

Développement de mortiers à retrait compensé avec des sables de recyclage

Auteur : Mettlen, Thibault

Promoteur(s) : Courard, Luc; 16196

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24543>

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.

Développement de mortiers à retrait compensé avec des sables de recyclage

METTLEN Thibault

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :
Ingénieur Civil en construction

Promoteur :
COURARD Luc
Co-Promoteur :
BISSONNETTE Benoît

Année académique: **2024 - 2025**

Remerciements

Ce travail de fin d'études marque l'aboutissement de cinq années d'études universitaires jalonnées d'apprentissages, de découvertes et de rencontres. Il matérialise la dernière étape de ma transition vers la vie professionnelle.

"Un seul mot, usé, mais qui brille comme une vieille pièce de monnaie : merci!", P. NERUDA [1].

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des Professeurs et des Membres du Corps Académique de l'Université de Liège. L'enseignement qu'ils m'ont prodigué, leurs engagements et leurs soutiens ont contribué à forger ce que je suis aujourd'hui. Ils m'ont inculqué de nouvelles compétences et m'ont apporté le bagage nécessaire pour affronter les défis que je devrai relever dans ma vie professionnelle.

J'exprime particulièrement toute ma reconnaissance au Professeur Luc Courard de l'Université de Liège qui m'a proposé ce sujet et qui m'a offert l'opportunité de me rendre à Québec pour réaliser les essais dans les laboratoires de l'Université Laval. Son encadrement, ses précieux conseils et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet m'ont profondément aidé et motivé.

Je tiens également à adresser mon extrême gratitude au Professeur Benoît Bissonnette de l'Université Laval à Québec pour son accueil, son soutien scientifique, sa disponibilité, ses directives et ses orientations qui ont contribué à la qualité de ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi 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'analyse de ce travail.

Je souhaite remercier chaleureusement Andreia De Almeida Rodrigues pour son aide lors de la réalisation des essais. Ma gratitude va également à Laura Arcelia Vaca Arciga et Rodolfo Castillo Araiza pour leurs précieux conseils et leur accompagnement tout au long de mes travaux et réflexions en laboratoire, ainsi que Romain Libert et Julien Troquay pour leur soutien constant en Belgique.

Ma reconnaissance s'étend également aux techniciens du laboratoire CRIB à Québec, et plus particulièrement à Frédérick Ross, René Malo, Pierre-André Tremblay et Christian Juneau, dont le savoir-faire et l'appui technique offerts ont grandement contribué à la réalisation de ce projet.

Merci à la société Mitacs, organisme national canadien, pour son soutien financier suite à l'octroi d'une bourse de recherche Globalink.

À mes camarades de promotion et en particulier à Noah Léva, Arthur Heuse et Valentin Moreau, je témoigne toute mon amitié pour les moments de partage et de soutien mutuel.

Enfin, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mes parents et à mon frère Christopher, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants, qui ont été le socle de mon parcours académique et personnel.

Résumé

Face à la demande croissante en matières premières pour la production industrielle, le développement des infrastructures, le développement économique et les besoins individuels de ses habitants, notre planète est confrontée à la diminution de ses ressources naturelles. Le secteur de la construction est particulièrement concerné, notamment en raison de la raréfaction annoncée du sable naturel, ressource fortement exploitée et dont l'extraction massive entraîne d'importants impacts environnementaux. Cette situation risque à terme d'augmenter les prix de ces matières premières indispensables au développement de notre planète.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'économie circulaire qui cherche à rompre avec le modèle linéaire « produire-consommer-jeter » en favorisant la réduction des ressources utilisées, le recyclage et le réemploi. Ce projet, mené en coopération entre l'Université de Liège et l'Université Laval de Québec, vise à étudier la substitution (50% et 100%) des sables naturels dans les mortiers par des sables recyclés issus de la déconstruction.

Ces matériaux "transformés" présentent des caractéristiques spécifiques (forte porosité, absorption d'eau élevée) et provoquent un retrait du mortier augmentant les risques de fissuration. Le projet porte ainsi sur la caractérisation granulométrique et physico-mécanique des sables recyclés, leur compatibilité avec certains liants, ainsi que l'analyse des propriétés mécaniques des mortiers ainsi constitués. Deux agents expansifs (un de type K et l'autre de type G) ont été utilisés pour compenser les effets du retrait et déterminer l'évolution des propriétés mécaniques.

Comme attendu, la substitution importante (50% et 100%) du sable naturel par des sables recyclés a mis en évidence la forte augmentation du retrait ainsi qu'une diminution des propriétés mécaniques des mortiers ainsi formés.

L'ajout d'un agent expansif de type G a permis de compenser intégralement le retrait, indépendamment des conditions de cure. À l'inverse, l'agent de type K n'a pas montré d'effet significatif dans les conditions de cure initiales, mais a nécessité une immersion prolongée en eau de chaux pour exprimer pleinement son potentiel de compensation. Toutefois, malgré cette contrainte, les formulations intégrant l'agent de type K ont conduit à des propriétés mécaniques non seulement compatibles avec un usage courant dans la construction, mais également supérieures à celles obtenues avec l'agent de type G.

Les proportions des formulations réalisées dans ce travail pourraient encore être améliorées afin de maîtriser l'expansion du mortier. Ce travail a permis de mettre en évidence la possibilité de compenser le retrait tout en garantissant des performances mécaniques et une durabilité conforme aux exigences requises dans les normes.

Abstract

Faced with the growing demand for raw materials driven by industrial production, infrastructure development, economic growth, and the individual needs of populations, our planet is experiencing a steady decline in its natural resources. The construction sector is particularly affected, notably due to the predicted scarcity of natural sand, a heavily exploited resource whose massive extraction has significant environmental impacts. In the long term, this situation is likely to drive up the cost of these raw materials, which are essential for global development.

This work is part of the circular economy approach, which seeks to move away from the linear “produce–consume–dispose” model by promoting resource efficiency, recycling, and reuse. . This project, carried out in cooperation between the University of Liège and Laval University in Québec, aims to study the substitution (50% and 100%) of natural sands with recycled sands from demolition waste in mortar production.

These “transformed” materials exhibit specific characteristics (high porosity and high water absorption) and induce mortar shrinkage, thereby increasing the risk of cracking. The project therefore focuses on the granulometric and physico-mechanical characterization of recycled sands, their compatibility with certain binders, as well as the analysis of the mechanical properties of the resulting mortars. Two expansive agents (one of type K and the other of type G) were incorporated to mitigate shrinkage and to assess the evolution of mechanical performance.

As expected, the substantial substitution of natural sand (50% and 100%) with recycled sand revealed a significant increase in shrinkage, along with a reduction in the mechanical performance of the mortars.

The addition of a type G expansive agent compensated for shrinkage, as did the use of a type K agent. However, formulations with the latter agent (type K) achieved mechanical properties acceptable for common use in construction and even superior to those obtained with the type G agent.

The mix proportions developed in this study could be further optimized to better control mortar expansion. Overall, this work demonstrates the feasibility of eliminating shrinkage while ensuring mechanical performance and durability that comply with established standards.

Table des matières

Introduction	1
1 Description et notions théoriques sur les matériaux utilisés	4
1.1 Préface	4
1.2 Le sable : un matériau en voie de rationnement	4
1.3 L'économie circulaire en construction	6
1.4 Le retrait	10
1.5 Le ciment Portland	11
1.6 L'hydratation du ciment	14
1.7 Rapport Eau/Liant (E/L)	16
1.8 Les agents expansifs	17
1.8.1 L'agent expansif de type K	18
1.8.2 L'agent expansif de type G	19
2 Méthodologie et protocoles expérimentaux	20
2.1 Préface	20
2.2 Matériaux	20
2.2.1 Le ciment	20
2.2.2 Les agents expansifs	22
2.2.3 Les granulats	24
2.3 Granulométrie	25
2.3.1 Sable Naturel (NS)	25
2.3.2 Sable Recyclé (RS1)	25
2.3.3 Sable Recyclé (RS2)	27
2.3.4 Comparaison des granulométries	28
2.4 Absorption d'eau des différents sables	30
2.4.1 Protocole appliqué aux sables NS et RS1	30
2.4.2 Protocole appliqué au sable RS2	34
2.5 Procédure pour les mortiers	34
2.6 Essais sur le mortier frais	35
2.7 Détermination du rapport E/L et de la consistance	36
2.8 Descriptions des mélanges finaux réalisés	37
2.9 Essais de caractérisation mécanique	38
2.9.1 Résistance à la compression	38
2.9.2 Résistance à la traction indirecte par fendage	39
2.10 Détermination du retrait libre	41
2.10.1 Description du dispositif expérimental	42
2.10.2 Préparation des moules	43
2.10.3 Moulage des éprouvettes	44
2.10.4 Période de cure humide	44

2.10.5	Séchage et suivi du retrait	45
2.10.6	Conditionnement spécifique : barrettes scellées	46
2.10.7	Calcul du retrait	47
3	Analyse des résultats	48
3.1	Analyse du retrait : barrettes non scellées	48
3.1.1	Comportement sans agent expansif	48
3.1.2	Effet de l'agent expansif de type K	51
3.1.3	Effet de l'agent expansif de type G	53
3.1.4	Réactivation de l'expansion par immersion en eau de chaux : Agent expansif de type K	56
3.1.5	Conclusion sur l'effet des granulats et des agents expansifs	60
3.2	Analyse du retrait : barrettes scellées	62
3.2.1	Comportement sans agent expansif	62
3.2.2	Effet de l'agent expansif de type K	64
3.2.3	Effet de l'agent expansif de type G	65
3.2.4	Conclusion sur l'effet des granulats et des agents expansifs	67
3.3	Propriétés mécaniques	68
3.3.1	Résistances à la compression des mélanges sans agents à 7 jours	69
3.3.2	Résistances à la compression des mélanges avec agent expansif de type K à 7 jours	71
3.3.3	Résistances à la compression des mélanges avec agent de type G à 7 jours	73
3.3.4	Comparaison des résistance à la compression des mélanges à 7 jours	74
3.3.5	Résistances à la compression des mélanges sans agents à 28 jours	76
3.3.6	Résistance à la compression des mélanges avec agent expansif de type K à 28 jours	77
3.3.7	Résistance à la compression des mélanges avec agent expansif de type G à 28 jours	79
3.3.8	Comparaison des résistance à la compression des mélanges à 28 jours	80
3.3.9	Comparaison graphique globale des résistances à la compression des différents mélanges	81
3.3.10	Résistance à la traction indirecte par fendage	82
4	Positionnement par rapport aux normes	84
5	Conclusion	89
6	Annexes	91
Annexes		92
6.1	Annexe A : Description des sables	92
6.1.1	Sable Naturel : NS	92
6.1.2	Sable recyclé : RS1	93
6.1.3	Sable recyclé : RS2	94
6.2	Annexe B : Ciment de type GU - Certificat d'analyse	95
6.3	Annexe C : Données expérimentales sur le retrait : résultats des campagnes de mesure	96
6.3.1	Retrait des barrettes non scellées	96
6.3.2	Retrait des barrettes scellées	98
6.4	Annexe D : Formations suivies en vue de l'accès au laboratoire ULaval	100
6.5	Annexe E : Essai d'ajustement d'un appareil de protection respiratoire	101

6.6	Annexe F : Journée des Conférences du Réseau Francophone de Recherche en Béton - Nancy	102
	Bibliographie	106

Table des figures

1.1	Croissance de la construction d'infrastructures entre 2020 et 2030 [2]	5
1.2	Répartition des déchets générés BTP en France	7
1.3	Coûts occasionnés en millions d'euro	7
1.4	Échelle de Lansink [3]	8
1.5	Diagramme illustrant de manière simplifiée l'économie circulaire [4]	8
1.6	Économie circulaire dans la construction [5]	9
1.7	Procédé de fabrication du ciment Portland par voie sèche [6]	12
1.8	Micrographie d'une section polie de clinker [7]	13
1.9	Courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment [8]	15
1.10	Eau de gâchage [9]	16
2.1	Les 27 produits de la famille des ciments courants : EN 197-1	21
2.2	Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques : EN 197-1	22
2.3	Carbonatation du sable recyclé RS2 (ULiège)	24
2.4	Granulométrie du sable naturel (NS)	25
2.5	Système de tamisage Ro-Tap	26
2.6	Granulométrie du sable recyclé (RS1)	27
2.7	Granulométrie du sable recyclé (RS2)	28
2.8	Comparaison granulométrique des sables NS, RS1 et RS2	28
2.9	Immersion du sable pendant 24 heures	30
2.10	Système de séchage pour atteindre l'état SSS	31
2.11	Matériel utilisé pour l'essai	32
2.12	Préparation du pycnomètre avec le sable à l'état SSS	32
2.13	Malaxeur à bras utilisé	35
2.14	Table à secousse manuelle	36
2.15	Ordre de compactage lors du moulage des éprouvettes d'essai.	38
2.16	Machine d'essai de résistance en compression (INSTRON)	39
2.17	Dispositif utilisé pour l'essai de fendage	41
2.18	Synoptique des goujons de jauge H-3260 utilisés	42
2.19	Calibration du comparateur de longueur	43
2.20	Photographie d'un moule utilisé	44
2.21	Éprouvettes d'essai cassées	44
2.22	Synoptique des propriétés de la salle climatique	45
2.23	Prise de mesures : retrait (gauche) ; masse (droite)	46
2.24	Pose de ruban d'aluminium autocollant	46
2.25	Disposition des éprouvettes d'essai dans la chambre humide	47
3.1	Variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs	49
3.2	Variations massiques des mélanges sans agents expansifs	50

3.3	Variations dimensionnelles des mélanges avec agent expansif de type K	52
3.4	Variations massiques des mélanges avec agent expansif de type K	52
3.5	Variations dimensionnelles des mélanges avec agent expansif de type G	55
3.6	Variations massiques des mélanges avec agent expansif de type G	55
3.7	Variations dimensionnelles des mortiers à agent expansif de Type K après cure prolongée en eau de chaux	58
3.8	Variations massiques des mortiers avec agent expansif de Type K après cure prolongée en eau de chaux	58
3.9	Comparaison des variations de longueur des différents mélanges incorporant du NS et/ou du RS1	60
3.10	Comparaison des variations de longueur des différents mélanges incorporant du NS et/ou du RS2	60
3.11	Variations dimensionnelles des mélanges scellés avec de l'aluminium sans agent expansif	63
3.12	Variations dimensionnelles des mélanges scellés avec de l'aluminium avec agent expansif de Type K	65
3.13	Variations dimensionnelles des mélanges scellés avec de l'aluminium avec agent expansif de Type G	66
3.14	Comparaison des variations de longueur des différents mélanges scellés incorporant du NS et du RS1	67
3.15	Comparaison des variations de longueur des différents mélanges scellés incorporant du NS et du RS2	67
3.16	Résistances à la compression des mélanges sans agent à 7 jours	69
3.17	Résistances à la compression moyennnées des mélanges sans agent à 7 jours	69
3.18	Résistances à la compression des mélanges avec agent de type K à 7 jours	71
3.19	Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type K à 7 jours	71
3.20	Résistances à la compression des mélanges avec agent de type G à 7 jours	73
3.21	Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type G à 7 jours	73
3.22	Comparaison des résistances à la compression des mélanges à 7 jours	75
3.23	Résistances à la compression des mélanges sans agent à 28 jours	76
3.24	Résistances à la compression moyennnées des mélanges sans agent à 28 jours	76
3.25	Résistances à la compression des mélanges avec agent de type K à 28 jours	77
3.26	Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type K à 28 jours	78
3.27	Résistances à la compression des mélanges avec agent de type G à 28 jours	79
3.28	Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type G à 28 jours	79
3.29	Comparaison des résistances à la compression des mélanges à 28 jours	80
3.30	Résistances moyennes en compression des mélanges à 7 et à 28 jours	81
3.31	Comparaison des résistances à la traction indirecte par fendage des différents mélanges	82
4.1	Choix de la classe de résistance d'un béton [10]	84
4.2	Classes d'environnement [10]	85
4.3	Illustration des différentes classes d'environnement selon la classification de la norme NBN B 15-001 [11]	85
4.4	Exigences de durabilité pour les bétons non armés, armés et précontraints - NBN B 15-001 :2024	86

4.5	Classes de résistance minimale des mortiers selon les normes NBN EN 998-2 :2016 et NBN EN 1504-3 :2006	87
6.1	Fiche technique du NS	92
6.2	Granulométrie RS1 effectuée au laboratoire ULaval	93
6.3	Granulométrie RS2 effectuée au laboratoire ULg	94
6.4	Absorption d'eau du RS2 effectuée au laboratoire ULg	94
6.5	Certificat d'analyse du ciment GU utilisé	95
6.6	Résultats des mélanges NS, NS type K et NS type G	96
6.7	Résultats des mélanges RS1, RS1 type K et RS1 type G	96
6.8	Résultats des mélanges RS2, RS2 type K et RS2 type G	96
6.9	Résultats des mélanges NS+RS1, NS+RS1 type K et NS+RS1 type G	97
6.10	Résultats des mélanges NS+RS2, NS+RS2 type K et NS+RS2 type G	97
6.11	Nouvelle expansion des mortiers incorporant l'agent de type K	97
6.12	Résultats des mélanges scellés NS, NS type K et NS type G	98
6.13	Résultats des mélanges scellés RS1, RS1 type K et RS1 type G	98
6.14	Résultats des mélanges scellés RS2, RS2 type K et RS2 type G	98
6.15	Résultats des mélanges scellés NS+RS1, NS+RS1 type K et NS+RS1 type G	99
6.16	Résultats des mélanges scellés NS+RS2, NS+RS2 type K et NS+RS2 type G	99
6.17	Attestation de formation : Poussières de silice	100
6.18	Attestation de formation : Protections respiratoires	100
6.19	Essai d'ajustement qualitatif du masque 3M 6502	101
6.20	Certificat de réussite - Essai d'ajustement qualitatif	101
6.21	Poster présenté lors des journées de conférences à Nancy	102

Liste des tableaux

2.1	Valeurs Granulométrie NS	29
2.2	Valeurs Granulométrie RS1	29
2.3	Valeurs Granulométrie RS2	29
2.4	Mélanges finaux sans agent expansif	37
2.5	Mélanges finaux avec agent expansif de type K	37
2.6	Mélanges finaux avec agent expansif de type G	37
4.1	Classes de résistance minimale du béton selon la norme CSA A23.1	86

Introduction

"Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme !" Si à l'origine, Antoine De Lavoisier, chimiste de XVIII^e siècle, a employé cette maxime pour illustrer le principe de la conservation des masses, cet adage pourrait schématiser le principe de l'économie circulaire.

Celle-ci s'oppose à l'économie linéaire, mise en place lors de la Révolution industrielle du XIX^e siècle et qui repose sur les principes suivants : puiser dans nos ressources naturelles, produire massivement, consommer et enfin jeter. Fondement du développement durable, l'économie circulaire vise à apporter des solutions aux défis environnementaux et sociétaux auxquels nous sommes confrontés. Elle repose sur trois piliers : une production qui limite l'utilisation des ressources, une consommation locale et équitable et le recyclage, la réparation ou le réemploi des déchets.

L'industrie de la construction, comme toutes les autres, devra prendre ce virage. En effet, elle éprouvera des difficultés à s'approvisionner en matières premières, mais devra en même temps limiter le solde des déchets qu'elle ne pourra pas réutiliser. Certes, le recyclage du béton sous forme de granulats grossiers de déconstruction est déjà appliqué dans la réalisation de remblais ou de fondations routières. En revanche, l'utilisation de matériaux plus fins - sables et fillers - doit aujourd'hui trouver sa place et reste à ce jour plus délicate.

"Dès les années 2100, soit quasiment demain, le sable pourrait venir à manquer sur Terre. Le programme des Nations Unies pour l'environnement tire la sonnette d'alarme et invite les pays à réduire leur consommation de cette matière première. "(...) Notre consommation a été multipliée par trois en 20 ans. On extrait aujourd'hui 50 milliards de tonnes de sable par an..." [12].

Le sable est, à l'heure actuelle, une matière première peu chère, d'où son utilisation fréquente. Cependant, le besoin croissant dans les régions en plein développement, comme la Chine et l'Inde, et l'offre qui risque très vite de diminuer amènent certains pays à s'attaquer à leur littoral et à extraire la ressource des fonds marins. Ces extractions, qu'elles soient légales ou illégales, ont un impact majeur sur l'environnement. Au-delà du réchauffement climatique, de la pollution, de la déforestation, ces effets viendraient accroître l'impact de l'Homme sur son lieu de vie : notre Terre.

Mais l'économie circulaire ne se limite pas à un impact écologique, elle a une incidence sur la sphère économique.

"Le développement durable n'est ni une utopie ni même une contestation, mais la condition de survie de l'économie de marché.", Louis Schweitzer. [13]

Effectivement, cette carence en ressources et les moyens utilisés pour y suppléer pourraient conduire à une augmentation des coûts. Il faudra toutefois être attentif à réduire autant que faire se peut l'utilisation d'énergies, de matières dans le processus de recyclage pour tendre le plus possible vers un processus de réutilisation.

En outre, un autre enjeu de cette politique durable trouverait particulièrement sa place dans les lieux où les déchets de construction sont abondants, comme dans des zones ayant subi des catastrophes

naturelles (tremblements de terre, cyclones, etc.) ou des conflits armés accompagnés d'une grande quantité de résidus de construction.

Malheureusement, l'insuffisance de connaissances dans ce domaine ainsi que les réglementations très strictes en vigueur empêchent actuellement la mise sur le marché (commercialisation) de ces matériaux.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une coopération entre l'Université de Liège et l'Université Laval à Québec et s'intègre dans le cadre du projet de recherche Mitacs Globalink. Le processus expérimental se déroule au sein du Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB) du laboratoire de développement durable des infrastructures publiques de la Fondation Canadienne de l'Innovation (FCI) à l'Université Laval, afin de bénéficier d'installations à la pointe de la technologie, au sein d'une équipe d'experts en sciences des matériaux, technologie du béton, réparation de structures, ...

Le projet, intitulé **"RECQc1 - Développement de mortiers à retrait compensé avec des sables de recyclage"**, a pour objectif d'étudier la substitution des sables naturels par des sables recyclés issus de la déconstruction et de la démolition des ouvrages d'art des bâtiments dans les mortiers.

Ces sables recyclés présentent des comportements et caractéristiques différents de ceux des sables naturels. Plus poreux, les sables recyclés absorbent plus d'eau et induisent notamment une augmentation du retrait et, par le fait même, un risque accru de fissuration. Une solution intéressante qui s'offre pour mitiger le risque est de leur adjoindre des agents expansifs permettant la compensation du retrait et la prévention de ses effets nuisibles.

Au-delà de l'impact environnemental, en étendant cette gestion durable à la construction, l'utilisation de sables recyclés aura non seulement un impact économique direct, au travers d'une réduction du tonnage des bétons envoyés vers les sites d'enfouissement, mais aussi indirect en réduisant l'empreinte carbone de l'industrie, en diminuant les besoins en ressources naturelles et en préservant les écosystèmes fragiles des zones côtières confrontées à des extractions intensives.

Elle ouvrira également une alternative à l'utilisation de ces déchets dans des applications moins nobles ("down cycling").

L'objectif de ce travail sera de développer des compositions de mortiers intégrant des quantités de sables recyclés semblables à celles du sable naturel et de vérifier l'impact d'agents compensateurs de retrait pour minimiser les fissurations. Il s'agira ainsi d'apporter des réponses à un ensemble de questions scientifiques et techniques relatives aux performances de ces mortiers.

Si l'industrie de la construction souhaite utiliser des sables recyclés dans de nouveaux bétons ou mortiers tout en garantissant des performances comparables aux matériaux actuels, quels niveaux de propriétés physiques et mécaniques doivent-ils atteindre pour être incorporés efficacement ? Quel est l'impact sur ces différentes propriétés et caractéristiques de la substitution partielle ou totale du sable naturel par ces granulats recyclés ? Quel agent compensateur peut être intégré dans les mélanges pour éliminer ou réduire les effets néfastes de l'intégration des sables recyclés notamment sur le retrait plastique ? Dans quelle mesure ces agents peuvent-ils annihiler les effets négatifs constatés ? N'en induisent-ils pas d'autres ? Quelles sont les concentrations maximales ou minimales en sables recyclés et en agents compensateurs à intégrer dans les mortiers pour obtenir des propriétés similaires aux classiques ? Quel pourrait être l'impact sur les réglementations actuelles ?

De manière synthétique, le travail se déclinera en quelques grands chapitres :

1. Quelles vont être les références sur lesquelles nous allons nous baser ?

Dans un premier temps, les caractéristiques et les propriétés des mortiers réalisés avec du sable naturel seront déterminées. La granulométrie du sable naturel utilisé, ainsi que ses caractéristiques globales, seront analysées. Sur la base de mesures effectuées, il sera ensuite possible d'évaluer les propriétés physiques et mécaniques des mortiers classiques (retrait, résistance à la compression, etc.).

2. Quels sont les types et les caractéristiques des sables recyclés utilisés lors de nos essais ?

Dans cette seconde partie, il sera vérifié que les sables recyclés s'inscrivent bien dans la fourchette de granulométrie requise. Le degré de propreté de ceux-ci (terre, débris organiques, plastiques, métaux, ...) sera contrôlé afin de ne pas affecter la résistance et la durabilité des nouveaux mortiers. Les effets et les réactions éventuels avec d'autres éléments tels que les chlorures, les sulfates ou les matières organiques devront être contrôlés ou éliminés, tout en assurant la compatibilité avec les composants du mortier.

3. Une fois ces sables intégrés dans nos mortiers, quels sont les effets et les problèmes à maîtriser, voire à corriger ?

Sur la base d'essais et de mesures effectués en laboratoire, ce nouveau chapitre permettra de déterminer l'influence des sables utilisés sur le retrait, la fissuration, ainsi que sur les propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des mortiers. Ces analyses seront menées pour différents types de mélanges réalisés, offrant ainsi une vision globale des performances. Les résultats obtenus mettront en évidence les éventuelles déficiences et faiblesses des mortiers à base de sables recyclés par rapport aux mortiers classiques, permettant ainsi d'identifier les axes d'amélioration et les stratégies d'optimisation.

4. Pour éliminer ou réduire dans une fourchette acceptable ces effets néfastes, quels sont les agents compensateurs à intégrer dans ces mortiers et leurs effets ?

Nous analyserons dans cette partie de notre projet, sur base de nouveaux essais, l'apport que peuvent nous donner différents agents compensateurs en vue d'améliorer les performances des mortiers pour les rapprocher des actuelles. Nous disposerons par conséquent de résultats de mortiers à base de sables recyclés sans et avec agents expansifs et pourrons les comparer avec les classiques.

5. Quelles sont enfin les recommandations et conclusions que nous pouvons tirer de notre recherche ?

Dans le dernier volet, des recommandations pratiques et techniques seront émises afin de faire évoluer les connaissances, la documentation de référence et les normes au Québec, en Belgique et éventuellement dans d'autres pays.

Chapitre 1

Description et notions théoriques sur les matériaux utilisés

1.1 Préface

Dans un premier temps, ce chapitre va préciser la problématique dans laquelle ce travail s'intègre, de planter son décor. Ainsi, une série de questions sera abordée et des pistes de solutions seront envisagées.

Y a-t-il réellement à terme un risque de pénurie d'approvisionnement en sable ?

Les sables recyclés peuvent-ils représenter une alternative à l'utilisation de sable naturel dans les mortiers ?

Leur utilisation pose-t-elle des problèmes ?

Pour mieux comprendre le sujet, d'une part, les éléments constitutifs des composants du mortier seront présentés, dans ce chapitre, ainsi que les produits que nous avons utilisés pour tenter de résoudre les difficultés qu'ils induisent et plus particulièrement le retrait. D'autre part, quelques rappels théoriques seront précisés.

1.2 Le sable : un matériau en voie de rationnement

Pour le commun des mortels, le sable est une ressource qui semble inépuisable sur terre. Certains scientifiques (Howard C. McAllister, professeur de physique à l'université d'Hawaï, et Éric Chaumillon, chercheur à l'université de La Rochelle) ont d'ailleurs estimé le nombre de grains de sable présents sur terre et sont arrivés à des chiffres exorbitants : de 7,5 trillions (10^{18}) à 200 millions de milliards de milliards de grains de sable ! [14]

D'où la question : Risquons-nous une pénurie de sable ?

Les sables peuvent présenter différentes origines géologiques, tailles, formes, compositions chimiques, couleurs, ...

Classons-les, en première approche, en différentes catégories :

- Le sable calcaire est principalement présent dans les régions tropicales et provient de la décomposition de coquilles et de coraux.
- Composé de sulfates de calcium, le sable gypseux se situe dans des déserts nord-américains comme White Sands.
- La présence de minéraux volcaniques et notamment de fragments de basalte confère une couleur noire au sable volcanique.

- Le sable granitique est quant à lui composé de quartz, de mica, etc.
- Mais celui que l'on retrouve majoritairement dans les déserts, sur les plages et dans le lit des rivières et qui est la ressource convoitée est composé de dioxyde de silicium SiO_2 et est appelé sable siliceux.

Le sable est un élément essentiel pour bon nombre de procédés industriels. En effet, il est utilisé dans la fabrication des verres, des panneaux solaires, ... et bien entendu dans la construction ! Cependant, cette application ne correspond qu'à 5 % de la consommation mondiale.

Les besoins sont pharaoniques. Ainsi, pour construire un kilomètre d'autoroute, il faut de l'ordre de 30 000 tonnes de sable, 200 tonnes pour construire une maison individuelle. [15]

L'évolution démographique et le développement économique des pays émergents a pour conséquence une demande croissante de sable. Ainsi, on estime la consommation mondiale de sable de l'ordre de 50 milliards de tonnes par an actuellement. La Chine est de nos jours le plus gros consommateur avec de l'ordre de 60 % de la consommation mondiale. Toutes les estimations considèrent encore une croissance de la demande dans les années futures. Si une augmentation de la construction d'habitations liée à l'évolution démographique et à l'augmentation de la classe moyenne et de son pouvoir d'achat est fort compréhensible, l'impact sur les infrastructures est lui moins prévisible et dépendra des moyens des autorités publiques. Mais là où il y a croissance, il y a des ressources financières pour financer et accompagner le boom économique.

"Oxford Economics estime que le marché mondial de la construction était évalué à 10,7 billions de dollars américains en 2020, dont 5,7 billions de dollars américains se trouvaient dans les marchés émergents. Le marché mondial de la construction devrait croître de 4,5 billions de dollars américains entre 2020 et 2030." [2]

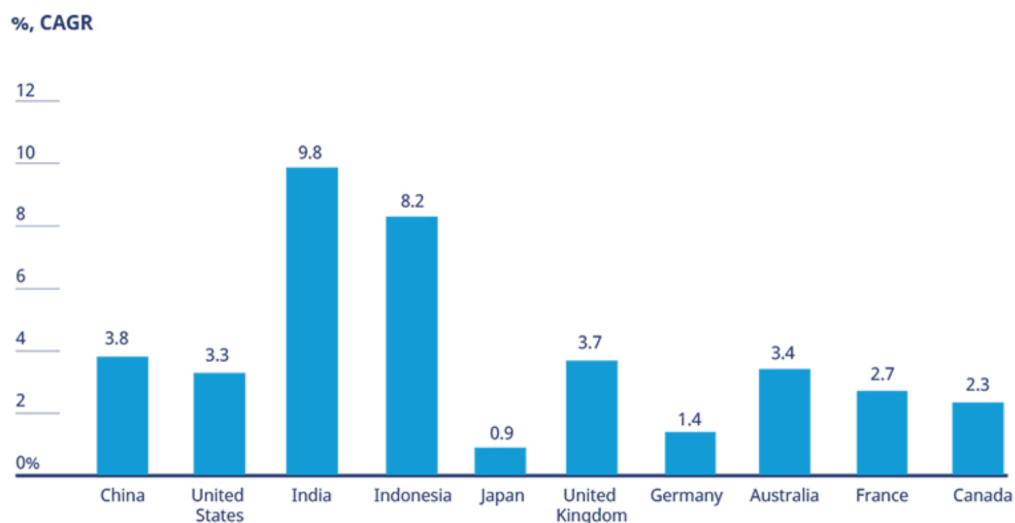


Figure 1.1 – Croissance de la construction d'infrastructures entre 2020 et 2030 [2]

"Le marchand de sable ne fait pas fortune dans le désert !", a écrit Alexandre VIALATTE [16]. Cependant, tout sable n'est pas forcément bon à l'emploi. Ainsi, le sable de nombreux déserts est trop fin pour la plupart des applications et ne peut être utilisé dans le domaine de la construction car ses caractéristiques ne lui permettent pas de garantir la stabilité requise.

Aujourd'hui, les filières terrestres, qu'elles soient minières ou un prélèvement dans nos rivières et fleuves, arrivent pour la plupart à leur terme. Afin d'assurer l'approvisionnement en sable, l'extrac-

tion se fait aussi dans les fonds marins. Au-delà des coûts engendrés, l'impact sur l'écosystème est gigantesque.

Il est dès lors indispensable de passer d'une économie linéaire vers une économie circulaire. En effet, le modèle qui a prévalu ces dernières décennies et qui visait à extraire des ressources, à fabriquer, à assembler, à vendre, à utiliser et enfin à jeter est aujourd'hui non seulement économiquement caduque mais présente également un déficit environnemental extraordinaire que ce soit en approvisionnement, mais aussi en consommations énergétiques.

1.3 L'économie circulaire en construction

Et si nos déchets nous sauvaient ! ?

Si des inquiétudes existent quant à l'approvisionnement en ressources naturelles pour le bâtiment, ce changement de politique (passer d'une économie linéaire à une économie circulaire) présente non seulement des intérêts économiques mais aussi des avantages environnementaux et nous inscrit dans un schéma ou un développement durable !

Aujourd'hui, de nombreux états, de nombreuses régions (à l'instar de la Région Wallonne), ainsi que les institutions européennes, ont mis en place des réglementations de plus en plus strictes et contraignantes quant à la gestion de nos déchets. Ces lois, ces règles, portent non seulement sur la collecte, sur le stockage ou l'entreposage des déchets, mais également sur leur transport et, in fine, sur le traitement ou l'usage qui en sera fait.

La Région Wallonne a ainsi défini un "Plan Wallon des déchets-ressources" [17]. Cette problématique fait non seulement partie d'un suivi au sein de l'entreprise, mais est une partie prépondérante dans l'établissement d'une autorisation ou de la prolongation d'un permis d'exploitation pour celle-ci.

Le Québec n'est pas en reste avec cette problématique. Ainsi, le "Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs" estime que, toutes les minutes, les Québécois et les Québécoises "produisent" 25 tonnes de matières résiduelles d'origine non seulement domestique mais aussi au niveau des collectivités, du commerce et bien entendu de l'industrie ! Il a mis en place une Politique globale qui vise à "Éliminer une seule matière résiduelle au Québec : le résidu ultime" [18].

Le plan quinquennal d'actions 2019-2024 avait pour objectif de "recycler et valoriser 70 % des résidus de construction, rénovation et démolition". À mi-parcours, en 2021, le résultat pour cet objectif était de 47%. [19]

Si ces politiques visent non seulement à sensibiliser et à conscientiser les citoyens, elles concernent et impliquent également l'ensemble des acteurs économiques de nos sociétés.

Toutes les activités économiques sont concernées par celles-ci : l'industrie sidérurgique, par exemple, a dû trouver des solutions et des alternatives locales au traitement et à la revalorisation de ces déchets, comme pour les scories par exemple, qui sont, entre autres choses, utilisées pour les infrastructures routières. Mais ce n'est pas tout, des débouchés ont été trouvés pour les résidus huileux, pour les boues de rectification,...

Ces résidus sont soit réintégrés dans le processus sidérurgique, soit peuvent être réutilisés dans d'autres processus industriels comme les cimenteries. D'ailleurs, des entreprises ont vu le jour afin de conditionner ou d'adapter ces déchets à leur utilisation future. Nous avons par exemple en région liégeoise Hydrometal et Recyfuel.

Au Québec, la société "Bétonmoulds" récolte les bétons excédentaires ou non utilisés sur les chantiers lors des travaux de bétonnage pour en faire d'autres produits comme des dalles de béton. [20]

De manière compréhensible, la construction de bâtiments et d'infrastructures diverses génère des déchets, produits aussi bien lors des démolitions qui la précèdent que lors des rénovations. Elle en crée également au moment de l'édification : 10 à 15 % des matériaux sont jetés durant cette phase.

L'ensemble de ces déchets est réparti dans différentes catégories :

- Les déchets inertes où on retrouve le béton, la terre, les pierres, ...
- Les déchets non inertes mais non dangereux : les plastiques, les métaux, les bois.
- Les déchets dangereux : les peintures, les solvants, les terres polluées, ...

Ainsi en France, la quantité de déchets liés au secteur des "bâtiments et des travaux publics" (BTP) produit de l'ordre de 46 millions de tonnes de résidus par an.

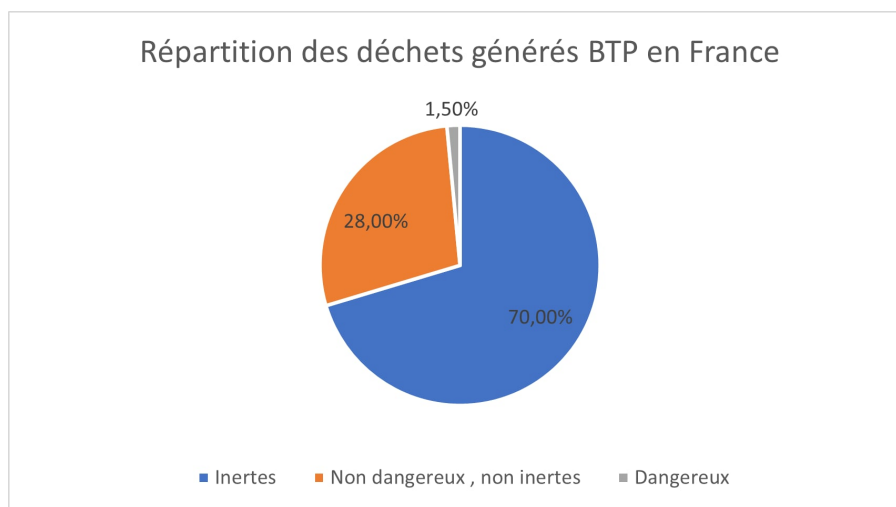


Figure 1.2 – Répartition des déchets générés BTP en France

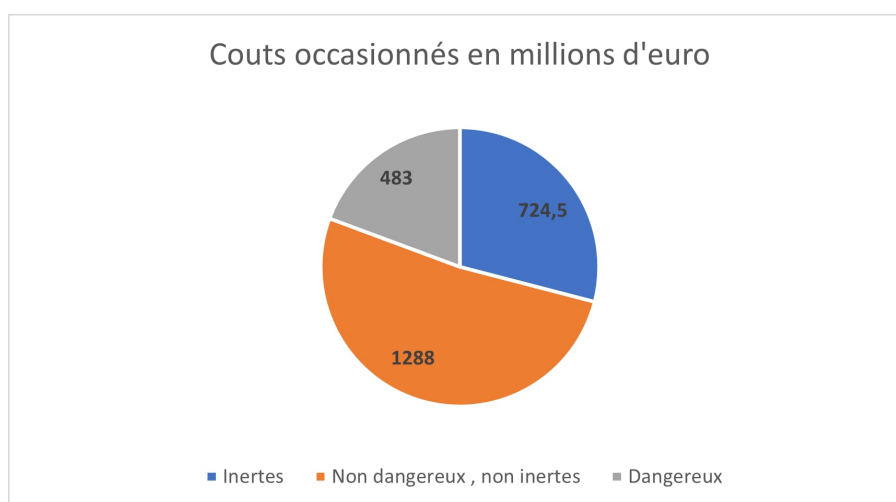


Figure 1.3 – Coûts occasionnés en millions d'euro

Le coût total de cette gestion des déchets liés au BTP est de l'ordre de 2500 millions d'euros. [21] Une autre source, Batiweb, évoque des chiffres encore plus élevés. Batiweb considère que la construction en France génère 232 millions de tonnes par an ! [22]

Un intérêt économique certain au recyclage et à la réutilisation des résidus est évident. Mais un intérêt environnemental est également à prendre en considération. En effet, un enfouissement de déchets, au-delà des impacts directs qu'il peut avoir, pourrait aussi déboucher sur une pollution de nos réserves en eau et sur la qualité des sols.

L'Union Européenne s'est également penchée sur cette problématique et a promulgué une Directive en 2008 : "Waste Framework Directive". [23]

L'échelle de Lansink illustre la hiérarchisation des démarches de progrès et des actions qui s'inscrivent dans la gestion des déchets.

REPENSER	Refuser	1
	Repenser	2
	Réduire	3
PROLONGER	Réutiliser	4
	Réparer	5
	Reconditionner	6
	Ré-usiner	7
OPTIMISER	Recycler	8
	Produire de l'énergie	9a
DÉTRUIRE	Incinerer	9b
	Mise en décharge	10

Figure 1.4 – Échelle de Lansink [3]

Cette réflexion a débouché sur une nouvelle Directive en 2015 : "Circular Economy Package". [24] L'ensemble des politiques mises en place vise à atteindre la maxime suivante : "boucler la boucle".

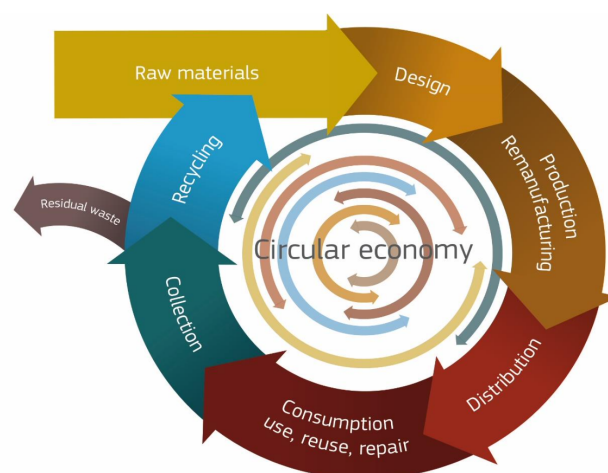


Figure 1.5 – Diagramme illustrant de manière simplifiée l'économie circulaire [4]

Une série de rapports analyse les carences en ressources naturelles au travers d'un rapport "Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy". [4]

Le meilleur déchet est celui que l'on ne crée pas, il faut dès lors repenser les projets afin de supprimer ou de réduire les déchets. Ainsi, les autorités visent à réduire les déchets de 15 %. Une seconde famille d'actions visera à réutiliser, à réemployer les résidus. Si une réduction et un réemploi ne sont pas possibles, les actions viseront à recycler les déchets, c'est-à-dire à les utiliser dans d'autres processus.

Cette politique de "boucler la boucle" peut s'illustrer facilement par le schéma suivant extrait d'un article "Vers une économie circulaire dans la construction. Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction". [5]

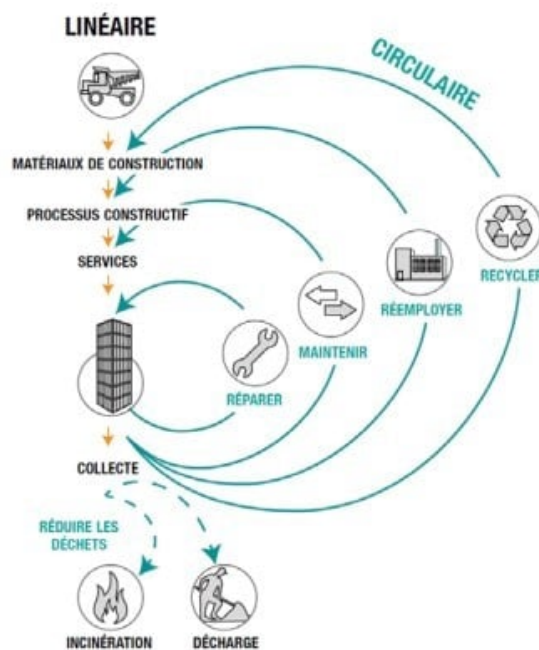


Figure 1.6 – Économie circulaire dans la construction [5]

Cette illustration présente les principes évoqués dans l'échelle de Lansink sous une forme plus fonctionnelle. Ainsi, les politiques mises en œuvre viseront à proposer des solutions dont la boucle sera la plus petite.

Stephen COVEY, homme d'affaires et professeur à l'école de commerce Jon M. Huntsman de l'université d'État de l'Utah, a écrit "Begin with the end in mind!". Le domaine de la construction va devoir revoir ses projets futurs en intégrant dès la conception la notion d'adaptabilité, par exemple en réalisant un inventaire de pré-déconstruction.

L'Union Européenne dans sa Directive de 2008 évoquait déjà ce tournant en précisant qu'il faudra définir le moment, les conditions qui font qu'un déchet n'en est plus un mais devient une ressource. Nos chantiers de démolition, nos déconstructions, nos villes deviendront non plus des déchets en devenir mais une réserve de ressources : c'est la notion d'Urban Mining.

Certes les actions, qui ont été mises en place pour réutiliser les déchets de la démolition et de la déconstruction, portent leurs fruits. La Belgique apparaît parmi les bons élèves avec un taux de recyclage de 90 % de ces déchets. [11]

La notion de recyclage mise en avant dans nos objectifs doit évoluer face à cette politique d'Urban

Mining. En effet, le fait d'incinérer des déchets était et est encore, dans certains discours, considéré comme une valorisation de ceux-ci.

D'autre part, à ce jour, les granulats de béton sont utilisés dans des travaux de remblais, de construction d'infrastructure comme des sous-produits et peuvent être intégrés dans un processus "downcycling" de moindre qualité. Certes, ces recyclages sont nettement plus intéressants et à privilégier par rapport à des mises en décharge, mais seront-ils pérennes ? En d'autres termes, disposerons-nous de suffisamment de travaux d'infrastructure pour les réutiliser ? D'autant plus que nous perdons dans ce schéma une valeur intrinsèque de ces produits, nous ne les exploitons pas sous toutes leurs facettes !

Une politique durable tendra à utiliser ces déchets-ressources dans des applications de plus haute qualité, à plus haute valeur ajoutée, c'est le "upcycling". C'est dans ce cadre que ce travail s'inscrit : utiliser du sable recyclé, issu de déchets de déconstruction, pour remplacer le sable naturel dans le mortier.

Pour atteindre cet objectif, il faut s'assurer que les performances mécaniques et physiques sont comparables à celles d'un mortier classique ou d'analyser l'impact de mélanges hybrides ou de l'ajout d'agents chimiques dans ceux-ci.

En effet, comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, les sables recyclés ont un comportement tout autre avec l'eau. Ainsi, lors d'une série d'essais effectués en Belgique, il apparaît très clairement que l'absorption d'eau quand on utilise des granulats de la déconstruction est nettement plus élevée. [11]

Or ce phénomène conduira à un retrait plus important du mortier et, par conséquent, à des fissures.

1.4 Le retrait

Le retrait est un phénomène physique lié au séchage du béton ou du mortier. À la suite de l'évaporation de l'eau, des rétrécissements s'opèrent dans les trois dimensions. Mais nous sommes bien souvent en présence d'un phénomène linéaire. Cela s'explique par la prédominance d'une dimension sur les deux autres, ce qui accentue et rend plus perceptibles les effets dans cette direction.

Différents types de retrait se produisent lors du séchage du mortier ou du béton. Ils pourront être concomitants ou successifs. Ils pourront aussi être indépendants ou liés.

- Le retrait de séchage est celui qui vient le premier à l'esprit, il se produit les premiers mois en surface quand le béton ou mortier durcit. L'évaporation de l'eau s'effectue à la surface en contact avec l'air ambiant. Cette perte d'eau sera influencée par les facteurs suivants : la porosité du béton, le degré hygrométrique de l'air ambiant et la surface exposée à l'air rapportée au volume de l'élément. [25]
- Le retrait plastique est lui lié à l'évaporation de l'eau de gâchage et a lieu avant et pendant la prise. Une fois le béton ou mortier coulé, la surface libre commence à sécher et des tensions de contraction apparaissent. Il est d'autant plus important quand la température ambiante est élevée et que l'air est sec, mais aussi quand la surface est soumise à des courants d'air. Un grand rapport surface coulée sur épaisseur et un excès d'eau constitueront également des facteurs aggravants. Dans des conditions normales, le retrait plastique peut être de l'ordre de 1 mm par mètre. [25]
- Mis en présence d'eau, le ciment réagit chimiquement pour constituer de nouveaux composants : ces processus sont appelés réactions d'hydratation du ciment. Elles sont indispensables car les produits générés par celles-ci conduisent à la prise et au durcissement du béton ou

mortier. L'eau consommée pour ces réactions chimiques va provoquer une contraction du béton ou mortier. Le retrait chimique (retrait endogène ou encore retrait d'auto-dessiccation) qui en résulte est irréversible et peut évoluer aussi longtemps que l'hydratation du ciment se poursuit. Il peut avoir un impact allant de 300 à 800 $\frac{\mu m}{m}$. Nous reviendrons par la suite plus en détail sur ce point. [25]

- Ces réactions chimiques (exothermiques) provoquent un accroissement de la température de la pièce coulée. Une fois la prise du béton ou mortier opérée, la température de l'élément va décroître pour revenir à la température ambiante, nous serons confrontés à des retraits thermiques qui vont également produire des tensions au sein du béton ou mortier. Il est bien évident que ce phénomène sera d'autant plus important que l'élément est massif. [25]

La combinaison de tous ces retraits conduit à un retrait dit total.

Dans ce travail, l'analyse portera principalement sur le retrait endogène et le retrait de séchage. Après le moulage, les éprouvettes sont recouvertes d'un voile humide puis d'un film imperméable afin de limiter le retrait plastique et de maintenir une humidité suffisante jusqu'au démoulage. Elles sont ensuite conservées pendant sept jours dans une chambre humide avant d'être transférées dans une salle à conditions contrôlées pour la phase de séchage.

1.5 Le ciment Portland

Si nous avons évoqué l'approvisionnement en sable, les autres composants du mortier sont l'eau et le ciment. Ces deux éléments vont créer une pâte qui va agir comme un liant, comme une colle, pour des éléments inertes comme le sable dans le cas du mortier et comme le sable et de plus gros granulats (gravier, pierre, ...) dans le cas du béton. L'objectif recherché est qu'en séchant, ce mélange durcisse et ressemble à la pierre naturelle. L'impact sur les propriétés mécaniques et physiques de ces mélanges est décrit plus en détail dans le cours "Matériaux de construction : Composition des bétons" du Professeur Luc COURARD. [26]

Dans le présent chapitre, nous allons revenir sur les éléments qui composent ce ciment afin d'expliquer sommairement les réactions chimiques qui se produisent à la suite du mélange réalisé.

Si la chaux, ou encore l'oxyde de calcium CaO , était déjà connue à l'Antiquité, les Romains se sont rendus compte qu'elle réagissait chimiquement avec l'eau. En y ajoutant des cendres volcaniques de Pouzzoles, ils ont réalisé ce qui est plus que probablement le premier béton de l'Histoire. Ils ont utilisé ce matériau pour construire le Panthéon ! [7]

La réaction chimique exothermique de la chaux avec l'eau conduit à la création d'une chaux éteinte ($Ca(OH)_2$) et à un dégagement de chaleur.

Le problème de la chaux "pure" est qu'elle ne durcit pas sous l'eau.

Fin du $XVIII^{me}$ et début du XIX^{me} siècle, une découverte allait remédier à ce problème : l'ajout d'argile ou de silice à la chaux offrait des ciments plus résistants.

À cette époque, en Angleterre, Joseph ASPDIN met au point, fabrique et brevète un ciment composé de 80% de chaux et 20% d'argile. Une fois pris, il trouve que ce ciment ressemble à la pierre d'une île : Portland, il lui donne son nom. Vers 1838, son fils William arrivera à convaincre Isambard BRUNEL, dont le père Marc BRUNEL réalisait au moyen d'un tunnelier le premier tunnel sous un fleuve, la Tamise, d'utiliser le ciment Portland. Le ciment Portland est utilisé pour la première fois dans un ouvrage de génie civil.

Le processus de réalisation du ciment Portland est décrit dans le schéma suivant :

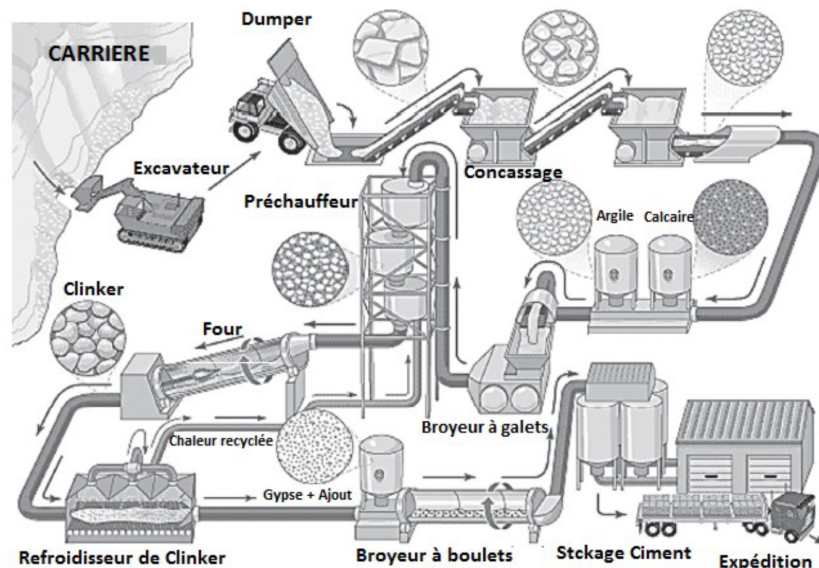


Figure 1.7 – Procédé de fabrication du ciment Portland par voie sèche [6]

Les différentes phases du processus de production sont :

1. L'extraction de calcaire (encore appelé craie) dans une carrière. Ce minerai est composé de carbonate de calcium CaCO_3 .
2. Les minerais sont ensuite concassés, broyés et séchés afin de faciliter les réactions chimiques par la suite. Un mélange constitué de 80% de calcaire et de 20% d'argile est réalisé et homogénéisé.
3. Celui-ci est ensuite réchauffé progressivement pour atteindre 1450 °Celsius. Lors de la cuisson différentes réactions chimiques s'opèrent et ainsi les différents composants du ciment apparaissent dont son principal à hauteur de 70 %, l'alite ou le silicate tricalcique C_3S . Le produit qui sort du four est appelé le clinker.
4. Il est ensuite refroidi rapidement pour éviter la transformation du silicate tricalcique en silicate dicalcique et en carbone.
5. Le clinker auquel sera ajouté du gypse pour éviter une prise trop rapide du ciment hydraté sera broyé à la granulométrie désirée.
6. Il sera ensuite stocké et conditionné pour être expédié vers les clients.

Afin de simplifier l'écriture des différents composants, les cimentiers ont décidé d'une nomenclature des éléments basée sur les oxydes qui les composent :

- La chaux (CaO) est représentée par **C**.
- La silice, ou dioxyde de silicium SiO_2 , composé que l'on retrouve largement sur terre et qui constitue principalement les sables, le quartz, ... est notée **S**.
- L'alumine, trioxyde d'aluminium Al_2O_3 , qu'on retrouve et qui est extraite de la bauxite, représentée par **A**, est un facteur important influençant la prise du béton et sa résistance à la corrosion.
- Au-delà du fait qu'il influence la couleur du ciment, le composant **F**, l'oxyde de fer Fe_2O_3 , améliore la résistance à la compression mais diminue la maniabilité du mortier.

D'autres abréviations simplificatrices sont également préconisées : H pour l'eau (H_2O), \bar{S} pour le trioxyde de soufre (SO_3).

Ces éléments se retrouvent dans le ciment Portland sous différentes phases minérales, à savoir :

- Le silicate tricalcique ou l'alite (Ca_3SiO_5 noté C_3S) (50 à 70 %)
- Le silicate dicalcique ou la belite (Ca_2SiO_4 notée C_2S) (10 à 30 %)
- L'aluminate tricalcique ou encore aluminate ($Ca_3Al_2O_6$ notée C_3A) (<15%)
- L'aluminoferrite tétracalcique ou celite ($2(Ca_2AlFeO_5)$ notée C_4AF)

Comme on peut le voir, les deux silicates C_3S et C_2S constituent 80 % du ciment Portland.

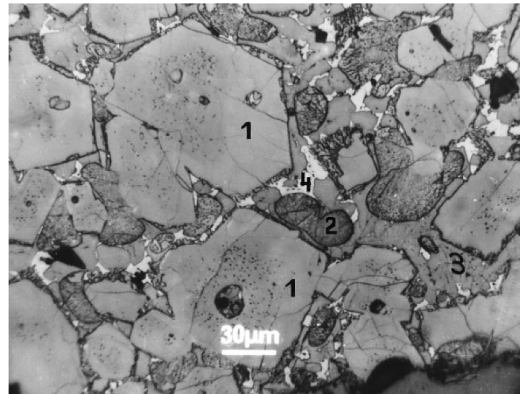


Figure 1 : Micrographie d'une section polie de clinker.

1. Silicate tricalcique - **2.** Silicate dicalcique.
3. Aluminate tricalcique - **4.** Aluminoferrite.

Figure 1.8 – Micrographie d'une section polie de clinker [7]

La masse volumique apparente et la masse volumique absolue (suivant que l'on considère un volume "aéré" ou un volume compact) sont utilisées pour caractériser les ciments.

Une troisième caractéristique est primordiale en ce qui concerne le processus d'hydratation du ciment : la surface spécifique (finesse Blaine). Celle-ci est exprimée en cm^2 par gramme (cm^2/g) et est conditionnée par la grosseur des grains de ciment.

En effet, si on considère une sphère de rayon R , son volume est égal à $\frac{4}{3}\pi R^3$ et sa surface est $4\pi R^2$. Cependant, huit sphères de rayon $\frac{R}{2}$ auront un volume total égal à $\frac{4}{3}\pi R^3$, mais présenteront une surface totale de $8\pi R^2$, soit le double.

Dès lors, pour des grains plus fins, la surface de contact entre le solide anhydre (le ciment) et l'eau sera plus grande et l'hydratation sera plus rapide.

Le ciment Portland présente une granulométrie allant de quelques microns à 150 microns et offre ainsi des surfaces de $2500\text{ }cm^2$ par gramme pour les grains grossiers à des surfaces de $5500\text{ }cm^2$ par gramme pour les grains les plus fins. [27]

Lors de la préparation du ciment Portland, l'ajout de gypse a pour effet de retarder la prise du mortier. S'il est dosé en excès, son influence peut être une expansion du mortier. Pourrait-il, dans notre cas, diminuer voire compenser le retrait ?

Non car cela aurait un impact défavorable sur la résistance mécanique et occasionnerait une expansion trop importante. Le dosage recommandé en gypse dans le ciment se situe dans une fourchette entre 3 et 5 % en masse dans le ciment pour contrôler la prise du mortier.

Néanmoins, le gypse est, dans certains cas, un des composants d'agents expansifs mais dans un rôle secondaire. Il fournira des sulfates en combinaison avec d'autres éléments (C_3A , CaO). Cependant, une utilisation isolée ne pourra pas apporter une expansion utile.

1.6 L'hydratation du ciment

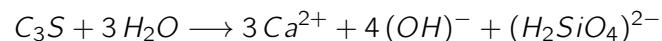
Quand le ciment est mis en contact avec de l'eau, une série de réactions chimiques se produisent, transformant les éléments composant le ciment ; ce sont les réactions d'hydratation. La pâte de ciment hydraté apportera la cohésion au solide créé et conférera au mortier sa résistance. Ce n'est pas le séchage qui donne au mortier sa résistance mais le passage de la pâte cimentaire qui enrobe les granulats (ici le sable) de la phase liquide à la phase solide. Par ailleurs, ces réactions chimiques dégagent de la chaleur et provoquent une diminution du volume de la pâte de ciment : c'est la contraction de Le Chatelier.

Ces réactions chimiques sont irréversibles et exothermiques et sont une succession de processus de dissolution - précipitation. Ce processus de dissolution - précipitation va se dérouler suivant une succession de phases. La maîtrise d'un point de vue chimique (et des modifications micro-structurales qu'elles induisent) est importante, mais la cinétique qui les régit est également fondamentale.

Une fois le mélange réalisé, l'eau entre en contact avec le ciment et le processus démarre, c'est la première phase du processus d'hydratation.

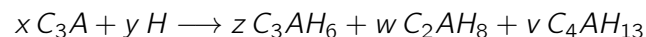
Dans un second temps, la dissolution du ciment dans l'eau va se produire, la phase aqueuse va progressivement se charger en ions. Pendant cette période, vu de manière macroscopique et vu de l'extérieur, rien ne semble se produire, le mélange présente toujours une structure plastique et maniable et la température est constante.

L'alite, élément principal du ciment Portland, va se dissoudre dans l'eau selon la formule suivante :



Le silicate dicalcique C_2S produira les mêmes ions mais dans des proportions différentes.

En ce qui concerne l'aluminate tricalcique C_3A , son hydratation va produire trois hydrates et on peut écrire de manière empirique :

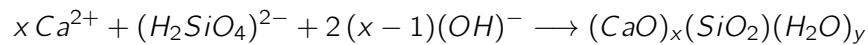


Si des mesures préalables à cette hydratation ne sont pas prises, ces hydrates peuvent provoquer une prise très rapide du mortier (réaction flash). Pour éviter cela, les producteurs de ciment Portland ajoutent du gypse. Ainsi, la dissolution du gypse apporte des ions sulfates (SO_4)²⁻ qui vont réagir avec les aluminates pour créer de l'ettringite $3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$ (notation cimentaire : $C_6A\bar{S}_3H_{32}$). Celle-ci va venir recouvrir les aluminates d'une fine couche cristalline qui va ralentir le processus de dissolution des aluminates dans l'eau.

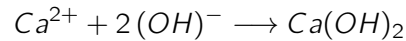
La cinétique de réaction des silicates dicalcique C_2S et des aluminoferrite C_4AF est nettement plus lente et n'a dès lors pas d'impact direct dans le processus.

Comme nous l'avons dit précédemment, la phase aqueuse se charge en ions, son pH augmente et petit à petit la dissolution des constituants diminue. Quand celle-ci est saturée, après quelques heures, de nouveaux composés sont apparus et ceux-ci vont précipiter :

- Les silicates de calcium hydratés C-S-H :



- Les hydroxydes de calcium ou encore portlandite CH :



Les précipités des silicates de calcium hydratés (C-S-H) vont s'agglomérer à proximité des grains anhydres et des granulats, vont s'entremêler et rigidifier progressivement le mélange. Les C-S-H sont les éléments les plus importants car, outre le fait qu'ils constituent le composant le plus présent dans le mortier, ils confèrent par leur fonction de liant, sa cohésion et sa résistance. C'est la prise du mortier.

La précipitation des hydroxydes de calcium (portlandite) va diminuer la concentration en ions $(\text{OH})^-$ et Ca^{2+} et ainsi permettre une nouvelle dissolution des hydrates.

Cette nouvelle phase s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

Les produits de précipitation finissent par enrober progressivement les grains anhydres, limitant ainsi la diffusion de l'eau vers les particules de ciment non encore hydratées. L'eau doit alors circuler à travers les pores du gel qui entoure les anhydres. Lorsque ce réseau devient peu poreux, l'hydratation du grain est fortement entravée. Néanmoins, bien que la cinétique d'hydratation ralentisse, elle peut se poursuivre durant plusieurs mois, voire plusieurs années. La chaleur dégagée décroît progressivement et le matériau retrouve une température proche de l'ambiance. Dans cette phase tardive, une fois les sulfates (issus du gypse) consommés, l'étringite réagit avec l'excédent d'aluminates tricalciques (C_3A) pour former des monosulfoaluminates de calcium.

Si on suit la température en fonction du temps, les différentes phases se présentent comme suit :

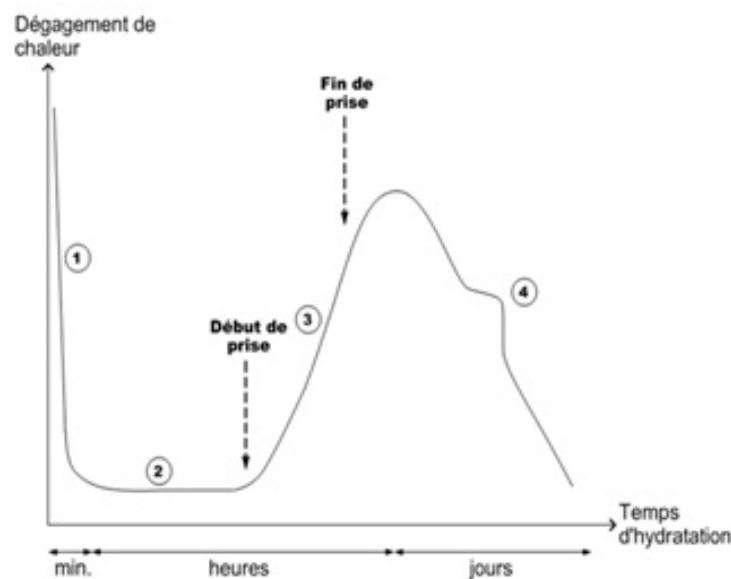


Figure 1.9 – Courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment [8]

1.7 Rapport Eau/Liant (E/L)

Jusqu'à présent, nous avons abordé les principaux composants solides du mélange à effectuer pour in fine obtenir un mortier constitué de granulats (dans notre travail, le sable ou le sable recyclé) et de liant (le ciment Portland).

L'ingrédient liquide prépondérant est l'eau. Celle-ci doit être exempte d'autres composés chimiques ou d'agents polluants pouvant venir perturber les réactions d'hydratation développées à la section 1.6.

Eau de gâchage du béton

Caractérisation des eaux brutes et de qualité douteuse



Paramètre	Concentration max dans l'eau de gâchage (mg/l)	Méthode d'analyse
Chlorures	500 (béton précontraint) 1000 (béton armé)	MA.300 - Ions 1.3 MA.303 - Anions 1.0
Sulfates (SO ₄)	3000	MA.300 - Ions 1.3 MA.303 - Anions 1.0
Alcalis (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	600	MA.200 - Mét. 1.2
Total de solides	50 000	MA.100 - S.T. 1.1
pH	≥ 6	MA.100 - pH 1.1

Figure 1.10 – Eau de gâchage [9]

Le rapport E/L correspond au rapport entre la masse d'eau et la masse de liants dans un mélange de béton ou de mortier, exprimé sous forme de décimale. Ce dernier ne tient pas compte de l'eau absorbée par le granulat. [9]

Le choix des composants et des proportions utilisées dans le mélange a pour objectif d'atteindre les caractéristiques non seulement du béton ou mortier frais mais aussi et surtout celles du béton ou du mortier durci. Par conséquent, les qualités requises sont [28] :

1. La maniabilité acceptable du mortier frais
2. La durabilité, la résistance et l'apparence du mortier durci liées à l'usage qui en sera fait in fine. Ces éléments seront influencés par sa fonction finale, son environnement, ses dimensions, ses formes, ...
3. Les coûts

L'eau est un paramètre crucial dans la qualité et les propriétés que nous rechercherons.

Comme expliqué dans le cours "Matériaux de construction - Composition des bétons" du Professeur Luc COURARD, le rapport E/C doit de préférence se situer entre 0,35 et 0,6. Un excès d'eau peut entraîner un retrait plastique. Il y est précisé également qu'une augmentation de 10 % de ce rapport a pour effet une diminution de la résistance mécanique de $10 \frac{N}{mm^2}$.

Par conséquent, il faudra trouver le meilleur compromis entre une maniabilité du mortier et une réduction des effets défavorables (retrait, résistance, ...).

La recherche d'un "bon" rapport E/C sera fonction de la finesse des grains de notre granulat mais également de sa nature (les sables recyclés auront tendance à absorber plus d'eau).

Dans le cadre du présent travail, nous avons cherché à obtenir des mélanges de même consistance et nous avons opté pour des rapports eau/liant adaptés à la nature des granulats utilisés. Les résultats obtenus sont présentés à la section 2.7.

1.8 Les agents expansifs

Afin de contrecarrer le retrait du mortier, des agents expansifs sont régulièrement utilisés dans des bétons dont le granulat est du sable naturel. En effet, au jeune âge du béton, la création d'ettringite et de la portlandite ($Ca(OH)_2$) va provoquer une légère expansion qui va annuler ou réduire le retrait et par conséquent le risque de fissuration. Les agents expansifs peuvent par exemple être utilisés pour la réalisation de grandes dalles, de murs minces, de structures sans joints, ...

Le remplissage des vides internes et des interfaces réduira ou éliminera le retrait, mais améliorera également l'étanchéité du béton, ce qui de facto réduira les risques d'altération dus aux cycles gel/dégel ou à des attaques chimiques.

Dans ce travail où le retrait des mortiers à base de sables recyclés est étudié, l'impact de l'ajout de ces additifs sera analysé non seulement sur le retrait mais également sur les propriétés mécaniques.

Dans les années 30, ce qui au départ fût considéré comme un défaut de réalisation amena les constructeurs à s'interroger sur les effets positifs qu'ils pourraient en retirer. Ils avaient en effet constaté que les bétons qui contenaient beaucoup de sulfates et d'aluminates présentaient une expansion due à la formation d'ettringite. Ils cherchèrent à contrôler cette expansion afin de compenser le retrait.

Plus tard, dans les années 1940-1950, au Japon, des membres du "Research Institute of Public Works" de Tokyo étudièrent l'impact de l'ajout de chaux CaO libre et de sulfates dans les ouvrages hydrauliques. En effet, dans cette période d'après-guerre et dans le cadre de la renaissance du Japon, les ingénieurs japonais se sont lancés non seulement dans des travaux de construction de bâtiments, d'infrastructures (routes) et d'ouvrages de génie civil, mais aussi dans la réalisation d'ouvrages hydrauliques. Les besoins énergétiques accompagnent ce développement, la gestion des inondations et l'impérieuse nécessité d'assurer la sécurité des surfaces agricoles les ont amenés à construire de nombreux barrages (Sakuma sur la rivière Tenryū, Okutadami, ...) et des digues. Ils avaient eu l'occasion d'éprouver et d'expérimenter leurs idées dans leurs colonies en Mandchourie, en Corée, ... Ils ont profité également d'un transfert d'informations technologiques des États-Unis afin de consolider l'influence américaine lors de la Guerre Froide et de la Guerre de Corée. [29]

Il faudra attendre les années 60, pour qu'aux États-Unis, l'utilisation d'agents expansifs soit régie par une norme : ASTM C845.

Différents agents y sont classifiés [30] :

1. Le Type K, composé principalement de sulfoaluminate de calcium, de sulfate de calcium et d'oxyde de calcium.
2. Le Type M, basé sur un mélange d'aluminate de calcium et de sulfate de calcium.
3. Le Type S, constitué d'aluminate tricalcique associé au sulfate de calcium

Par ailleurs, le guide ACI 223 élargit cette classification en ajoutant une quatrième catégorie d'agent expansif :

4. Le Type G, qui repose sur une combinaison d'oxyde de calcium et de pouzzolane calcinée.

L'hydratation rapide des agents expansifs de Type G conduit à la formation précoce de portlandite ($Ca(OH)_2$), à l'origine de l'expansion de la pâte de ciment. Certaines formulations peuvent contenir de faibles proportions de sulfates et d'aluminates, qui permettent de réguler la prise et l'amplitude de l'expansion.

En comparaison, les agents de Type M présentent une réaction chimique plus lente et progressive. La différence majeure entre ces deux types réside donc dans la vitesse de formation de la portlandite

et le contrôle des mécanismes d'expansion durant les premières phases de cure.

Entre 1970 et 1990, des formulations à base d'additifs en poudre plus stables et à dosage simplifié apparaissent sur le marché mondial. Elles peuvent être incorporées directement dans les bétons et les mortiers et permettront leur utilisation notamment dans le domaine des ouvrages de génie civil (ponts, barrages, tunnels).

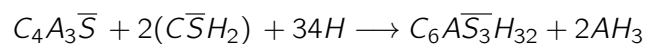
Ces vingt dernières années, de nouvelles formulations sont apparues permettant l'utilisation d'agents expansifs pour réduire la consommation lors de leur production et pour diminuer les fissurations tardives (ISA - Internal Sulfate Attack). Ils participent également aux considérations écologiques actuelles au travers de liants alternatifs (géopolymères expansifs). Ils sont utilisés pour des réparations rapides, les bétons haute performance (BHP) et les bétons autoplaçants. Ils remplacent le ciment Portland. Ils réduisent ainsi l'émission de CO_2 et présentent une durabilité chimique supérieure.

1.8.1 L'agent expansif de type K

L'agent expansif n'est pas un ciment complet mais est incorporé au ciment Portland pour produire de l'ettringite primaire afin d'assurer une expansion contrôlée. En effet, si l'expansion n'est pas suffisante, le risque de fissuration par suite du retrait ne pourra pas être levé. Par ailleurs, une expansion trop forte pourrait conduire à des contraintes débouchant également sur des fissures (faïence, ...).

La composition classique de l'agent expansif de type K (en anglais : "Type K expansive cement" ou "K-type shrinkage-compensating cement") a été brevetée par Klein aux USA dans les années 1960 et comporte :

- "Anhydre Sulfate de Trialuminate Tétracalcique" ou encore "Ye'elimite" ($C_4A_3\bar{S}$ (ou $Ca_4Al_6O_{12}(SO_4)$ en chimie classique), ou calcium sulfoaluminate). Mis en contact avec le gypse et l'eau, il s'hydrate pour former rapidement de l'ettringite :



NB : ce minéral a été découvert en Israël à Ye'elim d'où son nom. La proportion de ce composant est fonction des fabricants afin d'obtenir une expansion de l'ordre de 0,04 % à 0,07 % au jeune âge.

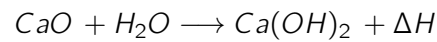
- Sulfate de calcium ou gypse
- Chaux libre (CaO)

L'expansion se produit dans les premiers jours et est d'autant plus efficace quand le mûrissement a lieu en immersion dans l'eau que dans une atmosphère humide.

Lors de nos essais, nos éprouvettes ont mûri en atmosphère humide afin de conserver les mêmes procédures que pour les autres éprouvettes d'essais. Cependant, afin de déterminer si une expansion plus importante aurait pu être obtenue, celles-ci ont été, après la période des 28 jours de séchage, immergées dans de l'eau de chaux et ont subi une nouvelle série de mesures. Les résultats de cette nouvelle série de mesures, se trouvent au point 3.1.4.

1.8.2 L'agent expansif de type G

Un agent expansif de type G est composé principalement de chaux libre CaO. La chaux en contact avec l'eau s'hydrate et se transforme en portlandite suivant la formule suivante :



Où ΔH représente la chaleur dégagée car la réaction est exothermique.

Très régulièrement, la chaux libre est combinée avec des sulfoaluminates. En effet, ceux-ci réagissent très rapidement pour créer de l'ettringite alors que la chaux, elle, suite à la création de portlandite, provoquera une expansion plus lente et prolongée permettant ainsi de compenser l'expansion différée.

Chapitre 2

Méthodologie et protocoles expérimentaux

2.1 Préface

Ce chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie expérimentale mise en œuvre dans le cadre de ce travail de fin d'études. Il retrace de manière rigoureuse les différentes étapes suivies, depuis la formulation des mélanges de mortier jusqu'à la mise en œuvre des essais, en précisant les conditions de préparation, de conservation et de test des éprouvettes.

L'objectif de cette démarche est de caractériser l'influence de l'incorporation de sables recyclés sur les propriétés du mortier, à l'état frais comme à l'état durci. Pour garantir la comparabilité et la pertinence des résultats, les essais ont été réalisés selon des protocoles normés. Certains mélanges ont en outre été modifiés par l'ajout d'un agent expansif, intégré à titre exploratoire, dans l'optique de limiter les effets induits par le retrait.

Ce chapitre vise ainsi à établir un cadre technique clair et reproductible, en justifiant les choix opérés en matière de matériaux, de proportions et de procédures expérimentales. Il constitue une base essentielle pour l'interprétation critique des résultats présentés ultérieurement, tout en soulignant les limites inhérentes à toute démarche expérimentale.

2.2 Matériaux

2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail a été mis à disposition par le laboratoire du CRIB de l'Université Laval à Québec. Il s'agit d'un ciment de type GU (General Use), fourni par Ciment Québec, conforme aux exigences de la norme CSA A3000-18, section A3001-18 Type GU. Il s'agit d'un ciment Portland destiné à un usage général, sans exigences spécifiques liées, par exemple, à la résistance aux sulfates ou à la chaleur d'hydratation. Ce type de liant est un équivalent au Type I défini par la norme ASTM C150-07.

Afin de permettre une comparaison avec les normes européennes, et plus particulièrement avec la norme EN 197-1, le ciment GU peut être assimilé à un ciment de type CEM I, qui désigne un ciment Portland constitué d'au moins 95 % de clinker, les 5 % restants étant composés de constituants secondaires tels que du gypse.

L'analyse chimique fournie par le fabricant (Annexe 6.16), révèle une composition typique d'un clinker Portland : une teneur élevée en CaO (61,4 %), associée à des teneurs en SiO₂ (19,4 %), Al₂O₃ (4,7 %), et Fe₂O₃ (3,4 %). Les pertes au feu (2,5 %) et le résidu insoluble (0,3 %) confirment l'absence d'ajouts majeurs tels que des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau.

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition [proportion by mass ¹⁾]											
			Main constituents										Minor additional constituents	
			Clinker	Blastfurnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone*			
			K	S	D ²⁾	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland-composite cement ³⁾	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->										0-5
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->										0-5
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement ³⁾	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Composite cement ³⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<----- 31-50 ----->			-	-	-	-	0-5	

1) The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents. 2) The proportion of silica fume is limited to 10%.

3) In Portland-composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in Pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B

and in Composite cements CEM V/A and CEM V/B the main constituents besides clinker shall be declared by designation of the cement.

* L : total organic carbon (TOC) shall not exceed 0.5% by mass; LL: TOC shall not exceed 0.20% by mass.

Figure 2.1 – Les 27 produits de la famille des ciments courants : EN 197-1

Sur le plan minéralogique, la présence importante de C₃S (54,6 %) et C₂S (14,4 %) indique un développement rapide des résistances, renforcé par des résultats mécaniques obtenus en laboratoire, notamment une résistance à la compression de 29,2 MPa à 3 jours et 38,9 MPa à 28 jours.

Au regard de la norme EN 197-1, cette performance se rapproche de la classe CEM I 42,5 R, laquelle impose une résistance minimale de 20 MPa à 2 jours et de 42,5 MPa à 28 jours. Toutefois, la résistance à 28 jours mesurée (38,9 MPa) reste légèrement en dessous du seuil normatif, ce qui suggère qu'en l'absence d'un essai direct selon les protocoles européens, une classification prudente pourrait s'orienter vers la classe CEM I 32,5 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 2.2 – Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques : EN 197-1

Ainsi, le ciment GU peut raisonnablement être assimilé à un ciment de type CEM I, avec une classe de résistance comprise entre 32,5 R et 42,5 R, sous réserve des écarts de méthode entre les normes CSA et EN.

2.2.2 Les agents expansifs

Dans le cadre des mélanges finaux, deux types d'agents expansifs ont été employés : le type K et le type G. Il convient de noter que les fabricants ne divulguent généralement pas la composition exacte de ces produits et qu'aucune analyse externe spécifique n'a été réalisée sur les échantillons utilisés dans ce travail.

Les descriptions qui suivent se basent donc sur les informations reçues par l'intermédiaire du Professeur B. BISSONNETTE et des données génériques disponibles dans la littérature scientifique.

1. Component (Agent expansif de type K : sulfoaluminate de calcium)

Le type K repose sur l'utilisation de sulfoaluminate de calcium comme phase active. Cet agent expansif agit principalement par la formation d'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) lors de l'hydratation. L'ettringite se caractérise par un fort potentiel d'expansion volumique, qui compense en partie le retrait de séchage des matériaux cimentaires.

De manière générique, les composants typiques du type K sont les suivants :

- Phase sulfoaluminate de calcium ($C_4A_3\bar{S}$) : phase principale responsable de la réaction expansive.
- Sulfates de calcium (gypse, anhydrite) : sources de sulfate nécessaires à la formation d'ettringite.
- Aluminate de calcium et silicates de calcium : phases complémentaires issues du procédé de fabrication.

La réaction entre ces phases en présence d'eau conduit à une cristallisation interne qui génère une pression expansive, contribuant ainsi à limiter les déformations de retrait dans les mortiers et bétons.

2. Conex (Agent expansif de type G : chaux calcinée)

La chaux calcinée, également appelée chaux vive, est obtenue par la décarbonatation du calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3) lors d'un chauffage à haute température. Cette réaction de calcination provoque la libération de dioxyde de carbone (CO_2) et conduit à la formation d'oxyde de calcium (CaO), qui constitue le principal composant de ce type d'agent expansif.

La composition générique de la chaux calcinée est la suivante :

- Oxyde de calcium (CaO) : il s'agit du constituant majoritaire, issu de la décomposition thermique du carbonate de calcium. En présence d'eau, il s'hydrate rapidement pour donner de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). Cette réaction, fortement exothermique, s'accompagne d'une augmentation volumique qui est à l'origine de l'effet expansif recherché.
- Oligo-éléments : la composition exacte de la chaux calcinée varie en fonction de la nature géologique du calcaire et des conditions de calcination. Elle peut contenir de faibles quantités de constituants secondaires, parmi lesquels :
 - Oxyde de magnésium (MgO) : présent lorsque le calcaire contient du carbonate de magnésium (MgCO_3). Après calcination, ce carbonate se transforme en oxyde de magnésium, qui possède lui aussi un certain potentiel de réactivité, mais généralement plus lent que celui du CaO .
 - Silice (SiO_2), alumine (Al_2O_3) et oxyde de fer (Fe_2O_3) : ces éléments apparaissent comme impuretés, héritées de la composition minéralogique du calcaire d'origine. Bien qu'ils soient minoritaires, ils peuvent influencer la réactivité et la microstructure finale.
 - Carbonate de calcium non décomposé (CaCO_3) : une fraction résiduelle peut subsister si la calcination n'est pas totale. Cette "matière non brûlée" est fréquente et dépend à la fois de la pureté initiale du matériau et du procédé de cuisson.

En résumé, la chaux calcinée est largement dominée par le CaO , mais demeure un matériau hétérogène. La présence et la proportion de ces oligo-éléments peuvent influencer la cinétique d'hydratation et, par conséquent, l'efficacité expansive observée dans les mélanges cimentaires.

Lors de la préparation de mes mélanges, l'incorporation des agents expansifs a été réalisée avec des dosages spécifiques selon le type d'agent utilisé. Ainsi, pour les formulations contenant un agent de Type K, celui-ci a été ajouté à hauteur de 15 % en substitution de la masse totale de ciment. En revanche, pour les mélanges intégrant un agent de Type G, la proportion employée a été fixée à 10 % de la masse totale de ciment. Ces choix de dosage visent à respecter les recommandations usuelles tout en assurant une évaluation pertinente de l'influence de chaque agent sur les propriétés des mortiers.

2.2.3 Les granulats

Dans le cadre de ce travail, trois types de sables ont été employés pour la confection des mortiers expérimentaux.

Le sable désigné par l'abréviation NS correspond à un sable naturel, utilisé comme matériau de référence dans le cadre de cette étude comparative. Il s'agit d'un sable tamisé et lavé, provenant de la gravière de Saint-Raphaël (Québec), dont la classe granulaire est particulièrement fine (5–80 μm). Classé SAL selon les critères du fournisseur, ce sable est conforme aux exigences de la norme CSA A23.2 relative aux granulats pour béton. Il a été fourni par la société Qualigranulat et analysé par le laboratoire LEQ.

Les sables identifiés par RS1 et RS2 correspondent à des sables recyclés, issus de la valorisation de déchets de béton.

- RS1 : sable recyclé canadien (Lafarge - Montréal)
- RS2 : sable recyclé belge (Wanty - Belgique)

Le sable RS2 a également été soumis à une carbonatation au sein du laboratoire de l'Université de Liège.



Figure 2.3 – Carbonatation du sable recyclé RS2 (ULiège)

Les différentes propriétés de ces sables se trouvent en Annexe 6.

2.3 Granulométrie

La granulométrie des sables utilisés dans le cadre de cette étude a été caractérisée par tamisage à sec, conformément aux normes en vigueur dans les différents contextes géographiques d'analyse.

Cette étape vise à déterminer la distribution dimensionnelle des particules, ce qui constitue un préalable fondamental pour évaluer la compatibilité des matériaux avec une utilisation en mortier. Une telle caractérisation granulométrique permet notamment d'anticiper leur comportement en matière de compacité, de porosité ou encore de réactivité.

2.3.1 Sable Naturel (NS)

Le sable naturel a été fourni avec une fiche du fabricant incluant sa courbe granulométrique standard. Toutefois, afin d'uniformiser les fractions granulaires utilisées pour la confection des mélanges, un tamisage complémentaire a été effectué en laboratoire.

Seule la fraction passant au travers d'un tamis de 5 mm d'ouverture a été conservée. Cette opération visait à éliminer les grains trop gros pouvant perturber l'homogénéité des mortiers et à garantir une cohérence avec les fractions retenues pour les sables recyclés.

La courbe granulométrique du sable naturel utilisé est représentée en bleu sur le graphique ci-dessous. Les courbes en pointillés représentent les limites inférieure et supérieure de la granulométrie de ce sable naturel.

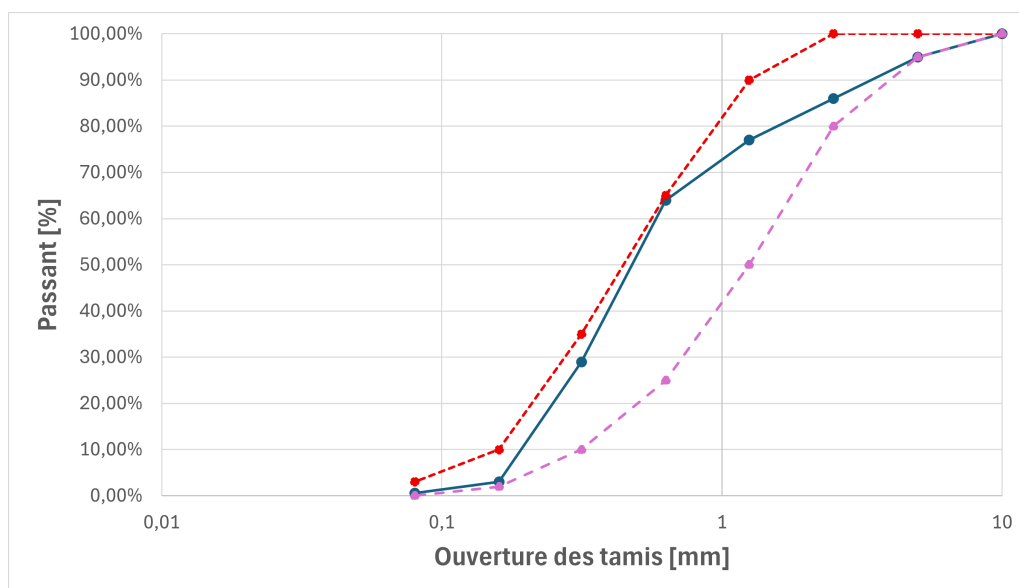


Figure 2.4 – Granulométrie du sable naturel (NS)

2.3.2 Sable Recyclé (RS1)

La granulométrie du sable recyclé RS1 a été analysée au sein du laboratoire de l'Université Laval au Canada selon deux normes du Bureau de Normalisation du Québec (BNQ) :

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

La méthode prescrite par la norme BNQ 2501-025 repose sur un tamisage mécanique à sec, réalisé avec une série de tamis normalisés conformes aux spécifications de la norme ASTM E11.

Pour les granulats fins, les tamis utilisés sont généralement de tailles allant de 5 mm à 80 μm . L'échantillon est tout d'abord séché à l'étuve à 110 ± 5 °C jusqu'à masse constante, puis tamisé mécaniquement pendant une durée déterminée. La masse de matériau retenue sur chaque tamis est ensuite pesée avec précision, ce qui permet de calculer le pourcentage cumulé passant ou retenu.

L'essai a été réalisé à l'aide d'un système de tamisage Ro-Tap, appareil électromécanique reproduisant une double action de vibration horizontale et de choc vertical. Ce dispositif permet un tamisage plus efficace des particules, en particulier pour les granulats à texture anguleuse ou à forme irrégulière, comme c'est le cas des sables recyclés. La durée de tamisage est de 7 minutes. À l'issue de l'essai, la masse de matériau retenue sur chaque tamis est pesée et utilisée pour établir une courbe de distribution granulométrique.



Figure 2.5 – Système de tamisage Ro-Tap

La norme BNQ 2501-025 insiste par ailleurs sur une préparation rigoureuse de l'échantillon, incluant éventuellement des opérations de réduction de taille (fractionnement par cône et quartage) afin de garantir la représentativité du sous-échantillon analysé.

Le graphique ci-dessous présente les quatre courbes issues des essais de granulométrie réalisés sur le sable recyclé RS1.

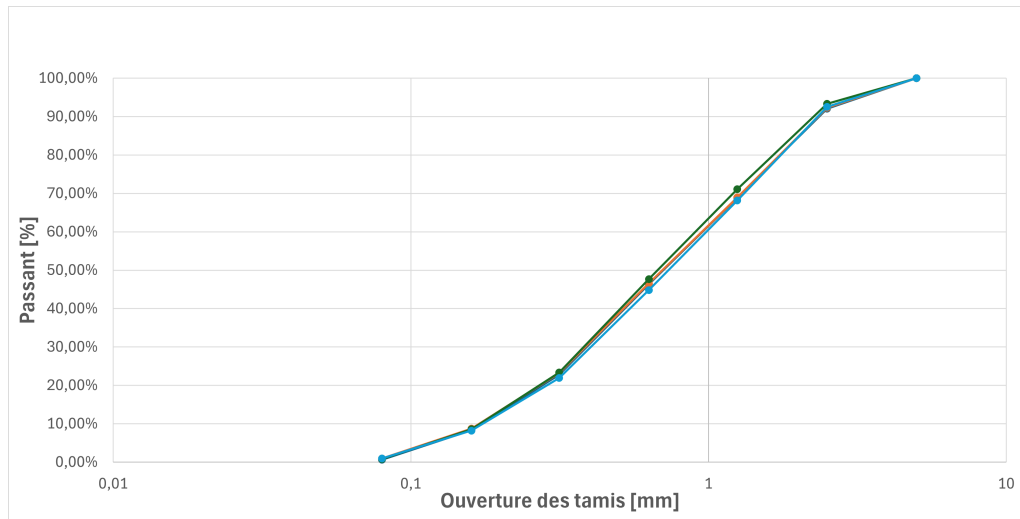


Figure 2.6 – Granulométrie du sable recyclé (RS1)

En moyenne, le pourcentage de fines obtenu suite à la granulométrie du RS1 est de 7,79 %.

2.3.3 Sable Recyclé (RS2)

L'analyse du sable RS2 a été réalisée en Belgique conformément à la norme NBN EN 933-1, intitulée "*Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la distribution granulométrique – Tamisage à sec*". Cette norme européenne s'appuie sur un tamisage mécanique à sec avec des tamis conformes à la norme ISO 3310-1, couvrant généralement une gamme d'ouvertures de 4 mm à 63 μm pour les sables.

Comme dans la procédure BNQ, l'échantillon est d'abord séché à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante, puis introduit dans un tamiseur vibrant durant une période standardisée (généralement 2 à 5 minutes, ajustée selon la nature du matériau). Chaque fraction retenue est pesée avec précision, permettant l'établissement de la courbe granulométrique.

Sur le graphique ci-dessous, nous pouvons observer trois courbes différentes qui correspondent aux trois essais de granulométrie effectués sur le sable recyclé RS2.

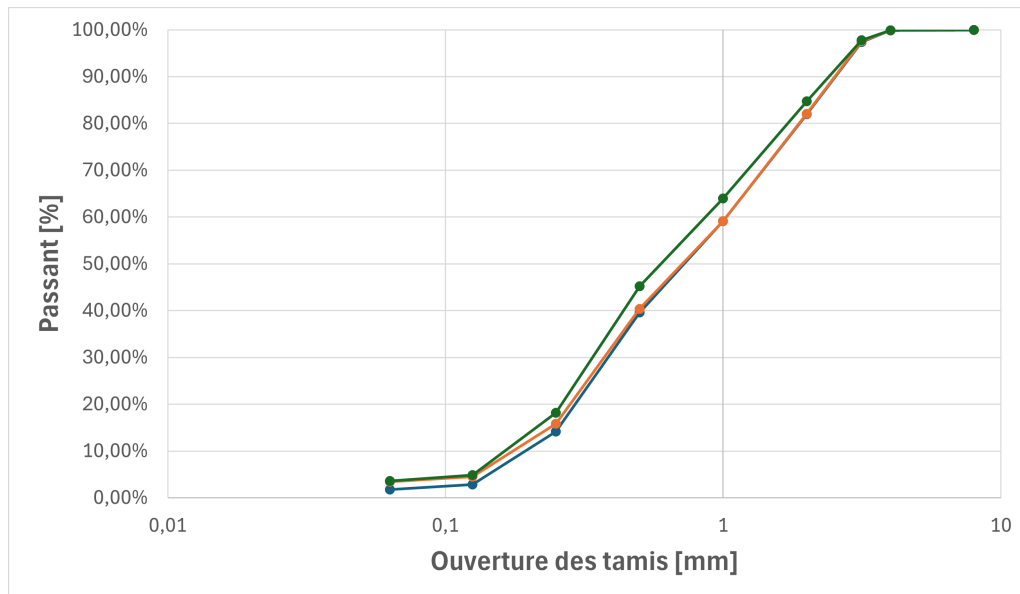


Figure 2.7 – Granulométrie du sable recyclé (RS2)

En moyenne, le pourcentage de fines obtenu suite à la granulométrie du RS2 est de 3,44 %.

2.3.4 Comparaison des granulométries

Afin de confronter directement les profils granulométriques des différents sables étudiés, le graphique ci-dessous illustre la distribution cumulée des particules en fonction de l'ouverture des tamis, sur une échelle logarithmique. Cette représentation permet de visualiser rapidement les divergences de répartition entre le sable naturel (NS) et les deux sables recyclés (RS1 et RS2).

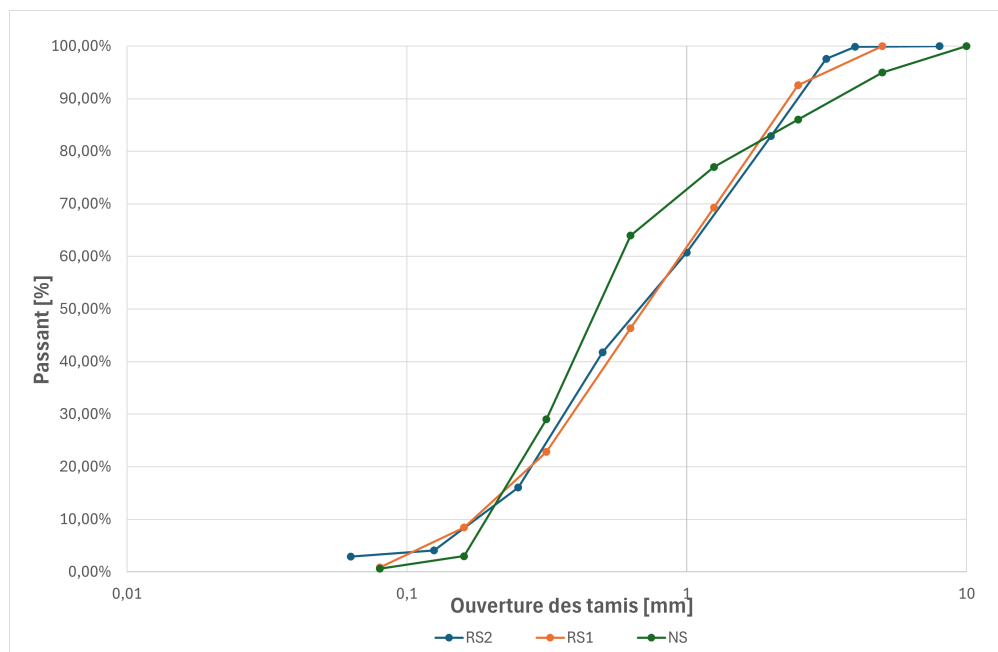


Figure 2.8 – Comparaison granulométrique des sables NS, RS1 et RS2

Le graphique présenté ci-dessus illustre les courbes granulométriques moyennes obtenues à partir des différents essais réalisés sur chacun des sables étudiés.

Les résultats détaillés des analyses granulométriques des différents sables sont présentés dans les tableaux suivants. Les distributions obtenues montrent que les courbes restent relativement proches les unes des autres, indiquant que les écarts granulométriques entre les sables étudiés ne sont pas très marqués.

Ouverture Tamis [mm]	Passant [%]
10	100
5	95
2,5	86
1,25	77
0,63	64
0,315	29
0,16	3
0,08	0,6

Tableau 2.1 – Valeurs Granulométrie NS

Ouverture Tamis [mm]	Passant [%]
5	100
2,5	92,55
1,25	69,27
0,63	46,33
0,315	22,82
0,16	8,47
0,08	0,85
0	0,02

Tableau 2.2 – Valeurs Granulométrie RS1

Ouverture Tamis [mm]	Passant [%]
8	100
4	99,88
3,15	97,57
2	82,92
1	60,74
0,5	41,76
0,25	16,05
0,125	4,07
0,063	2,92
0	2,82

Tableau 2.3 – Valeurs Granulométrie RS2

2.4 Absorption d'eau des différents sables

L'absorption d'eau des sables utilisés dans le cadre de cette étude a été évaluée selon deux protocoles normalisés distincts, adaptés aux spécificités de chaque type de matériau et à leur contexte d'origine.

Cette caractérisation vise à quantifier la capacité des grains à retenir l'eau dans leurs pores, un paramètre essentiel dans le cas des sables recyclés souvent plus poreux et irréguliers. L'absorption d'eau influence directement le bilan hydrique du mortier, affectant le rapport eau/ciment effectif, la maniabilité à l'état frais, ainsi que le développement des propriétés mécaniques et la durabilité à long terme.

À ce titre, la mesure de l'absorption n'est pas une simple donnée physique : elle constitue un indicateur critique de la qualité et de la stabilité du matériau granulaire, en particulier lorsqu'il s'agit de substituer des granulats naturels par des granulats issus du recyclage.

2.4.1 Protocole appliqué aux sables NS et RS1

L'absorption d'eau des sables NS et RS1 a été déterminée selon la norme BNQ 2560-065, qui spécifie la méthode de caractérisation du granulat fin à l'état saturé et superficiellement sec (SSS). Cette norme vise à obtenir la densité brute, la densité apparente, et le taux d'absorption d'eau après 24 heures d'immersion. Ces paramètres sont indispensables à la formulation rationnelle des mélanges cimentaires, car ils conditionnent la précision du bilan hydrique et volumétrique du mortier.

Étapes de la procédure expérimentale

1. Mise en trempage du sable :

Un échantillon de 1000 g de sable sec est placé dans un récipient métallique, puis recouvert d'eau à 23 °C de manière à immerger complètement les grains. Cette étape permet l'ouverture progressive des pores accessibles à l'eau.



Figure 2.9 – Immersion du sable pendant 24 heures

2. Trempage pendant 24 heures :

L'échantillon reste immergé pendant 24 heures afin de garantir une saturation complète. Passé ce délai, l'excès d'eau libre est éliminé délicatement par décantation ou égouttage.

3. Préparation de l'échantillon à l'état SSS :

Après égouttage, le sable est séché en surface à l'aide d'un sèche-cheveux, afin d'atteindre l'état dit « saturé et superficiellement sec » (SSS).

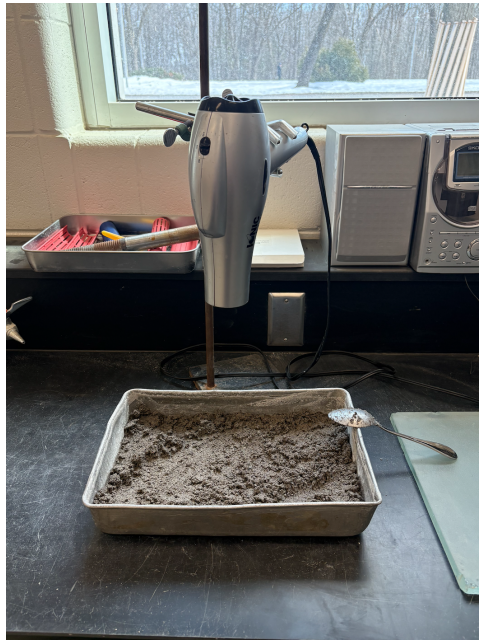


Figure 2.10 – Système de séchage pour atteindre l'état SSS

4. Vérification de l'état SSS — Méthode du cône tronqué :

Pour s'assurer de l'atteinte correcte de l'état SSS, on utilise un petit cône tronqué. Une petite quantité de sable est versée dans le cône, puis 25 coups de tige sont appliqués à environ 1 cm sous la surface du sable.

On retire ensuite verticalement le cône.

- Si le cône de sable s'affaisse légèrement, le sable est considéré à l'état SSS.
- Si le cône conserve sa forme intacte, cela indique encore la présence d'eau libre : le séchage doit alors se poursuivre.

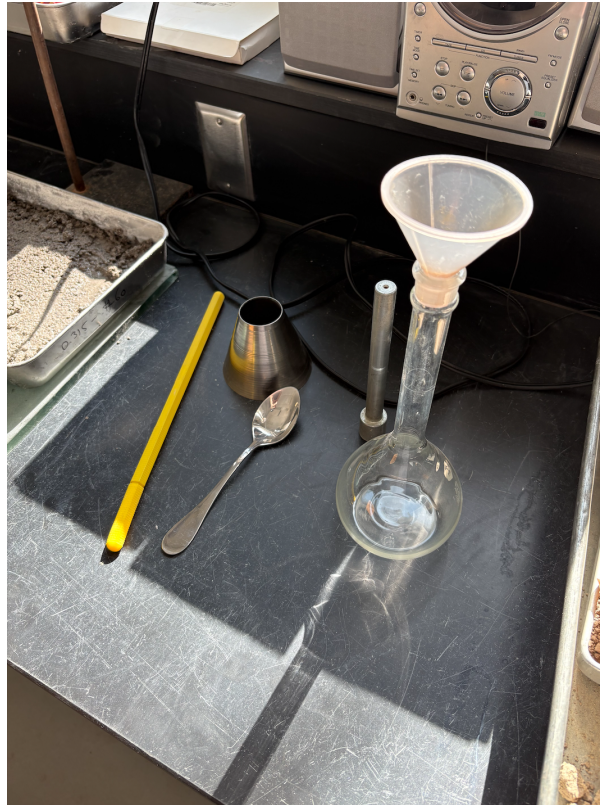


Figure 2.11 – Matériel utilisé pour l'essai

5. Préparation du pycnomètre :

Une fois l'état SSS atteint, on prélève 500 g de sable ± 2 g que l'on introduit à l'aide d'un entonnoir dans un pycnomètre de 500 mL propre et sec.

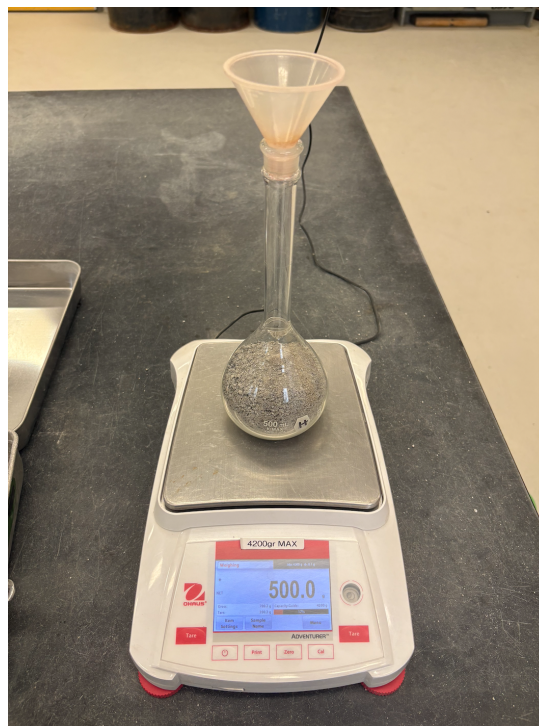


Figure 2.12 – Préparation du pycnomètre avec le sable à l'état SSS

6. Remplissage partiel et dégazage :

Le pycnomètre est ensuite rempli aux 2/3 avec de l'eau à 23 ± 2 °C, puis agité doucement pour favoriser la remontée et l'élimination des bulles d'air piégées entre les grains.

7. Remplissage jusqu'au ménisque :

Après élimination des bulles d'air, on complète le remplissage jusqu'au ménisque supérieur, en respectant rigoureusement le niveau de jauge.

8. Nettoyage externe pour la pesée :

Le bord interne au-dessus de la jauge et toute la surface externe du pycnomètre sont soigneusement essuyés avec un linge propre, afin d'éliminer toute trace d'humidité avant la pesée. Cette précaution garantit la précision de la mesure de la masse totale du système.

9. Séchage de l'échantillon :

Le contenu du pycnomètre est ensuite versé dans un récipient métallique, puis séché à l'étuve à 110 ± 5 °C pendant 24 h. Cela permet de récupérer l'échantillon à l'état sec pour établir la masse sèche réelle.

10. Pesée finale :

Deux pesées sont réalisées :

- celle du récipient métallique vide,
- puis celle du récipient métallique contenant le sable sec après étuvage, afin de retrouver la masse sèche de l'échantillon.

Calculs

Les données expérimentales recueillies permettent de déterminer l'absorption d'eau (%) :

$$\text{Absorption} = \left(\frac{500 - A}{A} \right) \cdot 100$$

où A désigne la masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve.

Résultats

Les mesures d'absorption d'eau réalisées conformément à la norme BNQ 2560-065 ont mis en évidence des différences significatives entre les deux types de sable étudiés.

Le sable naturel (NS) présente une absorption d'eau faible, de l'ordre de 0,65 %, ce qui est conforme aux valeurs attendues pour un granulat fin de qualité naturelle, caractérisé par une porosité interne limitée.

En revanche, le sable recyclé de première génération (RS1) affiche une absorption beaucoup plus élevée, atteignant 12,5 %. Cette valeur reflète la nature plus poreuse et hétérogène du matériau recyclé, incluant des fragments de mortier ancien et des particules fines poreuses, qui favorisent une capacité d'imbibition d'eau nettement supérieure.

Ces résultats soulignent l'impact majeur de l'utilisation de sables recyclés sur la gestion de l'eau dans les formulations de mortiers, en particulier sur la prise en compte de l'eau absorbée qui ne participe pas à l'hydratation du liant mais influence la maniabilité et la durabilité des mélanges.

2.4.2 Protocole appliqué au sable RS2

L'essai visant à déterminer l'absorption d'eau du sable recyclé RS2 a été réalisé au sein du laboratoire de l'Université de Liège (GeMMe).

L'essai a été réalisé conformément à la norme EN 1097-6 afin de déterminer la masse volumique apparente et l'absorption d'eau du sable recyclé RS2 à l'aide d'un pycnomètre. Un échantillon représentatif de sable a tout d'abord été prélevé, puis séché à l'étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante, définie comme une variation inférieure ou égale à 0,1 % entre deux pesées consécutives espacées de 24 heures. Après séchage, l'échantillon a été refroidi à température ambiante dans un dessiccateur pour éviter toute réabsorption d'humidité.

Le sable sec a ensuite été immergé dans de l'eau à température ambiante pendant une durée de 24 heures afin d'assurer sa saturation complète.

Après trempage, le sable a été amené à l'état SSS, de la même manière qu'expliqué précédemment, à l'aide d'un système de sèche-cheveux générant un courant d'air chaud. 2.10

Le pycnomètre propre et sec a d'abord été pesé vide (M_1). Il a ensuite été rempli avec le sable à l'état SSS, complété d'eau déminéralisée jusqu'au repère, en veillant à éliminer toute bulle d'air par agitation douce. L'ensemble a été essuyé et pesé (M_2). Une troisième pesée a été effectuée après le remplissage complet du pycnomètre uniquement avec de l'eau déminéralisée (M_3). Enfin, la masse de l'échantillon sec à l'étuve a été déterminée séparément (M_4).

Les résultats obtenus ont permis de déterminer la valeur en pourcentage de l'absorption d'eau du sable recyclé RS2. La valeur pour ce sable est de 5,88%.

2.5 Procédure pour les mortiers

La méthode de fabrication des mortiers s'est globalement alignée sur les prescriptions de la norme CSA-A23.2-2C-04, qui encadre les protocoles de préparation des mélanges cimentaires en laboratoire.

Toutefois, en raison de la granulométrie étendue des sables utilisés (0/4 mm), non compatible avec les capacités des malaxeurs mécaniques disponibles (Hobart) - initialement conçus pour des sables de type 0/2 mm -, une modification de la procédure a été nécessaire.

Le malaxage a ainsi été réalisé manuellement à l'aide d'un malaxeur à bras, permettant d'assurer une répartition homogène des constituants tout en maîtrisant les temps et séquences de mélange. Cette adaptation a permis de maintenir la cohérence des conditions de fabrication entre les différentes séries d'éprouvettes, tout en respectant les ratios de formulation définis dans le protocole expérimental.

Les différentes étapes de la procédure de malaxage sont les suivantes :

1. Préparation des matériaux et du matériel
2. Incorporer les matériaux secs dans un seau (sable + liants)
3. Malaxer les matériaux secs pendant 2 minutes pour homogénéiser le tout
4. Ajouter la quantité d'eau correspondante
5. Malaxer le mélange pendant 5 minutes



Figure 2.13 – Malaxeur à bras utilisé

2.6 Essais sur le mortier frais

L'essai d'étalement a été réalisé conformément à la norme ASTM C1437, en utilisant une table conforme à la spécification ASTM C230/C230M. Cette dernière définit les exigences dimensionnelles et fonctionnelles de la table d'essai, qui doit présenter une surface circulaire de 254 ± 2 mm de diamètre, montée sur un axe vertical. Le mécanisme de secousses permet de soulever et relâcher la table d'une hauteur de 12,5 mm. La table doit être fabriquée à partir de matériaux rigides et non absorbants, et être capable de résister à des cycles répétés sans déformation.

La procédure suivie, telle que décrite par la norme ASTM C1437, consiste à déposer le moule cylindrique (avec un diamètre de 100 mm à la base, 70 mm au sommet et une hauteur de 50 mm) au centre de la table propre et sèche. Une première couche de mortier frais est introduite jusqu'à une hauteur d'environ 25 mm, puis compactée manuellement à l'aide d'un bourroir par 20 coups appliqués avec une pression modérée pour assurer un remplissage homogène. Une seconde couche est ensuite ajoutée, compactée de la même manière, puis nivelée à ras du moule à l'aide d'une spatule ou d'une règle. Après avoir soigneusement nettoyé la surface de la table et le pourtour du moule, ce dernier est retiré verticalement une minute après la fin du malaxage. L'étalement du mortier est alors provoqué par 25 chutes successives de la table en 15 secondes. Le diamètre final du mortier étalé est mesuré selon deux axes perpendiculaires, et la moyenne de ces mesures constitue la valeur d'étalement.



Figure 2.14 – Table à secousse manuelle

2.7 Détermination du rapport E/L et de la consistance

Dans le cadre de cette étude, la détermination du rapport eau/liant (E/L) s'est révélée être une étape préliminaire cruciale avant l'élaboration des formules définitives des mortiers.

Cette démarche visait à assurer une cohérence expérimentale, la consistance jouant un rôle déterminant tant dans la mise en œuvre que dans l'évolution des propriétés mécaniques et durables des matériaux.

Des gâchées de mortier préliminaires ont ainsi été réalisées afin d'identifier, dans la mesure du possible, un rapport E/L unique pouvant être appliqué à l'ensemble des compositions. Toutefois, les résultats ont rapidement mis en lumière les limites de cette approche. Les mélanges incorporant des sables recyclés se sont révélés plus sensibles aux variations d'humidité, en raison notamment de leur structure poreuse, de leur forme plus angulaire et d'une absorption d'eau significativement plus élevée que celle observée pour le sable naturel. Ces facteurs ont conduit à des comportements rhéologiques divergents, rendant difficile, voire inadaptée, l'application d'un rapport E/L unique à tous les mélanges.

Dès lors, il a été jugé plus pertinent d'ajuster le rapport E/L individuellement, en fonction de la nature du sable utilisé, dans le but d'obtenir une consistance finale visuellement et mécaniquement comparable. Cette consistance a été évaluée selon la méthode expliquée à la section précédente 2.6.

Pour finir, après une série d'essais, les rapports E/L choisis sont :

- Mélanges 100% NS : Rapport E/L = 0,5
- Mélanges 50-50% NS - RS1/RS2 : Rapport E/L = 0,55
- Mélanges 100% RS1/RS2 : Rapport E/L = 0,6

La consistance des différents mélanges se situe dans une fourchette allant de 195 à 205 mm.

2.8 Descriptions des mélanges finaux réalisés

Cette sous-section présente les quantités de matériaux mises en œuvre pour la formulation des mélanges finaux, ainsi que les valeurs de consistance associées. Ces compositions résultent d'une phase d'optimisation préalable, ayant permis de définir les proportions adéquates des différents constituants en fonction des exigences de mise en œuvre et de performance. Les mélanges ainsi définis ont été utilisés pour la fabrication des éprouvettes d'essai (barrettes, cubes et cylindres) dans le cadre des différentes campagnes de caractérisation.

Mélanges	NS	RS1	RS2	NS+RS1	NS+RS2
Rapport E/L	0,5	0,6	0,6	0,55	0,55
Masse Sable NS [kg]	5	-	-	2,5	2,5
Masse Sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5	-
Masse Sable RS2 [kg]	-	-	5	-	2,5
Masse Ciment GU [kg]	1,667	1,667	1,667	1,667	1,667
Volume d'eau [mL]	833,5	1000	1000	916,85	916,85
Absorption d'eau [mL]	32,5	625	294	328,75	163,25
Consistance [mm]	200, 205	195, 200	200	195	195

Tableau 2.4 – Mélanges finaux sans agent expansif

Mélanges	NS typeK	RS1 typeK	RS2 typeK	NS+RS1 typeK	NS+RS2 typeK
Rapport E/L	0,5	0,6	0,6	0,55	0,55
Masse Sable NS [kg]	5	-	-	2,5	2,5
Masse Sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5	-
Masse Sable RS2 [kg]	-	-	5	-	2,5
Masse Ciment GU [kg]	1,417	1,417	1,417	1,417	1,417
Masse Agent typeK [kg]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Volume d'eau [mL]	833,5	1000	1000	916,85	916,85
Absorption d'eau [mL]	32,5	625	294	328,75	163,25
Consistance [mm]	200	195	200	195	200

Tableau 2.5 – Mélanges finaux avec agent expansif de type K

Mélanges	NS typeG	RS1 typeG	RS2 typeG	NS+RS1 typeG	NS+RS2 typeG
Rapport E/L	0,5	0,6	0,6	0,55	0,55
Masse Sable NS [kg]	5	-	-	2,5	2,5
Masse Sable RS1 [kg]	-	5	-	2,5	-
Masse Sable RS2 [kg]	-	-	5	-	2,5
Masse Ciment GU [kg]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Masse Agent typeG [kg]	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
Volume d'eau [mL]	833,5	1000	1000	916,85	916,85
Absorption d'eau [mL]	32,5	625	294	328,75	163,25
Consistance [mm]	200	195, 200	200, 205	200, 205	200, 205

Tableau 2.6 – Mélanges finaux avec agent expansif de type G

2.9 Essais de caractérisation mécanique

Dans le but de quantifier les performances mécaniques des différents mélanges, des essais ont été réalisés pour déterminer la résistance en compression ainsi que la résistance à la traction indirecte par fendage.

Ces essais ont été respectivement effectués conformément aux normes ASTM C109 et ASTM C496. Ils constituent une étape essentielle dans l'évaluation du comportement des mortiers durcis, en fournissant des indicateurs clés sur leur capacité à répondre aux sollicitations mécaniques.

2.9.1 Résistance à la compression

L'évaluation de la résistance à la compression des mortiers a été réalisée conformément à la norme ASTM C109, intitulée : "*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens)*". Cette dernière décrit une méthode standardisée pour déterminer la résistance en compression de mortiers à base de ciment hydraulique, en utilisant des éprouvettes cubiques de dimensions 50 mm × 50 mm × 50 mm.

Cette méthode prévoit la préparation d'un mortier de composition définie, mélangeant du ciment, du sable et de l'eau selon un rapport de mélange prescrit.

Avant le coulage du mortier, une attention particulière est portée à la préparation des moules. Ceux-ci doivent être propres, exempts de résidus de mortier ou de poussière, et rigides afin de garantir des arêtes nettes et une géométrie conforme. Une fine couche d'huile de décoffrage est appliquée sur les parois internes des moules afin de faciliter le démoulage après durcissement initial, sans altérer les arêtes ou la texture de surface des éprouvettes. Cette étape est essentielle pour éviter les défauts de surface qui pourraient nuire à la précision de la mesure de la résistance.

Le coulage du mortier dans les moules se fait en deux couches successives, chacune étant compactée selon un ordre précis de piquage (Order of Tamping), prescrit par la norme. Ce compactage est réalisé manuellement à l'aide d'une tige standard. Enfin, les moules peuvent être vibrés mécaniquement afin d'éliminer les bulles d'air et d'assurer une densité uniforme.

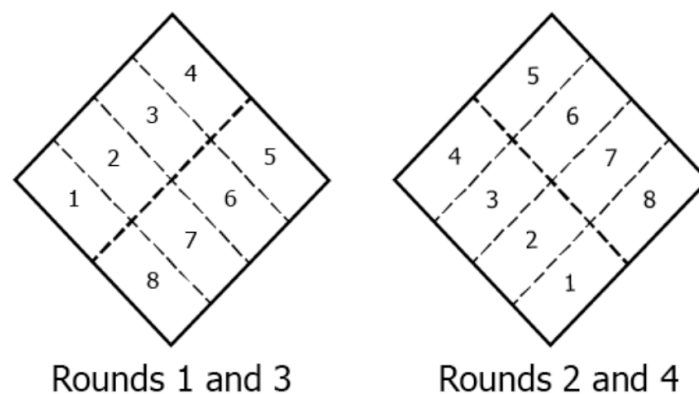


Figure 2.15 – Ordre de compactage lors du moulage des éprouvettes d'essai.

Après le moulage, les éprouvettes sont immédiatement recouvertes d'un tissu humide, puis enveloppées d'un film plastique afin de limiter l'évaporation de l'eau de gâchage. Cette précaution garantit des conditions d'humidité optimales durant la phase initiale de durcissement, assurant une hydratation uniforme du liant en surface comme en profondeur et réduisant les risques de retrait plastique ou de fissuration prématurée. Une fois démoulés, les cubes de mortier sont ensuite placés

dans une chambre humide, où ils sont conservés jusqu'aux échéances prévues pour les essais de résistance, soit 7 ou 28 jours.

L'essai de compression consiste à soumettre les cubes à une charge axiale croissante à l'aide d'une presse hydraulique conforme aux exigences de la norme. La résistance à la compression est calculée en divisant la charge maximale enregistrée par la surface de la section de l'éprouvette, et exprimée en mégapascals (MPa).



Figure 2.16 – Machine d'essai de résistance en compression (INSTRON)

2.9.2 Résistance à la traction indirecte par fendage

La norme ASTM C496/C496M, intitulée : "*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*", définit la méthode d'essai permettant de déterminer la résistance à la traction indirecte des matériaux cimentaires, à travers un essai communément appelé essai de fendage (ou essai brésilien).

Ce protocole consiste à soumettre un cylindre à une charge de compression diamétrale, ce qui induit des contraintes de traction perpendiculaires à l'axe de l'effort appliqué. La rupture se produit généralement selon un plan diamétral vertical, révélant ainsi le comportement en traction du matériau.

Dans le cadre de cette étude, des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur ont été utilisées. Ce format, qui respecte un rapport hauteur/diamètre de 2 :1, est conforme à la norme ASTM C496, qui recommande des rapports compris entre 1.8 et 2.2 pour éviter des effets de flambement ou des concentrations de contraintes non représentatives. Ces dimensions permettent d'assurer une homogénéité suffisante du matériau tout en facilitant la manipulation et l'essai en laboratoire.

La préparation des échantillons débute par l'application d'une fine huile de décoffrage sur les parois

internes des moules afin de faciliter le démoulage après durcissement initial des échantillons d'essai. Ensuite, le moulage est réalisé dans ces cylindres rigides, en veillant à un compactage homogène à l'aide d'une longue tige afin de limiter la présence de bulles d'air, susceptibles d'altérer les résultats.

Après démoulage, les éprouvettes sont soumises à une phase de cure humide jusqu'à l'âge d'essai (28 jours). Cette étape est essentielle pour garantir une hydratation complète des liants et des conditions mécaniques reproductibles.

Avant l'essai, les faces du cylindre doivent être parfaitement planes et perpendiculaires à l'axe longitudinal. Le cas échéant, un surfacage mécanique ou l'utilisation de disques abrasifs peut être nécessaire afin d'éviter toute concentration anormale de contraintes lors de l'application de la charge.

Lors de l'essai, le cylindre est placé horizontalement entre deux bandes de chargement souples (en carton) qui permettent une répartition uniforme des charges et réduisent les effets de poinçonnement. Une charge croissante est appliquée à l'aide d'une presse de compression, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La résistance à la traction est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante :

$$T = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

où T représente la résistance à la traction par fendage [MPa], P la charge maximale à la rupture [N], L la longueur du cylindre [mm] et D son diamètre [mm].

Sur le plan critique, il convient de rappeler que cette méthode fournit une mesure indirecte de la traction, fondée sur des hypothèses idéalisées de distribution des contraintes. Elle est sensible à divers facteurs expérimentaux, tels que l'alignement de l'éprouvette, l'uniformité du matériau ou encore la qualité du surfacage. Dans le cas de petits cylindres de 50 mm de diamètre, l'essai reste pertinent mais peut accentuer certains effets d'échelle ou de dispersion statistique. Toutefois, si les conditions de préparation sont rigoureusement contrôlées, la norme ASTM C496 constitue un outil fiable pour l'évaluation comparative de la cohésion et du comportement en traction de mélanges cimentaires.



Figure 2.17 – Dispositif utilisé pour l'essai de fendage

La photographie présentée illustre le dispositif expérimental utilisé pour l'essai de traction indirecte par fendage, conformément à la norme ASTM C496. On y observe un cylindre de mortier de dimensions 50×100 mm positionné horizontalement dans un système de maintien métallique spécialement conçu pour garantir un alignement précis et stable. Ce montage comprend deux éléments rigides assurant une application linéaire et uniforme de la charge. Le tout est placé entre les plateaux d'une presse de compression instrumentée, permettant l'enregistrement précis de la charge appliquée jusqu'à la rupture du spécimen. Ce type de configuration vise à reproduire les conditions d'essai normalisées tout en assurant une répartition homogène des contraintes de traction dans le matériau.

2.10 Détermination du retrait libre

L'évaluation de la variation dimensionnelle des matériaux cimentaires durcis au cours du temps constitue une étape essentielle dans l'analyse de leur stabilité dimensionnelle et de leur durabilité.

Le retrait libre est un phénomène lié à la perte d'eau, à l'hydratation et aux processus internes de réorganisation microstructurale du mortier. Lorsqu'il est mal contrôlé, ce retrait peut conduire à des fissurations précoces susceptibles de compromettre la performance mécanique ou la durabilité à long terme des éléments en mortier.

Dans ce contexte, l'essai de retrait libre a été réalisé conformément à la norme ASTM C157, *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*, qui fournit une méthodologie standardisée pour quantifier la variation de longueur d'éprouvettes prismatiques soumises à un environnement de séchage contrôlé.

2.10.1 Description du dispositif expérimental

L'essai repose sur la mesure périodique de la longueur longitudinale d'éprouvettes prismatiques de dimensions 25 x 25 x 285 mm, conformément aux spécifications de la norme ASTM C157. Ces dimensions sont adaptées à l'analyse du retrait des mortiers, offrant un bon compromis entre finesse de mesure et représentativité du comportement volumétrique du matériau. Ces dimensions ont également été retenues en raison de la quantité limitée de RS2 disponible pour les essais. L'utilisation de petites éprouvettes permettait ainsi d'optimiser les volumes de matériaux nécessaires, tout en respectant les exigences normatives pour l'évaluation du retrait.

Il est important de rappeler que le retrait des matériaux cimentaires se manifeste dans les trois directions de l'espace. Toutefois, dans le cas des éprouvettes prismatiques utilisées, la déformation longitudinale constitue la composante principale du retrait libre, tant en raison de son amplitude que de sa faisabilité de mesure. Cette orientation est privilégiée car la longueur des barrettes (285 mm) est significativement plus grande que leur section carrée (25 x 25 mm), ce qui permet de capter des variations dimensionnelles plus marquées et donc plus représentatives du comportement du matériau.

La mesure du retrait est ainsi réalisée uniquement dans cette direction, à l'aide d'un comparateur de longueur. Les comparateurs de longueur se composent de trois éléments principaux :

- une base avec un cadre vertical muni d'une borne et d'un collier réglables,
- un indicateur (mécanique ou numérique) de haute précision monté sur bras mobile,
- une barre de référence en Invar, usinée avec une grande précision, utilisée pour l'étalonnage du dispositif.

L'ensemble est conçu pour assurer une excellente stabilité et une parfaite précision des mesures.

À chaque extrémité des éprouvettes, un goujon de jauge (type H-3260) en acier inoxydable est inséré avant le coulage. Ces goujons servent de points de contact standardisés lors de la lecture au comparateur.



Figure 2.18 – Synoptique des goujons de jauge H-3260 utilisés

Avant chaque série de mesures, l'appareil est calibré à l'aide de cette tige de référence en Invar, dont la longueur constante est de 303,124 mm.

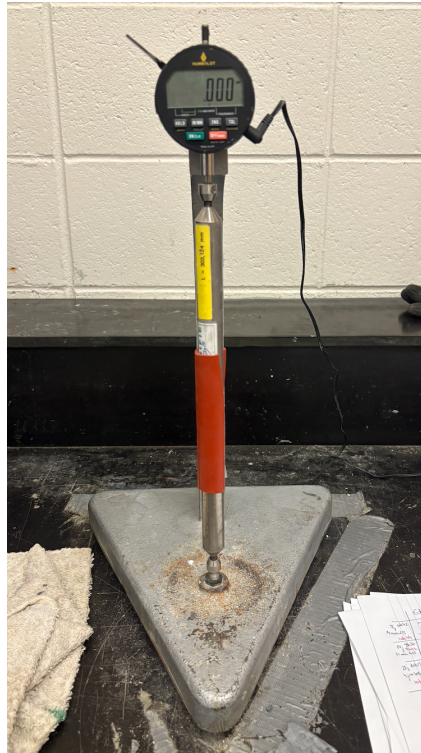


Figure 2.19 – Calibration du comparateur de longueur

Cette calibration, effectuée systématiquement avant chaque séance de mesure, permet de compenser d'éventuelles dérives mécaniques ou thermiques du dispositif. Lors de la lecture, chaque éprouvette est positionnée entre les deux enclumes (fixe et mobile) du comparateur, en appui sur ses goujons de jauge.

2.10.2 Préparation des moules

Les moules prismatiques rigides utilisés pour le moulage ont été préalablement nettoyés et enduits d'un agent de démoulage non réactif (huile), appliqué uniformément afin de faciliter l'extraction des éprouvettes sans endommager les arêtes. Les inserts métalliques ont été soigneusement fixés aux extrémités, centrés dans l'axe longitudinal. Une attention particulière a été portée à leur stabilité durant le moulage des barrettes.



Figure 2.20 – Photographie d'un moule utilisé

2.10.3 Moulage des éprouvettes

Le remplissage des moules a été réalisé en deux couches successives, chacune représentant environ la moitié du volume total. Chaque couche a été compactée manuellement à l'aide d'une tige afin de limiter les bulles d'air et d'assurer une densification homogène. La surface supérieure a ensuite été soigneusement arasée à l'aide d'une truelle métallique rigide pour obtenir une planéité optimale. Immédiatement après le moulage, les éprouvettes ont été recouvertes d'un drap humide et d'un film plastique hermétique, empêchant l'évaporation de l'eau durant la prise initiale.

2.10.4 Période de cure humide

Le démoulage des éprouvettes d'essai a été réalisé avec précaution, après un durcissement jugé suffisant : 24 heures pour les mélanges sans agents expansifs et 8 heures pour ceux contenant des agents expansifs, en raison de leur prise plus rapide. Malgré le soin apporté à cette étape délicate, quelques barrettes ont été endommagées ou cassées lors de l'extraction. Toutefois, le nombre de pertes est resté limité, ce qui a permis de conserver un ensemble d'échantillons représentatif pour l'ensemble des conditions d'essais.



Figure 2.21 – Éprouvettes d'essai cassées

Les éprouvettes ont ensuite été conservées pendant une période de sept jours à l'air libre dans une chambre humide maintenue à 100 % d'humidité relative et à une température de 23 ± 2 °C.

Cette période de cure en environnement humide a favorisé le développement des réactions d'hydratation du ciment, contribuant ainsi à limiter les risques de fissuration précoce liés au retrait plastique.

Des mesures de longueur et de masse ont été réalisées à des intervalles spécifiques pendant cette phase de cure, à savoir :

- directement après le démoulage (jour 0),
- puis aux jours 1, 3 et 7.

Chaque mesure visait à documenter l'évolution du retrait potentiel dès les premières étapes de durcissement du matériau, en suivant de manière précise les variations dimensionnelles et la masse des éprouvettes au cours du temps.

La combinaison de ces deux types de mesures permet également de mettre en évidence certains phénomènes transitoires, notamment l'augmentation de masse liée à l'absorption d'eau durant la cure humide, ainsi que l'expansion dimensionnelle observée dans les mélanges contenant des agents expansifs. Ce comportement est particulièrement marqué durant les premiers jours, lorsque les réactions d'hydratation générées par ces additifs induisent une pression interne suffisante pour provoquer un léger gonflement du matériau, phénomène accentué en environnement saturé.

2.10.5 Séchage et suivi du retrait

À l'issue des sept jours de cure humide, les éprouvettes ont été transférées dans une salle climatique contrôlée, régulée à une humidité relative de 50 ± 4 % et une température oscillant autour d'une valeur moyenne de 23 °C.

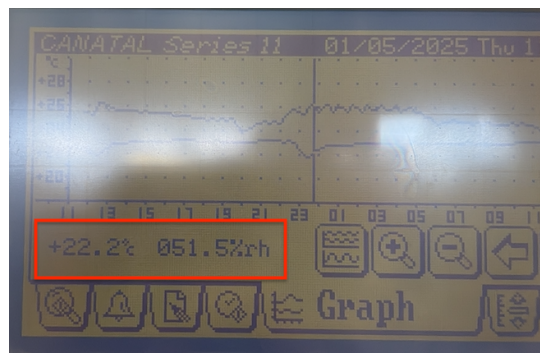


Figure 2.22 – Synoptique des propriétés de la salle climatique

Ces conditions ont été maintenues tout au long de la période de séchage afin de reproduire un environnement standardisé propice au développement du retrait de dessiccation.

Les éprouvettes d'essai ont été soumises à des campagnes de mesure à jours fixes : 1, 3, 7, 14 et 28 jours après le début de la phase de séchage.

Lors de chaque session, la longueur de chaque éprouvette a été mesurée avec le comparateur de longueur, après calibration avec la tige de référence, et la masse correspondante a été enregistrée avec une balance analytique. Cette double mesure permet de corréler la perte de masse (essentiellement due à l'évaporation de l'eau) à la contraction dimensionnelle du matériau.

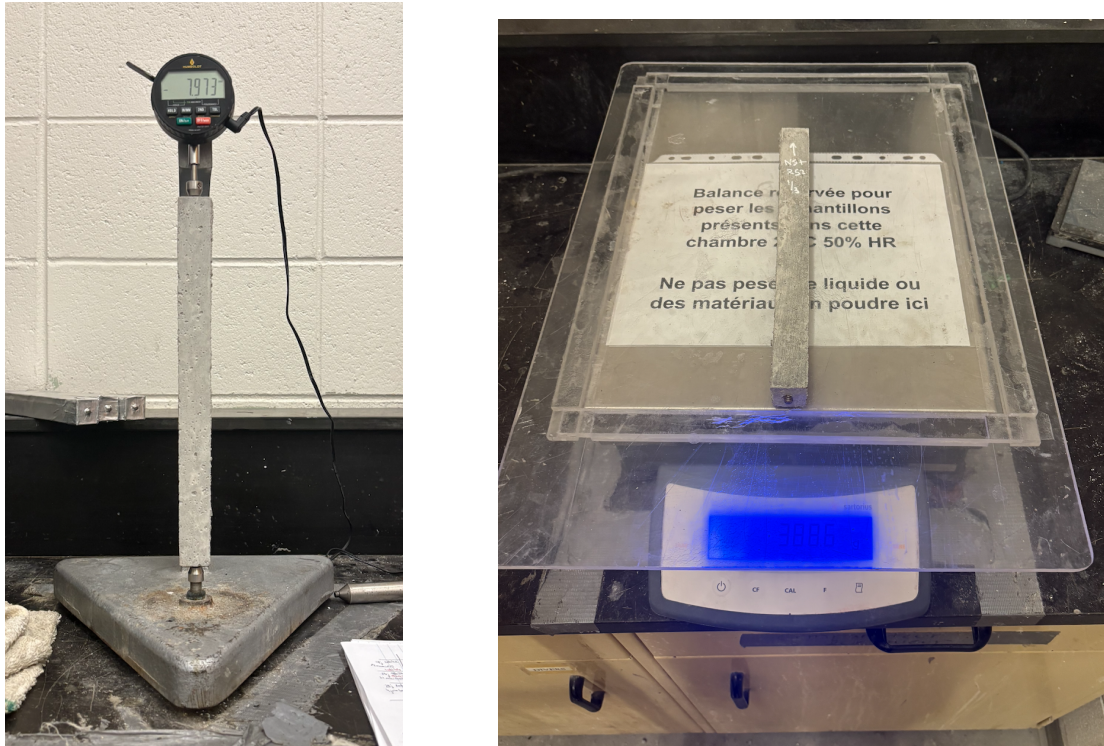


Figure 2.23 – Prise de mesures : retrait (gauche) ; masse (droite)

2.10.6 Conditionnement spécifique : barrettes scellées

En complément du suivi standard, une série d'éprouvettes a fait l'objet d'un conditionnement hermétique immédiatement après le démoulage, par application soignée de trois couches de ruban d'aluminium autocollant sur l'ensemble de leur surface.



Figure 2.24 – Pose de ruban d'aluminium autocollant

Ces éprouvettes ont ensuite été placées pendant sept jours dans la chambre humide, à l'intérieur de sachets hermétiques de type Ziploc, afin de maintenir une hydratation interne suffisante sans échange d'humidité avec l'extérieur.



Figure 2.25 – Disposition des éprouvettes d'essai dans la chambre humide

Après cette période, elles ont été transférées dans la même salle climatique que les autres, sans être déscellées, et mesurées aux mêmes échances. Ce protocole visait à isoler et quantifier le retrait autogène, c'est-à-dire la contraction liée uniquement aux mécanismes internes du matériau, en éliminant les effets de dessiccation externe.

2.10.7 Calcul du retrait

Le retrait libre a été calculé comme la variation de longueur rapportée à une longueur de référence normalisée de 250 mm, conformément à la norme ASTM C157. La formule utilisée est :

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

où :

- L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette après démoulage [mm],
- L_t est la longueur mesurée au temps t [mm],
- 250 mm correspond à la longueur de référence normalisée (gage length) selon la norme,
- le facteur 10^6 permet d'exprimer le résultat en micromètres par mètre.

Cette normalisation à 250 mm permet d'assurer la comparaison des résultats, même si la longueur réelle des éprouvettes utilisées est légèrement différente. Une valeur négative indique une contraction du matériau, tandis qu'une valeur positive correspond à une expansion.

Chapitre 3

Analyse des résultats

3.1 Analyse du retrait : barrettes non scellées

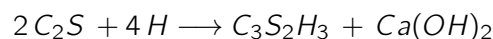
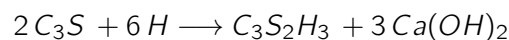
L'étude des variations dimensionnelles des éprouvettes d'essai en mortier a été menée sur les quinze formulations précédemment énoncées intégrant les différents types de sables - un sable naturel (NS) et deux sables recyclés (RS1 et RS2) - avec ou sans agents expansifs. Les éprouvettes prismatiques, de dimensions 25 x 25 x 285 mm, ont été soumises à une période de cure humide de 7 jours en chambre humide (échantillons à l'air libre, non immergés), suivie d'une période de séchage à l'air libre pendant 28 jours. Les mesures ont été réalisées sur les quatre faces de chaque barrette, puis moyennées pour obtenir une valeur représentative du retrait ou de l'expansion pour chaque mélange.

3.1.1 Comportement sans agent expansif

Sans incorporation d'agent expansif, l'ensemble des formulations présente une expansion initiale modérée après la période de cure humide de 7 jours, suivie d'un retrait important après la période de séchage de 28 jours. Cette tendance est cohérente avec les mécanismes d'hydratation et de dessiccation du ciment.

Ce comportement résulte principalement de deux phénomènes interdépendants :

- Expansion initiale due à l'hydratation des phases silicatées du ciment Portland, principalement le silicate tricalcique et le silicate dicalcique, selon les réactions suivantes :



Ces réactions génèrent la formation d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et d'hydroxyde de calcium, entraînant une légère dilatation liée à l'absorption d'eau par la pâte.

- Retrait ultérieur dominé par le retrait de dessiccation, qui correspond à la perte d'eau capillaire provoquant la réorganisation de la microstructure. Cela se traduit par le rapprochement des feuillets C-S-H et la fermeture des pores, induisant une contraction irréversible de la matrice.

Les mesures pour les formulations sans agents expansifs montrent :

- Mélange 100% NS : expansion initiale de $+89 \frac{\mu m}{m}$, retrait final de $-870 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 100% RS1 : Le RS1, caractérisé par une porosité ouverte élevée et une surface spécifique importante, absorbe plus d'eau au gâchage mais la restitue rapidement lors du séchage, ce qui entraîne un retrait final particulièrement important de l'ordre de $-2106,7 \frac{\mu m}{m}$. L'expansion initiale mesurée est aussi plus élevée, autour de $+337,3 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 100% RS2 : Le RS2, moins poreux que le RS1, présente une expansion initiale plus faible de l'ordre de $+120 \frac{\mu m}{m}$ et un retrait final moins marqué de l'ordre de $-1593,3 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélanges 50% NS et 50% RS : Les mélanges à substitution partielle (NS+RS1 ou NS+RS2) présentent des bilans intermédiaires. Par exemple, le mélange 50% NS - 50 % RS1 affiche une expansion initiale de $+204 \frac{\mu m}{m}$ et un retrait final de $-1468 \frac{\mu m}{m}$, tandis que le mélange 50% NS - 50% RS2 montre une expansion initiale de $+102,7 \frac{\mu m}{m}$ et un retrait final de $-1152 \frac{\mu m}{m}$. Ces résultats traduisent l'influence directe de la proportion de sable recyclé sur la cinétique de dessiccation et le bilan volumétrique.

Ainsi, pour tous les mélanges sans agents expansifs, le bilan volumétrique final est négatif, traduisant un retrait net de la matrice à l'issue des périodes de cure et de séchage.

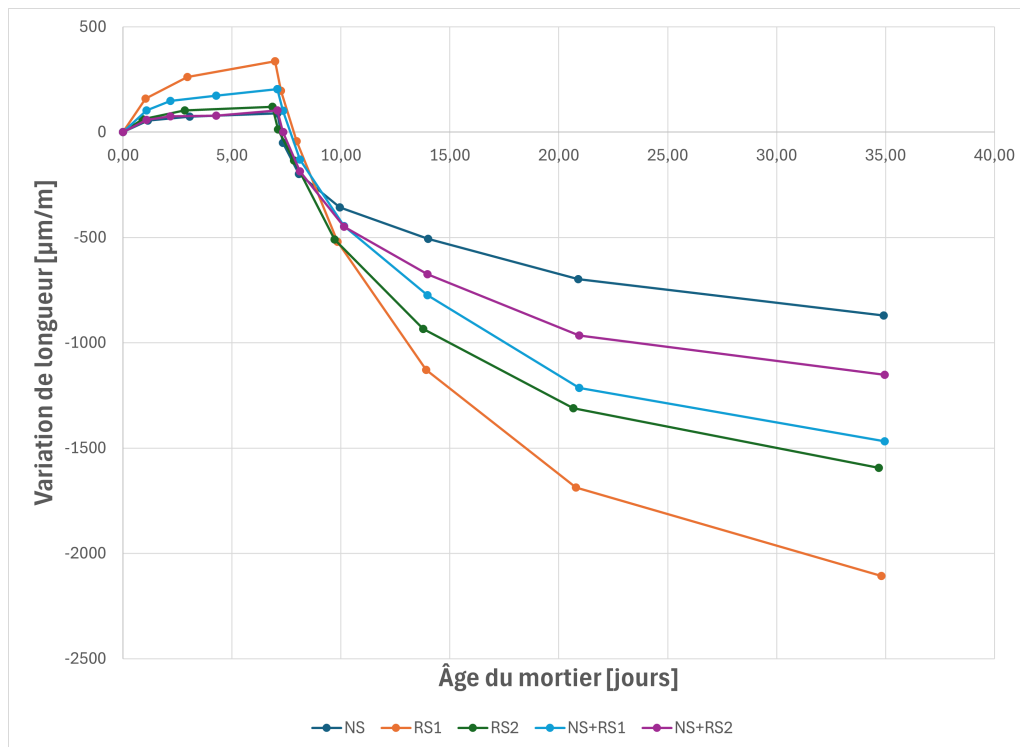


Figure 3.1 – Variations dimensionnelles des mélanges sans agents expansifs

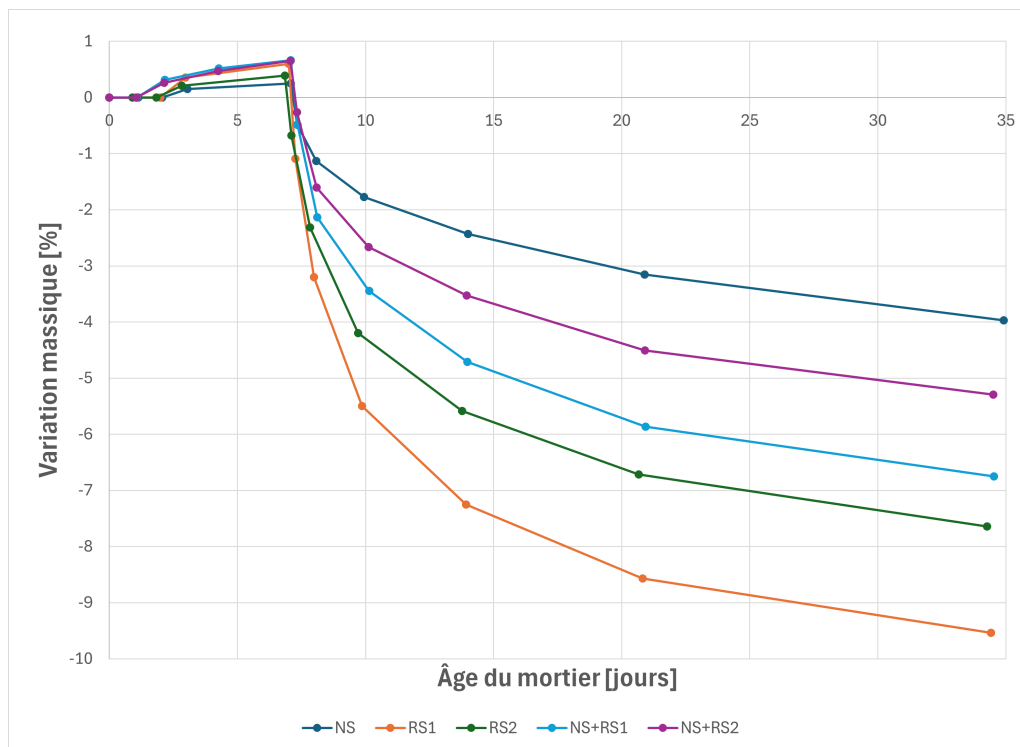


Figure 3.2 – Variations massiques des mélanges sans agents expansifs

L'examen simultané des variations massiques et dimensionnelles met clairement en évidence la corrélation entre perte hydrique et retrait des mortiers. Il convient toutefois de préciser que, pour les mesures de masse, les données correspondant aux jours 0 (immédiatement après démoulage) et 1 n'ont pas été relevées pour les mélanges NS, RS1 et RS2. De même, les données du jour 0 n'ont pas été enregistrées pour les mélanges NS+RS1 et NS+RS2. L'absence de ces points initiaux entraîne un léger biais dans l'estimation de l'ampleur exacte de la prise de masse en début de cure humide, mais n'empêche pas de dégager les tendances générales et d'évaluer qualitativement l'influence mutuelle entre variation massique et retrait.

Pendant la période de cure humide, les courbes révèlent une légère augmentation de masse, inférieure à 1 %, traduisant une absorption d'eau par capillarité très légère et la saturation progressive des pores accessibles. Cette évolution se manifeste également par des variations dimensionnelles légèrement positives, témoignant d'une dilatation modérée liée à l'hydratation en cours.

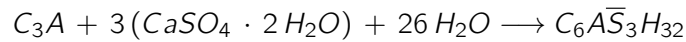
À partir du 7^e jour, le passage en phase de séchage à l'air libre induit une diminution marquée de la masse pour l'ensemble des formulations, conséquence de l'évaporation progressive de l'eau libre contenue dans les pores capillaires. Cette perte hydrique est accompagnée d'un retrait dimensionnel prononcé, visible dans la concordance des pentes descendantes sur les deux graphiques ci-dessus. Les différences d'amplitude entre formulations sont notables :

- RS1 présente la plus forte perte de masse (-9,53% à 35 jours) et le retrait le plus élevé ($-2106,7 \frac{\mu m}{m}$), confirmant que sa structure poreuse favorise à la fois la rétention initiale et l'évaporation ultérieure d'eau, amplifiant ainsi le retrait.
- RS2 et NS+RS1 montrent également des pertes massiques et des retraits importants, bien que moindres que RS1, reflétant une porosité et cinétique de séchage intermédiaires.
- NS et NS+RS2 conservent les pertes massiques et retraits les plus faibles, indiquant une structure moins propice aux évaporations rapides et donc à un retrait important.

Ces résultats confirment, même avec des données initiales incomplètes, que l'ampleur du retrait est étroitement liée à la quantité d'eau évaporée durant le séchage : plus la perte de masse est importante, plus la contraction dimensionnelle est marquée.

3.1.2 Effet de l'agent expansif de type K

L'agent expansif de Type K, riche en aluminates et sulfates, provoque la formation d'ettringite selon la réaction :



L'ettringite ainsi formée est une phase expansive constituée de cristaux aciculaires, dont le volume dépasse largement celui des réactifs solides initiaux, générant une expansion interne du matériau.

Dans nos conditions expérimentales, la cure à l'air libre dans la chambre humide limite la disponibilité en eau, freinant la formation complète et homogène d'ettringite.

Les résultats montrent, dans la plupart des cas, une augmentation modérée de l'expansion initiale ainsi qu'un retrait légèrement plus prononcé par rapport aux formulations sans agent :

- Mélange 100% NS Type K : expansion initiale de $+61,3 \frac{\mu m}{m}$, retrait final de $-1044 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 100% RS1 Type K : expansion initiale de $+606,7 \frac{\mu m}{m}$, retrait final de $-2116 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 100% RS2 Type K : expansion initiale de $+175,3 \frac{\mu m}{m}$, retrait final de $-1663 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 50% NS + 50% RS1 Type K : expansion initiale de $+342,7 \frac{\mu m}{m}$, retrait final de $-1622,7 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 50% NS + 50% RS2 Type K : expansion initiale de $+156 \frac{\mu m}{m}$, retrait final de $-1257,3 \frac{\mu m}{m}$.

Malgré cette expansion chimique réelle, l'agent de Type K ne compense pas entièrement le retrait lié au séchage.

L'expansion initiale observée dans les mortiers contenant un agent expansif de Type K, notamment lors de la formation d'ettringite pendant la phase de cure humide, n'est que partiellement conservée dans la durée. Plusieurs mécanismes physico-chimiques et microstructuraux expliquent cette dissipation partielle de l'expansion :

- Relaxation des contraintes internes : L'expansion générée par la croissance cristalline de l'ettringite exerce des contraintes dans la matrice cimentaire. Cependant, la matrice poreuse et hétérogène du mortier peut s'adapter en redistribuant localement ces contraintes. Cela se traduit par des micro-ajustements au niveau de la microstructure (glissement relatif des grains, légère microfissuration contrôlée), qui atténuent la manifestation macroscopique de l'expansion initiale sans compromettre l'intégrité structurelle globale du matériau.
- Limitation de la disponibilité en eau : La cure à l'air libre, contrairement à une immersion prolongée, restreint l'apport continu en eau nécessaire à la formation et à la croissance prolongée de l'ettringite. Cette limitation hydrique freine l'avancement complet des réactions expansives, réduisant ainsi le volume d'ettringite formé à terme.
- Effets conjoints de la dessiccation : La perte d'eau capillaire pendant la phase de séchage provoque une contraction de la matrice cimentaire, liée au retrait de dessiccation. Cette contraction tend à compenser partiellement la dilatation initiale induite par l'agent expansif. Le rapprochement des feuillets C-S-H et la fermeture progressive des pores entraînent une déformation irréversible à la contraction qui domine finalement le bilan dimensionnel.

Le bilan volumétrique final reste donc négatif, indiquant un retrait net de l'ensemble des formulations contenant cet agent expansif, malgré la présence d'un mécanisme expansif intrinsèque.

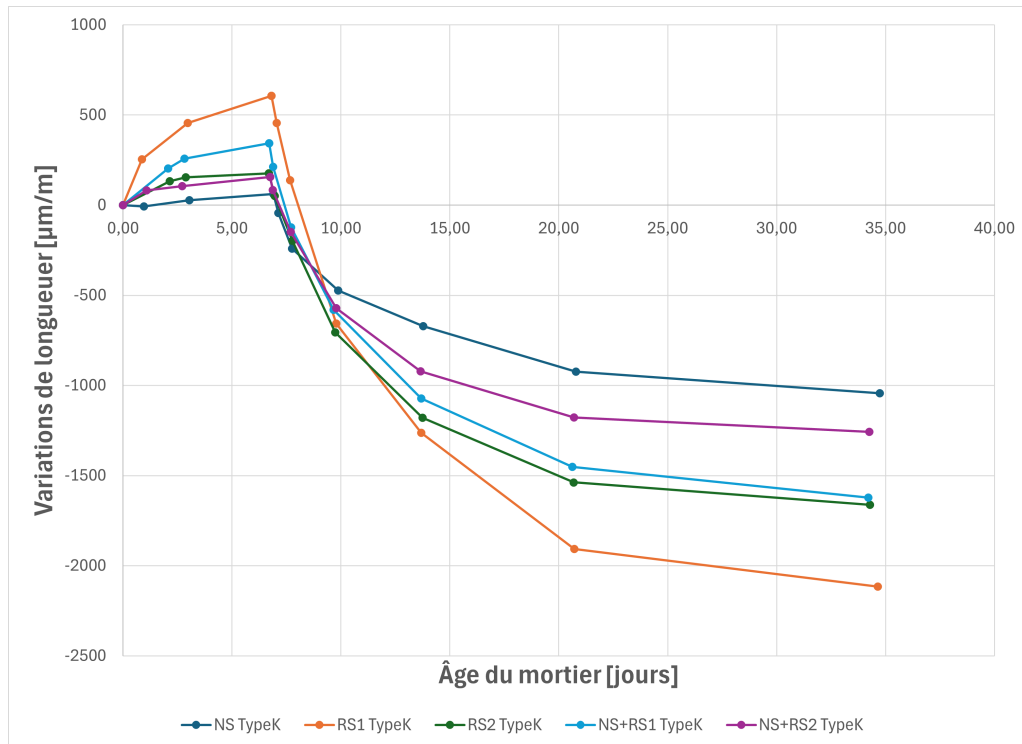


Figure 3.3 – Variations dimensionnelles des mélanges avec agent expansif de type K

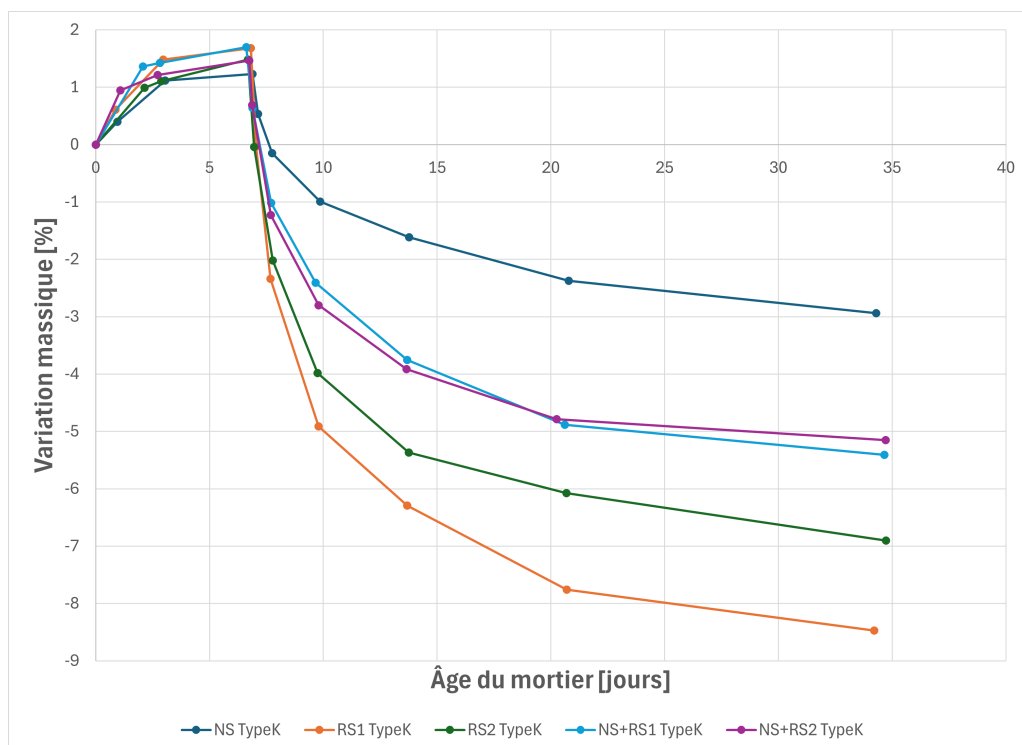


Figure 3.4 – Variations massiques des mélanges avec agent expansif de type K

Durant la période de cure humide, les mortiers incorporant l'agent expansif de Type K présentent une prise de masse modérée, comprise entre +1,23% et +1,69%. Cette absorption d'eau, bien qu'elle favorise la formation d'hydrates expansifs et induise une expansion dimensionnelle initiale (+175 à +606 $\frac{\mu m}{m}$), ne semble pas suffisante pour activer pleinement le potentiel de gonflement de l'agent expansif de Type K.

Lors de la période de séchage, une perte de masse importante est observée (jusqu'à -8,47 %), traduisant principalement l'évaporation de l'eau libre ainsi qu'une désorption partielle de l'eau physiquement liée dans la matrice. Cette dessiccation provoque un retrait dimensionnel notable (-1044 à -2116 $\frac{\mu m}{m}$), proportionnel à l'ampleur de la perte de masse.

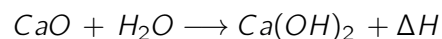
Une corrélation claire se dégage entre la diminution de la masse et l'intensité du retrait, particulièrement accentuée dans les formulations RS1 Type K et RS2 Type K, en raison de leur porosité favorisant l'évaporation.

Les mélanges avec substitution partielle (NS+RS1 Type K et NS+RS2 Type K) présentent des valeurs intermédiaires, confirmant que le mélange des granulats module la dynamique hydrique et limite l'intensité du retrait.

En synthèse, la variation de masse liée aux échanges d'eau conditionne fortement le comportement dimensionnel des mortiers avec un agent expansif de Type K : si l'absorption d'eau lors de la cure humide initie l'expansion, celle-ci est limitée par le faible pourcentage d'eau absorbée, ne permettant pas de pleinement exploiter le potentiel expansif de l'agent de Type K. La phase de séchage, quant à elle, entraîne une dessiccation qui domine le phénomène dimensionnel par un retrait significatif proportionnel à l'ampleur de la perte de masse.

3.1.3 Effet de l'agent expansif de type G

L'agent expansif de Type G est principalement composé d'oxyde de calcium non hydraté, communément appelé chaux vive (CaO). Sa réaction avec l'eau est immédiate, fortement exothermique, et génère une hydratation volumétrique importante selon la réaction chimique suivante :



Cette hydratation rapide produit une augmentation significative du volume molaire, générant ainsi une expansion précoce et considérable dans la matrice cimentaire.

Les mesures expérimentales montrent que la majeure partie de cette expansion se produit dans les 24 premières heures de cure humide. Il est important de noter que les valeurs d'expansion initiales ont pu être sous-estimées, car les mesures n'ont débuté qu'après le démoulage des éprouvettes, empêchant ainsi la quantification précise de l'expansion survenant avant cette étape.

Les résultats des formulations incorporant l'agent expansif de type G révèlent des expansions initiales particulièrement prononcées, nettement supérieures à celles observées tant pour les formulations sans agent expansif que pour celles contenant un agent de type K. Ces expansions initiales sont suivies d'un bilan dimensionnel final également positif, indiquant que les éprouvettes continuent de présenter un gonflement net après la période de séchage de 28 jours.

Plus précisément, les mesures enregistrées sont les suivantes :

- Mélange 100% NS Type G : expansion initiale de $+2914,7 \frac{\mu m}{m}$, bilan dimensionnel final positif de $+1924 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 100% RS1 Type G : expansion initiale de $+4281,3 \frac{\mu m}{m}$, bilan dimensionnel final positif de $+1853,3 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 100% RS2 Type G : expansion initiale de $+4658,7 \frac{\mu m}{m}$, bilan dimensionnel final positif de $+2860 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 50% de NS et 50% de RS1 Type G : expansion initiale de $+5396 \frac{\mu m}{m}$, bilan dimensionnel final positif de $+3696 \frac{\mu m}{m}$.
- Mélange 50% de NS et 50% de RS2 Type G : expansion initiale de $+4369,3 \frac{\mu m}{m}$, bilan dimensionnel final positif de $+3082,7 \frac{\mu m}{m}$.

Par ailleurs, les bilans volumétriques finaux apparaissent positifs, ce qui corrobore l'existence d'un effet expansif prépondérant, sans retour notable vers une contraction ou retrait.

Les mécanismes fondamentaux sous-jacents à ce phénomène d'expansion sont :

- Hydratation immédiate et volumineuse de la chaux vive : Contrairement à l'agent expansif de Type K, qui induit une expansion progressive via la formation d'ettringite, la chaux vive réagit quasi instantanément dès le contact avec l'eau. Cette réaction d'hydratation provoque un gonflement volumétrique notable, dû à la conversion de CaO , un solide dense, en $Ca(OH)_2$, dont le volume occupé est supérieur d'environ 2 fois celui du CaO initial.
- Réservoir d'eau et effet des sables recyclés : La porosité accrue et la forte capacité d'absorption des sables recyclés favorisent la rétention prolongée d'eau dans la matrice. Cette eau retenue constitue un réservoir hydrique local, maintenant l'hydratation de la chaux vive sur une période étendue, ce qui prolonge l'expansion au-delà de la simple phase initiale de cure humide. Cette particularité explique pourquoi les formulations intégrant du sable recyclé présentent des expansions encore plus marquées.
- Influence microstructurale : La microstructure des mortiers incorporant des sables recyclés se caractérise, aux premiers stades de durcissement, par une porosité plus ouverte et une distribution des pores plus hétérogène que celle observée dans les mortiers à sable naturel. Cette configuration résulte principalement de la rugosité accrue et de la capacité d'absorption élevée des granulats recyclés, qui induisent une répartition plus diffuse de l'eau de gâchage au sein de la matrice cimentaire.

Dans ce contexte, la porosité interconnectée initiale peut jouer un rôle d'amortisseur mécanique vis-à-vis des contraintes générées par la formation des produits expansifs issus de la réaction de l'agent de Type G. Durant les premiers jours, une partie de l'expansion est ainsi absorbée par de légères déformations internes et par la micro-restructuration du réseau poreux, retardant l'apparition immédiate de microfissures.

Cependant, cette capacité d'absorption est transitoire. Au fur et à mesure de l'hydratation du ciment, les produits hydratés colmatent progressivement les pores les plus fins, réduisant la perméabilité interne et densifiant la matrice. Une fois ce seuil atteint, toute expansion supplémentaire provoquée par la poursuite des réactions de l'agent expansif se traduit par une augmentation significative des contraintes internes. Ce phénomène favorise alors l'apparition de microfissures différées susceptibles de compromettre la durabilité et les performances mécaniques à long terme.

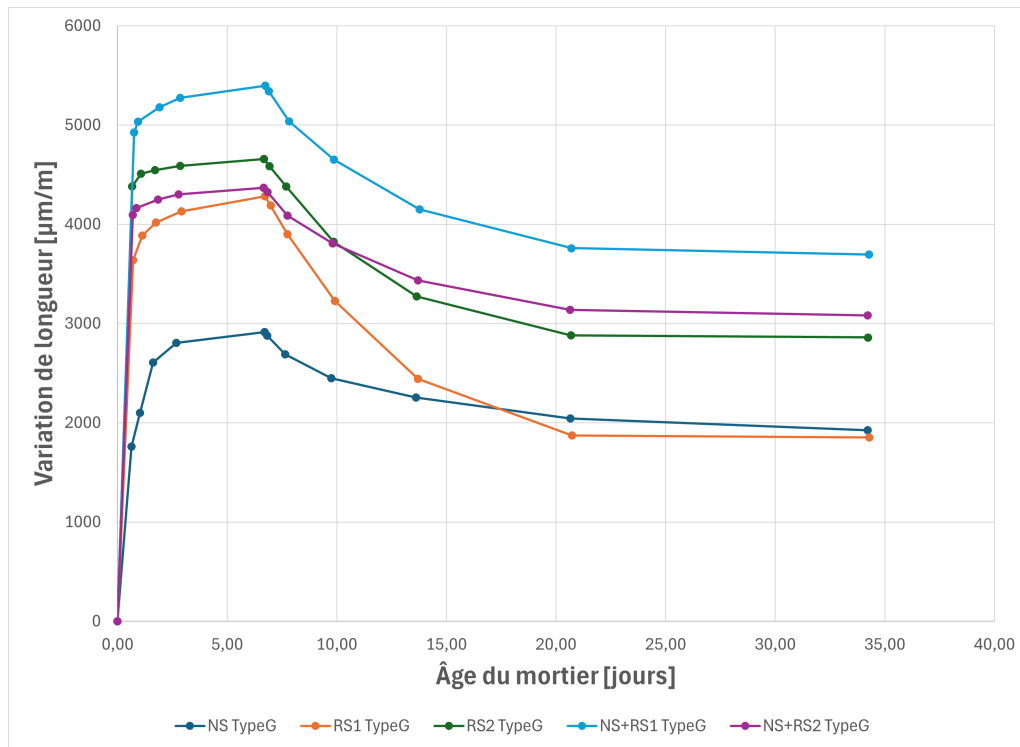


Figure 3.5 – Variations dimensionnelles des mélanges avec agent expansif de type G

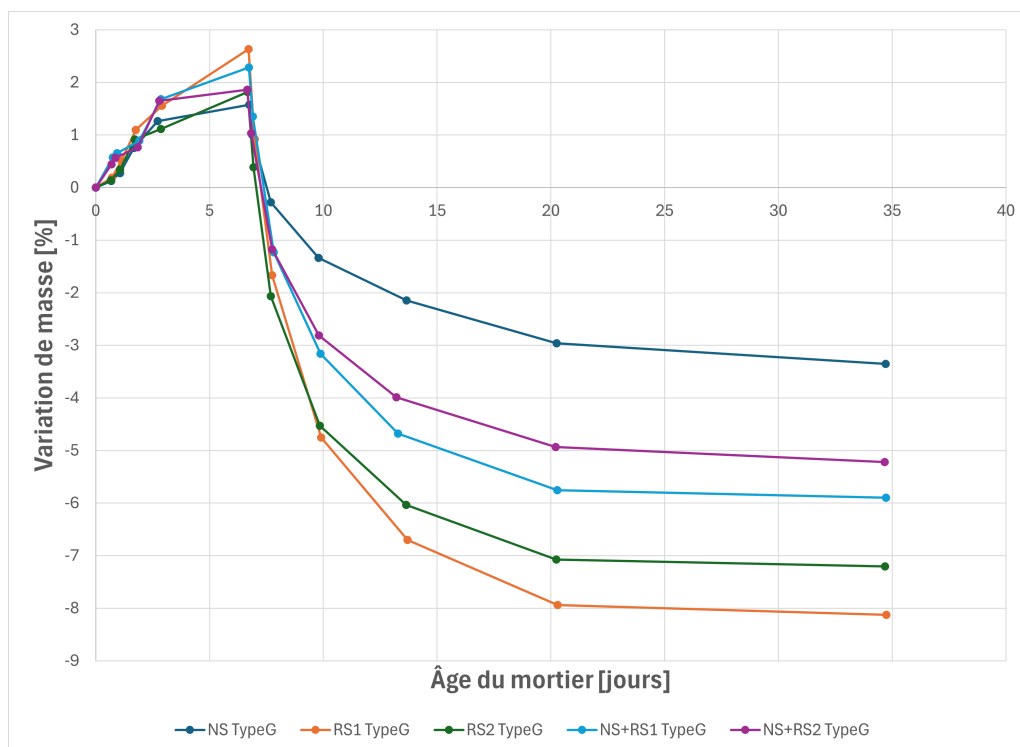


Figure 3.6 – Variations massiques des mélanges avec agent expansif de type G

L'analyse simultanée des variations de masse et de longueur pour les mortiers incorporant un agent expansif de Type G met en évidence des tendances cohérentes entre la cinétique de séchage et le comportement dimensionnel. Durant la période de cure humide, toutes les formulations présentent un gain de masse, attribuable à l'absorption d'eau par capillarité et à la saturation progressive des pores accessibles, concomitante à une expansion importante liée à l'hydratation rapide de l'oxyde de calcium et à la formation de portlandite.

L'observation d'une expansion moindre pour le mélange RS1 G comparée à NS+RS1 G, bien que pouvant sembler contradictoire au regard des caractéristiques intrinsèques des sables recyclés, ne peut être expliquée uniquement par ces dernières. En effet, la cinétique d'hydratation rapide de l'oxyde de calcium favorise une expansion précoce, partiellement non mesurée, qui influence la dilatation effective enregistrée. Par ailleurs, la formulation des mortiers, notamment le rapport eau/liant, joue un rôle déterminant en modulant la disponibilité d'eau nécessaire à l'hydratation de l'agent expansif. De plus, les propriétés microstructurales du mélange, incluant la porosité, la connectivité des pores, ainsi que l'interaction entre le sable naturel et le sable recyclé, contribuent à réguler les transferts hydriques et les contraintes internes, affectant ainsi la dynamique et l'amplitude de l'expansion. Ces observations soulignent la complexité des phénomènes en jeu, où l'expansion volumétrique résulte d'une synergie entre les propriétés granulométriques, la formulation chimique et la cinétique de réaction.

À l'issue de la cure humide, la transition vers la phase de séchage s'accompagne d'une diminution rapide de la masse, dont la pente varie selon la nature du sable et la connectivité poreuse du squelette granulaire. Les formulations présentant une pente de séchage plus forte subissent également une contraction longitudinale post-pic plus marquée. Ce lien direct s'explique par le fait qu'une évacuation rapide de l'eau depuis les pores accessibles intensifie les déformations de dessiccation. Les sables recyclés, à porosité ouverte et connectivité élevée, facilitent ces transferts hydriques, conduisant à des contractions plus prononcées lorsque la vitesse de séchage est élevée.

Inversément, les mélanges contenant une proportion plus importante de sable naturel présentent des pentes de perte de masse plus modérées et, par conséquent, une contraction post-pic atténuée. Cet effet ralentisseur est dû à la plus faible porosité accessible du sable naturel, qui limite les échanges hydriques et contribue à la conservation de l'expansion acquise initialement.

Ainsi, les formulations NS+RS1 Type G et NS+RS2 Type G conservent une expansion résiduelle plus importante (égale à $3696 \frac{\mu m}{m}$ et $3082,7 \frac{\mu m}{m}$ respectivement), alors que les formulations à base de sable recyclé seul (RS1 Type G et RS2 Type G) affichent un bilan final plus modeste, conséquence directe de leur cinétique de séchage plus rapide.

Ces résultats confirment que, pour les mortiers à base d'agent expansif de Type G, la performance volumétrique finale dépend non seulement de la réaction expansive initiale, mais aussi de la vitesse de séchage, elle-même fortement influencée par les propriétés physiques du sable employé. Une cinétique de séchage rapide, favorisée par une porosité ouverte et une connectivité poreuse élevées, accroît la contraction post-expansion et réduit la conservation de l'expansion résiduelle à long terme.

3.1.4 Réactivation de l'expansion par immersion en eau de chaux : Agent expansif de type K

À partir de 49 jours d'âge, les éprouvettes de mortier incorporant l'agent expansif de Type K ont été immergées dans de l'eau de chaux, dans le but d'évaluer la possibilité de réactiver le processus d'expansion.

Ce protocole expérimental repose sur l'hypothèse que la disponibilité en eau et en ions calcium (Ca^{2+}) et hydroxydes (OH^-) peut favoriser la poursuite ou la reprise des réactions d'hydratation

des composants du Type K, principalement les aluminates réactifs, conduisant à la formation tardive d'ettringite secondaire. Cette réaction, connue pour induire un gonflement volumétrique, peut se produire lorsque les conditions de saturation et la disponibilité en réactifs sont rétablies.

Les résultats montrent qu'une expansion significative est effectivement survenue après cette immersion prolongée. Après 28 jours supplémentaires dans l'eau de chaux – soit à l'âge total de 77 jours des éprouvettes d'essai – les expansions mesurées sont les suivantes :

- Mélange 100% NS Type K : nouvelle expansion de $+586 \frac{\mu m}{m}$ soit une augmentation de +857%
- Mélange 100% RS1 Type K : nouvelle expansion de $+1334,7 \frac{\mu m}{m}$ soit une augmentation de +120%
- Mélange 100% RS2 Type K : nouvelle expansion de $+908 \frac{\mu m}{m}$ soit une augmentation de +418%
- Mélange 50% NS + 50% RS1 Type K : nouvelle expansion de $+1016 \frac{\mu m}{m}$ soit une augmentation de +197%
- Mélange 50% NS + 50% RS2 Type K : nouvelle expansion de $+656 \frac{\mu m}{m}$ soit une augmentation de +321%

L'analyse des résultats met en évidence que l'immersion en eau de chaux à partir de 49 jours a conduit à une réactivation notable de l'expansion dans l'ensemble des mélanges contenant l'agent expansif de Type K. Ce phénomène peut s'expliquer par la combinaison de plusieurs mécanismes physico-chimiques. Tout d'abord, l'eau de chaux fournit simultanément un apport massif en eau et en ions calcium (Ca^{2+}) et hydroxyles (OH^-), recréant des conditions saturées favorables à la reprise des réactions d'hydratation de phases aluminates encore présentes dans la matrice cimentaire. En présence de sulfates disponibles, ces phases peuvent générer de nouvelles formations d'ettringite secondaire, dont la précipitation dans les pores capillaires engendre des pressions de cristallisation du gonflement observé.

La comparaison des expansions finales à 77 jours avec celles mesurées initialement après 7 jours de cure humide à l'air libre met en évidence des augmentations considérables, allant de +120% pour le mélange 100% de RS1 Type K à plus de 855% pour le mélange 100% de NS Type K. Dans ce dernier cas, l'expansion relative est très élevée en raison d'une valeur initiale extrêmement faible ($+61,333 \frac{\mu m}{m}$). Cette faible réaction initiale s'explique par le fait que les échantillons n'avaient pas bénéficié d'une immersion prolongée lors de la première phase de cure, limitant ainsi la poursuite des réactions expansives. L'immersion ultérieure en eau de chaux a fourni les conditions optimales pour activer pleinement ces réactions, entraînant un gonflement massif.

À l'inverse, le mélange 100% RS1 Type K, qui présentait déjà une expansion importante à 7 jours ($+606,667 \frac{\mu m}{m}$), a tout de même vu sa valeur croître significativement pour atteindre $+1334,667 \frac{\mu m}{m}$, confirmant la sensibilité prolongée de ce matériau à l'humidité. Ce comportement est attribuable à la porosité plus élevée et à la capacité d'absorption du sable recyclé RS1, favorisant la pénétration et la rétention de la solution de chaux au sein de la matrice.

De façon générale, les mélanges intégrant des sables recyclés (RS1 et RS2) présentent des expansions absolues supérieures à celles du sable naturel seul, ce qui souligne l'influence directe des propriétés physiques du granulat sur la cinétique et l'amplitude des réactions expansives différées. Ces observations confirment que l'agent expansif de Type K conserve un potentiel réactif latent important, qui peut être réactivé plusieurs semaines après la fin de la cure initiale lorsque les conditions d'immersion et la disponibilité en réactifs sont rétablies, avec des implications notables sur la stabilité dimensionnelle et la durabilité des mortiers.

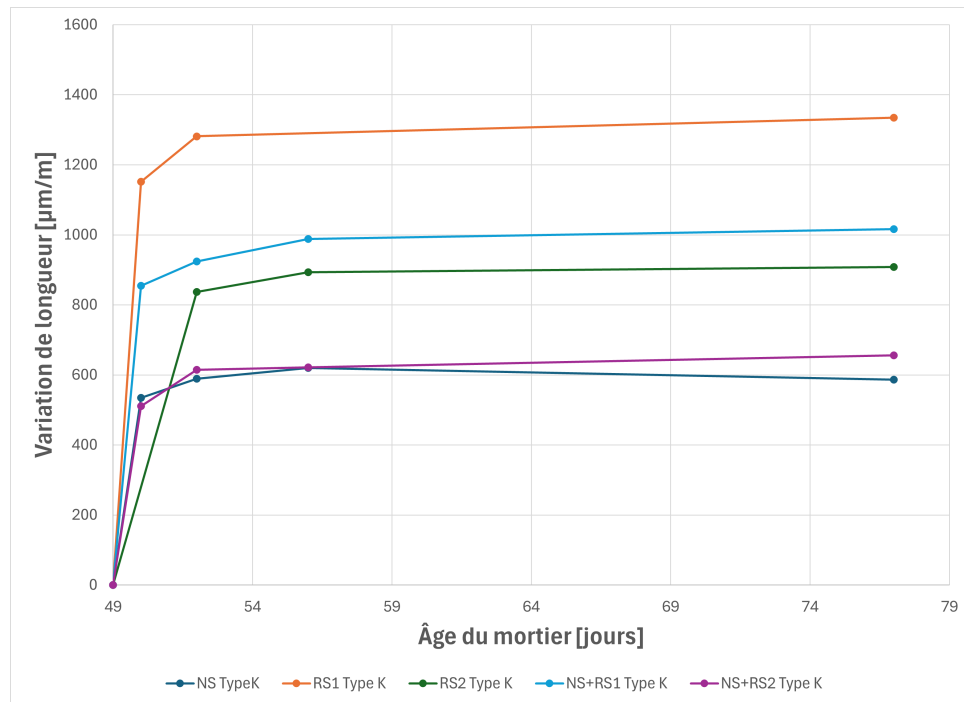


Figure 3.7 – Variations dimensionnelles des mortiers à agent expansif de Type K après cure prolongée en eau de chaux

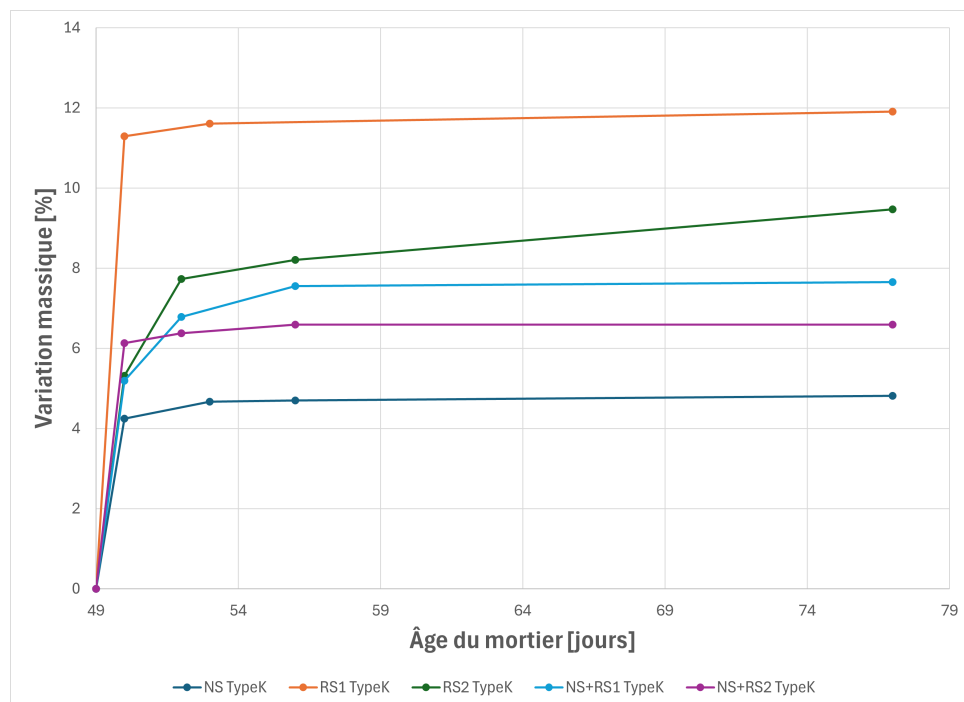


Figure 3.8 – Variations massiques des mortiers avec agent expansif de Type K après cure prolongée en eau de chaux

L'évolution massique des éprouvettes immergées en eau de chaux à partir de leur 49^e jour d'âge révèle une absorption significative, dont l'intensité varie selon la nature des granulats utilisés. Après 28 jours supplémentaires d'immersion, les gains de masse enregistrés s'établissent à :

- Mélange 100% NS type K : +4,8%
- Mélange 100% RS1 type K : +11,9%
- Mélange 100% RS2 type K : +9,5%
- Mélange 50% NS et 50% RS1 : +7,65%
- Mélange 50% NS et 50% RS2 : +6,5%

Ces résultats traduisent une forte hétérogénéité dans la capacité d'absorption des différentes formulations, directement liée aux caractéristiques microstructurales des sables employés. Les mélanges contenant du sable recyclé, en particulier RS1, affichent les plus fortes augmentations de masse, ce qui confirme l'effet de leur porosité et de leur capacité d'imbibition supérieure par rapport au sable naturel.

Cette absorption ne constitue pas seulement un simple phénomène physique de remplissage de pores, elle conditionne également la réactivation des réactions expansives en fournissant un réservoir hydrique interne, nécessaire à l'hydratation différée des aluminates de l'agent expansif de type K. Ainsi, les données de variation massique corroborent directement les tendances observées en terme de gonflement, puisqu'une absorption plus importante se traduit par une expansion plus marquée.

Le cas du mélange RS1 type K illustre particulièrement bien cette relation, combinant la variation massique la plus élevée (+11,9%) avec l'expansion absolue la plus importante ($+1334,7 \frac{\mu m}{m}$).

À l'inverse, le mélange NS Type K, dont l'absorption d'eau reste faible (+4,8 %), n'a montré qu'une expansion limitée en valeur absolue, même si l'augmentation relative reste importante. Ces observations mettent en évidence le rôle fondamental de la capacité d'absorption d'eau et de la porosité des granulats dans le contrôle conjoint de la variation massique et de la variation dimensionnelle des différents mélanges.

En synthèse, l'immersion en eau de chaux à partir de 49 jours réactive efficacement l'expansion des mortiers incorporant un agent de type K. L'ampleur et l'efficacité de cette réponse expansive sont conditionnées par l'interaction entre la capacité de rétention hydrique des granulats et la connectivité de leur réseau poreux, notamment pour le sable RS1. Ce couplage contrôle la fraction d'eau absorbée qui participe activement à la cristallisation de l'ettringite et à la dilatation volumétrique, par opposition à l'eau simplement confinée dans les pores sans effet mécanique.

3.1.5 Conclusion sur l'effet des granulats et des agents expansifs

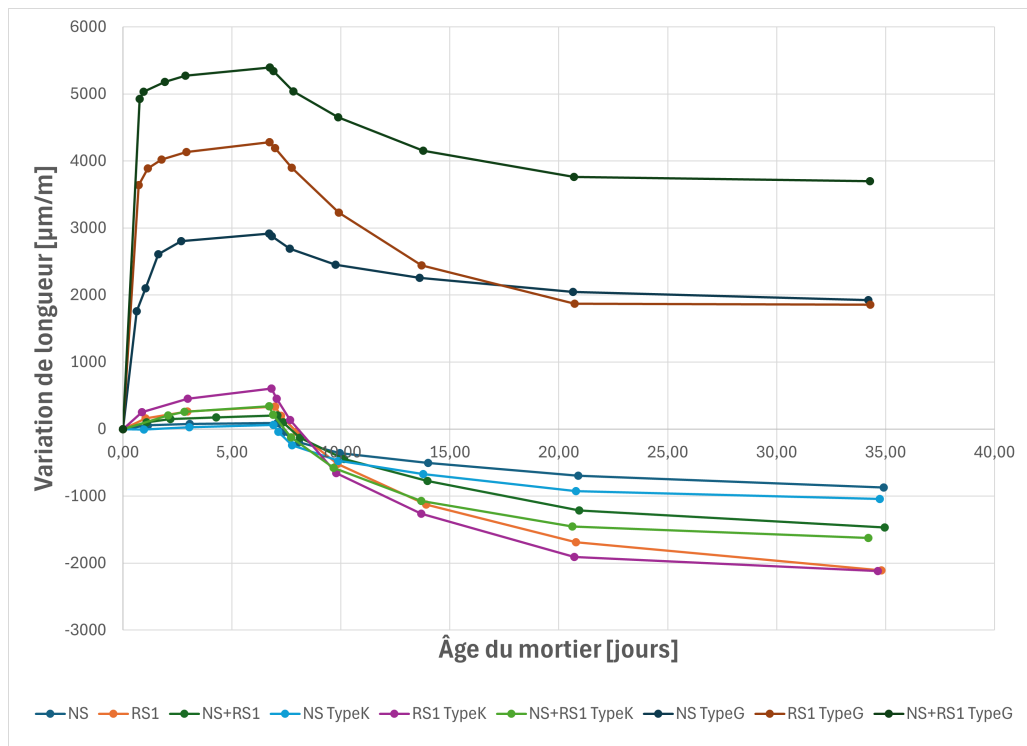


Figure 3.9 – Comparaison des variations de longueur des différents mélanges incorporant du NS et/ou du RS1

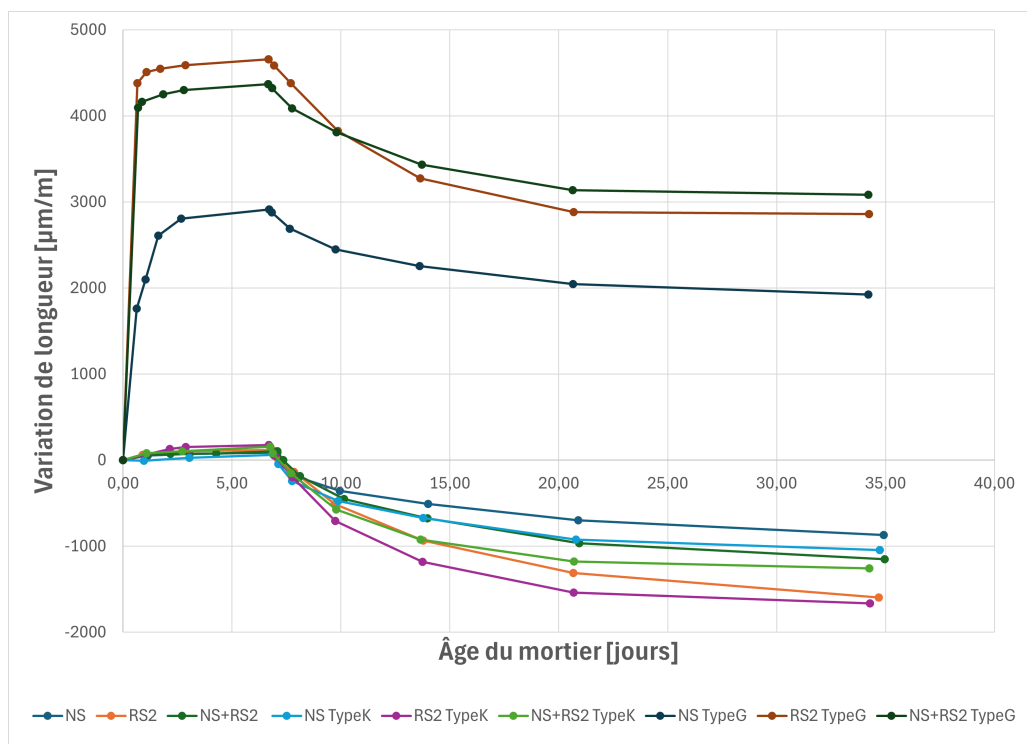


Figure 3.10 – Comparaison des variations de longueur des différents mélanges incorporant du NS et/ou du RS2

L'ensemble des résultats obtenus sur les quinze formulations étudiées met en évidence l'interaction complexe entre la nature du sable et l'incorporation d'agents expansifs dans le contrôle des variations dimensionnelles des mortiers. En l'absence d'agent expansif, le comportement volumétrique des mortiers est dominé par le retrait de dessiccation, lié à la perte d'eau pendant la période de séchage. Les sables recyclés, RS1 et RS2, induisent un retrait plus marqué que le sable naturel (NS), en raison de leur porosité accrue et de leur capacité supérieure à absorber puis restituer l'eau. Le RS1, plus poreux que le RS2, engendre les amplitudes de retrait les plus élevées, tandis que le RS2 produit des bilans intermédiaires. Les substitutions partielles, telles que les mélanges NS+RS1 ou NS+RS2, conduisent à des comportements intermédiaires, confirmant que le volume final est directement modulé par la proportion de sable recyclé. Ces observations montrent que, sans mécanisme expansif additionnel, le bilan volumétrique final des mortiers reste négatif, exposant la matrice à un risque de fissuration.

L'introduction d'un agent expansif de Type K entraîne la formation d'ettringite, mais dans les conditions de cure à l'air libre, son effet expansif reste limité. La disponibilité en eau restreinte empêche le développement complet et homogène de cette phase expansive, de sorte que l'expansion observée n'est pas significativement supérieure à celle des formulations sans agent. Les phénomènes de relaxation microstructurale et le retrait de dessiccation compensent l'effet de l'agent expansif, conduisant à un bilan volumétrique final toujours négatif. On note toutefois que les formulations contenant du RS1 présentent des variations légèrement plus importantes que celles avec RS2 ou NS, reflétant l'influence de la porosité ouverte des sables recyclés, mais cet effet reste insuffisant pour compenser le retrait postérieur.

En revanche, l'immersion des éprouvettes d'essai dans de l'eau de chaux, au jour 49 de la vie des éprouvettes, a joué un rôle crucial dans la réactivation du potentiel expansif de l'agent expansif de Type K. En effet, cette immersion fournit une quantité d'eau suffisante pour permettre la formation complète d'ettringite. Ce processus avait, comme mentionné précédemment, été limité pendant la période de cure à l'air libre en raison de la disponibilité hydrique restreinte. Comme le montrent les mesures expérimentales, cette réhydratation tardive favorise une expansion supplémentaire, démontrant que le développement des phases expansives dépend fortement de la présence continue d'eau. Ainsi, la capacité de l'agent expansif de Type K à générer un gonflement significatif n'est pleinement exploitée que lorsque le mortier dispose d'un apport hydrique adéquat, soulignant l'importance de la gestion de l'humidité dans les formulations contenant cet agent.

À l'inverse, l'agent expansif de Type G démontre une efficacité significative et constante dans toutes les formulations. Son hydratation rapide et volumineuse induit un gonflement initial important, qui se maintient dans le temps en raison de la conversion de la chaux vive en portlandite et de la stabilité des produits hydratés formés. Le retrait de dessiccation est plus prononcé pour les formulations incorporant 100 % de sables recyclés, conséquence de leur porosité et de la cinétique de séchage accélérée qui favorise l'évaporation rapide de l'eau libre. En revanche, les mélanges à substitution partielle (NS+RS1 ou NS+RS2) offrent un compromis optimal, combinant une conservation de l'expansion initiale avec une limitation du retrait lors de la période de séchage grâce à la modulation des transferts hydriques par le mélange des granulats. Malgré ces variations, le bilan volumétrique final de toutes les formulations reste positif, confirmant la prépondérance de l'agent expansif de Type G dans le contrôle dimensionnel des mortiers étudiés.

3.2 Analyse du retrait : barrettes scellées

Le contexte expérimental et les paramètres d'essai présentés ci-après visent à définir précisément les conditions dans lesquelles ont été réalisées les mesures de retrait, afin de garantir une interprétation fiable et comparative des résultats obtenus.

Le démoulage a été effectué 24 heures après le contact eau-ciment pour les barrettes sans agent expansif, et 8 heures après ce contact pour celles incorporant un agent expansif de type K ou de type G. 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.

Ce scellement empêche tout échange hygrométrique direct avec l'air ambiant, maintenant un environnement interne saturé en humidité. Dans ces conditions, le retrait de dessiccation classique est quasiment nul, et les variations dimensionnelles enregistrées sont principalement imputables à :

- Des déformations autogènes, liées aux processus d'hydratation et de réorganisation interne de la matrice cimentaire.
- Des phénomènes expansifs, générés par la réaction des agents de Type K ou G.
- Des ajustements microstructuraux internes, liés à l'évolution de la porosité et aux contraintes capillaires résiduelles.

Pour les échantillons scellés, la variation massique n'a montré aucune évolution notable au cours de la période de mesure. La masse des éprouvettes est restée globalement constante, traduisant l'absence d'échanges significatifs avec l'environnement. Les mesures de masse ont été réalisées à l'aide d'une balance analytique affichant les valeurs au dixième de gramme près. Une précision plus fine, par exemple au centième de gramme, aurait peut-être permis de détecter de très légères variations, mais ces variations seraient minimales et sans impact significatif dans le cadre de cette étude.

3.2.1 Comportement sans agent expansif

Le retrait dimensionnel des mortiers résulte de plusieurs mécanismes, parmi lesquels le retrait autogène occupe une place majeure dans des conditions confinées. Ce phénomène correspond à la contraction interne de la pâte hydratée, provoquée par la consommation d'eau lors de l'hydratation du ciment et la génération de forces capillaires au sein de la microstructure. Il est particulièrement marqué dans les mortiers à faible rapport E/L (eau/liant), où la disponibilité en eau limitée accentue les tensions capillaires et la contraction. Ce comportement est clairement observé dans le mélange de référence NS ($E/L = 0,5$), qui présente un retrait continu ($-160,3 \frac{\mu m}{m}$ à 35 jours).

L'augmentation du rapport E/L dans les formulations contenant des sables recyclés RS1 et RS2 ($E/L = 0,6$) modifie cette dynamique. Un excès d'eau relative favorise une hydratation plus complète et plus rapide, réduisant la tension capillaire interne et les phénomènes de contraction. Ceci pourrait expliquer partiellement la réduction du retrait observé dans la formulation RS2 ($-97 \frac{\mu m}{m}$ à 35 jours), ainsi que le comportement expansif dans la formulation RS1.

La différence notable entre RS1 et RS2 suggère une influence directe de la nature des sables recyclés sur la réponse dimensionnelle. La formulation RS1 présente une expansion nette, atteignant plus de $100 \frac{\mu m}{m}$. Cette expansion pourrait s'expliquer par plusieurs hypothèses : la présence de phases résiduelles hygroscopiques ou expansives (produits d'altération, argiles, sulfates), susceptibles de gonfler en présence d'eau liée, ou une hydratation prolongée des fragments cimentaires résiduels dans le sable recyclé. Cette expansion interne peut aussi être amplifiée par le rapport E/L élevé qui

assure une meilleure mobilité de l'eau et favorise ces réactions. L'absence de dessiccation externe empêche la contraction, mettant en évidence ces phénomènes d'expansion interne.

Un autre facteur influençant le comportement dimensionnel de RS2 est son état carbonaté. La carbonatation transforme les phases hydrauliques présentes dans le sable recyclé en carbonates de calcium, composés minéraux plus stables chimiquement. Ce processus tend à densifier la microstructure locale en comblant partiellement les pores et fissures, réduisant ainsi la porosité accessible et limitant la réactivité ultérieure du matériau. En conséquence, le sable recyclé carbonaté présente une moindre susceptibilité aux réactions d'hydratation tardive ou aux réactions chimiques générant des expansions, ce qui contribue à la stabilité dimensionnelle observée dans la formulation RS2. De plus, la carbonatation peut modifier la capacité d'absorption et la dynamique d'échange d'eau, influençant ainsi l'équilibre hydrique interne et le retrait autogène. Ce phénomène participe donc à expliquer pourquoi la formulation RS2 affiche un retrait modéré sans expansion significative, contrastant avec le comportement expansif de la formulation RS1.

Les formulations mixtes (NS+RS1 et NS+RS2), avec un rapport E/L intermédiaire ($E/L = 0,55$) montrent des comportements également intermédiaires. En particulier, la formulation NS+RS1 affiche un retrait faible ($-56 \frac{\mu m}{m}$), voire des variations proches de la stabilité dimensionnelle à certains instants. Cela suggère une compensation partielle entre le retrait autogène du ciment et l'expansion induite par les particules RS1, ce qui pourrait être intéressant pour contrôler la déformation des mortiers.

La formulation NS+RS2 présente un retrait plus marqué ($-104 \frac{\mu m}{m}$), mais toujours moindre que la formulation NS pure, confirmant l'effet modérateur du sable recyclé RS2. La composition de ces mélanges mixtes semble favoriser une microstructure plus équilibrée, réduisant le risque de retrait excessif.

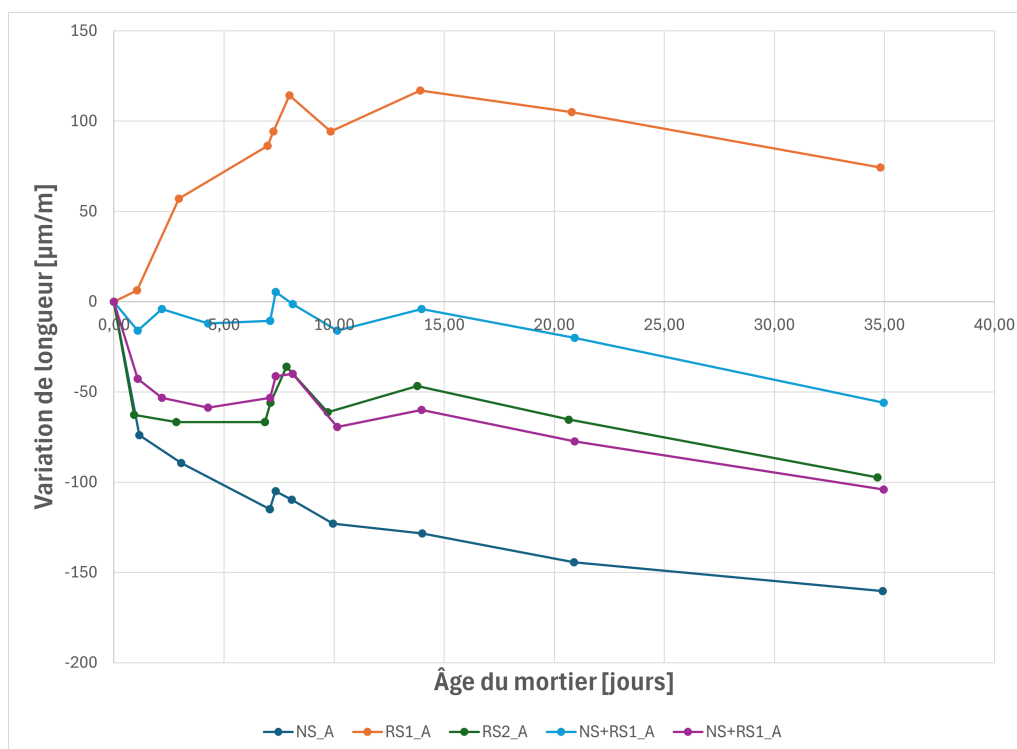


Figure 3.11 – Variations dimensionnelles des mélanges scellés avec de l'aluminium sans agent expansif

3.2.2 Effet de l'agent expansif de type K

L'incorporation d'un agent expansif de Type K dans les mortiers modifie légèrement leur comportement dimensionnel en conditions scellées.

Le mélange de référence NS Type K ($E/L = 0,5$) présente un comportement globalement contractile, atteignant $-181 \frac{\mu m}{m}$ à 35 jours. La contraction est rapide dès les premiers jours, suggérant que la quantité d'ettringite formée n'a pas suffi à contrebalancer les tensions capillaires liées au retrait autogène. La courbe présente également de légères variations au cours du temps, probablement imputables à des ajustements internes de la microstructure ou à des redistributions locales d'humidité. Néanmoins, la tendance dominante demeure contractile. Ce résultat indique que dans un mortier à faible rapport E/L , l'agent expansif de Type K ne parvient pas à compenser les effets du retrait autogène lorsque l'eau disponible est limitée.

À l'inverse, le mélange RS1 Type K présente un comportement expansif, avec un pic à $+266 \frac{\mu m}{m}$ au 7^e jour. Cette expansion traduit une légère réactivité du système, probablement favorisée par la combinaison de l'agent expansif et des caractéristiques propres du sable recyclé RS1. La disponibilité en eau ($E/L = 0,6$) facilite la diffusion ionique et accélère la précipitation d'ettringite, générant une poussée expansive.

La formulation RS2 Type K adopte une trajectoire différente. Après un retrait initial de $-53 \frac{\mu m}{m}$ au jour 1, le matériau se rapproche progressivement de la stabilité dimensionnelle avant de retourner vers une contraction modérée ($-62 \frac{\mu m}{m}$ à 35 jours). La formation d'ettringite a ici été plus limitée ou s'est trouvée répartie de manière à ne compenser que partiellement le retrait autogène.

Le mélange NS+RS1 Type K montre un équilibre intéressant entre retrait et expansion. Après un gain dimensionnel modéré de $+58 \frac{\mu m}{m}$ au 7^e jour, le matériau revient progressivement vers une contraction légère de $-37 \frac{\mu m}{m}$ à 35 jours. Ce résultat indique que la combinaison du sable RS1 et de l'agent expansif compense en partie le retrait du ciment, conduisant à un bilan volumétrique globalement stable.

Malheureusement, les trois barrettes correspondantes au mélange NS+RS2 Type K se sont cassées lors du démoulage, empêchant toute mesure ultérieure. L'absence de données ne permet donc pas de commenter le comportement dimensionnel de cette formulation.

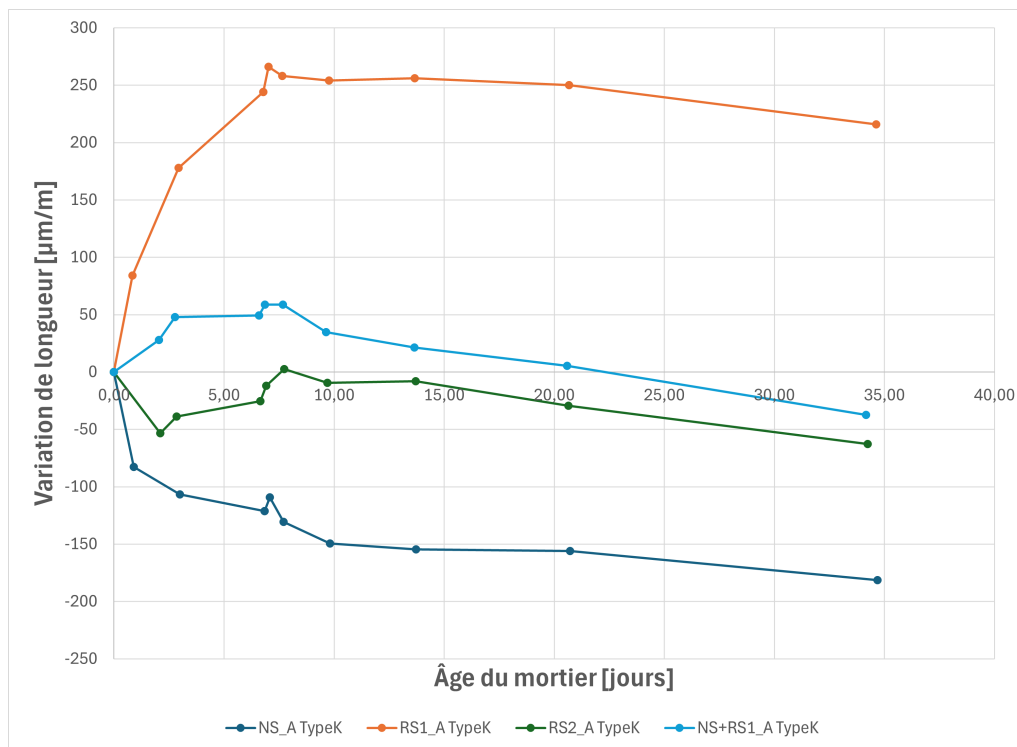


Figure 3.12 – Variations dimensionnelles des mélanges scellés avec de l'aluminium avec agent expansif de Type K

3.2.3 Effet de l'agent expansif de type G

L'incorporation d'un agent expansif de Type G dans les mortiers étudiés entraîne une expansion importante dès les premières heures, même sur des barrettes scellées avec du ruban adhésif d'aluminium. Cette réaction chimique avec l'eau de gâchage provoque une augmentation de longueur significative des éprouvettes, dont l'amplitude dépend de la composition en sable et se stabilise progressivement au fil du temps.

Le mortier de référence NS Type G présente un gonflement initial, inférieur aux autres formulations, avec une expansion de $+972 \frac{\mu m}{m}$ à 1 jour. Cette valeur augmente progressivement pour atteindre $+1108 \frac{\mu m}{m}$ au jour 8. Après ce pic, une légère diminution est observée, la variation de longueur passant à $+1044 \frac{\mu m}{m}$ au jour 35. Comparé aux mélanges NS sans agent et NS avec agent de Type K, l'expansion observée dans ce cas est plus importante, reflétant l'efficacité de l'agent expansif G.

La formulation RS1 Type G montre un gonflement beaucoup plus marqué dès les premières heures, atteignant $+2532 \frac{\mu m}{m}$ au jour 1. Cette valeur augmente progressivement jusqu'à atteindre le pic au jour 10 ($+2824 \frac{\mu m}{m}$). Après ce pic, une légère baisse est constatée, avec $+2770 \frac{\mu m}{m}$ au jour 35.

Pour le mélange RS2 Type G, le gonflement initial est également élevé, avec $+2218 \frac{\mu m}{m}$ à 1 jour et un maximum de $+2333$ au jour 10. Par la suite, la variation de longueur diminue légèrement pour atteindre une valeur de $+2265 \frac{\mu m}{m}$ au jour 35. Cette évolution est similaire à celle de RS1 mais avec une amplitude moindre, probablement en raison des caractéristiques du sable recyclé.

La combinaison NS+RS1 Type G produit une expansion de $+3193 \frac{\mu m}{m}$ à 1 jour, augmentant de manière progressive jusqu'à $+3452 \frac{\mu m}{m}$ au jour 10. Une légère baisse suit, donnant $+3378 \frac{\mu m}{m}$ au jour 35. En ce qui concerne le mélange NS+RS2 Type G, ce dernier montre une expansion

initiale de $+2625 \frac{\mu m}{m}$ à 1 jour, qui progresse jusqu'à $+2798 \frac{\mu m}{m}$ au jour 14 pour, au final, diminuer légèrement pour atteindre $+2728 \frac{\mu m}{m}$ au jour 35.

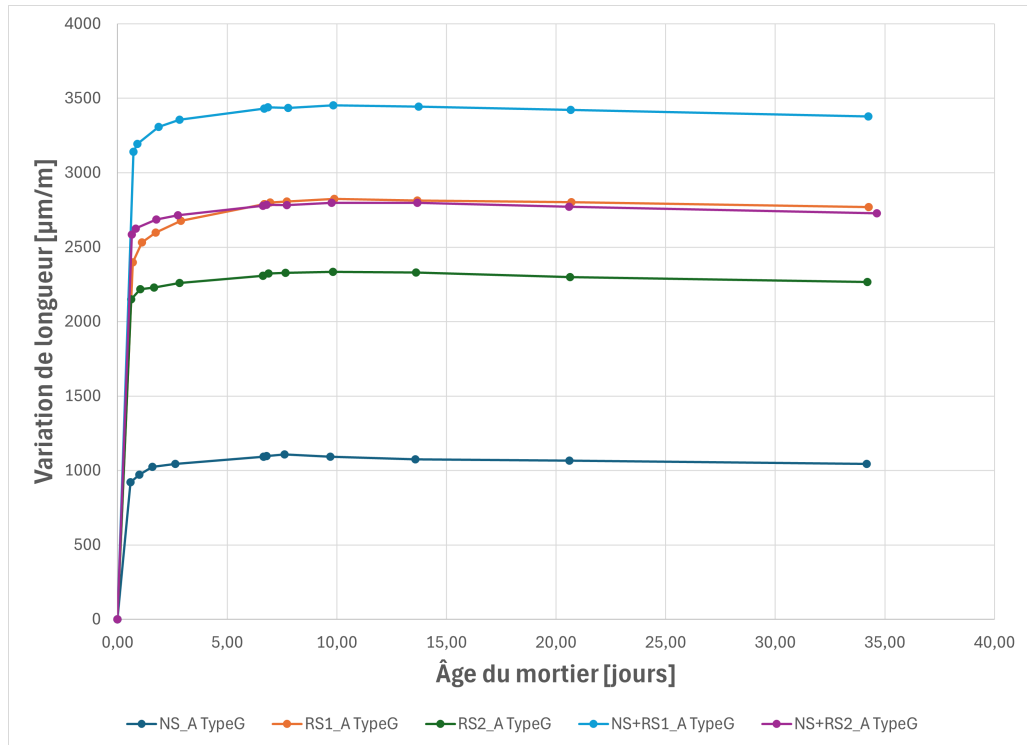


Figure 3.13 – Variations dimensionnelles des mélanges scellés avec de l'aluminium avec agent expansif de Type G

Globalement, l'intégration de l'agent expansif de Type G dans les formulations expérimentées se traduit par un bilan volumétrique positif durable. Malgré les légères diminutions observées après le 10^e jour, l'expansion initiale rapide et le plateau stable assurent que la majorité de la déformation expansive est conservée sur la période expérimentale.

3.2.4 Conclusion sur l'effet des granulats et des agents expansifs

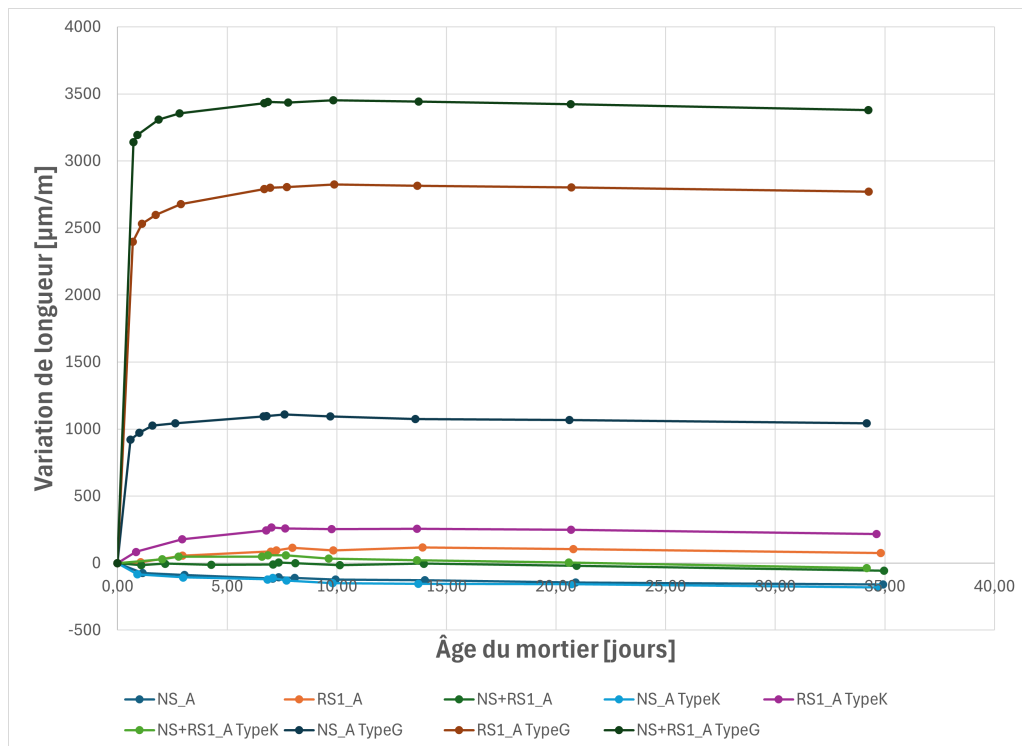


Figure 3.14 – Comparaison des variations de longueur des différents mélanges scellés incorporant du NS et du RS1

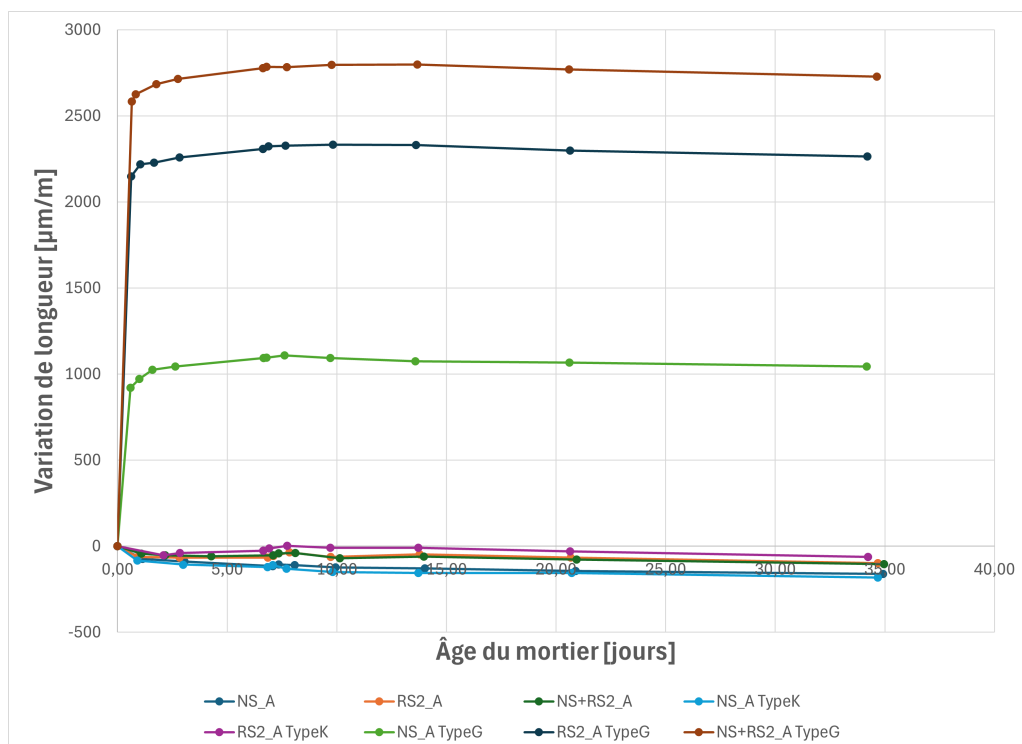


Figure 3.15 – Comparaison des variations de longueur des différents mélanges scellés incorporant du NS et du RS2

Pour les barrettes scellées avec du ruban d'aluminium, le retrait de dessiccation est négligeable, ce qui permet d'isoler les phénomènes de retrait autogène et d'expansion interne. Les formulations sans agent expansif montrent essentiellement un retrait autogène, dont l'amplitude est modulée par le rapport E/L et la nature des sables. Le mélange NS, à faible rapport E/L, présente le retrait le plus important, tandis que les formulations contenant des sables recyclés avec un rapport E/L plus élevé limitent la contraction, le mélange RS1 pouvant même présenter une expansion interne liée à des phases résiduelles hygroscopiques ou à l'hydratation prolongée des fragments cimentaires.

L'agent expansif de Type K génère une expansion limitée dans des conditions scellées. Pour le mélange NS Type K, le retrait autogène domine et l'expansion ne parvient pas à compenser les contractions internes. La formulation RS1 Type K montre une expansion légèrement plus importante que son équivalent sans agent, grâce à l'hydratation partielle de l'agent expansif, tandis que le mélange RS2 Type K reste quasi stable, en raison de la faible réactivité de son sable carbonaté.

L'agent expansif de Type G provoque une expansion nette des mortiers même sous conditions strictement scellées, bien qu'inférieure à celles des barrettes exposées à l'air, ce qui met en avant le rôle déterminant de l'apport en eau supplémentaire pour la réaction. Les variations dimensionnelles se stabilisent rapidement, atteignant un plateau sensiblement constant dès le 7^e jour, avec une diminution très faible par la suite. Dans tous les cas, la majorité de l'expansion initiale est conservée jusqu'à 35 jours, assurant un bilan volumétrique positif. Ces résultats confirment l'efficacité de l'agent expansif de Type G pour stabiliser les formulations, même en l'absence d'échanges hygrométriques avec l'air.

3.3 Propriétés mécaniques

L'étude des propriétés mécaniques constitue un critère déterminant pour évaluer la performance et la durabilité des mortiers.

Les essais de résistance à la compression et de résistance à la traction indirecte par fendage ont été retenus comme indicateurs principaux. La résistance à la compression fournit une mesure de la capacité portante du matériau et reflète directement la qualité de la matrice cimentaire ainsi que la compacité du squelette granulaire. La résistance à la traction, déterminée par l'essai de fendage, permet quant à elle d'appréhender le comportement du mortier vis-à-vis des contraintes de traction, généralement à l'origine de l'initiation et de la propagation des fissures.

L'analyse conjointe de ces résultats apporte une compréhension globale du comportement mécanique des formulations étudiées et permet de mettre en évidence l'influence de la substitution par le sable recyclé.

3.3.1 Résistances à la compression des mélanges sans agents à 7 jours

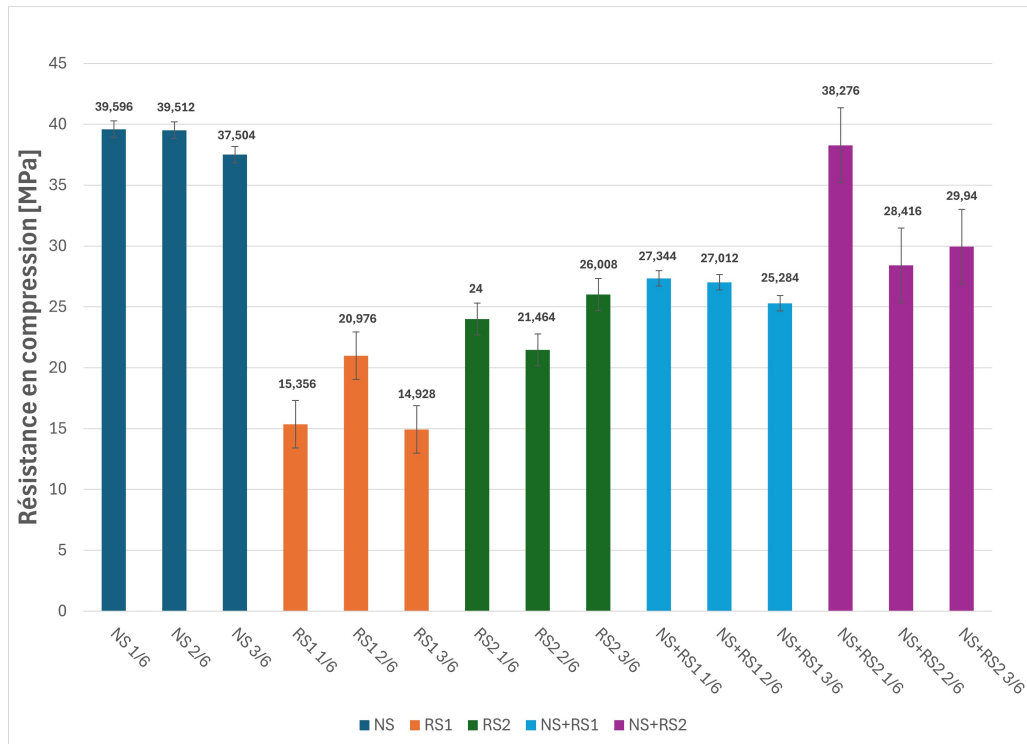


Figure 3.16 – Résistances à la compression des mélanges sans agent à 7 jours

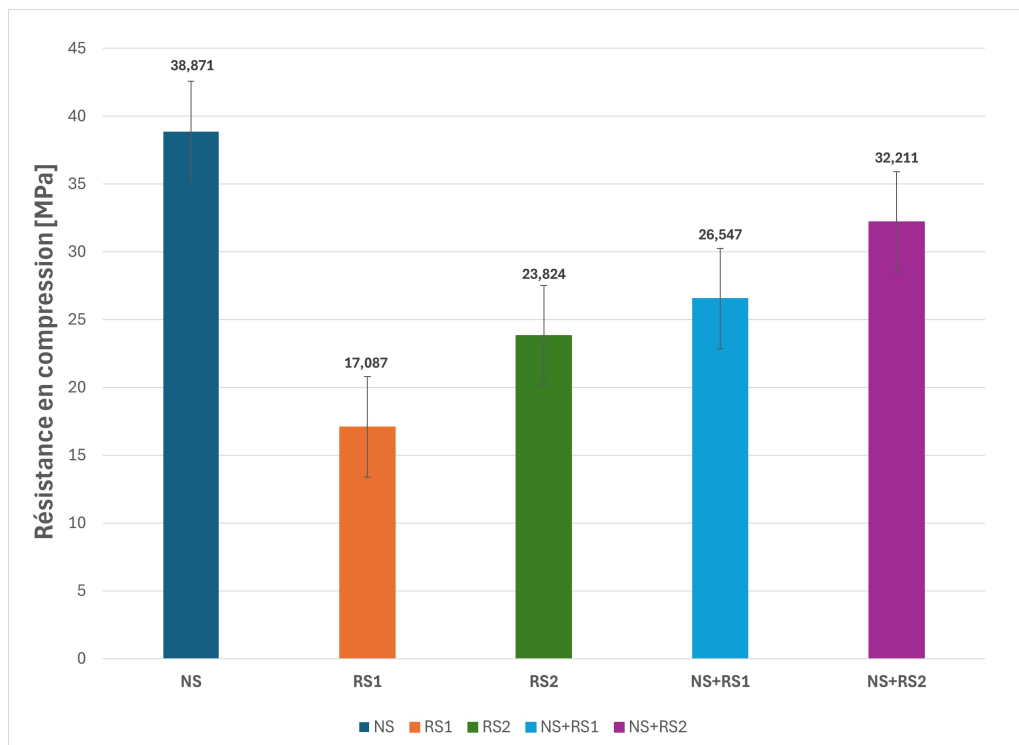


Figure 3.17 – Résistances à la compression moyennnées des mélanges sans agent à 7 jours

Les résultats obtenus après 7 jours de cure humide pour les mortiers sans agent expansif révèlent des écarts notables de performances mécaniques, principalement influencés par la nature du sable

utilisé et les paramètres de formulation associés. Le mortier de référence (NS), élaboré avec du sable naturel, présente une résistance moyenne élevée de 39 MPa, traduisant une microstructure dense, peu poreuse, et un bon développement des produits d'hydratation. Cette performance résulte de la faible teneur en fines du sable naturel, de sa faible absorption d'eau (0,65 %) et d'un rapport eau/liant (E/L) optimisé à 0,50, favorable à une bonne compacité et à un faible volume de pores capillaires.

En comparaison, le mortier contenant exclusivement du sable recyclé RS1 présente une chute importante de résistance, atteignant 17 MPa, soit une diminution de plus de 55 % par rapport au mortier de référence. Plusieurs facteurs concourent à cette dégradation. D'abord, RS1 affiche une teneur en fines élevée (7,79 %), ce qui augmente la surface spécifique des solides et donc la demande en eau du système. Ensuite, son fort pouvoir d'absorption d'eau (12,5 %) mobilise une partie significative de l'eau de gâchage, susceptible de perturber localement l'hydratation du ciment. Bien que l'eau absorbée ait été compensée dans la formulation, ces mécanismes demeurent pénalisants, car l'absorption reste lente et non instantanée. De plus, le rapport E/L appliqué à ce mélange était de 0,60, donc plus élevé que celui du mélange de référence, ce qui contribue à une porosité globale plus importante et à une baisse de résistance.

Le mortier formulé avec le sable recyclé RS2 atteint une résistance moyenne de 24 MPa (–39 % par rapport au mélange NS). Cette performance relativement meilleure que celle de RS1 s'explique par une teneur en fines plus faible (3,44 %), limitant la demande en eau et améliorant le comportement rhéologique, ainsi que par une absorption d'eau moindre (5,88 %), réduisant les perturbations hydriques internes. Le même rapport E/L de 0,60 a été utilisé ici, mais son impact est partiellement compensé par une meilleure compacité granulaire et une microstructure plus cohérente que dans le cas du RS1.

Les substitutions à 50% confirment ces tendances. Le mélange NS+RS1 (50/50%) présente une résistance moyenne de 26,5 MPa, soit une amélioration notable par rapport au RS1 pur, mais toujours inférieure au témoin (–32 %). Le rapport E/L de ce mélange a été fixé à 0,55, intermédiaire entre les deux cas extrêmes, ce qui réduit légèrement la porosité par rapport au mélange RS1 tout en permettant un meilleur enrobage des fines. La diminution relative de la quantité de RS1 limite par ailleurs les effets délétères de sa forte absorption et de sa charge en fines.

Le mélange NS+RS2 (50/50%) atteint quant à lui 32,2 MPa (–17 % par rapport à NS), ce qui traduit un bon compromis. La combinaison d'un rapport E/L de 0,55, d'une absorption plus modérée, et d'une granulométrie plus favorable à la densification permet de préserver une structure relativement performante, proche du mortier de référence.

Il est important de noter que pour chaque formulation, l'eau correspondant à la capacité d'absorption du sable a été déterminée expérimentalement et ajoutée en plus de l'eau calculée selon le rapport E/L cible, afin de garantir un E/L effectif cohérent entre les mélanges. Cependant, cette correction ne permet pas d'annuler totalement les effets liés à l'absorption différée ou aux interactions fines/eau, qui influencent encore la compacité locale et la distribution de l'eau disponible pour l'hydratation du liant.

En résumé, les performances mécaniques des mélanges sans agents à 7 jours sont fortement corrélées à la teneur en fines, à l'absorption d'eau des sables, et au rapport E/L choisi. Le sable RS1, cumulant une absorption élevée et une fraction fine importante, dégrade nettement les résistances, tandis que le sable RS2, plus modéré sur ces deux aspects, permet de préserver une part significative des performances initiales, surtout en substitution partielle avec du sable naturel.

3.3.2 Résistances à la compression des mélanges avec agent expansif de type K à 7 jours

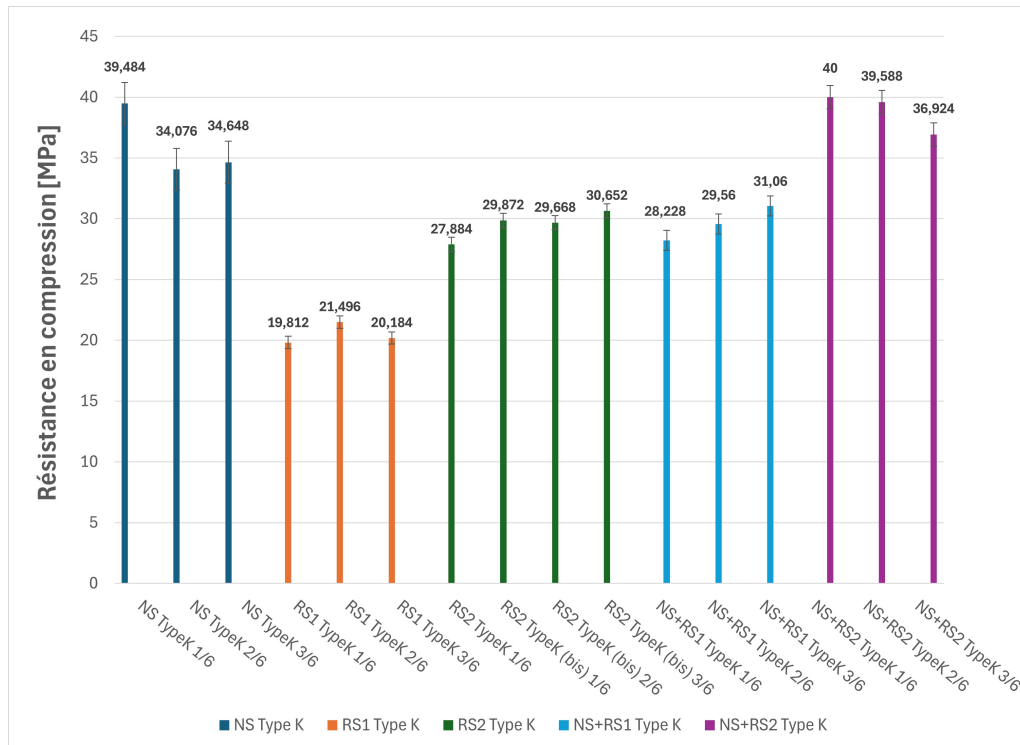


Figure 3.18 – Résistances à la compression des mélanges avec agent de type K à 7 jours

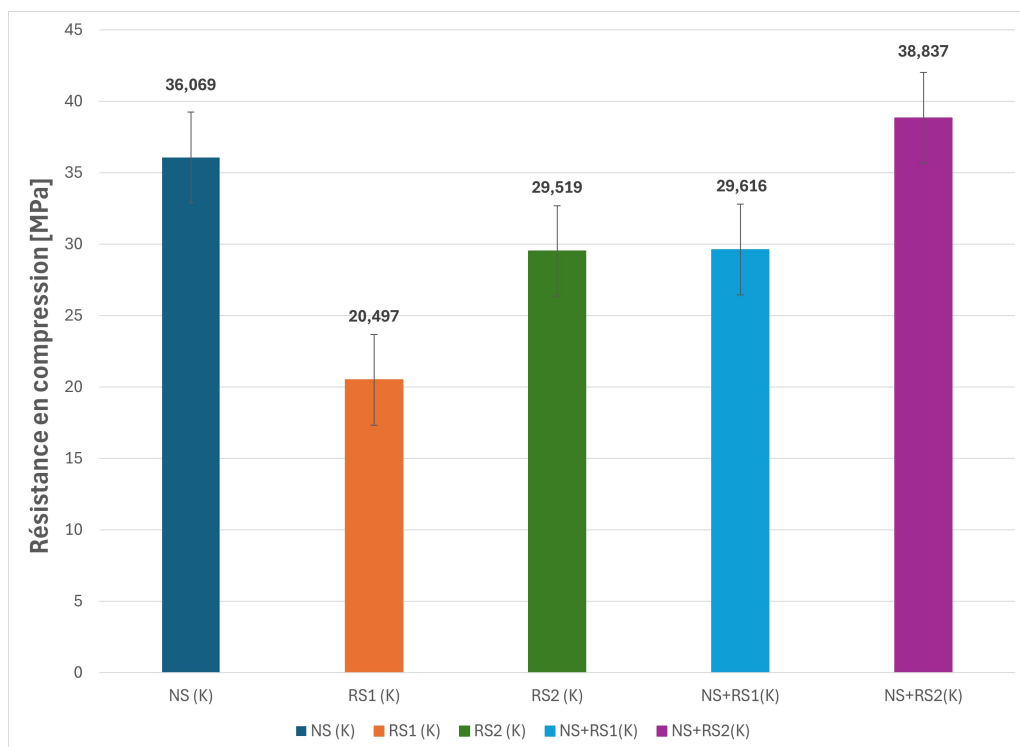


Figure 3.19 – Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type K à 7 jours

L'intégration d'un agent expansif de type K, à base de sulfoaluminate de calcium, modifie sensiblement le comportement mécanique des mortiers à 7 jours.

Le mortier de référence (NS Type K) atteint une résistance moyenne de 36 MPa, légèrement inférieure à celle du témoin sans agent (39 MPa). Cette valeur reste élevée et reflète une bonne densité de la matrice cimentaire. Le rapport E/L de 0,50, associé à la faible absorption d'eau du sable naturel (0,65 %), permet de maîtriser la porosité capillaire. La différence observée entre les deux résistances pourrait s'expliquer par le fait que l'effet de l'agent expansif de Type K n'a pas été pleinement exploité en raison des conditions de cure humide mises en place.

Le mortier contenant exclusivement du sable recyclé RS1 (RS1 type K) présente une résistance moyenne de 20,5 MPa (-43 % par rapport à NS type K). Bien que supérieure à celle de RS1 sans agent (17 MPa), cette valeur reste faible. Cette amélioration relative résulte de l'action de l'agent de type K, dont la formation d'ettringite secondaire compense en partie les effets négatifs liés à la structure poreuse du mélange. Néanmoins, les caractéristiques du sable RS1 restent pénalisantes : sa teneur en fines élevée (7,79 %) accentue la demande en eau, et sa forte absorption (12,5 %), bien que compensée dans la formulation, retarde localement l'hydratation. Le rapport E/L élevé (0,60) accentue encore cette porosité globale.

Le mortier RS2 type K atteint une résistance moyenne de 29,5 MPa (-18 % par rapport à la référence NS type K), soit une performance nettement supérieure à celle de RS1 K. Cette différence s'explique par la teneur en fines plus modérée de RS2 (3,44 %), qui limite la demande en eau, et par une absorption d'eau moins extrême (5,88 %), plus facilement compensée dans la formulation. Le rapport E/L est identique (0,60), mais les propriétés physiques plus favorables du sable RS2 permettent une meilleure cohésion de la pâte et une densification efficace sous l'effet de l'expansion liée à la formation d'ettringite.

Les substitutions partielles à 50% confirment ces observations. Le mélange NS+RS1 type K développe une résistance de 29,6 MPa, soit une progression marquée par rapport à RS1 seul, bien qu'encore inférieure au mélange NS type K (-18%). Cette amélioration découle d'une dilution de la teneur en fines et d'une réduction de la porosité induite, grâce à un rapport E/L intermédiaire de 0,55. De plus, l'agent de type K agit efficacement dans ce milieu moins défavorable que RS1 pur.

À l'opposé, le mélange NS+RS2 type K atteint une résistance de 38,8 MPa, soit une valeur supérieure au mortier de référence sans agent. Ce résultat reflète un effet synergique optimal entre la granulométrie équilibrée de RS2, le rapport E/L maîtrisé (0,55) et la réaction d'expansion contrôlée. La porosité initiale réduite du système permet à l'ettringite secondaire de remplir utilement les vides capillaires sans provoquer de microfissuration, aboutissant à une microstructure dense et mécaniquement performante.

En résumé, l'intégration de l'agent expansif de type K influence les performances mécaniques des mortiers à 7 jours, avec des effets étroitement liés aux propriétés des sables et au rapport E/L. Les mortiers à base de sable naturel (NS) conservent une résistance élevée grâce à une faible absorption et une porosité maîtrisée, tandis que les sables recyclés (RS1 et RS2) voient leur performance modulée par la teneur en fines et la capacité d'absorption. L'agent de Type K améliore légèrement les résistances à la compression et densifie la microstructure par la formation d'ettringite secondaire, bien que cette formation reste limitée par l'apport d'eau, compensant partiellement les effets défavorables des granulats recyclés. Les substitutions partielles à 50% montrent un effet bénéfique en combinant un granulat naturel et recyclé, en particulier le mélange NS+RS2 type K, permettant une densification optimale et une résistance proche, voire supérieure, à celle des références.

3.3.3 Résistances à la compression des mélanges avec agent de type G à 7 jours

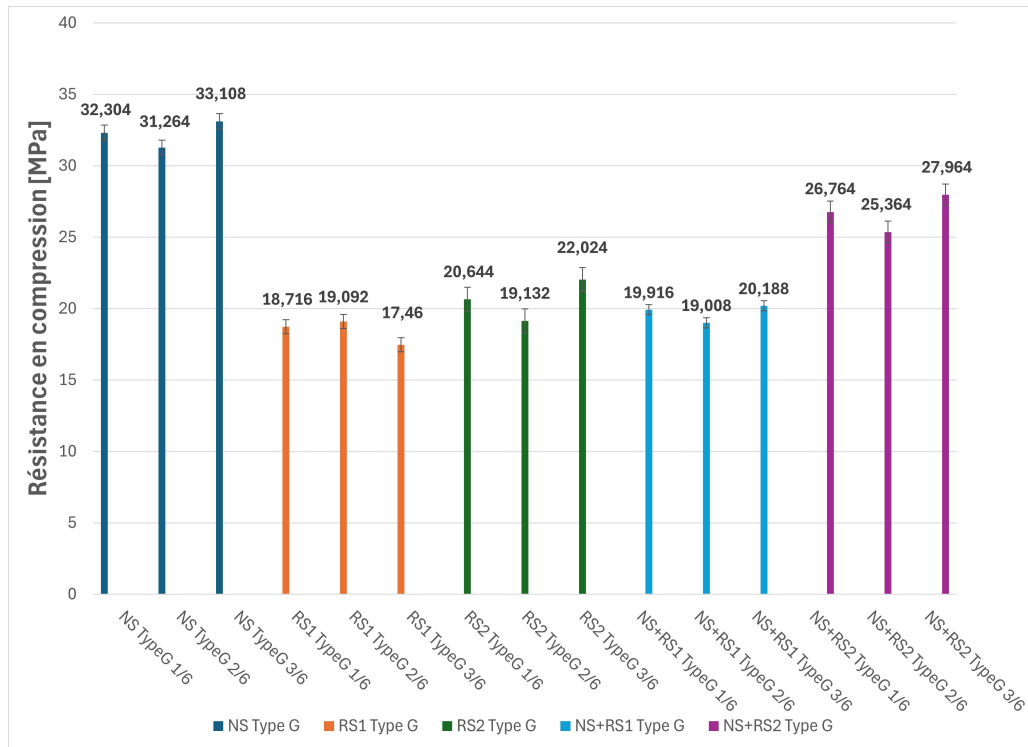


Figure 3.20 – Résistances à la compression des mélanges avec agent de type G à 7 jours

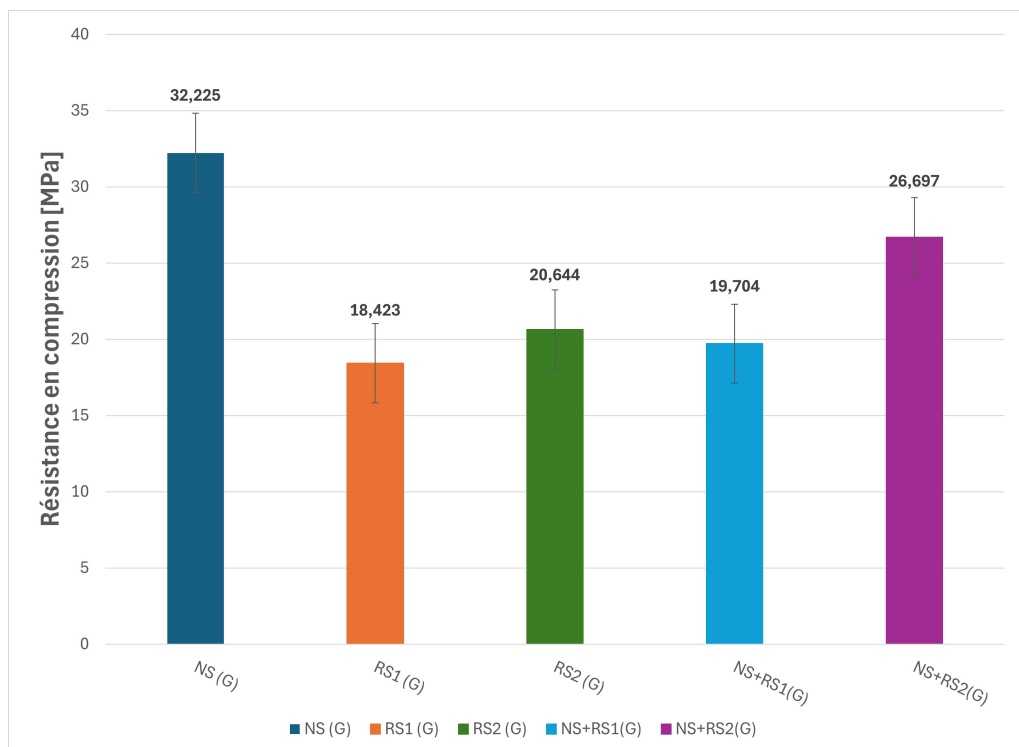


Figure 3.21 – Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type G à 7 jours

L'incorporation d'un agent expansif de type G, généralement constitué de chaux vive (CaO), s'avère dans la plupart des cas pénalisante pour la résistance à la compression des mortiers. Pour le mortier NS type G, la résistance moyenne atteint 32,2 MPa, légèrement inférieure à celle des mélanges NS sans agent ou NS avec agent de type K. Cette diminution est attribuable à l'expansion rapide due à l'hydratation exothermique de la chaux vive, qui forme de la portlandite (Ca(OH)_2) et génère des contraintes internes dans la matrice. La faible absorption du sable naturel (0,65%) et le rapport E/L modéré (0,50) limitent partiellement ces désordres, mais la portlandite, peu résistante mécaniquement, augmente la porosité et peut favoriser l'apparition de fissures très fines au sein de la matrice.

Dans le cas du RS1 type G, la résistance chute encore davantage à 18,4 MPa, à peine supérieure à celle du mélange RS1 sans agent (17 MPa), soulignant que l'effet de l'agent de type G y est très limité. La forte teneur en fines (7,79%) et l'absorption élevée (12,5%) du RS1 rendent le système particulièrement sensible aux déséquilibres hydriques. Même avec un apport d'eau compensatoire et un rapport E/L de 0,60, l'expansion de la chaux vive se produit dans un milieu déjà poreux, favorisant l'apparition de fissures très fines qui accroissent la porosité et limitent le gain de densité et de résistance.

Le mortier RS2 type G, avec une résistance moyenne de 20,6 MPa, montre un comportement légèrement meilleur. Cela s'explique par les propriétés physiques plus favorables du sable RS2 (teneur en fines 3,44 %, absorption de 5,88 %). Toutefois, le rapport E/L élevé (0,60), combiné à la nature chimique de l'agent G, ne permet pas d'obtenir une structure aussi dense que dans le cas de l'agent K. La portlandite générée reste une phase peu cohésive, susceptible d'augmenter la vulnérabilité de la matrice.

Les substitutions à 50% suivent la même tendance. Le mélange NS+RS1 type G atteint 19,7 MPa, ce qui constitue une amélioration marginale par rapport au mélange RS1 type G seul. Le rapport E/L intermédiaire (0,55) permet une réduction modérée de la porosité, mais le comportement du RS1 reste trop pénalisant pour que l'agent G puisse exercer un effet favorable. Le mélange NS+RS2 type G atteint 26,7 MPa (-17 % par rapport à la formulation de référence NS type G), indiquant une meilleure compatibilité. Ici encore, le caractère plus stable du sable RS2 et le contrôle plus précis de l'eau absorbée permettent une microstructure moins altérée par l'expansion.

Globalement, l'incorporation d'un agent expansif de type G tend à diminuer la résistance à la compression des mortiers, surtout dans les formulations à forte teneur en fines et à haute absorption, comme RS1. Pour les mortiers à sable naturel (NS), l'effet est limité mais observable, lié à l'expansion rapide de la chaux vive et à la formation de portlandite peu cohésive, qui augmente la porosité et peut générer des fissures très fines. Les mortiers à sable recyclé plus favorable, comme RS2, montrent des résistances légèrement meilleures, grâce à une absorption plus faible et une teneur en fines réduite, mais restent inférieures aux formulations de référence ou aux agents de type K. Les mélanges partiels (50% substitutions) confirment cette tendance. L'agent de type G apporte au mieux un léger gain dans des conditions de sable et de rapport E/L plus favorables, mais reste généralement pénalisant pour la densité et la résistance mécanique des mortiers.

3.3.4 Comparaison des résistance à la compression des mélanges à 7 jours

L'analyse comparative montre que les performances mécaniques à 7 jours dépendent de l'interaction complexe entre la nature du sable, le type d'agent expansif, le rapport E/L et la gestion de l'eau absorbée. Toutes les formulations ont été corrigées en eau pour compenser l'absorption mesurée des sables. Toutefois, cette correction ne supprime pas l'impact des caractéristiques physiques des sables (notamment leur absorption différée et la répartition des fines), ni celui du rapport E/L imposé à chaque formulation.

- Sans agent expansif, le sable naturel assure les meilleures performances grâce à sa faible absorption, sa faible teneur en fines, et un E/L réduit (0,50). Le RS1, à l'inverse, cumule un E/L élevé (0,60), une absorption importante (12,5 %) et une charge en fines excessive (7,79 %), conduisant à une forte perte de résistance. Le RS2, mieux équilibré, offre de meilleures performances, notamment en substitution partielle.
- Avec l'agent de type K, les résistances augmentent sensiblement. L'expansion contrôlée liée à la formation d'ettringite secondaire densifie la matrice, particulièrement dans les cas où les propriétés physiques du sable ne sont pas trop défavorables (comme avec RS2). Le couple NS+RS2 type K constitue ainsi la meilleure combinaison, atteignant 38,8 MPa.
- Avec l'agent de type G, les résistances sont presque systématiquement inférieures. La réaction brutale de la chaux vive génère de la portlandite et de la chaleur, ce qui, dans un système poreux ou contenant des fines, favorise la microfissuration. L'effet est aggravé avec RS1, et plus limité avec RS2.

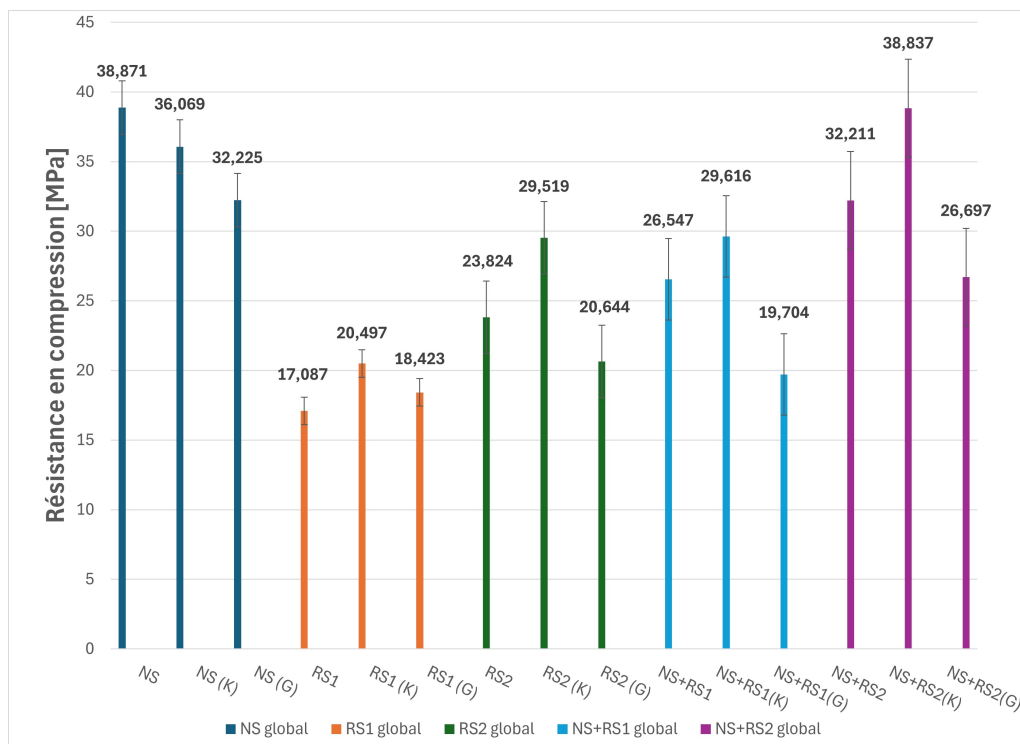


Figure 3.22 – Comparaison des résistances à la compression des mélanges à 7 jours

3.3.5 Résistances à la compression des mélanges sans agents à 28 jours

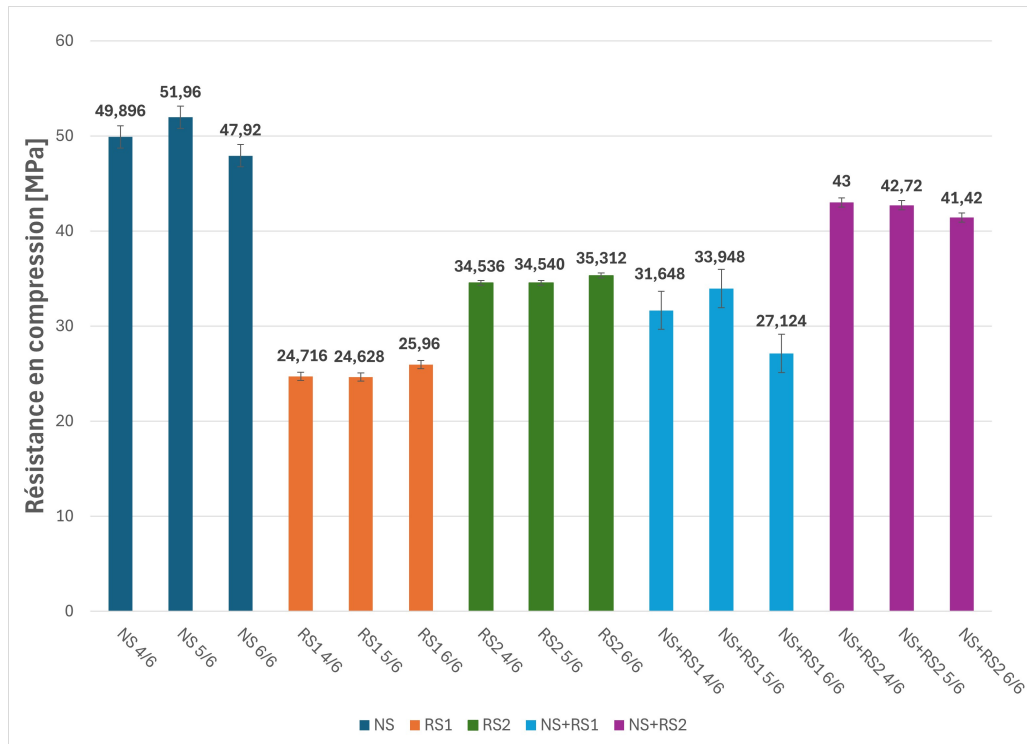


Figure 3.23 – Résistances à la compression des mélanges sans agent à 28 jours

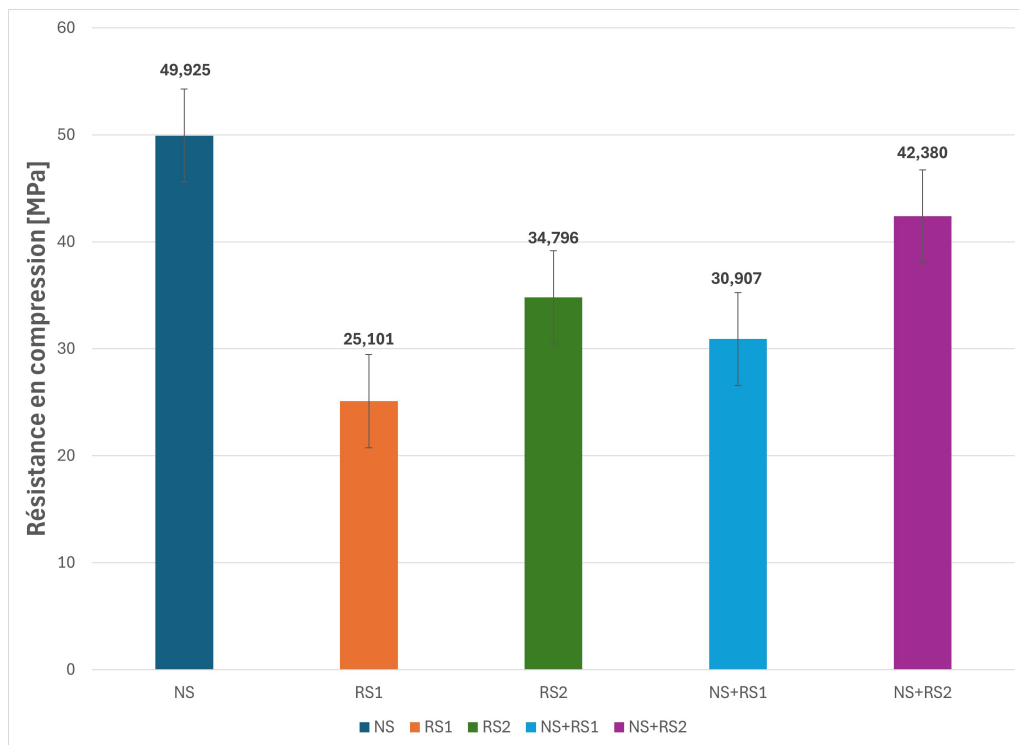


Figure 3.24 – Résistances à la compression moyennées des mélanges sans agent à 28 jours

Après 28 jours de cure à l'air libre dans la chambre humide, le mortier de référence (NS) présente la résistance la plus élevée (49,93 MPa). Cette performance traduit la faible porosité finale et la

bonne compacité offertes par le sable naturel, dont la faible teneur en fines limite la demande en pâte et favorise la formation d'une microstructure dense.

L'utilisation exclusive du sable recyclé RS1 réduit significativement la résistance moyenne à 25,10 MPa. Cette baisse ne peut pas être attribuée à un déficit initial en eau, puisque l'eau correspondant à son absorption (12,5%) a été ajoutée en supplément du rapport E/L. Elle s'explique plutôt par la porosité intrinsèque plus élevée de RS1 et par sa teneur importante en fines (7,79%), qui augmente la surface spécifique à enrober et nécessite une quantité plus importante de pâte pour enrober correctement les grains. Cette redistribution de la pâte vers l'enrobage des particules réduit la quantité disponible pour combler les vides dans la matrice, conduisant à une structure finale plus poreuse et moins résistante.

Le sable recyclé RS2, avec une absorption d'eau plus modérée (5,88%) et une teneur en fines plus faible (3,44%), présente un meilleur comportement mécanique (34,80 MPa). Bien que la correction en eau ait supprimé tout déficit hydrique initial, sa moindre demande en pâte permet de limiter les vides résiduels et de former une microstructure plus compacte que celle observée avec RS1.

En substitution partielle, NS+RS1 atteint 30,91 MPa, montrant que l'apport de sable naturel compense partiellement la porosité élevée du RS1.

Le mélange NS+RS2 (42,38 MPa) conserve une résistance proche du mélange de référence, confirmant que la combinaison de RS2 avec du sable naturel limite les pertes de compacité et maintient la continuité de la matrice cimentaire.

3.3.6 Résistance à la compression des mélanges avec agent expansif de type K à 28 jours

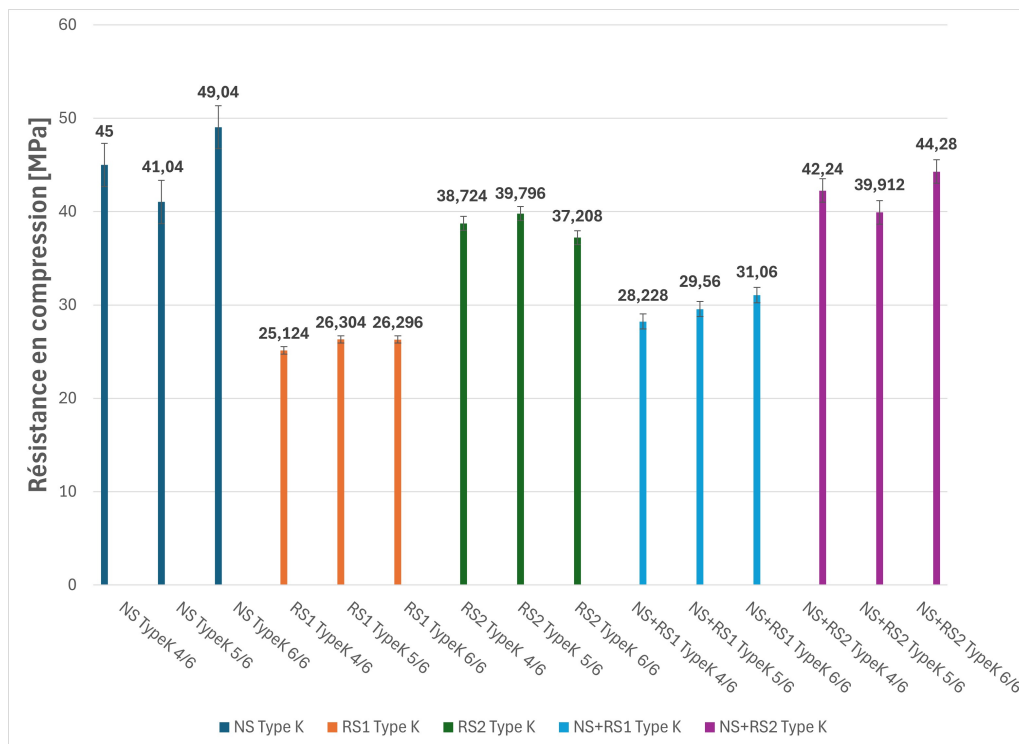


Figure 3.25 – Résistances à la compression des mélanges avec agent de type K à 28 jours

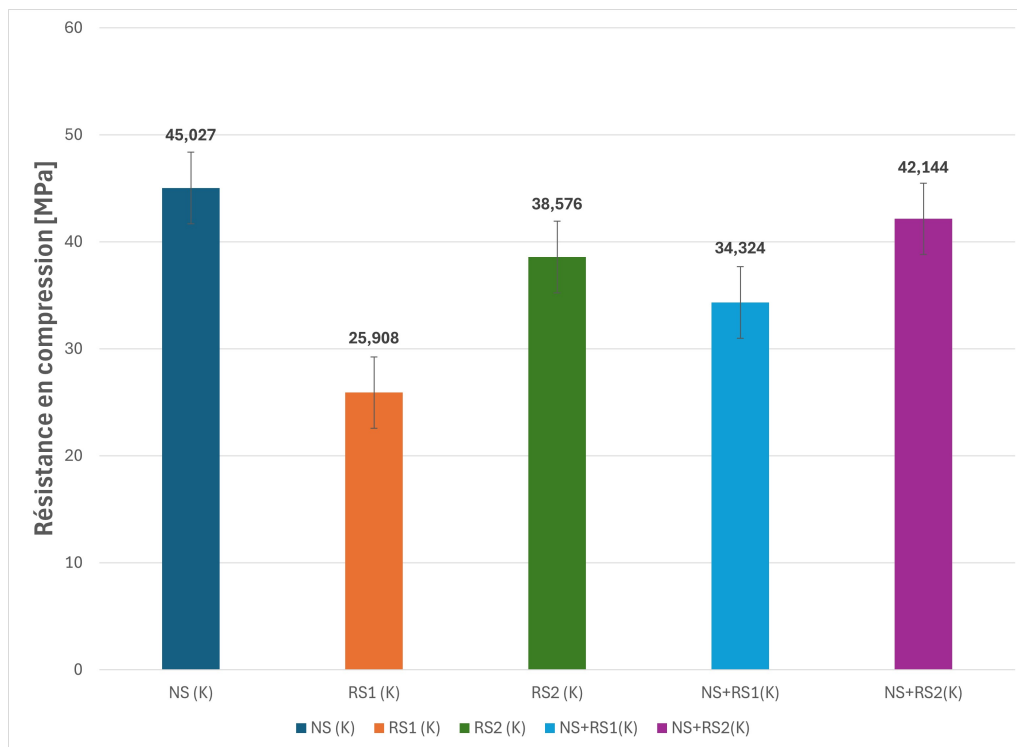


Figure 3.26 – Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type K à 28 jours

L'incorporation de l'agent expansif de type K entraîne globalement une amélioration ou un maintien des résistances à long terme, bien que la formation d'ettringite secondaire puisse rester incomplète dans les conditions de cure humide utilisées. Ce type d'agent, riche en aluminates et sulfates, favorise normalement la cristallisation d'ettringite expansive lors de l'hydratation, permettant de combler les pores capillaires précoces et de limiter le développement de microfissures par retrait.

Le mortier NS type K atteint 45,03 MPa, soit une légère diminution par rapport au mélange de référence sans agent, probablement due à une redistribution locale des contraintes générée par l'expansion. Pour la formulation RS1 type K (25,91 MPa), l'effet bénéfique reste limité : malgré l'ajustement de l'eau pour compenser l'absorption, la porosité élevée et la forte teneur en fines réduisent l'efficacité du mécanisme de densification induit par l'ettringite.

Le mélange RS2 type K (38,58 MPa) montre un gain plus marqué : sa porosité plus faible et sa demande en pâte réduite permettent à l'ettringite de se former dans un réseau capillaire plus restreint, optimisant la densification. En substitution partielle, le mélange NS+RS1 type K (34,32 MPa) améliore nettement la performance par rapport à la formulation RS1 seule, tandis que le mélange NS+RS2 type K (42,14 MPa) conserve des performances proches du mélange NS+RS2 sans agent, indiquant un effet stabilisateur de l'agent K.

Ainsi, dans la plupart des cas étudiés, l'agent de type K contribue positivement aux résistances, mais la densification et l'effet bénéfique sont limités par la formation incomplète d'ettringite dans les conditions réelles de cure humide.

3.3.7 Résistance à la compression des mélanges avec agent expansif de type G à 28 jours

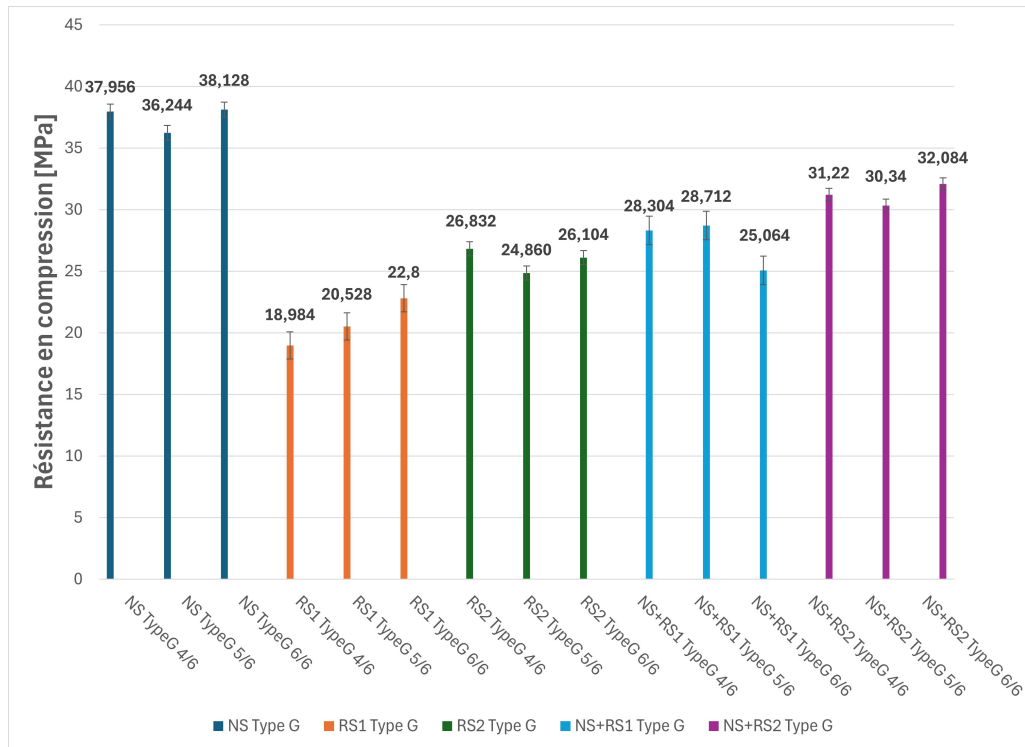


Figure 3.27 – Résistances à la compression des mélanges avec agent de type G à 28 jours

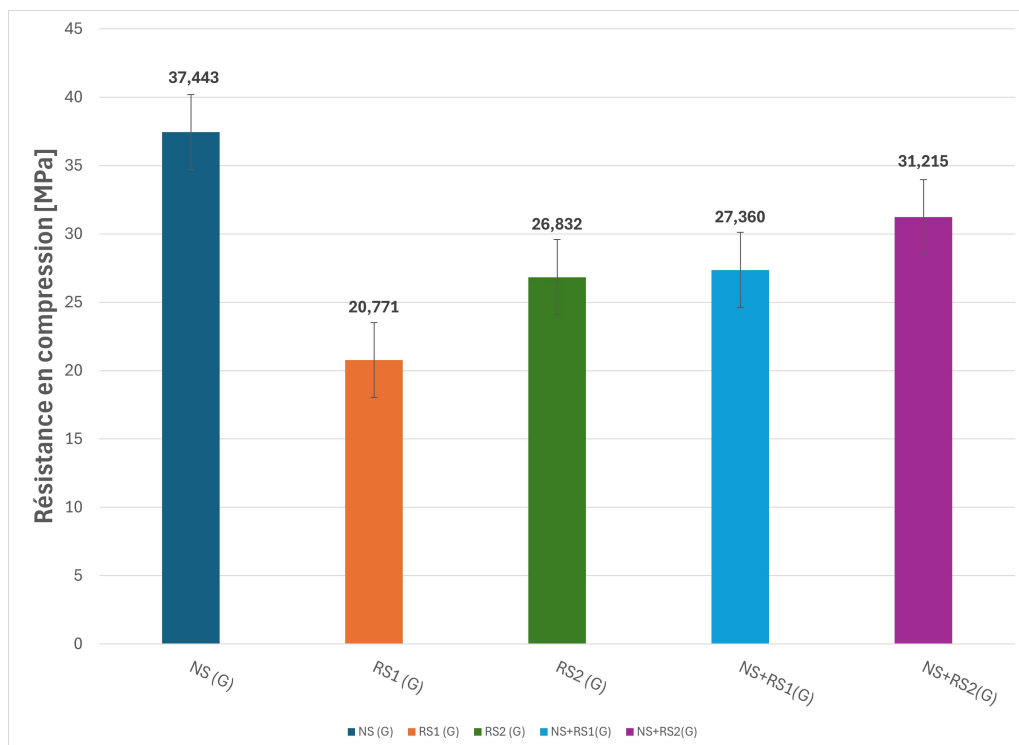


Figure 3.28 – Résistances à la compression moyennnées des mélanges avec agent de type G à 28 jours

L'agent expansif de type G, constitué principalement de chaux vive (CaO), agit par hydratation rapide, formant de la portlandite (Ca(OH)_2) avec dégagement de chaleur et expansion importante. Cette expansion, se produisant très précocement, peut induire des microfissures avant que la pâte n'ait atteint une résistance suffisante pour les contenir.

Le mortier NS type G atteint 37,44 MPa, ce qui tend à confirmer que cet agent tend à fragiliser la matrice par sa cinétique rapide. En ce qui concerne le mélange RS1 type G (20,77 MPa), les effets combinés de la porosité intrinsèque élevée et de la proportion importante de fines accentuent la sensibilité aux microfissures induites par l'expansion.

La formulation RS2 type G (26,83 MPa) présente de meilleures performances que le mélange RS1 type G, mais reste inférieur à celles du mélange RS2 sans agent, ce qui suggère que l'expansion rapide de l'agent G réduit la cohésion interne même dans une matrice moins poreuse. Les substitutions partielles NS+RS1 type G (27,36 MPa) et NS+RS2 type G (31,21 MPa) confirment cette tendance, avec des résistances inférieures aux formulations équivalentes sans agent.

En synthèse, l'agent expansif de type G entraîne une expansion très rapide dès les premières heures, ce qui peut provoquer des microfissures avant que la matrice n'ait atteint sa résistance. Cette cinétique rapide fragilise globalement le mortier, comme le montrent les résistances plus faibles des formulations NS et RS, seules ou combinées, par rapport à leurs équivalents sans agent. L'effet est particulièrement marqué pour les mélanges plus poreux ou riches en fines, soulignant la sensibilité des mortiers à l'expansion précoce de l'agent G.

3.3.8 Comparaison des résistance à la compression des mélanges à 28 jours

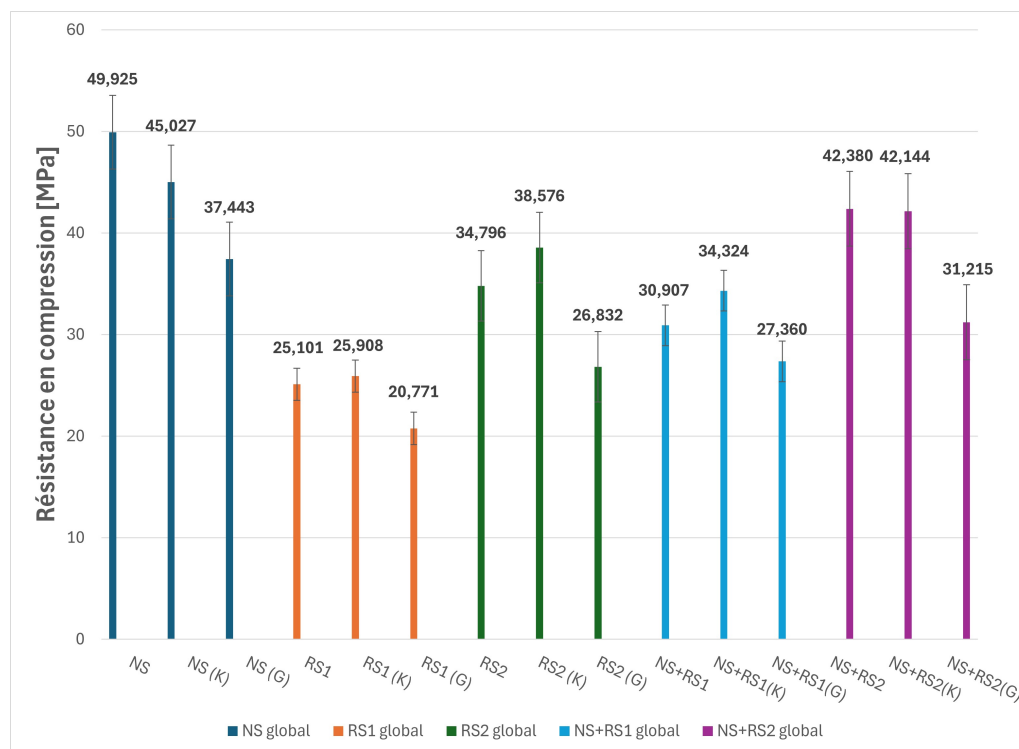


Figure 3.29 – Comparaison des résistances à la compression des mélanges à 28 jours

La comparaison des résistances à la compression à 28 jours doit être considérée en tenant compte de plusieurs facteurs interdépendants. D'une part, les propriétés intrinsèques des matériaux, telles que la porosité interne, la taille et la distribution des fines, exercent une influence déterminante sur la cohésion et la densité de la matrice cimentaire. D'autre part, la présence d'un agent expansif

modifie la cinétique d'hydratation et peut induire des déformations internes précoces, affectant la résistance finale. Ainsi, l'analyse comparative des performances mécaniques ne peut être dissociée de l'interaction entre la nature du matériau et l'effet des adjuvants expansifs, qui combinés, gouvernent la capacité du mortier à résister aux sollicitations à long terme.

- RS1 : forte porosité + teneur élevée en fines → demande en pâte importante → moins de pâte disponible pour combler les vides → résistance réduite.
- RS2 : porosité plus faible + plus faible teneur en fines → compacité accrue → résistance plus élevée.

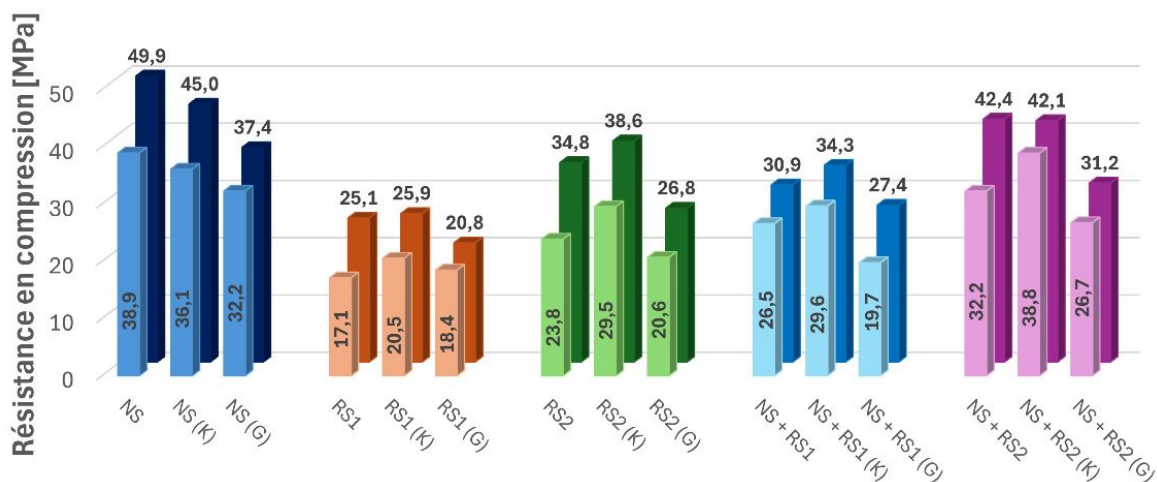
Concernant les agents expansifs :

- Type K : favorise légèrement la densification par formation d'ettringite secondaire, avec un effet plus marqué lorsque la porosité initiale est modérée (cas du RS2)
- Type G : expansion rapide et précoce, génératrice de microfissures, effet amplifié dans des matrices initialement plus poreuses (cas du RS1).

En résumé, l'association du sable recyclé RS2 avec l'agent expansif de type K apparaît comme l'option la plus performante, combinant la valorisation d'un sable recyclé à des résistances mécaniques élevées à 28 jours. On peut toutefois s'attendre à des valeurs encore différentes si la cure humide avait consisté en une immersion dans de l'eau de chaux, favorisant une hydratation plus complète et une cohésion accrue de la matrice.

3.3.9 Comparaison graphique globale des résistances à la compression des différents mélanges

Cette sous-section a pour objectif de présenter de manière synthétique l'ensemble des résultats de résistance à la compression obtenus pour tous les mélanges étudiés. Elle illustre simplement les variations de performance entre les différentes formulations, en mettant en évidence l'influence combinée des types de sable et de la présence éventuelle d'agents expansifs sur les résistances à 7 jours et à 28 jours.



Visualisation en perspective des résistances moyennes : 7 jours à l'avant-plan, 28 jours à l'arrière-plan.

Figure 3.30 – Résistances moyennes en compression des mélanges à 7 et à 28 jours

3.3.10 Résistance à la traction indirecte par fendage

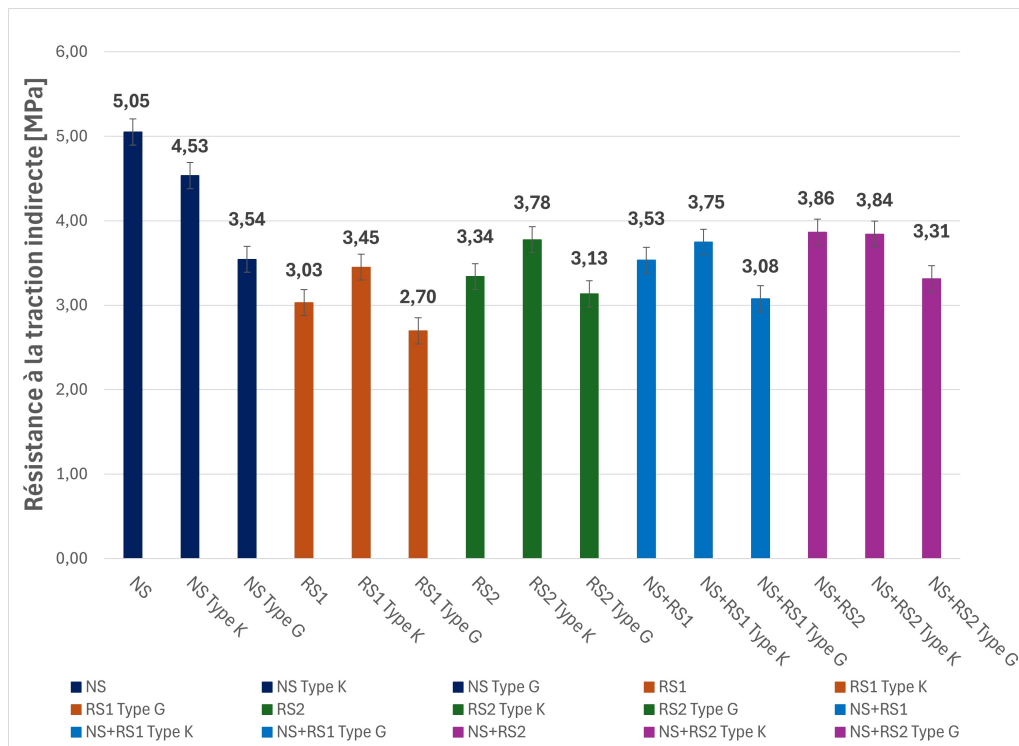


Figure 3.31 – Comparaison des résistances à la traction indirecte par fendage des différents mélanges

L'essai de traction indirecte par fendage met en évidence une tendance générale similaire à celle observée pour la résistance en compression, mais avec des différences marquées selon la nature des sables et la présence d'agents expansifs.

La formulation de référence à base de sable naturel (NS) présente la valeur la plus élevée, atteignant 5,05 MPa, ce qui confirme la meilleure compacité et la cohésion plus forte de la matrice cimentaire lorsqu'aucun granulat recyclé n'est incorporé. L'incorporation de l'agent expansif de type K entraîne une légère diminution de la résistance mesurée par traction indirecte (fendage). Cette baisse s'explique par une formation partielle d'ettringite secondaire, limitée par la quantité d'eau disponible pour la réaction entre le sulfoaluminat de calcium et les aluminates du ciment. L'apport d'eau insuffisant réduit la densification de la matrice, ce qui limite la cohésion interne et se traduit par une résistance au fendage moins élevée que celle attendue. Cependant, cette diminution reste limitée et ne remet pas en cause la bonne performance globale de la formulation à base de sable naturel. L'incorporation de l'agent G, en revanche, entraîne une chute plus prononcée (3,54 MPa, soit –30%), conséquence de l'hydratation rapide de la chaux vive qui provoque une expansion brutale et des microfissures persistantes.

La substitution par un sable recyclé de type RS1 se traduit par une baisse marquée de la résistance (3,03 MPa, soit –40% par rapport à la formulation NS). Cette diminution est liée à une compacité moins favorable et à une interface pâte-granulat affaiblie par la présence de mortier résiduel poreux. L'ajout de l'agent K, dans ce cas, améliore sensiblement la performance (3,45 MPa), ce qui montre que la réaction expansive contribue ici à compenser les défauts de compacité en densifiant localement la microstructure. L'agent G, en revanche, accentue la dégradation (2,70 MPa).

Le sable recyclé RS2 présente un comportement plus favorable que RS1, avec une résistance de 3,34 MPa, ce qui traduit une granulométrie et une compacité mieux adaptées. L'ajout de l'agent K

améliore également la performance (3,78 MPa), confirmant son effet bénéfique dans la majorité des cas. L'agent G induit, comme pour les autres mélanges, une baisse significative (3,13 MPa).

Les mélanges combinant sable naturel et sable recyclé montrent un meilleur équilibre. Ainsi, le mélange NS+RS1 atteint 3,53 MPa, supérieur à la formulation RS1 seul. L'agent K renforce légèrement cette valeur (3,75 MPa), alors que l'agent G la réduit (3,08 MPa). Le mélange NS+RS2 obtient la meilleure performance parmi les formulations avec du sable recyclé (3,86 MPa), se rapprochant de la référence avec le sable naturel. Dans ce cas, l'effet du K est quasiment neutre (3,84 MPa), tandis que l'agent G entraîne une diminution (3,31 MPa).

De manière générale, les résultats montrent que l'incorporation de sable recyclé induit une perte de résistance en traction, plus marquée avec RS1 qu'avec RS2. L'association avec du sable naturel permet toutefois de limiter cette perte, en particulier avec le mélange NS+RS2. Concernant les agents expansifs, il apparaît que l'agent K contribue dans la plupart des cas à améliorer la résistance, surtout lorsque des sables recyclés sont utilisés, grâce à l'effet de densification par ettringite secondaire. La seule exception est observée avec le sable naturel, où une légère diminution se manifeste, mais celle-ci reste limitée et ne remet pas en cause la performance de la formulation. À l'inverse, l'agent G se révèle systématiquement nuisible, son expansion rapide et désordonnée favorisant le développement de microfissures internes et entraînant une réduction notable des résistances, quelle que soit la composition.

La cure humide joue un rôle déterminant dans le développement des propriétés mécaniques des mortiers contenant un agent expansif de type K. La réaction de cet agent repose sur la formation d'ettringite secondaire, qui nécessite un apport en eau suffisant pour se développer de manière progressive et homogène au sein de la matrice cimentaire. Bien que nos conditions de cure aient été humides, elles restreignent la disponibilité immédiate d'eau par rapport à une immersion complète. Or, un apport en eau suffisant favorise à la fois la progression des réactions d'hydratation du ciment et le développement optimal de l'expansion liée à l'agent K. En conséquence, les résultats obtenus pourraient légèrement sous-estimer le potentiel de cet agent, dont l'efficacité reste étroitement liée aux conditions de cure et, en particulier, à la quantité d'eau disponible.

Chapitre 4

Positionnement par rapport aux normes

La norme belge NBN B 15-001 :2024 "*Béton - Spécification, performances, production et conformité*" a pour objectif d'apporter un complément à la norme européenne NBN EN 206 :2013+A2 :2021, "*Béton : spécification, performances, production et conformité*".

Ces deux normes permettent de spécifier différentes exigences liées aux bétons en fonction de l'utilisation qui en sera faite et des contraintes non seulement mécaniques mais aussi (par exemple) environnementales.

Ainsi, le "client" définira les performances du béton dont il a besoin en fonction de :

- (A) : la classe de résistance du béton durci.
- (B1) : le domaine d'utilisation.
- (B2) : la classe d'environnement.
- (C) : la classe de consistance du béton frais.
- (D) : la dimension maximale du gros granulat du béton.
- (E) : informations complémentaires.

Ces deux normes, si elles apportent des informations quant à la dimension des granulats, du rapport E/L, de la teneur du ciment, ..., définissent deux cibles : la résistance et la consistance.

En ce qui concerne l'aspect résistance, après calcul de la structure à réaliser, le "client" pourra déterminer la classe de résistance $C_{xx/yy}$ en fonction de la valeur minimale souhaitée et en se basant sur le tableau ci-dessous. La première valeur xx (ou encore $f_{ck/cyl}$) correspond à la résistance sur un cylindre et la valeur yy (ou encore $f_{ck/cube}$) est celle mesurée sur un cube.

Donnée de base A: choisir la classe de résistance									
CLASSE	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
$f_{ck,cyl}$	8	12	16	20	25	30	35	40	45
$f_{ck,cube}$	10	15	20	25	30	37	45	50	55
CLASSE	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115		
$f_{ck,cyl}$	50	55	60	70	80	90	100		
$f_{ck,cube}$	60	67	75	85	95	105	115		
$f_{ck,cyl}$: résistance sur cylindre (N/mm ² ; cyl. de 300 mm de hauteur x 150 mm de diam.)					Les éprouvettes sont conservées pendant 28 jours à (20±2)°C sous eau ou dans une chambre où l'humidité relative est ≥ 95 %				
$f_{ck,cube}$: résistance sur cube (N/mm ² ; cube de 150 mm de côté)									

Figure 4.1 – Choix de la classe de résistance d'un béton [10]

Une autre contrainte, dont doit tenir compte l'utilisateur dans son analyse, est le critère de la durabilité lié à l'exposition aux conditions environnementales. Si la norme européenne définit 6 classes différentes, le complément belge NBN B 15-001 :2024, lui, traduit celles-ci en 13 classes environnementales différentes.

CLASSE	DESCRIPTION
E0	Environnement non agressif (uniquement valable pour béton non armé)
EI	Application intérieure (parois intérieures des habitations ou de bureaux)
EE	Application extérieure
EE1	Pas de gel (fondation sous le niveau de gel,...)
EE2	Gel, mais pas de contact avec la pluie (garage ouvert couvert, vide sanit., passage ouvert dans un bâtiment,...)
EE3	Gel et contact avec la pluie (murs extérieurs exposés à la pluie,...)
EE4	Gels et agents de déverglaçage (éléments d'infrastructure routière,...)
ES	Environnement marin
	<i>Pas de contact avec l'eau de mer, mais bien avec de l'air marin (jusqu'à 3 km de la côte) et/ou avec de l'eau saumâtre</i>
ES1	Pas de gel (fondations sous le niveau de gel exposées à de l'eau saumâtre,...)
ES2	Gel (murs extérieurs de bâtiments en zone côtière,...)
	<i>Contact avec de l'eau de mer</i>
ES3	Éléments immergés
ES4	Éléments exposés aux marées et aux éclaboussures (murs de quai,...)
EA	Environnement agressif (toujours en combinaison avec une des classes d'environnement ci-dessus)
EA1	Environnement à faible agressivité chimique
EA2	Environnement d'agressivité chimique modérée
EA3	Environnement à forte agressivité chimique

Figure 4.2 – Classes d'environnement [10]

En fonction des éléments cités ci-dessus et rapport eau/liant (noté $T(E/L)$), il est possible de déterminer un tableau ci-dessous qui tient compte de ces différents facteurs et qui définit les critères à respecter. Différentes applications peuvent ainsi être illustrées en fonction des différentes classes dont il est question dans le schéma ci-dessous :

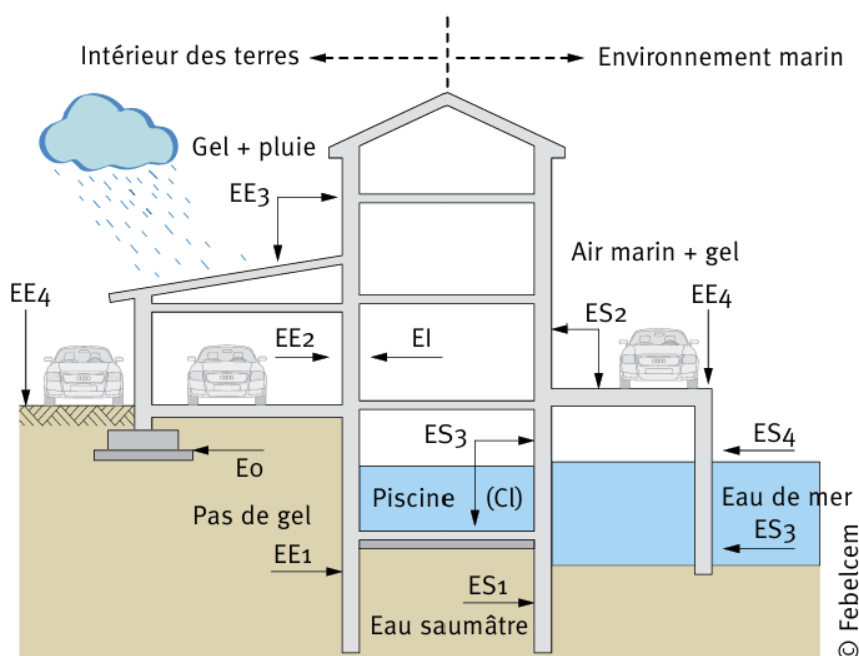


Figure 4.3 – Illustration des différentes classes d'environnement selon la classification de la norme NBN B 15-001 [11]

Classe d'environnement		Exigences de durabilité			
symb.	Description	BNA		BA ou BP	
		Type de béton	Autres exigences	Type de béton	Autres exigences
E0	Environnement non agressif	T(1,00)	(6)		
EI	Application intérieure	T(1,00)		T(0,65)	
EE	Application extérieure				
EE1	Pas de gel	T(1,00)		T(0,60)	
EE2	Gel, mais pas de contact avec la pluie	T(0,55)	(1) (3) (4)	T(0,55)	(1) (2) (3) (4)
EE3	Gel et contact avec la pluie	T(0,55)	(1) (3) (4)	T(0,50)	(1) (2) (3) (4)
EE4	Gel et agents de déverglaçage (présence d'eau contenant des agents de déverglaçage provenant soit de sa fonte sur place, soit de projections, soit de ruissellement)	T(0,45) ou T(0,50)A	(1) (3) (4) (7)	T(0,45) ou T(0,45)A	(1) (2) (3) (4) (7)
ES	Environnement marin				
	Pas de contact avec de l'eau de mer, mais bien avec de l'air marin (jusqu'à 3 km de la côte) et/ou avec de l'eau saumâtre				
ES1	Pas de gel	T(0,60)		T(0,50)	
ES2	Gel	T(0,55)	(1) (3) (4)	T(0,50)	(1) (2) (3) (4)
	Contact avec de l'eau de mer				
ES3	Éléments immergés	T(0,55)		T(0,45)	
ES4	Éléments exposés aux marées et aux éclaboussures	T(0,45) ou T(0,50)A	(1) (3) (4) (7)	T(0,45) ou T(0,45)A	(1) (2) (3) (4) (7)
EA	Environnement agressif				
EA1	Environnement à faible agressivité chimique suivant le tableau 2 du NBN EN 206-1:2001	T(0,55)	(5) (8)	T(0,55)	(5) (8)
EA2	Environnement d'agressivité chimique modérée suivant le tableau 2 du NBN EN 206-1:2001	T(0,50)	(5) (8)	T(0,50)	(5) (8)
EA3	Environnement à forte agressivité chimique suivant le tableau 2 du NBN EN 206-1:2001	T(0,45)	(5) (8)	T(0,45)	(5) (8)

(1) La résistance au gel des granulats doit être mesurée suivant la norme NBN EN 1367-1:2000 ou NBN EN 1367-2:1998.
(2) En cas d'utilisation de ciment CEM I et ajout de plus de 33 % de cendres volantes par rapport à la teneur en ciment, la valeur du coefficient k est 0.
En cas d'utilisation de ciment CEM III/A et ajout de plus de 25 % de cendres volantes par rapport à la teneur en ciment, la valeur du coefficient k est 0.
(3) Lors d'ajout au béton de cendres volantes avec une perte au feu comprise entre 5 et 7 %, il y a lieu (outre les exigences formulées à l'article 5.2.5.2.2) de ne pas excéder une quantité de cendres volantes en masse de 25 % par rapport au dosage de ciment en masse. On peut toutefois s'écarter de cette exigence pour autant que l'on ait exécuté des essais d'aptitude à l'emploi selon le prescrit de l'annexe J de la NBN EN 206-1:2001.
(4) Dans le cas de ciments CEM II/B-V, CEM II/B-M (V-...) et CEM V/A sur le sac et/ou le bon de livraison desquels il est mentionné que les cendres volantes utilisées ont une perte au feu de 7 %, ces ciments ne peuvent être utilisés que dans la mesure où la teneur en cendres volantes de ces ciments n'excède pas 25 % de la somme des constituants principaux et secondaires (selon la NBN EN 197-1:2000). On peut toutefois s'écarter de cette exigence pour autant que l'on ait exécuté des essais d'aptitude à l'emploi selon le prescrit de l'annexe J de la NBN EN 206-1:2001.
(5) Un ciment à haute résistance aux sulfates (conforme à la NBN B12-108:2002) doit être utilisé si la teneur en sulfate est > 500 mg/kg dans l'eau ou > 3000 mg/kg dans le sol.
(6) Le béton de type T(1,50) n'est autorisé que dans des cas exceptionnels de bétons non armés tels que, par exemple, les bétons de propreté de fondation.
(7) Béton sans air entraîné sauf si imposé par le prescripteur en fonction du risque de dégâts dus au gel.
(8) Voir paragraphe 6 du tableau 1 et tableau 2 de la norme NBN EN 206-1:2001.

Figure 4.4 – Exigences de durabilité pour les bétons non armés, armés et précontraints - NBN B 15-001 :2024

Au Canada, les contraintes relatives au béton sont développées dans les normes CSA (Canadian Standards Association) sous les références CSA A23.1/A23.2 :24 - "Concrete materials and methods of concrete construction / Test Methods and Standard Practices for concrete".

À l'instar des normes européennes, la norme CSA A23.1 définit également des classes de résistance minimale en fonction de l'usage qui sera fait du béton. En synthèse, celles-ci peuvent être décrites comme suit :

Usage du béton	Résistance minimale
Béton non exposé (éléments intérieurs sans risque)	≥ 15 MPa
Béton exposé aux intempéries ou cycles gel/dégel	≥ 25 MPa
Béton soumis aux sels de déverglaçage (routes, stationnements)	≥ 30 MPa
Béton structurel courant (éléments porteurs)	souvent entre 25 et 35 MPa
Béton haute performance (ouvrages spéciaux, ponts, etc.)	40 à 80 MPa et plus

Tableau 4.1 – Classes de résistance minimale du béton selon la norme CSA A23.1

Ces éléments peuvent également être déclinés sous d'autres formes et sont plus largement décrits dans le chapitre 9 du cours : "*Dosage et contrôle des mélanges de béton*" du Professeur B. BISSONNETTE de l'Université Laval de Québec. [28]

En ce qui concerne les mortiers, un parallèle peut être fait avec ce qui précède. En effet, l'utilisateur veillera à "commander" un produit en fonction de l'usage qui en sera fait (conditions d'exposition) et de la résistance à la compression minimale à respecter.

Ces points sont repris dans différentes normes en fonction de l'usage. Ainsi, la norme NBN EN 998-2 :2016 décrit les critères relatifs au mortier de maçonnerie courant, la NBN EN 1504-3 :2006 pour les réparations structurales, ...

En synthèse, les valeurs requises sont les suivantes :

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

Figure 4.5 – Classes de résistance minimale des mortiers selon les normes NBN EN 998-2 :2016 et NBN EN 1504-3 :2006

Au Canada, la norme A179 - "*Mortar and Grout for Unit Masonry*" distingue deux approches spécifiques décrites ci-dessous :

La première méthode, "Proportion Specification", se base sur une combinaison qui définit les proportions ainsi, le mortier sera caractérisé par sa formulation (proportions de ciment, chaux, sable). Aucune contrainte relative directe n'est formulée en ce qui concerne la résistance minimale à la compression à respecter, ainsi, il n'y a pas de valeur minimale exigée car celle-ci suppose être rencontrée suite au respect des proportions des mélanges. Si cette voie est utilisée (Proportion Specification), la norme ne définit pas de minimum fixe, mais les essais effectués doivent montrer une performance équivalente à celle d'un mélange conforme à ce qui est attendu par la formulation définie.

La seconde méthode, quant à elle, "Property Specification" (spécification par propriétés), est utilisée pour des mélanges prêts à l'emploi et elle détermine des valeurs minimales de résistance à la compression à respecter. Ainsi, pour le type S (mortier préparé sur chantier), ces valeurs doivent être supérieures ou égales à 5 MPa à 7 jours et à 8,5 MPa à 28 jours.

Certes, dans le cadre de ce travail nous ne nous situons pas dans les prérequis de ces normes. Ainsi en Belgique, l'utilisation de granulats de type A+, à savoir ceux issus du recyclage des matériaux de la construction de très haute qualité, est limitée entre 20 et 30 % de taux de substitution pour les applications de type EE3. Ces granulats sont régis par différentes normes (PTV 460 (Prescriptions techniques pour les granulats recyclés) émis par COPRO (Organisme de certification et de contrôle de la qualité), NBN B 15-001) et répondent à des critères qualitatifs sévères. Par exemple, le taux d'absorption d'eau de ces granulats doit se situer en-dessous de 10 %.

Il existe une autre catégorie de granulats recyclés, Mixte B+, provenant d'un mélange de béton, de briques cuites et de pierres naturelles. Ce type de granulats présente un taux d'absorption plus élevé mais est réservé pour des applications moins nobles et requiert des contrôles supplémentaires.

La caractérisation des sables recyclés a déjà été décrite dans les chapitres précédents et dans le cas du sable recyclé RS1, le taux d'absorption d'eau est supérieur à 10 %.

Néanmoins, nous pouvons constater que la résistance à la compression la plus basse lors de nos essais se situe aux alentours des 25 MPa dans le cas d'un mélange à base de granulats 100% RS1 ainsi que pour un mélange 100% RS1 avec l'agent expansif de type G. Il s'agit ici d'une valeur minimale sur l'ensemble de nos cubes à 28 jours. Ces valeurs relativement inférieures comparées aux autres résultats peuvent s'expliquer non seulement par le taux d'absorption d'eau élevé mais également par la teneur en particules fines. Si on se réfère aux normes décrites ci-dessus, l'utilisation de tels mélanges d'un point de vue de la résistance à la compression pourrait s'envisager pour une majorité d'applications.

Afin de pouvoir utiliser des quantités supérieures à 50 % voire 100% de sables recyclés, l'ajout d'un agent expansif de type K, pour autant que les réactions avec cet agent soient complètes et maîtrisées, viendra compenser le retrait et par conséquent diminuer le risque de fissures. De plus, le fait de venir combler les porosités non seulement dans le cœur du mortier mais également en surface permettra d'utiliser celui-ci dans des applications à conditions environnementales plus sévères. Cet ajout d'additif permettra au-delà de la résistance à la compression d'assurer un aspect conforme (sans défaut) et la durabilité de ces mortiers.

Chapitre 5

Conclusion

Les travaux initiés dans le cadre de ce projet "RECQc1 – Développement de mortiers à retrait compensé avec des sables de recyclage" ont permis d'avancer dans l'étude de la substitution, dans les mortiers, des sables naturels par des sables recyclés issus de la déconstruction et de la démolition d'ouvrages d'art et de bâtiments.

Nous avons ainsi utilisé, dans le cadre de notre processus expérimental, deux types de sables recyclés issus de la déconstruction :

- Le premier, noté RS1, provenait du Canada et était caractérisé par la présence d'un pourcentage élevé de particules fines (7,79%) et un taux d'absorption de l'eau de 12,5%. Il sortait ainsi du cadre de ce qui est classé comme un sable recyclé de type A+ (la norme NBN B 15-001 définit les propriétés de ces granulats). 4
- Le second, noté RS2, était issu de chantiers de déconstruction en Belgique. Ses caractéristiques s'avéraient plus compatibles avec la norme recherchée, présentant 3,44% de particules fines et un taux d'absorption d'eau de 5,88%. Ce produit répondait ainsi aux critères de classement dans la catégorie des sables recyclés de type A+. 4

Contrairement à ce que nous pensions au début du processus expérimental et afin de garantir une consistance équivalente des différents mélanges, nous n'avons pas pu garder le même rapport eau/liant pour les différentes formulations. Pour les mortiers réalisés uniquement avec du sable naturel, ce rapport était de 0,5, à 0,55 lorsque 50% de ce dernier était substitué par du sable recyclé, et à 0,6 pour les formulations intégrant 100% de sable recyclé.

Le retrait conséquent au séchage constitue une problématique déjà connue pour les mortiers à base de sable naturel, mais la propension des sables recyclés à absorber l'eau amplifie ce phénomène, particulièrement avec le sable RS1. Les résultats obtenus en attestent : une augmentation de 242% de retrait pour le mélange RS1 par rapport au mélange NS.

L'ajout d'agents expansifs s'est révélé bénéfique pour atténuer cette problématique. Toutefois, cet effet n'a pas été immédiatement observable pour les échantillons incorporant un agent expansif de type K. Cette absence s'explique par le protocole de cure humide initialement appliqué de manière uniforme à l'ensemble des éprouvettes, consistant à les maintenir à l'air libre en chambre humide durant les sept premiers jours, et non pas immergées dans de l'eau de chaux.

En revanche, les éprouvettes contenant un agent expansif de type G ont présenté dans les 24 premières heures une expansion annihilant tout retrait. Les mesures effectuées après 35 jours attestent sur tous les échantillons une expansion. La formulation RS1 sans agent expansif présentait un retrait de $-2106 \frac{\mu m}{m}$ tandis qu'avec l'agent expansif de type G, une expansion de $+1853,3 \frac{\mu m}{m}$ a été mesurée.

Une fois le processus de mesure terminé (35 jours), les barrettes contenant un agent de type K ont été immergées pendant 28 jours dans de l'eau de chaux. Suite à cette intervention, une expansion plus importante a été observée confirmant que ce type d'agent expansif nécessitait un processus hydrique particulier pour exprimer pleinement son potentiel.

L'action de ces agents expansifs ne se limite pas à la compensation du retrait ; elle influence également la durabilité ainsi que l'aspect des mortiers durcis. Concernant les propriétés mécaniques, l'impact de la substitution de 50% de sable naturel par du sable recyclé, s'est révélé particulièrement marqué dans le cas des mélanges incorporant le sable recyclé RS1. En effet, pour le mélange 100% RS1, la résistance à la compression a chuté de l'ordre de 50%. Si des diminutions ont été observées pour l'ensemble des échantillons contenant des sables recyclés, ceux utilisant du sable recyclé RS2 et l'agent de type K semblent apporter satisfaction.

De manière générale, les résultats obtenus confrontés aux exigences des normes entrouvent la porte à l'utilisation de telles formulations dans un bon nombre d'applications.

Ainsi, de futurs travaux pourraient s'orienter vers :

- L'établissement, en fonction des caractéristiques propres des sables recyclés, d'un rapport E/L optimal et d'un dosage en additifs permettant à la fois d'annuler le retrait, de limiter l'expansion et de maintenir des résistances mécaniques satisfaisantes.
- L'étude de combinaisons entre agents expansifs (agent de type K et de type G) au sein d'un même mélange pourrait apporter d'autres enseignements tout aussi prometteurs. L'agent de type G offrant une expansion rapide et celui de type K agissant plus lentement dans le temps mais leur combinaison pourrait apporter des effets bénéfiques sur les caractéristiques des mortiers ainsi constitués.

Chapitre 6

Annexes

6.1 Annexe A : Description des sables

6.1.1 Sable Naturel : NS

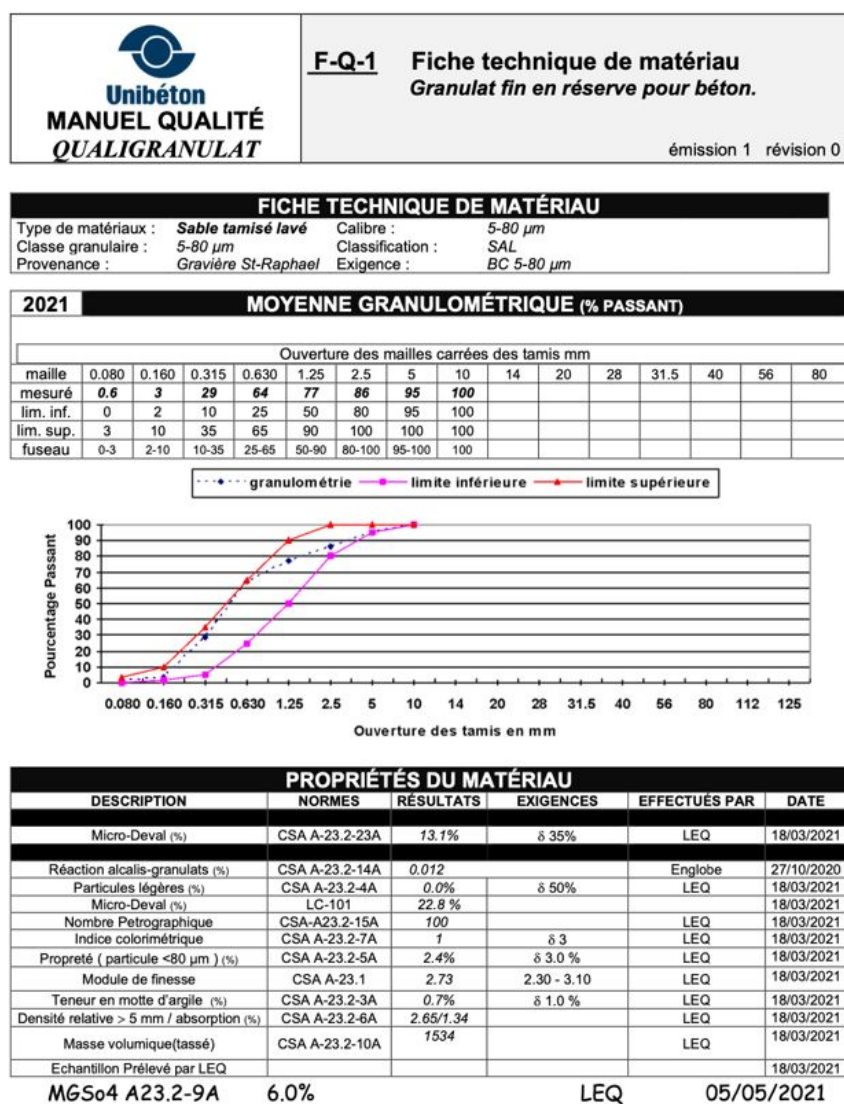


Figure 6.1 – Fiche technique du NS

6.1.2 Sable recyclé : RS1

Granulométrie - Ro-Tap		Sable recyclé Canadien (RS1)					
Date	24-03-25	Date	24-03-25	Date	26-03-25	Date	26-03-25
Masse initiale [g]	371,30	Masse initiale [g]	341,40	Masse initiale [g]	435,50	Masse initiale [g]	505,10
Masse finale [g]	343,20	Masse finale [g]	318,10	Masse finale [g]	405,60	Masse finale [g]	471,80
(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	27,30	92,05%	24,60	92,27%	26,90	93,37%	35,20	92,54%	92,55%
1,25	106,80	68,88%	98,80	68,94%	117,30	71,08%	150,20	68,16%	69,27%
0,63	184,30	46,30%	170,00	46,56%	212,30	47,66%	260,40	44,81%	46,33%
0,315	265,00	22,79%	244,30	23,20%	310,80	23,37%	368,40	21,92%	22,62%
0,16	314,50	8,36%	290,40	8,71%	370,80	8,58%	433,00	8,22%	8,47%
0,08	341,00	0,64%	315,00	0,97%	402,20	0,84%	467,40	0,93%	0,85%
0	343,10	0,03%	318,00	0,03%	405,50	0,02%	471,80	0,00%	0,02%

Poids des fines [g]	30,2	Poids des fines [g]	26,3	Poids des fines [g]	33,2	Poids des fines [g]	37,7	MOYENNE :
Pourcentage de fines [%]	8,18%	Pourcentage de fines [%]	7,77%	Pourcentage de fines [%]	7,68%	Pourcentage de fines [%]	7,53%	7,79%

Figure 6.2 – Granulométrie RS1 effectuée au laboratoire ULaval

6.2 Annexe B : Ciment de type GU - Certificat d'analyse



ANALYSIS CERTIFICATE

General Use cement type

GU

June - 2024

Physical tests

Time of Set Vicat (minutes)
Initial 145
Final 285

Fineness
Specific surface
(Blaine) (m²/kg) 393
Retained on 45 µm
sieve (%) 3

Autoclave
expansion (%) 0.09

Air content (%) 5

Compressive strength (MPa)
3 days 29.2
7 days 34.0
28 days (May-24) 38.9

Expansion of mortar bars
at 14 days (%) 0.012

Chemical analysis (%)

SiO₂ 19.4
Al₂O₃ 4.7
Fe₂O₃ 3.4
CaO 61.4
Free Lime 1.5
MgO 2.7
SO₃ 4.0
Loss on ignition 2.5
Insoluble residue 0.3
Total alkali
(Na₂O equivalent) 0.94

Mineralogical composition
C₃S 54.6
C₂S 14.4
C₃A 6.7
C₄AF 10.3

We hereby certify that the cement delivered complies with the
 CSA Standard A3000-18 requirements section A3001-18, Type GU.

For any information regarding this certificate, please contact our technical service at (418) 329-2100.

GUCsaEn


 Louis Lefrançois Perreault
 M. Sc. Chemist

145 du Centenaire Blvd • Saint-Basile (Québec) G0A 3G0 • Canada • Tel.: 418 329-2100 • Fax: 418 329-3436



Figure 6.5 – Certificat d'analyse du ciment GU utilisé

6.3 Annexe C : Données expérimentales sur le retrait : résultats des campagnes de mesure

6.3.1 Retrait des barrettes non scellées

Mélanges NS - NS Type K - NS Type G								
Mélange NS			Mélange NS Type K			Mélange NS Type G		
Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne
mardi 29 avril 2025	0,00	0	jeudi 1 mai 2025	0,00	0	mardi 6 mai 2025	0,00	0
mercredi 30 avril 2025	1,14	54,333	vendredi 2 mai 2025	0,95	-6,667	mercredi 7 mai 2025	0,63	1760
vendredi 2 mai 2025	3,05	74,333	dimanche 4 mai 2025	3,05	26,667	mercredi 7 mai 2025	1,03	2100
mardi 6 mai 2025	7,08	89	jeudi 8 mai 2025	6,89	61,333	jeudi 8 mai 2025	1,62	2608
mardi 6 mai 2025	7,08	89	jeudi 8 mai 2025	6,89	61,333	vendredi 9 mai 2025	2,67	2805,333
mardi 6 mai 2025	7,34	-51	jeudi 8 mai 2025	7,13	-42,667	mardi 13 mai 2025	6,70	2914,667
mercredi 7 mai 2025	8,07	-199	vendredi 9 mai 2025	7,76	-241,333	mardi 13 mai 2025	6,70	2914,667
vendredi 9 mai 2025	9,94	-357,667	dimanche 11 mai 2025	9,87	-473,333	mardi 13 mai 2025	6,83	2878,667
mardi 13 mai 2025	14,01	-506,333	jeudi 15 mai 2025	13,77	-670,667	mercredi 14 mai 2025	7,65	2690,667
mardi 20 mai 2025	20,90	-697,667	jeudi 22 mai 2025	20,79	-924	vendredi 16 mai 2025	9,75	2449,333
mardi 3 juin 2025	34,91	-869,667	jeudi 5 juin 2025	34,73	-1044	mardi 20 mai 2025	13,61	2256
						mardi 27 mai 2025	20,65	2045,333
						mardi 10 juin 2025	34,21	1924

Figure 6.6 – Résultats des mélanges NS, NS type K et NS type G

Mélanges RS1 - RS1 Type K - RS1 Type G								
Mélange RS1			Mélange RS1 Type K			Mélange RS1 Type G		
Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne
mardi 29 avril 2025	0,00	0	jeudi 1 mai 2025	0,00	0	mercredi 7 mai 2025	0,00	0
mercredi 30 avril 2025	1,03	160	vendredi 2 mai 2025	0,87	254,667	jeudi 8 mai 2025	0,71	3638,667
vendredi 2 mai 2025	2,95	262,667	dimanche 4 mai 2025	2,97	454,667	jeudi 8 mai 2025	1,13	3886,667
mardi 6 mai 2025	6,98	337,333	jeudi 8 mai 2025	6,81	606,667	vendredi 9 mai 2025	1,76	4018,667
mardi 6 mai 2025	6,98	337,333	jeudi 8 mai 2025	6,81	606,667	samedi 10 mai 2025	2,91	4132
mardi 6 mai 2025	7,24	197,333	jeudi 8 mai 2025	7,05	454,667	mercredi 14 mai 2025	6,72	4281,333
mercredi 7 mai 2025	7,97	-42,667	vendredi 9 mai 2025	7,67	137,333	mercredi 14 mai 2025	6,72	4281,333
vendredi 9 mai 2025	9,84	-520	dimanche 11 mai 2025	9,79	-657,333	mercredi 14 mai 2025	6,98	4189,333
mardi 13 mai 2025	13,91	-1128	jeudi 15 mai 2025	13,69	-1262,67	jeudi 15 mai 2025	7,75	3898,667
mardi 20 mai 2025	20,79	-1686,667	jeudi 22 mai 2025	20,71	-1906,67	samedi 17 mai 2025	9,91	3228
mardi 3 juin 2025	34,81	-2106,667	jeudi 5 juin 2025	34,65	-2116	mercredi 21 mai 2025	13,70	2442,667
						mercredi 28 mai 2025	20,73	1872
						mercredi 11 juin 2025	34,29	1853,333

Figure 6.7 – Résultats des mélanges RS1, RS1 type K et RS1 type G

Mélanges RS2 - RS2 Type K - RS2 Type G								
Mélange RS2			Mélange RS2 Type K			Mélange RS2 Type G		
Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne
mardi 29 avril 2025	0,00	0	lundi 5 mai 2025	0,00	0	mercredi 7 mai 2025	0,00	0
mercredi 30 avril 2025	0,90	61,333	mercredi 7 mai 2025	2,14	131,667	jeudi 8 mai 2025	0,66	4380
vendredi 2 mai 2025	2,82	102,667	jeudi 8 mai 2025	2,88	153,667	jeudi 8 mai 2025	1,07	4509,333
mardi 6 mai 2025	6,85	120	lundi 12 mai 2025	6,69	175,333	vendredi 9 mai 2025	1,71	4546,667
mardi 6 mai 2025	6,85	120	lundi 12 mai 2025	6,69	175,333	samedi 10 mai 2025	2,86	4588
mardi 6 mai 2025	7,11	13,333	lundi 12 mai 2025	6,96	51	mercredi 14 mai 2025	6,67	4658,667
mercredi 7 mai 2025	7,84	-134,667	mardi 13 mai 2025	7,78	-197,667	mercredi 14 mai 2025	6,67	4658,667
vendredi 9 mai 2025	9,71	-509,333	jeudi 15 mai 2025	9,74	-705,333	mercredi 14 mai 2025	6,93	4586,667
mardi 13 mai 2025	13,78	-934,667	jeudi 19 mai 2025	13,75	-1179,33	jeudi 15 mai 2025	7,70	4380
mardi 20 mai 2025	20,66	-1310,667	lundi 26 mai 2025	20,69	-1538	samedi 17 mai 2025	9,86	3825,333
mardi 3 juin 2025	34,68	-1593,333	lundi 9 juin 2025	34,28	-1663	mercredi 21 mai 2025	13,65	3273,333
						mercredi 28 mai 2025	20,68	2882,667
						mercredi 11 juin 2025	34,24	2860

Figure 6.8 – Résultats des mélanges RS2, RS2 type K et RS2 type G

Mélanges NS+RS1 - NS+RS1 Type K - NS+RS1 Type G

Mélange NS+RS1		
Date	Jours	Moyenne
mercredi 30 avril 2025	0,00	0
jeudi 1 mai 2025	1,08	102,667
vendredi 2 mai 2025	2,17	148
dimanche 4 mai 2025	4,27	173,333
mercredi 7 mai 2025	7,09	204
mercredi 7 mai 2025	7,09	204
mercredi 7 mai 2025	7,34	101,333
jeudi 8 mai 2025	8,11	-130,667
samedi 10 mai 2025	10,14	-445,333
mercredi 14 mai 2025	13,98	-774,667
mercredi 21 mai 2025	20,93	-1214,67
mercredi 4 juin 2025	34,96	-1468

Mélange NS+RS1 Type K		
Date	Jours	Moyenne
lundi 5 mai 2025	0,00	0
mercredi 7 mai 2025	2,07	204
jeudi 8 mai 2025	2,81	257,333
lundi 12 mai 2025	6,70	342,667
lundi 12 mai 2025	6,70	342,667
lundi 12 mai 2025	6,89	212
mardi 13 mai 2025	7,71	-122,667
jeudi 15 mai 2025	9,67	-580
lundi 19 mai 2025	13,68	-1072
lundi 26 mai 2025	20,62	-1452
lundi 9 juin 2025	34,20	-1622,67

Mélange NS+RS1 Type G		
Date	Jours	Moyenne
jeudi 8 mai 2025	0,00	0
vendredi 9 mai 2025	0,76	4926,667
vendredi 9 mai 2025	0,93	5033,333
samedi 10 mai 2025	1,91	5178,667
dimanche 11 mai 2025	2,86	5273,333
jeudi 15 mai 2025	6,73	5396
jeudi 15 mai 2025	6,73	5396
jeudi 15 mai 2025	6,90	5340
vendredi 16 mai 2025	7,82	5038,667
dimanche 18 mai 2025	9,87	4652
jeudi 22 mai 2025	13,78	4152
jeudi 29 mai 2025	20,70	3760
jeudi 12 juin 2025	34,28	3696

Figure 6.9 – Résultats des mélanges NS+RS1, NS+RS1 type K et NS+RS1 type G

Mélanges NS+RS2 - NS+RS2 Type K - NS+RS2 Type G

Mélange NS+RS2		
Date	Jours	Moyenne
mercredi 30 avril 2025	0,00	0
jeudi 1 mai 2025	1,08	58,667
vendredi 2 mai 2025	2,17	74,667
dimanche 4 mai 2025	4,27	78,667
mercredi 7 mai 2025	7,09	102,667
mercredi 7 mai 2025	7,09	102,667
mercredi 7 mai 2025	7,34	7,58E-11
jeudi 8 mai 2025	8,11	-186,667
samedi 10 mai 2025	10,14	-449,333
mercredi 14 mai 2025	13,98	-674,667
mercredi 21 mai 2025	20,93	-965,333
mercredi 4 juin 2025	34,96	-1152

Mélange NS+RS2 Type K		
Date	Jours	Moyenne
mardi 6 mai 2025	0,00	0
mercredi 7 mai 2025	1,07	81,333
vendredi 9 mai 2025	2,72	105,333
mardi 13 mai 2025	6,75	156
mardi 13 mai 2025	6,75	156
mardi 13 mai 2025	6,87	82,667
mercredi 14 mai 2025	7,69	-149,333
vendredi 16 mai 2025	9,79	-572
mardi 20 mai 2025	13,66	-921,333
mardi 27 mai 2025	20,69	-1177,33
mardi 10 juin 2025	34,25	-1257,33

Mélange NS+RS2 Type G		
Date	Jours	Moyenne
jeudi 8 mai 2025	0,00	0
vendredi 9 mai 2025	0,69	4094,667
vendredi 9 mai 2025	0,86	4164
samedi 10 mai 2025	1,84	4249,333
dimanche 11 mai 2025	2,79	4301,333
jeudi 15 mai 2025	6,66	4369,333
jeudi 15 mai 2025	6,66	4369,333
jeudi 15 mai 2025	6,83	4324
vendredi 16 mai 2025	7,76	4086,667
dimanche 18 mai 2025	9,81	3809,333
jeudi 22 mai 2025	13,71	3434,667
jeudi 29 mai 2025	20,64	3138,667
jeudi 12 juin 2025	34,21	3082,667

Figure 6.10 – Résultats des mélanges NS+RS2, NS+RS2 type K et NS+RS2 type G

Nouvelle expansion Des mélanges Types K (seulement cure humide)

Mélange NS Type K (Expansion2)		
jeudi 19 juin 2025	0	0
vendredi 20 juin 2025	1	534,667
lundi 23 juin 2025	4	589,333
jeudi 26 juin 2025	7	620
jeudi 17 juillet 2025	28,07291667	586,667

Mélange RS1 Type K (Expansion2)		
jeudi 19 juin 2025	0	0
vendredi 20 juin 2025	1	1152
lundi 23 juin 2025	4	1281,333
jeudi 17 juillet 2025	28,07291667	1334,667

Mélange RS2 Type K (Expansion2)		
lundi 23 juin 2025	0	0
jeudi 26 juin 2025	3,052083333	837,333
lundi 30 juin 2025	7	893,333
lundi 21 juillet 2025	28	908

Mélange NS+RS1 Type K (Expansion2)		
lundi 23 juin 2025	0	0
mardi 24 juin 2025	1	854,667
jeudi 26 juin 2025	3,052083333	924
lundi 30 juin 2025	7	988
lundi 21 juillet 2025	28	1016

Mélange NS+RS2 Type K (Expansion2)		
mardi 24 juin 2025	0	0
mercredi 25 juin 2025	1	510,667
vendredi 27 juin 2025	3	614,667
mardi 1 juillet 2025	7	621,333
mardi 22 juillet 2025	28	656

Figure 6.11 – Nouvelle expansion des mortiers incorporant l'agent de type K

6.3.2 Retrait des barrettes scellées

Mélanges NS - NS Type K - NS Type G ALUMINIUM								
Mélange NS ALU			Mélange NS Type K ALU			Mélange NS Type G ALU		
Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne
mardi 29 avril 2025	0,00	0	jeudi 1 mai 2025	0,00	0	mardi 6 mai 2025	0,00	0
mercredi 30 avril 2025	1,15	-74	vendredi 2 mai 2025	0,90	-82,667	mercredi 7 mai 2025	0,60	921,333
vendredi 2 mai 2025	3,06	-89,333	dimanche 4 mai 2025	3,00	-106,667	mercredi 7 mai 2025	0,99	972
mardi 6 mai 2025	7,08	-115	jeudi 8 mai 2025	6,84	-121,333	jeudi 8 mai 2025	1,59	1025,333
mardi 6 mai 2025	7,08	-115	jeudi 8 mai 2025	6,84	-121,333	vendredi 9 mai 2025	2,64	1044
mardi 6 mai 2025	7,34	-105	jeudi 8 mai 2025	7,08	-109,333	mardi 13 mai 2025	6,67	1093,333
mercredi 7 mai 2025	8,07	-109,667	vendredi 9 mai 2025	7,70	-130,667	mardi 13 mai 2025	6,67	1093,333
vendredi 9 mai 2025	9,94	-123	dimanche 11 mai 2025	9,82	-149,333	mardi 13 mai 2025	6,79	1096
mardi 13 mai 2025	14,01	-128,333	jeudi 15 mai 2025	13,72	-154,667	mercredi 14 mai 2025	7,61	1108
mardi 20 mai 2025	20,90	-144,333	jeudi 22 mai 2025	20,72	-156	vendredi 16 mai 2025	9,71	1093,333
mardi 3 juin 2025	34,92	-160,333	jeudi 5 juin 2025	34,68	-181,333	mardi 20 mai 2025	13,58	1074,667
						mardi 27 mai 2025	20,61	1066,667
						mardi 10 juin 2025	34,17	1044

Figure 6.12 – Résultats des mélanges scellés NS, NS type K et NS type G

Mélanges RS1 - RS1 Type K - RS1 Type G ALUMINIUM								
Mélange RS1 ALU			Mélange RS1 Type K ALU			Mélange RS1 Type G ALU		
Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne
mardi 29 avril 2025	0,00	0	jeudi 1 mai 2025	0,00	0	mercredi 7 mai 2025	0,00	0
mercredi 30 avril 2025	1,05	6,333	vendredi 2 mai 2025	0,84	84	jeudi 8 mai 2025	0,69	2398
vendredi 2 mai 2025	2,96	57	dimanche 4 mai 2025	2,94	178	jeudi 8 mai 2025	1,11	2532
mardi 6 mai 2025	6,98	86,333	jeudi 8 mai 2025	6,79	244	vendredi 9 mai 2025	1,73	2598
mardi 6 mai 2025	6,98	86,333	jeudi 8 mai 2025	6,79	244	samedi 10 mai 2025	2,89	2878
mardi 6 mai 2025	7,24	94,333	jeudi 8 mai 2025	7,02	266	mercredi 14 mai 2025	6,70	2790
mercredi 7 mai 2025	7,97	114,333	vendredi 9 mai 2025	7,65	258	mercredi 14 mai 2025	6,70	2790
vendredi 9 mai 2025	9,84	94,333	dimanche 11 mai 2025	9,76	254	mercredi 14 mai 2025	6,96	2800
mardi 13 mai 2025	13,91	117	jeudi 15 mai 2025	13,66	256	jeudi 15 mai 2025	7,72	2806
mardi 20 mai 2025	20,80	105	jeudi 22 mai 2025	20,68	250	samedi 17 mai 2025	9,88	2824
mardi 3 juin 2025	34,82	74,333	jeudi 5 juin 2025	34,62	216	mercredi 21 mai 2025	13,67	2814
						mercredi 28 mai 2025	20,70	2802
						mercredi 11 juin 2025	34,26	2770

Figure 6.13 – Résultats des mélanges scellés RS1, RS1 type K et RS1 type G

Mélanges RS2 - RS2 Type K - RS2 Type G ALUMINIUM								
Mélange RS2			Mélange RS2 Type K			Mélange RS2 Type G		
Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne	Date	Jours	Moyenne
mardi 29 avril 2025	0,00	0	lundi 5 mai 2025	0,00	0	mercredi 7 mai 2025	0,00	0
mercredi 30 avril 2025	0,91	-62,667	mercredi 7 mai 2025	2,10	-53,333	jeudi 8 mai 2025	0,62	2149,333
vendredi 2 mai 2025	2,83	-66,667	jeudi 8 mai 2025	2,84	-38,667	jeudi 8 mai 2025	1,03	2218,667
mardi 6 mai 2025	6,85	-66,667	lundi 12 mai 2025	6,65	-25,333	vendredi 9 mai 2025	1,67	2228
mardi 6 mai 2025	6,85	-66,667	lundi 12 mai 2025	6,65	-25,333	samedi 10 mai 2025	2,82	2258,667
mardi 6 mai 2025	7,11	-56	lundi 12 mai 2025	6,92	-12	mercredi 14 mai 2025	6,63	2308
mercredi 7 mai 2025	7,84	-36	mardi 13 mai 2025	7,73	2,667	mercredi 14 mai 2025	6,63	2308
vendredi 9 mai 2025	9,71	-61,333	jeudi 15 mai 2025	9,70	-9,333	mercredi 14 mai 2025	6,89	2322,667
mardi 13 mai 2025	13,78	-46,667	lundi 19 mai 2025	13,71	-8	jeudi 15 mai 2025	7,66	2328
mardi 20 mai 2025	20,66	-65,333	lundi 26 mai 2025	20,64	-29,333	samedi 17 mai 2025	9,82	2333,333
mardi 3 juin 2025	34,68	-97,333	lundi 9 juin 2025	34,23	-62,667	mercredi 21 mai 2025	13,61	2330,667
						mercredi 28 mai 2025	20,64	2298,667
						mercredi 11 juin 2025	34,19	2265,333

Figure 6.14 – Résultats des mélanges scellés RS2, RS2 type K et RS2 type G

Mélanges NS+RS1 - NS+RS1 Type K - NS+RS1 Type G ALUMINIUM

Mélange NS+RS1 ALU		
Date	Jours	Moyenne
mercredi 30 avril 2025	0,00	0
jeudi 1 mai 2025	1,08	-16
vendredi 2 mai 2025	2,17	-4
dimanche 4 mai 2025	4,27	-12
mercredi 7 mai 2025	7,09	-10,667
mercredi 7 mai 2025	7,09	-10,667
mercredi 7 mai 2025	7,35	5,333
jeudi 8 mai 2025	8,11	-1,333
samedi 10 mai 2025	10,14	-16
mercredi 14 mai 2025	13,98	-4
mercredi 21 mai 2025	20,93	-20
mercredi 4 juin 2025	34,96	-56

Mélange NS+RS1 Type K ALU		
Date	Jours	Moyenne
lundi 5 mai 2025	0,00	0
mercredi 7 mai 2025	2,04	28
jeudi 8 mai 2025	2,78	48
lundi 12 mai 2025	6,59	49,333
lundi 12 mai 2025	6,59	49,333
lundi 12 mai 2025	6,85	58,667
mardi 13 mai 2025	7,67	58,667
jeudi 15 mai 2025	9,63	34,667
lundi 19 mai 2025	13,65	21,333
lundi 26 mai 2025	20,58	5,333
lundi 9 juin 2025	34,17	-37,333

Mélange NS+RS1 Type G ALU		
Date	Jours	Moyenne
jeudi 8 mai 2025	0,00	0
vendredi 9 mai 2025	0,72	3140
vendredi 9 mai 2025	0,90	3193,333
samedi 10 mai 2025	1,87	3308
dimanche 11 mai 2025	2,82	3356
jeudi 15 mai 2025	6,69	3430,667
jeudi 15 mai 2025	6,69	3430,667
jeudi 15 mai 2025	6,86	3440
vendredi 16 mai 2025	7,79	3434,667
dimanche 18 mai 2025	9,84	3452
jeudi 22 mai 2025	13,74	3444
jeudi 29 mai 2025	20,67	3422,667
jeudi 12 juin 2025	34,24	3378,667

Figure 6.15 – Résultats des mélanges scellés NS+RS1, NS+RS1 type K et NS+RS1 type G

Mélanges NS+RS2 - NS+RS2 Type K - NS+RS2 Type G ALUMINIUM

Mélange NS+RS2 ALU		
Date	Jours	Moyenne
mercredi 30 avril 2025	0,00	0
jeudi 1 mai 2025	1,08	-42,667
vendredi 2 mai 2025	2,17	-53,333
dimanche 4 mai 2025	4,27	-58,667
mercredi 7 mai 2025	7,09	-53,333
mercredi 7 mai 2025	7,09	-53,333
mercredi 7 mai 2025	7,35	-41,33
jeudi 8 mai 2025	8,11	-40
samedi 10 mai 2025	10,14	-69,333
mercredi 14 mai 2025	13,98	-60
mercredi 21 mai 2025	20,93	-77,333
mercredi 4 juin 2025	34,96	-104

Mélange NS+RS2 Type K ALU		
Date	Jours	Moyenne

Mélange NS+RS2 Type G ALU		
Date	Jours	Moyenne
jeudi 8 mai 2025	0,00	0
vendredi 9 mai 2025	0,65	2584
vendredi 9 mai 2025	0,82	2625,333
samedi 10 mai 2025	1,77	2685,333
dimanche 11 mai 2025	2,75	2714,667
jeudi 15 mai 2025	6,63	2777,333
jeudi 15 mai 2025	6,63	2777,333
jeudi 15 mai 2025	6,80	2785,333
vendredi 16 mai 2025	7,72	2782,667
dimanche 18 mai 2025	9,77	2797,333
jeudi 22 mai 2025	13,67	2796,667
jeudi 29 mai 2025	20,60	2770,667
jeudi 12 juin 2025	34,63	2728

Figure 6.16 – Résultats des mélanges scellés NS+RS2, NS+RS2 type K et NS+RS2 type G

6.4 Annexe D : Formations suivies en vue de l'accès au laboratoire ULaval

Avant d'accéder au laboratoire et de pouvoir y réaliser les essais expérimentaux, plusieurs formations obligatoires ont dû être validées afin d'assurer la sécurité personnelle et collective dans l'environnement de travail.

Parmi celles-ci figurait la formation SIMDUT (Système d'Information sur les Matières Dangereuses Utilisées au Travail), qui vise à familiariser les utilisateurs avec l'étiquetage, les fiches de données de sécurité et les bonnes pratiques de manipulation des substances chimiques potentiellement dangereuses. Deux formations spécifiques en santé et sécurité au travail ont également été suivies : la SST-39, portant sur la gestion des risques liés à la silice cristalline et aux poussières fines, et la SST-42, axée sur le port approprié des équipements de protection individuelle, notamment les protections respiratoires. L'ensemble de ces modules de formation visait à garantir un usage sécuritaire des équipements et des matériaux, tout en respectant les protocoles de sécurité en vigueur dans l'établissement.



Figure 6.17 – Attestation de formation : Poussières de silice

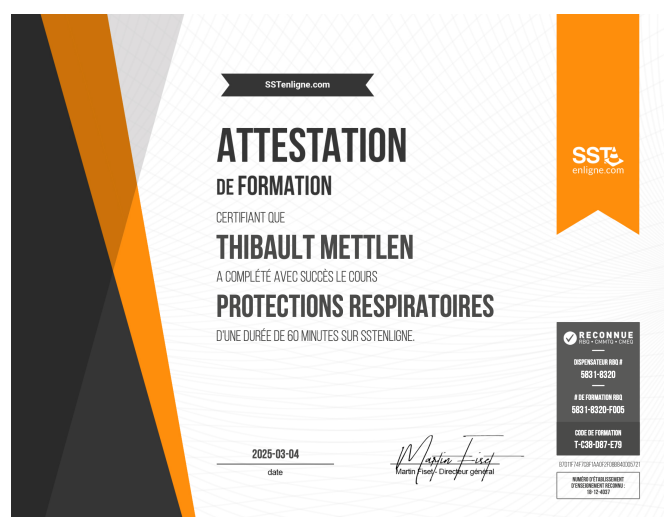


Figure 6.18 – Attestation de formation : Protections respiratoires

6.5 Annexe E : Essai d'ajustement d'un appareil de protection respiratoire

Conformément à la norme CSA Z94.4-F18, un essai d'ajustement (fit-test) a été réalisé afin de valider l'efficacité du demi-masque 3M 6502 sélectionné comme équipement de protection respiratoire. Cet essai vise à s'assurer que le masque s'adapte correctement au visage de l'utilisateur, en assurant une étanchéité suffisante pour empêcher toute infiltration de particules en suspension, notamment les poussières de silice cristalline. Le test d'ajustement permet de confirmer que le joint facial est adéquat en conditions réelles d'utilisation. Ce type de vérification est obligatoire avant toute exposition à des atmosphères potentiellement contaminées, et doit être renouvelé périodiquement ou en cas de changement de modèle, de taille ou de morphologie faciale.



Figure 6.19 – Essai d'ajustement qualitatif du masque 3M 6502

Certificat de réussite - Essai d'ajustement qualitatif

Ce certificat atteste que Thibault Mettlen a réussi un essai d'ajustement qualitatif sur un appareil de protection respiratoire (APR) le 2025-03-05 effectué par Nathalie St-Laurent .

Type d'APR	Jetable	Demi-masque	Facial complet
Fabriqueur		3M	
Modèle		6502	
Taille		Moyen	

Valide pour une période de deux ans.

Formation de l'utilisateur : Oui ☒ Non ☐

N.B. Le renouvellement de la formation théorique et d'un essai d'ajustement pour chacun des APR portés est nécessaire à tous les deux ans conformément à la norme CSA Z-94.4-F11. Lorsque la date de validation de ce certificat est expirée, une demande de renouvellement doit être effectuée conjointement par l'utilisateur et son gestionnaire à une fréquence de 2 ans maximum OU dès que la morphologie du visage change conformément à la norme.

Figure 6.20 – Certificat de réussite - Essai d'ajustement qualitatif

6.6 Annexe F : Journée des Conférences du Réseau Francophone de Recherche en Béton - Nancy

Suite à la proposition de mes professeurs, M. Courard et M. Bissonnette, j'ai participé à la 23^e Journée des Conférences du Réseau Francophone de Recherche en Béton (RF2B) - "Diminuer l'empreinte carbone et environnementale des bétons, organisée à Nancy du 08/07/2025 au 10/07/2025. Suite à cette opportunité, un poster scientifique a été réalisé afin de présenter les principaux axes de mon travail de recherche ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. Cette présentation m'a permis de partager mon travail de fin d'études avec la communauté scientifique présente et d'échanger avec d'autres chercheurs et étudiants sur des problématiques similaires liées aux matériaux cimentaires.

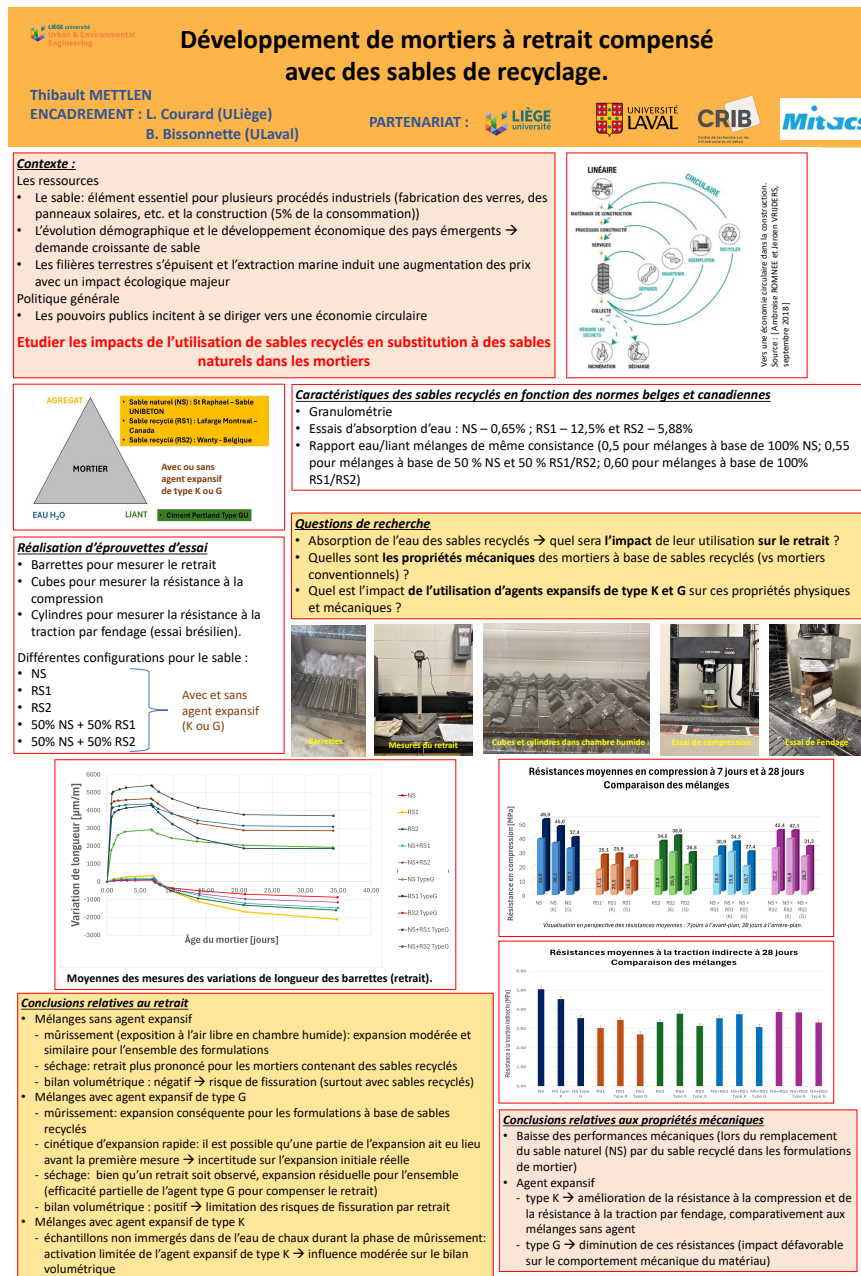


Figure 6.21 – Poster présenté lors des journées de conférences à Nancy

Bibliographie

- [1] Pablo NERUDA : <https://citation-celebre.leparisien.fr/citations/7131>.
- [2] Perspectives du marché mondial de la construction, 2021 , disponible sur : <https://www.marsh.com/fr-ca/industries/construction/insights/global-construction-outlook.html>.
- [3] Frédéric JAOUEN : Du bon usage de l'Échelle de l'ansink. *LinkedIn*, 2021.
- [4] Silvia BOBBA Philip NUSS Gian Andrea BLENGINI Patricia ALVES DIAS Darina BLAGOEVA Cristina TORRES DE MATOS Dominic WITTMER Claudiu PAVEL Tamas HAMOR Hans SAVEYN Bernd GAWLIK Glenn ORVEILLON Dries HUYGENS Elena GARBARINO Evangelos TZIMAS Faycal BOURAOUI et Slavko SOLAR Fabrice MATHIEUX, Fulvio ARDENTE : European commission : Critical raw materials and the circular economy. *Joint Research Centre (JRC) Science for Policy Report*, 2017-2018.
- [5] Ambroise ROMNEE et Jeroen VRIJERS : 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*, 2018.
- [6] Fourat THAMRI : Estimation de la composition chimique de la matière première d'une cimenterie à l'aide d'un système de vision par ordinateur basé sur des algorithmes de régression de l'apprentissage supervisé. *Thèse*, 2019.
- [7] Micheline MORANVILLE : Ciments et bétons : Composition, propriétés et utilisations. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1997.
- [8] Philippe SOUCHU : Hydratation du ciment portland. *Le site institutionnel du Lerm*, 2009.
- [9] Yves DÉNOMMÉ : Introduction au béton - eau de gachage du béton. *Association béton Québec*, 2024.
- [10] Luc COURARD : Constructions : Matériaux et pathologies. *Notes de cours*, page p200.
- [11] J. VRIJERS et L. DE BOCK : Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton. *Buildwise*, 2019.
- [12] Martial YOU : En 2100, l'économie mondiale va-t-elle connaître une pénurie de sable? <https://www.rtl.fr/actu/economie-consommation/en-2100-l-economie-mondiale-va-t-elle-connaître-une-pénurie-de-sable-7900409303>, 2024.
- [13] Louis Schweitzer : <https://encyclopedia-dd.org/encyclopedia/developpement-durable/1-4-le-developpement-durable-en/la-supercherie-du-developpement.html>.
- [14] Science et Vie : Y a-t-il plus de grains de sable sur Terre que d'étoiles dans l'univers, 2021, disponible sur : <https://www.science-et-vie.com/article-magazine/y-a-t-il-plus-de-grains-de-sable-sur-terre-que-detoiles-dans-lunivers>.
- [15] Sable : existe-t-il un risque réel d'une crise mondiale? Quelles alternatives?, Finalcad, 2022, disponible sur : <https://www.finalcad.com/fr/blog/sable-crise-mondiale>.
- [16] Alexandre VIALATTE : <https://citation-celebre.leparisien.fr/citations/19350>.

- [17] Plan Wallon des déchets-ressources, 2018, disponible sur : https://environnement.wallonie.be/files/Images/Gestion%20environnementale/D%C3%A9chets/PWDR_3.pdf.
- [18] Politique Québécoise de gestion des matières résiduelles, disponible sur : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/>.
- [19] Politique Québécoise de gestion des matières résiduelles - Plan d'Action 2019-2024 , disponible sur : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/plan-action-2019-2024-mi-parcours.pdf>.
- [20] BÉTONMOULDS - Valorisation des résidus de béton sur les chantier , disponible sur : <https://www.betonmoulds.com/fr/domaines-dutilisation/chantiers-de-construction/>.
- [21] Laura SILVA : Déchets de chantier (btp) : règles à suivre, responsabilités, démarches innovantes. *Dashdoc*, 2024.
- [22] Déchets de chantier : la réglementation en 2022, disponible sur : <https://www.batiweb.com/actualites/legislation/dechets-chantier-reglementation-40799>.
- [23] Journal officiel de l'Union européenne, DIRECTIVE 2008/98/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL, disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>.
- [24] Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy, disponible sur : https://commission.europa.eu/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy_en.
- [25] Le retrait du béton - Tout sur le béton, disponible sur : <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-retrait-du-beton/>.
- [26] Luc COURARD : Matériaux de construction - composition des bétons. *Note de cours*, 2021-2022.
- [27] Williams PAUCHET : Les ciments - grandeurs caractéristiques. *Techniques de l'ingénieur*, 2019.
- [28] Benoît BISSONNETTE : Chapitre 9 : Dosage des bétons conventionnels - dosage et contrôle des mélanges de béton. *Notes de cours*.
- [29] William STEELE : Constructing the construction state : Cement and postwar japan. *Tout sur le béton*, 2017.
- [30] Pierre-Vincent CERTAIN : Étude de la robustesse, de l'adhérence et de la durabilité des bétons de réparation à retrait compensé. *Thèse*, pages p6–8, 2012.
- [31] Sami-Joseph ESSALIK : Nouveaux essais de caractérisation du comportement volumétrique des bétons à retrait compensé. *Thèse*, 2020.
- [32] Charles LAMOTHE : Étude du comportement des bétons à retrait compensé dans des conditions restreintes. *Thèse*, 2019.
- [33] Benoît BISSONNETTE : Chapitre 1 : Caractéristiques fondamentales du béton. *Notes de cours*.
- [34] NBN EN 197-1, Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères des conformité des ciments courants, 2011, disponible sur : https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=180369&p40_language_code=en&p40_detail_id=64684&session=13228107720983.
- [35] NBN EN 933-1 :2012, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, disponible sur : https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=247088&p40_language_code=en&p40_detail_id=65428&session=13228107720983.
- [36] NBN EN 1097-6 :2022, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption

- d'eau, disponible sur : https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=197939&p40_language_code=en&p40_detail_id=98648&session=13228107720983.
- [37] NBN B 15-001 :2024, Béton - Spécifications, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206 :2013+A2 :2021, disponible sur : https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=2462228&p40_language_code=en&p40_detail_id=531944&session=13228107720983.
- [38] NBN EN 998-2 :2016, Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie - Partie 2 : Mortiers de montage des éléments de maçonnerie, disponible sur : https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=177002&p40_language_code=en&p40_detail_id=79273&session=13228107720983.
- [39] NBN EN 1504-3 :2006, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 3 : Réparation structurale et réparation non structurale, disponible sur : https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=234023&p40_language_code=en&p40_detail_id=31623&session=13228107720983.
- [40] Astm c150-07 - standard specification for portland cement. 2012.
- [41] Astm c1437-20 - standard test method for flow of hydraulic cement mortar. 2020.
- [42] Astm c203/c230m-20 - standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. 2021.
- [43] Astm c109/c109m-20 - standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). 2020.
- [44] Astm c496/c496m-17 - standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. 2017.
- [45] Astm c157/c157m-17 - standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. 2024.
- [46] Csa a23.1 :f19/csa a23.2 :f19 - béton : constituants et exécution des travaux/procédures d'essai et pratiques normalisées pour le béton. 2019.
- [47] Csa a3000-18 - cementitious materials compendium. 2018.