). *Circular Wallonia* (2020) soutient également les projets circulaires dans les marchés publics wallons afin de favoriser l'*upcycling* plutôt que le simple remblai.

Malgré ces avancées, le *downcycling* reste dominant, notamment sous forme de granulats routiers et de remblais.

Au Québec, les résidus de construction, de rénovation et de démolition représentent 32 % des déchets, soit environ 3,5 Mt par an, dont 47 % sont encore dirigés directement vers l'enfouissement sans tri, ce qui traduit une performance relativement faible (98,5 Montréal, 2024). RECYC-QUÉBEC montre toutefois une amélioration : sur 1,219 Mt triées en 2021, 47 % ont été recyclées ou valorisées énergétiquement (RECYC-QUÉBEC, 2023).

Un comité permanent pilote actuellement neuf actions prioritaires pour la période 2024-2026, notamment l'augmentation des coûts d'enfouissement et l'ajout de barrières réglementaires afin d'ancrer davantage les CRD dans l'économie circulaire (RECYC-QUÉBEC, 2024). Par ailleurs, les normes BNQ 2560-600 et les lignes directrices du MELCC encadrent déjà la valorisation

des granulats recyclés, ce qui témoigne d'une évolution encourageante vers une gestion plus circulaire des matériaux.

Il est important de noter que les contextes québécois et wallon diffèrent significativement, et que les enjeux associés ne sont pas directement comparables. En effet, la disponibilité des ressources en sable naturel n'est pas équivalente, le Québec disposant de réserves nettement plus abondantes que la Wallonie. C'est pourquoi, en Wallonie, la pression exercée sur la ressource impose la mise en œuvre de l'ensemble des solutions précédemment évoquées.

L'*upcycling* du sable recyclé, c'est-à-dire sa valorisation dans des applications de plus haute valeur tout en conservant des propriétés proches de celles d'un sable naturel, constitue un enjeu majeur de l'économie circulaire, à l'opposé du *downcycling* souvent limité aux remblais. Si les granulats recyclés issus du béton sont déjà autorisés dans les bétons structuraux à des taux de substitution pouvant atteindre 20 à 50 % selon les cadres normatifs, le sable recyclé demeure plus difficile à valoriser en raison de sa forte variabilité, des restrictions sur les fines et de son marché encore limité. Cette difficulté s'explique en partie par sa porosité élevée, liée à la présence de pâte de ciment résiduelle, qui entraîne une absorption d'eau nettement supérieure à celle du sable naturel. Lorsqu'il est incorporé dans des mortiers ou des bétons, ce comportement complique le contrôle du rapport eau/liant effectif et peut accentuer le phénomène de retrait au passage de l'état frais à l'état durci, avec à la clé un risque plus important de fissuration et de perte de durabilité.

1.2 Le retrait

Le retrait correspond à la diminution de volume et de longueur des mortiers et des bétons au cours du temps, depuis l'état frais jusqu'au matériau durci. Bien qu'il s'agisse d'un phénomène tridimensionnel, il est en pratique considéré comme quasi isotrope pour ces matériaux (Courard, 2024). Cette contraction résulte principalement des échanges d'eau entre le matériau et son environnement, des réactions d'hydratation du ciment et des variations de température.

Pris isolément, le retrait n'est pas forcément problématique. Les difficultés apparaissent lorsqu'il est contrarié par des contraintes extérieures, comme la rigidité du support, la continuité avec des parties déjà durcies, la présence d'armatures ou encore des gradients d'humidité et de température (Neville, 1995 ; Infociments, 2021). Dans ces conditions, les déformations empêchées se traduisent par des contraintes de traction internes susceptibles de dépasser la faible résistance en traction du béton/mortier au jeune âge, conduisant ainsi à l'apparition de fissures. Le retrait constitue donc un mécanisme central pour comprendre les pathologies de fissuration précoce et différée des structures.

Dans la pratique, on distingue plusieurs formes de retrait selon le moment où elles apparaissent et selon le mécanisme dominant : évaporation d'eau, autodesiccation interne, effets thermiques ou réactions chimiques spécifiques. Les principaux types de retrait affectant les mortiers et les bétons sont présentés à la Figure 6 et font l'objet d'une description détaillée

ci-après :

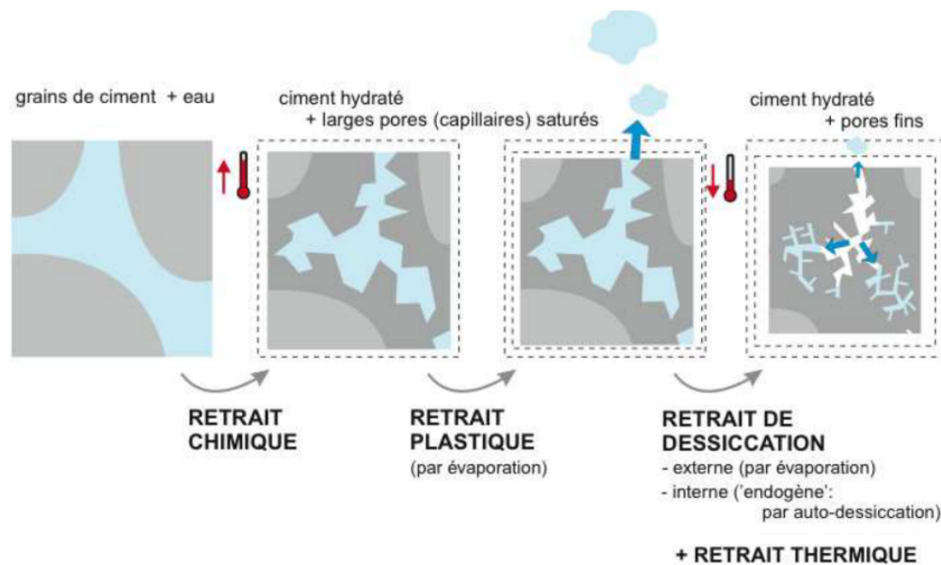


FIGURE 6 – Phénomène de retrait (Courard, 2024)

- **Le retrait plastique** survient avant et pendant la prise du mortier lorsque l'évaporation en surface devient trop rapide et dépasse le ressuage, provoquant une contraction de la croûte superficielle et l'apparition de fissures précoces, en particulier pour des pièces de faible épaisseur exposées à des conditions climatiques sévères. Ce phénomène est critique pour les ouvrages à grande surface exposée, tels que les dalles, radiers ou chapes. À formulation donnée, un excès d'eau de gâchage et un rapport eau/ciment élevé l'accroît également. La prévention repose sur la limitation de l'évaporation et l'optimisation de la composition (Infociments, 2021).
- **Le retrait chimique**, également appelé contraction de Le Chatelier, correspond à la diminution de volume intrinsèque qui accompagne l'hydratation du ciment. En effet, les produits d'hydratation occupent un volume inférieur à celui du mélange initial composé de ciment et d'eau, ce qui crée une contraction interne du système (Taylor, 1997). Ce phénomène n'est pas mesuré directement, mais il contribue au retrait endogène, en particulier lorsque le rapport E/C est faible. Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, les pores de la pâte se vident partiellement, la pression capillaire augmente et la microstructure se contracte (Taylor, 1997).
- **Le retrait endogène** (ou autodesiccation) est la contraction résultant de la baisse d'humidité relative interne liée à la consommation d'eau par l'hydratation du ciment, même lorsqu'un système de cure fermée protège l'élément contre les échanges d'eau avec l'extérieur. Ce phénomène devient notable dans les formulations à faible rapport eau/ciment (E/C) et à forte teneur en fines, pour lesquelles l'eau disponible est à peine suffisante, voire insuffisante, pour assurer une hydratation complète. Dans ces matériaux, le retrait endogène peut devenir prépondérant par rapport au retrait de séchage (Kou et al. 2021).
- **Le retrait de dessiccation** (ou retrait de séchage) provient de l'évaporation progressive

de l'eau libre des pores du matériau durci. La surface exposée à l'air sèche en premier, tandis que le cœur reste plus humide, ce qui engendre des gradients d'humidité et de déformation dans l'épaisseur de l'élément. Au fur et à mesure que l'eau migre vers la surface et s'évapore, la microstructure se resserre, entraînant une contraction globale. L'ampleur de ce retrait dépend principalement de la porosité du matériau, du rapport surface/volume de l'élément, des conditions climatiques (humidité relative, température) et de la durée de séchage (Kou et al. 2021).

- **Le retrait thermique** : résulte de la réaction exothermique issue de l'hydratation du ciment, qui provoque d'abord une montée en température et une dilatation, suivie d'un refroidissement et d'une contraction, en particulier dans les éléments massifs. Lorsque la pièce est libre de se déformer, ce retrait pose peu de problèmes ; en revanche, sous contrainte (appuis rigides, gradients entre noyau et parement), il induit des tractions et des fissures précoces. Typique des bétons de masse et des radiers épais, ce phénomène impose une gestion thermique rigoureuse (Briffaut, 2010).
- **Le retrait de carbonatation** est lié à la réaction du dioxyde de carbone avec la portlandite présente dans la pâte de ciment. Cette réaction conduit à la formation de carbonate de calcium, qui s'accompagne d'une légère diminution de volume et peut ainsi provoquer une contraction locale du matériau. En pratique, ce phénomène reste généralement limité par rapport au retrait de dessiccation ou au retrait endogène, et il se développe surtout à plus long terme, lorsque le CO_2 a eu le temps de diffuser dans la matrice cimentaire (Aitcin et al., 1998).

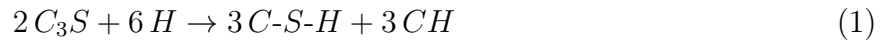
Au final, le retrait total observable sur un mortier ou un béton au cours du temps résulte de la superposition des différentes composantes décrites ci-dessus. Le retrait plastique apparaît très tôt, avant ou pendant la prise, et affecte surtout la surface. Le retrait chimique et le retrait endogène se développent dans la masse du matériau, en lien avec l'hydratation du ciment. Le retrait de dessiccation intervient progressivement, au fur et à mesure des échanges d'eau avec l'environnement, tandis que le retrait thermique s'ajoute à ces phénomènes, en particulier dans les éléments massifs.

Dans ce travail, il sera possible d'étudier le retrait endogène à l'aide d'éprouvettes scellées ainsi que le retrait de séchage.

1.2.1 Facteurs influençant le retrait

Comme nous l'avons vu, le retrait est directement lié à l'hydratation du ciment. Cette hydratation s'accompagne d'un dégagement de chaleur, à l'origine du retrait thermique, d'une consommation d'eau interne qui provoque le retrait endogène ou d'autodessiccation, et d'une contraction volumique des produits formés par rapport aux réactifs, à l'origine du retrait chimique (Neville, 1995 ; Taylor, 1997). L'hydratation du mortier correspond à la réaction chimique entre les phases anhydres du ciment Portland et l'eau de gâchage, qui conduit à la prise puis au durcissement progressif du matériau.

Les principales réactions concernent les silicates (Souchu, 2009) :



où C_3S (alite) et C_2S (bélite) produisent le $C-S-H$, principal produit responsable de la cohésion et de la résistance, ainsi que la portlandite CH ($Ca(OH)_2$). Les aluminates, notamment C_3A et C_4AF , participent également aux réactions d'hydratation, mais leur contribution au retrait est généralement plus limitée.

Ces réactions s'accompagnent d'une diminution du volume global de la pâte, ce qui génère des tensions internes à l'origine des différents types de retrait.

La composition des mortiers et des bétons influence fortement le retrait, à commencer par le rapport eau/liant. Un rapport élevé augmente la porosité de la pâte cimentaire et favorise ainsi le retrait de dessiccation, ainsi que le retrait plastique lorsqu'il y a un excès d'eau au jeune âge. À l'inverse, un rapport plus faible limite la porosité capillaire et améliore la compacité du matériau, mais il peut aussi accentuer le retrait endogène, en particulier lorsque l'autodessiccation devient significative (Infociments, 2021 ; Aïtcin et al., 1997). La nature des granulats intervient également : des sables recyclés, souvent plus poreux et plus absorbants en raison de la pâte de ciment résiduelle, mobilisent davantage d'eau et peuvent donc amplifier le retrait.

La géométrie joue également un rôle important. Par exemple, les éléments minces, caractérisés par un grand rapport surface/volume, sont plus sensibles au retrait de dessiccation, car ils échangent plus rapidement leur eau avec l'environnement. D'autres caractéristiques comme la rigidité du support, la présence d'armatures ou la continuité avec des zones déjà durcies empêchent certaines déformations libres et génèrent des tensions internes.

Enfin, l'environnement influence directement l'intensité des retraits : une faible humidité relative, une température élevée, le vent et l'ensoleillement accélèrent l'évaporation de l'eau et renforcent ainsi les retraits plastique et de dessiccation.

1.2.2 Essais

La caractérisation expérimentale du retrait repose sur des protocoles normalisés permettant de quantifier les déformations dans des conditions contrôlées. On distingue généralement le retrait libre, mesuré sans contrainte externe, et le retrait entravé, qui permet d'évaluer la sensibilité du matériau à la fissuration lorsqu'il est empêché de se déformer librement.

Les essais de retrait libre sont notamment couverts par l'ASTM C157/C157M. Ils consistent à mesurer la variation de longueur d'éprouvettes prismatiques conservées sous conditions contrôlées de séchage, afin d'évaluer le retrait de dessiccation. Pour le retrait endogène, des éprouvettes scellées sont utilisées afin d'empêcher les échanges d'eau avec l'environnement et de ne conserver que les déformations liées à l'hydratation interne.

Le retrait plastique, qui apparaît très tôt avant la prise, est évalué par l'ASTM C1579 sur des plaques ou des panneaux soumis à une évaporation accélérée en surface. Cet essai permet d'observer l'apparition de fissures précoces lorsque l'évaporation dépasse la remontée d'eau à la surface.

Le retrait restreint peut être étudié à l'aide de l'ASTM C1581 (illustré à la Figure 7), appelé aussi essai de l'anneau, dans lequel un mortier est moulé autour d'un anneau métallique rigide. La fissuration observée au cours du temps renseigne sur la sensibilité du matériau au retrait restreint.

L'essai *German Angle*, illustré à la Figure 8, est un essai linéaire standard créé au sein de l'Université d'Aachen qui permet de mesurer la sensibilité à la fissuration des mortiers sous retrait restreint (Morency, 2013). Le mortier est coulé dans une cornière en acier, préparé afin d'avoir une adhérence optimale, ce qui empêche le matériau de se déformer librement lors du séchage. Le retrait est bloqué par le support rigide, induisant des efforts internes de traction dans le mortier et de compression dans le substrat, avec formation de fissures dont on suit le nombre, la longueur et l'ouverture. Cet essai reproduit les conditions réelles d'une réparation en couche mince sur béton ancien adhérent.



FIGURE 7 – Essai de l'anneau ASTM C1581 (Schleibinger, 2024)

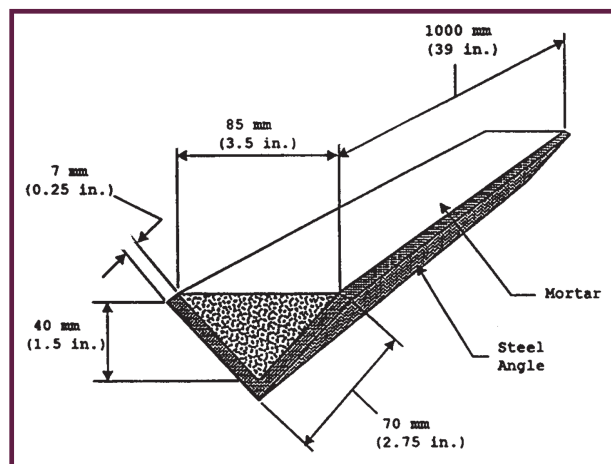


FIGURE 8 – Essai *German angle* (Emmons et al., 2000)

Dans le cadre de ce travail, les essais de retrait libre sur barrettes scellées et non scellées seront réalisés, ainsi qu'un essai de *German angle* modifié. Différents types et compositions de mortiers seront étudiés afin de comparer leur comportement vis-à-vis du retrait et de la fissuration. La composition des mortiers influence en effet de manière significative leur comportement global, notamment lorsqu'on y incorpore des sables recyclés, des agents expansifs, des mortiers de réparation ou encore des mortiers à haute performance.

1.3 Les mortiers

Un mortier est un matériau composite constitué de liant, de sable fin, d'eau et éventuellement d'adjuvants, dosé pour une granulométrie plus fine que celle du béton et sans gros granulats. Contrairement au béton, conçu pour la structure portante (poutres, dalles, poteaux), le mortier est plutôt utilisé pour la maçonnerie, l'enduit, le scellement, le jointoiement ou encore les réparations, tout en assurant liaison et transmission des efforts.

1.3.1 Mortier à base de sable recyclé

Comme mentionné dans les sections précédentes, les mortiers à base de sable recyclé constituent une voie intéressante dans une logique d'économie circulaire, mais leur emploi s'accompagne d'enjeux techniques. Le sable recyclé se caractérise notamment par une masse volumique plus faible et une absorption d'eau nettement supérieure à celle du sable naturel, ce qui perturbe l'ajustement du rapport eau/liant et influence directement la formulation des mortiers qui en sont issus.

Au niveau des performances mécaniques, des études montrent qu'un taux de substitution de sable naturel par du sable recyclé allant jusqu'à environ 20 % ne génère pas de baisse significative des résistances en compression, à condition de maintenir un rapport eau/liant cohérent (Etxeberria et al., 2007). Au-delà de ce seuil, une diminution progressive des résistances est observée, qui s'explique en grande partie par la porosité plus élevée des sables recyclés (Evangelista & de Brito, 2007) et par la présence de pâte de ciment résiduelle adhérente aux grains, qui fragilise la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le granulat et la nouvelle matrice cimentaire (Nedjar, 2018). Cette pâte résiduelle, plus poreuse et moins résistante que le granulat d'origine, constitue un point faible mécanique qui s'accroît avec l'augmentation du taux de substitution (Corinaldesi & Moriconi, 2009). La Figure 9 présente les résultats de résistance en compression à 28 jours obtenus par Mettlen (2025). On y distingue le sable naturel (NS), le mélange contenant 50 % de sable recyclé (NS + RS) ainsi que les formulations avec 100 % de sable recyclé (RS). Deux sables recyclés de nature différente ont été étudiés, RS1 et RS2, ce dernier présentant une absorption et une porosité intermédiaires entre celles du NS et du RS1. Les résultats montrent une diminution marquée de la résistance mécanique dès l'incorporation de 50 % de sable recyclé, avec une baisse comprise entre $-6,4\%$ et $-14,3\%$ selon la nature du sable utilisé, puis une réduction plus prononcée encore à 100 %, allant de $-23,7\%$ jusqu'à $-42,5\%$.

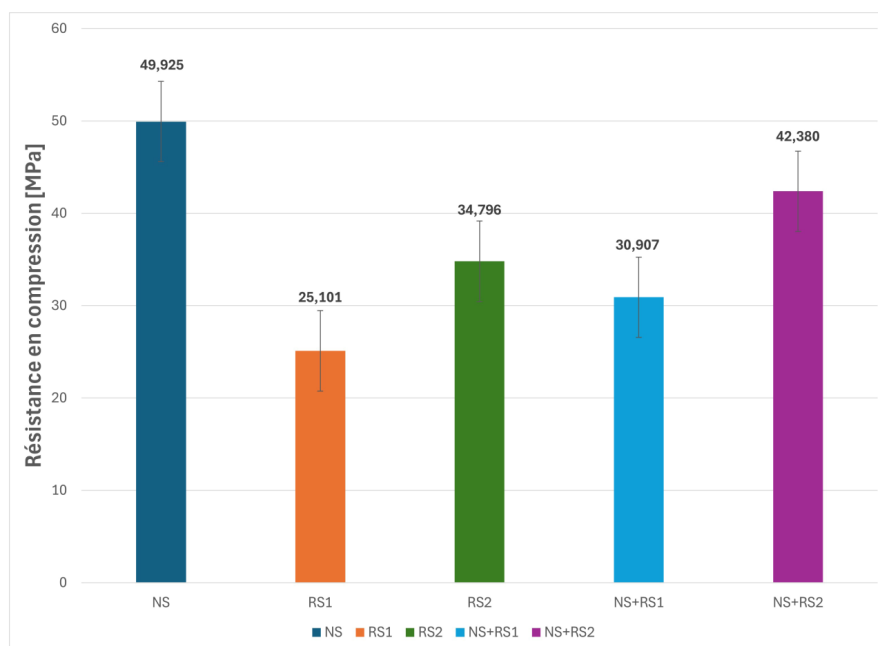


FIGURE 9 – Résistances à la compression moyennées à 28 jours (Mettlen, 2025)

En ce qui concerne la durabilité, pour des taux de substitution de l'ordre de 30%, les essais de carbonatation et d'absorption capillaire montrent des comportements proches de ceux d'un mortier de référence, ce qui suggère que la résistance aux agents chimiques agressifs peut rester acceptable à condition de maîtriser la porosité de la matrice (Courard & Bissonnette, 2025). Au-delà de ce seuil, la durabilité se dégrade progressivement, principalement en raison de l'augmentation de la perméabilité liée à la structure poreuse et hétérogène du sable recyclé (Evangelista & Brito, 2010).

L'un des principaux défis liés à l'utilisation de sables recyclés concerne leur influence sur le retrait des mortiers. Quel que soit le taux de substitution, le retrait de séchage des mortiers à base de sable recyclé demeure nettement supérieur à celui des mortiers de référence, en raison de leur porosité plus élevée et de leur absorption d'eau accrue. Cette amplification se traduit, comme illustrée sur la Figure 10, par des déformations libres atteignant jusqu'à $-2\,107\ \mu\text{m}/\text{m}$ à 100 % de sable recyclé RS1 et $-1\,593\ \mu\text{m}/\text{m}$ pour RS2, contre des valeurs de l'ordre de -800 à $-900\ \mu\text{m}/\text{m}$ pour le sable naturel de référence, dans des conditions de séchage à 50 % HR (Mettlen, 2025). Ces résultats correspondent à une augmentation d'environ 242 % pour RS1 et 180 % pour RS2, ce qui montre que la sensibilité à la fissuration est plus élevée lorsque le sable naturel est remplacé par du sable recyclé (Mettlen, 2025). Une solution pour contrer les effets du retrait consiste à incorporer des agents expansifs dans la formulation afin de réaliser des mortiers à retrait compensé.

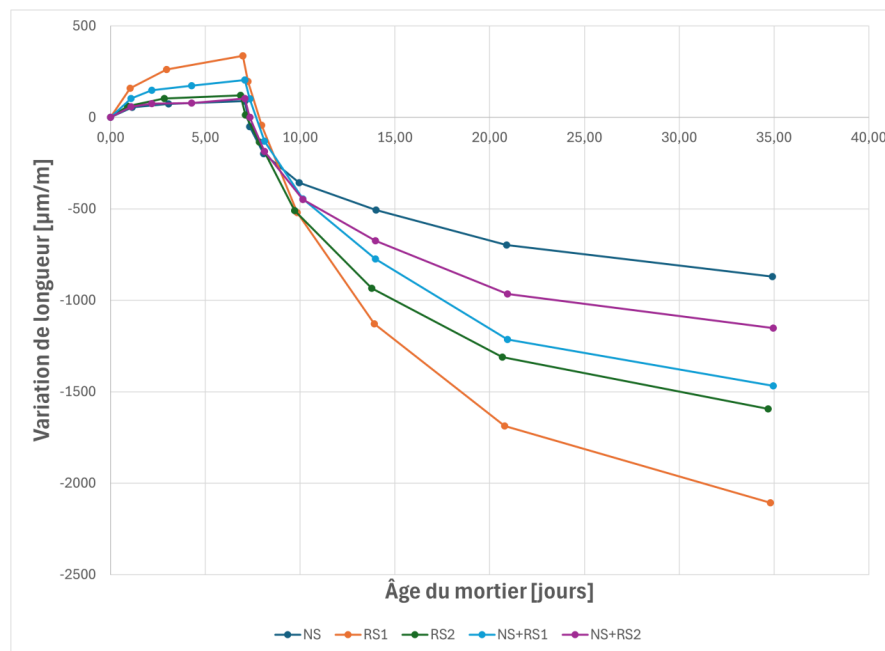


FIGURE 10 – Variation dimensionnelle des différents mélanges (Mettlen, 2025)

1.3.2 Mortier à retrait compensé

Les phénomènes de retrait ont conduit depuis longtemps au développement de solutions visant à en limiter les effets, notamment les contraintes internes et la fissuration qu'elles peuvent provoquer. Dans cette optique, les ciments expansifs ont été introduits afin de fabriquer des bétons et des mortiers à retrait compensé. Selon l'ACI (2022), le retrait compensé correspond à « une caractéristique des coulis, mortiers ou bétons fabriqués avec un ciment expansif et dont le volume augmente après la prise, induisant s'il sont adéquatement restreints des contraintes de compression destinées à compenser approximativement les contraintes de traction induites par le retrait de séchage ». Autrement dit, ces matériaux sont conçus pour développer une expansion initiale contrôlée afin de limiter, voire d'annuler, les effets du retrait ultérieur. La Figure 11 illustre ce principe pour un béton à retrait compensé, dont le comportement est semblable à celui d'un mortier à retrait compensé.

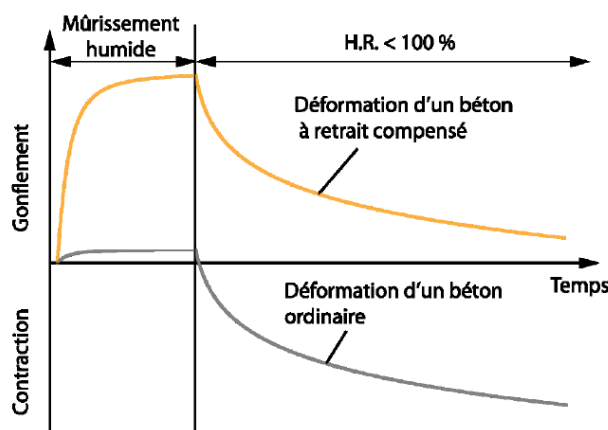


FIGURE 11 – Déformation d'un béton à retrait compensé (Certain, 2012)

Il convient tout d'abord de distinguer l'agent expansif du ciment expansif. L'agent expansif désigne les constituants responsables de l'expansion, tandis que le ciment expansif résulte du mélange d'un ciment Portland de type GU avec un agent expansif préalablement incorporé. Dans ce système, un composé chimique ajouté au ciment réagit pendant le durcissement pour produire un produit expansif, ce qui entraîne une augmentation nette du volume du matériau. L'objectif n'est pas de provoquer une expansion importante et incontrôlée, mais bien de générer une déformation positive limitée, capable de compenser le retrait de séchage et de réduire le risque de fissuration.

Le principe repose principalement sur la formation d'ettringite au jeune âge. En présence d'eau et de sulfates, les phases réactives de l'agent expansif, hydratent et forment des cristaux d'ettringite, conformément à la réaction. Cette formation s'accompagne d'une importante prise de volume, puisque l'ettringite capte un grand nombre de molécules d'eau (Shen et al. 2023). En pratique, cette expansion initiale permet de contrer la diminution de volume liée au retrait, si elle est bien maîtrisée, elle limite l'ouverture des fissures et améliore la tenue dimensionnelle du matériau. À l'inverse, une expansion insuffisante ne compense pas correctement le retrait, tandis qu'une expansion excessive peut induire des contraintes internes défavorables.

L'intérêt des mortiers à retrait compensé est particulièrement marqué pour les éléments minces, les grandes surfaces sans joints, les ouvrages post-tendus, ainsi que pour les mortiers de réparation et les formulations sensibles au retrait, notamment celles contenant des sables recyclés. Dans ce type d'application, la fissuration précoce peut compromettre l'adhérence, l'étanchéité et la durabilité du système. La compensation du retrait permet donc d'améliorer à la fois le comportement mécanique et la résistance aux agressions extérieures. En effet, le comblement partiel des vides capillaires par les produits d'hydratation contribue aussi à réduire la perméabilité, à améliorer la résistance au gel-dégel et à limiter la pénétration des agents agressifs.

Les premières recherches sur les ciments expansifs remontent aux travaux de Guttman en 1920, puis de Lossier en 1946, avant d'être formalisées sous le type K breveté par Klein en

1964, reposant sur un mélange de sulfoaluminate de calcium et d'oxyde de calcium combiné à un ciment Portland, de manière à ce que l'expansion cesse lorsque l'agent expansif est épuisé (Certain, 2012). Depuis lors, les formulations ont évolué pour devenir des poudres plus stables, plus faciles à doser et plus adaptées aux exigences du génie civil.

Les agents expansifs ont été standardisés aux États-Unis dans les années 1960 via la norme ASTM C845, qui définit leurs usages dans les matériaux cimentaires. Cette norme classe les principaux types (Certain, 2012) :

- Type K : à base de sulfoaluminate de calcium, sulfate de calcium et oxyde de calcium ;
- Type M : mélange d'aluminate de calcium et sulfate de calcium ;
- Type S : aluminate tricalcique avec sulfate de calcium.

Le guide ACI 223 complète cette liste avec :

- Type G : oxyde de calcium combiné à de la pouzzolane calcinée.

Parmi ces formulations, le type K est celui qui nous intéresse. Son constituant principal est le sulfoaluminate de calcium $C_4A_3\bar{S}$ ou $4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$, aussi appelé ye'elinite, fabriqué à partir de matières premières telles que le sulfate de calcium, le calcaire et la bauxite, ou à partir de sous-produits industriels comme les cendres volantes, les laitiers ou le phosphogypse. Une formulation classique de ce système comprend le sulfoaluminate de calcium, du gypse et de la chaux libre (CaO), qui participent à la réaction expansive.

L'équation simplifiée de formation de l'ettringite peut s'écrire comme suit :



où le produit formé correspond à l'ettringite. La cure joue un rôle déterminant dans l'efficacité de ces agents expansifs (Berger, 2011). L'expansion survient principalement au cours des premiers jours et se manifeste plus efficacement en immersion dans de l'eau saturée en chaux qu'en atmosphère humide, car la disponibilité en eau favorise la formation d'ettringite.

Les travaux de Mettlen (2025) montrent que, si l'agent de type K permet de compenser efficacement le retrait dans le cas des sables naturels, il peut s'avérer insuffisant pour neutraliser totalement celui de formulations contenant des sables recyclés.

Malgré cette limite, ces matériaux à retrait compensé améliorent la durabilité en limitant la fissuration précoce et en densifiant la microstructure par formation d'ettringite. Cela réduit la pénétration des agents agressifs, prolonge la durée de vie des ouvrages et diminue les besoins d'entretien, avec des impacts environnementaux moindres (Courard & Bissonnette, 2025).

Enfin, l'ajout d'agent expansif n'altère que modérément les résistances mécaniques, qui restent compatibles avec un usage courant. Pour pallier la perte de performance due à l'incorporation de sables recyclés dans les composition de mortier évoquée dans la section précédente, des formulations de mortiers haute performance à retrait compensé pourraient être une solution prometteuse.

1.3.3 Mortier haute performance

Un mortier haute performance se distingue généralement par une matrice plus compacte, un rapport eau/liant faible et l'emploi d'adjuvants ou d'ajouts minéraux destinés à améliorer sa mise en œuvre. Cette réduction du rapport E/L permet d'obtenir une structure plus dense, moins poreuse et plus étanche, ce qui se traduit par de meilleures performances mécaniques, une perméabilité réduite et, plus généralement, une durabilité accrue (Baroghel-Bouny, 2004).

Cette diminution du rapport E/L s'accompagne toutefois d'une baisse de l'ouvrabilité. Pour compenser cette perte de maniabilité, des superplastifiants sont incorporés afin d'obtenir, à l'état frais, une consistance comparable pour des formulations présentant des rapports E/L différents. Ces adjuvants permettent notamment de réduire la quantité d'eau nécessaire à ouvrabilité équivalente, ou d'augmenter l'ouvrabilité à teneur en eau constante. Ils contribuent également à limiter le ressuage, à faciliter le malaxage et la mise en place, ainsi qu'à améliorer la compacité du matériau à l'état durci.

Un superplastifiant est un tensioactif qui va se déposer à la surface des grains de ciment et faciliter leur interaction avec l'eau, ce qui va disperser les grains et améliorer l'écoulement du mélange, comme illustré sur la Figure 12 (Courard, 2024).

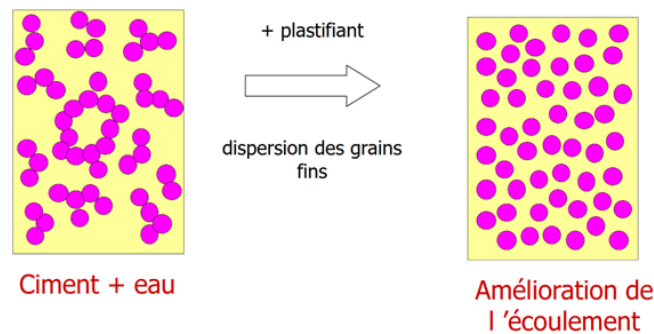


FIGURE 12 – Comportement d'un ciment avec superplastifiant (Courard, 2024)

Les superplastifiants sont constitués de molécules organiques complexes à caractère tensioactif, comportant une partie hydrophobe et une partie hydrophile. La longueur de leurs chaînes polymériques influence la durée de leur efficacité : plus ces chaînes sont longues, plus l'effet dispersant persiste, car leur dégradation est nécessaire avant que l'hydratation du ciment ne puisse pleinement se développer. Leur mécanisme d'action repose sur l'adsorption de ces molécules à la surface des grains de ciment. Une fois fixées, les chaînes hydrophiles se déploient dans la phase aqueuse, formant une structure comparable à une couche de poils. Cette configuration engendre des effets de répulsion stérique, réduisant les forces d'attraction entre particules. Il en résulte une diminution des frottements intergranulaires et une dispersion des grains de ciment.

Dans le cadre de ce travail, le superplastifiant utilisé est de type polycarboxylate, appartenant à la troisième génération d'adjuvants, développée à partir des années 1980 (Borida, 2025). Ce type de produit se distingue par une forte rétention d'ouvrabilité et par une réduction de la consommation d'eau pouvant atteindre 20 à 40 % à consistance égale (Tenessy, 2025). Sa

structure comprend une chaîne principale anionique, constituée d'acide polycarboxylique (hydrophile), qui s'adsorbe sur les particules de ciment via ses groupes carboxylate, ainsi que des chaînes latérales de polyéthylène glycol (hydrophobe) (PEG) non ioniques responsables de la répulsion stérique (Bédiako, 2024). Ce mécanisme, illustré à la Figure 13, explique l'efficacité élevée des polycarboxylates à faibles dosages, ainsi que leur capacité à maintenir une bonne ouvrabilité sur une durée relativement longue.

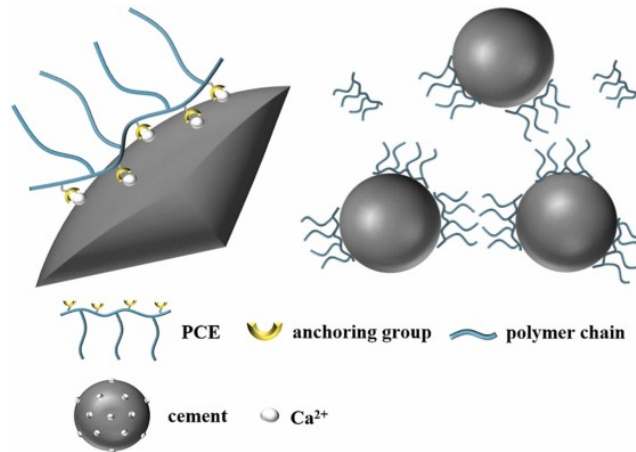


FIGURE 13 – Superplastifiant PC mécanisme (Ma et al., 2023)

L'intérêt de ces adjuvants ne se limite pas à l'état frais. Dans le béton durci, la réduction du rapport E/L associée à l'usage de superplastifiants peut conduire à une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, parfois de l'ordre de 20 à 25 % selon la formulation, voire davantage (Baroghel-Bouny, 2004). Cette densification de la matrice s'accompagne d'une diminution de la porosité capillaire, ce qui réduit la pénétration des chlorures, ralentit la corrosion des armatures et améliore la résistance aux cycles de gel-dégel, à condition que la teneur en air soit correctement maîtrisée (ACI, 2016).

Sur le plan des déformations, abaisser le rapport E/L réduit le retrait de dessiccation en limitant la quantité d'eau libre disponible à l'évaporation. Cependant, pour des valeurs inférieures à 0,40–0,42, le retrait endogène par autodessiccation devient non négligeable et tend à dominer, l'eau disponible n'étant plus suffisante pour assurer une hydratation complète du ciment (Aïtcin et al., 1998).

Par ailleurs, les superplastifiants peuvent légèrement retarder la prise en ralentissant le début des réactions du ciment. En s'adsorbant à la surface des grains, ils forment une barrière stérique qui limite le contact entre l'eau et les particules de ciment, ce qui ralentit leur mise en solution (Ma et al., 2023). L'importance de cet effet dépend du dosage et de la structure du polymère, d'où la nécessité d'ajuster précisément la formulation pour concilier ouvrabilité et performances mécaniques.

Dans le cas des mortiers contenant du sable recyclé, l'utilisation de superplastifiants présente un intérêt particulier, car elle permettrait notamment de compenser en partie la perte de résistance mécanique liée au remplacement du sable naturel. Par ailleurs, les mortiers haute

performance sont souvent utilisés dans les travaux de réparation, en raison de leurs atouts en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'étanchéité.

1.3.4 Mortier de réparation

Dans de nombreux ouvrages en béton, des phénomènes comme les cycles de gel-dégel, l'humidité et la pénétration d'agents agressifs entraînent une dégradation progressive du matériau. Ces phénomènes favorisent la corrosion des armatures, qui se traduit par de l'écaillage, de la fissuration ou encore de la délamination de l'enrobage (exemple sur la Figure 14). Au-delà de l'aspect visuel, ces altérations traduisent une perte de cohésion du béton pouvant compromettre l'intégrité structurale de l'ouvrage.



FIGURE 14 – Ouvrage béton dégradé : passerelle Saucy, Liège (photo personnelle)

Une réparation devient alors nécessaire afin de préserver l'intégrité structurale de l'ouvrage et d'assurer sa sécurité et sa durabilité. Elle consiste à éliminer les zones dégradées jusqu'au support sain, nettoyer les armatures, puis appliquer un mortier de réparation compatible avec le béton existant, afin de rétablir l'adhérence et les performances mécaniques.

Les mortiers de réparation doivent répondre à des exigences élevées, notamment en termes de compatibilité mécanique et de déformation avec le support. Cela inclut des propriétés adaptées en module d'élasticité, résistance en traction, retrait et fluage. Un mortier trop rigide ou présentant un retrait excessif peut engendrer des contraintes à l'interface, favorisant la fissuration ou le décollement, en particulier dans le cas de réparations minces. Ces aspects sont pris en compte dans la norme EN 1504-3.

Le comportement au retrait restreint constitue un enjeu central. L'adhérence au support limite les déformations du mortier, générant des contraintes de traction internes susceptibles de provoquer des fissures (Figure 15) (Shen et al. 2023). À l'inverse, une adhérence insuffisante peut entraîner un décollement du mortier (Figure 16), compromettant l'efficacité de la réparation.

L'adhérence dépend fortement de la préparation du support (rugosité, propreté et géométrie) et de son état hydrique (Bissonnette et al., 2014). Elle peut être évaluée par essais d'arrachement (*pull-off*).



FIGURE 15 – Fissuration du mortier de réparation (Courard, 2025)



FIGURE 16 – Décollement du mortier de réparation passerelle Saucy Liège (photo personnelle)

À l'échelle microstructurale, les mortiers sont formulés pour limiter la porosité et la perméabilité, afin de freiner la pénétration de l'eau, des chlorures et d'autres agents agressifs vers les armatures. Des mortiers modifiés aux polymères (PCC) peuvent notamment être utilisés pour améliorer l'adhérence, la ténacité et la capacité de pontage des fissures (*crack-bridging ability*) (Courard, 2025).

Enfin, les conditions de mise en œuvre sont déterminantes. Les réparations minces sont particulièrement sensibles au retrait de dessiccation en raison de leur fort rapport surface/volume, ce qui impose une cure rigoureuse. Le rapport eau/liant joue également un rôle clé : un E/L faible améliore les performances mais peut accentuer le retrait endogène et réduire l'ouvrabilité, tandis qu'un E/L élevé facilite la mise en œuvre au détriment de la durabilité. Son choix résulte donc d'un compromis entre ces différents paramètres.

Méthodologie et protocoles expérimentaux

2.1 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 compensateurs de retrait 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. §2.9 Essai du *German Angle*), 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* (cf. §2.9 Essai du *German Angle* et §2.9.2 Variante), l'évolution de la déformation du mortier dans des profilés métalliques en C.

2.2 Les matériaux

2.2.1 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 17, 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

Composition Minéralogique

C₃S 54.5

C₂S 15.3

C₃A 6.9

C₄AF 10.3

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

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 17 – 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 17) 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 18). Néanmoins, la résistance mesurée à 28 jours (40,2 MPa) demeure inférieure au seuil minimal requis pour la classe 42,5 R.

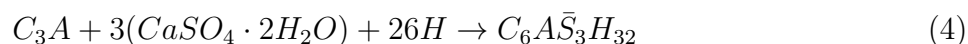
Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps de début de prise	Stabilité (expansion)	
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L ^a	-	≥16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60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

FIGURE 18 – 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.

2.2.2 L'agent expansif de type K

Dans ce travail, l'agent expansif utilisé est un agent de type K qui repose principalement sur la formation d'ettringite lors de la phase d'hydratation du ciment. Cette réaction met donc en jeu des aluminates de calcium issus du clinker sulfoalumineux, du sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) et de l'eau. La réaction chimique représentant ce phénomène peut s'écrire :



où C_3A représente l'aluminate tricalcique, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ le gypse et $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ l'ettringite. Dans le cas spécifique des agents de type K, la présence de chaux (CaO) favorise également la disponibilité en ions calcium (Ca^{2+}), ce qui stabilise et amplifie la formation d'ettringite.

Cette formation d'ettringite s'accompagne d'une augmentation de volume due à la croissance de cristaux formés au sein de la matrice cimentaire. Lorsque cette réaction se produit à un stade précoce, alors que la matrice est encore partiellement plastique ou faiblement rigide, elle génère

une expansion interne contrôlée capable de compenser les déformations de retrait. À l'inverse, si la réaction se poursuit dans une matrice déjà durcie, elle peut engendrer des contraintes internes excessives et conduire à des fissurations. Il est donc important de contrôler cette expansion.

Ce matériau est fourni par la société CTS *Cement Manufacturing Corp* (Canada). Les caractéristiques du produit ainsi que les recommandations d'utilisation sont présentées en Annexe D.1.

Concernant l'agent expansif de type K, le fabricant recommande une incorporation comprise entre 5 % et 17 % en substitution du liant total. Par ailleurs, un rapport eau/ciment (E/C) compris entre 0,40 et 0,55 est préconisé afin d'assurer des conditions d'hydratation et de performance optimales.

2.2.3 Le superplastifiant de type PC

Le superplastifiant utilisé dans cette étude est le PLASTOL 6400 (fiche technique en Annexe D.2), un adjuvant à base de polycarboxylates conçu pour améliorer la dispersion des particules de liant et réduire la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du mélange. Ce type d'adjuvant agit par adsorption à la surface des grains de ciment, où il génère des répulsions stériques entre particules et limite ainsi leur floculation. Il en résulte une amélioration de la fluidité du mélange à rapport eau/liant réduit. Cette diminution de la demande en eau favorise également une matrice plus compacte, limite la porosité capillaire et contribue, à l'état durci, à l'augmentation des résistances mécaniques.

Le fabricant indique qu'une réduction de la teneur en eau pouvant atteindre 45 % est possible tout en conservant une bonne maniabilité. Cette efficacité demeure toutefois dépendante de la formulation, de la nature des matériaux employés et du dosage retenu. À cet effet, le dosage recommandé se situe entre 200 et 780 mL par 100 kg de liant, mais des ajustements peuvent être nécessaires selon les caractéristiques granulaires et la réponse rhéologique recherchée. Dans le cadre de cette étude, le superplastifiant a été incorporé directement à l'eau de gâchage avant son ajout au mélange. Son incorporation avait pour objectif de réduire le rapport eau/liant de 0,1 tout en conservant une consistance comparable. Pour les formulations en contenant, le temps de démoulage a été allongé en raison du retard de prise induit par l'adjuvant, passant généralement de 8 h à 9 h ou davantage selon la composition et la quantité incorporée.

2.2.4 Les sables

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

1. Un sable naturel (Sablière de ST-GABRIEL-DE-BRANDON, Canada), noté NS, (fiche technique en Annexe D.3)

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 μm . 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.

2. 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 ré-introduits 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. 2.3 Analyse de la granulométrie).

3. 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. 2.3 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.

2.3 Analyse de la granulométrie

Dans cette section, 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.

2.3.1 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 19). Cette étape permet d'éliminer les fractions les plus fines, qui pourraient autrement obstruer les tamis lors du tamisage à sec.



FIGURE 19 – 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 :

$$\text{Teneur en fines} = \frac{M_{\text{fines}}}{M_{\text{initiale}}} \quad (5)$$

La teneur en fines calculée pour chacun des sables est reprise dans le Tableau 2 :

TABLE 2 – 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 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.

Tamissage 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 μ m).

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 20), 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 20 – 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 21, permettant d'établir la répartition des fractions granulaires. Ces données ont ensuite été exploitées pour tracer les courbes granulométriques des différents sables étudiés.



FIGURE 21 – Pesée des fractions retenues après tamisage à sec

2.3.2 Caractérisation des sables

Le sable naturel : NS

La distribution granulométrique, obtenue sur base de la fiche technique (cf. Annexe D.3), du sable naturel étudié est présentée à la Figure 22. Et les résultats détaillés de l'analyse granulométrique du sable naturel sont présentés dans le Tableau 3.

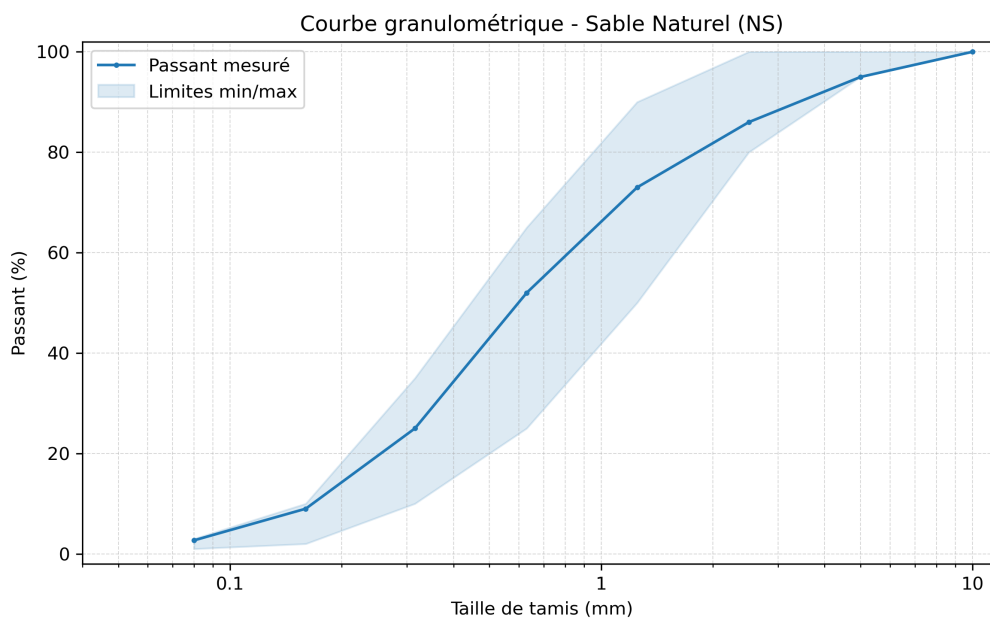


FIGURE 22 – Courbe granulométrique du sable naturel - NS

TABLE 3 – 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

Le sable recyclé du Québec : RS1

La distribution granulométrique, obtenue en laboratoire, du sable recyclé canadien est présentée à la Figure 23.

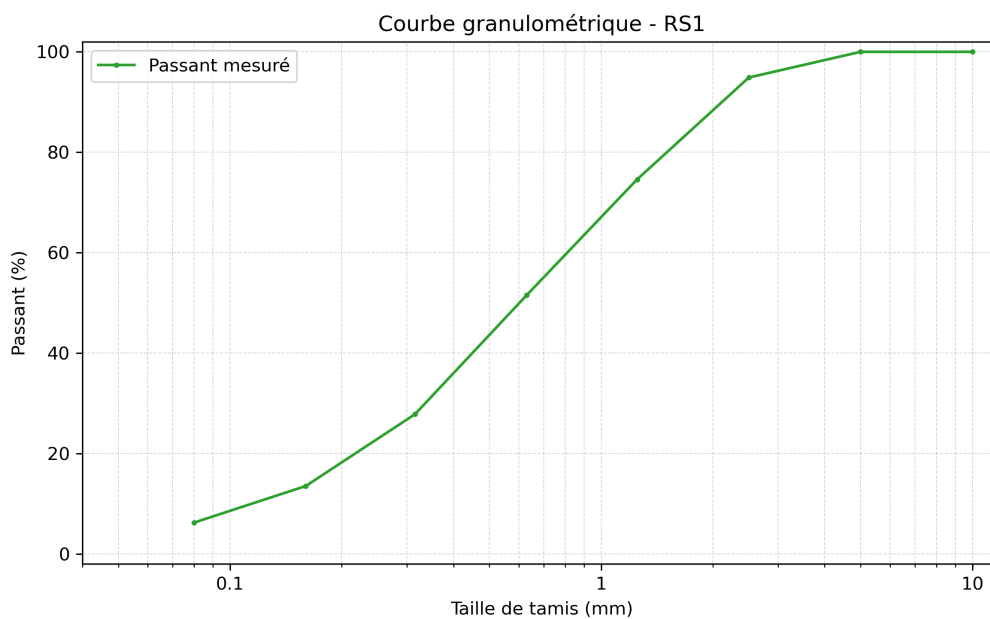


FIGURE 23 – Courbe granulométrique du sable recyclé canadien - RS1

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

TABLE 4 – 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

Le sable recyclé de Liège : RS2

La distribution granulométrique, obtenue en laboratoire, du sable recyclé belge est présentée à la Figure 24.

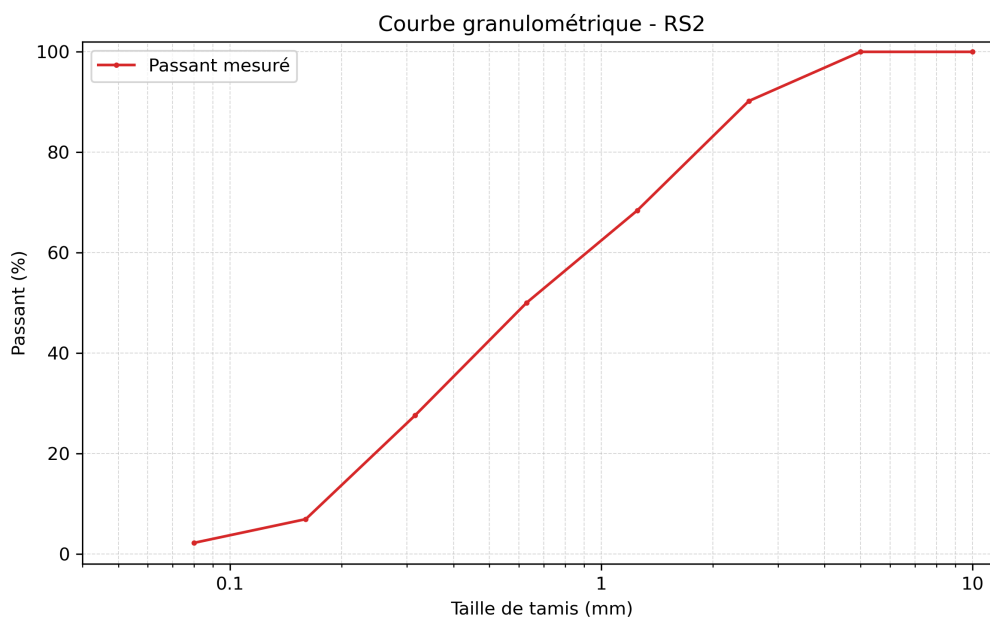


FIGURE 24 – Courbe granulométrique du sable recyclé belge - RS2

Les résultats détaillés de l'analyse granulométrique du sable naturel sont présentés dans le Tableau 5 suivant :

TABLE 5 – 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

Comparaison des différentes granulométries

Dans une optique de comparaison, les courbes granulométriques des différents sables ont été regroupées sur un même graphique (cf. Figure 25), 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.

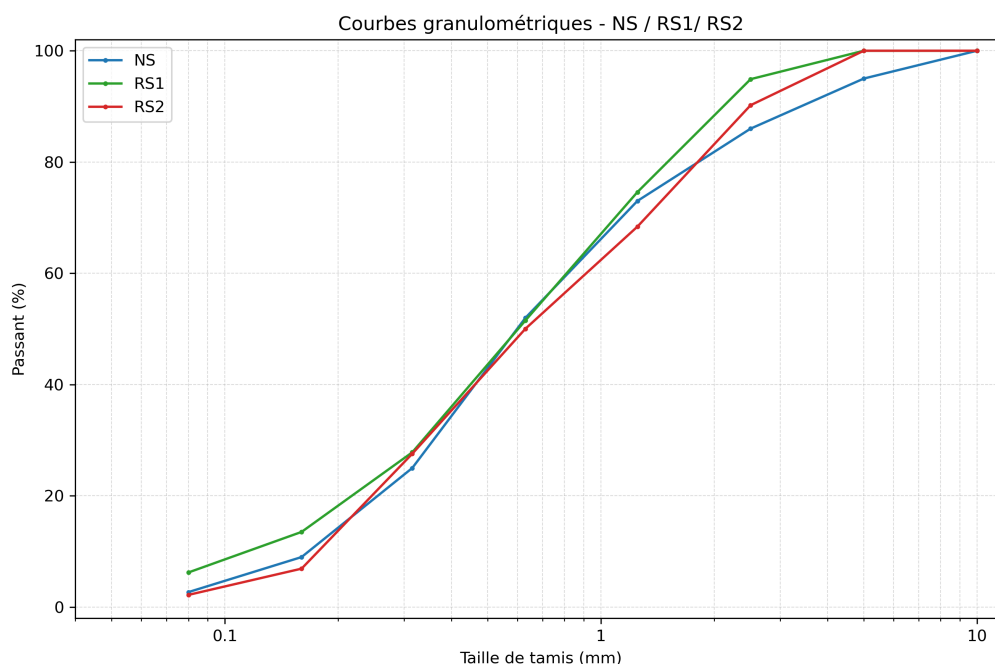


FIGURE 25 – Courbes granulométriques des trois sables étudiés

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 6 – 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 6, 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.

2.4 Evaluation de l'absorption des granulats

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.

2.4.1 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.

2.4.2 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 26 – 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.

2.4.3 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 :

$$A = \frac{m_{\text{SSS}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100 \quad (6)$$

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.

2.4.4 Résultats

TABLE 7 – 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 7 met en évidence les différences de comportement hydrique entre les sables étudiés. Le sable naturel présente une absorption nettement plus faible (0,65 %), tandis que le sable recyclé RS1 affiche une absorption beaucoup plus élevée (15,29 % contre 12,50 % pour Mettlen (2025)), 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 Mettlen (2025)).

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 Mettlen (2025). 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 classiques (belges, canadiennes et européennes) sont principalement adaptées aux granulats naturels et ne prennent pas pleinement en compte les spécificités des granulats recyclés, telles que la porosité élevée et la présence de pâte de ciment résiduelle (Hubert et al., 2023).

2.5 Préparation des mortiers

2.5.1 Mélanges de calibration

Une phase préliminaire de mise au point a été réalisée avant la production des mélanges définitifs. Cette étape a consisté à réaliser 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 (issues des 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., & 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 27.



FIGURE 27 – 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 :

1. Préparation des matériaux et du matériel ;
2. Introduction des constituants secs dans le récipient de mélange ;
3. Homogénéisation à sec pendant 2 minutes ;
4. Ajout de l'eau de gâchage avec l'incorporation des SRA/Superplastifiants ;
5. Malaxage pendant 5 minutes jusqu'à obtention d'une pâte homogène.

2.5.2 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 28 – 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.

2.5.3 Détermination du rapport eau/liant et teneur en eau

L'ajustement du rapport E/L a fait l'objet d'une phase expérimentale réalisée par 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. Leur porosité accrue, leur texture plus anguleuse et leur capacité d'absorption élevée ont engendré une demande en eau plus importante par rapport au sable naturel.

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, mais il venait d'être livré et était plutôt sec.

2.5.4 Description des mélanges finaux étudiés

Les compositions des mélanges finaux standardisées (5 kg de sable) ainsi que leur consistance sont regroupées par type de mélange dans les Tableaux 26 à 30 de l'Annexe E.1 et E.2. 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. Le planning de la réalisation des mélanges est visible à l'Annexe E.3

Pour l'agent expansif de type K, un dosage de 15 % de la masse de liant a été utilisé pour les mélanges reprenant 100 % du dosage recommandé, et 7,5 % pour ceux reprenant 50 % du dosage recommandé. Pour le superplastifiant, les dosages ont été ajustés en fonction de la consistance voulue et sont repris dans le Tableau 8.

TABLE 8 – Dosages en superplastifiant par type de mélange (ml/100 kg de liant)

Type de mélange	Dosage
Sable naturel (NS)	818
NS + RS1 (50/50)	631
RS1 (100 %)	578
RS2 (100 %)	773
Dosage recommandé fiche	200–780

Les dosages de superplastifiant restent dans la plage recommandée par la fiche technique (200–780 ml/100 kg de liant), certains mélanges nécessitant un léger dépassement dû à un faible rapport E/L pour des mortiers.

2.6 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.

2.6.1 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 29 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 29 – Comparateur de longueur avec tige de référence

2.6.2 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.

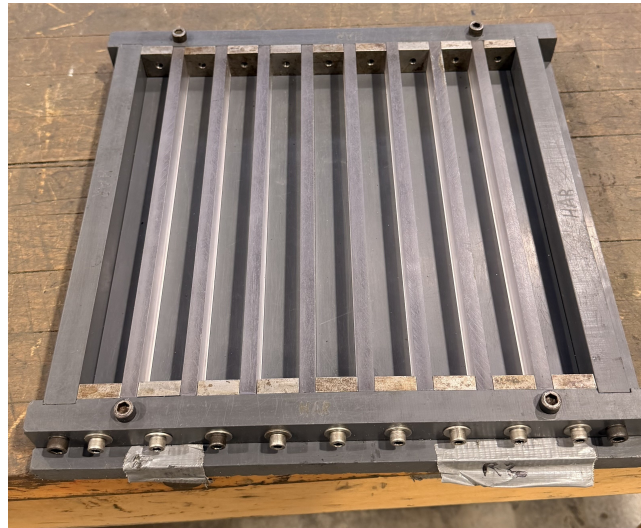


FIGURE 30 – Moules pour la fabrication des éprouvettes

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 30 et Figure 31), 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, elle contribue à réduire les erreurs de lecture et à renforcer la fiabilité du suivi des déformations au cours du temps.

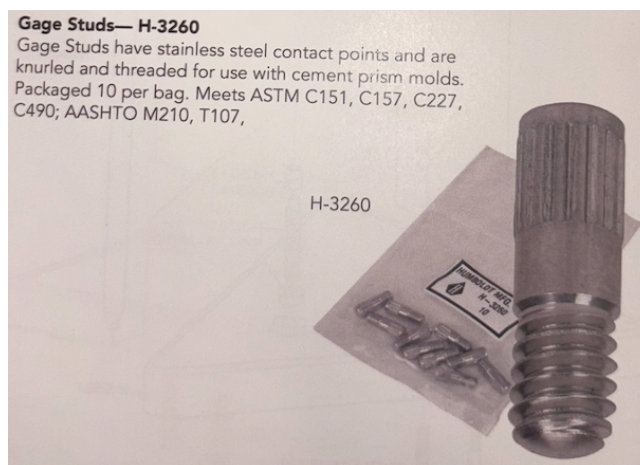


FIGURE 31 – Goujons de jauge H-3260

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 :

1. 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.
2. 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.
3. 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

Le démoulage des éprouvettes 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 17 heures** pour ceux intégrant des superplastifiants.

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 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

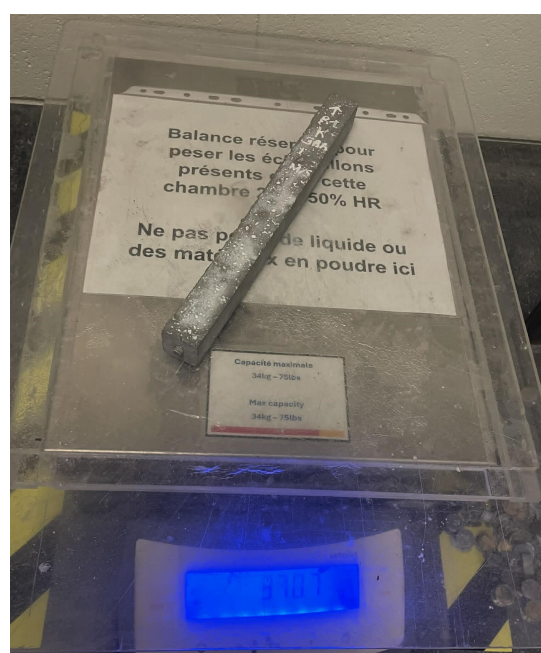
Afin de favoriser la réaction des agents expansifs et de limiter les effets de dessiccation précoce, les éprouvettes ont été maintenues en environnement saturé pendant une durée de sept jours. Cette phase a été réalisée dans des contenants hermétiques remplis d'eau de chaux saturée, eux-mêmes placés dans une enceinte régulée à une humidité relative d'environ $50 \pm 4 \%$ et à une température de $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 32a) et de masse (Figure 32b) 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 32 – 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 33. 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 33 – 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.

2.6.3 Conditionnement spécifique : barrettes scellées

Une série d'éprouvettes a fait l'objet d'un conditionnement particulier. Il s'agit des mélanges à base de sable naturel et de RS1 contenant du superplastifiant, qui ont été immédiatement enveloppés après démoulage par quatre couches de ruban adhésif aluminium afin d'assurer une fermeture aussi étanche que possible. Les éprouvettes ont ensuite été placées pendant les sept premiers jours dans la chambre humide, à l'intérieur de sachets hermétiques de type Ziploc, de manière à maintenir une humidité interne suffisante et à limiter tout échange avec le milieu extérieur, ce conditionnement est illustré à la Figure 34.



FIGURE 34 – Conditionnement des éprouvettes scellées dans la chambre humide

Par la suite, les éprouvettes ont été transférées dans la même salle climatique que les autres, tout en restant scellées dans leurs sachets, et ont été suivies aux mêmes échéances de mesure. Ce protocole avait pour objectif d'isoler le retrait autogène, c'est-à-dire la déformation volumique provoquée uniquement par les mécanismes internes du matériau, sans contribution du retrait de dessiccation.

2.6.4 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 35), 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.

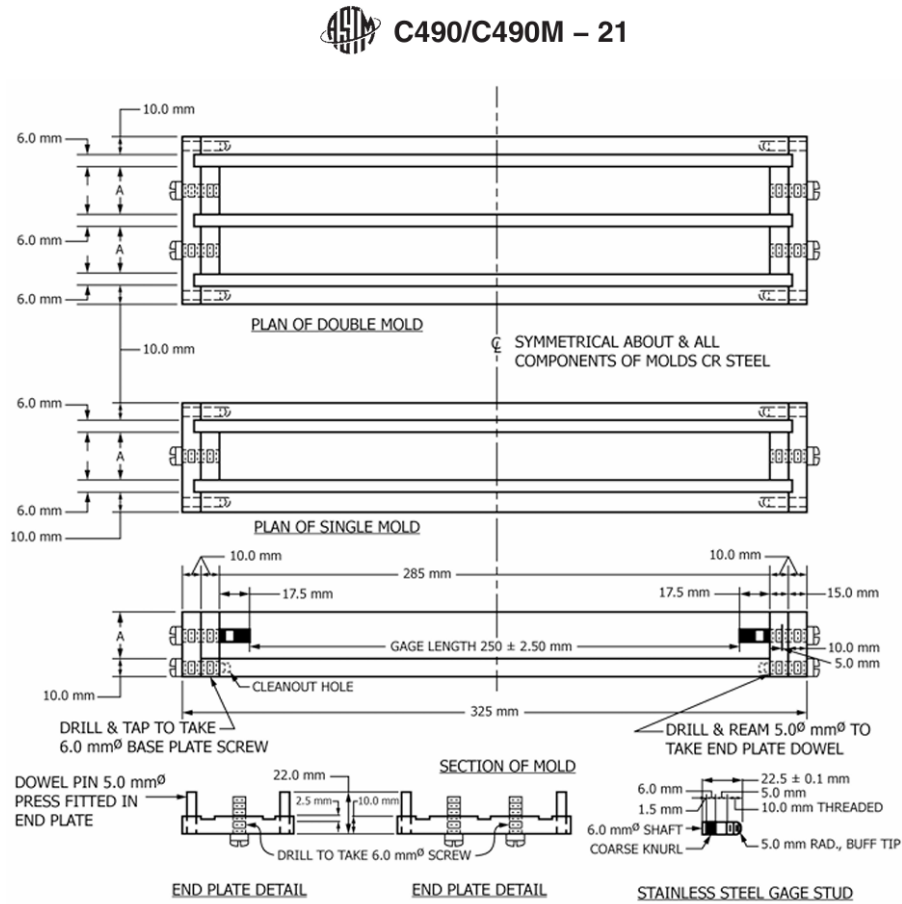


FIGURE 35 – Norme ASTM C490 : Longueur de référence considérée

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

$$\text{Retrait} = \frac{L_t - L_0}{250} \cdot 10^6 [\mu\text{m}/\text{m}] \quad (7)$$

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.

2.7 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.

2.7.1 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 vibration 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 36, 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 36 – Presse hydraulique Instron

2.7.2 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 37 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 37 – 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 :

$$T = \frac{2F}{\pi LD} \quad (8)$$

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.

2.7.3 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 2.7.2.

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 38. 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 2.7.1), afin d'obtenir une réponse représentative du comportement élastique du matériau.



FIGURE 38 – 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 :

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (9)$$

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 .

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.

2.8 Essai d'absorption

2.8.1 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 :

$$A = \text{masse sèche après étuvage à } 110\text{ }^{\circ}\text{C jusqu'à masse constante} \quad (10)$$

$$B = \text{masse saturée surface-sèche après immersion de 48 h} \quad (11)$$

$$C = \text{masse saturée surface-sèche après ébullition de 5 h} \quad (12)$$

$$D = \text{masse immergée de l'éprouvette saturée après ébullition} \quad (13)$$

Procédure expérimentale

1. **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 ;
2. **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 ;
3. **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 39 – Mise en ébullition des échantillons

4. **Mesurer la masse immergée** en suspendant l'échantillon saturé après ébullition à l'aide d'un fil dans de l'eau à environ $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, afin d'obtenir la masse déjaugée D .



FIGURE 40 – 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 :

$$\text{Absorption par immersion [\%]} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (14)$$

$$\text{Absorption après ébullition [\%]} = \frac{C - A}{A} \times 100 \quad (15)$$

$$\text{Densité sèche [kg/m}^3\text{]} = \frac{A}{C - D} \times 1000 \quad (16)$$

$$\text{Densité apparente [kg/m}^3\text{]} = \frac{B}{B - D} \times 1000 \quad (17)$$

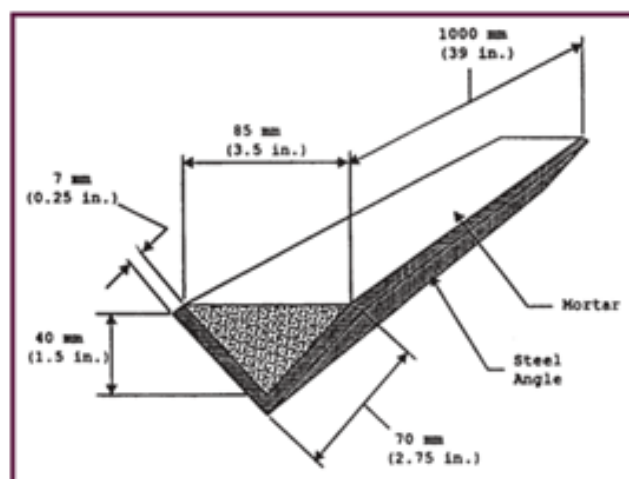
$$\text{Porosité [\%]} = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (18)$$

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.

2.9 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 41. Et dont le ratio section mortier / section acier est : $\frac{A_{\text{mortier}}}{A_{\text{acier}}} = \frac{1984.5}{931} = 2,13$

FIGURE 41 – 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.

2.9.1 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 9 – 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

2.9.2 Adaptation de l'essai : profilé en C

Pour la variante étudiée dans ce travail, le profilé métallique retenu est un profilé en C de type *bar size channels*, de dimensions $1' 1/4 \times 1' 1/2 \times 1' 1/8$, fourni par *Canada Steel*, et d'une longueur de 285 mm. Les dimensions en millimètres sont présentées à la Figure 42, tandis que la Figure 43 illustre l'aspect du profilé avec du mortier.

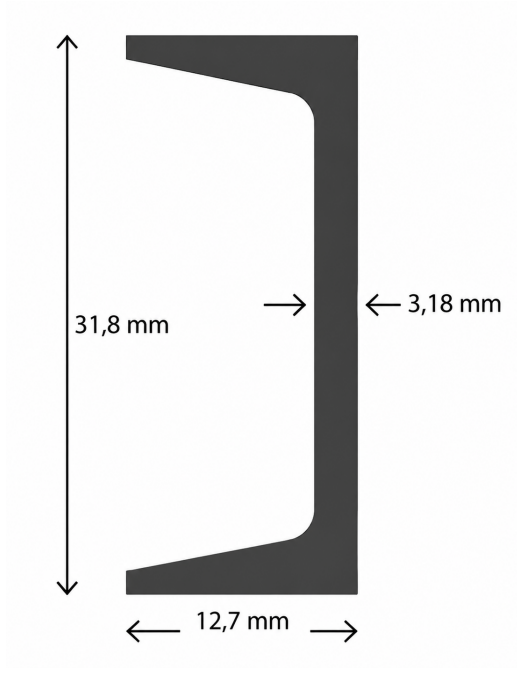


FIGURE 42 – Dimensions du profilé C



FIGURE 43 – Vue du profilé C

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

$$\frac{A_{\text{mortier}}}{A_{\text{acier}}} = \frac{272,9}{161,7} = 1,69. \quad (19)$$

Ce rapport est plus faible que celui de l'essai de référence, ce qui signifie que le profilé en acier offre une rigidité plus élevée. En conséquence, la déformation du support est plus limitée, et les contraintes de retrait sont davantage transmises au mortier. Cette configuration est défavorable du point de vue de la fissuration, ce qui peut favoriser l'apparition de fissures plus rapidement ou conduire à des ouvertures plus importantes.

Analyse des résultats

3.1 Préface

Dans la section suivante, les résultats des différents essais vont être présentés et interprétés pour les 24 mélanges réalisés afin répondre aux questions de recherche posées dans l'introduction. Le Tableau 10 reprend les notations utilisées pour identifier les mélanges sur tous les graphiques et durant tout le reste de ce travail.

TABLE 10 – Notation des mélanges

Notation	Définition
NS	100% de sable naturel.
NS+RS1	Mélange composé de 50 % de sable naturel (NS) et 50 % de sable recyclé du Québec (RS1).
RS1	100 % de sable recyclé du Québec.
RS2	100 % de sable recyclé de Liège.
K50	50 % du dosage recommandé de l'agent expansif K, soit 7,5 % de la masse de liant.
K100	100 % du dosage recommandé de l'agent expansif K, soit 15 % de la masse de liant.
SP	Ajout de superplastifiant, réduction du rapport E/L à consistance équivalente.
ALU	Éprouvettes scellées dans un ruban aluminium.

Les rapports eau/liant (E/L) effectifs retenus pour chaque type de mélange sont rappelés dans le Tableau 11. Ces valeurs ont été ajustées lors de la phase de calibration afin d'obtenir une consistance équivalente entre les formulations.

TABLE 11 – Rapports E/L des mélanges finaux

Type de mélange	NS	NS+RS1	RS1	RS2
Référence / K50 / K100	0,50	0,55	0,60	0,60
Référence + SP / K50+SP / K100+SP	0,40	0,45	0,50	0,50

Les propriétés hydriques des trois sables utilisés sont rappelées dans le Tableau 12. Ces écarts de propriétés des sables constituent un paramètre important pour l'interprétation des résultats.

TABLE 12 – Absorption et teneur en eau des sables

Sable	Absorption [%]	Teneur en eau [%]	État hydrique lors des essais
NS	0,65	0,15 – 0,30	Sous-saturé
RS1	15,29	15 – 17	Saturé
RS2	6,50	1,57	Sous-saturé

3.2 Analyse du retrait : barrettes non scellées

La variation dimensionnelle des 24 formulations a été étudiée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 25×25×285 mm, conformément à la norme ASTM C157/C157M. Les éprouvettes ont été immergées dans une eau saturée en chaux durant les 7 premiers jours de cure, puis soumises à une période de séchage à l'air libre de 28 jours dans une salle climatisée maintenue à 23 ± 2 °C et 50 ± 4 % d'humidité relative. Pour chaque formulation, les mesures ont été effectuées sur trois éprouvettes afin d'obtenir une valeur moyenne représentative. Afin de structurer l'interprétation des résultats, l'analyse sera conduite en distinguant successivement l'influence de la nature du sable, l'effet de l'incorporation du superplastifiant, puis le rôle de l'agent expansif à différents dosages, avant d'examiner l'effet combiné de ces deux adjuvants. Les graphiques de variation dimensionnelle et de masse de l'ensemble des formulations ont été produits, ceux qui ne sont pas nécessaires à l'analyse principale sont regroupés à l'Annexe C.1 et C.2.

3.2.1 Comportement sans adjuvant

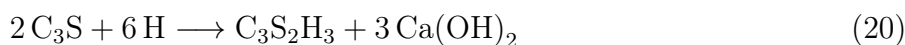
Cette section examine l'influence du type de sable sur la variation dimensionnelle des mortiers, en l'absence de tout adjuvant. Elle constitue la base de comparaison pour l'interprétation des effets de l'agent expansif et du superplastifiant présentés dans les sections suivantes. Il est à noter que la formulation RS2 n'a pas été reproduite dans le cadre de ce travail par manque de matériau disponible. Les résultats, issus des travaux de Mettlen (2025), sont néanmoins intégrés à l'analyse à titre comparatif.

Comportement général

L'ensemble des formulations sans agent expansif présente un comportement en deux phases caractéristique des mortiers cimentaires : une légère expansion durant la période de cure humide, suivie d'un retrait progressif lors du séchage. Ce comportement résulte de deux mécanismes interdépendants.

Le premier est l'expansion observée durant la cure humide, qui s'explique par deux contributions distinctes. D'une part, l'hydratation des phases silicatées du ciment Portland, princi-

palement le silicate tricalcique (C_3S) et le silicate dicalcique (C_2S), engendre la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et d'hydroxyde de calcium selon les réactions :



La formation de ces hydrates, conjuguée à l'absorption d'eau par la pâte en milieu saturé, provoque une légère dilatation de la matrice cimentaire. D'autre part, l'état hydrique initial et les propriétés des sables recyclés peuvent également contribuer à cette expansion.

Le second mécanisme est le retrait de dessiccation, qui domine la phase de séchage. Lors de l'exposition à l'air, l'évaporation de l'eau capillaire contenue dans la porosité de la pâte de ciment engendre une dépression capillaire croissante, provoquant le rapprochement des feuillets de C-S-H et la fermeture progressive des pores. Il en résulte une contraction irréversible de la matrice, d'autant plus prononcée que la porosité totale du mortier est élevée. Les sables recyclés, dont la porosité est significativement plus élevée que celle du sable naturel en raison de la pâte de ciment résiduelle adhérente, contribuent ainsi à augmenter la porosité globale du mortier et sont donc susceptibles d'amplifier le retrait de dessiccation par rapport aux formulations à sable naturel.

Influence du type de sable

Les résultats des formulations de référence, sans agent expansif ni superplastifiant, sont présentés aux Figures 44 et 45. L'analyse conjointe des variations dimensionnelles et massiques permet de mettre en évidence une corrélation directe entre la perte hydrique et le retrait, confirmant que le retrait de dessiccation est bien le mécanisme dominant lors de la phase de séchage.

Durant la cure humide, les variations de masse sont similaires entre les formulations, avec une légère prise d'eau de l'ordre de +1,3 % pour l'ensemble des mélanges. À première vue, cette homogénéité des prises de masse pourrait paraître contre-intuitive : le RS1, dont l'absorption est nettement plus élevée que celle du sable naturel (15 % contre 0,65 %), absorbe davantage d'eau durant la cure et génère une expansion plus marquée. Or, lors des essais, le RS1 présentait une teneur en eau de 17 % pour une absorption de 15 %, soit un état légèrement sursaturé : il ne présentait donc plus de demande résiduelle en eau et sa contribution à la dilatation par imbibition est ainsi comparable à celle des autres formulations. C'est ce qui explique les expansions initiales relativement proches entre NS (+205 $\mu\text{m}/\text{m}$) et RS1 (+228 $\mu\text{m}/\text{m}$). Cette interprétation est confirmée par les résultats de Mettlen (2025), qui avait obtenu une expansion nettement plus marquée de +337 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le RS1 livré à l'état sec, illustrant que l'état hydrique initial du granulat a un effet sur l'expansion du mortier. Lors du séchage, en revanche,

les différences entre formulations deviennent particulièrement marquées, comme en témoigne la Figure 44. Les résultats à 35 jours sont les suivants :

- **NS** : retrait final de $-684 \mu\text{m}/\text{m}$, accompagné de la perte massique la plus faible ($-3,04 \%$ à 35 jours). La faible porosité du sable naturel limite les échanges hydriques avec l'environnement et confère au mortier une meilleure stabilité dimensionnelle.
- **RS1** : retrait final de $-2715 \mu\text{m}/\text{m}$, soit près de quatre fois celui du NS, associé à la perte massique la plus élevée ($-8,87 \%$ à 35 jours). Cette amplification s'explique par la porosité ouverte plus importante du RS1, liée à la pâte de ciment résiduelle adhérente, qui favorise à la fois la rétention d'eau initiale et son évaporation rapide lors du séchage. Le retrait final obtenu dans ce travail ($-2715 \mu\text{m}/\text{m}$) est plus élevé que celui rapporté par Mettlen (2025) ($-2106 \mu\text{m}/\text{m}$), ce qui peut s'expliquer par la différence de mode de mûrissement.
- **RS2** (Mettlen, 2025) : expansion initiale de $+120 \mu\text{m}/\text{m}$ et retrait final de $-1593 \mu\text{m}/\text{m}$. Le RS2, moins poreux que le RS1, présente un comportement intermédiaire entre NS et RS1, reflétant une porosité et une cinétique de séchage moins défavorables. L'expansion plus faible peut s'expliquer par la cure humide et non en immersion.
- **NS+RS1** : expansion de $+187 \mu\text{m}/\text{m}$ et retrait final de $-1504 \mu\text{m}/\text{m}$, soit des valeurs intermédiaires entre NS et RS1, proches de celles du RS2. Ce résultat est cohérent avec l'effet de dilution attendu lors du remplacement partiel du sable naturel par du sable recyclé.

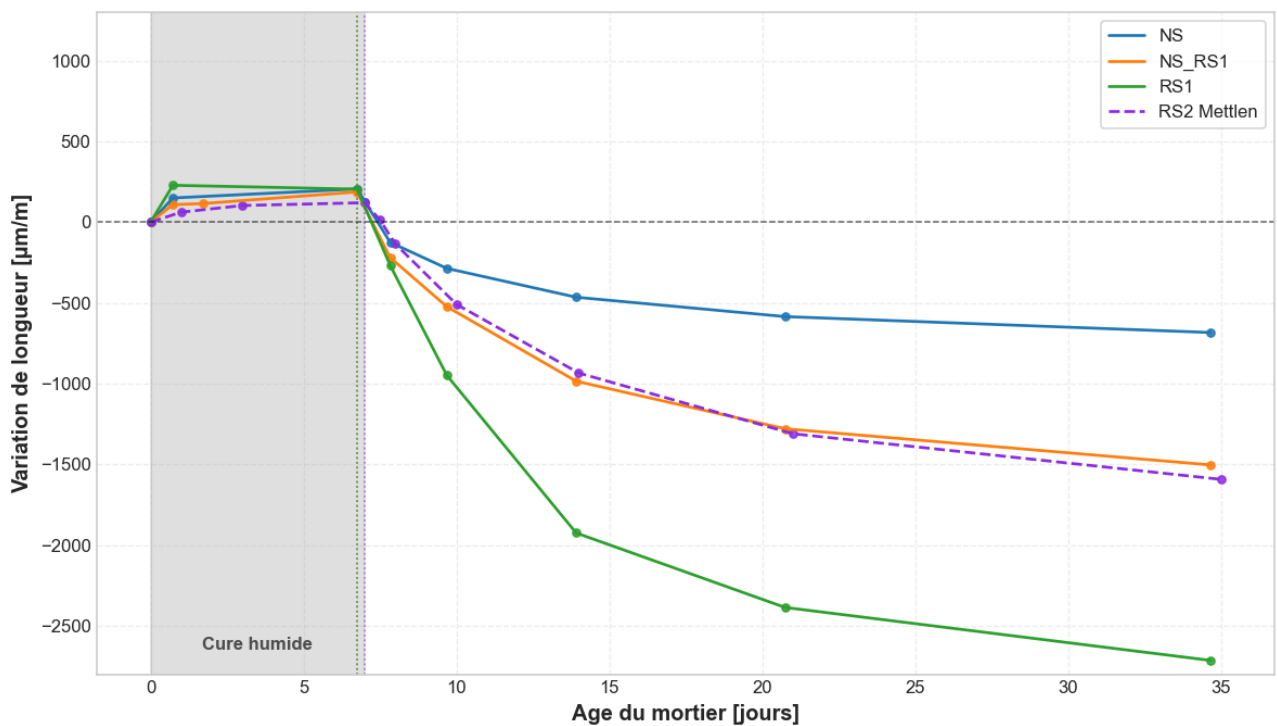


FIGURE 44 – Variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs et sans superplastifiant

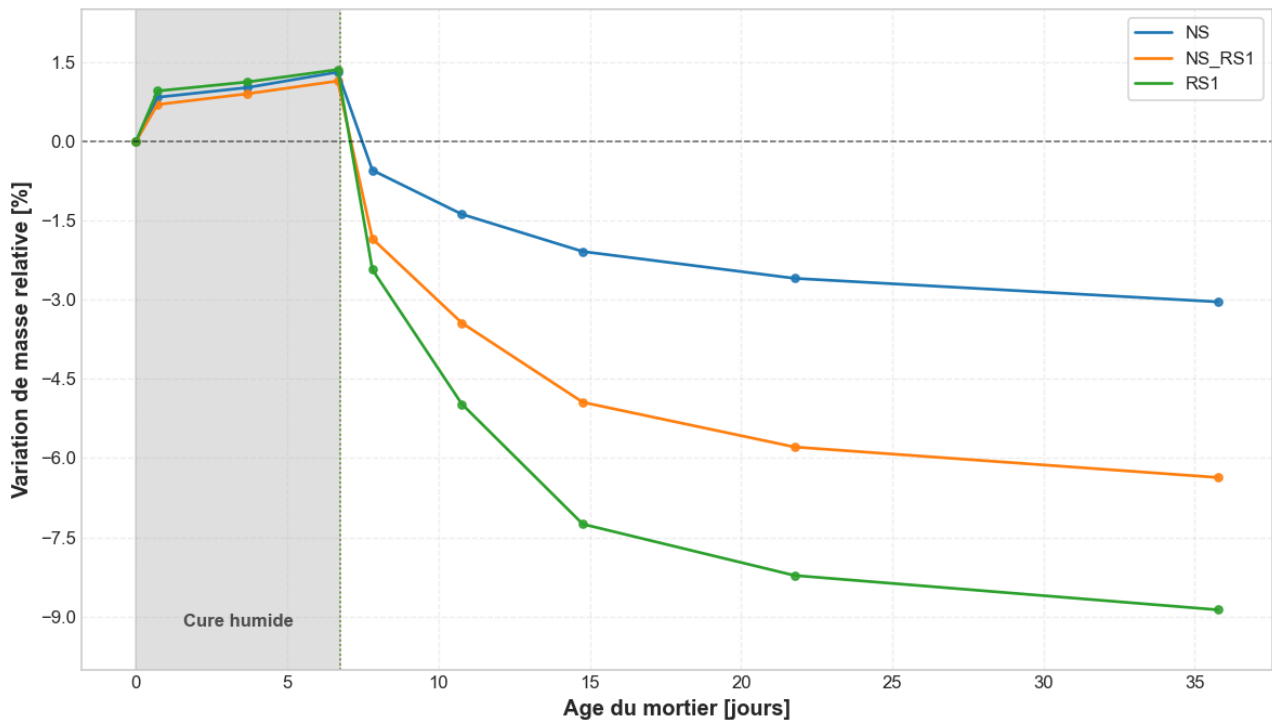


FIGURE 45 – Variations massiques des mélanges sans agents expansifs et sans superplastifiant

Pour l'ensemble des formulations sans adjuvants, le bilan volumétrique final est négatif, traduisant un retrait net à l'issue des périodes de cure et de séchage. Ce constat s'applique à tous les sables recyclés : leur porosité plus élevée que celle du sable naturel conduit systématiquement à un retrait de dessiccation amplifié, quel que soit le type de sable recyclé utilisé. La hiérarchie des retraits suit celle de la porosité des sables : $RS1 > RS2 \approx NS+RS1 > NS$. Toutefois, si la substitution totale du sable naturel par un sable recyclé est inévitablement pénalisante du point de vue du retrait, le choix du sable recyclé reste déterminant : le RS2 conduit à des performances dimensionnelles nettement meilleures que le RS1, comparables à celles du mélange NS+RS1, et constitue donc un choix plus favorable parmi les options à base de sable recyclé.

3.2.2 Effet du superplastifiant

Les formulations incorporant du superplastifiant sans agent expansif se distinguent des précédentes par un rapport E/L réduit (de 0,10), obtenu tout en maintenant une consistance équivalente. Cette réduction de l'eau de gâchage densifie la matrice cimentaire en diminuant la porosité capillaire résiduelle, ce qui limite à la fois la quantité d'eau évaporable et la cinétique de dessiccation lors du séchage, contribuant ainsi à une réduction du retrait de dessiccation. Notons que les rapports E/L retenus (0,40 à 0,50) restent au-dessus du seuil critique de 0,40 en dessous duquel le retrait autogène devient significatif (Aïtcin et al., 1998). Il convient également de noter que le retard de prise induit par le superplastifiant a nécessité un démoulage tardif, réalisé entre 16 et 17 heures après le moulage, contre environ 8 heures pour les formulations sans superplastifiant.

Les résultats sont présentés à la Figure 46 et les valeurs à 35 jours sont les suivantes :

- **NS+SP** : expansion de $+232\text{ }\mu\text{m/m}$ et retrait final de $-652\text{ }\mu\text{m/m}$, soit des valeurs très proches de la formulation NS sans superplastifiant ($-684\text{ }\mu\text{m/m}$). La réduction du rapport E/L n'a donc pas d'effet significatif sur le retrait final du mortier à sable naturel, la faible porosité du NS limitant déjà naturellement les échanges hydriques.
- **RS1+SP** : expansion de $+289\text{ }\mu\text{m/m}$ et retrait final de $-2602\text{ }\mu\text{m/m}$. Malgré la réduction du rapport E/L, le retrait reste très élevé et comparable à celui de la formulation RS1 sans superplastifiant ($-2715\text{ }\mu\text{m/m}$). Cela suggère que la porosité propre du RS1, liée à sa pâte de ciment résiduelle, constitue le facteur dominant du retrait, et que la densification de la matrice par réduction du rapport E/L ne suffit pas à compenser cet effet.
- **RS2+SP** : expansion de $+246\text{ }\mu\text{m/m}$ et retrait final de $-1382\text{ }\mu\text{m/m}$, soit un retrait légèrement inférieur à celui obtenu sans superplastifiant ($-1593\text{ }\mu\text{m/m}$). La densification de la matrice semble ici avoir un effet modéré mais perceptible sur la limitation du retrait.
- **NS+RS1+SP** : expansion de $+220\text{ }\mu\text{m/m}$ et retrait final de $-1441\text{ }\mu\text{m/m}$, soit des valeurs intermédiaires entre NS+SP et RS1+SP, proches de celles du RS2+SP. Ce résultat confirme la tendance observée sans superplastifiant : la substitution partielle du sable naturel par du RS1 conduit à un comportement comparable à celui d'une substitution totale par RS2.

De manière générale, la hiérarchie des retraits entre formulations reste inchangée par rapport aux mélanges sans superplastifiant : $\text{RS1+SP} > \text{RS2+SP} \approx \text{NS+RS1+SP} > \text{NS+SP}$. L'ajout de superplastifiant, bien qu'il permette une réduction du rapport E/L, n'inverse pas les tendances liées à la nature des sables et ne réduit pas significativement le retrait final. Les écarts entre les formulations avec et sans superplastifiant restent en effet modestes, ce qui suggère que la nature et la porosité du sable constituent le facteur prépondérant du retrait, devant le rapport E/L. Pour tous les mélanges, le bilan volumétrique final demeure négatif, confirmant que sans agent expansif, la seule réduction de l'eau de gâchage ne suffit pas à compenser le retrait de dessiccation.

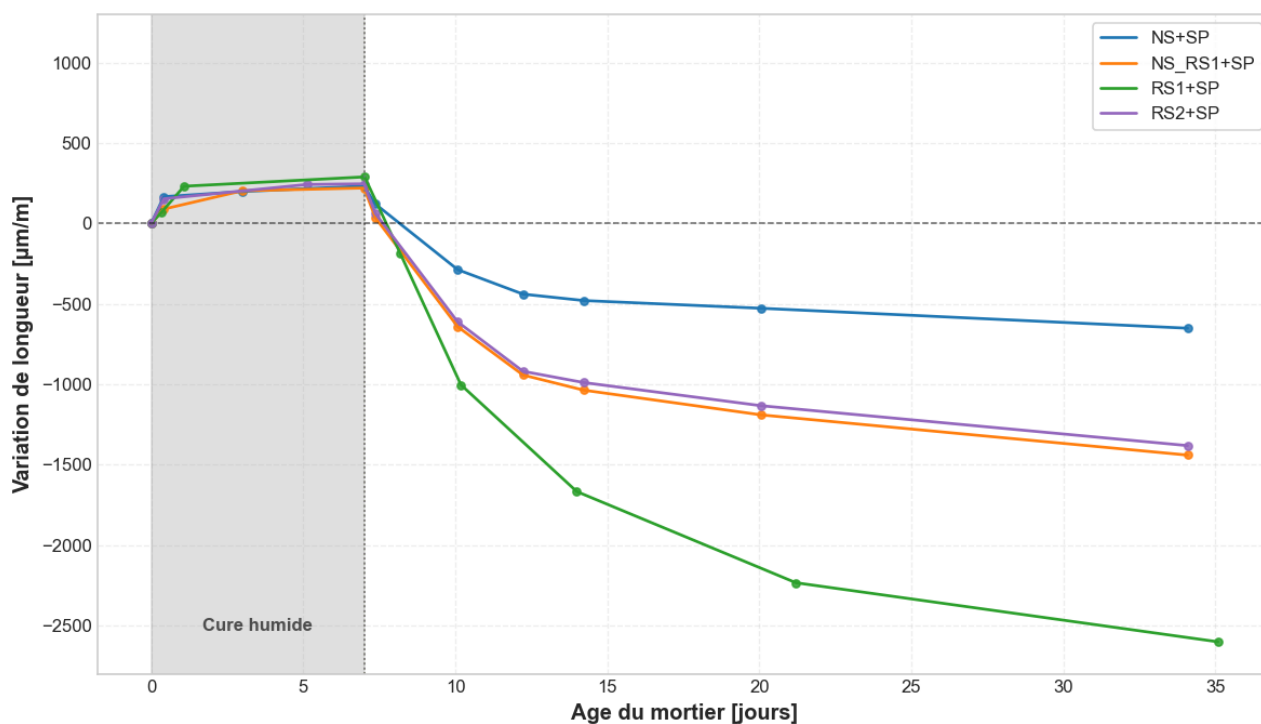


FIGURE 46 – Variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs et avec superplastifiant

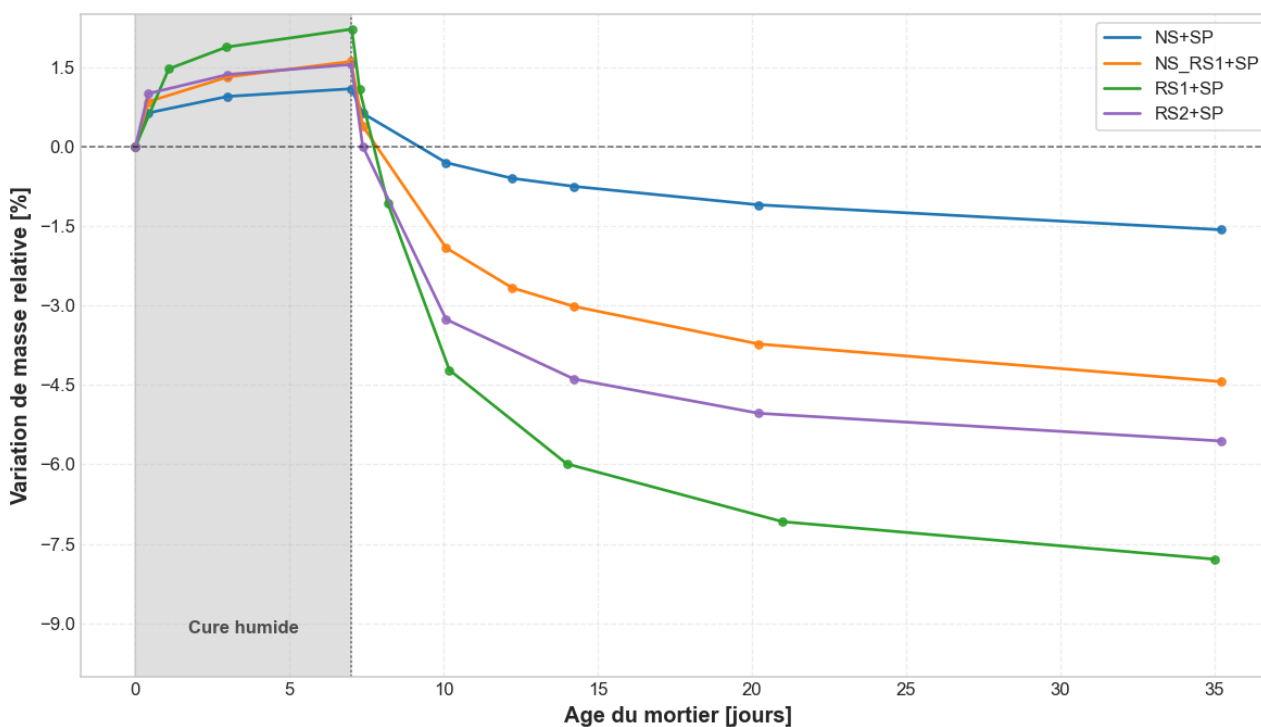


FIGURE 47 – Variations massiques des mélanges sans agents expansifs et avec superplastifiant

Comparaison avec et sans superplastifiant

La Figure 48 permet de comparer directement les formulations avec et sans superplastifiant pour l'ensemble des types de sable, et d'isoler ainsi l'effet de la réduction du rapport E/L des

effets liés à la nature des granulats.

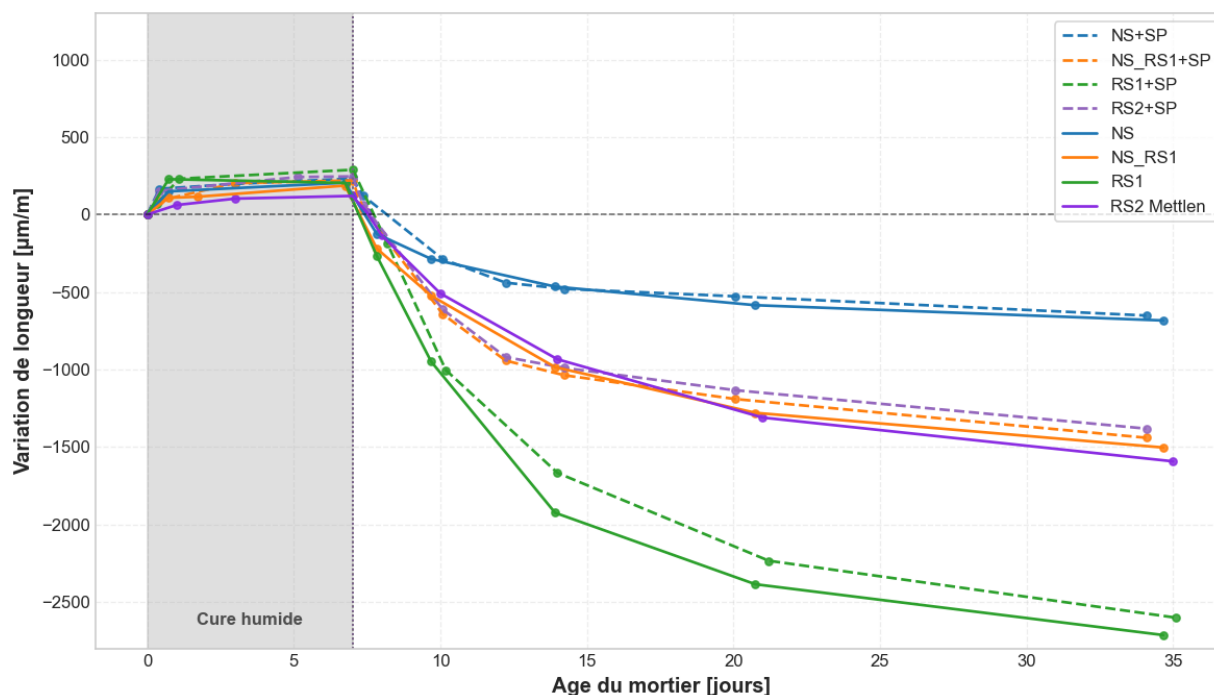


FIGURE 48 – Comparaison des variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs, avec et sans superplastifiant

De manière générale, les comportements avec et sans superplastifiant sont proches, ce qui confirme l'observation formulée en section précédente : la réduction du rapport E/L seule ne suffit pas à modifier significativement le retrait final. On observe néanmoins un retrait final légèrement inférieur pour les mélanges incorporant du superplastifiant, ce qui s'explique par la densification de la matrice cimentaire induite par la réduction de l'eau de gâchage. Une matrice plus dense présente en effet une porosité capillaire réduite, limitant à la fois la quantité d'eau évaporable et la cinétique de dessiccation, et conduisant ainsi à un retrait de dessiccation modérément atténué.

Concernant la phase de cure humide, les mélanges avec superplastifiant présentent une expansion initiale légèrement plus élevée que ceux sans superplastifiant. Cette observation peut s'expliquer par le démoulage plus tardif imposé par le retard de prise : les éprouvettes, plus sèches au moment de l'immersion en raison du temps d'attente prolongé, ont absorbé davantage d'eau lors de la cure humide, générant une dilatation par imbibition plus importante. Cette hypothèse est confirmée par l'analyse des variations de masse, qui montre une prise de masse plus élevée durant la cure pour les mélanges incorporant du superplastifiant (Figure 47). En effet, pour le RS1, dont la teneur en eau était comparable entre les deux séries d'essais, la variation de masse durant la cure atteint 2,22 % avec superplastifiant contre 1,36 % sans, malgré une matrice de départ plus dense, c'est bien le séchage supplémentaire lié au démoulage tardif qui explique cette absorption accrue au moment de l'immersion.

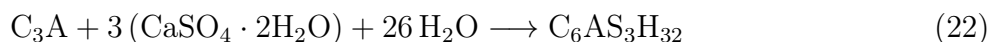
Synthèse sur l'influence des granulats et du superplastifiant

Cette première section d'analyse permet de dégager plusieurs conclusions sur le comportement dimensionnel des mortiers en l'absence d'agent expansif, et apporte des éléments de réponse à la question de recherche portant sur l'effet de la substitution du sable naturel par des sables recyclés. La nature du sable constitue le facteur prépondérant du retrait : le NS présente le retrait le plus modéré, le RS2 un comportement intermédiaire, et le RS1 un retrait particulièrement élevé, atteignant près de quatre fois celui du mortier à sable naturel. Si l'ensemble des sables recyclés conduit à une amplification du retrait par rapport au sable naturel, le choix du sable recyclé reste déterminant : le RS2, issu de déchets de démolition provenant de Liège, offre des performances dimensionnelles nettement supérieures à celles du RS1, comparables à celles du mélange NS+RS1, qui constitue quant à lui un compromis en cas d'incorporation partielle de RS1.

Cette section établit également la base de référence pour l'interprétation des sections suivantes. L'incorporation de superplastifiant et la réduction du rapport E/L réduisent le retrait final de manière perceptible mais modérée, insuffisant pour compenser les effets liés à la porosité intrinsèque des sables recyclés. Ces résultats soulignent la nécessité d'un levier complémentaire pour maîtriser le retrait des mortiers à sable recyclé, ce que l'agent expansif est censé apporter et que les sections suivantes vont permettre d'évaluer.

3.2.3 Effet de l'agent expansif de type K

Pour rappel, l'agent expansif de type K, riche en aluminates et sulfates, provoque la formation d'ettringite selon la réaction :



L'ettringite ainsi formée occupe un volume nettement supérieur à celui des réactifs initiaux, générant une expansion interne du matériau. Cette réaction est fortement dépendante de la disponibilité en eau : une cure en immersion dans l'eau de chaux, telle qu'appliquée dans ce travail, constitue un environnement particulièrement favorable à la formation d'ettringite, en maintenant une disponibilité en eau maximale durant les 7 premiers jours.

Les résultats des formulations incorporant 100 % du dosage recommandé en agent K sont présentés à la Figure 49 et synthétisés dans le Tableau 13.

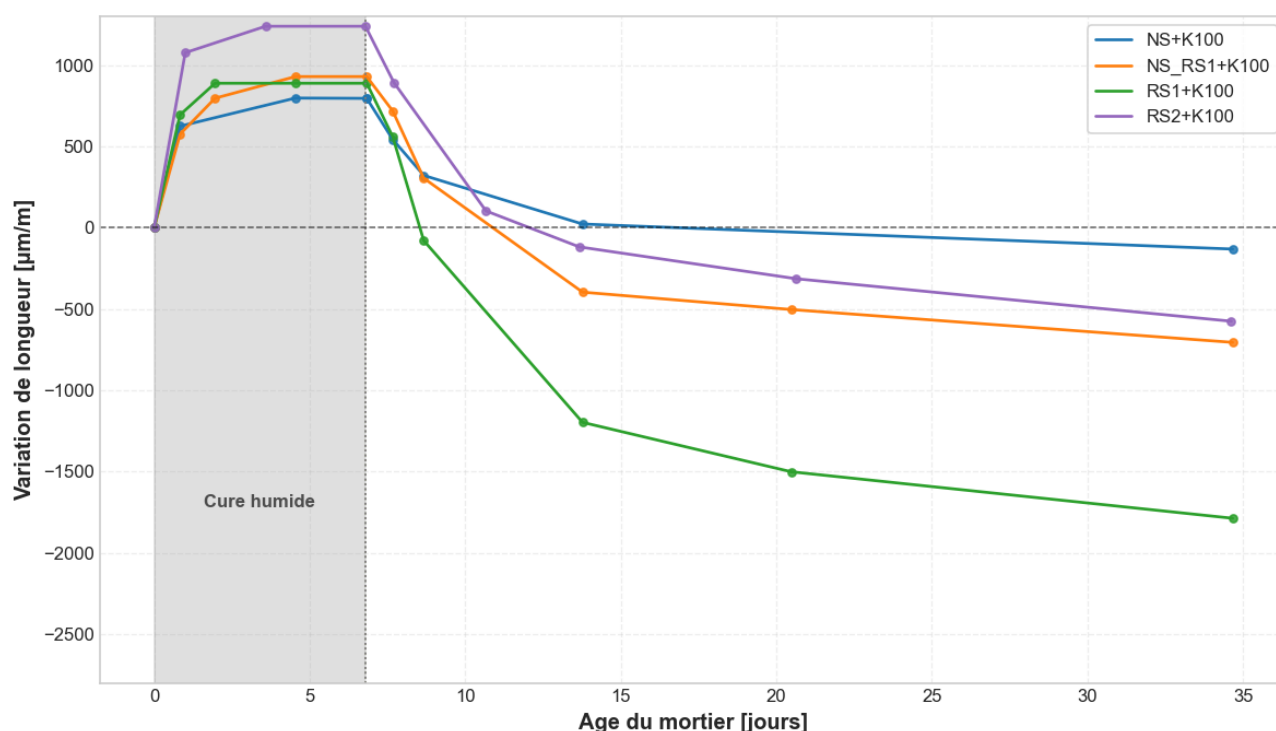


FIGURE 49 – Variations dimensionnelles des mélanges avec agent expansif K à 100 % du dosage recommandé, sans superplastifiant

TABLE 13 – Comparaison des variations dimensionnelles : formulations de référence sans agent expansif vs K100

Mélange	Référence		K100		Gain exp. [%]	Réd. retrait [%]
	Exp.	Ret.	Exp.	Ret.		
	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]		
NS	+205	-684	+797	-132	+289	81
NS+RS1	+187	-1504	+929	-706	+397	53
RS1	+228	-2715	+888	-1788	+289	34
RS2	+120	-1593	+1238	-576	+932	64

Exp. : expansion maximale en cure humide ; *Ret.* : retrait final à 35 jours ; *Gain exp.* : gain d'expansion entre la formulation de référence et K100 ; *Réd. retrait* : réduction du retrait final entre la formulation de référence et K100.

L'ensemble des formulations présente une expansion initiale nettement plus marquée qu'en l'absence d'agent expansif, confirmant l'action de l'agent K sur la formation d'ettringite durant la cure humide. La réduction du retrait final est également significative pour toutes les formulations, bien qu'elle soit inégale selon le type de sable. Néanmoins, pour l'ensemble des formulations à base de sable recyclé, cette réduction reste insuffisante pour compenser intégralement le retrait : le bilan dimensionnel final demeure négatif, avec un retrait résiduel particulièrement marqué pour le RS1, et plus modéré pour le RS2 et le NS+RS1.

Le **NS+K100** présente la meilleure performance globale, avec un retrait final quasi nul ($-132 \mu\text{m/m}$) et une réduction du retrait de 81 % par rapport à la formulation de référence.

L'agent expansif parvient ici à compenser quasi intégralement le retrait de dessiccation, ce qui en fait la formulation la plus efficace de cette série.

Le **RS1+K100** présente en revanche l'expansion la plus faible des formulations à sable recyclé (+888 $\mu\text{m}/\text{m}$) et le retrait final le plus élevé (−1788 $\mu\text{m}/\text{m}$), le bilan dimensionnel restant nettement négatif. Ce résultat peut paraître surprenant compte tenu de la porosité élevée du RS1, qui pourrait laisser supposer qu'une forte demande en eau favorise la réaction expansive. L'explication réside dans son état hydrique lors des essais : comme évoqué précédemment, la sursaturation du RS1 n'a nécessité aucun ajout en eau au malaxage, privant ainsi l'agent expansif d'un apport en eau libre supplémentaire au développement son potentiel de gonflement. Ce constat illustre un point, ce n'est pas l'eau contenue dans les pores des granulats qui est exploitable par l'agent expansif, mais l'eau libre disponible dans la pâte au moment de la réaction.

Le **RS2+K100** se distingue par le gain d'expansion le plus important de toutes les formulations (+932 %), avec une expansion initiale atteignant +1238 $\mu\text{m}/\text{m}$ et un retrait final fortement réduit à −576 $\mu\text{m}/\text{m}$, soit une réduction de 64 %. Il convient toutefois de rappeler que les résultats du RS2 de référence sont issus des travaux de Mettlen (2025) réalisés en chambre humide et non en immersion ; la comparaison avec les autres formulations doit donc être interprétée avec prudence, la disponibilité en eau durant la cure étant différente. Ce résultat s'explique par l'état hydrique du RS2 lors des essais : avec une teneur en eau initiale de 1,57 % pour une absorption de 6,50 %, ce sable était nettement sous-saturé, nécessitant une correction en eau de gâchage importante. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer cette réactivité accrue de l'agent expansif. D'une part, l'eau ajoutée en correction d'absorption, disponible librement dans le malaxeur dès les premières minutes, constitue une ressource directement exploitable par l'agent expansif pour alimenter la réaction de formation d'ettringite. D'autre part, il est possible que la cinétique de dissolution de l'agent expansif soit plus rapide que la cinétique d'absorption résiduelle des granulats de RS2 au moment du malaxage, permettant à l'agent de capter une fraction significative de cette eau avant qu'elle ne soit absorbée par les pores des granulats. Ces deux effets conjugués peuvent expliquer le potentiel de gonflement particulièrement élevé observé pour cette formulation.

Le **NS+RS1+K100** présente un comportement intermédiaire (+929 $\mu\text{m}/\text{m}$ d'expansion, −706 $\mu\text{m}/\text{m}$ de retrait final), cohérent avec la contribution respective des deux sables qui le composent.

L'agent expansif de type K réduit donc significativement le retrait pour l'ensemble des formulations, avec une efficacité maximale pour le NS (81 %) et le RS2 (64 %), mais limitée pour le RS1 (34 %), dont la saturation initiale constitue un facteur limitant.

Effet du mûrissement : comparaison avec les résultats de Mettlen (2025)

La comparaison entre les résultats obtenus dans ce travail, avec une cure en immersion dans l'eau de chaux, et ceux de Mettlen (2025), réalisés en chambre humide, permet d'évaluer directement l'influence du mode de mûrissement sur l'efficacité de l'agent expansif. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 14.

TABLE 14 – Effet du mûrissement sur les variations dimensionnelles des formulations K100 : immersion (ce travail) vs chambre humide Mettlen (2025)

Mélange	Immersion		Ch. humide		Gain exp. [%]	Réd. retrait [%]
	Exp.	Ret.	Exp.	Ret.		
	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		
NS+K100	+797	-132	+61,3	-1044	+1200	87
RS1+K100	+888	-1788	+606,7	-2116	+46	15
RS2+K100	+1238	-576	+175,3	-1663	+606	65
NS+RS1+K100	+929	-706	+342,7	-1622,7	+171	56

Exp. : expansion maximale en cure humide ; *Ret.* : retrait final à 35 jours ; *Gain exp.* : gain d'expansion immersion vs chambre humide ; *Réd. retrait* : réduction du retrait final immersion vs chambre humide. *Ch. humide* : données issues de Mettlen (2025).

Les différences sont frappantes et cohérentes pour l'ensemble des formulations : la cure en immersion produit systématiquement une expansion initiale nettement plus élevée et un retrait final réduit par rapport à la cure en chambre humide. Ces résultats apportent une réponse directe à la première partie de la question de recherche : *le mode de mûrissement constitue un facteur déterminant de l'efficacité de l'agent expansif de type K.*

La formation d'ettringite étant une réaction fortement consommatrice en eau, une disponibilité en eau maximale durant la cure favorise directement l'amplitude de l'expansion. En chambre humide, l'apport en eau est limité aux échanges par diffusion à travers la surface des éprouvettes, ce qui peut conduire à une sous-alimentation de la réaction expansive, particulièrement dans le cœur des éprouvettes. En immersion, l'eau est disponible en quantité illimitée et pénètre par capillarité dans toute la porosité du matériau, alimentant pleinement la réaction sur l'ensemble du volume. Ces effets sont particulièrement marqués pour le NS et le RS2, avec des gains d'expansion respectifs de +1200 % et +606 % et des réductions de retrait de 87 % et 65 %. Le RS1 bénéficie moins de l'immersion, confirmant que sa saturation initiale constitue un facteur limitant qui atténue significativement l'effet du mode de mûrissement, contrairement aux autres formulations.

La cure en immersion améliore donc drastiquement l'efficacité de l'agent expansif par rapport à une cure en chambre humide, en assurant une disponibilité en eau continue pour la formation d'ettringite, et constitue une condition indispensable à son efficacité.

Effet du dosage : comparaison K100 vs K50

Afin d'évaluer l'influence du dosage en agent expansif, les formulations incorporant 50 % du dosage recommandé (K50) ont été comparées aux formulations K100. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 15 et les courbes sont reprises sur la Figure 50.

TABLE 15 – Comparaison des variations dimensionnelles : K50 et K100

Mélange	K50		K100		Gain exp. [%]	Réd. retrait [%]
	Exp. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ret. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Exp. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ret. [$\mu\text{m}/\text{m}$]		
NS	+351	-528	+797	-132	+127	75
NS+RS1	+438	-1158	+929	-706	+112	39
RS1	+397	-2553	+888	-1788	+124	30
RS2	+591	-1159	+1238	-576	+109	50

Exp. : expansion maximale en cure humide ; *Ret.* : retrait final à 35 jours ; *Gain exp.* : gain d'expansion de K50 à K100 ; *Réd. retrait* : réduction du retrait de K50 à K100.

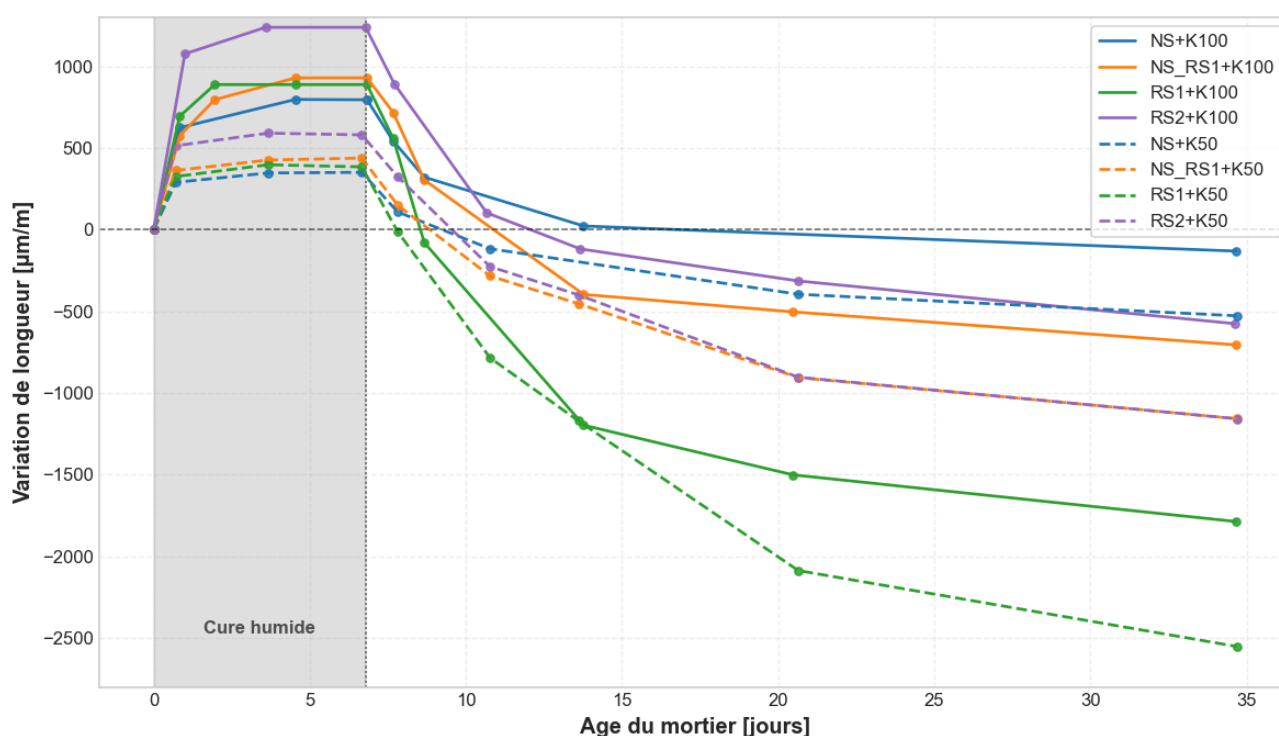


FIGURE 50 – Comparaison des variations dimensionnelles K50 vs K100

Le passage de K50 à K100 se traduit par une augmentation de l'expansion initiale d'environ 100 % pour toutes les formulations, soit un doublement quasi exact, confirmant une relation proportionnelle entre le dosage en agent expansif et l'amplitude de l'expansion générée. Cette proportionnalité est cohérente avec le mécanisme réactionnel : la quantité d'ettringite formée, et donc l'expansion induite, dépend directement de la quantité d'agent disponible pour réagir.

L'effet sur le retrait final est également perceptible mais moins systématique, et dépend fortement de la nature du sable. Pour le NS, doubler le dosage permet de réduire le retrait de 75 %, passant de $-528 \mu\text{m/m}$ (K50) à $-132 \mu\text{m/m}$ (K100), tout en restant inférieur à celui de la formulation de référence ($-684 \mu\text{m/m}$). Pour le RS1 en revanche, la réduction n'est que de 30 % (-2553 à $-1788 \mu\text{m/m}$), ce qui tend à confirmer que l'agent K à 100 % du dosage n'a pas exprimé son plein potentiel dans cette formulation vraisemblablement en raison de la saturation initiale du RS1. Le RS2 (50 %) et le NS+RS1 (39 %) présentent un comportement intermédiaire, confirmant la hiérarchie observée tout au long de cette section : $\text{NS} > \text{RS2} \approx \text{NS+RS1} > \text{RS1}$ en termes de performances dimensionnelles.

Le dosage en agent expansif a un effet directement proportionnel sur l'expansion initiale, avec un doublement de l'expansion entre K50 et K100 ; son influence sur le retrait final est en revanche moins linéaire et dépend fortement de la nature du sable, restant limitée pour le RS1 quelle que soit la quantité d'agent utilisée.

Synthèse : effet de l'agent expansif de type K

L'efficacité de l'agent expansif de type K repose avant tout sur la disponibilité en eau libre au moment de la réaction, conditionnée par trois paramètres : l'état hydrique des granulats (facteur limitant structurel pour le RS1), le mode de mûrissement (la cure en immersion étant indispensable à l'expression du plein potentiel de l'agent) et le dosage (dont l'effet proportionnel sur l'expansion reste subordonné aux deux premiers). Ces résultats placent la gestion de l'eau libre au cœur de la maîtrise du retrait par agent expansif dans ces formulations.

3.2.4 Effet de l'agent expansif type K combiné au superplastifiant

Les derniers mélanges étudiés dans cette série combinent l'agent expansif de type K avec un superplastifiant, impliquant un rapport E/L réduit de 0,10 par rapport aux formulations sans superplastifiant. En raison du retard de prise induit par le superplastifiant, le démoulage a été réalisé environ 16 heures après le moulage, contre 8 heures pour les formulations sans superplastifiant. La première mesure dimensionnelle a donc été effectuée à cet instant, ce qui implique une perte potentielle d'information sur les déformations très précoces, dont les conséquences seront évoquées plus loin.

TABLE 16 – Variations dimensionnelles des formulations K100+SP et K50+SP

Mélange	K100+SP		K50+SP	
	Exp. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ret. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Exp. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ret. [$\mu\text{m}/\text{m}$]
NS	+791	−103	+503	−368
NS+RS1	+596	−1044	+470	−1200
RS1	+489	−2171	+339	−2445
RS2	+647	−947	+483	−1080

Exp. : expansion maximale en cure humide ; Ret. : retrait final à 35 jours.

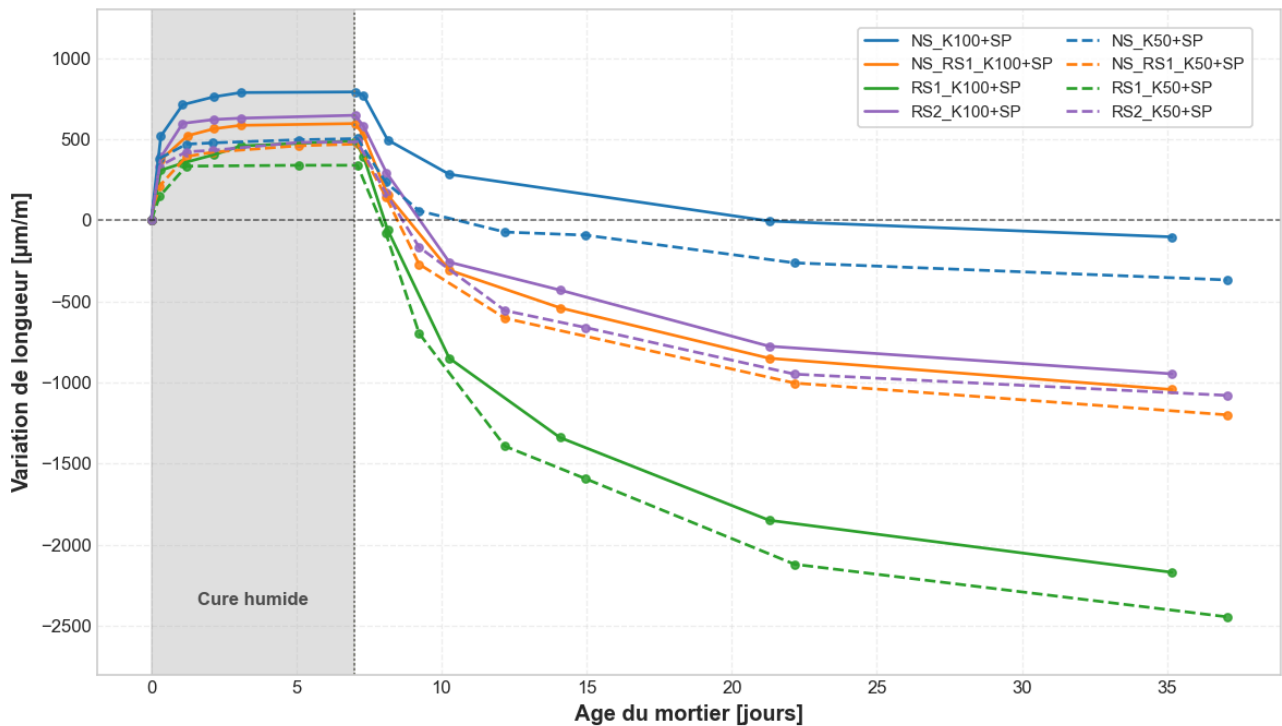


FIGURE 51 – Comparaison des variations dimensionnelles K100+SP vs K50+SP

Le comportement global de ces formulations suit la même hiérarchie que celle observée tout au long de cette section : le NS présente le retrait le plus faible, le RS1 le plus élevé, et le RS2 ainsi que le NS+RS1 des valeurs intermédiaires. Pour tous les mélanges, le bilan dimensionnel final reste négatif.

Ce qui est en revanche surprenant est l'ordre des expansions initiales : c'est le NS qui présente l'expansion la plus élevée, bien qu'il soit le moins poreux. On aurait pourtant pu s'attendre à ce que les sables recyclés, plus poreux et nécessitant davantage d'eau, favorisent davantage la réaction expansive. Plusieurs éléments permettent d'expliquer ce phénomène. D'une part, il a été observé sur l'ensemble des résultats précédents que les formulations à sable recyclé développent leur expansion principalement dans les premières heures suivant le moulage, de manière plus rapide et concentrée dans le temps que les formulations à sable naturel. En démoulant à 16 heures au lieu de 8 heures, une fraction significative de cette expansion précoce n'a pas pu être

capturée par les mesures, conduisant à une sous-estimation de l'expansion réelle des mélanges à sable recyclé. D'autre part, les formulations NS sont celles ayant nécessité le dosage en superplastifiant le plus élevé, dépassant légèrement la plage recommandée par la fiche technique, ce qui a pu induire le retard de prise le plus important et donc décaler davantage le début de la réaction expansive vers des âges mieux capturés par les premières mesures.

Comparaison K100+SP vs K50+SP

TABLE 17 – Comparaison des variations dimensionnelles : K50+SP et K100+SP

Mélange	K50+SP		K100+SP		Gain exp. [%]	Réd. retrait [%]
	Exp. [µm/m]	Ret. [µm/m]	Exp. [µm/m]	Ret. [µm/m]		
NS	+503	−368	+791	−103	+57	72
NS+RS1	+470	−1200	+596	−1044	+27	13
RS1	+339	−2445	+489	−2171	+44	11
RS2	+483	−1080	+647	−947	+34	12

Exp. : expansion maximale en cure humide ; Ret. : retrait final à 35 jours ; Gain exp. : gain d'expansion de K50+SP à K100+SP ; Réd. retrait : réduction du retrait de K50+SP à K100+SP.

Contrairement à ce qui avait été observé pour les formulations sans superplastifiant (voir section 3.2.3), où doubler le dosage doublait approximativement l'expansion, la différence entre K50+SP et K100+SP est ici nettement moins marquée et ne suit plus de relation proportionnelle (Tableau 17). À l'exception du NS, l'augmentation d'expansion entre K50+SP et K100+SP est inférieure à 45 %. La réduction du retrait entre K50+SP et K100+SP suit la même tendance : si le NS bénéficie d'une amélioration notable (−72 %), les formulations à base de sable recyclé n'enregistrent qu'une faible réduction du retrait (−11 à −13 %), nettement inférieure à ce qui a été observé sans superplastifiant. Ces résultats indiquent que les formulations K100+SP n'exploitent pas pleinement le potentiel de l'agent expansif : la réduction du rapport E/L prive l'agent d'une partie de l'eau libre nécessaire à la formation d'ettringite, limitant son efficacité indépendamment du dosage. Il convient toutefois de rappeler que le démoulage tardif, réalisé à 16 heures pour les formulations avec superplastifiant, entraîne une perte d'information sur l'expansion très précoce.

Impact du démoulage tardif : essais complémentaires

Au vu de la perte d'information potentielle dans les premières heures, la décision a été prise de refaire les mélanges NS+K100+SP et RS1+K100+SP avec un démoulage à environ 9 heures, plus proche des conditions des autres formulations. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 18.

TABLE 18 – Comparaison des résultats selon le moment de démoulage : NS+K100+SP et RS1+K100+SP

Mélange	Démoulage 16h		Démoulage 9h		Diff. exp. [%]
	Exp. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ret. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Exp. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Ret. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
NS+K100+SP	+791	-103	+834	-166	+5
RS1+K100+SP	+489	-2171	+820	-2135	+68

Exp. : expansion maximale en cure humide ; *Ret.* : retrait final à 35 jours ; *Diff. exp.* : gain d'expansion entre démoulage 16h et démoulage 9h.

L'influence du moment de démoulage apparaît clairement : pour le RS1, démouler 7 heures plus tôt révèle une expansion de $+820 \mu\text{m}/\text{m}$ contre $+489 \mu\text{m}/\text{m}$, soit 68 % d'expansion supplémentaire non capturée lors du premier essai. Pour le NS en revanche, la différence n'est que de 5 %, confirmant que l'expansion du NS se développe plus progressivement dans le temps et que la cinétique d'expansion est moins concentrée dans les premières heures suivant le moulage. Ces résultats valident l'hypothèse formulée précédemment : les formulations à sable recyclé développent leur expansion de manière plus précoce et concentrée, et sont donc plus sensibles à la fenêtre de mesure. Par ailleurs, le retrait final reste dans le même ordre de grandeur pour les deux moments de démoulage, ce qui confirme que la perte d'information concerne exclusivement la phase d'expansion et non le comportement à long terme.

Ce sont donc les valeurs issues du démoulage à 9 heures qui seront retenues pour la comparaison avec les formulations K100 sans SP.

Impact de l'incorporation du superplastifiant : K100 vs K100+SP

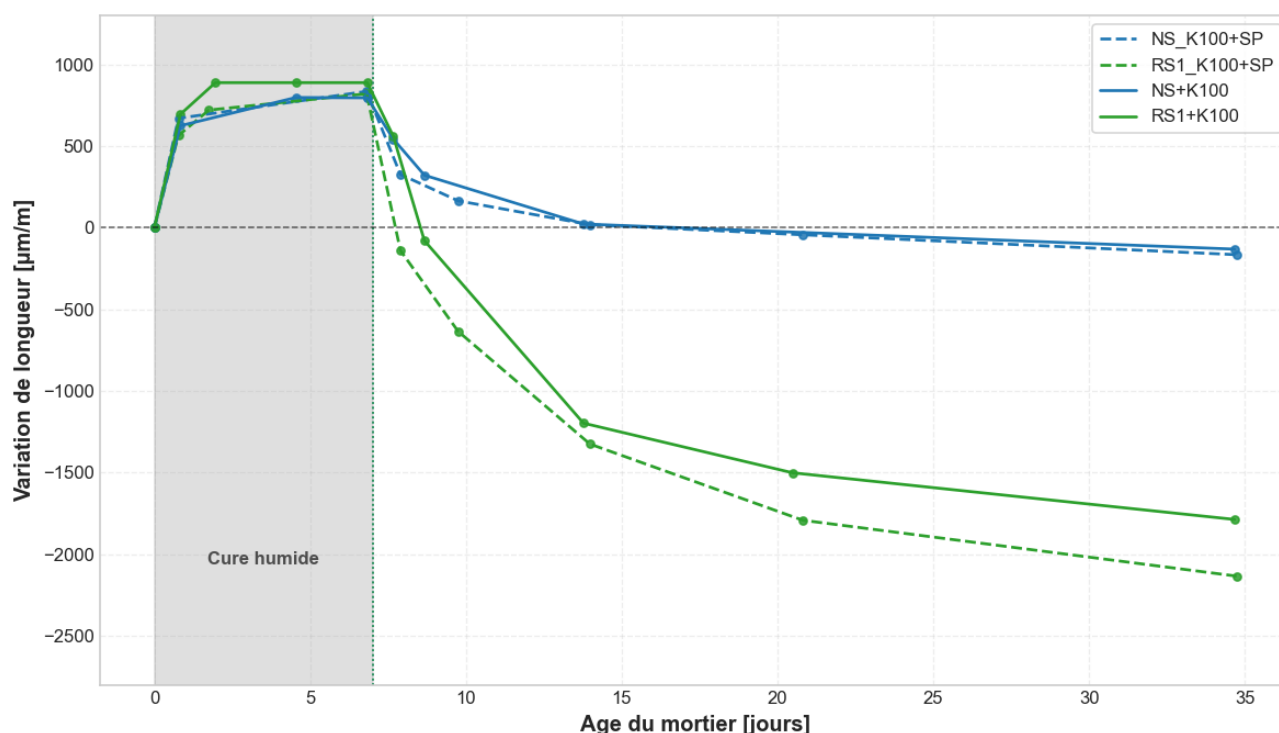


FIGURE 52 – Comparaison des variations dimensionnelles K100 vs K100+SP

La comparaison entre K100 et K100+SP, réalisée sur la base des essais à démoulage équivalents, permet d'isoler l'effet combiné du superplastifiant et de la réduction du rapport E/L sur le comportement expansif et le retrait. Contrairement à ce qui a été observé pour les formulations sans agent expansif, où l'ajout de superplastifiant réduisait légèrement le retrait par densification de la matrice, l'effet net est ici moins favorable : si la réduction du rapport E/L contribue bien à densifier la matrice cimentaire, elle prive simultanément l'agent expansif d'une partie de l'eau libre nécessaire à la formation d'ettringite. Or, c'est précisément cette réaction expansive qui constitue le levier principal de compensation du retrait dans ces formulations, et c'est sa limitation qui domine le bilan final.

Pour le NS, l'expansion est légèrement réduite avec superplastifiant ($+797$ vs $+834 \mu\text{m/m}$), sans que cela ne se traduise par une dégradation notable du retrait final, la densification de la matrice compensant partiellement la perte d'efficacité de l'agent. Pour le RS1 en revanche, cette même perte d'efficacité de l'agent ($+820$ vs $+888 \mu\text{m/m}$) se traduit par un retrait final plus élevé (-2171 vs $-1788 \mu\text{m/m}$ sans SP), illustrant que lorsque l'agent opère déjà en conditions limitantes, la densification de la matrice ne suffit pas à compenser la perte d'expansion, et toute réduction supplémentaire de la disponibilité en eau se répercute directement sur le bilan dimensionnel.

Ce résultat est d'autant plus notable que, pour les formulations sans agent expansif, la réduction du rapport E/L a montré un effet bénéfique sur le retrait. Ici, cet avantage disparaît : la perte d'efficacité de l'agent expansif annule et dépasse le gain apporté par la densification,

confirmant que c'est bien la réaction expansive, et non le rapport E/L , qui constitue le levier déterminant du comportement dimensionnel à long terme dans ces formulations.

Synthèse : effet combiné du superplastifiant et de l'agent expansif

L'incorporation de superplastifiant, combinée à la réduction du rapport E/L , ne réduit pas le retrait final par rapport aux formulations sans SP et pénalise le potentiel expansif de l'agent type K, particulièrement pour les sables recyclés, en réduisant la disponibilité en eau libre nécessaire à la formation d'ettringite. Contrairement aux formulations sans agent expansif où la densification de la matrice joue un rôle bénéfique, cet avantage est ici annulé par la perte d'efficacité de l'agent, confirmant que la disponibilité en eau constitue le facteur limitant déterminant dans ces conditions.

3.3 Analyse du retrait : barrettes scellées

Les barrettes scellées visent à isoler le retrait autogène du retrait de dessiccation, en empêchant tout échange hydrique avec l'extérieur. Le retrait autogène correspond à la contraction interne de la pâte hydratée, provoquée par la consommation d'eau lors de l'hydratation du ciment et par la génération de forces capillaires au sein de la microstructure en cours de densification. Il est généralement d'autant plus prononcé que le rapport E/L est faible : la littérature indique qu'il devient significatif en dessous d'un rapport E/L de 0,40 pour des mortiers à sable naturel (Aïtcin et al., 1998). Les rapports E/L retenus ici, 0,40 pour le NS et 0,50 pour le RS1, se situent au-dessus de ce seuil, ce qui laisse supposer que le retrait autogène devrait rester limité. Il convient toutefois de noter que ce seuil de 0,40 a été établi pour des granulats naturels : sa validité pour des sables recyclés, dont la porosité élevée modifie les échanges hydriques internes, reste à vérifier. Les barrettes scellées permettent d'apporter une réponse directe à cette question.

Le démoulage a été effectué 16 heures après le contact eau-ciment. Immédiatement après démoulage, trois barrettes de chaque mélange ont été scellées en recouvrant intégralement leur surface avec trois couches de ruban adhésif en aluminium autocollant, empêchant tout échange hygrométrique avec l'air ambiant. La variation massique des éprouvettes scellées n'a montré aucune évolution notable au cours de la période de mesure, validant l'efficacité du scellement. La seule variabilité entre les mélanges est donc la nature du sable et le dosage en agent expansif : 0 %, 50 % et 100 % du dosage recommandé.

Comportement des barrettes scellées

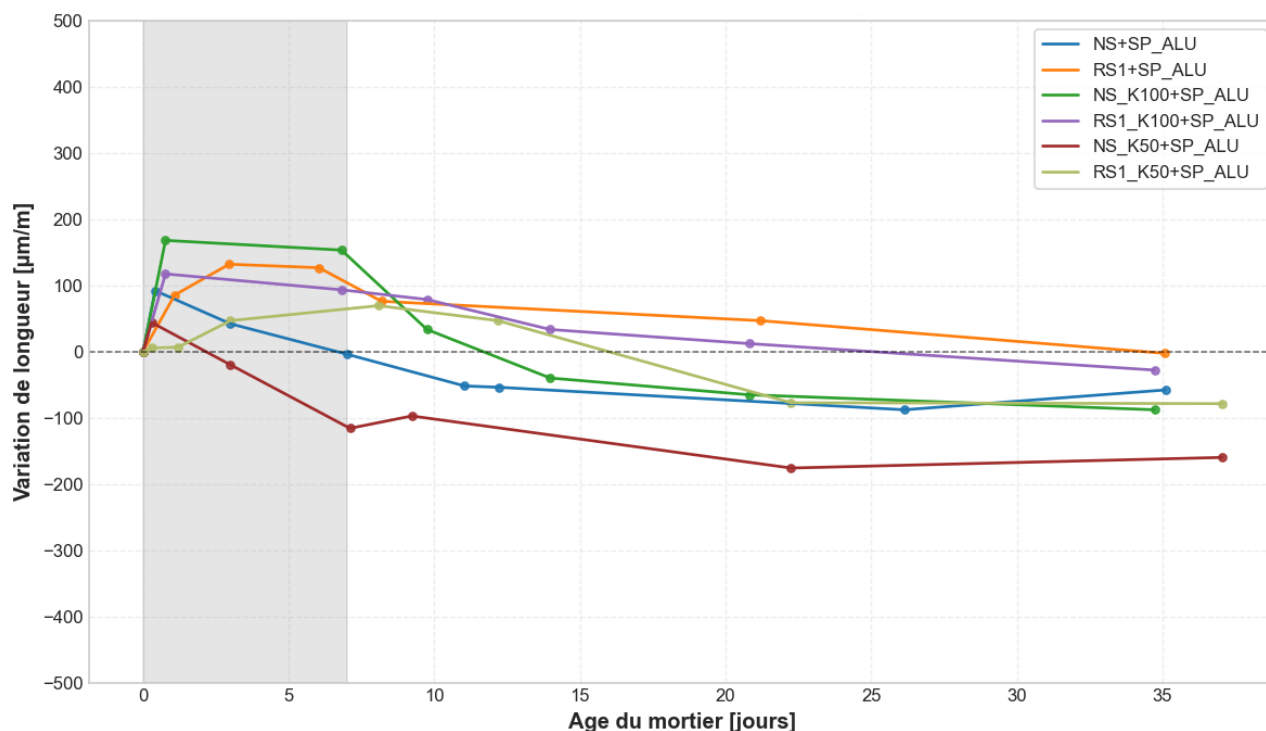


FIGURE 53 – Variations dimensionnelles des barrettes scellées

TABLE 19 – Retrait autogène final à 35 jours : barrettes scellées

Mélange	SP [$\mu\text{m/m}$]	K50+SP [$\mu\text{m/m}$]	K100+SP [$\mu\text{m/m}$]
NS	-58	-160	-88
RS1	-3	-78	-28

La Figure 53 et le Tableau 19 montrent que les variations dimensionnelles des barrettes scellées sont très limitées pour l'ensemble des formulations, oscillant entre +150 et $-170 \mu\text{m/m}$. Ce constat appelle deux observations importantes.

La première concerne l'absence d'expansion significative, même pour les formulations incorporant 100 % du dosage recommandé en agent expansif. Dans un système scellé, aucun apport en eau extérieur n'est possible : l'eau disponible pour alimenter la réaction de formation d'ettringite se limite à l'eau de gâchage résiduelle après hydratation du ciment. Or, avec des rapports E/L de 0,40 et 0,50, cette eau résiduelle est particulièrement faible, insuffisante pour développer un potentiel de gonflement significatif, ce qui confirme une fois de plus que la cure en immersion est indispensable à l'efficacité de l'agent de type K.

La seconde observation concerne le retrait autogène lui-même, qui reste faible malgré les rapports E/L réduits. Cela confirme que les valeurs de 0,40 pour le NS et 0,50 pour le RS1 permettent bien de s'affranchir d'un retrait autogène significatif, comme le mentionne la littérature. Les courbes sont par ailleurs très proches entre formulations, ce qui rend difficile toute

conclusion robuste sur l'influence du dosage en agent expansif ou du type de sable. Les écarts observés restent dans la gamme de variabilité expérimentale et ne permettent pas de dégager de tendance significative. On notera néanmoins que le RS1 tend à présenter un retrait légèrement inférieur à celui du NS, ce qui est cohérent avec le rôle modérateur de sa porosité élevée, en restituant progressivement une partie de l'eau qu'il contient vers la pâte en cours d'hydratation.

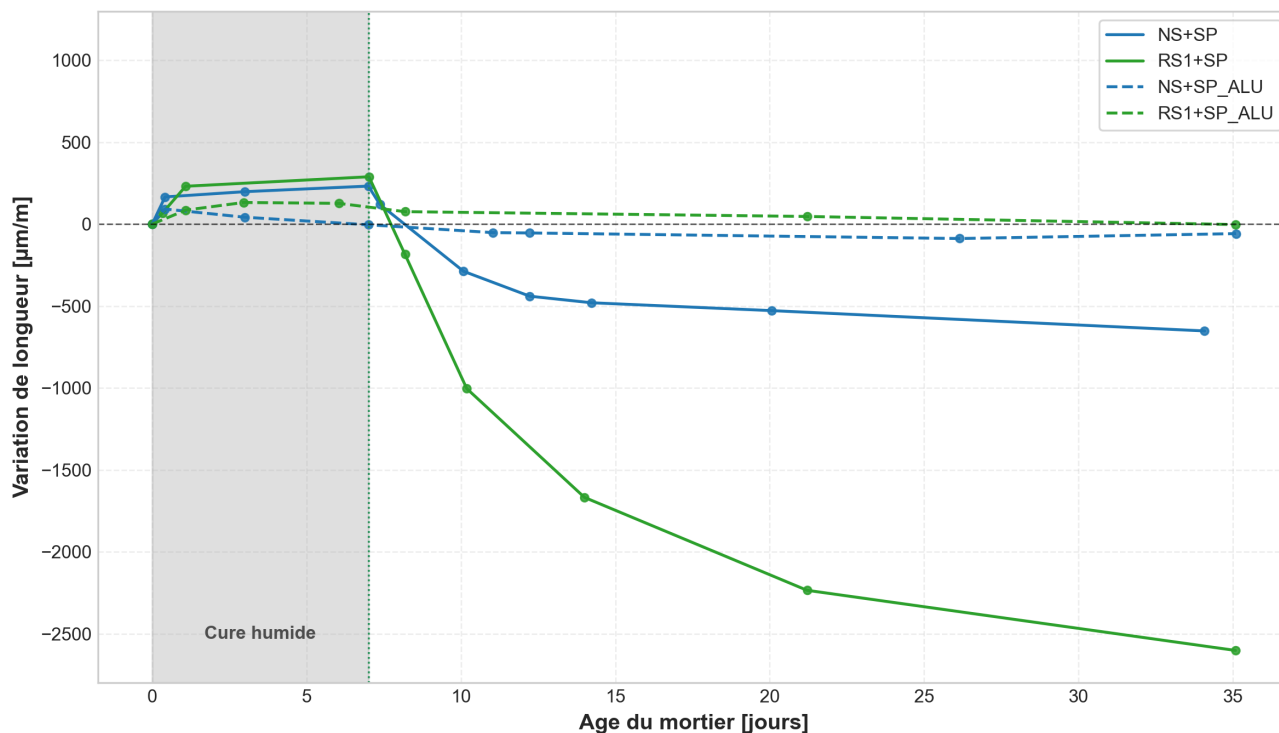


FIGURE 54 – Comparaison des variations dimensionnelles : barrettes scellées vs barrettes non scellées

La Figure 54 met en perspective l'amplitude du retrait autogène par rapport au retrait total mesuré sur les barrettes non scellées. La comparaison est sans équivoque : les courbes des barrettes scellées restent proches de zéro tout au long de la période d'essai, tandis que les barrettes non scellées présentent un retrait de dessiccation très important, confirmant que c'est bien ce dernier qui constitue le mécanisme dominant à maîtriser dans ces formulations.

Synthèse : barrettes scellées

Le retrait autogène est négligeable pour l'ensemble des formulations, confirmant que les rapports E/L retenus, 0,40 pour le NS et 0,50 pour le RS1, permettent de s'affranchir de ce mécanisme, y compris pour les sables recyclés. L'agent expansif ne développe pas non plus de gonflement en système scellé, faute d'eau disponible pour la formation d'ettringite. Cela confirme que le retrait de dessiccation reste le mécanisme prépondérant et que la cure en immersion constitue une condition indispensable à l'efficacité de l'agent de type K.

3.4 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des mortiers constituent un indicateur complémentaire aux variations dimensionnelles permettant d'évaluer l'effet des différents paramètres étudiés : nature du sable, incorporation de superplastifiant et dosage en agent expansif. L'analyse conjointe de la résistance à la compression, de la résistance à la traction indirecte par fendage et du module d'élasticité permet de vérifier si les tendances observées sur le comportement dimensionnel se reflètent également dans les performances mécaniques des formulations, et d'identifier les interactions éventuelles entre les différents paramètres.

Les essais de résistance à la compression et de résistance à la traction indirecte par fendage ont été réalisés sur trois échantillons par formulation, après 28 jours de cure en immersion dans de l'eau de chaux. Les barres de dispersion représentées sur les graphiques correspondent à l'écart-type des trois mesures, permettant d'apprécier la variabilité expérimentale et la représentativité des valeurs moyennes (valeurs des échantillons cf. Annexe C.3 et C.4). Le module d'élasticité a quant à lui été déterminé sur un seul échantillon par formulation, soumis à trois chargements successifs. Les résultats doivent donc être interprétés de manière qualitative et comparative, et non comme des valeurs absolues.

Il convient également de noter que les valeurs obtenues dans ce travail sont systématiquement inférieures à celles rapportées par Mettlen (2025), qui a réalisé ses essais sur des échantillons conservés en chambre humide. Les éprouvettes testées dans ce travail étant immergées dans l'eau de chaux jusqu'au moment de l'essai, leur degré de saturation est plus élevé que celui des échantillons de Mettlen (2025). Le Tableau 20 illustre cet écart pour les formulations de référence : les résistances obtenues en immersion sont inférieures de 16 à 23 % à celles mesurées en chambre humide, ce qui suggère que la saturation plus importante des éprouvettes a un effet pénalisant sur les résistances mesurées.

TABLE 20 – Comparaison des résistances à la compression des mélanges sans adjuvants à 28 jours : ce travail vs Mettlen (2025)

Mélange	Immersion [MPa]	Ch. humide [MPa]	Écart [%]
NS	38,57	49,93	−23
RS1	21,09	25,10	−16
NS+RS1	23,96	30,91	−23

Ch. humide : données issues de Mettlen (2025) ; Écart : différence relative entre immersion et chambre humide.

3.4.1 Résistance à la compression à 28 jours

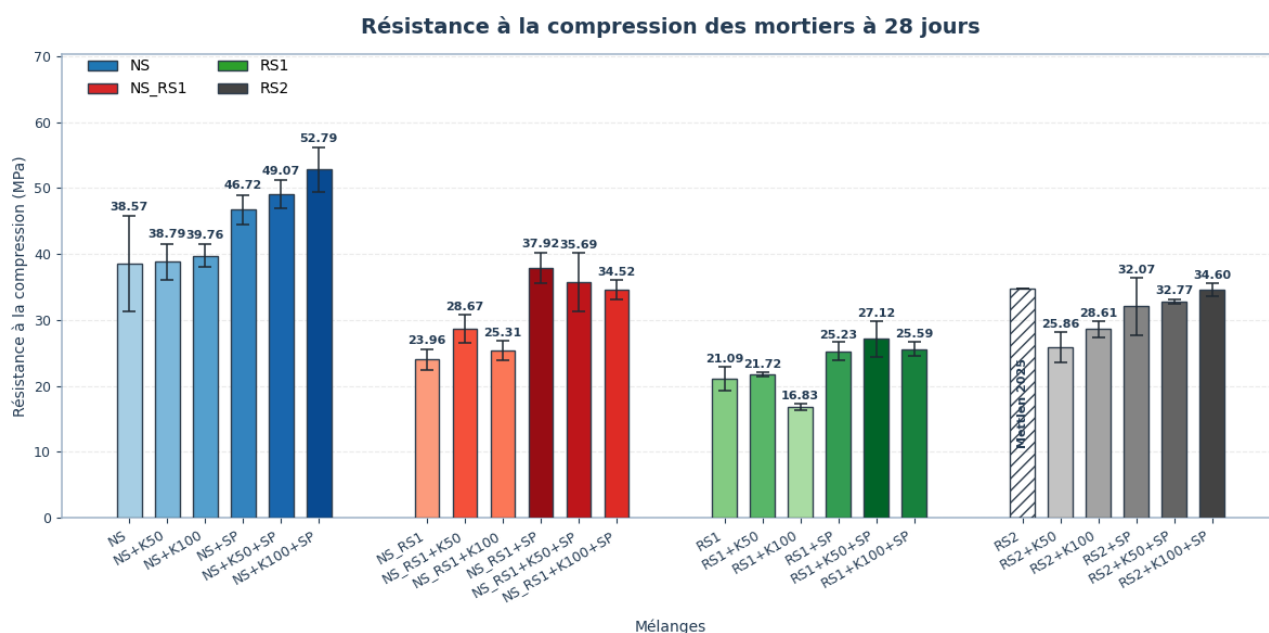


FIGURE 55 – Résistance à la compression des mortiers à 28 jours

Influence du type de sable

La Figure 55 met en évidence une hiérarchie claire des résistances en fonction du type de sable. Le mortier de référence NS présente la résistance la plus élevée avec 38,57 MPa, reflétant une microstructure dense, une faible porosité et un rapport E/L de 0,50 favorable à une bonne compacité. À l’opposé, le RS1 présente la résistance la plus faible avec 21,09 MPa, soit une diminution de 45 % par rapport au NS. Le RS2 obtient 34,60 MPa (valeur issue des travaux de Mettlen (2025) réalisés en chambre humide, ce mélange n’ayant pas été reproduit dans le cadre de ce travail) soit une performance nettement meilleure que le RS1 malgré un rapport E/L identique. Le mélange NS+RS1 présente quant à lui une valeur intermédiaire de 23,96 MPa, cohérente avec la contribution respective des deux sables.

Cette hiérarchie reflète directement l’influence de la porosité intrinsèque des sables recyclés sur les performances mécaniques. La porosité plus élevée des granulats recyclés, liée à la présence de pâte de ciment résiduelle adhérente aux grains, fragilise la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le granulat et la nouvelle matrice cimentaire. Cette pâte résiduelle, plus poreuse et moins résistante que le granulat d’origine, constitue un point faible mécanique qui s’accroît avec le taux de substitution : maximal pour le RS1 (–45 % par rapport au NS), il est nettement atténué pour le RS2 dont la porosité intrinsèque est plus faible, et intermédiaire pour le NS+RS1 qui ne substitue que partiellement le sable naturel.

Influence du superplastifiant

L'incorporation de superplastifiant, associée à la réduction du rapport E/L, améliore significativement la résistance à la compression pour l'ensemble des formulations (Tableau 21). La réduction du rapport E/L densifie la matrice cimentaire en diminuant la porosité capillaire résiduelle, limitant ainsi les points faibles microstructuraux et améliorant la cohésion interne de la pâte.

TABLE 21 – Effet du superplastifiant sur la résistance à la compression

Mélange	Référence [MPa]	+SP [MPa]	Gain [%]
NS	38,57	46,72	+21
NS+RS1	23,96	37,92	+58
RS1	21,09	25,23	+20
RS2	34,60	32,07	−7

Les gains sont particulièrement marqués pour les formulations à sable recyclé : le NS+RS1 enregistre une augmentation de 58 %, portant sa résistance à 37,92 MPa, soit une valeur proche de celle du NS de référence (38,57 MPa). Ce résultat est notable : il suggère que la réduction du rapport E/L par incorporation de superplastifiant constitue un levier efficace pour compenser partiellement la perte de résistance liée à l'incorporation de sables recyclés, et pourrait permettre d'atteindre des performances comparables à celles d'un mortier à sable naturel. Pour le RS1, le gain reste plus modeste (+20 %), la porosité intrinsèque élevée du granulat constituant un facteur limitant que la seule réduction du rapport E/L ne suffit pas à compenser entièrement.

Le RS2 présente en apparence une légère baisse (−7 %), attribuable aux conditions de cure différentes : la valeur de référence (Mettlen, 2025) a été obtenue en chambre humide, contre une cure en immersion pour la valeur RS2+SP. En appliquant la correction de cure estimée à $\approx 22\%$, sur base des écarts observés pour le NS et le NS+RS1, la résistance de référence corrigée du RS2 serait de l'ordre de 27,0 MPa si on avait fait cette formulation pour les mêmes conditions de cure, soit un gain estimé de +18 %, cohérent avec les autres formulations.

Influence de l'agent expansif

L'incorporation de l'agent expansif de type K produit des effets contrastés selon le type de sable, révélant une interaction complexe entre la réaction expansive et la microstructure du mortier.

Pour le NS, l'agent expansif améliore modérément la résistance : NS+K50 atteint 38,79 MPa et NS+K100 39,76 MPa, contre 38,57 MPa pour la référence. La formation d'ettringite, en comblant partiellement la porosité capillaire, est susceptible de densifier localement la matrice et de contribuer à une légère augmentation de résistance, bien que cet effet reste modéré.

Pour le **RS2**, on observe également une amélioration progressive avec le dosage : RS2+K50 atteint 25,86 MPa et RS2+K100 28,61 MPa, confirmant que l'agent expansif réagit efficacement dans ce contexte et contribue à densifier la matrice.

Pour le **RS1** en revanche, le comportement est inverse et particulièrement instructif : RS1+K50 atteint 21,72 MPa, valeur proche de la référence (21,09 MPa), indiquant qu'à faible dosage la réaction expansive se développe suffisamment pour maintenir les performances sans perturber la matrice. En revanche, RS1+K100 chute à 16,83 MPa, soit une diminution de 20 % par rapport à la référence RS1. Ce résultat est cohérent avec les observations faites sur le retrait : à 100 % du dosage, l'agent n'a pas réagi efficacement dans ce mélange en raison de l'état hydrique du RS1, qui a nui à la disponibilité en eau libre nécessaire à la formation d'ettringite, affaiblissant ainsi la résistance globale. Le mélange **NS+RS1** suit une tendance similaire : NS+RS1+K100 (25,31 MPa) reste légèrement supérieur à la référence NS+RS1 (23,96 MPa) mais inférieur à NS+RS1+K50 (28,67 MPa), confirmant qu'un dosage à 100 % en agent expansif est pénalisant dans les mélanges incorporant du RS1.

Combinaison superplastifiant et agent expansif

Les formulations combinant superplastifiant et agent expansif atteignent les résistances les plus élevées de toutes les séries testées, traduisant un effet synergique entre la densification de la matrice par réduction du rapport E/L et l'expansion ettringitique. Pour le **NS**, NS+K50+SP et NS+K100+SP culminent respectivement à 49,83 MPa et 52,79 MPa, soit +13 % par rapport à NS+SP seul : la réduction du rapport E/L assure une eau libre suffisamment disponible pour alimenter efficacement la réaction de l'agent K, maximisant ainsi la densification de la matrice. Le **NS+RS1** bénéficie également de cette synergie, avec NS+RS1+K100+SP à 34,52 MPa (+44 % par rapport à la référence NS+RS1), confirmant l'intérêt de combiner les deux adjuvants pour les mélanges incorporant du sable recyclé.

Pour le **RS2**, la combinaison produit également des résultats favorables, cohérents avec le comportement observé pour le NS : la faible absorption du RS2 n'entrave pas la disponibilité en eau libre, permettant à l'agent K de réagir efficacement en présence du superplastifiant.

Pour le **RS1** en revanche, la situation est plus nuancée. L'ajout du superplastifiant apporte un gain notable par rapport aux formulations K sans SP, RS1+K100+SP atteint 25,59 MPa contre 16,83 MPa pour RS1+K100 seul, indiquant que la réduction du rapport E/L compense partiellement les effets négatifs de l'agent K à fort dosage. Toutefois, cette réduction du rapport E/L aggrave paradoxalement la compétition pour l'eau libre : en diminuant la quantité d'eau totale de gâchage, elle laisse encore moins d'eau disponible pour la réaction de l'agent K après absorption par le granulat, limitant ainsi l'effet synergique attendu. RS1+K50+SP présente de ce fait de meilleures perspectives que RS1+K100+SP, le dosage réduit en agent étant mieux adapté à la disponibilité hydrique réelle de ce mélange.

Il convient toutefois de nuancer ces interprétations au regard des barres de dispersion (Fi-

gure 55) : certains écarts entre formulations proches restent dans la plage de variabilité expérimentale et doivent être interprétés avec prudence.

L'effet combiné du superplastifiant et de la réduction du rapport E/L constitue le levier le plus efficace en compression : il permet d'atteindre des résistances comparables à la référence NS lors d'une substitution partielle à 50 % avec le RS1, et s'en approche significativement en substitution totale avec le RS2. L'ajout de l'agent expansif à ces formulations ne fait pas varier significativement les résistances obtenues avec le superplastifiant seul, que ce soit en hausse pour le NS ou en baisse pour le RS1 : c'est donc l'effet combiné SP-E/L qui domine, l'agent expansif jouant un rôle secondaire en termes de résistance à la compression.

3.4.2 Résistance à la traction indirecte à 28 jours

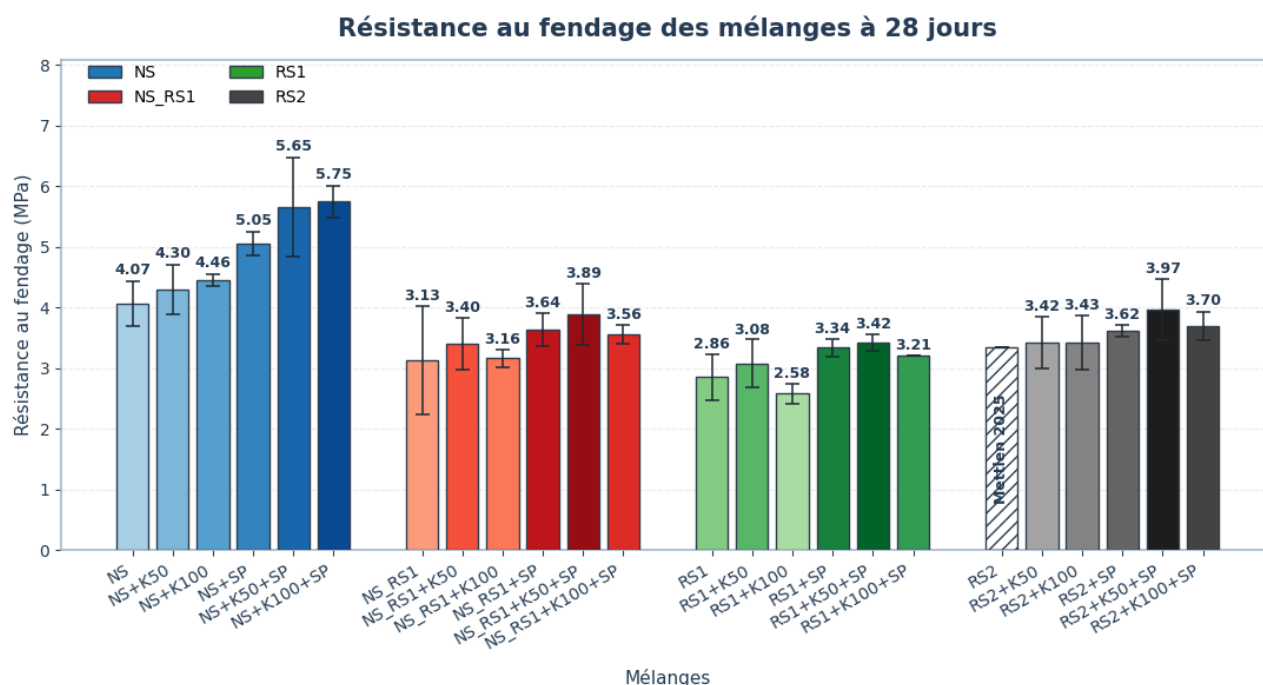


FIGURE 56 – Résistance au fendage des mortiers à 28 jours

Influence du type de sable

Les résultats de l'essai de fendage, présentés à la Figure 56, confirment la hiérarchie observée en compression : le NS présente la résistance la plus élevée, tandis que le RS1 affiche la valeur la plus faible ($-29,7\%$ par rapport au NS), le RS2 (Mettlen, 2025) et le NS+RS1 se situant à des niveaux intermédiaires cohérents avec leur composition. Les barres de dispersion étant plus marquées qu'en compression, seules les différences clairement supérieures à l'écart-type peuvent être considérées comme significatives.

Influence du superplastifiant et de l'agent expansif

Le superplastifiant améliore la résistance au fendage pour toutes les formulations, à l'image de ce qui a été observé en compression. La densification de la matrice par réduction du rapport E/L renforce la cohésion interne et l'interface pâte-granulat, avec des gains de l'ordre de 16 à 24 % selon le mélange. Ce gain est particulièrement notable pour le NS+RS1+SP, dont la résistance se rapproche sensiblement de celle du NS de référence, confirmant que l'effet combiné SP-E/L permet de compenser en partie la perte de résistance liée à l'incorporation de sable recyclé.

L'agent expansif produit des effets analogues à ceux observés en compression. Pour le NS et le RS2, dont les conditions hydriques sont favorables, on observe une amélioration progressive et modérée avec le dosage. Pour le RS1 en revanche, le comportement s'inverse à fort dosage : RS1+K100 chute en dessous de la référence RS1, confirmant que l'agent n'a pas réagi efficacement dans ce mélange.

Les formulations combinant superplastifiant et agent expansif atteignent les meilleures performances de la série. Pour le NS, la synergie entre densification de la matrice et expansion ettringitique se traduit par les résistances au fendage les plus élevées. Pour le NS+RS1 et le RS2 en revanche, K50+SP surpasse K100+SP, suivant la même tendance qu'en compression et confirmant qu'un dosage modéré en agent expansif est plus adapté dès lors que la réduction du rapport E/L induite par le superplastifiant limite la disponibilité en eau libre. Néanmoins, l'ajout de l'agent expansif aux formulations avec superplastifiant ne modifie que peu les résistances obtenues avec le SP seul : c'est donc bien l'effet combiné SP-E/L qui domine, l'agent expansif jouant un rôle secondaire sur les performances mécaniques en fendage comme en compression.

3.4.3 Module d'élasticité à 28 jours

Pour rappel, l'essai du module d'élasticité a été adapté par rapport à la norme ASTM C469, en raison de l'absence de cage d'extensométrie adaptée aux dimensions des éprouvettes utilisées. Les déplacements mesurés correspondent à ceux de l'ensemble du système de la presse et non uniquement à la déformation réelle de l'éprouvette. Les résultats présentés dans cette section doivent donc être interprétés de manière qualitative et comparative, et non comme des valeurs absolues. Par ailleurs, l'essai ayant été réalisé sur un seul échantillon par formulation, une certaine prudence s'impose dans l'interprétation des écarts entre mélanges.

Trois chargements successifs ont été appliqués sur chaque éprouvette. L'analyse des courbes contrainte-déformation a rapidement mis en évidence que le premier chargement introduit une part importante de déplacements parasites, liés à la mise en contact progressive des plateaux de la presse avec l'éprouvette. La comparaison entre le module obtenu lors du premier chargement qui est systématiquement et significativement plus faible que ceux des chargements 2 et 3, ces derniers étant très proches l'un de l'autre(cf. Annexe C.7). Le premier chargement a donc été

exclu du calcul, et le module de Young a été déterminé comme la moyenne des modules obtenus lors des chargements 2 et 3.

Quatre approches de calcul ont été testées et comparées : la moyenne des pentes locales, la tangente locale à 50 % de la contrainte maximale, la tangente locale à 90 %, et la prescription normative ASTM C469. Les résultats de l'ensemble de ces approches sont disponibles en Annexe C.7. L'ASTM C469 a été retenue comme référence, car elle offre un cadre de calcul standardisé et reproductible. Les tangentes à 50 % et 90 % donnent des valeurs sensiblement différentes, reflétant la non-linéarité des courbes contrainte-déformation, bien visible sur la Figure 57 pour la formulation NS+K100 (cf. Annexe C.5 pour les autres formulations).

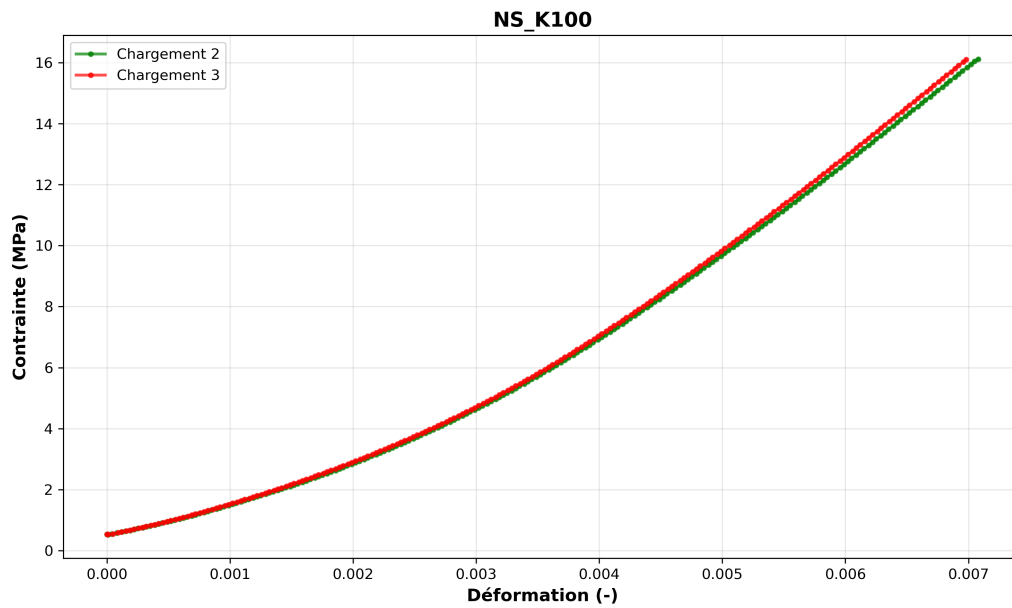


FIGURE 57 – Courbes contrainte-déformation pour les chargements 2 et 3 — formulation NS+K100 (exemple illustratif de la non-linéarité)

Résultats et analyse

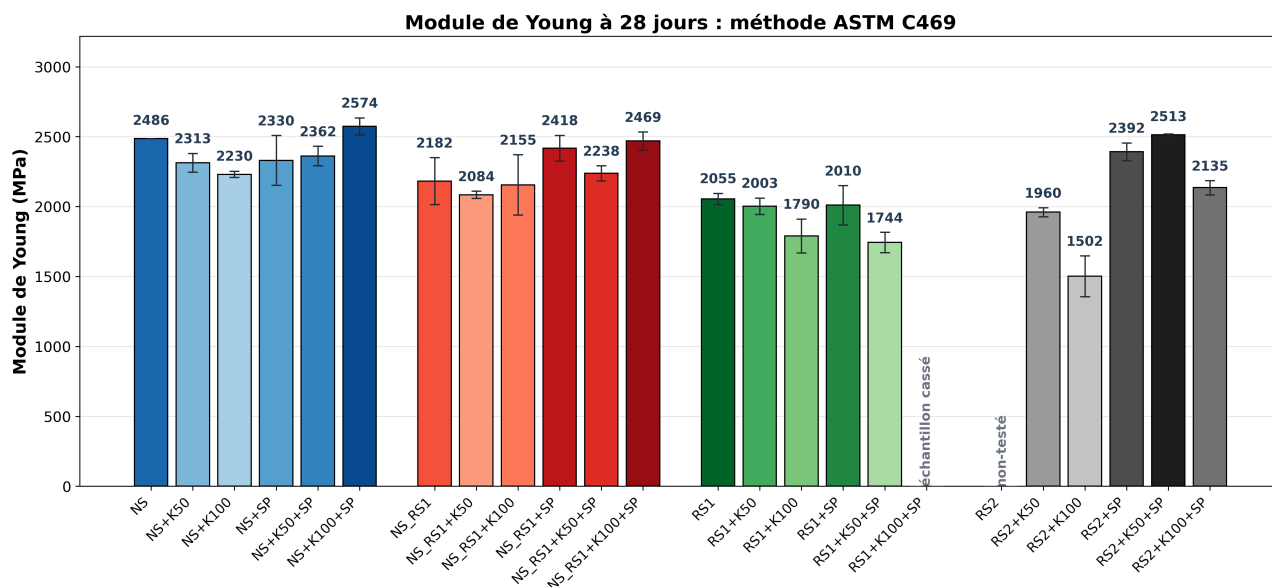


FIGURE 58 – Module de Young à 28 jours — méthode ASTM C469

Les valeurs de module de Young obtenues par l'ASTM C469 sont présentées à la Figure 58. Les résultats s'inscrivent dans une plage allant de 1502 à 2574 MPa.

La hiérarchie des modules suit globalement celle observée pour la résistance à la compression, ce qui est cohérent : un matériau plus dense et plus résistant présente généralement un module d'élasticité plus élevé. Le NS présente le module le plus élevé, suivi du RS2, du NS+RS1 et enfin du RS1. Cette hiérarchie reflète l'influence de la porosité des granulats sur la rigidité globale de la matrice : plus la porosité est élevée, plus le module est réduit.

L'incorporation de superplastifiant améliore le module pour la plupart des formulations, en cohérence avec la densification de la matrice par réduction du rapport E/L, NS+K100+SP culminant à la valeur la plus élevée de toute la série.

Toutefois, certaines incohérences apparaissent au sein d'une même famille de sable, avec des barres de dispersion importantes qui rendent difficile toute interprétation fine entre formulations proches. Ces irrégularités s'expliquent par les limitations de l'essai : en l'absence de cage extensométrique adaptée, les déplacements mesurés correspondent à ceux de l'ensemble du système de presse et non à la déformation réelle de l'éprouvette. L'utilisation d'un extensomètre adapté aurait vraisemblablement permis d'obtenir des tendances plus nettes.

3.5 Absorption sur matériau durci

L'essai d'absorption sur matériau durci, réalisé conformément à la norme ASTM C642, fournit trois indicateurs complémentaires : l'absorption en immersion, la densité volumique sèche et la porosité accessible à l'eau. Ces paramètres constituent des indicateurs indirects de durabi-

lité : une absorption élevée traduit une porosité ouverte importante, favorable à la pénétration d'agents agressifs (ions chlorures, sulfates, cycles gel-dégel), tandis qu'une densité élevée reflète une matrice plus compacte et donc moins vulnérable aux dégradations. L'analyse de ces indicateurs permet ainsi de compléter l'interprétation des résultats mécaniques et dimensionnels présentés précédemment. Les graphiques détaillés d'absorption, de densité et de porosité par formulation sont disponibles en Annexe C.6.

L'analyse principale s'appuie sur la Figure 59, qui représente la relation entre l'absorption en immersion et la densité volumique sèche pour l'ensemble des formulations. Cette représentation permet de visualiser simultanément les deux indicateurs et de mettre en évidence les tendances générales.

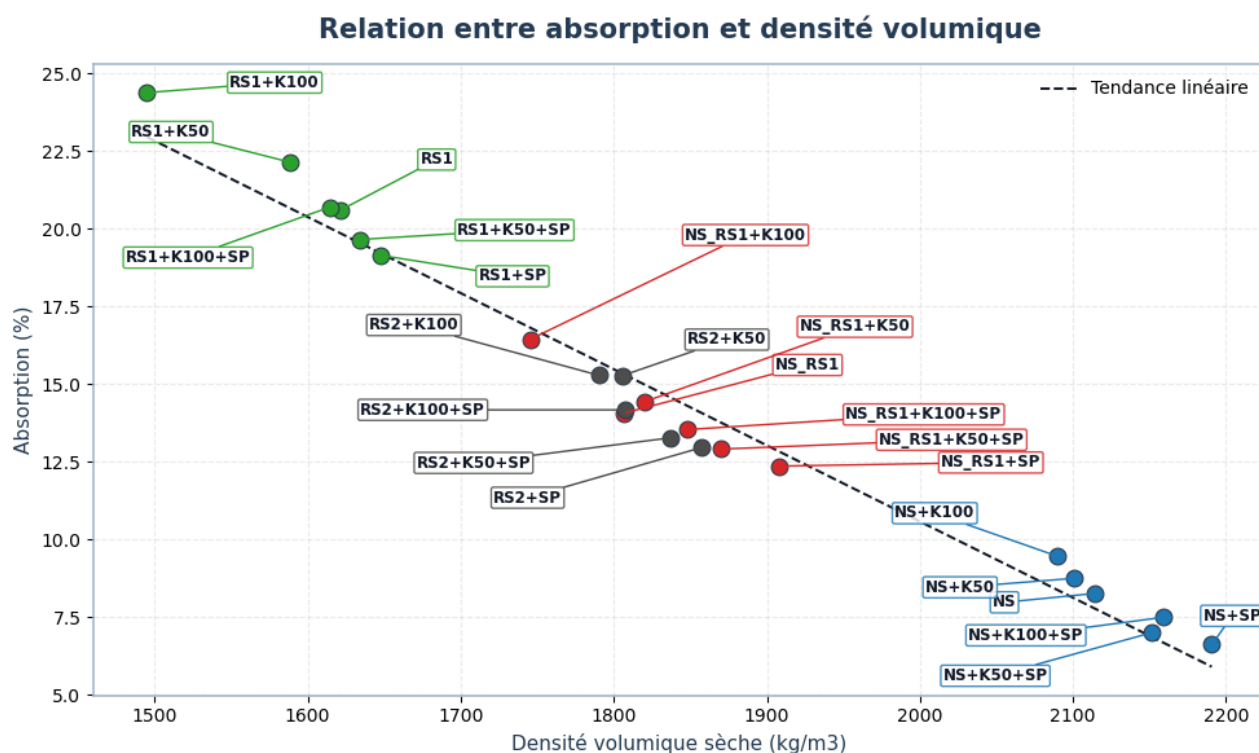


FIGURE 59 – Relation entre absorption en immersion et densité volumique sèche des mortiers durcis à 28 jours

Influence du type de sable

La Figure 59 met en évidence une tendance linéaire décroissante nette entre absorption et densité, confirmant que plus un mortier est dense, moins il est absorbant, ce qui est cohérent avec les mécanismes physiques attendus. Les formulations se regroupent clairement par type de sable, illustrant l'influence prépondérante de la nature des granulats sur les propriétés hydriques du matériau durci.

Les formulations à base de **sable naturel** se positionnent dans le coin inférieur droit du graphique, combinant les densités les plus élevées (2090 à 2191 kg/m³) et les absorptions les plus faibles (6,6 à 9,5 %), traduisant une matrice cimentaire compacte avec une faible porosité

accessible. Ces formulations présentent donc la meilleure durabilité potentielle vis-à-vis des agents agressifs. À l’opposé, les formulations à base de **RS1** se situent dans le coin supérieur gauche, avec les densités les plus faibles (1495 à 1648 kg/m³) et les absorptions les plus élevées (19,1 à 24,4 %), reflétant directement la porosité élevée du mortier ancien adhérent et le rapport E/L de 0,60, qui conduisent à une microstructure ouverte défavorable à la durabilité.

Les formulations **NS+RS1** et **RS2** occupent des positions intermédiaires cohérentes avec leurs compositions. Le RS2, malgré un rapport E/L identique au RS1, présente une absorption (13,0 à 15,3 %) et une densité nettement supérieure, confirmant que sa porosité intrinsèque plus modérée conduit à une microstructure durcie sensiblement plus performante.

Influence du superplastifiant

TABLE 22 – Effet du superplastifiant sur l’absorption et la densité volumique sèche

Mélange	Densité réf.	Densité +SP	Gain [%]	Abs. réf. [%]	Abs. +SP [%]	Perte [%]
NS	2115	2191	+3,6	8,3	6,6	−20,5
NS+RS1	1807	1908	+5,6	14,1	12,4	−12,1
RS1	1622	1648	+1,6	20,6	19,1	−7,3

Abs. : absorption en immersion ; Densité réf./+SP : densité volumique sèche sans/avec superplastifiant [kg/m³] ;

Gain : variation relative de densité ; Perte : variation relative d’absorption, par rapport à la formulation de référence.

L’incorporation de superplastifiant améliore systématiquement la compacité des mortiers durcis en permettant de réduire le rapport E/L d’environ 0,10. Les gains sont perceptibles pour toutes les familles de sable, avec une réduction de l’absorption et une augmentation de la densité cohérentes avec la densification de la matrice observée en compression. Ce résultat confirme que l’effet combiné superplastifiant–réduction E/L améliore à la fois les performances mécaniques et la durabilité potentielle des mortiers.

Influence de l’agent expansif

Pour l’ensemble des formulations, l’incorporation de l’agent expansif de type K diminue la densité volumique sèche et augmente l’absorption de manière dose-dépendante : K50 produit un effet modéré, K100 un effet plus prononcé. Ce comportement s’explique par la formation d’ettringite, dont les cristaux aciculaires occupent les pores capillaires mais l’expansion générée peut introduire des contraintes internes locales qui peuvent générer des microfissures et augmenter la porosité accessible à l’eau.

Pour le **RS1**, cet effet est particulièrement marqué et révélateur : RS1+K100 atteint une absorption de 24,4 % et une densité de 1495 kg/m³, valeurs nettement dégradées par rapport à la référence RS1 (20,6 % et 1622 kg/m³). Sur la Figure 59, RS1+K100 et NS+RS1+K100 se

distinguent nettement des autres points de leur famille, constituant une confirmation microstructurale indépendante de l'hypothèse formulée en compression et en retrait : l'agent K100 n'ayant pas réagi efficacement, il a introduit des hétérogénéités sans apporter le bénéfice attendu de densification.

Pour les formulations combinant superplastifiant et agent expansif, la densification induite par la réduction du rapport E/L compense partiellement l'augmentation de porosité liée à l'agent K : les formulations K+SP présentent systématiquement une absorption inférieure et une densité supérieure à leurs équivalents K sans SP.

Les propriétés hydriques confirment et complètent les observations mécaniques et dimensionnelles. La nature du sable constitue le facteur prépondérant : le NS offre la meilleure compacité et la meilleure durabilité potentielle, tandis que le RS1 présente les performances les plus défavorables, avec une porosité et une absorption élevées défavorables à la durabilité. La réduction du rapport E/L par superplastifiant améliore systématiquement la compacité pour toutes les formulations. L'agent expansif dégrade quant à lui modérément la microstructure de manière dose-dépendante, résultat cohérent avec l'ensemble des observations de ce travail.

3.6 Essai du *German angle*

L'essai du *German angle* fournit des informations sur le comportement des mortiers soumis à un retrait restreint par un support rigide, reproduisant les conditions d'un mortier de réparation lié à un substrat. Pour rappel, l'essai a été adapté en utilisant un profilé en C de dimensions réduites, dont le rapport section mortier/section acier est de 1,69, offrant une rigidité de retenue plus élevée que l'essai de référence et donc des conditions plus sévères vis-à-vis de la fissuration.

Les résultats de l'ensemble des formulations sont synthétisés dans le Tableau 23, qui reporte pour chaque mélange la présence ou non de fissures, le jour d'apparition après la cure, le nombre moyen de fissures ainsi que leur ouverture moyenne et maximale mesurées à l'issue de la période d'observation de 35 jours. Deux éprouvettes ont été suivies par formulation et une bonne représentativité a été observée entre les deux, avec des comportements similaires en termes d'apparition et de développement des fissures. Des photographies ont été prises régulièrement pour documenter l'évolution de la fissuration, la Figure 60 illustre l'un des échantillons les plus critiques (RS1+SP) (cf. Annexe C.8 pour les autres formulations).

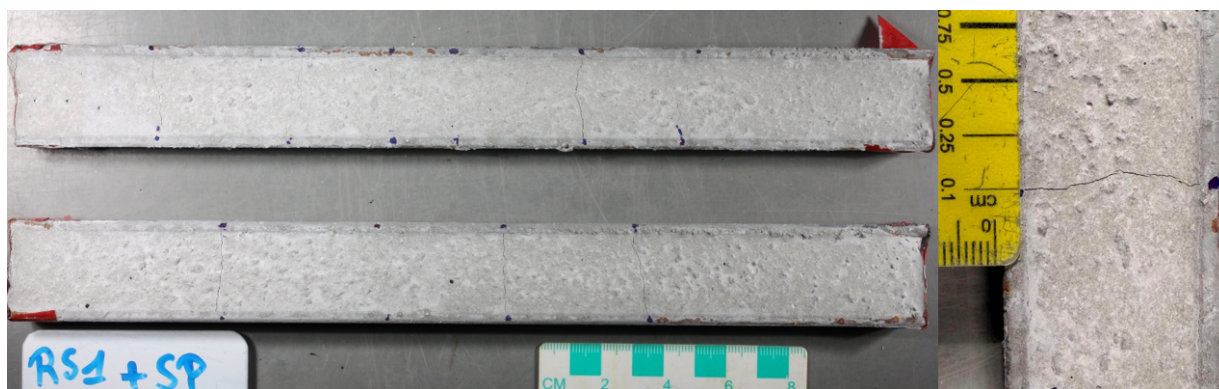


FIGURE 60 – Photographie d'un échantillon fissuré lors de l'essai du *German angle* (RS1+SP) à 35 jours

TABLE 23 – Résultats de l'essai du *German angle*

Sable	Agent	SP	Fissures	Appar. [j]	Nb moy.	Ouv. moy. [mm]	+ gde [mm]
NS	–		NON	–	–	–	–
NS+RS1	–	–	NON	–	–	–	–
RS1	–		OUI	3	5	0,1	0,1
NS	–		NON	–	–	–	–
NS+RS1	–	OUI	OUI	7	3	<<0,1	<<0,1
RS1	–		OUI	3	5	0,1	0,25
RS2	–		OUI	14	3	<<0,1	<<0,1
NS			NON	–	–	–	–
NS+RS1	K100	–	NON	–	–	–	–
RS1			OUI	14	3,5	<<0,1	<0,1
RS2			NON	–	–	–	–
NS			NON	–	–	–	–
NS+RS1	K100	OUI	NON	–	–	–	–
RS1			OUI	3	6,5	<<0,1	<0,1
RS2			NON	–	–	–	–
NS			NON	–	–	–	–
NS+RS1	K50	–	NON	–	–	–	–
RS1			OUI	3	5	<0,1	0,1
RS2			NON	–	–	–	–
NS			NON	–	–	–	–
NS+RS1	K50	OUI	NON	–	–	–	–
RS1			OUI	3	6,5	<0,1	0,1
RS2			OUI	14	2	<<0,1	<<0,1

SP : superplastifiant ; K50/K100 : agent expansif type K ; **Appar. [j]** : jour d'apparition des premières fissures (après cure) ; **Nb moy.** : nombre moyen de fissures observées ; **Ouv. moy.** : ouverture moyenne des fissures (mm) ; **+ gde** : ouverture de la plus grande fissure observée (mm) ;

3.6.1 Analyse des résultats

Validation de l'adaptation de l'essai

L'adaptation de l'essai du *German angle* au profilé en C s'est révélée fonctionnelle : des fissures ont été observées sur plusieurs formulations, avec une bonne reproductibilité entre les deux éprouvettes de chaque mélange. Cela valide le dispositif comme outil d'évaluation qualitative du retrait restreint pour des mortiers à sable recyclé. À noter que des fissures à l'interface mortier/acier ont été observées sur certaines formulations RS1, pouvant suggérer un décollement interfacial, toutefois, une évaluation visuelle ne permet pas de déterminer si ces fissures sont superficielles ou traversantes. Une analyse complémentaire par des outils dédiés, tels que la mesure de vitesse d'ultrasons (UPV), serait nécessaire pour le confirmer.

Sensibilité des différents sables au retrait restreint

L'observation la plus marquante est que la fissuration est systématiquement associée aux formulations incorporant du RS1, indépendamment de la présence ou non d'agent expansif ou de superplastifiant. Ce comportement est cohérent avec les résultats obtenus sur le retrait libre, les formulations à base de RS1 présentaient les retraits les plus élevés parmi tous les sables testés, conséquence directe de la nature de ce sable recyclé : sa granulométrie fine, sa forte absorption et la présence de pâte de ciment résiduelle à sa surface entraînant un retrait intrinsèque plus important. Sous conditions de retrait restreint, ces déformations élevées se traduisent par des contraintes de traction plus importantes dans le mortier ; combinées à une résistance en traction parmi les plus faibles de toutes les formulations testées, elles conduisent inévitablement à la fissuration, ce qui explique son caractère systématique pour le RS1 quelle que soit la formulation considérée.

Aucune fissure n'a été observée pour les formulations NS, ce qui est cohérent avec le retrait faible de ce sable mesuré sur les barrettes libres. Pour le NS+RS1, une fissuration n'a été observée qu'en présence de superplastifiant seul, avec une apparition tardive à 7 jours et des ouvertures très faibles ($<<0,1$ mm), suggérant que la substitution partielle par RS1 reste acceptable du point de vue du retrait restreint dans la plupart des conditions. Le RS2+SP présente également une fissuration tardive et très limitée (apparition à 14 jours, ouvertures $<<0,1$ mm), traduisant un comportement globalement satisfaisant malgré la présence de sable recyclé. Ainsi, dans une optique de valorisation de sable recyclé, le RS2 apparaît comme le substitut le plus approprié en remplacement total ; si le RS1 est utilisé, une substitution limitée à 50 % s'impose afin de maintenir un comportement acceptable vis-à-vis du retrait restreint.

Effet de l'agent expansif sur la fissuration du RS1

L'agent expansif de type K exerce un effet bénéfique visible sur la fissuration du RS1, bien qu'il ne permette pas de la supprimer totalement. Sans agent, la fissuration du RS1 apparaît

dès le jour 3, avec 5 fissures d'ouverture atteignant 0,1 mm. Avec K100 sans SP, la fissuration est retardée à 14 jours, le nombre de fissures est réduit à 3,5 et les ouvertures sont nettement plus faibles ($< 0,1$ mm) : l'agent expansif a donc bien exercé un effet compensateur du retrait, le retardant et le limitant de manière significative.

En revanche, avec K100+SP, la fissuration réapparaît dès le jour 3 et le nombre de fissures augmente à 6,5 avec une légère tendance au décollement parallèle. Ce résultat est cohérent avec les observations sur le retrait libre et les propriétés mécaniques, dans le cas du RS1, la combinaison K100+SP n'a pas permis à l'agent expansif de réagir efficacement, en raison de la réduction de l'eau de gâchage. Le retrait restreint se développe ainsi précocement ; bien que le rapport E/L plus faible densifie la matrice, cet effet ne suffit pas à compenser le retrait élevé du RS1 dans ces conditions.

Les formulations K50 présentent un comportement intermédiaire : la fissuration apparaît au jour 3 avec des ouvertures inférieures à 0,1 mm, et une tendance au décollement parallèle est déjà présente, suggérant que le dosage à 50 % est insuffisant pour compenser pleinement le retrait restreint du RS1. La combinaison K50+SP aggrave encore la situation avec 6,5 fissures en moyenne, confirmant l'effet défavorable du SP sur l'efficacité de l'agent dans les formulations RS1.

3.6.2 Conclusion sur l'adaptation du *German angle*

L'adaptation de l'essai du *German angle* au profilé en C s'est révélée fonctionnelle et pertinente pour discriminer le comportement des différentes formulations sous retrait restreint. Les résultats sont cohérents avec l'ensemble des observations dimensionnelles et mécaniques de ce travail : le RS1 est le sable le plus sensible à la fissuration par retrait restreint, le NS le plus résistant.

Le profilé en C, avec son rapport section mortier/acier de 1,69 plus contraignant que l'essai de référence, s'est avéré suffisamment sévère pour induire la fissuration sur les formulations les plus sensibles tout en permettant de distinguer les niveaux de performance entre mélanges. Cette adaptation pourrait constituer une base méthodologique pour des essais futurs sur mortiers de réparation à sable recyclé.

N.B. — Les mélanges de référence ont également été soumis à l'essai du *German angle* par Yasmine BARZAQ dans des profilés en L, en respectant le rapport acier/mortier de l'essai de référence. Les comportements observés sont cohérents avec ceux rapportés ici, ce qui valide la pertinence du profilé en C adopté dans ce travail : malgré un rapport section mortier/acier différent, les tendances de fissuration sont conservées, confirmant que le dispositif en C constitue une adaptation fiable de l'essai pour les mortiers à sable recyclé.

Application des mortiers formulés : conformité normative, durabilité et perspectives environnementales

4.1 Positionnement par rapport aux normes

Dans le cadre de ce travail, l'objectif est de déterminer si les mortiers à base de sable recyclé formulés peuvent être utilisés comme mortiers de réparation. Cette application suppose non seulement des performances mécaniques satisfaisantes, mais aussi un comportement compatible avec les exigences d'un support en béton existant, notamment en termes de résistance et de stabilité dimensionnelle. Le positionnement proposé ici repose sur les critères mesurés disponibles, tous les essais requis pour un classement normatif complet n'ayant pas pu être réalisés dans le cadre de ce travail.

En Europe et en Belgique, la norme NBN EN 1504-3 classe les mortiers de réparation en quatre niveaux de performance (R1 à R4) selon leur destination structurelle ou non structurelle. En Amérique du Nord, la norme ASTM C928/C928M constitue le principal référentiel pour les matériaux cimentaires destinés à la réparation du béton durci, avec trois classes de performance (R1 à R3).

Résistance à la compression

La résistance à la compression constitue le critère de classement central des deux normes. Les formulations de référence à base de sable naturel atteignent systématiquement les classes R3 et R4, confirmant la validité des protocoles adoptés. Pour les mortiers à sable recyclé, la porosité accrue et la pâte de ciment résiduelle pénalisent les performances mécaniques, l'incorporation d'un superplastifiant permet de compenser partiellement cet effet en densifiant la matrice cimentaire.

Le Tableau 24 présente le classement normatif de l'ensemble des formulations étudiées. Pour les formulations à base de sable recyclé, le comportement est contrasté selon la nature du granulat. Les mortiers à base de RS2, dont la porosité est intermédiaire, répondent aux critères de la classe R3 de la norme EN 1504-3 dans toutes les configurations testées, et répondent également aux exigences ASTM R3 lorsqu'un superplastifiant est incorporé, ce granulat apparaît ainsi compatible avec une application en réparation structurelle courante à taux de substitution de 100%. Les formulations à base de RS1 requièrent impérativement l'incorporation d'adjuvants et une limitation du taux de substitution à 50 % pour atteindre la classe R3 et permettre un usage en réparation structurelle.

TABLE 24 – Classement des formulations selon la résistance à la compression à 28 jours

Norme	Classe	f_c min. (MPa)	Application	Formulations conformes
EN 1504-3	R1	≥ 10	Non structurelle	Toutes
	R2	≥ 15	Non structurelle	Toutes
	R3	≥ 25	Structurelle	Toutes sauf NS+RS1, RS1, RS1+K100
	R4	≥ 45	Structurelle (haute perfor- mance)	NS+K50+SP, NS+K100+SP
ASTM C928	R1	≥ 14	Légère	Toutes
	R2	≥ 21	Modérée	Toutes sauf RS1+K100
	R3	≥ 28	Structurelle	Voir note ^a

^a NS, NS+K50, NS+K100, NS+SP, NS+K50+SP, NS+K100+SP, NSRS1+SP, NSRS1+K50+SP, NSRS1+K100+SP, RS2, RS2+K50, RS2+K100, RS2+SP, RS2+K50+SP, RS2+K100+SP.

Stabilité dimensionnelle et comportement sous retrait restreint

La stabilité dimensionnelle est un critère fondamental pour l'application en réparation : un retrait excessif du mortier par rapport au support induit des contraintes de traction à l'interface susceptibles de provoquer le délaminage ou la fissuration. Les deux normes s'accordent sur un seuil de $\pm 1500 \mu\text{m}/\text{m}$ ($\pm 0,15\%$) pour une application structurelle.

Les formulations à base de RS1 à 100% dépassent largement ce seuil quelle que soit la formulation, ce granulat utilisé seul n'est donc pas compatible avec une application en réparation structurelle. Une substitution à 50% avec agent expansif de type K permet en revanche de satisfaire le critère. Les formulations à base de RS2 se situent à la limite du seuil sans adjuvant, mais l'ajout d'agent expansif de type K confirme leur conformité.

Au-delà du retrait libre, la compatibilité vis-à-vis du support s'évalue sous conditions de retrait restreint, l'essai du *German Angle* adapté reproduit ces conditions réelles et corrobore les tendances observées : les formulations à base de RS1 fissurent systématiquement, tandis que l'incorporation d'un agent de type K supprime la fissuration pour l'ensemble des formulations à base de RS2 et à 50% de substitution par RS1, soulignant le rôle déterminant de cet adjuvant pour les mortiers à base de sable recyclé.

4.2 Durabilité potentielle des mortiers formulés

La durabilité d'un mortier de réparation conditionne directement la pertinence environnementale de son utilisation : substituer du sable naturel par du sable recyclé n'est justifié à long terme que si le matériau résiste suffisamment aux agressions extérieures pour ne pas nécessiter une intervention prématurée. L'absorption par immersion (ASTM C642), la porosité accessible et la densité volumique sèche constituent des indicateurs de cette résistance, gouvernée en grande partie par la perméabilité de la matrice cimentaire. Il convient de noter qu'il n'existe pas à ce jour de cadre normatif spécifique encadrant l'utilisation des sables recyclés dans les mortiers de réparation. Ainsi, les seuils de durabilité applicables restent ceux définis pour les bétons et mortiers courants, ce qui constitue une limite de l'interprétation proposée ici.

L'incorporation de sable recyclé tend structurellement à augmenter la perméabilité de la matrice cimentaire en raison de la porosité propre du granulat, le superplastifiant atténue cet effet en densifiant la matrice et en réduisant la porosité accessible à consistance équivalente. Ces résultats sont à lire en parallèle avec l'essai du German Angle : la fissuration sous retrait restreint ouvre des chemins préférentiels de pénétration des agents agressifs, établissant un lien direct entre comportement dimensionnel et durabilité à long terme.

Les formulations à base de RS2 et celles à 50 % de substitution par RS1 tendent à se rapprocher du comportement des mortiers de référence, notamment avec incorporation d'un superplastifiant, mais leur absorption reste supérieure à celle des mortiers à sable naturel. Elles apparaissent donc plus adaptées à des environnements peu agressifs, et une validation complémentaire serait nécessaire pour des expositions sévères (chlorures, cycles de gel-dégel). Les formulations à base de RS1 à 100 %, en revanche, présentent une matrice très poreuse et une fissuration systématique au German Angle, ce qui les exclut de tout contexte exposé, seule une substitution à 50 % avec superplastifiant et agent expansif de type K pourrait permettre d'atteindre un niveau de durabilité acceptable.

4.3 Perspectives d'analyse du cycle de vie

Une analyse du cycle de vie (ACV) complète des mortiers formulés n'a pas pu être réalisée dans le cadre de ce travail, faute de données suffisantes. Toutefois, les bases méthodologiques acquises dans un cours d'ACV du professeur Charles Berton (ULaval) permettent d'esquisser une approche structurée et d'identifier les paramètres déterminants pour une étude future.

L'intérêt d'une telle ACV est double : quantifier le bénéfice environnemental réel de la substitution du sable naturel par du sable recyclé, et vérifier que ce bénéfice n'est pas annulé par des impacts indirects tels que l'énergie de traitement et de recyclage des granulats, le transport ou la consommation accrue d'eau de gâchage. Parmi les données manquantes, les plus critiques sont les distances de transport, l'ensemble du processus de traitement et recyclage des granulats, ainsi que les bilans carbone des adjuvants (agent expansif, superplastifiant) (Annexe B).

Plusieurs points d'attention structurent cette réflexion. La distance de transport constitue le paramètre le plus sensible : si le sable recyclé doit parcourir de longues distances, ses bénéfices environnementaux s'amenuisent rapidement. Pour le RS1, la proximité de l'usine Lafarge de Saint-Constant avec les chantiers montréalais est favorable ; pour le RS2, la filière locale liégeoise reste à documenter. Le mix électrique doit également être pris en compte, car le bilan du traitement et du concassage dépend directement du mode de production énergétique de chaque région : au Québec, l'hydroélectricité minimise cet impact, tandis que le mix belge, plus carboné, le pénalise davantage. Enfin, la durée de vie en service lie directement les résultats de ce travail à l'ACV : un mortier qui fissure prématurément génère un impact additionnel lié au remplacement anticipé, ce qui confère aux formulations à base de RS2 un avantage environnemental à long terme par rapport aux formulations à base de RS1.

Au-delà de ces paramètres opérationnels, un enjeu fondamental d'une telle ACV réside dans le traitement de l'épuisement des ressources non renouvelables : contrairement aux autres postes d'impact, cette catégorie traduit le fait que le sable naturel est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. Le recours au sable recyclé ne sera pas toujours un choix, mais une nécessité croissante. Or, le poids accordé à cette catégorie d'impact dépend fortement du contexte géographique : en Wallonie, où les ressources en sable naturel sont limitées et la pression réglementaire forte, cet impact aura un poids nettement plus élevé que dans une ACV menée en contexte québécois, où les réserves demeurent abondantes. Cela implique que deux ACV distinctes, l'une en contexte belge et l'autre en contexte québécois, seraient nécessaires pour refléter fidèlement les enjeux locaux.

La provenance des deux sables recyclés mérite enfin d'être soulignée dans cette perspective : le RS1, issu de retours de béton frais non mis en service chez Lafarge, et le RS2, issu de déchets de démolition, sont tous deux des co-produits dont l'impact de production est en grande partie imputable au cycle de vie du matériau d'origine. Ce profil est particulièrement favorable d'un point de vue ACV et constitue un argument supplémentaire en faveur de leur valorisation, sous réserve que leurs performances techniques soient suffisantes.

Conclusion et perspectives

Ce travail a pour ambition d'évaluer l'interaction entre les superplastifiants de type polycarboxylate et les agents expansifs de type CSA dans des mortiers à base de sables recyclés, en vue de leur application comme mortiers de réparation à retrait compensé. Les réponses aux questions de recherche qui ont guidé ce travail sont synthétisées ci-après.

La substitution du sable naturel par les sables recyclés a-t-elle un effet sur le comportement des mortiers ? Oui, la nature du granulat constitue le facteur prépondérant de performance. Les deux sables recyclés étudiés se comportent de façon contrastée. Le RS2, sable recyclé belge issu de démolition, présente des propriétés intermédiaires entre le sable naturel de référence et le RS1. Ce dernier, sable recyclé canadien issu de retours de béton frais, génère des retraits libres jusqu'à trois fois supérieurs à ceux des mortiers de référence et des résistances à la compression à 28 jours inférieures d'environ 30 % pour les formulations à 100 % de substitution. Ces écarts s'expliquent par la granulométrie fine du RS1, sa forte absorption (supérieure à celle du RS2) et la pâte de ciment résiduelle adhérente à sa surface, qui amplifient le retrait de dessiccation. La substitution à 50 % atténue sensiblement ces effets négatifs et constitue une voie de valorisation réaliste pour le RS1.

Quel est l'effet des agents expansifs CSA sur le retrait en fonction du mode de mûrissement et du dosage ? L'agent expansif de type K exerce un effet compensateur du retrait dont l'amplitude dépend fortement du mode de cure et du dosage. En cure immergée, le dosage plein réduit sensiblement le retrait libre pour toutes les formulations. Cette cure apparaît indispensable au développement de la réaction ettringitique, le milieu aqueux fournissant l'eau nécessaire à la formation des cristaux d'ettringite. À dosage réduit (50 % de la dose recommandée), l'effet expansif reste perceptible mais diminue de façon proportionnelle. La diminution de l'effet expansif est d'autant plus marquée pour les granulats dont l'état hydrique initial est défavorable ; c'est notamment le cas du RS1, livré à l'état sursaturé lors des essais, ce qui a limité l'efficacité de l'agent expansif.

Les superplastifiants de type polycarboxylate réduisent-ils l'efficacité des agents expansifs CSA dans les mortiers à sables recyclés ? L'incorporation du superplastifiant permet une réduction du rapport eau/liant qui, si elle améliore les résistances mécaniques de l'ordre de 20 % selon les formulations, pénalise simultanément l'efficacité de l'agent expansif. Pris isolément, le superplastifiant, via la réduction du rapport E/L, a un effet bénéfique sur le plan mécanique et réduit modérément le retrait grâce à la densification de la matrice, tandis que l'agent expansif permet à lui seul de limiter plus efficacement le retrait. En combinaison, toutefois, la diminution de l'eau de gâchage disponible pour la formation d'ettringite limite le développement de l'expansion compensatrice. Cet effet est particulièrement marqué pour

les formulations à 100 % de RS1, tandis que les formulations à base de RS2 et à 50 % de substitution présentent un compromis plus favorable.

L'essai *German angle* est-il pertinent pour mettre en évidence l'effet de l'agent expansif de type CSA sur le retrait restreint ? Oui, l'adaptation de l'essai du *German angle* au profilé en C s'est révélée fonctionnelle et discriminante. Les résultats sont cohérents avec l'ensemble des observations dimensionnelles et mécaniques : la fissuration est systématiquement associée aux formulations à 100 % de RS1, tandis qu'aucune fissure n'est observée sur les mortiers à sable naturel quelle que soit la formulation. L'agent expansif au dosage plein prévient la fissuration pour les formulations à base de RS2 et à 50 % de RS1, confirmant son efficacité pour ces granulats. L'essai s'avère donc pertinent pour évaluer qualitativement le retrait restreint et confirme que le profilé en C constitue une adaptation méthodologique fiable de l'essai de référence.

Les mortiers testés respectent-ils les prescriptions pour un mortier de réparation ?

Au regard des normes EN 1504-3 et ASTM C928, le bilan est contrasté selon le granulat. Les formulations à base de RS2 atteignent la classe R3 et respectent le seuil de stabilité dimensionnelle avec agent expansif ; le RS2 constitue le candidat recyclé le plus crédible pour une application en réparation structurelle. Les formulations à 100 % de RS1 n'atteignent ni les critères mécaniques ni les seuils d'absorption requis, et présentent une fissuration systématique au *German angle*. Une substitution à 50 %, combinée à un superplastifiant et à un agent expansif au dosage plein en cure immergée, permet néanmoins d'atteindre un niveau de performance normatif acceptable.

En synthèse, ce travail démontre que la combinaison **RS2 + agent expansif à dosage plein + superplastifiant en cure immergée** représente la voie la plus prometteuse pour développer des mortiers de réparation durables intégrant des granulats recyclés. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux de Mettlen (2025) et contribuent aux objectifs d'économie circulaire dans le secteur de la construction. Plusieurs pistes méritent toutefois d'être approfondies : l'optimisation du dosage en agent expansif et en superplastifiant en fonction du rapport E/L effectif, la comparaison avec d'autres types d'agents expansifs (type G, type S), ainsi que des essais de durabilité à long terme et une évaluation par ultrasonographie (UPV) des éprouvettes du *German Angle*. Enfin, une analyse du cycle de vie complète, menée séparément en contexte belge et québécois, permettrait de quantifier le bénéfice environnemental réel de ces formulations.

Références

98,5 Montréal (Ferrandez, L.). *Au Québec : Le tiers des déchets provient des chantiers de construction*. Émission radio, 4 juin 2024. <https://www.985fm.ca/audio/629987/au-quebec-le-tiers-des-dechets-provient-des-chantiers-de-construction>.

ACI Committee 212. *ACI 212.3R-16 – Report on Chemical Admixtures for Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 82 p., p.15–19.

Aïtcin, P.-C., Neville, A.M. & Acker, P. *Les différents types de retrait du béton*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 215, 1998, p. 41–51.

American Concrete Institute. *ACI CT-21 — Concrete terminology*. 2022, 80 p.

ASTM C109/C109M. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens*. ASTM International.

ASTM C1437. *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. ASTM International.

ASTM C157/C157M. *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. ASTM International.

ASTM C230/C230M. *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. ASTM International.

ASTM C469/C469M. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International.

ASTM C490/C490M. *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. ASTM International.

ASTM C496/C496M. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.

ASTM C642. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International.

ASTM C928/C928M. *Standard Specification for Packaged, Dry, Rapid-Hardening Cementitious Materials for Concrete Repairs*. ASTM International.

ASTM E11. *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. ASTM International.

Barkat, A. *Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base de sable recyclé*. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.

Baroghel-Bouny, V. *Les spécificités des bétons à hautes performances*. Études et Recherches des LPC, OA44, LCPC, Paris, 2004.

- Bediako, M. *Superplasticized vs. Conventional Concrete : A Comparative Review*. Materials Sciences and Applications, 15(9), 271–284, 2024.
- Berger. *Etude des potentialités des ciments sulfo-alumineux bélitiques pour le conditionnement du zinc* (Thèse de doctorat). HAL, 2011.
- Bissonnette, B., Courard, L., Garbacz, A., Vaysburd, A. & von Fay, K. *Concrete repair bond : evaluation and factors of influence*. In : *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete Solutions*. Taylor & Francis, 2014, p. 51–57.
- BNQ 2501-025. *Granulats – Analyse granulométrique des granulats fins et grossiers – Tamisage*. Bureau de normalisation du Québec.
- BNQ 2560-040. *Béton – Granulats – Définitions, exigences et méthodes d’essai*. Bureau de normalisation du Québec.
- BNQ 2560-065. *Granulats – Détermination de l’absorption d’eau et de la densité*. Bureau de normalisation du Québec.
- Borida. *Quelle est l’histoire du superplastifiant ?* 14 janvier 2025. <https://fr.borida.net/news/what-is-the-history-of-superplasticizer-84116215.html>.
- Briffaut, M., Benboudjema, F., Torrenti, J.-M. & Nahas, G. *Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures*. Engineering Structures, vol. 33, n° 4, 2011, p. 1390–1401.
- Cain, F. *What Percentage of the Earth’s Land Surface is Desert ?* 2010. <https://www.universetoday.com/articles/what-percentage-of-the-earths-land-surface-is-desert>.
- Certain, P.-V. *Étude de la robustesse, de l’adhérence et de la durabilité des bétons de réparation à retrait compensé*. Thèse de doctorat, Université Laval, 2012, p.6–8.
- Circular Event Toolkit. *Échelle de Lansink*. s.d. <https://www.circular-event.eu/circular-est-quoi/>.
- Corinaldesi, V. & Moriconi, G. *Influence of mineral additions on the performance of 100,% recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, vol. 23, n° 8, 2009, p. 2869–2876.
- Courard, L. *Constructions : matériaux et pathologies*. Notes de cours, Université de Liège, 2022.
- Courard, L. *Technologie des bétons et matériaux nouveaux : propriétés physiques et mécaniques du béton durci*. Support de cours, Université de Liège, 2024.
- Courard, L., Bissonnette, B. *Utilisation de granulats recyclés et d’agents expansifs pour la compensation du retrait dans les mortiers*. RF2B, 2025.
- Courard, L. *Repair techniques and materials*. Notes de cours, Université de Liège, 2025.
- CSA A23.1. *Concrete materials and methods of concrete construction*. CSA Group.
- CSA A23.2-2C. *Method of test for production and calibration of mortar mixtures*. CSA Group.

- CSA A3000-23. *Cementitious materials compendium*. CSA Group.
- Emmons, P. H., Vaysburd, A. M., McDonald, J. E., Poston, R. W. & Kesner, K. E. *Performance criteria for concrete repair materials*. Concrete International, vol. 22, n° 3, 2000, pp. 38–45.
- EN 197-1 :2011. *Cement – Part 1 : Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. European Committee for Standardization, Bruxelles, 2011.
- EN 1504-3 *Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Partie 3 : Réparation structurale et non structurale*. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2005.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A. & Barra, M. *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 37, n° 5, 2007, p. 735–742.
- European Investment Bank – Circular City Centre (C3). *A Guide for Circularity in the Urban Built Environment*. Luxembourg : EIB, avril 2024.
- Evangelista, L. & de Brito, J. *Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, vol. 32, n° 1, 2010, p. 9–14.
- Evangelista, L. & de Brito, J. *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 29(5), 2007, p. 397–401.
- FEREDECO asbl, Buildwise & CRR (Centre de Recherches Routières). *Guide technique pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie – Version 2.0*. Granulats Recyclés, 20 septembre 2023.
- Foster-Goodman, S., Vallens, K. *Shrinkage-Compensating Concrete Designs : Designing Best Value Solutions*. Structure Magazine, 2018.
- GenieCVL. *Le retrait (partie 2) : aspect théorique*. 2023. <https://www.geniecvl.com/le-retrait-partie-2-aspect-theorique/>.
- Ginga, C. P., Ongpeng, J. M. C. & Daly, M. K. M. *The circular economy in the construction and demolition waste management : A comparative analysis in emerging and developed countries*. Resources, Conservation & Recycling Advances, vol. 20, 2023, art. 200245.
- Hubert, J., Zhao, Z., Michel, F. & Courard, L. *Effects of crushing method on the properties of produced recycled concrete aggregates*. Buildings, vol. 13, n° 9, 2023, art. 2217.
- Infociments. *Notions sur les retraits du béton*. 2021. <https://www.infociments.fr/betons/notions-sur-les-retraits-du-beton>.
- Infociments. *Maîtrise du retrait endogène*. 2024. <https://www.infociments.fr/betons/maitrise-du-retrait-endogene-ou-retrait-dautodessiccation>.
- Kheffi, A., Hubert, J., Jehin, T. & Aldric, J.-M. *L'expérience wallonne de béton préfabriqué avec granulats recyclés* [Tiré à part n°78]. Recyclage & Valorisation, Revue de la Société de l'industrie minérale, septembre 2022.

- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures*.
- Kou, S. C., Bao, J., Poon, C. S. *Autogenous and drying shrinkage of recycled aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, 295, 2021.
- Kou, S.C. & Poon, C.S. *Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates*. Construction and Building Materials, vol. 23, n° 8, 2009, p. 2877–2886.
- Ma, R., Wang, Y., Li, H., Bai, Y. *Progress in the polycarboxylate superplasticizer and their application in concrete*. Materials Today Sustainability, 2023.
- Mettlen, T. *Développement de mortiers à retrait compensé avec des sables de recyclage*. Université de Liège, 2025.
- Morency, M. *Cracking sensitivity of cementitious repair materials*. Université Laval, 2013.
- NASA Earth Observatory. *Sand Mining at Poyang Lake*. 2016. <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/sand-mining-at-poyang-lake-87663/>.
- NBN EN 206. *Béton – Spécification, performances, production et conformité*. Bureau de Normalisation, Bruxelles.
- NBN B 15-001. *Béton – Spécification, performances, production et conformité – Complément national à la NBN EN 206*. Bureau de Normalisation, Bruxelles.
- NBN EN 933-1. *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la granularité – Analyse granulométrique*. NBN.
- Nedjar, D. *Contribution à l'étude du comportement des mortiers à base de sables recyclés*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2018, p. 78–95.
- Neville, A.M. *Properties of Concrete*. 4^e éd., Longman, London, 1995, 844 p.
- Oxford Economics. *Future of construction*. 2023.
- Pearce, F. *The Hidden Environmental Toll of Mining the World's Sand*. 2019. <https://e360.yale.edu/features/the-hidden-environmental-toll-of-mining-the-worlds-sand>.
- Pereira, K., Jouffray, J.-B., Van Lancker, V., Vander Velpen, A., & Liu, J. *Rethinking sand circularity through sufficiency*. One Earth, 8(2), 2025.
- Prax, A. *Sables siliceux industriels*. BRGM, 1980.
- Rao, U.V.N., Kumar, N.V.S., Kavitha, C., Madhavi, Y., & Chowdary, P.S. *Polycarboxylate Superplasticizers Used in Concrete : A review*. IJERR, 38, 69–88, 2024.
- RECYC-QUÉBEC. *Les résidus de construction, de rénovation et de démolition – Bilan GMR 2021*. 2023.
- RECYC-QUÉBEC. *RECYC-QUÉBEC s'attaque aux résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD) en collaboration avec l'industrie*. 5 juin 2024. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/communiqués-de-presse/recyc-quebec-sattaque-aux-residus-de-con>

struction-renovation-demolition-crd-en-collaboration-avec-lindustrie/.

Romnée, A. & Vrijders, J. *Vers une économie circulaire dans la construction. Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction*. Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), Bruxelles, septembre 2018.

Roos, D. *Sand Is in Such High Demand, People Are Stealing Tons of It*. 2019. <https://science.howstuffworks.com/environmental/conservation/issues/sand-is-such-high-demand-and-people-are-stealing-tons-it.htm>.

Schleibinger, G. m.b.H. *ASTM Shrinkage Ring*. 2024. https://www.schleibinger.com/cms/imple/en/?Shrinkage:ASTM-Shrinkage_Ring.

Shen, D., Liu, X., Zeng, X., Zhao, X. & Jiang, G. *Effect of polypropylene plastic fibers on cracking resistance of concrete at early age*. Construction and Building Materials, vol. 248, 2021, 118601.

Silva, R.V., de Brito, J. & Dhir, R.K. *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials, vol. 65, 2014, p. 201–217.

Souchu, P. *Le sable pour la construction*. LERM, 2012.

Souchu, P. *Hydratation du ciment portland..* LERM, 2009.

Statbel (Service public fédéral Statistique de Belgique). *Production de déchets*. 2024. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/dechets-et-pollution/production-de-dechets>.

Stockholm Resilience Centre. *How sand mining threatens our planet*. 2025. <https://www.stockholmresilience.org/research/research-stories/2025-04-02-how-sand-mining-threatens-our-planet-and-what-we-can-do-about-it.html>.

Systems Change Lab. *Reuse and recycling rate of construction and demolition waste*. 2020. <https://systemschangelab.org/buildings/construct-zero-carbon-buildings/reuse-and-recycling-rate-construction-and-demolition>.

Tam, V.W.Y., Gao, X.F. & Tam, C.M. *Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*. Cement and Concrete Research, vol. 35, n° 6, 2005, p. 1195–1203.

Taylor, H.F.W. *Cement Chemistry*. 2^e éd., Thomas Telford, London, 1997, 459 p., p. 261–293.

Tenessy. *Polycarboxylate Superplasticizer (PCE)*. 2025. <https://cntenaisi.com/products/polycarboxylate-superplasticizer-pce/>.

Torres, A., Jouffray, J.-B., Van Lancker, V., Vander Velpen, A., & Liu, J. *Reducing sand mining's toll on marine biodiversity*. One Earth, 8(2), 2025.

ToutSurLeBéton. *Le retrait du béton*. 2025. <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-retrait-du-beton/>.

UNEP. *Sand and sustainability*. Genève, 2022.

UN News. *Use sand resources wisely*. 2022. <https://news.un.org/en/story/2022/04/1116972>.

Yaprak, H., Aruntas, H.Y., Demir, I., Simsek, O. & Durmus, G. *Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties*. International Journal of Physical Sciences, vol. 6, n° 10, 2011, p. 2455–2461.

Annexe A : Données brutes expérimentales

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)		
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%
Poids des fines	24,70	Poids des fines	25,30	Poids des fines	20,30	Poids des fines	27,50	MOYENNE :	Thibault
Pourcentage	6,02%	Pourcentage	6,45%	Pourcentage	5,80%	Pourcentage	6,67%	6,23%	7,79%

FIGURE 61 – Granulométrie 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)		
Tamis [mm]	Refus pot 1 [g]	Passant [%]	Refus pot 2 [g]	Passant [%]	Refus pot 3 [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	68,33%	104,00	69,02%	117,20	67,78%	68,38%
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 fi	9,94	Poids des fi	6,95	Poids des fi	7,11	MOYENNE :	Moyenne liège
Pourcentage	2,54%	Pourcentage	2,04%	Pourcentage	1,93%	2,17%	3,44%

FIGURE 62 – Granulométrie RS2

RS1			RS2		
Masse pycnomètre	184,7	g	Masse pycnomètre	184,7	g
Masse pycnomètre eau	682,9	g	Masse pycnomètre eau	682,9	g
Masse eau	498,2	g	Masse eau	498,2	g
Masse sss+eau	767	g	Masse sss+eau	789,3	g
Masse sss	500	g	Masse sss	500	g
Masse pan	186,4	g	Masse pan	172,7	g
Masse sèche	434,2	g	Masse sèche	469,5	g
Densité brute	1,87802768	-	Densité brute	2,247486836	-
Densité brute sss	2,16262976	-	Densité brute sss	2,393489708	-
Densité apparente	2,62515115	-	Densité apparente	2,631726457	-
Absorption	15,15%		Absorption	6,50%	
Absorption thibault	12,50%		Absorption liège	5,88%	

FIGURE 63 – Absorption des sables

Annexe B : Analyse de cycle de vie

TABLE 25 – Inventaire des données disponibles et manquantes pour une ACV des mortiers formulé

Paramètre ACV	Disponibilité	Valeur / Donnée disponible	Donnée manquante / Hypothèse requise
Type de sable naturel (NS)	Disponible	Sable naturel si-liceux, Québec (ULaval)	Distance extraction → site non précisé
Type de sable recyclé RS1	Disponible	Retours usine Lafarge, non mis en service, concassage interne	Distance transport concassage → ULaval
Type de sable recyclé RS2	Disponible	Sable recyclé belge, Liège (ULiège)	Filière de recyclage précise non documentée
Énergie de concassage / tamisage RS1	× Manquante	—	kWh/tonne de sable recyclé produit
Transport des granulats	× Manquante	—	Distances exactes NS, RS1, RS2
Impact CO ₂ du ciment GU / CEM I	Disponible	~800–900 kg CO ₂ /t ciment (Lafarge 2024)	Données spécifiques cimenterie Saint-Constant
Impact CO ₂ agent expansif (Komponent type K)	× Manquante	—	FDS Komponent ne précise pas le bilan carbone du produit
Impact CO ₂ superplastifiant PC	× Manquante	—	Impact typique ~1,5–2 kg CO ₂ /kg (base Ecoinvent)
Durée de vie en service	× Manquante	—	Hypothèse standard : 25–50 ans → dépend de la classe d'exposition
Fin de vie / recyclabilité du mortier durci	× Manquante	—	Mortier à sable recyclé : potentiellement recyclable à nouveau (circularité à étudier)
Épuisement ressource sable naturel en Wallonie et à Québec	Contexte	Ressources limitées en Wallonie	Indicateurs spécifiques de rareté non quantifiés dans ce travail

Annexe C : Analyse graphiques supplémentaires

C.1 Analyse du retrait

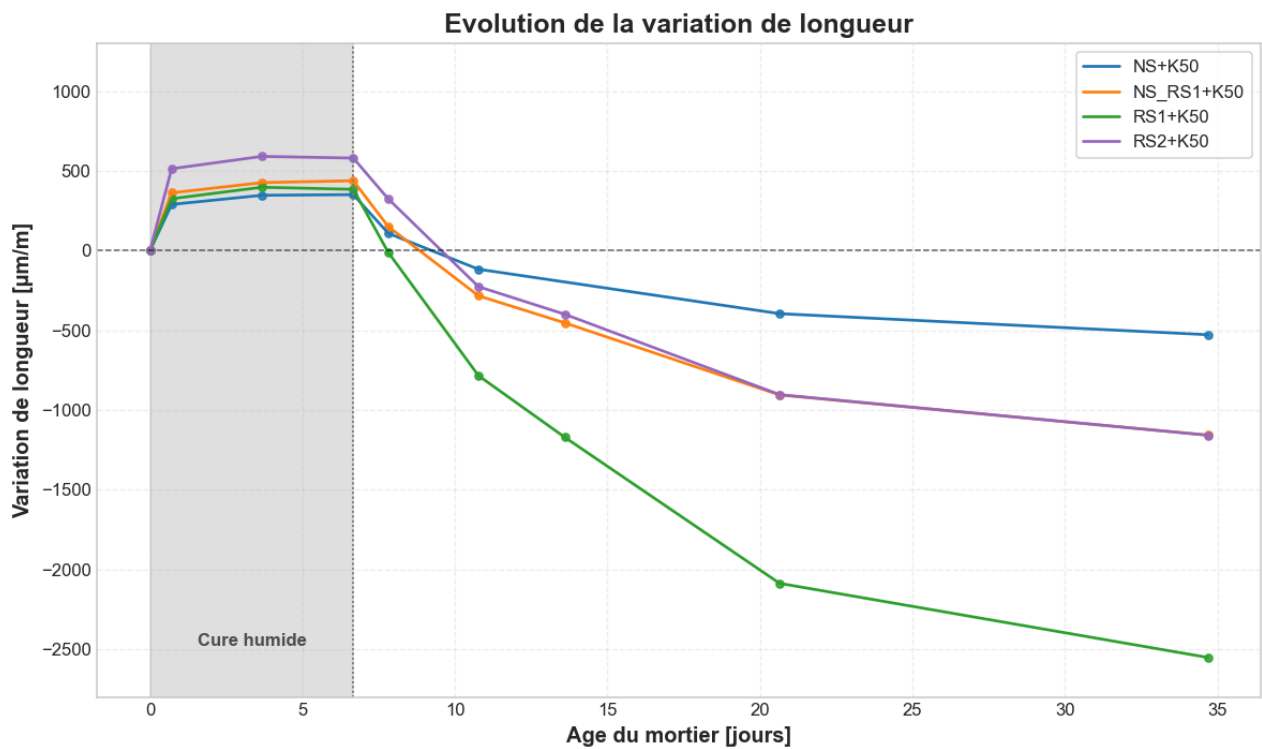


FIGURE 64 – Variation de longueur – Mélanges K50

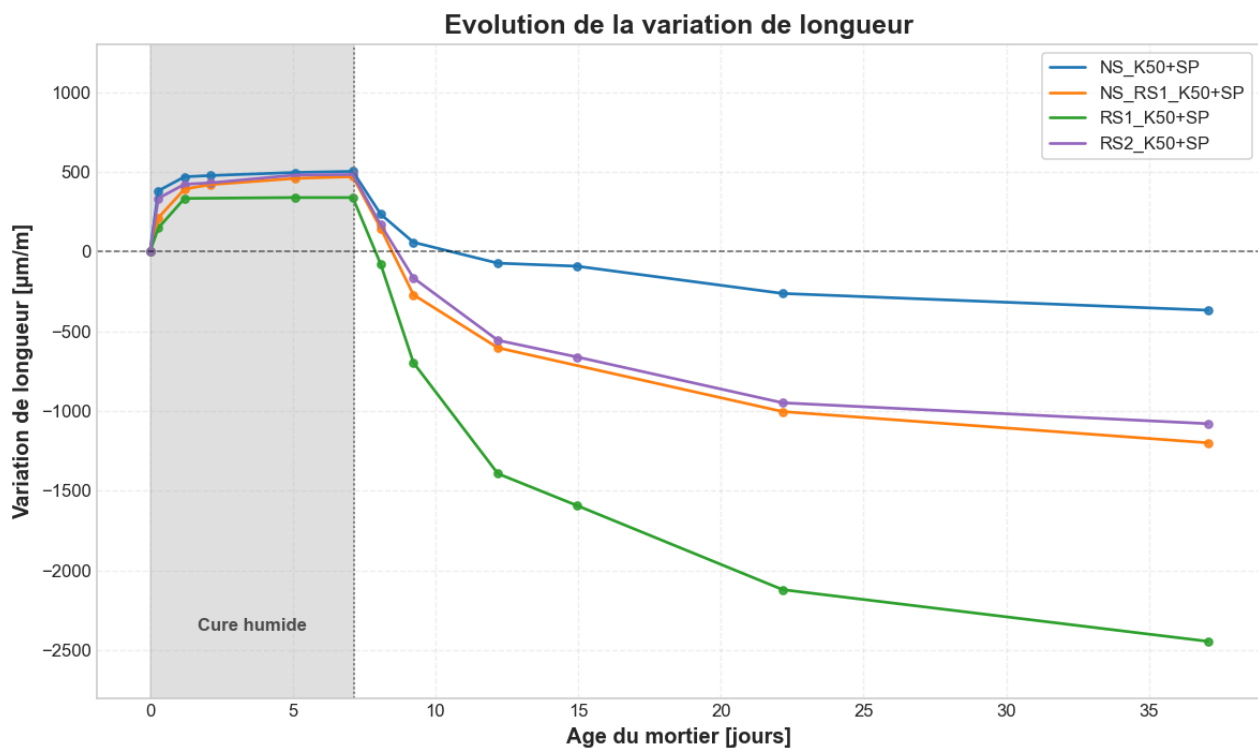


FIGURE 65 – Variation de longueur – Mélanges K50+SP

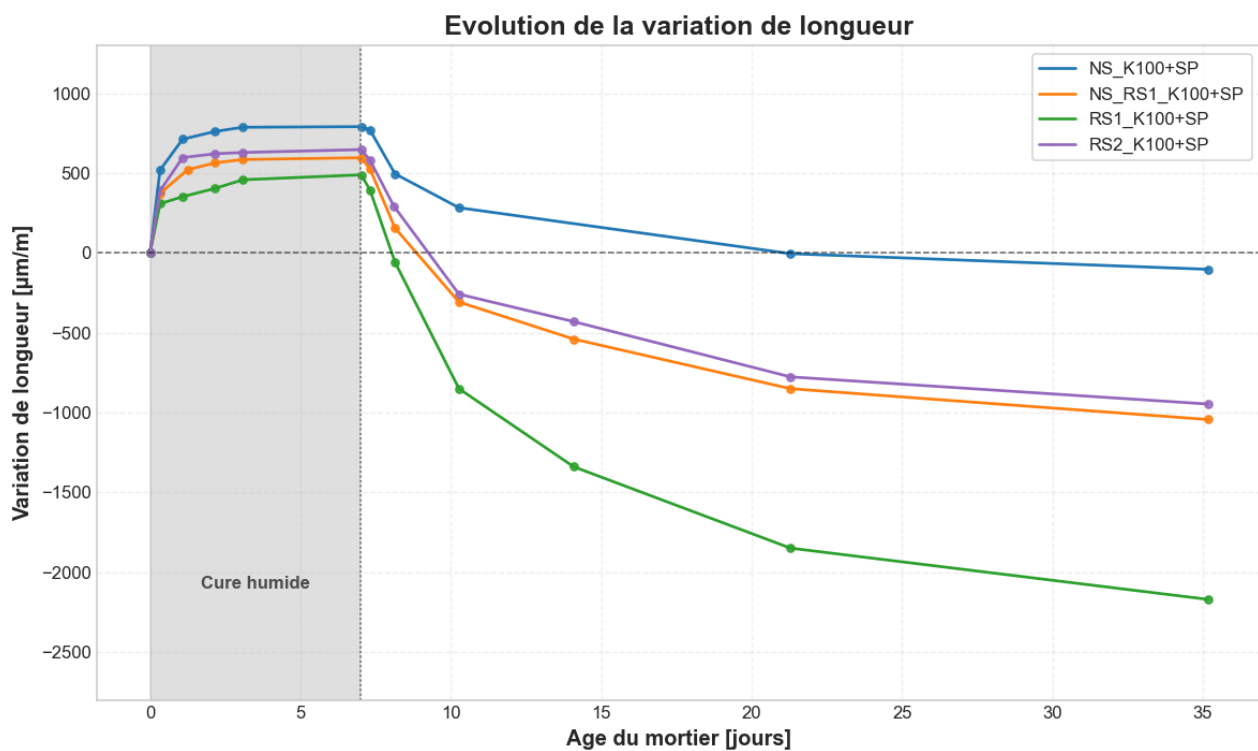


FIGURE 66 – Variation de longueur – Mélanges K100+SP

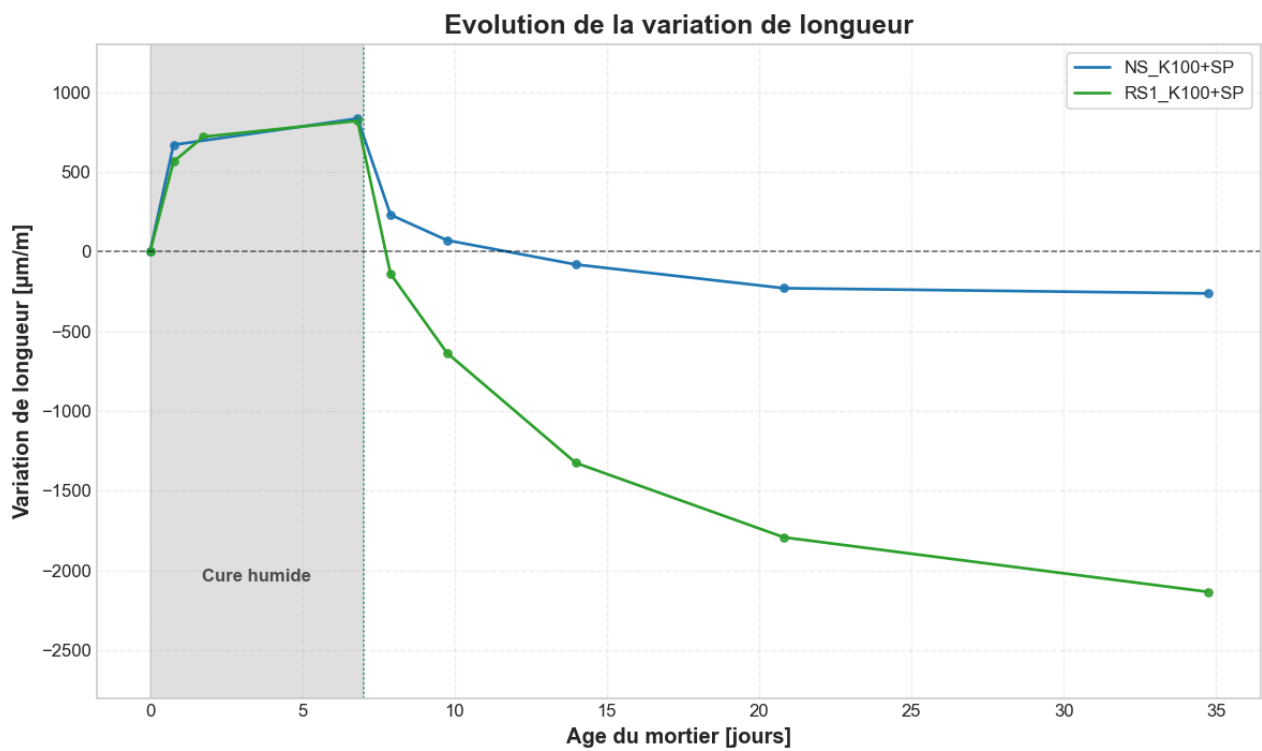


FIGURE 67 – Variation de longueur – Mélanges K100+SP (deuxième série)

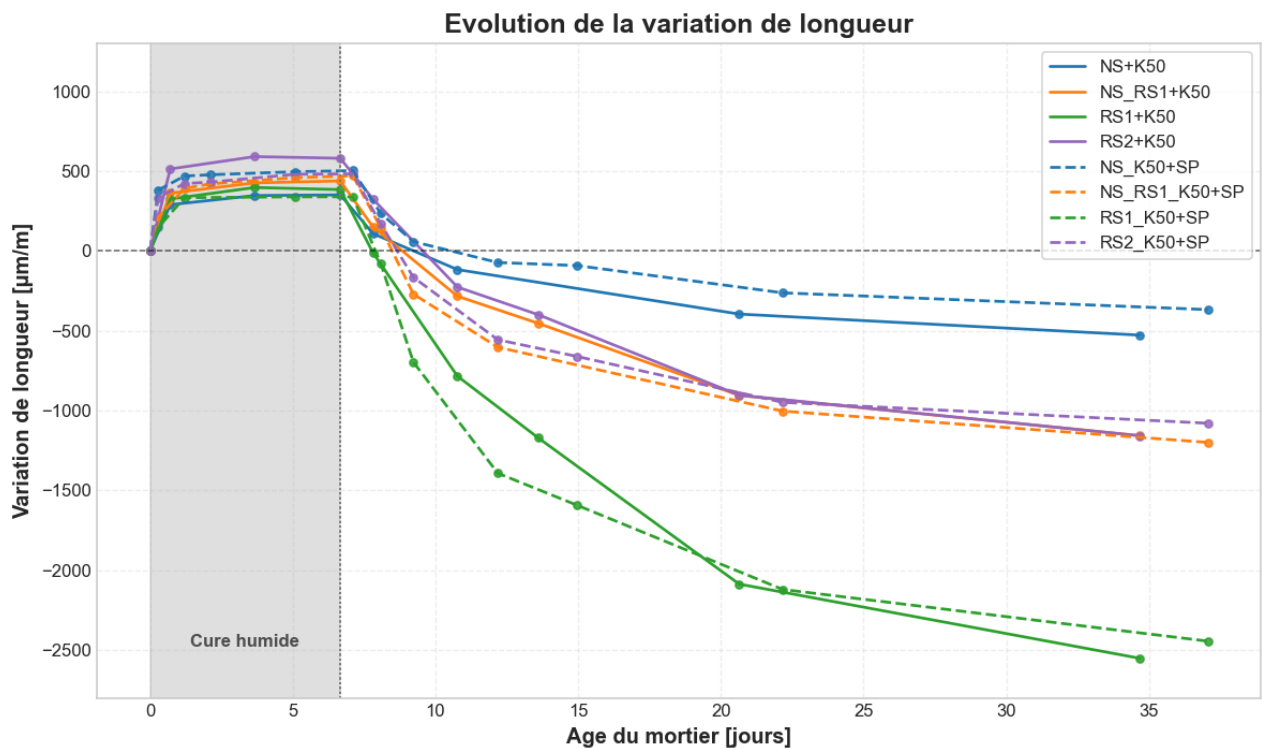


FIGURE 68 – Comparaison K50 vs K50+SP

C.2 Variation de la masse

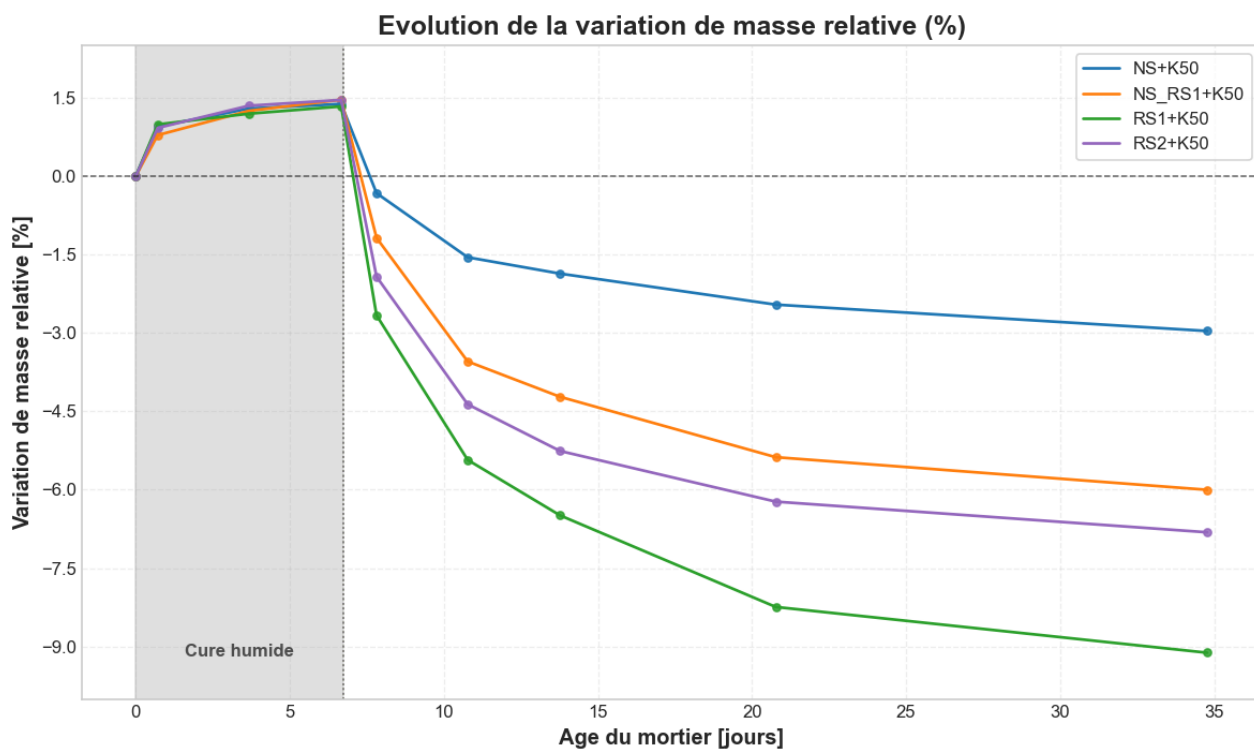


FIGURE 69 – Variation de la masse – K50

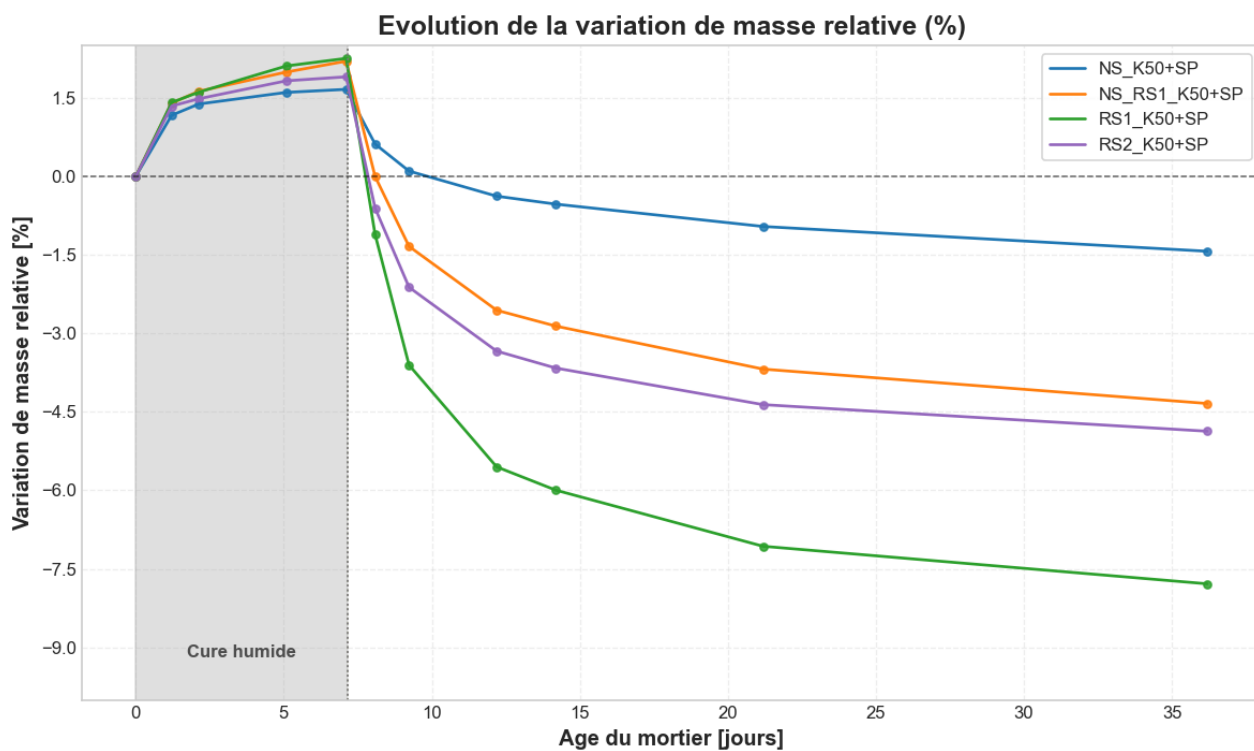


FIGURE 70 – Variation de la masse – K50+SP

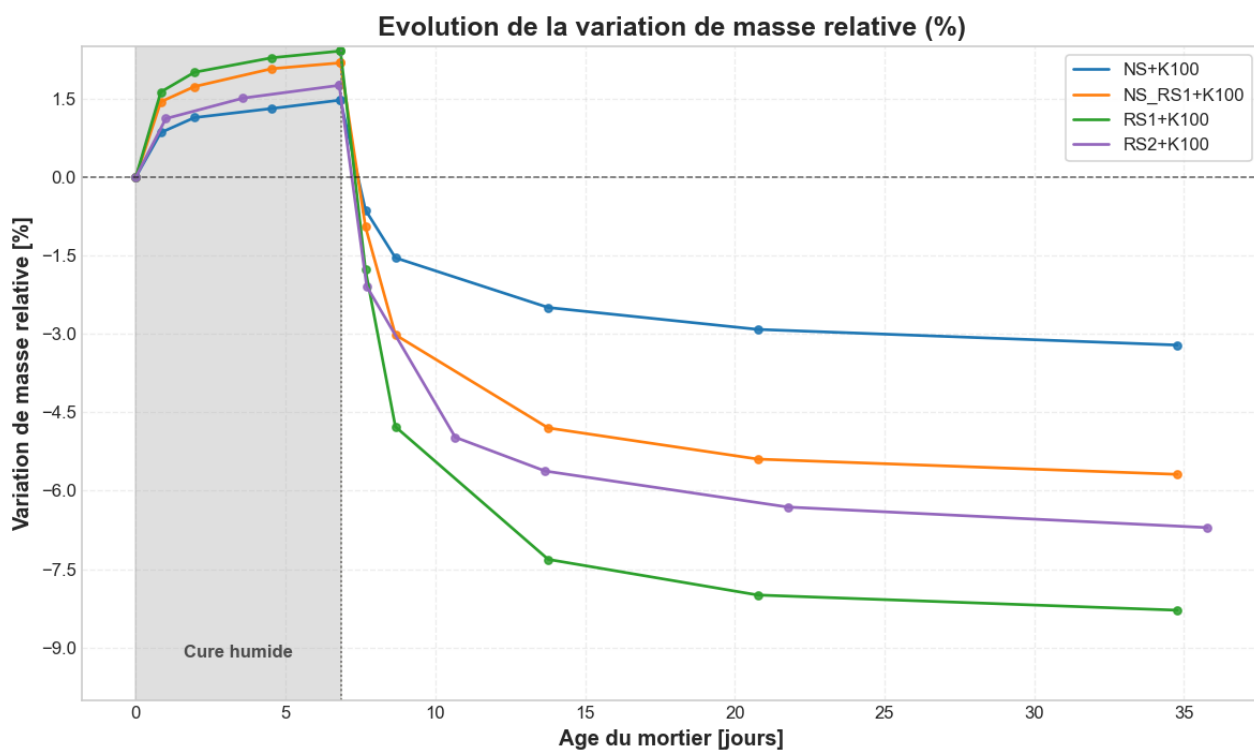


FIGURE 71 – Variation de la masse – K100

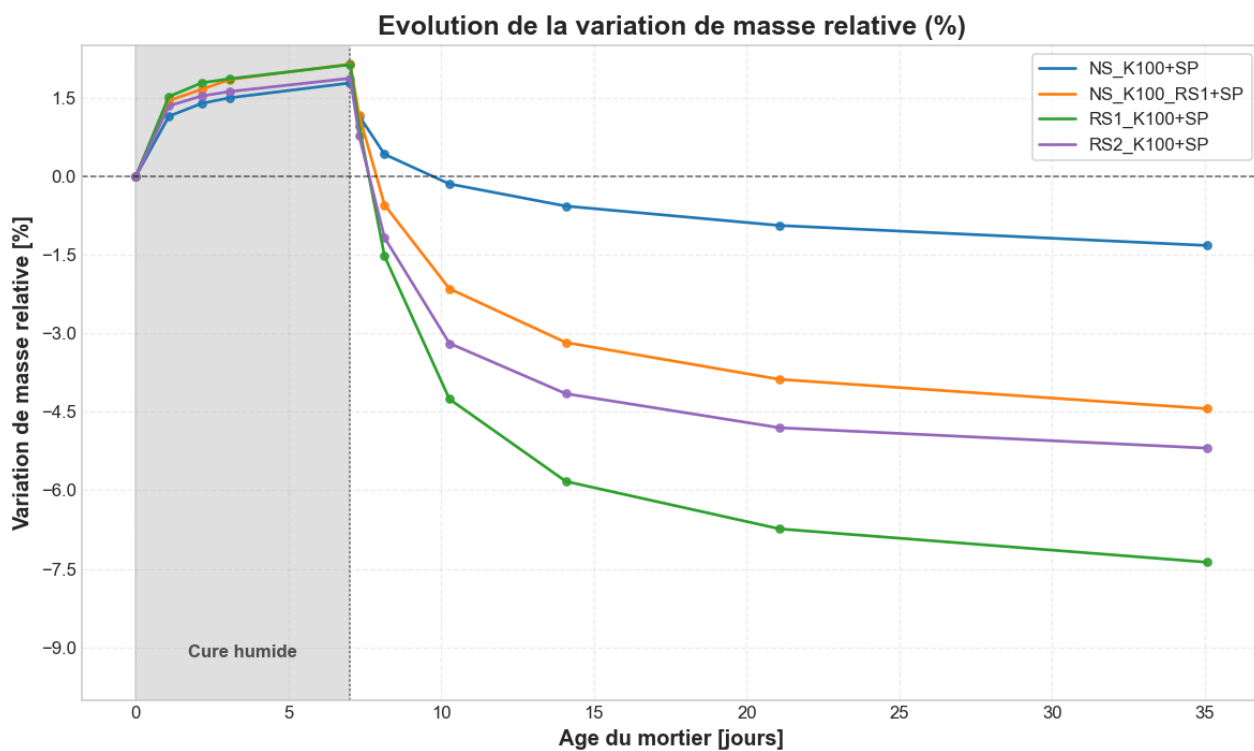


FIGURE 72 – Variation de la masse – K100+SP

C.3 Résistance à la compression à 28j – Échantillons individuels

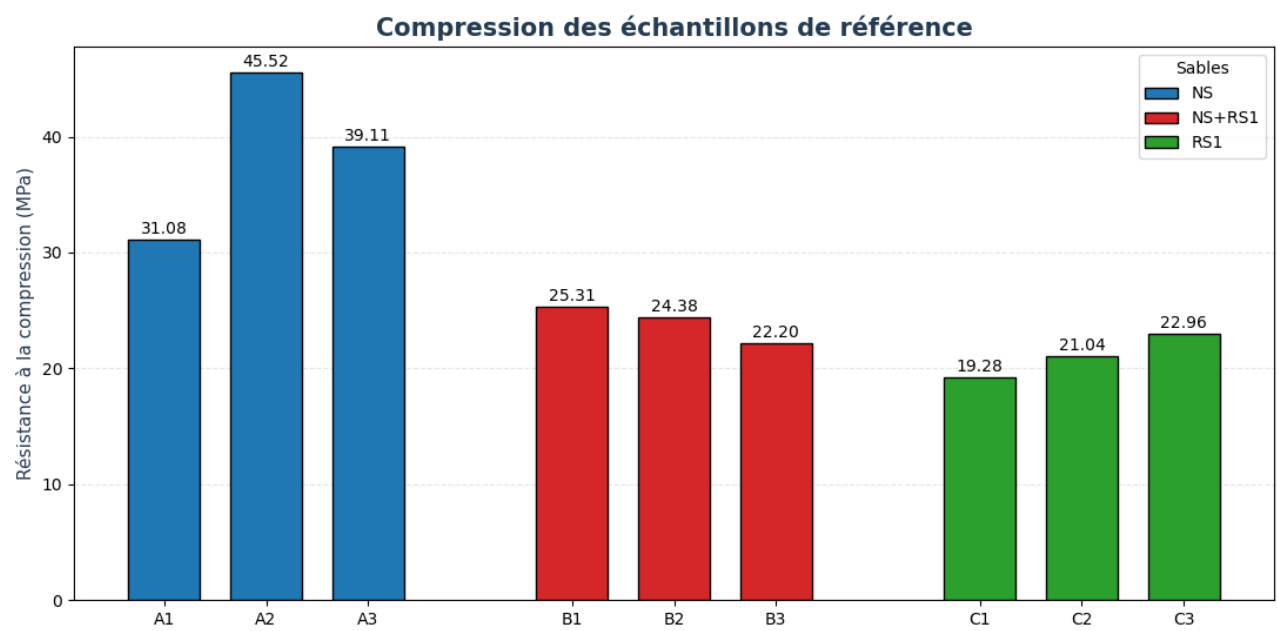


FIGURE 73 – Résistance à la compression – Formulations de référence

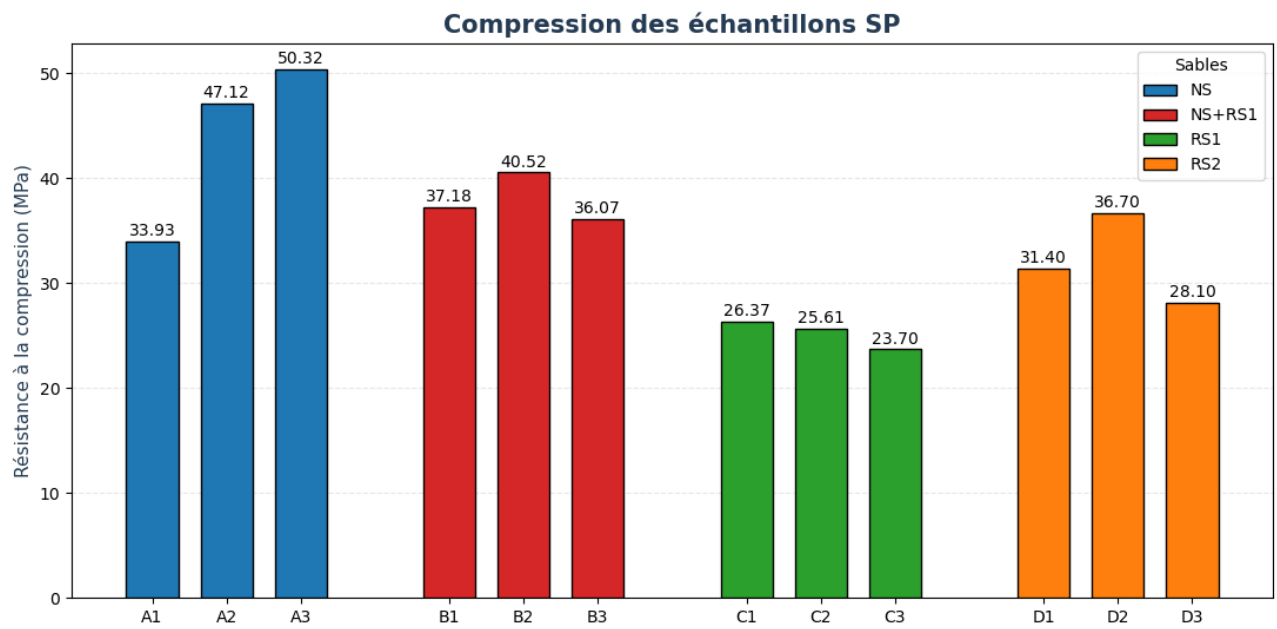


FIGURE 74 – Résistance à la compression – Mélanges SP

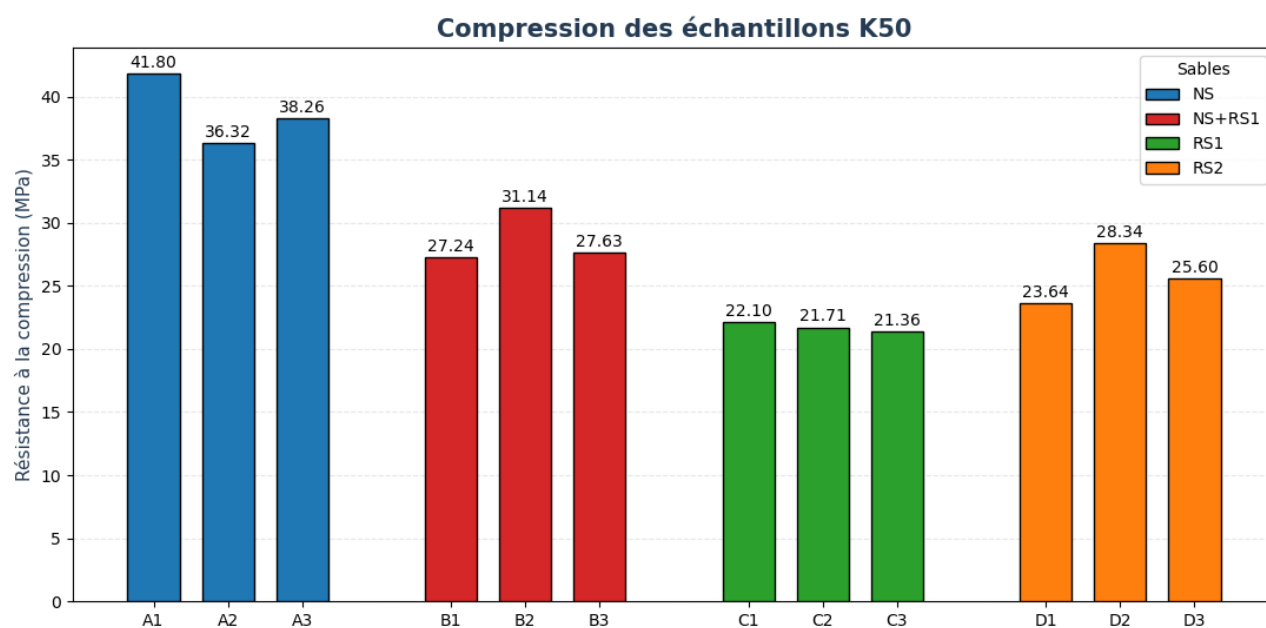


FIGURE 75 – Résistance à la compression – Mélanges K50

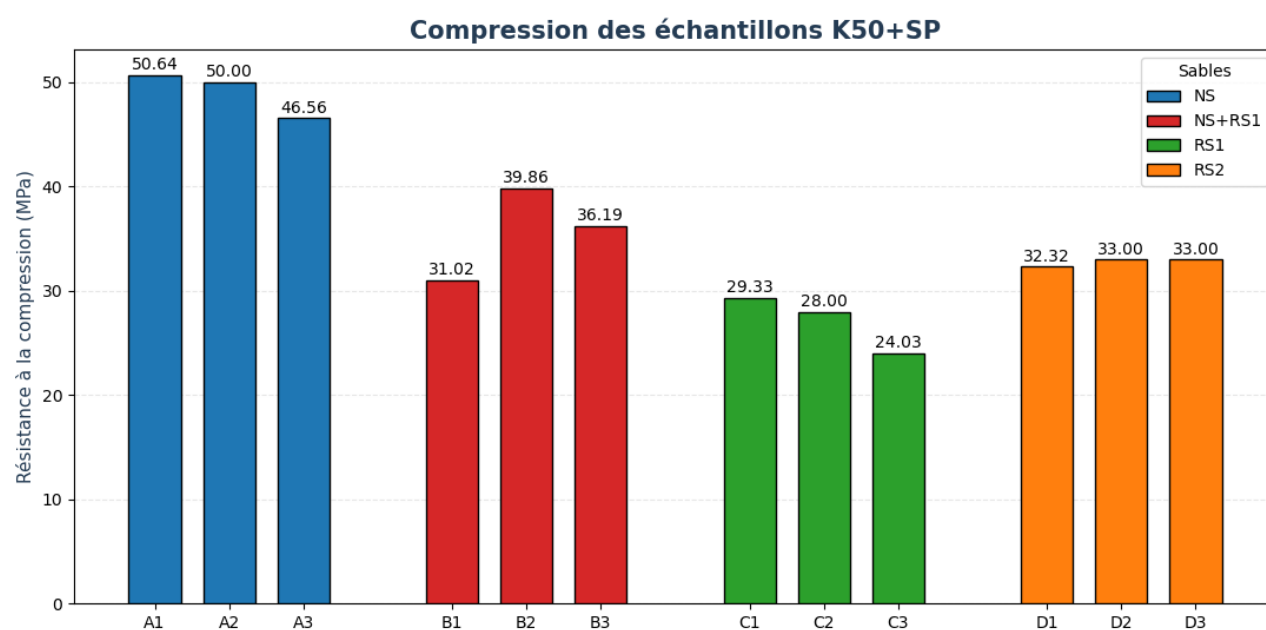


FIGURE 76 – Résistance à la compression – Mélanges K50+SP

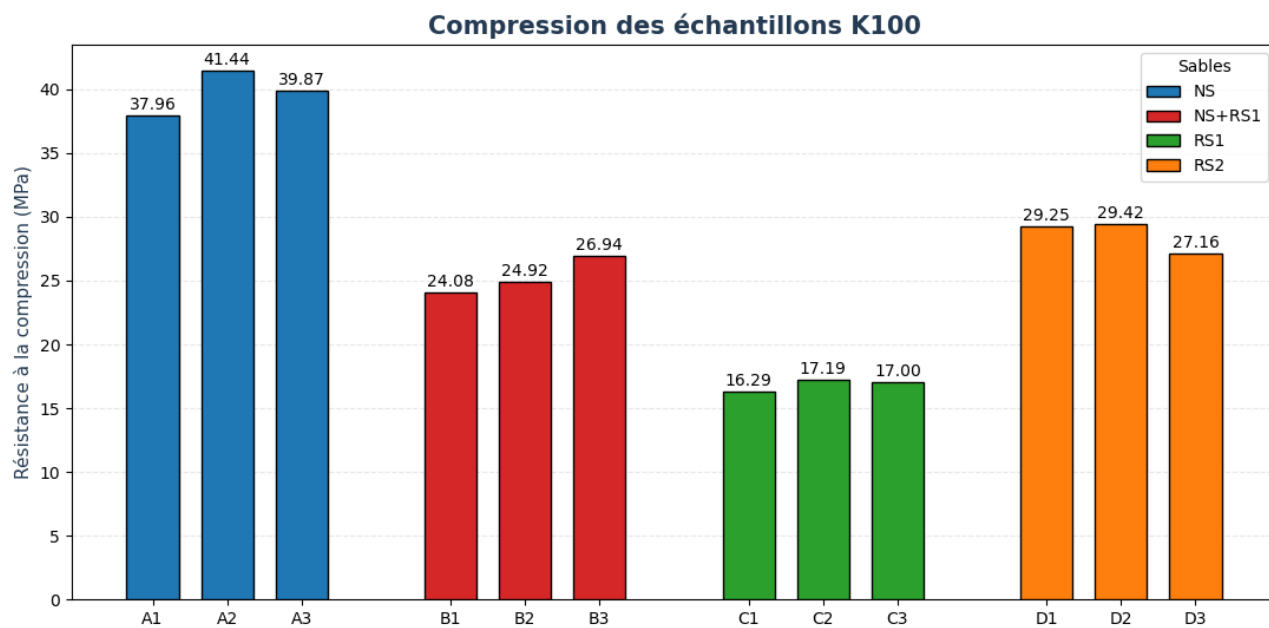


FIGURE 77 – Résistance à la compression – Mélanges K100

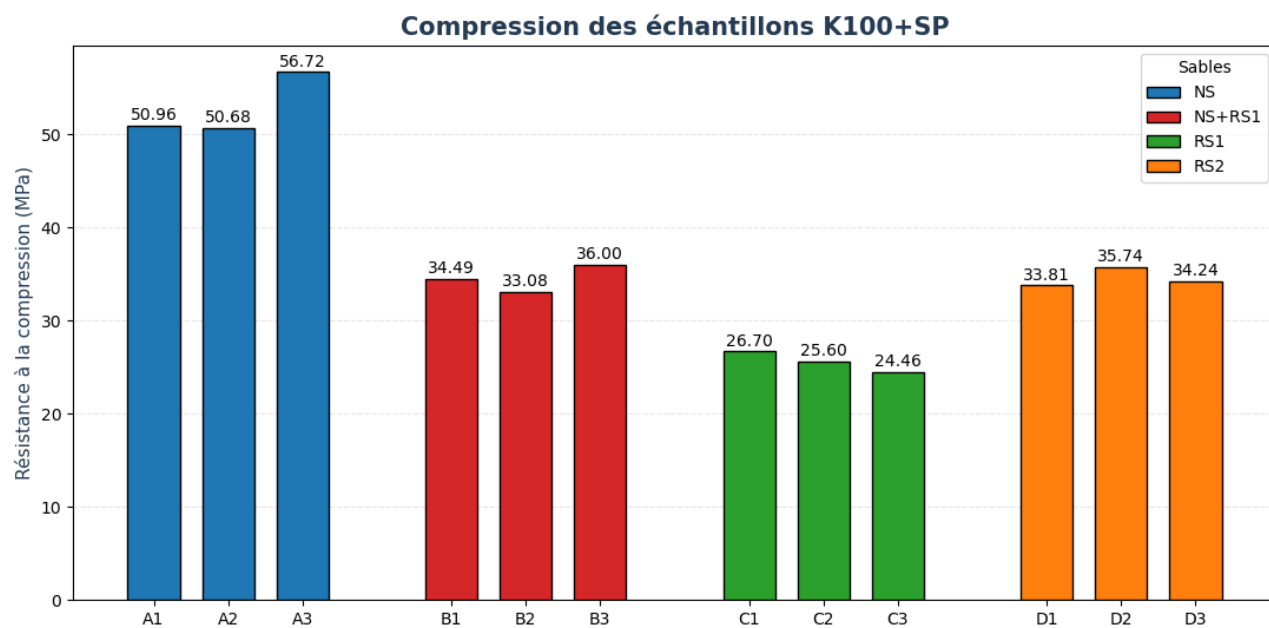


FIGURE 78 – Résistance à la compression – Mélanges K100+SP

C.4 Résistance à la traction indirecte à 28j – Échantillons individuels

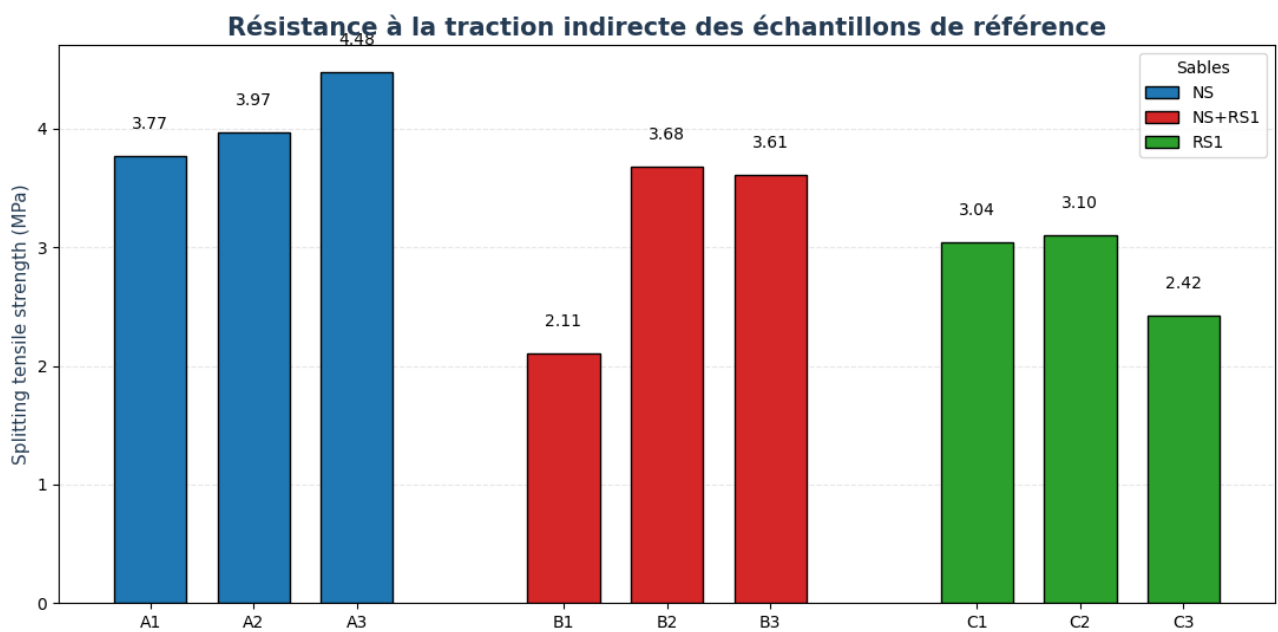


FIGURE 79 – Résistance à la traction indirecte – Formulations de référence

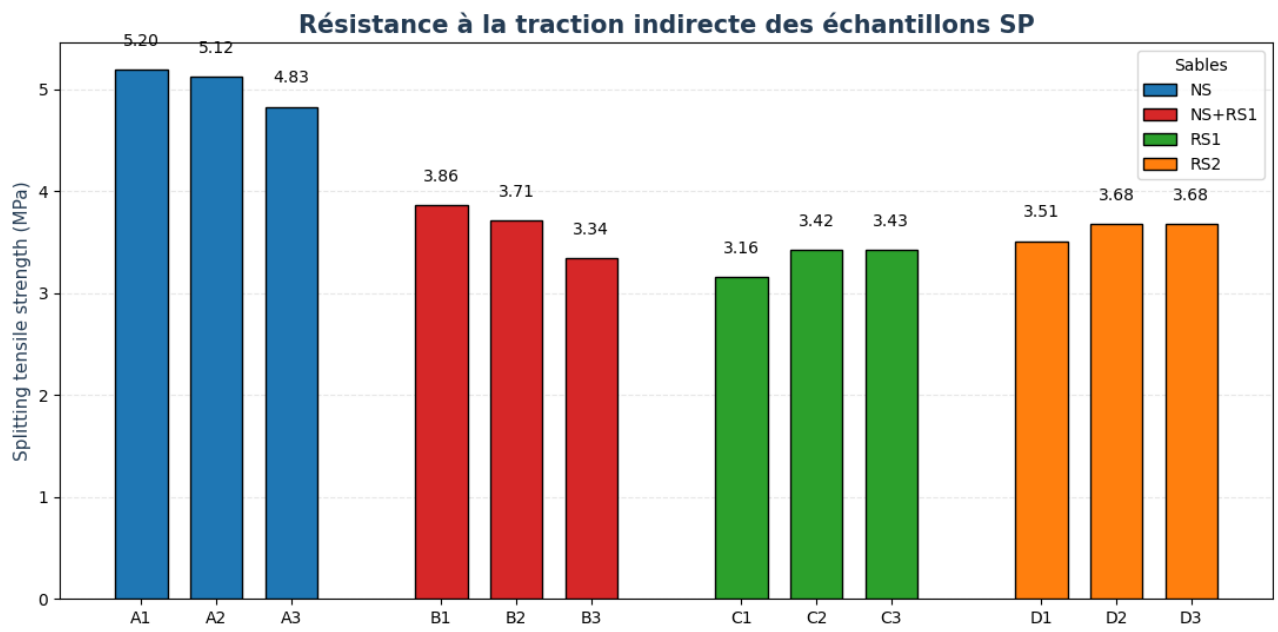


FIGURE 80 – Résistance à la traction indirecte – Mélanges SP

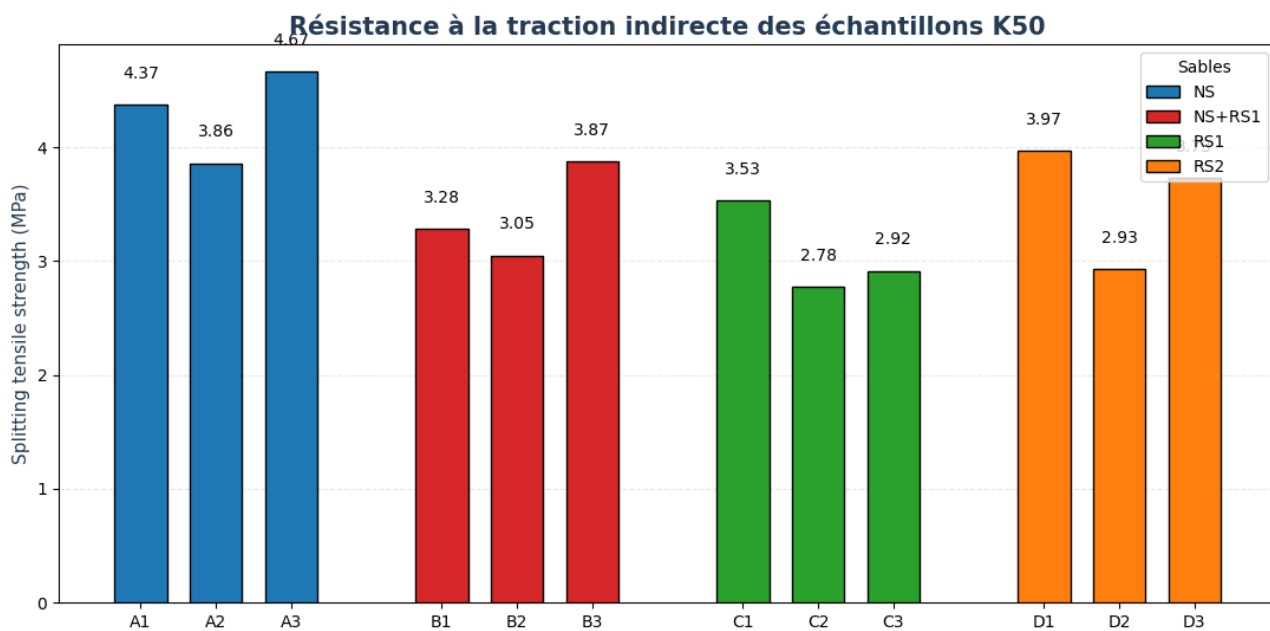


FIGURE 81 – Résistance à la traction indirecte – Mélanges K50

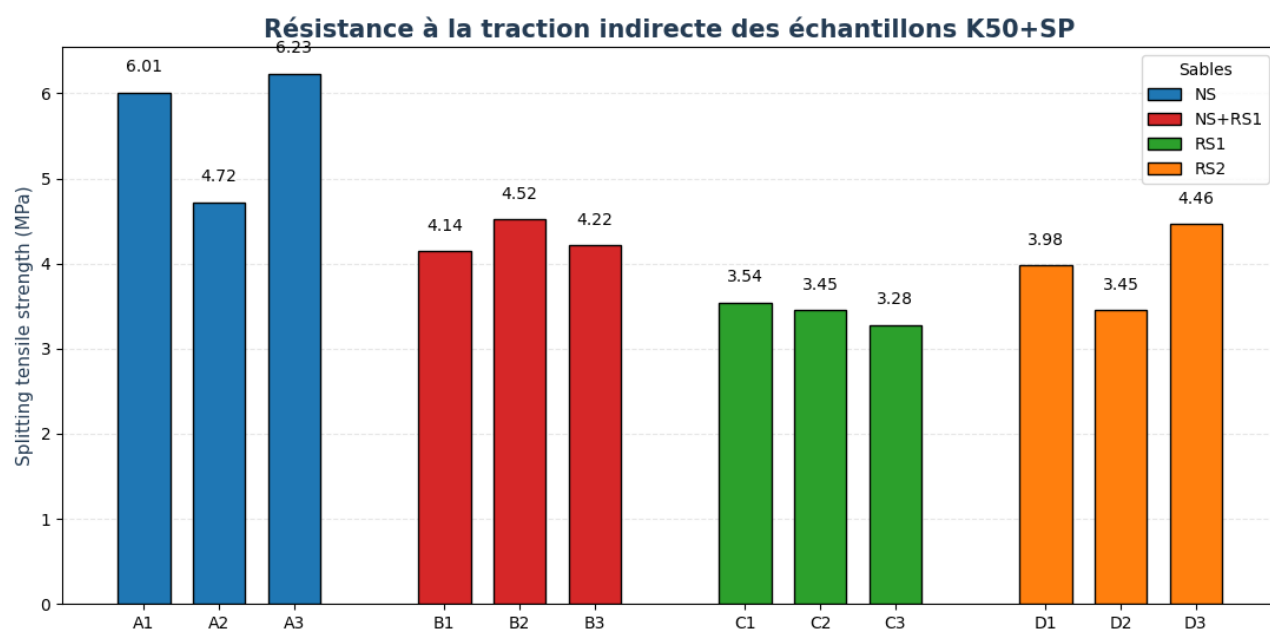


FIGURE 82 – Résistance à la traction indirecte – Mélanges K50+SP

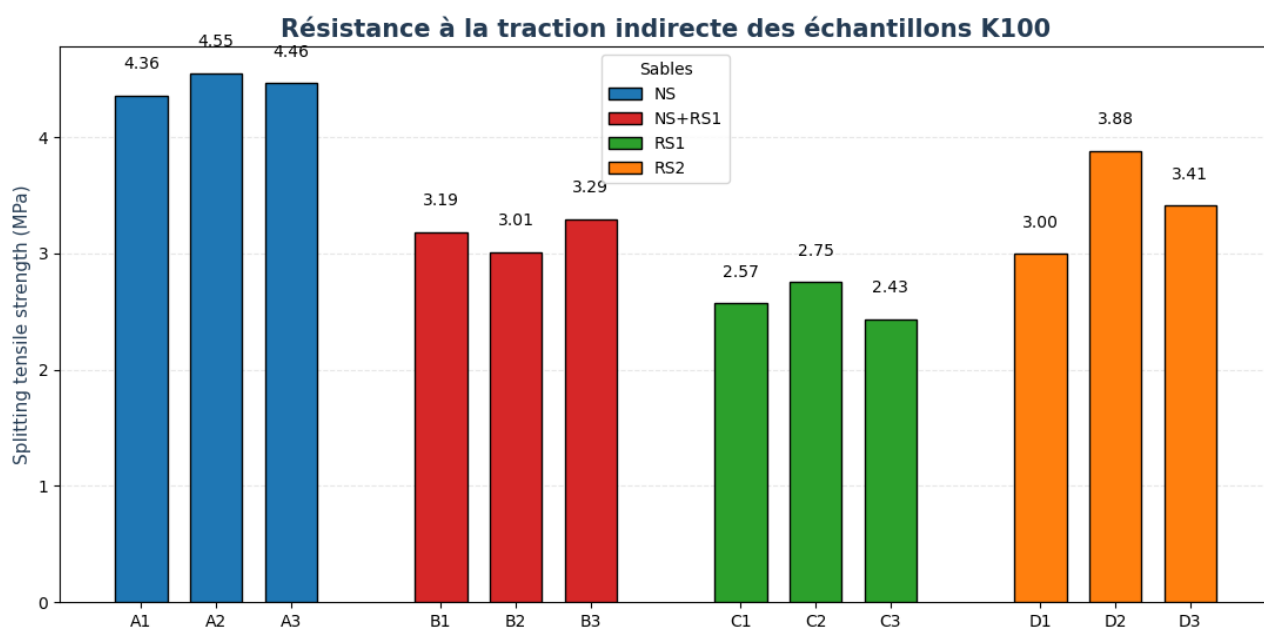


FIGURE 83 – Résistance à la traction indirecte – Mélanges K100

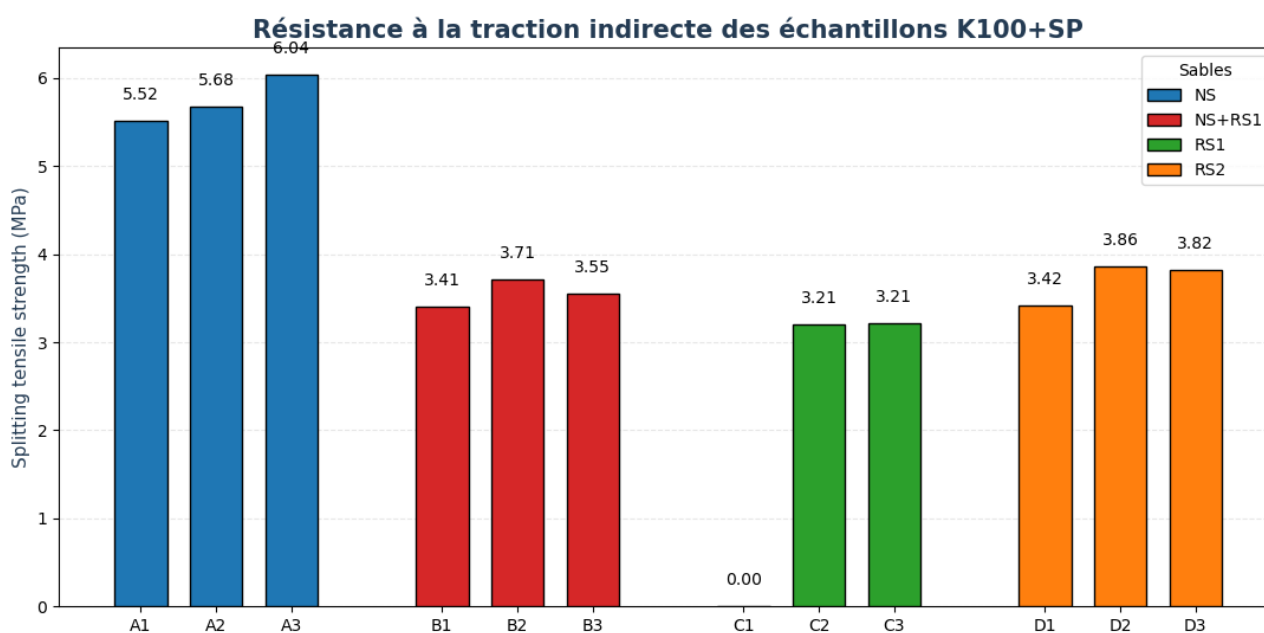


FIGURE 84 – Résistance à la traction indirecte – Mélanges K100+SP

C.5 Module de Young – Courbes contrainte-déformation

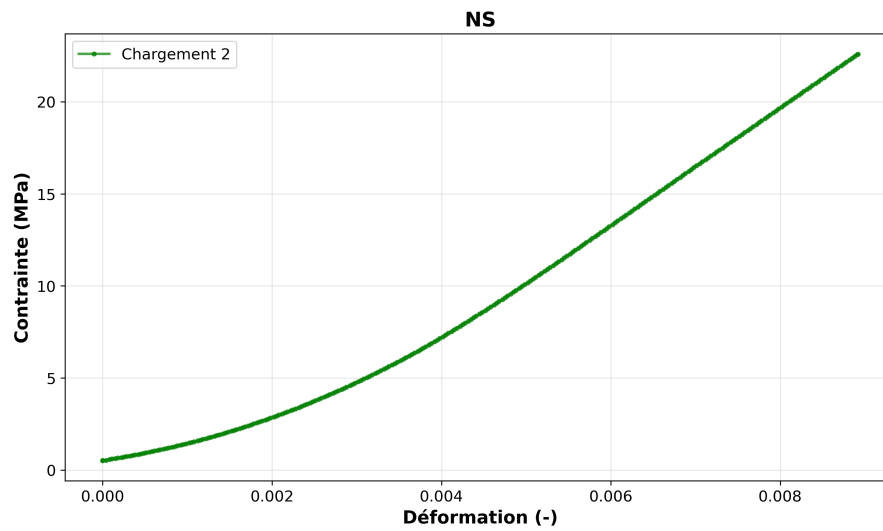


FIGURE 85 – Courbe contrainte-déformation – Formulation NS

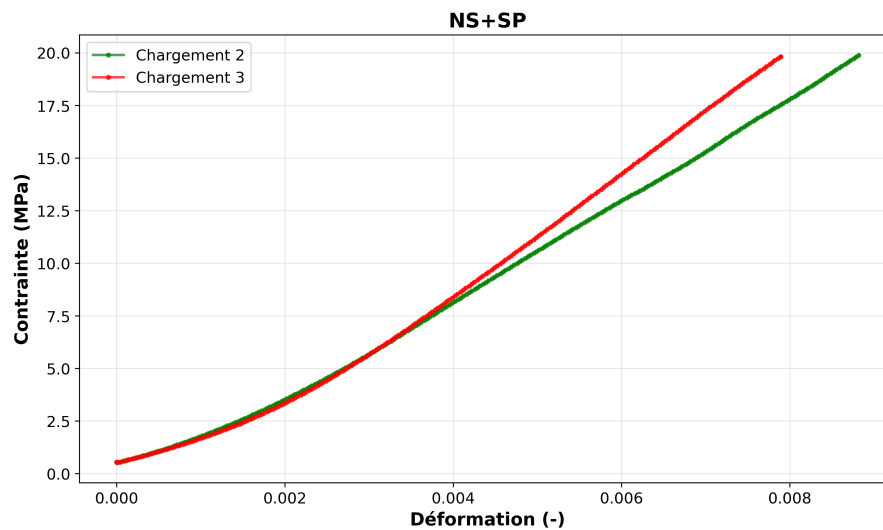


FIGURE 86 – Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+SP

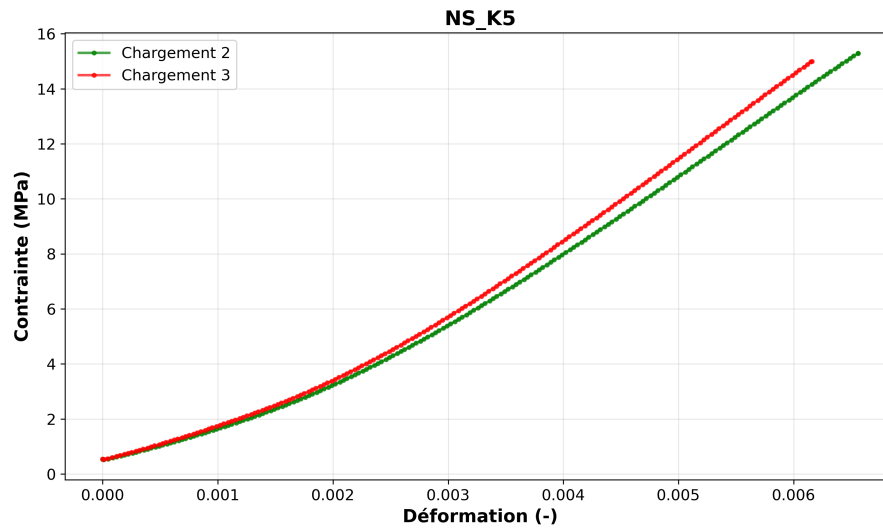


FIGURE 87 – Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K50

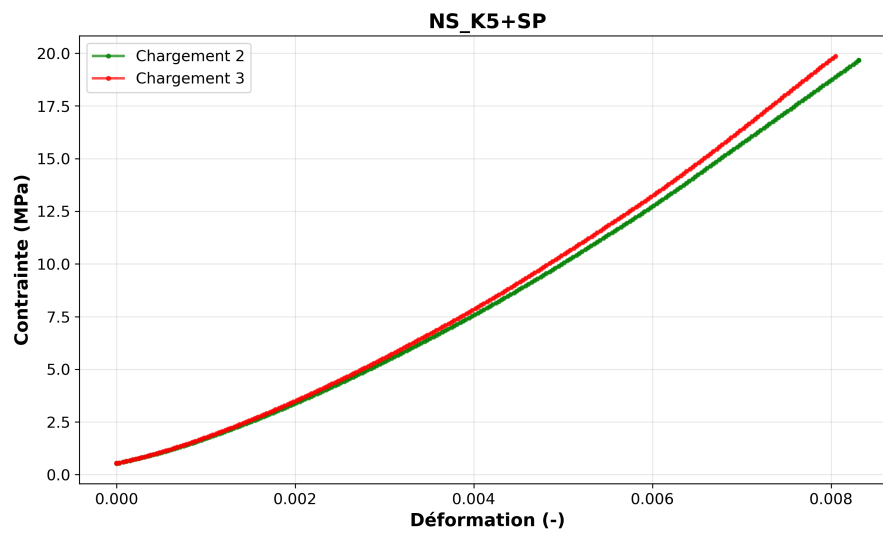


FIGURE 88 – Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K50+SP

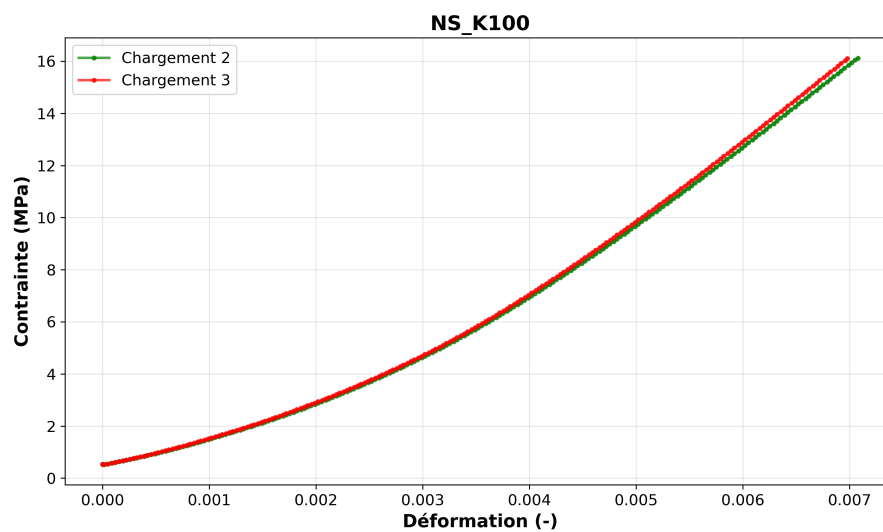


FIGURE 89 – Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K100

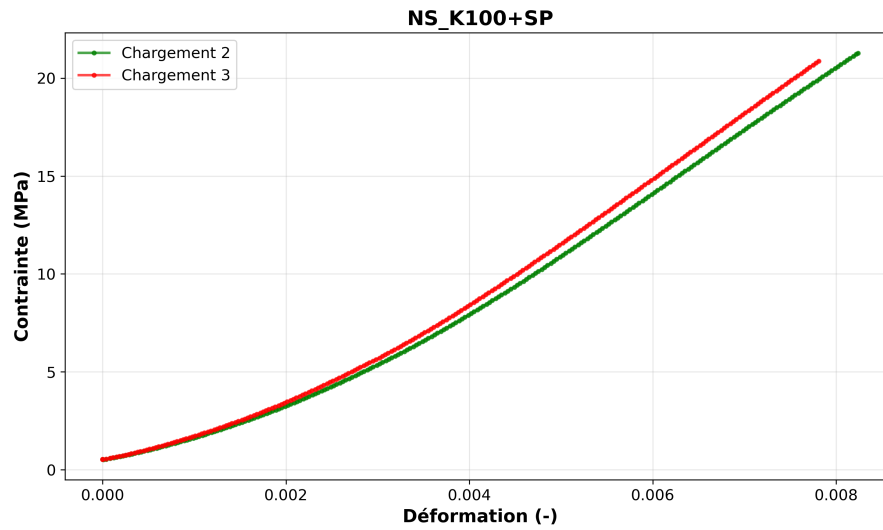


FIGURE 90 – Courbe contrainte-déformation – Formulation NS+K100+SP

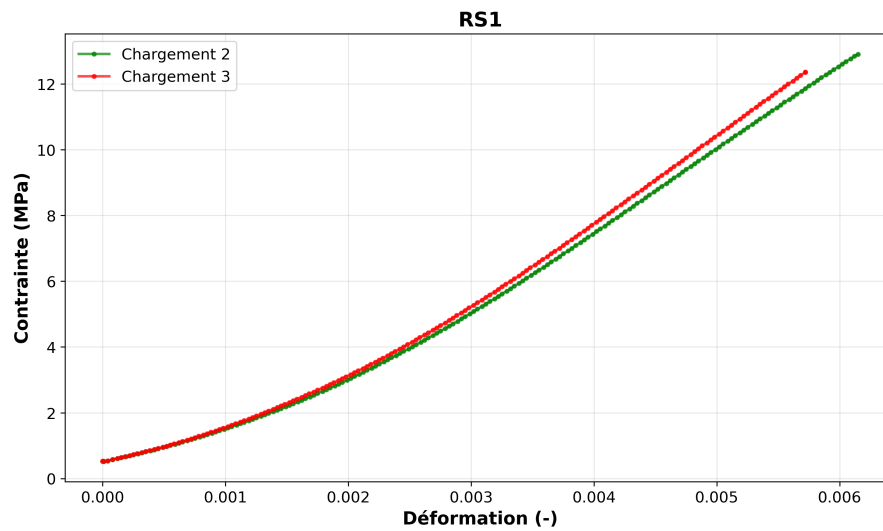


FIGURE 91 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1

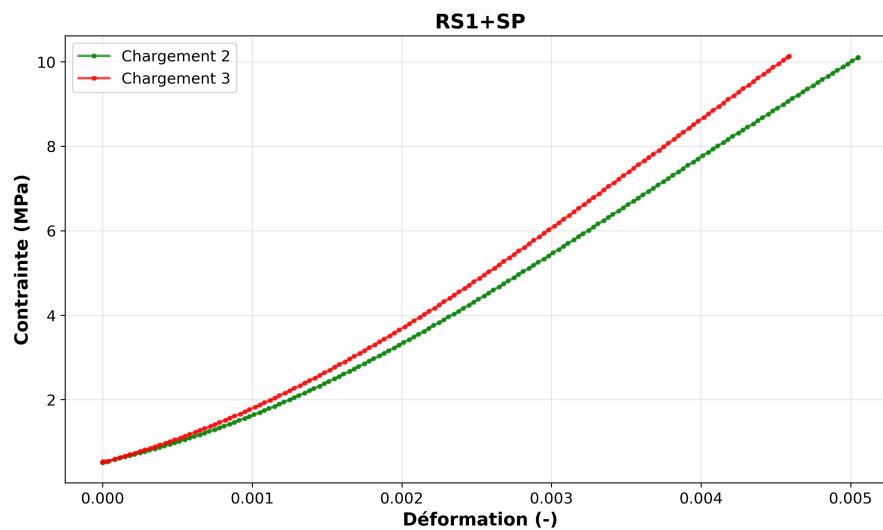


FIGURE 92 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+SP

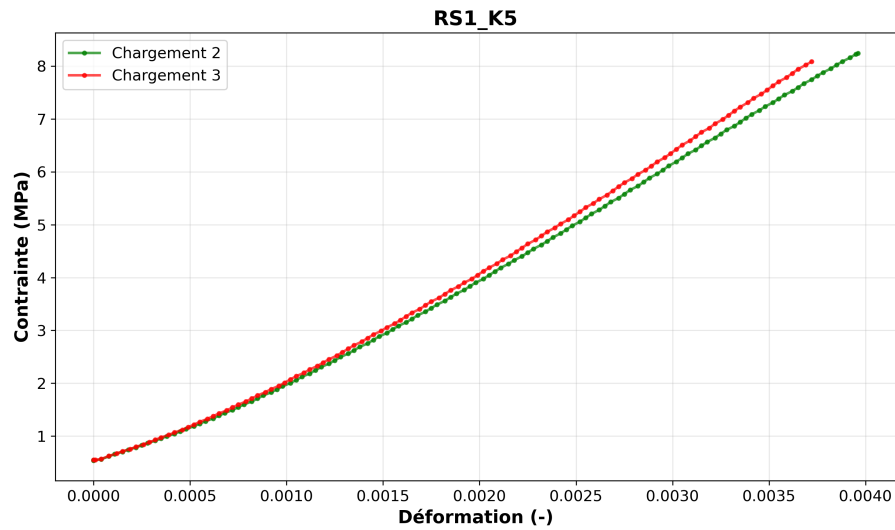


FIGURE 93 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+K50

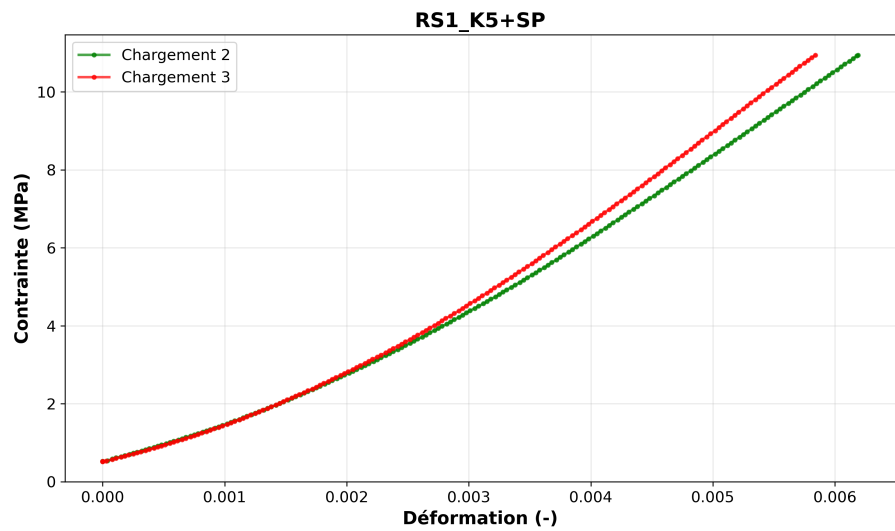


FIGURE 94 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+K50+SP

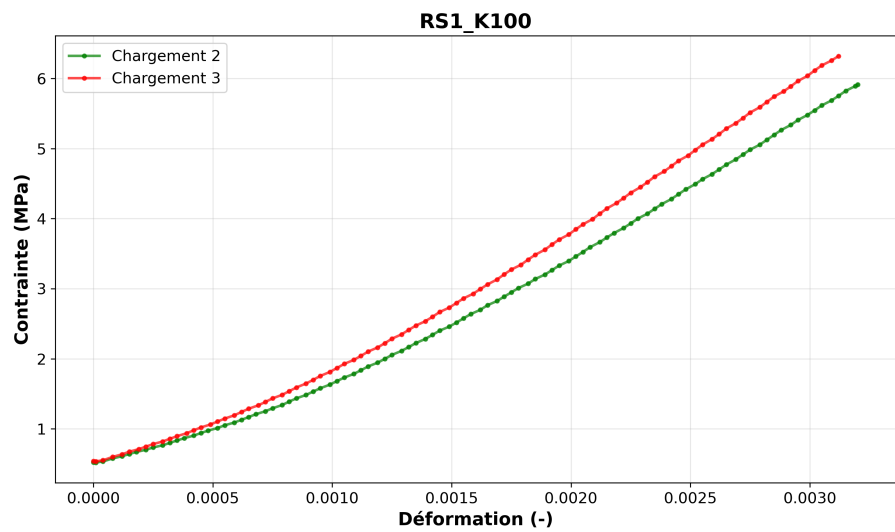


FIGURE 95 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS1+K100

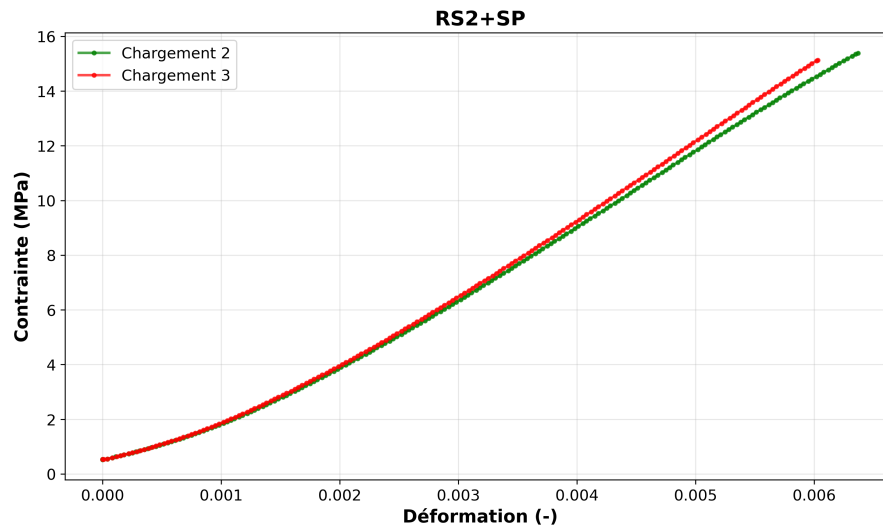


FIGURE 96 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+SP

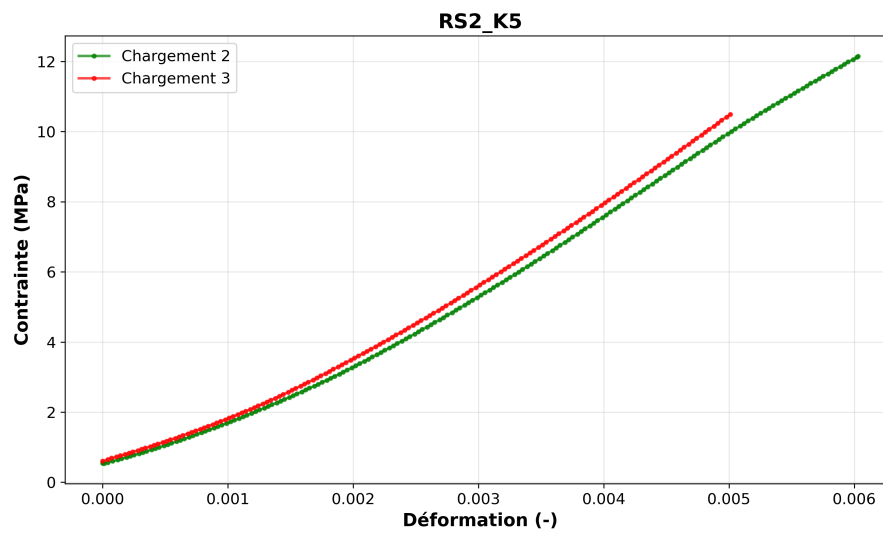


FIGURE 97 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K50

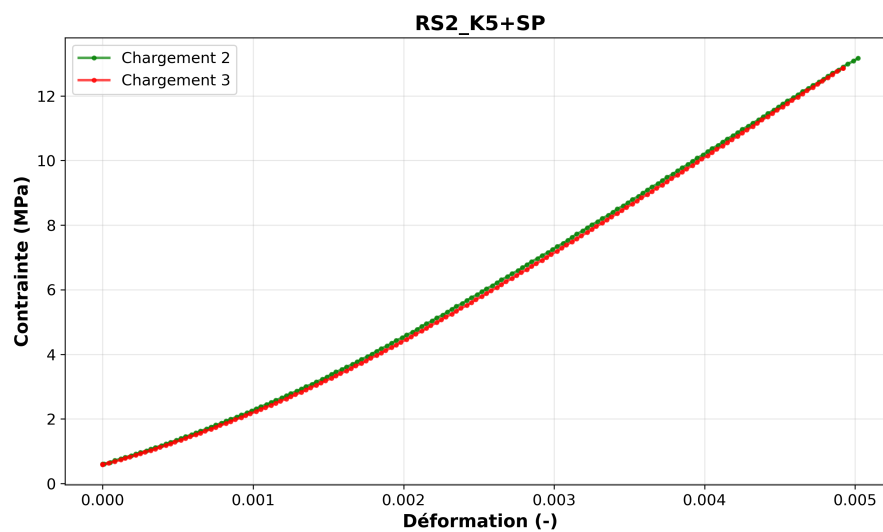


FIGURE 98 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K50+SP

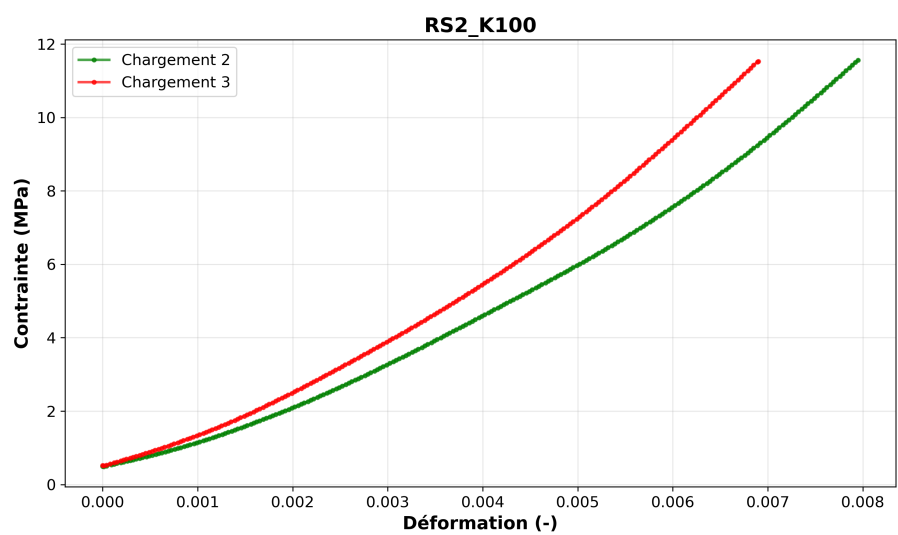


FIGURE 99 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K100

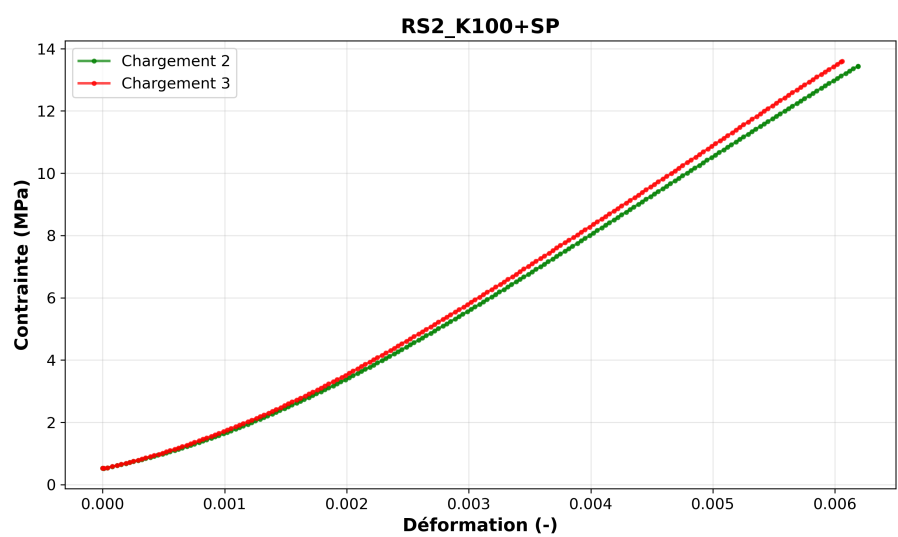


FIGURE 100 – Courbe contrainte-déformation – Formulation RS2+K100+SP

C.6 Absorption et porosité sur mortiers durcis

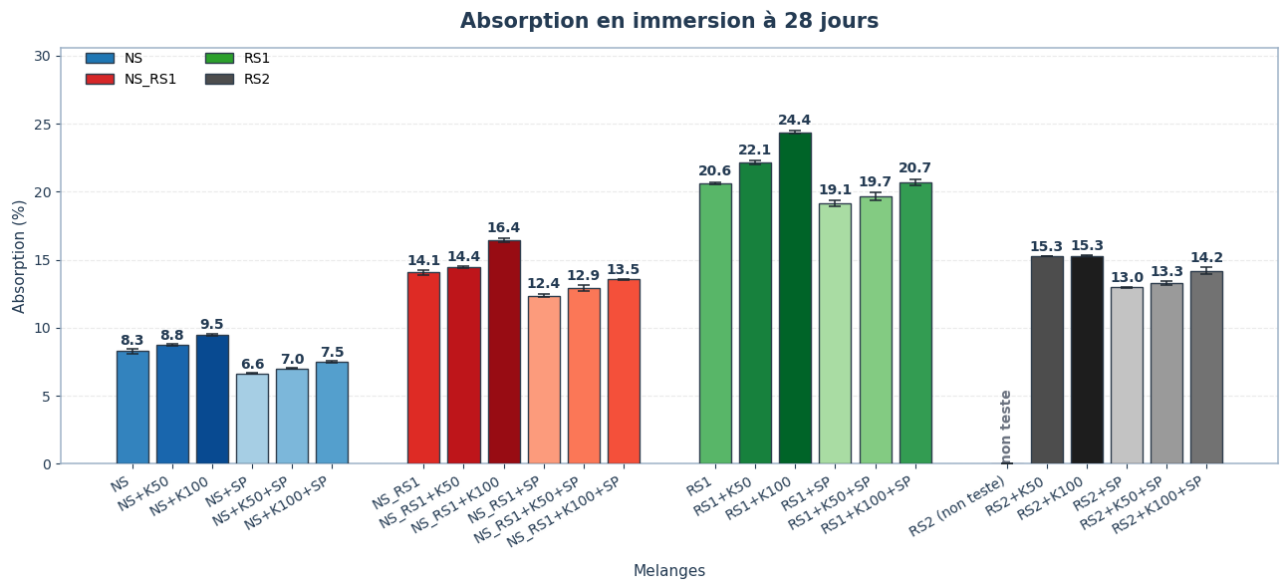


FIGURE 101 – Absorption sur mortiers durcis

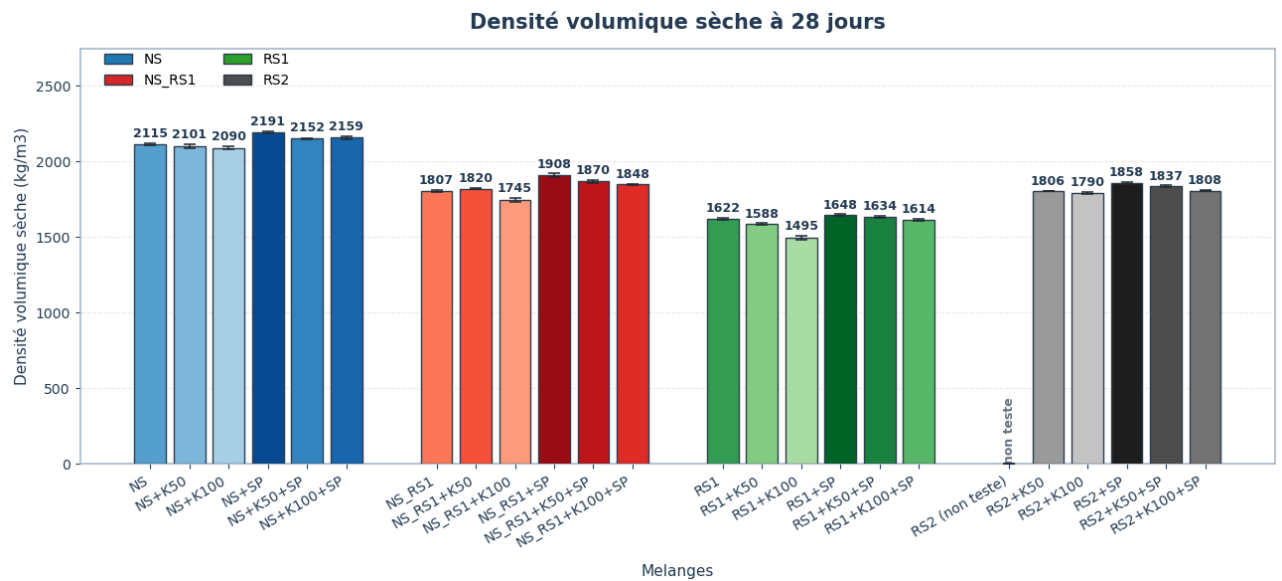


FIGURE 102 – Densité volumique sèche

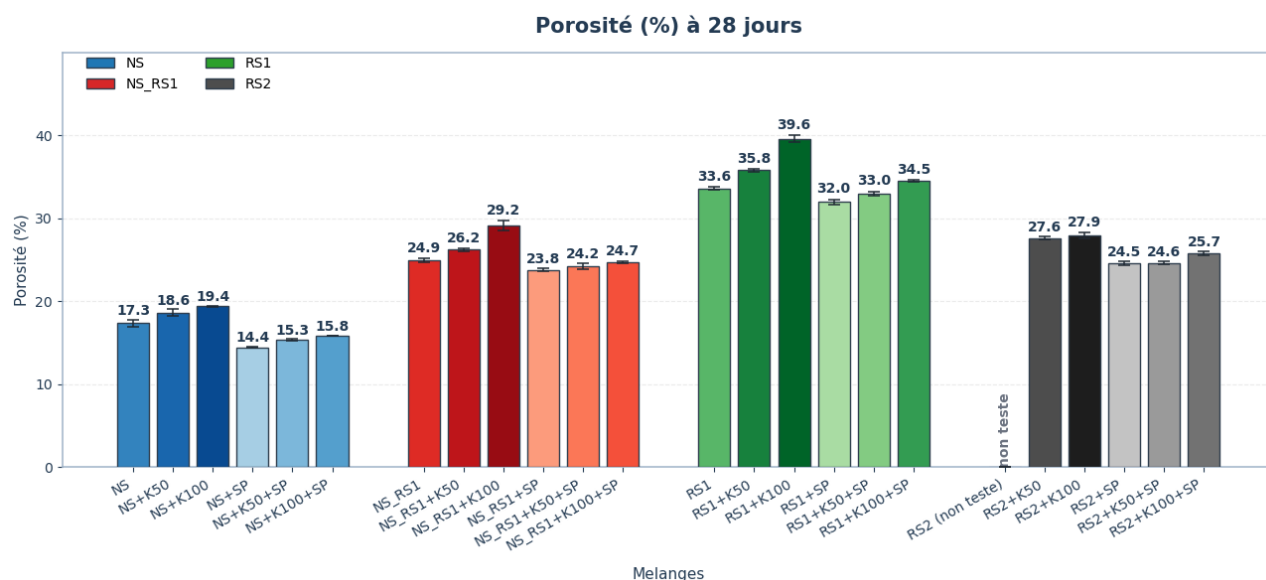


FIGURE 103 – Porosité accessible à l'eau

C.7 Comparaison des méthodes de calcul du module de Young

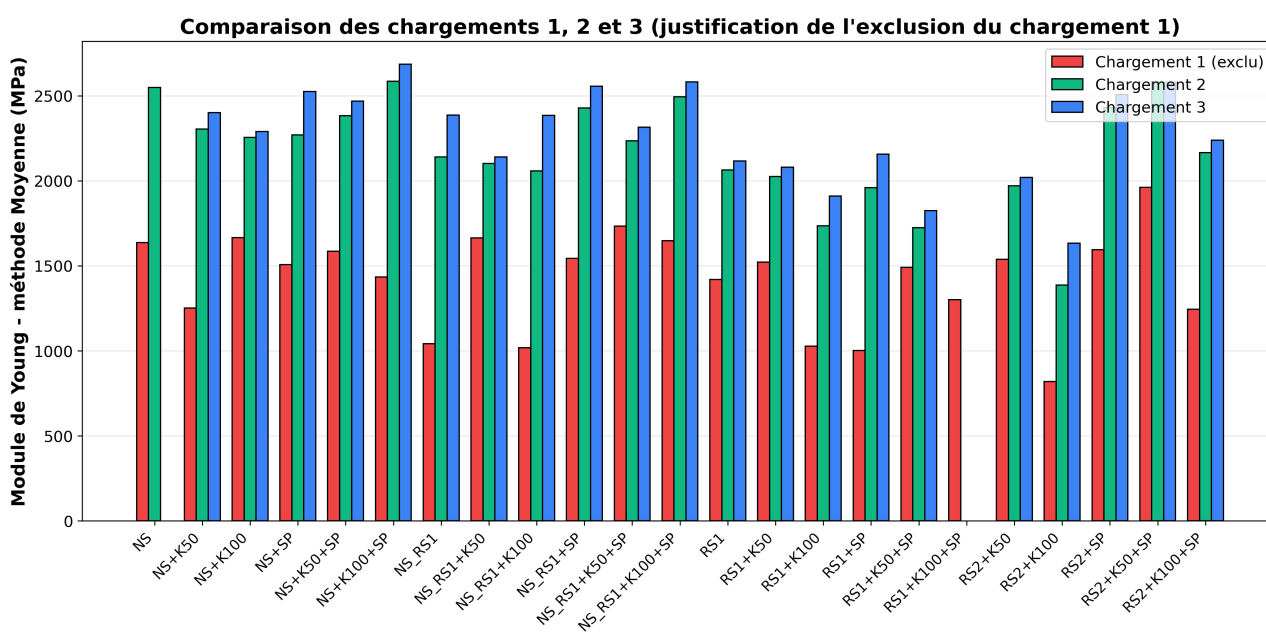


FIGURE 104 – Comparaison des chargements 1 vs 2-3

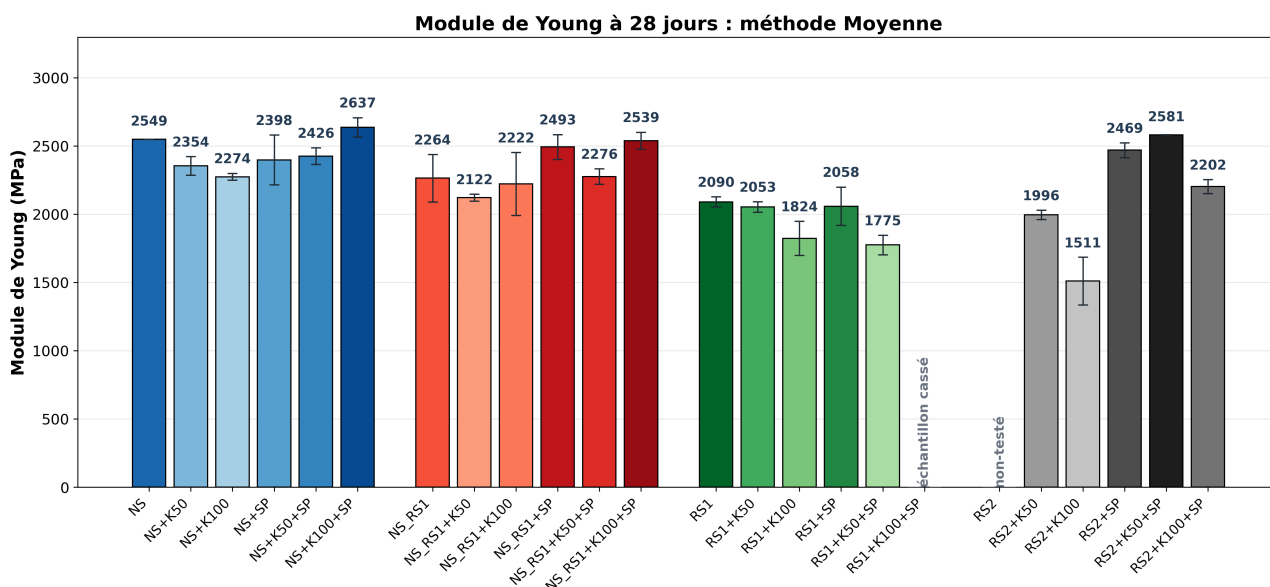


FIGURE 105 – Histogramme – Méthode de la Moyenne

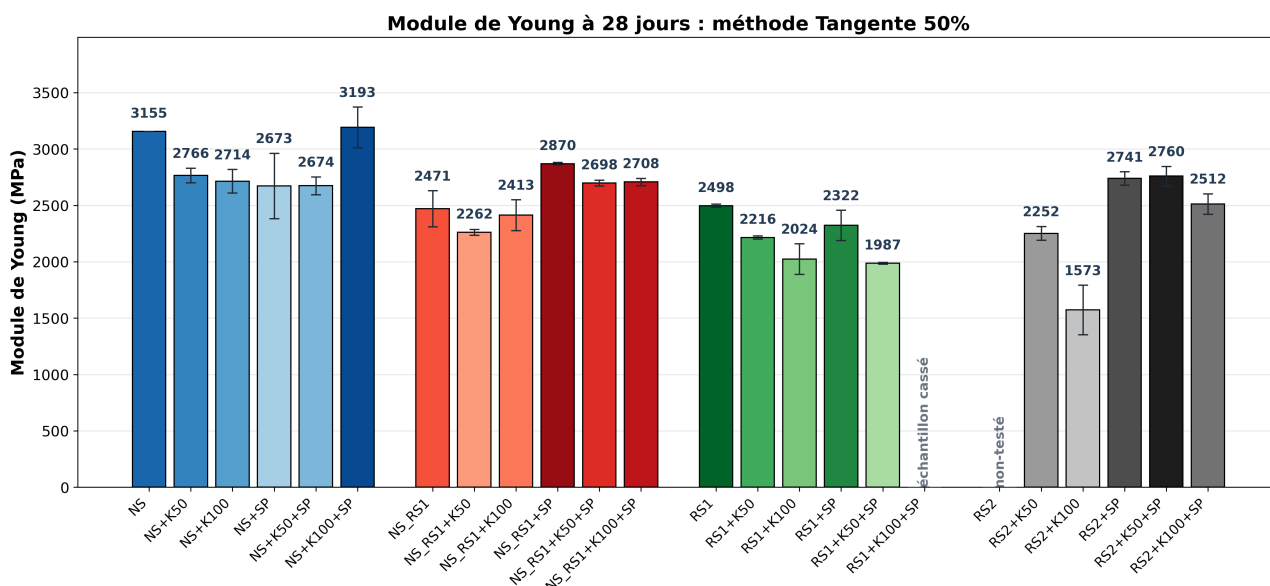


FIGURE 106 – Histogramme – Méthode de la Tangente 50

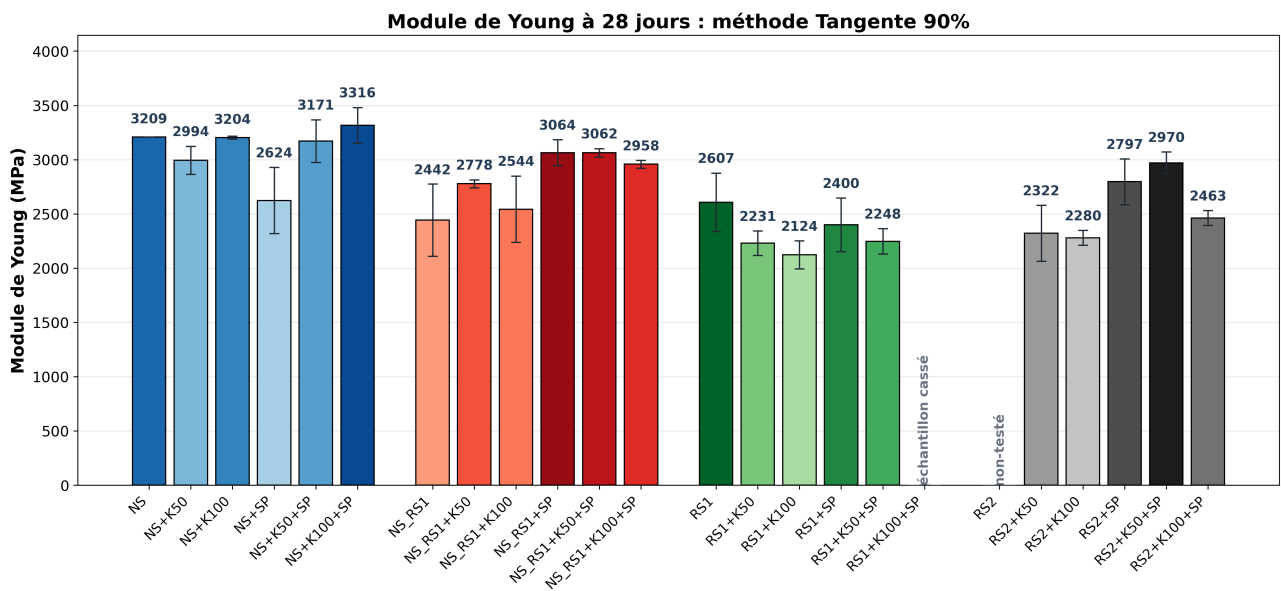


FIGURE 107 – Histogramme – Méthode de la Tangente 90

C.8 Photos finales de l'essai du *German angle*

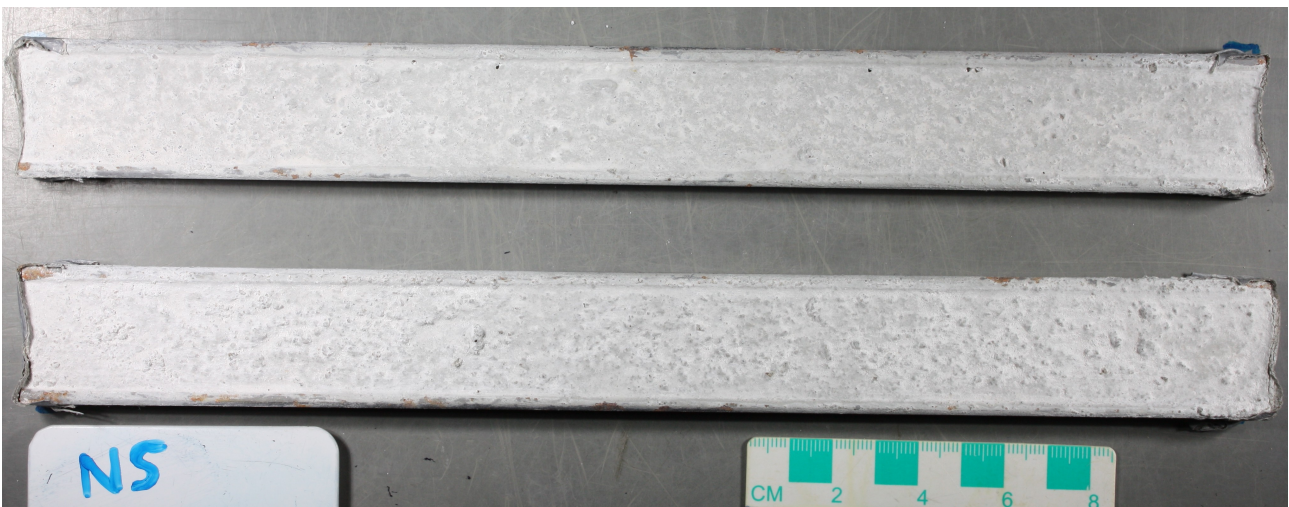


FIGURE 108 – *German angle* – Formulation NS

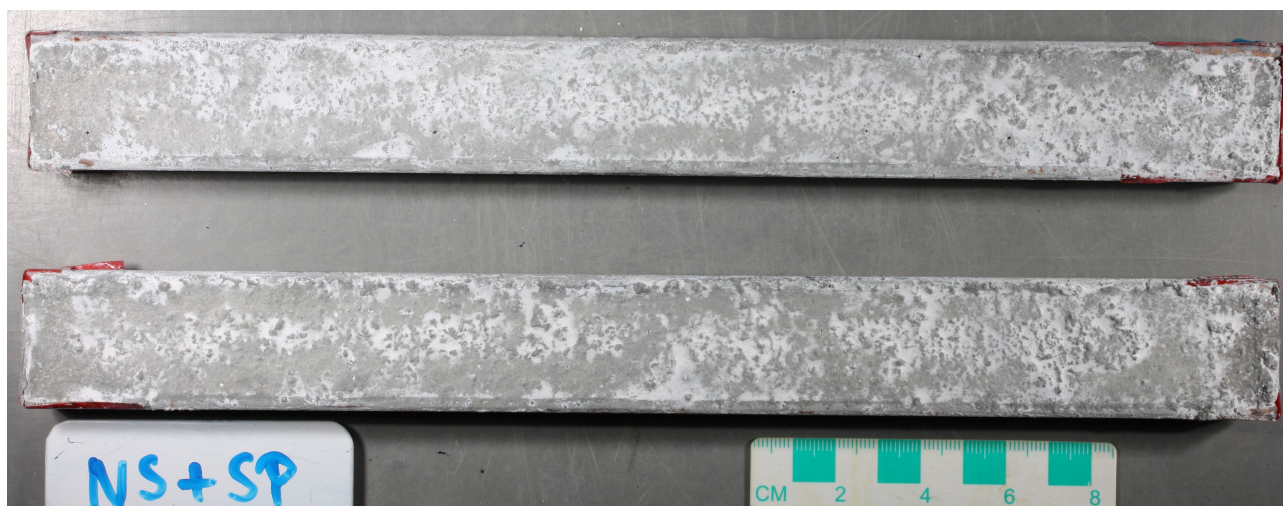


FIGURE 109 – *German angle* – Formulation NS+SP

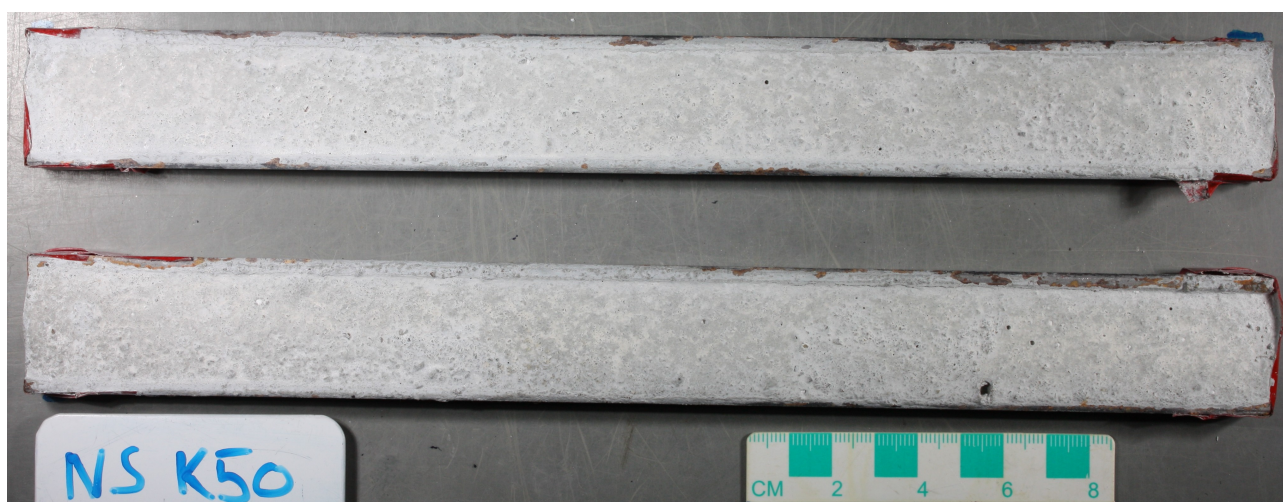


FIGURE 110 – *German angle* – Formulation NS+K50



FIGURE 111 – *German angle* – Formulation NS+K50+SP

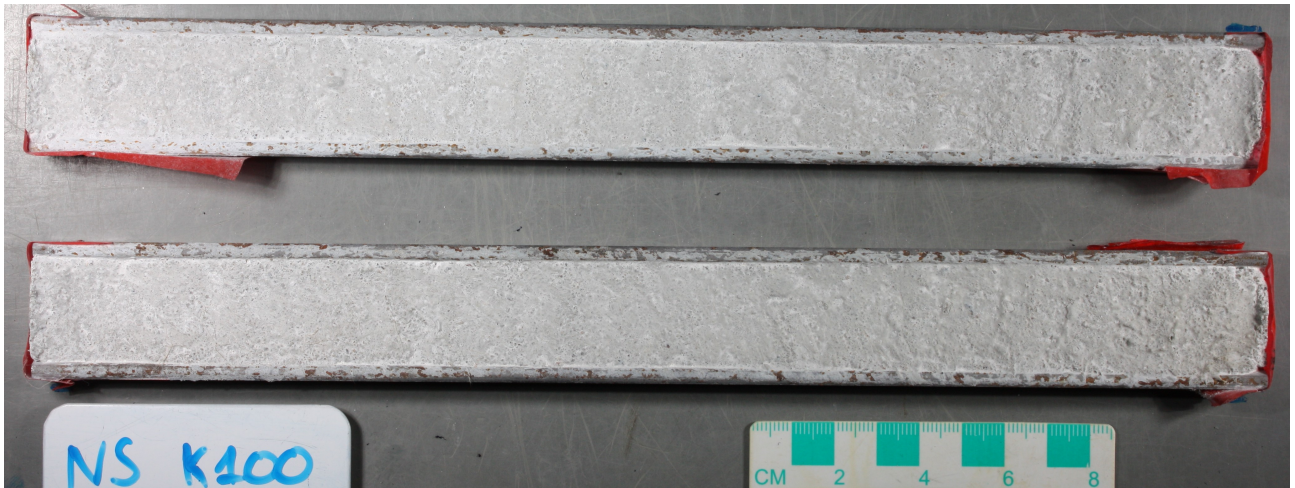


FIGURE 112 – *German angle* – Formulation NS+K100

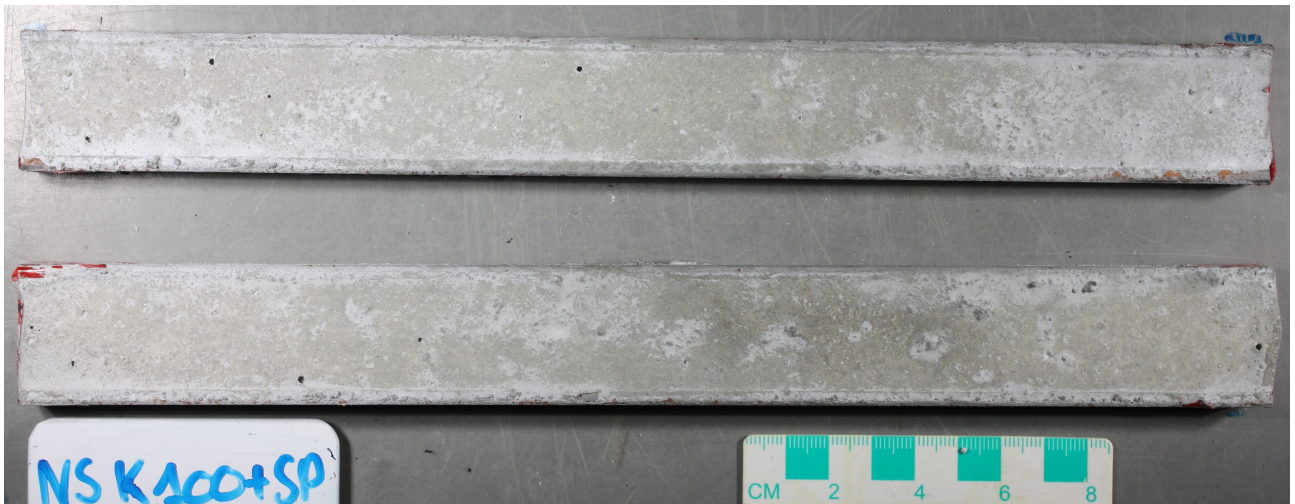


FIGURE 113 – *German angle* – Formulation NS+K100+SP

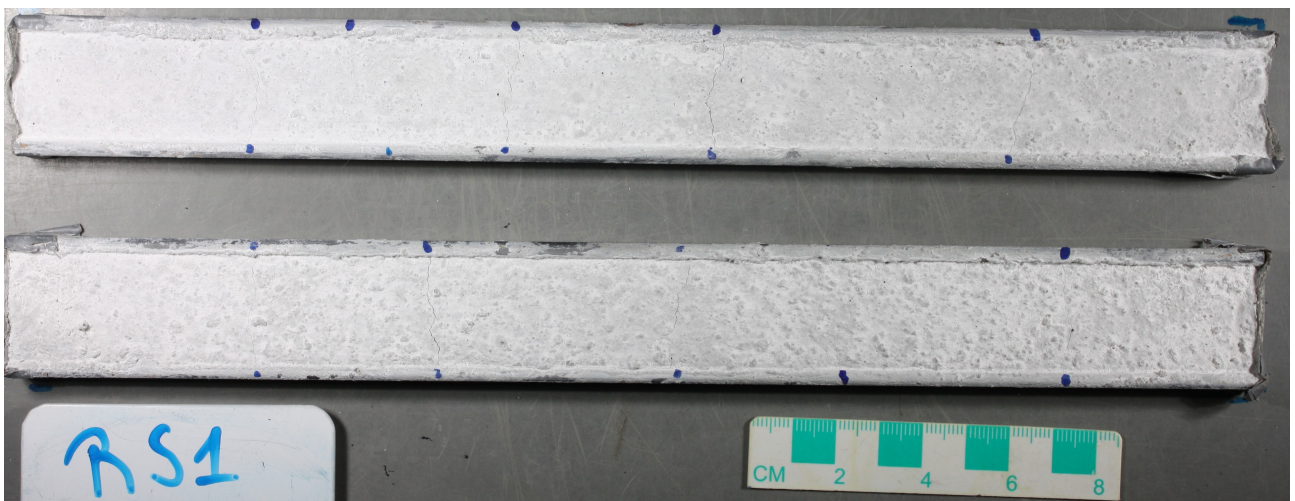


FIGURE 114 – *German angle* – Formulation RS1

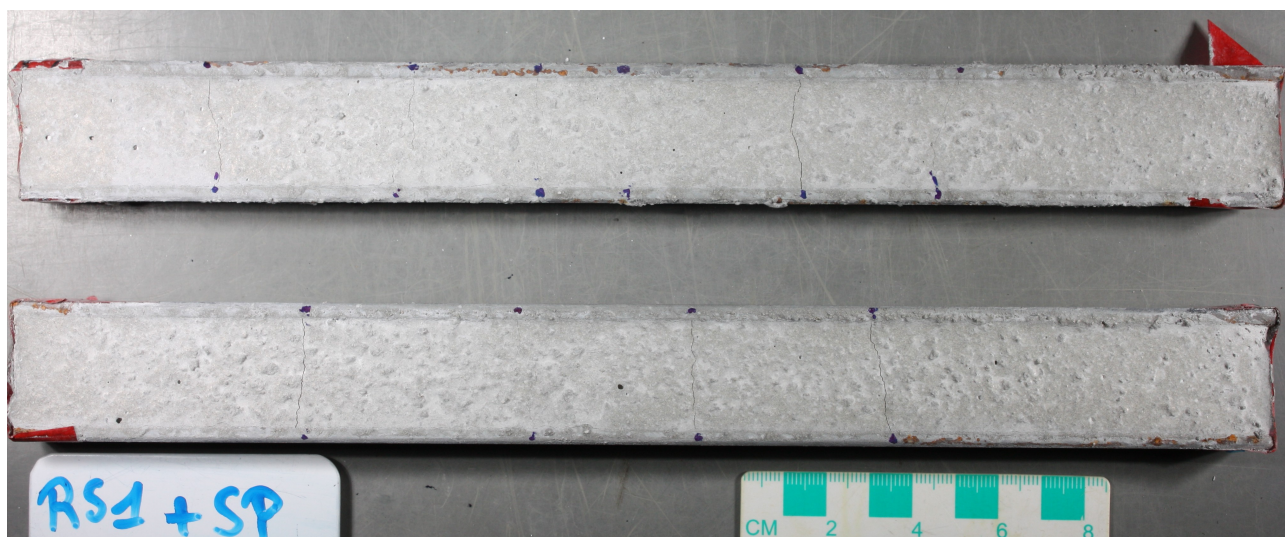


FIGURE 115 – *German angle* – Formulation RS1+SP

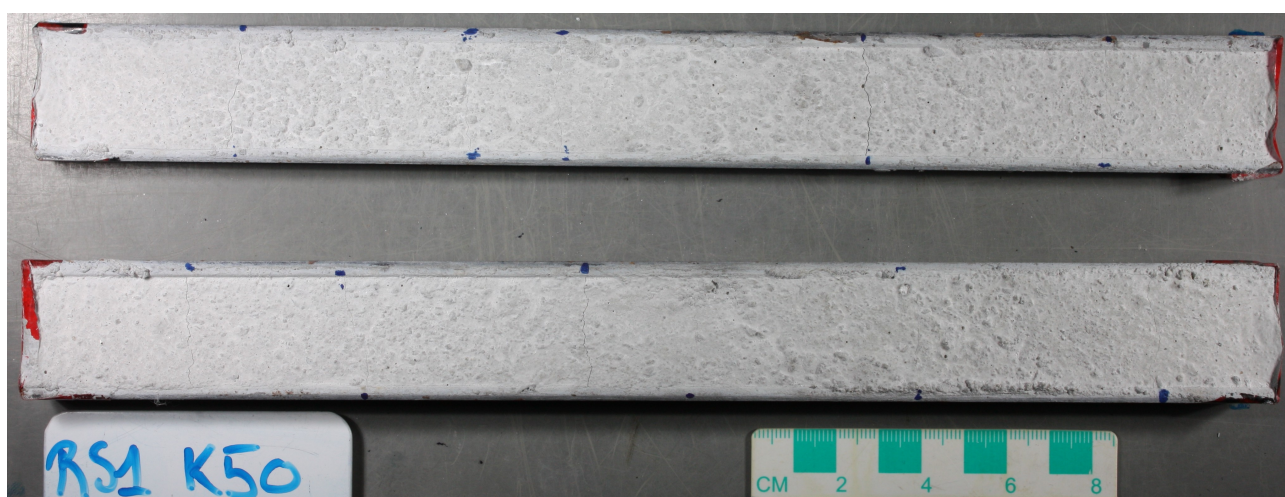


FIGURE 116 – *German angle* – Formulation RS1+K50

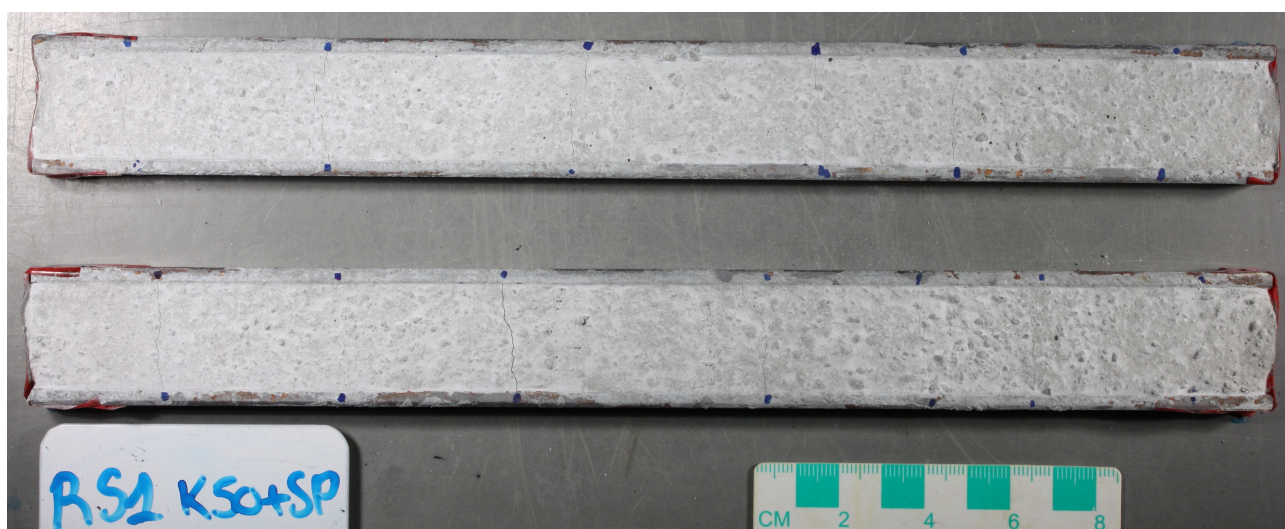


FIGURE 117 – *German angle* – Formulation RS1+K50+SP

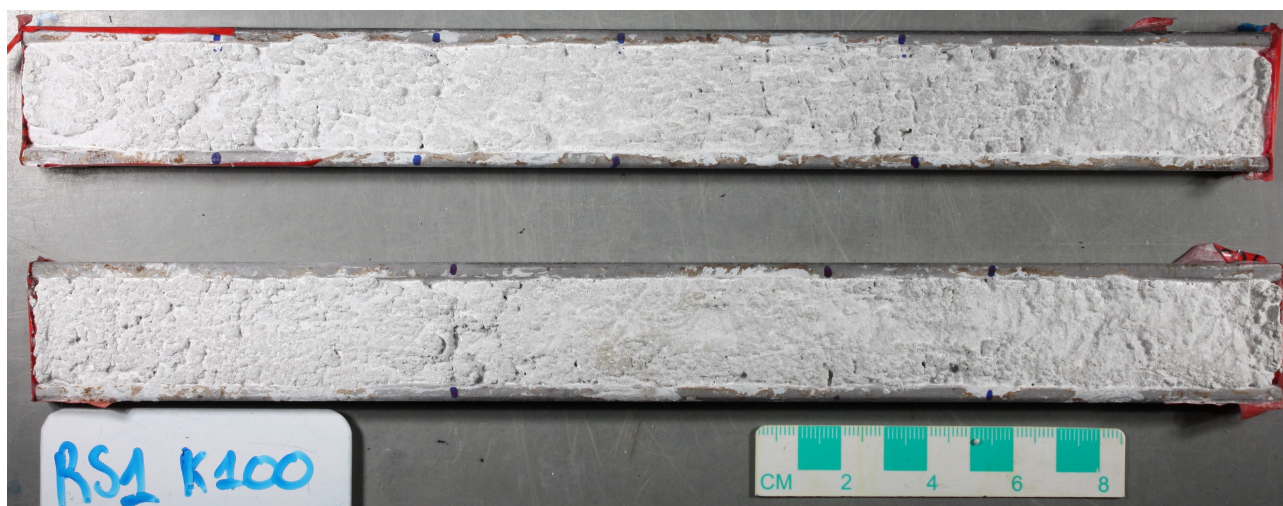


FIGURE 118 – *German angle* – Formulation RS1+K100

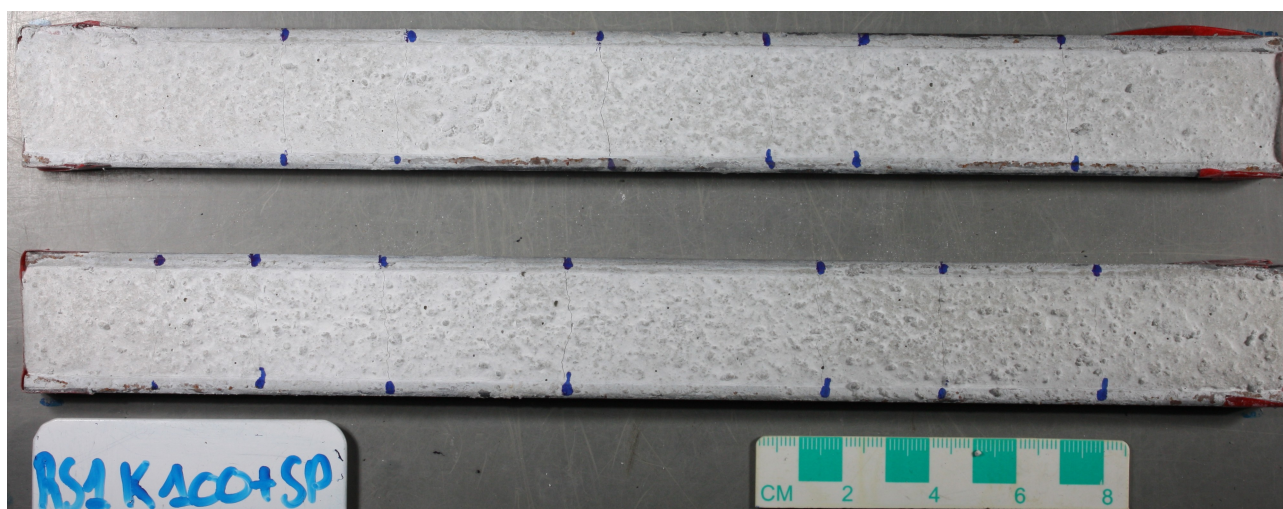


FIGURE 119 – *German angle* – Formulation RS1+K100+SP

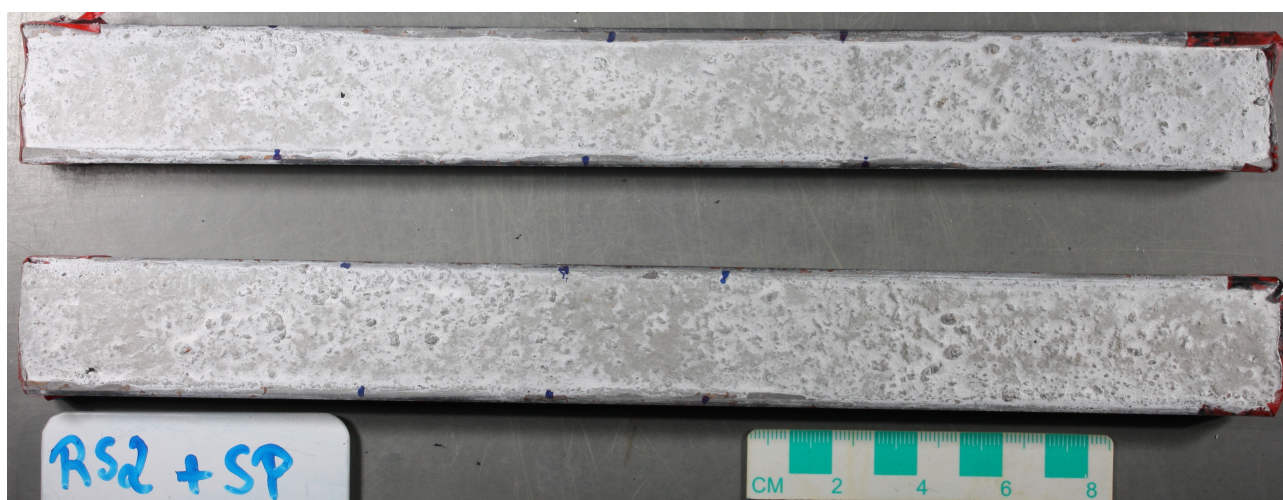


FIGURE 120 – *German angle* – Formulation RS2+SP

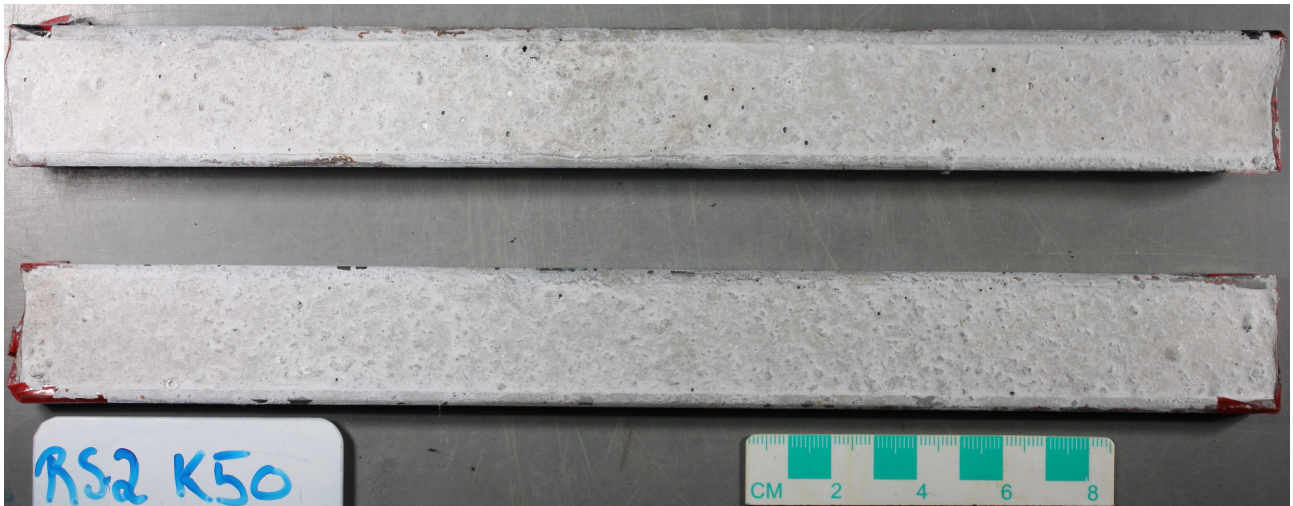


FIGURE 121 – *German angle* – Formulation RS2+K50

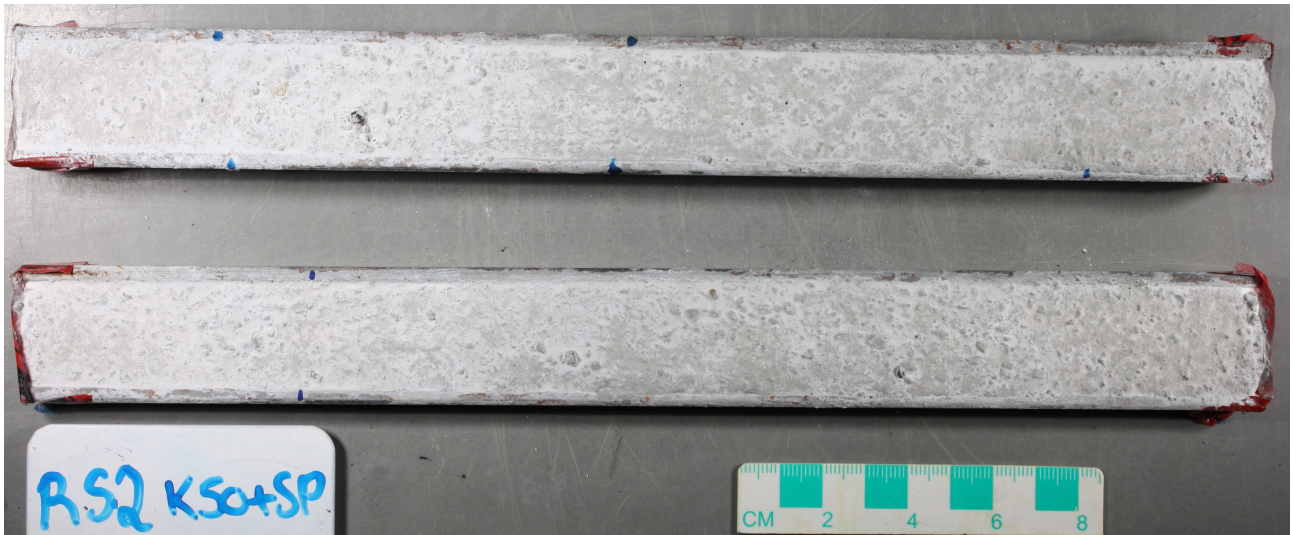


FIGURE 122 – *German angle* – Formulation RS2+K50+SP

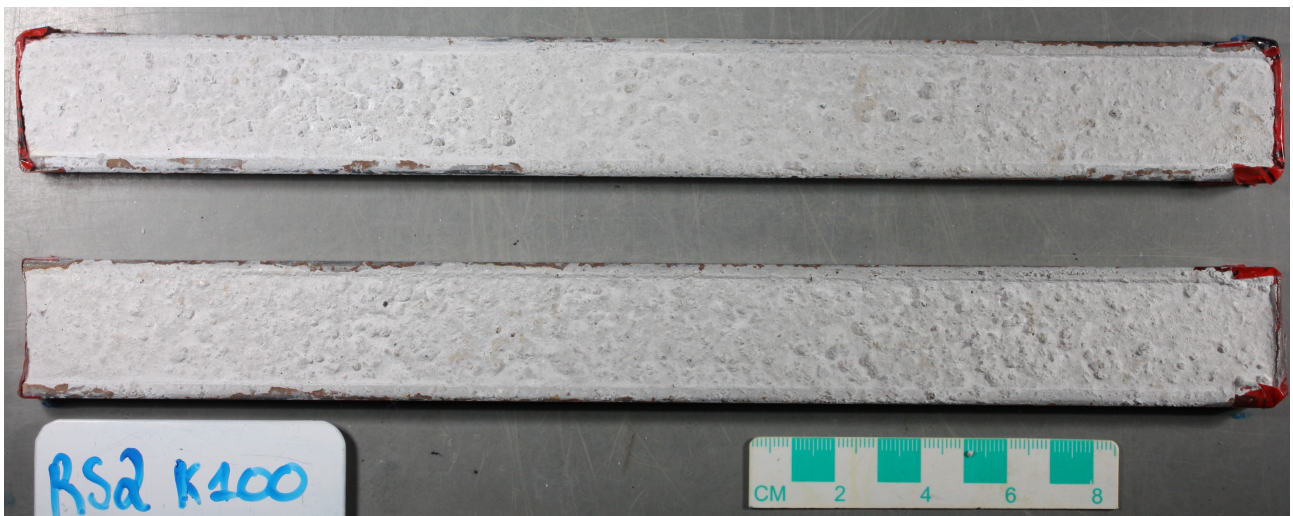


FIGURE 123 – *German angle* – Formulation RS2+K100

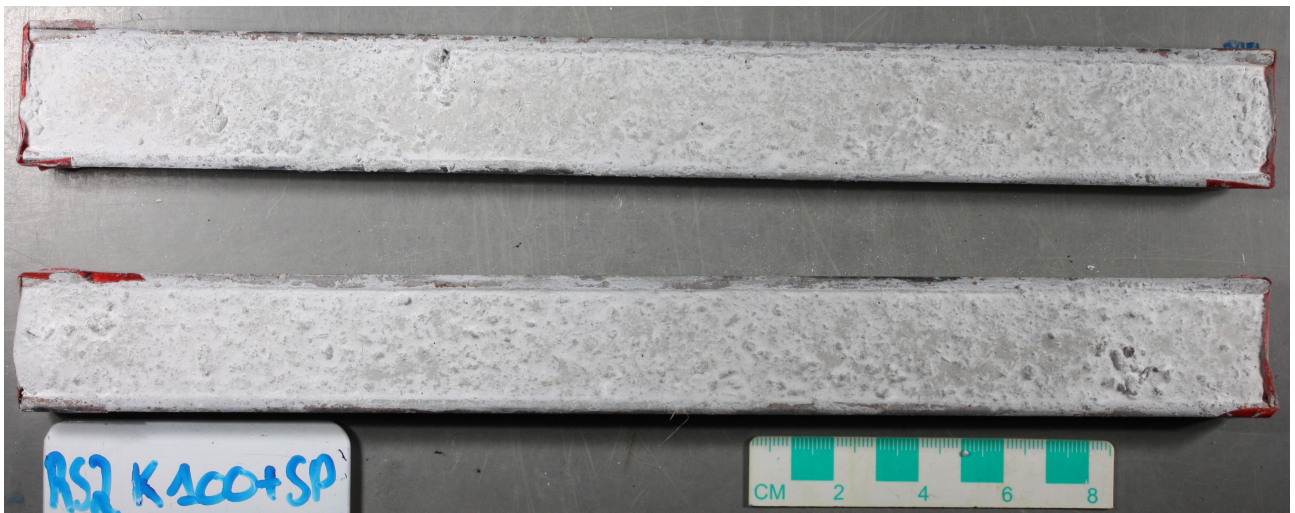


FIGURE 124 – *German angle* – Formulation RS2+K100+SP

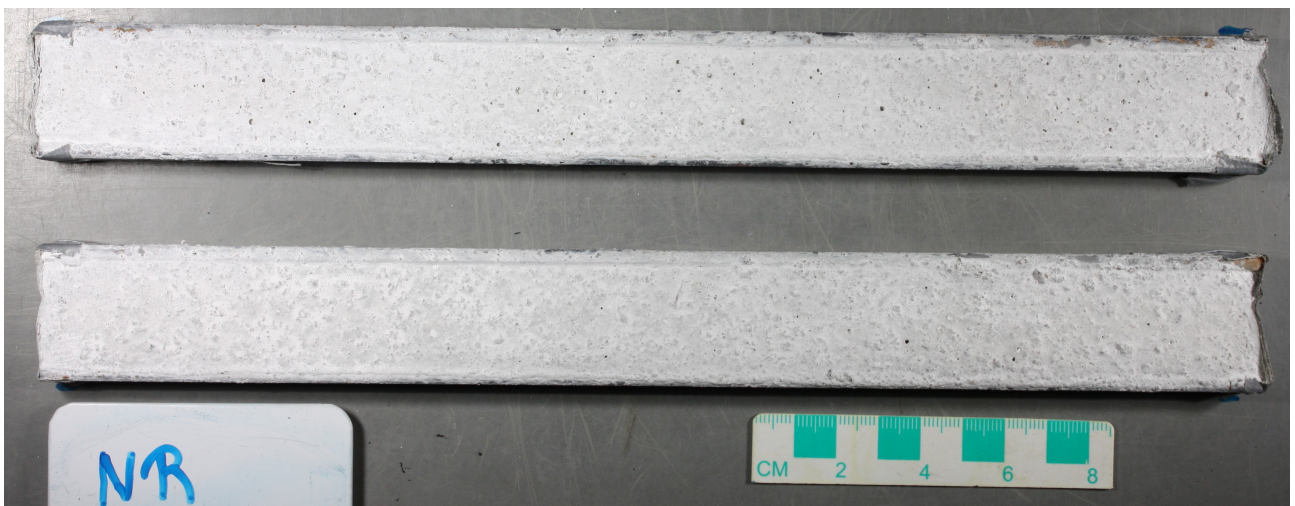


FIGURE 125 – *German angle* – Formulation NS/RS1

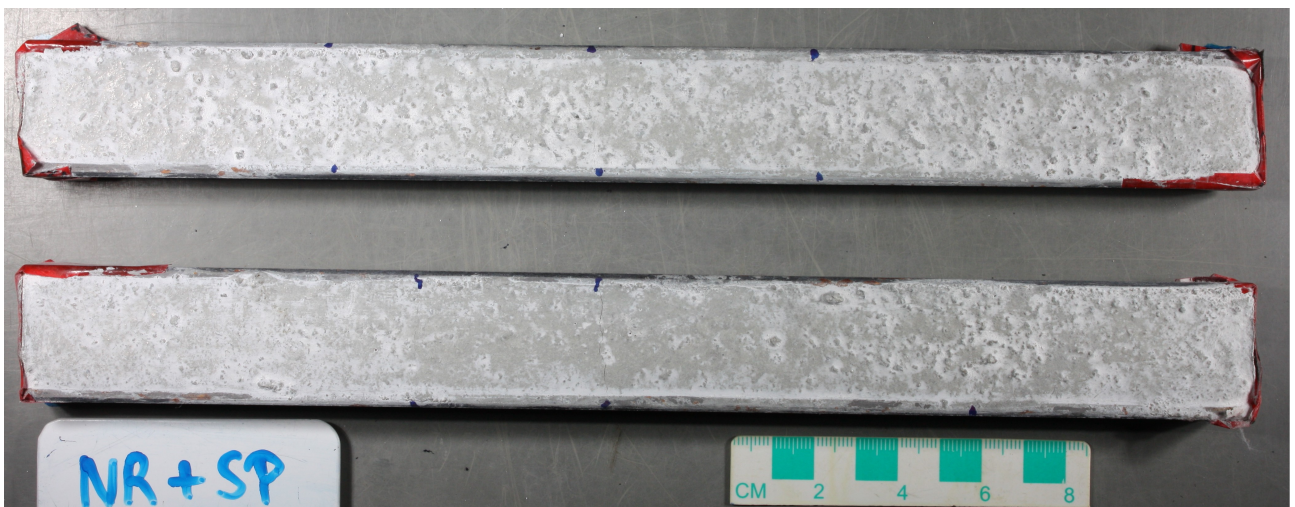


FIGURE 126 – *German angle* – Formulation NS/RS1+SP

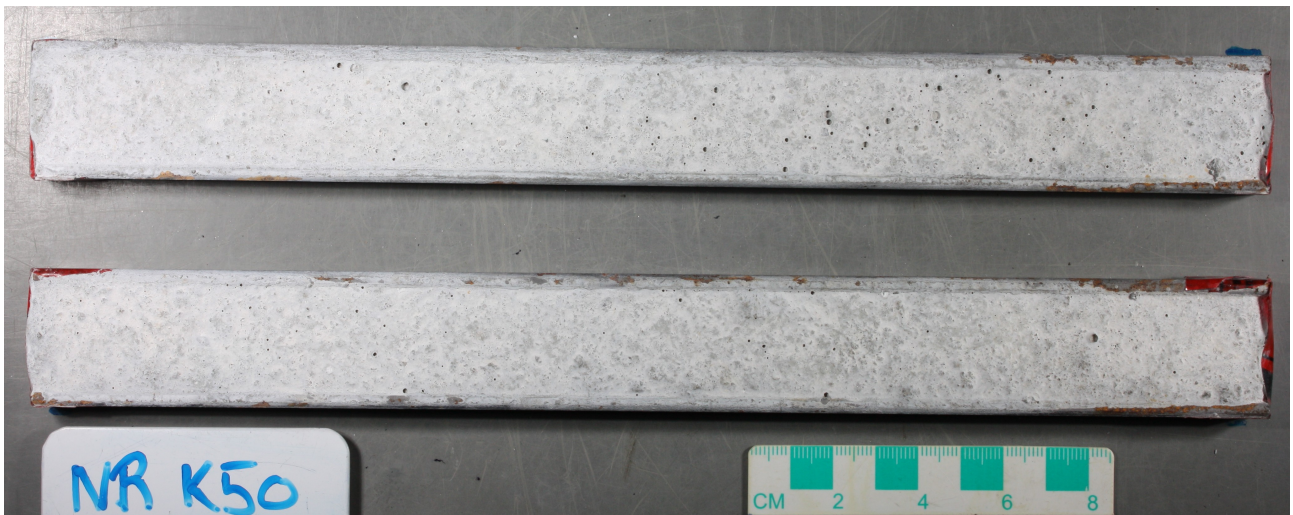


FIGURE 127 – *German angle* – Formulation NS/RS1+K50

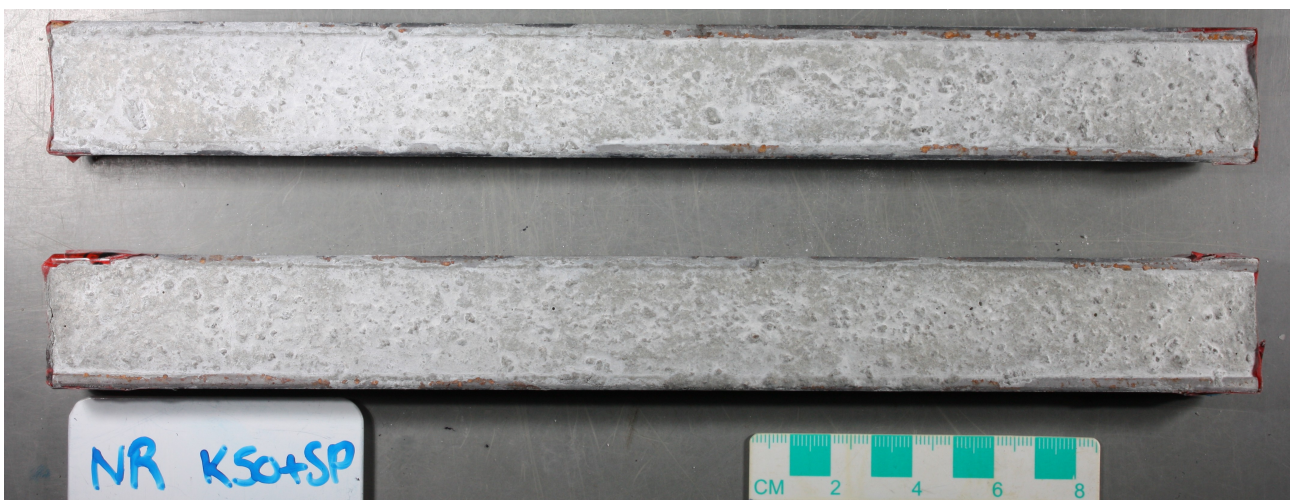


FIGURE 128 – *German angle* – Formulation NS/RS1+K50+SP

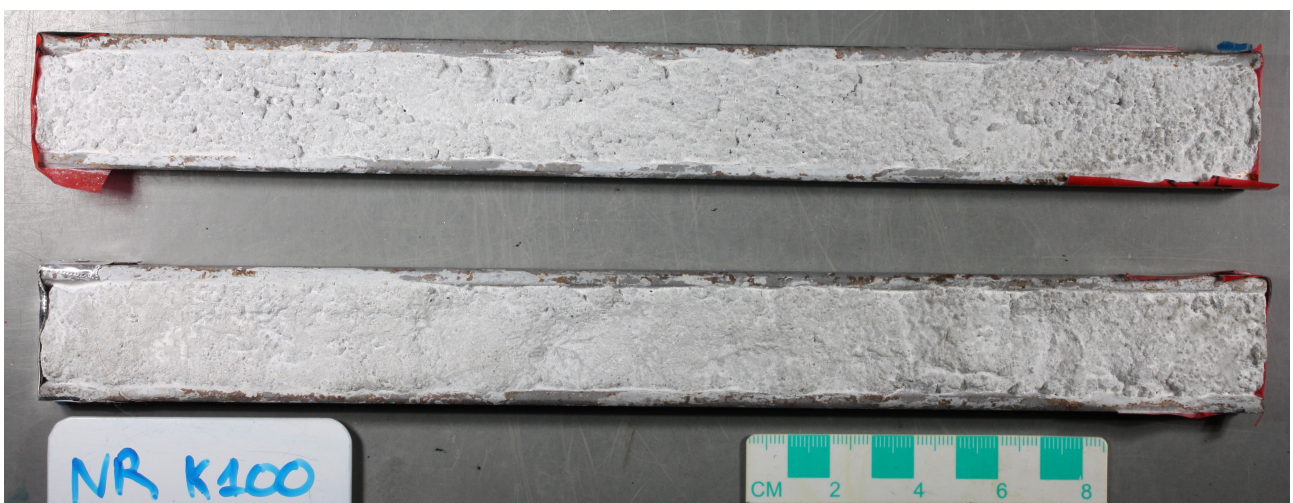


FIGURE 129 – *German angle* – Formulation NS/RS1+K100

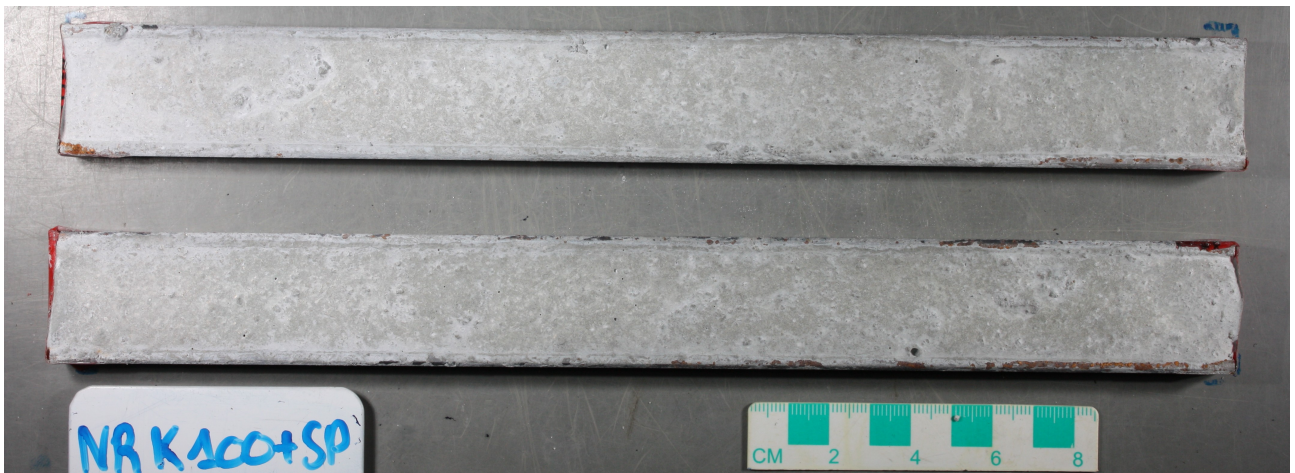


FIGURE 130 – *German angle* – Formulation NS/RS1+K100+SP

Annexe D : Fiches techniques des matériaux

D.1 Fiche technique 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

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

2

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.

© 2005 CTS Cement Manufacturing Corp. DS_002_EN_04/05/07

FIGURE 131 – Fiche technique fournie par CTS Cement Manufacturing Corp. : Komponent

D.2 Fiche technique superplastifiant PC

RÉDUCTEURS D'EAU À HAUT DEGRÉ / SUPERPLASTIFIANTS

Format principal n° : 03 30 00 03 40 00 03 70 00

PLASTOL™ 6400

RÉDUCTEUR D'EAU À HAUT DEGRÉ – SUPERPLASTIFIANT



EUCLID CHEMICAL

INFORMATION SUR LE PRODUIT

EMBALLAGE

Offert en vrac, en contenants de 1000 litres, en barils de 205 litres et en seaux de 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Un an dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

ASTM C494, Types A et F

ASTM C1017, Type I

AASHTO M194

ANSI/NSF 61

Approuvé par le ministère des Transports du Québec (MTQ)

DESCRIPTION

PLASTOL 6400 est un superplastifiant à base de polycarboxylate qui permet de produire le béton avec un très faible rapport eau/liant. PLASTOL 6400 produit un béton autoplaçant et fluide à faible dose et peut produire jusqu'à 45 % de réduction de la quantité d'eau. PLASTOL 6400 offre les avantages de la technologie polycarboxylate, à savoir des résistances à la compression et une résistance à la flexion élevées ainsi que d'excellentes caractéristiques de prise. PLASTOL 6400 peut être utilisé conjointement avec des ajouts cimentaires et ne contient pas de produits chimiques ou d'ions de chlorure ajoutés connus pour favoriser la corrosion de l'acier. De plus, il est compatible avec la plupart des adjuvants; toutefois, chaque matériau doit être ajouté séparément.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT

CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

- Réduit les coûts de main-d'œuvre
- Permet de réduire la teneur en liant
- Améliore les caractéristiques de stabilité de l'air
- Améliore la maniabilité et facilite la finition
- Réduit ou élimine l'addition de superplastifiant sur le chantier
- Améliore grandement la durabilité et l'apparence de la surface
- Réduit la demande en eau procurant ainsi une meilleure résistance
- Réduit la ségrégation, le ressuage, la fissuration et la perméabilité
- Produit un béton fluide qui développe une résistance au démoulage plus rapidement
- Produit des résistances élevées à court terme lorsqu'utilisé avec des ciments de Type GU et de Type HE

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton fortement armé
- Béton prêt à l'emploi
- Béton à haute performance
- Dalles et béton de masse
- Béton préfabriqué/précontraint
- Béton avec faible rapport eau/liant
- Béton fluide à affaissement élevé
- Béton autoplaçant (BAP), béton autonivelant (BAN)

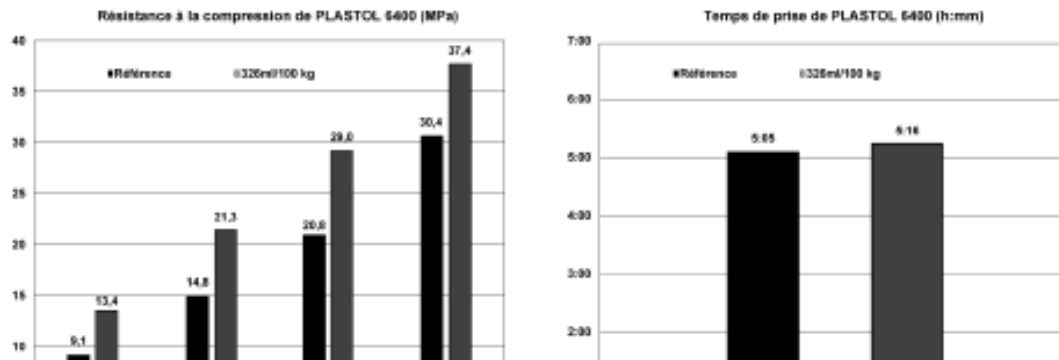
PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- PLASTOL 6400 doit être maintenu à l'abri du gel; toutefois, le gel et le dégel subséquent n'endommagent pas le matériau si ce dernier est mélangé vigoureusement. Ne pas agiter avec de l'air ou avec une lance à air.
- Ajouter au mélange séparément des autres adjuvants.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

DONNÉES TECHNIQUES

DONNÉES RELATIVES À LA PERFORMANCE

Les résultats d'essai suivants ont été obtenus en utilisant les exigences typiques de formulation de la norme ASTM C494, 307 kg/m³ (517 lb/vg³) de liant et une teneur en air similaire ($\pm$ 0,5 %). Ces résultats ont été obtenus en laboratoire avec des matériaux et des formulations qui satisfont aux exigences de la norme ASTM C494. Des changements de matériaux et de formulations peuvent affecter l'efficacité des dosages.



MODE D'EMPLOI

La plage de dosages recommandés pour PLASTOL 6400 est de 200 à 780 ml par 100 kg de liant. Les recommandations en matière de dosage dépendent des caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation. Des dosages plus élevés sont acceptables si des essais préalables sont réalisés et que des confirmations sont obtenues quant à la performance désirée avec les matériaux précis utilisés. PLASTOL 6400 peut être ajouté à l'eau de gâchage initiale ou directement sur le béton fraîchement dosé, puis malaxé pendant approximativement 5 minutes ou 70 tours. Toutefois, les meilleurs résultats ont été observés lorsqu'il est ajouté directement sur le béton fraîchement dosé. Le produit ne doit pas entrer en contact avec du liant sec ou d'autres adjuvants avant que ces derniers ne soient bien mélangés à la gâchée de béton.

Pour toutes les applications de béton, y compris le béton autoplaçant, le dosage de PLASTOL 6400 variera en fonction de la formulation, des matériaux locaux et des besoins particuliers du producteur de béton. Des formulations d'essais doivent être effectuées afin de vérifier la performance à l'état plastique et durci avec des matériaux locaux. Si la granularité des matériaux n'est pas optimale pour un béton autoplaçant, un modificateur de viscosité pourrait être utilisé pour améliorer la qualité du mélange. Veuillez contacter votre représentant Euclid Chemical afin d'obtenir des recommandations relatives aux formulations d'essai et aux dosages.

Révision : 3.21

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 sans 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 sans l'unique responsable pour déterminer la pertinence des produits Euclid en fonction des utilisations qu'il veut en faire.

FIGURE 132 – Fiche technique du superplastifiant PC

D.3 Fiche technique du sable naturel : NS



LABORATOIRE : AMRIZE ST-GABRIEL-DE-BRANDON1811 CHEMIN ST-CLÉOPHAS, ST-GABRIEL-DE-BRANDON

SITE DE PRODUCTION: 3530 AMRIZE SABLIERE ST-GABRIEL-DE-BRANDON1811 CHEMIN ST-CLÉOPHAS, ST-GABRIEL-DE-BRANDON

SITE DE DISTRIBUTION: 3530 AMRIZE SABLIERE ST-GABRIEL-DE-BRANDON1811 CHEMIN ST-CLÉOPHAS, ST-GABRIEL-DE-BRANDON

PRODUIT : 9071 SG,SABLE À BÉTON

RÉSERVE : 2025

SMQ ISO 9001:2015

FORMULAIRE : FICHE TECHNIQUE,20250625

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 133 – Fiche technique fournie par Amrize : NS

Annexe E : Mélanges finaux

E.1 Compositions des mélanges

TABLE 26 – Mélanges avec agent expansif type K : 100% du dosage recommandé

Mélanges type K100	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	5	-	-	2,5
Masse sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5
Masse sable RS2 [kg]	-	-	5	-
Masse ciment GU [kg]	1,42	1,42	1,42	1,42
Masse agent K [kg]	0,250	0,250	0,250	0,250
Volume superplastifiant [mL]	-	-	-	-
Volume d'eau [mL]	832	1000	1000	915
Absorption [mL]	29	758	325	393
Consistance [mm]	195-200	200	200	205

TABLE 27 – Mélanges avec agent expansif type K : 50% du dosage recommandé

Mélanges type K50	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,50	0,60	0,60	0,55
Masse sable NS [kg]	5	-	-	2,5
Masse sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5
Masse sable RS2 [kg]	-	-	5	-
Masse ciment GU [kg]	1,54	1,54	1,54	1,54
Masse agent K [kg]	0,125	0,125	0,125	0,125
Volume superplastifiant [mL]	-	-	-	-
Volume d'eau [mL]	832	1000	1000	915
Absorption [mL]	29	758	325	393
Consistance [mm]	195-200	200-205	205	195-200

TABLE 28 – Mélanges de référence avec ajout de superplastifiant

Mélanges référence + SP	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,40	0,50	0,50	0,45
Masse sable NS [kg]	5	-	-	2,5
Masse sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5
Masse sable RS2 [kg]	-	-	5	-
Masse ciment GU [kg]	1,67	1,67	1,67	1,67
Volume superplastifiant [mL]	13,5	10	13	10
Volume d'eau [mL]	666	833	833	749
Absorption [mL]	29	758	325	393
Consistance [mm]	200	195	200	200

TABLE 29 – Mélanges avec agent expansif type K : 100% du dosage recommandé avec ajout de superplastifiant

Mélanges type K100 + SP	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,40	0,50	0,50	0,45
Masse sable NS [kg]	5	-	-	2,5
Masse sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5
Masse sable RS2 [kg]	-	-	5	-
Masse ciment GU [kg]	1,42	1,42	1,42	1,42
Masse agent K [kg]	0,250	0,250	0,250	0,250
Volume superplastifiant [mL]	13,5	10	13	10
Volume d'eau [mL]	666	833	833	749
Absorption [mL]	29	758	325	393
Consistance [mm]	205	200	195-200	205

TABLE 30 – Mélanges avec agent expansif type K : 50% du dosage recommandé avec ajout de superplastifiant

Mélanges type K50+SP	NS	RS1	RS2	NS+RS1
Rapport E/L	0,40	0,50	0,50	0,45
Masse sable NS [kg]	5	-	-	2,5
Masse sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5
Masse sable RS2 [kg]	-	-	5	-
Masse ciment GU [kg]	1,54	1,54	1,54	1,54
Masse agent K [kg]	0,125	0,125	0,125	0,125
Volume superplastifiant [mL]	13,5	10	13	10
Volume d'eau [mL]	666	833	833	749
Absorption [mL]	29	758	325	393
Consistance [mm]	205	195-200	195-200	195-200

E.2 Mélanges finaux de référence

Les compositions des mélanges de référence, issues des travaux de Thibault Mettlen (2025), ainsi que leur consistance, sont présentées dans le Tableau 31. Ces formulations servent de base de comparaison pour l'analyse des effets des différents agents et adjuvants.

TABLE 31 – 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

E.3 Planning des mélanges

mars-26						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
						1
2	3	4	5	6	7	8
Détermination des mélanges	Détermination des mélanges	Détermination des mélanges	Détermination des mélanges	Détermination des mélanges		
état de l'art	état de l'art	état de l'art	état de l'art	état de l'art		
Chercher Sable Naturel	Essais sur éprouvettes de Thibault	Essais sur éprouvettes de Thibault	Essais sur éprouvettes de Thibault	Essais sur éprouvettes de Thibault		
9	10	11 DEBUT DES MELANGES	12	13	14	15
mélanges tests	état de l'art	M-0.5-NS-K100	M-0.5-RS2-K100	mélanges de calibration		
état de l'art	mesures éprouvettes Thibault	M-0.5-NS/RS1-K100	M-0.4-RS2-NE	mélanges de calibration		
	mesures éprouvettes Thibault	M-0.5-RS1-K100	M-0.4-NS-NE + M-0.4-NS/RS1-NE	Mesures éprouvettes		
16	17	18	19	20	21	22
M-0.4-RS1-NE	M-0.4-NS-K50		M-0.5-NS-K50			
M-0.4-NS-K100	M-0.4-NS/RS1-K50		M-0.5-NS/RS1-K50			
M-0.4-RS1-K100	M-0.4-RS1-K50		M-0.5-RS1-K50			
M-0.4-NS/RS1-K100 + M-0.4-RS2-K100	M-0.4-RS2-K50		M-0.5-RS2-K50			
23	24	25	26	27	28	29
M-0.5-NS-Mg	M-0.5-NS-SRA	M-0.5-NS-K100/SRA	M-0.5-NS-Mg/SRA			
M-0.5-NS/RS1-Mg	M-0.5-NS/RS1-SRA	M-0.5-NS/RS1-K100/SRA	M-0.5-NS/RS1-Mg/SRA			
M-0.5-RS1-Mg	M-0.5-RS1-SRA	M-0.5-RS1-K100/SRA	M-0.5-RS1-Mg/SRA			
M-0.5-RS2-Mg	M-0.5-RS2-SRA	M-0.5-RS2-K100/SRA	M-0.5-RS2-Mg/SRA			
30	31 FIN DES MELANGES					
M-0.5-NS-Conex/SRA	M-0.5-NS-NE					Général
M-0.5-NS/RS1-Conex/SRA	M-0.5-NS/RS1-NE					Mélanges Axel
M-0.5-RS1-Conex/SRA	M-0.5-RS1-NE					Mélanges Yasmine
M-0.5-RS2-Conex/SRA						Mélanges Thibault

FIGURE 134 – Planning des mélanges

Annexe F : Formations réalisées



FIGURE 135 – Fit test masque



FIGURE 136 – Formation – Poussière de silice



FIGURE 137 – Formation – Port du masque