

Formulation d'un mar à partir d'un liant circulaire alternatif à base d'ettringite

Auteur : Bah, Boubacar

Promoteur(s) : Collin, Frédéric

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/2268.2/24838>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



UNIVERSITÉ DE LIÈGE
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

FORMULATION D'UN MAR À PARTIR D'UN LIANT CIRCULAIRE ALTERNATIF
À BASE D'ETTRINGITE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES RÉALISÉ EN VUE DE
L'OBTENTION DU GRADE DE MASTER "INGÉNIEUR CIVIL DES
CONSTRUCTIONS"

Réalisé par :
BAH Boubacar

Promoteurs :
COLLIN Frédéric

Jury :
COURAR Luc
BERTRAND François
CUCCURULLO Alessia

Master 2 en Ingénieur Civil des Constructions
Année Académique 2024-2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Frédéric Collin, mon promoteur, pour la confiance qu'il m'a accordée, son encadrement attentif ainsi que ses conseils précieux tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son accompagnement m'a été d'un grand soutien et a largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur Jean-Jacques Mocto Kamden, chercheur à l'Université de Liège, pour son aide généreuse, sa disponibilité et la richesse de ses orientations scientifiques. Son appui m'a permis d'avancer avec clarté et méthode dans mes recherches.

Mes remerciements vont aussi à Madame Mathilde Piette, pour son aide précieuse lors des travaux pratiques en laboratoire. Son soutien et ses explications m'ont permis de surmonter de nombreuses difficultés et d'enrichir considérablement ma démarche expérimentale.

J'exprime également ma reconnaissance à Monsieur Courar Luc, Monsieur Bertrand François et Madame Cuccurullo Alessia, membres du jury, pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'évaluation de ce travail et pour l'attention portée à mon mémoire.

Je tiens à remercier tous les professeurs qui ont marqué mon parcours universitaire, pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leurs encouragements, qui ont contribué à enrichir mes connaissances et à éveiller mon intérêt pour la recherche.

Je remercie aussi mes amis, pour leur présence, leur soutien et les moments de partage qui ont rendu ce parcours plus agréable et motivant.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille pour leur soutien infaillible, leur patience et leur encouragement constant, qui ont été une source essentielle de force et de motivation dans la réalisation de ce travail.

Résumé

Cette étude évalue les performances mécaniques et les perspectives d'utilisation de matériaux autocompactants et réexcavables (MAR) formulés à partir d'un liant circulaire alternatif à base d'ettringite permettant de valoriser les sous-produits industriels tels que les boues de potabilisation, le papier riche en gypse et les sédiments de dragage. Pour ce faire, deux MAR ont été formulés dans deux systèmes de liants différents. La caractérisation mécanique a été réalisée à l'aide d'essais de compression simple (UCS) conformément à la norme ASTM C42/M. Les résultats ont été évalués selon les critères de classification du guide Qualiroutes (chapitre E 3.7) et les spécifications techniques issues du brevet Nonet.

Les résultats montrent que, pour les deux systèmes de liants, l'augmentation du dosage en ciment entraîne une amélioration nette de la résistance à la compression et de la rigidité. Cependant, à dosage identique, les mélanges ciment-chaux-cendres volantes atteignent des valeurs de résistance et de module nettement supérieures à celles des formulations ciment-ettringite. L'analyse comparative indique que le système classique se rapproche des seuils inférieurs de certaines exigences pour couches de fondation routière à fort dosage, tandis que le système à base d'ettringite reste dans une plage compatible avec les remblais techniques.

Ces résultats mettent en évidence le compromis entre performances mécaniques et aptitude à la réexcavation, et soulignent la nécessité d'optimiser la formulation ainsi que d'évaluer la durabilité à long terme. L'intégration de sous-produits industriels dans le système à base d'ettringite représente un atout environnemental notable, ouvrant des perspectives intéressantes pour des matériaux de construction durables destinés à des usages nécessitant une résistance modérée.

Abstract

This study investigates the mechanical performance and potential applications of re-excavatable self-compacting materials (MAR) formulated with two different binder systems. The first system combines cement, lime, and fly ash, while the second incorporates cement with an ettringite-based formulation containing lime, aluminum sludge, gypsum, and dredged sediment. Several dosages of cement (0, 30, 60, and 90 kg/m³) were tested for each system. Mechanical characterization was performed through unconfined compressive strength (UCS) tests following ASTM C42/M, applying the 0.87 correction factor for core samples, and modulus of elasticity determination. The results were evaluated according to the classification criteria of the Qualiroutes guide (chapter E 3.7) and the technical specifications from the Nonet patent.

The findings show that, for both binder systems, increasing cement content leads to a clear improvement in compressive strength and stiffness. However, at identical dosages, the cement–lime–fly ash mixtures achieved significantly higher UCS and modulus values than the cement–ettringite formulations. The latter exhibited lower strength but greater ductility, making them potentially suitable for re-excavatable applications. Comparative analysis indicates that the classical binder system approaches the lower thresholds of certain road foundation requirements at higher dosages, whereas the ettringite-based system remains in a range more compatible with technical backfills.

These results highlight the trade-off between mechanical performance and re-excavation potential, suggesting that binder optimization and long-term durability studies are necessary. The integration of industrial by-products in the ettringite-based system offers promising environmental benefits, making it a viable option for sustainable construction materials where moderate strength is sufficient.

Mots clés : réexcavabilité, ettringite, liant, compression, autocompactant.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Revue de Littérature	2
2.1	Généralités sur les MAR	2
2.1.1	Définition des MAR	2
2.1.2	Performances attendues	3
2.1.3	Types de MAR	4
2.2	Domaine d'application	4
2.2.1	Remblai	5
2.2.2	Citernes	5
2.2.3	Culées de pont	6
2.3	Limitations des MAR	6
2.4	Exemple type de MAR : le fluidoroc	7
2.4.1	Condition de mise en oeuvre(Qualiroutes E3.7.1.3) :	8
2.4.2	Vérifications (Qualiroutes E.3.7.3) :	8
2.5	Formulation d'un MAR	9
2.5.1	Formulation selon le brevet de Nonet	9
2.5.1.1	L'eau :	12
2.5.2	Fomulation selon ACI Comitte 229, 1994	12
2.6	Ettringite	15
2.6.1	Stabilité	15
2.7	Conclusion	16
3	Matériel et méthodes	17
3.1	Les matériaux	17
3.1.1	Les granulats	17
3.1.2	Le ciment	17
3.1.3	Les cendres volantes	18
3.1.4	La chaux	18
3.1.5	Les boues de potabilisation :	19
3.1.6	Le papier gypse :	20
3.1.7	Le sédiment B	21
3.2	Essais granulométriques des granulats et du sédiment B	22
3.2.1	Analyse granulométrique	23
3.2.2	Analyse sédimentométrique des sédiments B	25
3.3	Limites d'Atterberg	28
3.3.1	Limite de liquidité w_L	29
3.3.2	Limite de plasticité w_P	30
3.4	Test du pycnomètre à gaz	31
3.5	Essai au bleu de méthylène	32
3.6	Essai Proctor	33
3.7	Essai Los Angeles	34
3.8	Essai Micro-Deval	36
3.9	Essai d'absorption	38
3.10	Essai de compression	39
3.11	Conclusion	39
4	Formulation d'un MAR : résultats et analyses	41
4.1	Etude de la formulation	41
4.1.1	Optimisation de la compacité	41
4.1.2	Optimisation de la fluidité	43
4.1.3	Optimisation de la résistance	43
4.2	MAR classique	44

4.2.1	MAR classique 1	46
4.2.2	MAR classique 2	53
4.3	MAR avec éco-liant	55
4.3.1	Formulation d'éco-matériau à base d'ettringite	55
4.3.2	Caractérisation du liant	56
4.3.3	Utilisation de l'éco-matériau et du ciment	59
4.4	Conclusion	63
5	Conclusion et perspectives	64
5.1	Conclusion	64
5.2	Perspectives	64
6	Bibliographie	65
7	Annexes	66

Table des figures

1	Composition des MAR (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).)	3
2	Tranchées nécessitant un remblayage (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)	5
3	Remblayage de la fouille autour d'une citerne à l'aide de MAR (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)	6
4	Culées de pont (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)	6
5	Courbe granulométrique du fluidoroc Hublet sprl. 2017	9
6	Fuseau granulométrique pour n=0.4	12
7	Organigramme de dosage des proportions du mélange CLSM(Parhi, S. K., Dwibedy, S., Panda, S., et Panigrahi, S. K. 2015)	13
8	Les granulats (LMC, 2025)	17
9	Ciment (LMC, 2025)	18
10	chaux hydratée (Lhoist)	19
11	boues d'Eupen	20
12	boues de Stembert	20
13	gypse B	21
14	gypse C	21
15	sédiment B sec	22
16	sédiment B humide	22
17	Dispositif pour le tamisage mécanique en voie sèche	23
18	Courbe granulométrique	24
19	Mixeur (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnique)	25
20	Solution	26
21	éléments utilisés pour la sédimentométrie (ArGenC-Laboratoire de Géotechnique)	27
22	tamisage humide	27
23	Sédimentométrie des sédiments B	28
24	: matériel utilisé pour l'essai de la limite d'Atterberg(ArGenCo-Laboratoire de Géotechnique)	29
25	Limite de liquidité des sédiments B	30
26	Pycnomètre	32
27	Tableau de commande	32
28	Essai au bleu de méthylène du sédiments B	33
29	Proctor normal des sédiments B	34
30	Proctor modifié des sédiments B	34
31	Tambour (ArGenCo - Laboratoire de Géotechnologies)	35
32	boules d'acier (ArGenCo - Laboratoire de Géotechnologies)	35
33	Essai Micro-Deval	37
34	immersion des granulats	38
35	séchage des granulats	38
36	Évolution du coefficient d'absorption en fonction des granulats	39
37	n=0,3	42
38	n=0,4	42
39	n=0,5	42
40	diamètre 1	43
41	diamètre 2	43
42	essai de compression	44
43	après la comprssion	44
44	éléments MAR classique	45
45	mélangeur fermé	46
46	mélangeur ouvert	46
47	Évolution du diamètre d'étalement en fonction du w/s	48
48	moules cubiques de 15 × 15cm	49
49	Essai de compression	50
50	Etalement en fonction du dosage en ciment pour le MAR classique 1	51

51	Histogramme des résistances moyennes	53
52	Caption	54
53	Evolution du % de chaux en fonction du Ph	57
54	courbe de l'essai Proctor modifié pour l'éco-matériau	58
55	évolution de ph	59
56	Étalement pour l'optimisation de la fluidité MAR+éco-liant	60
57	Étalement en fonction du dosage en ciment pour l'optimisation de la résistance du MAR avec éco-liant	61
58	Evolution de la résistance du MAR+2éco-liant en fonction du dosage en ciment	62
59	Comparaison selon la résistance des 2 types de MAR	63
60	Comparaison selon la densité des 2 types de MAR	63

Liste des tableaux

1	Constituants possibles d'un MAR avec les prescriptions du Qualiroutes 2012 (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)	3
2	Classification des MAR en fonction du degré de difficulté d'excavabilité selon Qualiroutes E 3.7	4
3	Spécificité du fluidoroc (Hublet sprl. 2017)	7
4	Spécificité du fluidoroc (Hublet sprl. 2017)	8
5	Granulométrie du fluidoroc (Hublet sprl. 2017).	8
6	Tableau des valeurs de passant (brevet Nonet 2014)	12
7	Composition minéralogique des cendres volantes (LMC, 2025)	18
8	Teneurs (%) en éléments majeurs (CTP, 2023)	19
9	pH des boues (CTP 2023)	19
10	Teneurs en éléments majeurs dans les lixiviats des boues de potabilisation (CTP 2023)	19
11	Teneurs(mg/l) en éléments majeurs dans les lixiviats après lixiviation basique des boues de potabilisation alumineuse (CTP 2023)	20
12	Résultats de l'analyse des éléments majeurs (%) dans le brut des déchets de papiers riches en gypse (CTP 2023)	20
13	Teneurs en éléments majeurs (mg/L) dans les lixiviats de déchets de papier riches en gypse (CTP 2023)	21
14	Résultats de l'analyse des éléments majeurs (%) dans le brut des sédiments de dragage (CTP 2023)	21
15	Teneurs en éléments majeurs dans les lixiviats des sédiments de dragage (CTP 2023)	22
16	Teneurs en éléments majeurs dans les lixiviats après lixiviation basique des sédiments de dragage (CTP 2023)	22
17	Résultats pour la granulométrie des granulats 0/4, 4/7 et 7/14	24
18	Résultats expérimentaux pour w_L	29
19	Teneur en eau des échantillons pour w_P	31
20	Classification du sol selon la valeur IP (Géotechnique Expérimentale Essais de caractérisation mécanique	31
21	Classification des sols selon l'indice de plasticité (CRR, 2009)	31
22	Résultats des tests au pycnomètre	32
23	Données granulométriques et nombre de boulets pour l'essai Los Angeles (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies)	35
24	Fraction 4/6.3 pour l'essai Los Angeles	36
25	Fraction 6.3/10 pour l'essai Los Angeles	36
26	Préparation des échantillons selon la fraction choisie pour l'essai Micro Deval	37
27	Les essais Micro Deval	38
28	Tableau du facteur de correction en fonction de L/D(ASTM International. (2023). ASTM C42/C42M-23)	39
29	Proportions des granulats en fonction de n	41
30	Granulométrie des granulats 0/14	42
31	Composition idéale du brevet de Nonet.	46
32	Composition en matière sèche, et densité des ingrédients pour $w/s = 0,2$	47
33	Les dosages en fonction de w/s	47
34	Étalement en fonction du w/s	47
35	Composition en matière sèche, et densité des ingrédients pour $w/s = 0.5$	49
36	Les dosages en fonction des mélanges pour le MAR classique 1	50
37	La fluidité en fonction du dosage en ciment	51
38	Dosages en fonction des mélanges pour le MAR classique 2	54
39	% Masse sèche pour l'éco-mmatériau	55
40	Mélange pour la saturation en chaux	57
41	Résultats pour la saturation en chaux	57
42	Résultats de l'essai Proctor modifié pour l'éco-matériau	58
43	Évolution du pH au cours du temps	58

44	Optimisation de la fluidité pour le MAR avec éco-liant	59
45	diamètre moyen d'étalement pour l'optimisation de la fluidité du MAR avec l'éco-liant	60
46	Dosages pour l'optimisation de résistance du MAR l+éco-liant	60
47	Étalement en fonction du dosage en ciment pour l'optimisation de la résistance du MAR avec éco-liant	61
48	Sédimentométrie des sédiments B	66
49	tableau granulométrique 0-4	66
50	tableau granulométrique 4-7	66
51	tableau granulométrique 7-14	67
52	Sédimentométrie des sédiments B	67
53	Tableau des valeurs pour l'essai Proctor normal sédiment B	67
54	Tableau des valeurs pour l'essai Proctor modifié sédiment B	67
55	Résultats de l'essai d'absorption pour les granulats 0/4	68
56	Résultats de l'essai d'absorption pour les granulats 4/7	68
57	Résultats de l'essai d'absorption pour les granulats 7/14	68
58	n=0,3	69
59	n=0,4	69
60	n=0,5	69

1 Introduction

L'urbanisation croissante et la nécessité de gérer durablement les ressources naturelles imposent aujourd'hui le développement de solutions innovantes en matière de génie civil. Les matériaux autocompactants réexcavables (MAR) apparaissent comme une alternative prometteuse aux techniques classiques de remblayage, car ils offrent à la fois une bonne portance immédiate et la possibilité d'être facilement réexcavés lors de travaux ultérieurs. Leur utilisation suscite un intérêt particulier, notamment dans le cadre de l'économie circulaire, puisqu'ils peuvent intégrer des matériaux recyclés ou des sous-produits industriels.

L'objectif principal de ce travail est de formuler un MAR à partir d'un liant circulaire basé sur la formation d'ettringite, afin de valoriser des matériaux secondaires tout en garantissant les propriétés mécaniques et la réexcavabilité requises. Ce choix s'inscrit dans une démarche d'innovation et de durabilité, en explorant le potentiel des réactions ettringitiques pour stabiliser les mélanges et piéger certains constituants.

Dans le chapitre Revue de littérature, nous présentons d'abord les généralités relatives aux MAR, en abordant leur définition, leurs performances attendues et les différents types existants. Nous décrivons ensuite leur domaine d'application, leurs limites, ainsi qu'un exemple type – le Fluidoroc – avant de détailler les méthodes de formulation, notamment selon le brevet de Nonet et les recommandations de l'ACI Comité 229 (1994). Enfin, une attention particulière est accordée à la formation de l'ettringite, phase clé influençant la stabilité et la durabilité de ces matériaux.

Le chapitre Matériel et méthodes expose les matériaux utilisés dans cette étude – granulats, liants hydrauliques et ajouts – ainsi que les différents essais réalisés : analyses granulométriques, limites d'Atterberg, essais Proctor, tests de résistance mécanique (Los Angeles, Micro-Deval, absorption d'eau, compression, etc.). Ce chapitre constitue la base expérimentale nécessaire à l'évaluation des performances des mélanges étudiés.

Le chapitre des résultats et analyses est consacré à l'étude des formulations. Après l'optimisation de la compacité, de la fluidité et de la résistance, différentes variantes de MAR classiques et à base d'éco-liants ont été mises en œuvre et comparées. Des essais de compression ont permis de classer les matériaux selon les critères de performance établis par les normes et guides de référence (Qualiroutes notamment).

Enfin, le mémoire se termine par une Conclusion et perspectives qui synthétise les principaux résultats obtenus et propose des pistes de recherche futures, telles que l'utilisation d'additifs spécifiques comme les superplastifiants ou encore la substitution de certains sédiments par des cendres volantes, en vue d'améliorer la densité et la durabilité des MAR.

2 Revue de Littérature

La présente revue de littérature a pour objectif de situer le travail dans son contexte scientifique et technique en abordant les connaissances actuelles sur les matériaux autocompactants réexcavables (MAR). Ces matériaux, caractérisés par leur mise en œuvre fluide et leur capacité à être facilement retirés après durcissement partiel, constituent une alternative aux remblais granulaires traditionnels.

Dans un premier temps, une présentation générale des MAR est proposée, incluant leur définition, leur composition typique ainsi que les principales classifications établies selon les prescriptions Qualiroutes et les critères de Nonet. Les différents types de MAR, essorables ou non-essorables, sont décrits en lien avec leurs performances et leurs domaines d'application.

Par la suite, les multiples usages des MAR dans le domaine du génie civil sont détaillés, allant des remblais structurels et non structurels aux opérations spécifiques telles que le comblement de tranchées, la mise en place autour de citernes ou le remblayage des culées de pont. Les avantages pratiques et techniques sont mis en perspective avec les contraintes rencontrées sur le terrain.

Une attention particulière est portée aux limitations techniques, pratiques et économiques des MAR, afin de cerner les enjeux liés à leur mise en œuvre. L'étude se poursuit avec l'analyse d'exemples concrets, tel que le fluidoroc, illustrant les performances attendues et les spécificités de mise en place selon les normes et guides techniques en vigueur.

La revue présente les méthodes de formulation, à travers deux approches distinctes : celle issue du brevet Nonet, axée sur la prise rapide, la réexcavabilité et l'efficacité, et celle utilisée aux USA, orientée vers l'optimisation des propriétés mécaniques et rhéologiques par le contrôle de la compacité, de l'ouvrabilité et de la résistance. Ce cadre théorique constitue la base sur laquelle reposent les choix méthodologiques et expérimentaux développés dans la suite du travail. Enfin on terminera la revue sur une étude de l'ettringite.

2.1 Généralités sur les MAR

2.1.1 Définition des MAR

Les Matériaux Autocompactants et Réexcavables (M.A.R.) sont composés d'eau, de liants hydrauliques tels que le ciment ou la chaux, d'adjuvants, et de granulats naturels ou recyclés comme l'indique la figure 1. Leur formulation peut être enrichie par des liants hydrauliques routiers conformément aux recommandations du guide Qualiroutes. Ces matériaux offrent une réponse efficace aux difficultés liées au compactage des remblais classiques, notamment dans les tranchées (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).

Les matériaux sont qualifiés d'**autocompactants** en raison de leur capacité à se mettre en place spontanément dans une tranchée par simple déversement, sans nécessiter de compactage ni de vibrations. En quelques heures, ils atteignent une portance suffisante pour permettre une remise en circulation rapide, tout en conservant à long terme des propriétés mécaniques adéquates (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012). Leur caractère **réexcavable** provient d'une résistance volontairement limitée. Ainsi, tout remblai réalisé avec ces matériaux peut être retiré aisément, quel que soit le délai écoulé entre la mise en œuvre et une éventuelle réexcavation (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).

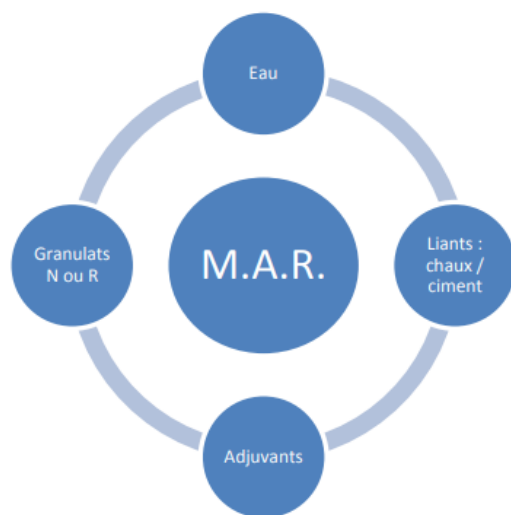


FIGURE 1 – Composition des MAR (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).)

Pour rentrer plus en détails sur les matériaux qui constituent un MAR (figure 1), le guide Qualiroutes 2012 dresse une liste complète reprise dans le tableau 1 de tous les constituants d'un MAR.

Matériaux	Prescriptions Qualiroutes 2012
Eau	C.1
Sol	C.2.2
Sable	C.3.4.3
Gravillons	C.4.4.3
Grave	C.5.4.3
Granulats d'argile expansée	C.6.3
Cendres volantes	C.7
Ciment	C.8
Chaux	C.9
L.H.R.	C.10.1
Filler	C.11
Adjuvant	C.17
Bentonite	C.65

TABEAU 1 – Constituants possibles d'un MAR avec les prescriptions du Qualiroutes 2012 (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)

2.1.2 Performances attendues

Les performances des MAR sont évaluées selon 3 critères :

- (a) la fluidité
- (b) la résistance
- (c) le délai de restitution

La fluidité

Selon le brevet de Nonet, la fluidité du MAR peut être évaluée grâce à un d'affaissement réalisé sur un cône d'Abrams et on s'attend à obtenir une valeur d'affaissement du cône d'Abrams supérieure ou égale à 24 cm (Brevet Nonet 2014).

On peut aussi évaluer la fluidité du MAR en effectuant un essai d'étalement en mesurant deux diamètres perpendiculaires et faire la moyenne. Le diamètre moyen devra alors se trouver en 60 et 75 cm selon la norme ASTM C1611/C1611M – 2008.

Résistance :

la résistance du MAR est déterminée à partir de l'essai de compression simple. Ainsi en fonction de la résistance on trouve différentes classe de MAR.

Selon le guide Qualiroutes E 3.7 (2011), on peut avoir 3 classe de MAR reprises dans le tableau 2.

CLASSE	MAR-1	MAR-2	MAR-3
Excavabilité	Facile	Moyennement facile	Difficile
Exécution	Manuelle	Manuelle ou légèrement mécanisée	Mécanisée
Rc	< 0,7MPa	De 0,7 à 2 MPa	> 2MPa

TABLEAU 2 – Classification des MAR en fonction du degré de difficulté d'excavabilité selon Qualiroutes E 3.7

Nous remarquons que la résistance nous permet non seulement de classer le MAR, mais aussi de trouver son mode d'exécution et l'excavabilité.

Selon le brevet de Nonet on peut classer les MAR se classent en 2 classes selon la résistance à la compression.

- (a) MAR de classe 1 dont la résistance à la compression est inférieure à 0.7 MPa ;
- (b) MAR de classe 2 dont la résistance à la compression est comprise entre 0.7 et 2 MPa ;

Nous remarquons que contrairement aux prescriptions de Qualiroutes, le brevet de Nonet ne prend pas en compte les MAR dont la résistance à la compression est supérieure à 2 MPa.

2.1.3 Types de MAR

Après avoir défini la nature et la composition des matériaux autocompactants réexcavables, il convient désormais d'en examiner les différentes catégories et leurs caractéristiques spécifiques, afin de mieux comprendre leurs domaines d'utilisation.

On distingue deux types de MAR, à savoir les MAR **essorables** et **non-essorables**.

- (a) Les **matériaux essorables** : assurent une capacité portante rapide grâce au principe du remblayage hydraulique. Une teneur en eau très élevée favorise leur densification par hydrocompactage. Environ 40 à 50 % de l'eau s'évacue naturellement à travers le sol récepteur, améliorant ainsi la portance du matériau par réduction de l'humidité et par la prise du liant (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).
- (b) En revanche, les **matériaux non essorables** : se comportent comme du béton frais : le mélange reste fluide et homogène à court terme. L'ajout d'agents moussants, comme les entraîneurs d'air, améliore leur maniabilité. Leur résistance dépend uniquement de la prise et du durcissement du liant, sans compaction hydraulique (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).

2.2 Domaine d'application

La distinction entre matériaux essorables et non-essorables, ainsi que les critères de classification par résistance et facilité d'excavation, permet d'identifier les usages les plus adaptés. Il est donc pertinent d'aborder à présent les principaux domaines d'application des MAR.

- Remblais structurels et non structurels ;
- l'installation des citernes ;
- les culées de pont ; etc...

Cette multiplicité d’usages témoigne de la flexibilité des formulations de MAR, permettant d’adapter les propriétés (résistance, densité, maniabilité, temps de prise) aux contraintes spécifiques de chaque projet (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012). Après avoir présenté les principaux domaines d’application des MAR, il convient d’examiner plus en détail certaines utilisations représentatives. Le remblai constitue l’un des cas les plus répandus.

2.2.1 Remblai

Les MAR se révèlent particulièrement efficaces comme matériaux de remblai, notamment dans les tranchées, cavités, réseaux souterrains ou sous chaussée. Leur nature autocompactante élimine le recours au compactage mécanique, même dans les espaces restreints, et garantit une densité homogène du remblai. Plusieurs études ont mis en avant leur temps de prise court, qui permet une réouverture rapide à la circulation (entre 4 et 7 heures), et leur facilité de réexcavation à l’aide d’outils classiques. Les formulations à faible densité (LD-MAR) sont privilégiées pour limiter les pressions latérales contre des structures comme les murs de soutènement (figure 2). Enfin, les MAR peuvent être produits à partir de matériaux alternatifs comme les sédiments ou sols de dragage, renforçant leur intérêt en matière de valorisation de déchets. Des travaux récents ont également conduit à des méthodes de dimensionnement spécifiques, assurant leur performance structurelle et opérationnelle (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).

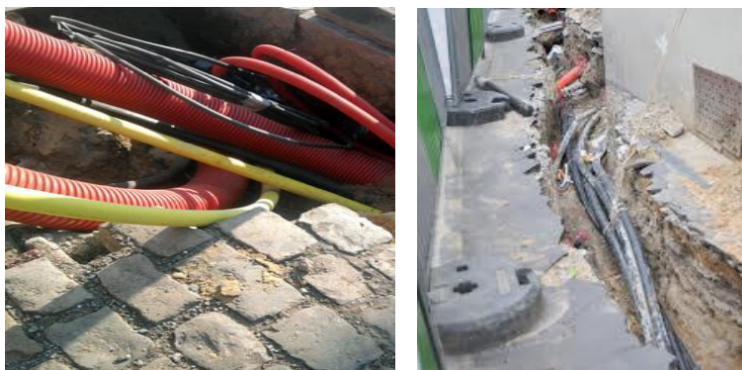


FIGURE 2 – Tranchées nécessitant un remblayage (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)

2.2.2 Citernes

L’installation de citernes ou de chambres de visite nécessite généralement un terrassement plus large que l’élément à poser, afin de permettre son positionnement ainsi que le compactage des remblais. Cette opération génère souvent un excédent de déblais dont la gestion peut poser problème si leur réutilisation sur le chantier n’est pas possible. L’utilisation des M.A.R permet de limiter considérablement le volume de fouille nécessaire (figure 3). Leur caractère autocompactant élimine le besoin de main-d’œuvre dans la tranchée pour effectuer un compactage, ce qui simplifie le travail et réduit le recours à des équipements comme les plaques vibrantes. Cela améliore aussi la sécurité sur le chantier en limitant la présence de personnel en fond de fouille. En outre, grâce à leur réexcavabilité, les M.A.R. facilitent toute intervention future sans contrainte particulière, offrant ainsi une solution pratique et durable (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).



FIGURE 3 – Remblayage de la fouille autour d’une citerne à l’aide de MAR (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)

2.2.3 Culées de pont

Le remblayage traditionnel des culées de pont est une opération complexe et risquée, nécessitant la mise en œuvre d’engins de compactage ainsi que la présence d’opérateurs dans une zone souvent difficile d’accès. L’utilisation des M.A.R., grâce à leurs propriétés autocompactantes et autoplacantes, permet de réaliser ce type de remblayage sans recourir à des équipements de compactage ni à de la main-d’œuvre en culée (figure 4). Ce procédé constitue donc un avantage technique et sécuritaire, adapté aux contraintes spécifiques de ce type d’ouvrage (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012).



FIGURE 4 – Culées de pont (CSTC, CRR, SPW, FEREDCO. 2012)

2.3 Limitations des MAR

Malgré la diversité et la pertinence de leurs applications, les MAR ne sont pas exempts de contraintes techniques, pratiques et économiques. L’étude de ces limitations est essentielle pour évaluer leur potentiel réel et envisager des stratégies d’optimisation. Plusieurs limitations techniques et économiques qui doivent être prises en compte en phase de conception et de mise en œuvre (Parhi, S. K., Dwibedy, S., Panda, S., et Panigrahi, S. K. (2023)). :

Techniques :

- Absence de normes de formulation, ce qui implique des ajustements spécifiques à chaque projet.
- Variabilité des performances selon les matériaux utilisés, la cure ou le dosage.
- Risque de pression latérale élevée à l'état frais, nécessitant des précautions de mise en place (levées par couches).
- Allongement du temps de prise par temps froid, ou prise trop rapide en climat chaud, impactant la planification.
- Tendance au tassement ou retrait différé, notamment dans les tranchées ou vides mal confinés.
- Non-étanchéité, rendant les MAR inadaptés aux usages de scellement.
- Impossibilité de recouvrir immédiatement le matériau après pose (2–4 h de prise initiale).

Au-delà de ces contraintes purement techniques, certaines limites relèvent également d'aspects pratiques liés à la mise en œuvre sur chantier et à la gestion opérationnelle des MAR.

- Nécessité de limiter la résistance à long terme dans les cas de réexcavation future.
- Obligation de protéger les réseaux sensibles avant coulage.
- Confinement indispensable pour garantir la stabilité de la mise en œuvre.
- Les applications en grande profondeur exigent des temps d'attente supplémentaires entre les phases.

Enfin, au-delà des considérations techniques et pratiques, l'aspect économique demeure un facteur déterminant dans le choix et l'acceptabilité de cette solution.

- Les MAR restent plus coûteux que les remblais granulaires classiques, notamment à cause des liants et adjuvants.
- Leur usage doit être justifié par la valeur ajoutée technique (réduction de main-d'œuvre, accessibilité, durabilité, etc.).

2.4 Exemple type de MAR : le fluidoroc

Malgré ces différentes limites, les MAR restent une solution innovante et performante lorsqu'ils sont adaptés aux contraintes spécifiques du projet. Pour illustrer concrètement leur potentiel et leurs conditions d'utilisation, il est pertinent d'examiner un exemple type : le Fluidoroc, un matériau développé et commercialisé par la société de construction HUBLET, dont les caractéristiques et performances offrent un éclairage pratique. Développé par la société Hublet, une entreprise spécialisée dans le recyclage des déchets de construction, le fluidoroc est un matériau de remblai autocompactant et réexcavable, qui a été développé spécialement pour l'enrobage des câbles et des conduites serrées (Hublet sprl. 2017).

Le fluidoroc est un matériau innovant dont les spécificités sont mentionnées à la table 3, conçu à partir de produits de scalpage, répondant aux exigences du cahier des charges Qualiroutes 2012 (section E.3.7). Il est spécifiquement destiné aux travaux de remblayage de tranchées, notamment lorsque ces dernières sont étroites ou encombrées par la présence de nombreux réseaux. Ce matériau, évolutif par nature, voit sa portance s'accroître avec le temps, ce qui en fait une alternative avantageuse aux sables traditionnellement utilisés pour les remblaiements autour des canalisations. Lorsqu'il est mis en œuvre selon les bonnes pratiques, le fluidoroc garantit une stabilité dimensionnelle optimale (Hublet sprl. 2017).

Granulométrie	0/14	mm
Teneur en eau	25 à 35	% (À la livraison)
Classe d'excavabilité	MAR-1	
Délai de restitution aux piétons	12	h
Portance	>17	MPa (Après 48h à 20°C, sans précipitations)
Type de MAR	Non essorable	(avantage)
Densité lors de la mise en œuvre	1.850	Kg/m ³

TABLEAU 3 – Spécificité du fluidoroc (Hublet sprl. 2017)

2.4.1 Condition de mise en oeuvre(Qualiroutes E3.7.1.3) :

La mise en œuvre de ce matériau nécessite certaines conditions précises. Il est impératif de stabiliser les canalisations pour éviter tout mouvement vertical. Avant le coulage, la fluidité du matériau peut être ajustée par ajout d'eau afin d'atteindre un affaissement optimal. Le produit doit être coulé en quantité strictement nécessaire, à température extérieure supérieure à 5 °C à 8 h du matin, sous abri et sur un sol non gelé. Il est fortement déconseillé d'utiliser le Fluidoroc en période de mauvaises conditions climatiques (Hublet sprl. 2017).

2.4.2 Vérifications (Qualiroutes E.3.7.3) :

Concernant les vérifications (conformément aux exigences de Qualiroutes E.3.7.3), des essais sont réalisés 48 heures après l'application, les résultats des essais sont mentionnés à la table 4. En profondeur, un pénétromètre à énergie variable permet de contrôler les performances du remblai selon les exigences du guide de Qualiroutes E.3.3.3. En surface, la résistance mesurée à la plaque de 750 cm² doit atteindre au minimum 17 MPa au niveau du fond de coffre. Enfin, la résistance à 28 jours ne doit pas dépasser 0,7 MPa, conformément aux spécifications (Hublet sprl. 2017).

Granulométrie	0/14	mm
Teneur en eau	25 à 35	% (À la livraison)
Classe d'excavabilité	MAR-1	
Délai de restitution aux piétons	12	h
Portance	>17	MPa (Après 48h à 20°C, sans précipitations)
Type de MAR	Non essorable	(avantage)
Densité lors de la mise en œuvre	1.850	Kg/m ³

TABLEAU 4 – Spécificité du fluidoroc (Hublet sprl. 2017)

Le Tableau 5 reprend la granulométrie du fluidoroc, et la figure 5 la courbe granulométrique associée.

Tamis (mm)	31,5	20	14	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Passant (%)	100,00	100,00	97,65	84,50	69,29	55,22	43,05	32,14	18,98	11,35	2,33

TABLEAU 5 – Granulométrie du fluidoroc (Hublet sprl. 2017).

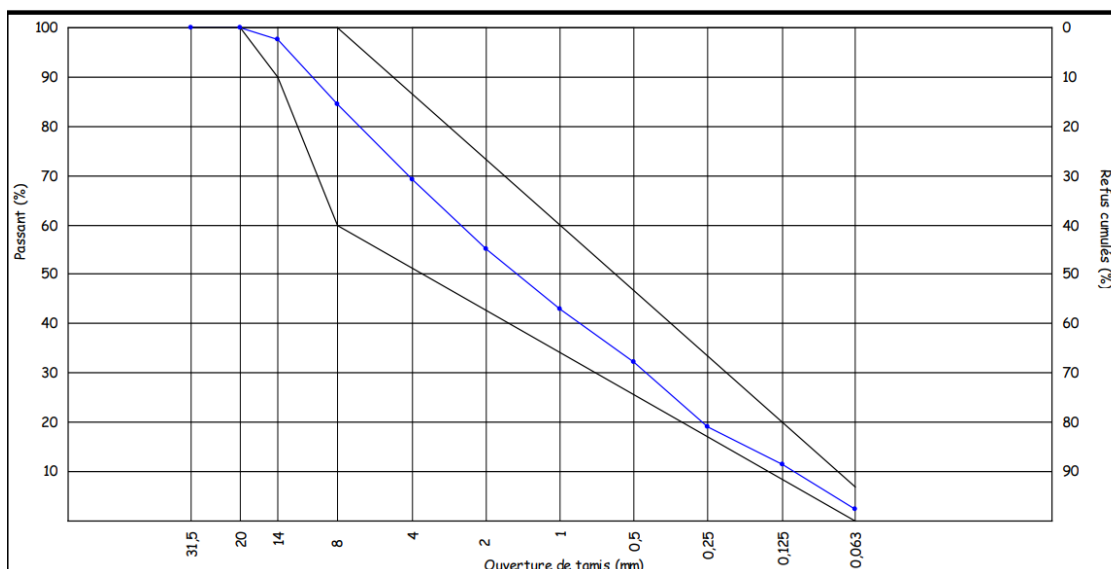


FIGURE 5 – Courbe granulométrique du fluidoroc Hublet sprl. 2017

2.5 Formulation d'un MAR

Si l'exemple du fluideorc met en lumière l'application réussie d'un MAR optimisé, il importe à présent d'examiner de manière plus générale les approches de formulation, afin de déterminer les paramètres clés influençant leurs performances.

Nous allons donc exposer de façon générale une première formulation qui correspond à la formulation selon le brevet de Nonet et une seconde formulation qui est une formulation selon ACI Comitte 229, 1994

2.5.1 Formulation selon le brevet de Nonet

Cette première formulation s'appuie sur le brevet délivré par la société de construction Nonet.

La formulation se base sur une composition de liant destinée aux remblais autocompactants et réexcavables à prise rapide, conformes aux classes MAR 1 ou MAR 2 conformément aux recommandations du guide Qualiroute 2012 de la Région Wallonne. Le but est donc d'avoir un MAR qui a trois propriétés principales : **la prise rapide**, **la réexcavabilité** et **l'efficacité accrue** en milieu perméable ou imperméable (brevet Nonet 2014).

- La prise rapide** : on attend à ce que le MAR atteigne une portance supérieure à 17 MPa après 60 minutes maximum de sa mise en oeuvre, de préférence entre 20 et 40 minutes. Cette portance est mesurée par un essai à la plaque [méthode de mesure du C.R.R. (Centre de recherches 20 Routières - Belgique) - MF.40/78 publiée en 1978] (brevet Nonet 2014).
- La réexcavabilité** : elle s'applique aux remblais de classes MAR 1 et MAR 2, dont la résistance à l'écrasement des éprouvettes cubiques est inférieure à 0,7 MPa pour la classe 1, ou comprise entre 0,7 et 2 MPa pour la classe 2. La plage préférentielle se situe entre 0,3 et 0,6 MPa. La mesure de cette résistance est réalisée 28 jours après la mise en place du remblai, sous des conditions de cure normalisées, à savoir une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 10\%$ (brevet Nonet 2014).
- L'efficacité accrue** l'objectif est d'atteindre les performances requises dans un délai maximal de 60 minutes, idéalement sans qu'une phase de drainage du remblai ne soit nécessaire. Autrement dit, aucune quantité d'eau supérieure à 15 l/m^3 de matériau ne doit nécessiter d'être évacuée par le sol ou extraite par intervention humaine, que ce soit par drainage ou pompage (brevet Nonet 2014).

Composition

Dans sa formulation optimale, la composition de remblayage contient (brevet Nonet 2014) :

- (a) 80 à 95 % de granulats, idéalement entre 80,5 % et 95 % en masse,
- (b) 4 à 14 % de liant hydraulique, avec une plage recommandée de 6 à 10 % en masse,
- (c) et 7% d'eau

Ces proportions sont exprimées en pourcentage du poids total de la composition de remblai.

Le liant

le liant est composé (brevet Nonet 2014) :

- (a) Cendres volantes : 65 à 95 % en masse, idéalement entre 75 et 85 %, apportant la majeure partie de la matrice liant ;
- (b) Ciment alumineux : 5 à 35 %, avec une plage optimale située entre 15 et 20 %, jouant un rôle essentiel dans la réactivité initiale ;
- (c) Chaux hydratée : 0,05 à 15 %, préférentiellement entre 1 et 5 %, utilisée pour améliorer la maniabilité, la prise et les propriétés mécaniques secondaires.

Ces pourcentages sont exprimés en proportion du poids total du liant hydraulique (hors granulats).

Une formulation alternative du liant hydraulique pour MAR peut intégrer (brevet Nonet 2014) :

- (a) 1 à 15% de chaux hydratée, idéalement entre 7 et 15 %, calculé sur la base du poids total du ciment alumineux et de la chaux.
- (b) La chaux joue un rôle d'accélérateur de prise du ciment alumineux, favorisant un durcissement plus rapide.

Les cendres volantes utilisées dans cette formulation présentent (brevet Nonet 2014) :

- (a) Une granulométrie contrôlée, avec un d_{80} compris entre 0,04 mm et 0.125 mm, garantissant une bonne répartition des particules fines ;
- (b) Par exemple, un $d_{80} = 0,04\text{mm}$ signifie que 80 % des particules ont un diamètre inférieur à 0,04 mm ;
- (c) Une densité volumique moyenne de l'ordre de $2,51 \cdot 10^3 \text{kg/m}^3 \pm 0.20 \cdot \text{kg/m}^3$;
- (d) elles assurent la fluidité du liant entre le moment de la production du liant et le début de prise.

Le liant peut aussi être composé de superplastifiant qui a pour rôle de diminuer la quantité d'eau. Sa teneur se trouve entre $2,7 \cdot 10^{-4}$ et $3,4 \cdot 10^{-3}\%$ en poids.

Pour atteindre une bonne fluidité du matériau de remblai, un superplastifiant à base de polycarboxylates, tel que ViscoCrete 1020® ou 2200HE® (Sika), peut être incorporé dans le liant hydraulique. Le dosage recommandé varie de 0,2 à 1,0 L/m³, avec une valeur optimale entre 0,3 et 0,5 L/m³, exprimée en solution à 34 % d'extrait sec. Cela équivaut à une dose massique de 0.06 à 0.35 kg/m³, et idéalement entre 0.10 et 0.17 kg/m³ pour des superplastifiants à 100 % (brevet Nonet 2014).

L'ajout de ces superplastifiants permet de réduire la quantité d'eau nécessaire à la formulation, tout en améliorant la maniabilité du mélange.

Le liant hydraulique utilisé dans les formulations de MAR joue un double rôle fonctionnel :

- d'une part, il agit comme lubrifiant entre les particules solides, facilitant la mise en œuvre et l'auto-compaction ;
- d'autre part, il assure une liaison mécanique par prise hydraulique, conférant une résistance suffisante après durcissement.

De part sa prise rapide, le liant permet d'avoir un MAR de type 1 ou 2 où le critère de portance qui au 17 MPa après 60 minutes est respecté ainsi que le critère sur la fluidité du MAR. Ce dernier est obtenu avec la valeur d'affaissement du cône d'Abrams qui au moins de 24 cm (brevet Nonet 2014).

Les granulats

Dans le cadre de cette formulation, les granulats utilisés doivent suivre une distribution granulométrique correspondant au fuseau défini par l'équation de Fuller et Thompson :

$$p = 100 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^n \text{ formule de Fuller Thompson (brevet Nonet 2014)} \quad (1)$$

où :

- p est le pourcentage cumulé de particules passantes, exprimé par rapport au poids total de la composition granulaire ;
- d représente la dimension des mailles du tamis (en millimètres) ;
- D est le diamètre maximal des particules ou grains de granulat (en millimètres), compris entre 5 mm et 10 mm ;
- n est un coefficient expérimental, dont la valeur varie entre 0,30 et 0,55.

Afin d'optimiser les propriétés de remblayage, la composition de granulat utilisée doit présenter une distribution granulométrique précise, caractérisée par les valeurs suivantes :

- d_{100} compris entre 6 mm et 17 mm ;
- d_{95} compris entre 5 mm et 12 mm ;
- d_{50} compris entre 1 mm et 5 mm ;
- d_{30} compris entre 0.3 mm et 1 mm

De manière préférentielle, il est recommandé que la distribution granulométrique présente également :

- d_{70} compris entre 3 mm et 7 mm ;
- d_{30} compris entre 0,3 mm et 0,9 mm ;
- d_{20} compris entre 0.1 mm et 0.5 mm ;

Dans ce contexte, la notation d_x désigne le diamètre en millimètres correspondant à la taille en dessous de laquelle se trouve X % en poids de l'ensemble des particules ou grains de la composition de granulat. De manière préférentielle, la composition de granulats est constituée de particules et/ou de grains provenant de l'un des mélanges suivants (brevet Nonet 2014) :

- sable naturel associé à du sable de concassage ;
- sable naturel combiné avec des granulats de carrière ;
- sable naturel associé à des granulats recyclés ;
- sable de concassage et granulats de carrière ;
- sable de concassage associé à des granulats recyclés ;
- granulats de carrière combinés à des granulats recyclés ;
- mélange de sable naturel, de sable de concassage et de granulats de carrière ;
- mélange de sable naturel, de sable de concassage et de granulats recyclés ;
- granulats de carrière, granulats recyclés et sable naturel ; ou
- granulats de carrière, granulats recyclés et sable de concassage

Le Tableau 6 reprend les valeurs pour le fuseau granulométrique et la figure 6 représente le fuseau avec la courbe idéale en rouge

d	p^s	p MIN (%)	p MAX (%)
14	100		100
10	100	85	100
8	91,5	76,5	100
6	81,5	66,5	entre 91,5 et 100
5	75,8	60,8	entre 85,8 et 90
4	69,3	54,3	79,3
2	52,5	37,5	62,5
1	39,8	24,8	49,8
0,5	30,2	15,2	40,2
0,2	20,9	5,9	30,9
0,063	13,2	0	23,2

TABLEAU 6 – Tableau des valeurs de passant (brevet Nonet 2014)

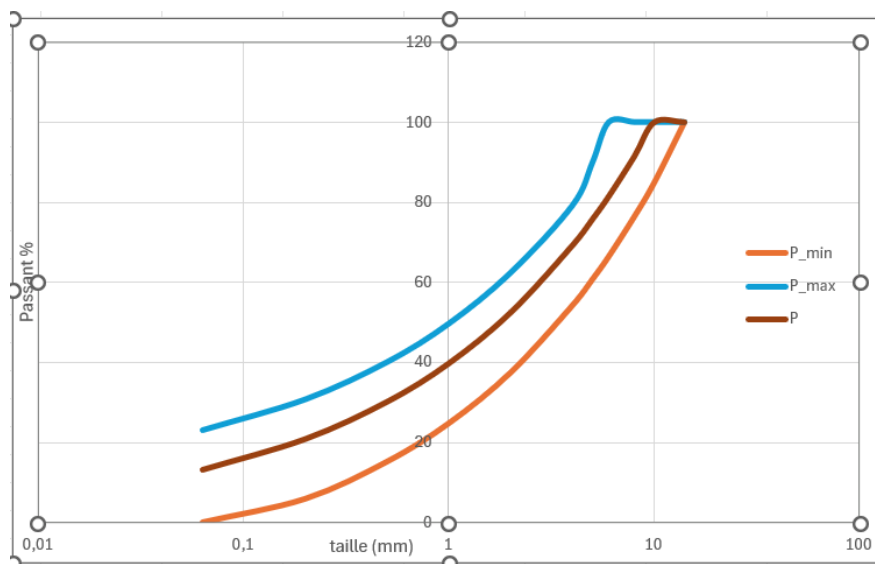


FIGURE 6 – Fuseau granulométrique pour $n=0.4$

2.5.1.1 L'eau : l'eau ajoutée doit avoir une teneur en poids comprise entre 6 et 15 %, de préférence entre 7 et 8 %, idéalement 7,1 % du poids total du MAR (brevet Nonet 2014).

2.5.2 Formulation selon ACI Comité 229, 1994

La première approche met l'accent sur la prise rapide et la réexcavabilité. La seconde, en revanche, adopte une démarche plus analytique et expérimentale visant l'optimisation globale des performances mécaniques et rhéologiques.

Aux USA, les MAR à très faibles résistances sont appelés les CLSM (Controlled Low Strength Material).

Cette deuxième formulation a été proposée par ACI Comité 229, 1994). En 2015, P.Pujadas, A.Blanco, S.Cavalero et A.Aguado ont défini la procédure basée sur l'optimisation des performances des CLSM (figure 7). Elle se décline en plusieurs étapes correspondant aux principales exigences fonctionnelles du matériau.

Dans un premier temps, il s'agit de concevoir un système solide (S), composé d'agrégats (A) et de liant (B), présentant la densité d'empilement la plus élevée possible. Ensuite, la quantité d'eau est déterminée afin d'assurer l'ouvrabilité souhaitée du mélange. Enfin, un ajustement du dosage en liant est réalisé pour atteindre la résistance mécanique requise (P.Pujadas, A.Blanco, S.Cavalero et A.Aguado en 2015).

Chaque étape fait l'objet d'une description détaillée dans les sections suivantes.

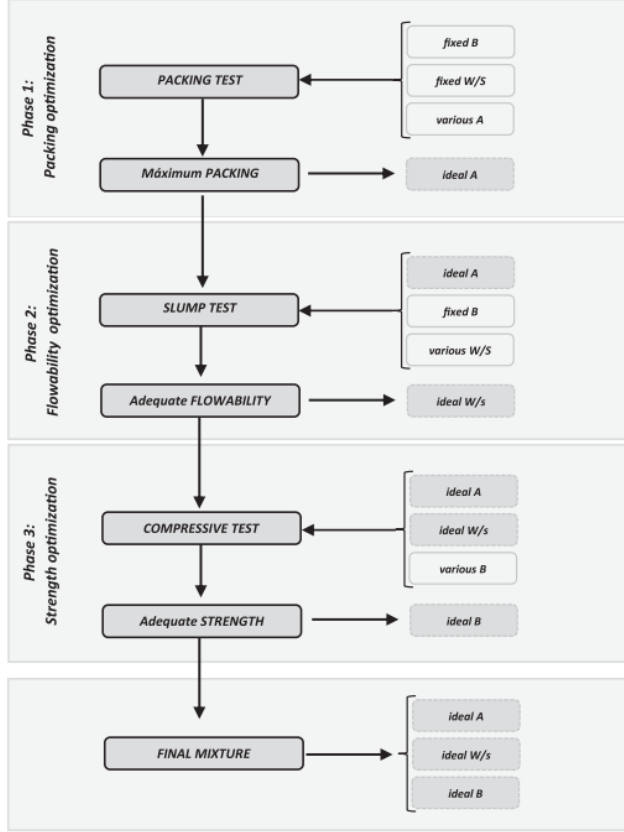


FIGURE 7 – Organigramme de dosage des proportions du mélange CLSM(Parhi, S. K., Dwibedy, S., Panda, S., et Panigrahi, S. K. 2015)

Étape 1 : Optimisation du compactage du système solide :

Le compactage du mélange solide exerce une influence majeure sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques des matériaux autocompactants et réexcavables, comme l'ont montré plusieurs études. Un compactage élevé réduit l'espace entre les particules, ce qui améliore la stabilité du mélange à l'état frais, limite les phénomènes de ségrégation, augmente la résistance mécanique et permet de diminuer la quantité de liant nécessaire (Kwan et Fung, Fung 2009).

Cette première étape vise donc à identifier la proportion optimale d'agrégats permettant d'atteindre la concentration solide maximale (ϕ), paramètre déterminé en utilisant la relation entre le volume total (V_T) et le volume de solides (V_S).

Le but ici est de trouver la proportion des granulats qui donne la plus grande concentration en solide.

Étant donné que les granulats représentent près de 80% du volume du MAR, plusieurs combinaisons granulaires sont testées par un essai de compactage humide jusqu'à atteindre la concentration maximale (ϕ_{max}). À ce stade, la teneur précise en eau et en liant n'est pas encore optimisée, mais des valeurs standards sont retenues afin de limiter leur influence sur la détermination de ϕ_{max} (P.Pujadas, A.Blanco, S.Cavalero et A.Aguado en 2015).

$$\phi = \frac{V_S}{V_T} \quad (\text{Pujadas, P., Blanco, A., Cavalero, S., Aguado, A. 2015}) \quad (2)$$

Il faut donc pour cette première étape :

- fixer la teneur en ciment ;
- fixer le rapport w/s (eau/solide) ;
- faire varier les proportions de granulats jusqu'à obtenir la concentration solide maximale.

En 2004, DeSchutter et Poppe ont mesuré la densité de compactage du sable par la méthode de compactage à sec et ont corrélé la demande en eau du mortier ciment-sable à la densité de compactage du sable.

En 2007, Miyake et Matsushita ont mesuré la densité de tassement de toutes les particules constitutives du mortier de ciment et de sable (y compris les matériaux cimentaires et le sable) à l'aide de la méthode du tassement à sec. Ils ont constaté que l'ouvrabilité du mortier est principalement régie par le rapport entre l'épaisseur du film d'eau et la taille des particules, qui peut être déterminé, à partir de la teneur en eau du mortier et de la densité de tassement des particules constitutives. La concentration solide ϕ peut aussi être calculée à partir de la masse volumique humide (M/V) (Kwan, A. K. H., et Fung, W. W. S. 2009).

$$\phi = \frac{M/V}{\rho_w U_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_S R_S} \quad (\text{A.K.H. Kwan, W.W.S. Fung}) \quad (3)$$

où :

- ρ_w est la densité de l'eau ;
- ρ_α et ρ_β sont respectivement les densités des matériaux cimentaires α et β ;
- ρ_S est la densité des granulats ;
- U_W est le rapport eau/solide (W/S) ;
- R_α , R_β et R_S sont respectivement les rapports volumiques des composants α , β et des granulats par rapport au total des solides.

Étape 2 : Détermination de l'ouvrabilité optimale

De nombreux auteurs ont étudié les rôles physiques de l'eau dans les mélanges cimentaires frais.

Une fois le système solide optimisé, la seconde étape vise à définir la quantité d'eau nécessaire pour garantir l'ouvrabilité ciblée du MAR. L'eau joue trois rôles essentiels trois rôles fondamentaux dans le comportement du mélange à l'état frais : elle est d'abord partiellement absorbée par les grains solides, ensuite elle permet d'enrober les particules, et enfin elle facilite leur mobilité, assurant ainsi la fluidité du matériau. Dans le cadre des MAR, où la proportion de granulats est largement dominante par rapport au liant, c'est essentiellement cette phase granulaire qui détermine le besoin en eau. Il est donc plus pertinent d'utiliser un rapport eau/agrégat (E/A) plutôt que le rapport eau/liant (E/L) classique des bétons. Néanmoins, ce raisonnement peut entraîner une procédure itérative dans la formulation, car toute variation du liant (étape 3) modifierait indirectement l'ouvrabilité définie ici. Pour éviter cela, il est plus judicieux d'adopter le rapport eau/solide (E/S) comme paramètre de référence global. En utilisant ce ratio, les ajustements dans la composition solide (liant et granulats) ont un impact limité sur le besoin en eau, ce qui stabilise l'ouvrabilité Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A. 2015).

Ce rapport peut être défini soit volumétriquement :

$$W/S = \frac{V_W}{V_A + V_B} \quad (\text{Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A. (2014)}) \quad (4)$$

avec :

- V_A , V_B et V_W respectivement les volumes des granulats, du liant et de l'eau.

Lorsque le rapport eau/solide (E/S) est trop faible, la quantité d'eau disponible est insuffisante pour assurer l'enrobage complet des particules solides. En dessous d'un certain seuil critique $(W/S)_{min}$ les variations du ratio n'ont quasiment aucun effet sur la fluidité du mélange. Une fois cette limite minimale dépassée, l'eau additionnelle commence à jouer pleinement son rôle de lubrification, en augmentant la distance inter-particulaire et donc la mobilité des grains. Cela se traduit par une nette amélioration de l'ouvrabilité. Toutefois, un excès d'eau au-delà d'un certain point entraîne un phénomène de saturation : les gains en fluidité deviennent marginaux, tandis que le risque de ressuage et d'instabilité augmente. Il est donc recommandé de réaliser une série d'essais d'étalement avec des valeurs croissantes de E/S afin d'identifier le rapport optimal répondant aux exigences d'ouvrabilité (Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A. 2014).

$$(W/S)_{min} = 0.9(1 - \phi_{max}) \quad (\text{Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A. 2014}) \quad (5)$$

Une autre manière de déterminer le bon rapport w/s serait aussi de mesurer la fluidité à l'aide d'un slump-flow, c'est à dire mesurer l'étalement.

La norme ASTM C1611/C1611M – 2008, intitulée Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, définit la méthode d’essai permettant de mesurer la fluidité du béton autoplaçant (BAP). Cette méthode repose sur le principe de l’essai de slump-flow, qui consiste à évaluer l’écoulement du béton à l’état frais sans vibration, après soulèvement d’un cône tronqué. L’objectif est de mesurer le diamètre d’étalement obtenu, ce qui permet d’apprécier la capacité du béton à s’écouler sans ségrégation, critère essentiel pour garantir une mise en œuvre optimale du BAP (Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete).

$$\text{Slump flow} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete}) \quad (6)$$

- (a) avec d_1 : le plus grand diamètre de l’étalement circulaire du béton,
- (b) d_2 le diamètre de l’étalement du béton dans une direction approximativement perpendiculaire à d_1
- (c) avec $d_1 - d_2 \leq 50\text{mm}$ pour que le l’essai soit valide.

Étape 3 : Ajustement de la résistance mécanique

En complément de l’ouvrabilité, le MAR doit présenter une résistance mécanique suffisante, tout en conservant sa réexcavabilité. En général, une résistance à la compression comprise entre 1,5 et 2,0 MPa convient pour des applications structurales nécessitant un retrait ultérieur du matériau. L’objectif de cette étape est donc d’ajuster la teneur en liant afin d’atteindre une résistance adéquate, sans altérer les propriétés d’écoulement et de mise en œuvre obtenues lors des étapes précédentes. Lorsque le ciment Portland est utilisé comme liant, les dosages courants varient entre 40 et 100 kg/m³, ce qui permet d’atteindre des résistances à la compression comprises entre 0,5 et 2,5 MPa (Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A.).

Il est important de noter que l’ouvrabilité optimale définie à l’étape 2, le rapport eau/liant (W/S) ainsi que la granulométrie issue de la première étape sont maintenus constants.

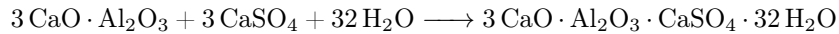
2.6 Ettringite

L’objectif de ce travail est de développer un écoliant, c’est à dire un liant issu des sous produits industriels. Or ces sous produits grâce à leurs caractéristiques, sont capables de former une phase hydraulique appelée **ettringite**. Cette phase hydraulique va donc servir de liant pour les MAR.

Dans le secteur du bâtiment, l’ettringite est un minéral qui se forme lors de certaines réactions d’hydratation du ciment. Ce dernier résulte principalement d’un mélange de chaux (C, selon la notation cimentière), de silice (S), d’oxyde d’aluminium (A), d’oxyde de fer (F) et de sulfate de calcium (CS). Ces matières premières, chauffées à environ 1450 °C, réagissent pour produire différents composés hydrauliques, notamment la bélite (C_2S), l’alite (C_3S), l’aluminat tricalcique (C_3A) et l’alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF), qui constituent ensemble le clinker.

Lors de la mise en contact du clinker avec l’eau, il se forme des hydrates de silicate de calcium (CSH) et de l’hydroxyde de calcium (CH). Parallèlement, la présence simultanée de sulfate de calcium et de C_4AF en milieu aqueux entraîne la formation d’ettringite. Ce processus, influencé par les proportions relatives des réactifs et les conditions de cure, joue un rôle significatif dans les propriétés des matériaux cimentaires (Courard. Luc. 2022).

La réaction globale de synthèse de l’ettringite peut s’écrire comme suit :



Des travaux ont mis en évidence la possibilité de synthétiser de l’ettringite sans ciment, à partir de boues de traitement d’eau riches en aluminium, de chaux et de papier à forte teneur en gypse (REMIND, 2021, Charlier. Nicolas 2025).

2.6.1 Stabilité

La stabilité de l’ettringite varie selon les conditions environnementales, et plusieurs paramètres influencent sa conservation : la température, le degré d’hydratation, le pH et la carbonatation (Poupelloz 2019) .

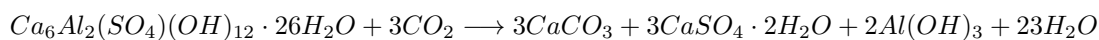
Sur le plan thermique, elle demeure stable jusqu'à environ 85 °C, comme l'ont montré des essais menés dans différentes conditions (air sec, humidité élevée, immersion) (Poupelloz, 2019).

Concernant l'hydratation, la perte partielle d'eau ne provoque pas immédiatement la dégradation de la structure cristalline ; toutefois, lorsque le nombre de molécules d'eau chute en dessous de 29–30, la cristallinité commence à se détériorer, et devient irréversiblement altérée en dessous de 10 à 13 molécules. Ce processus est en partie réversible si l'ettringite est réhydratée (Poupelloz, 2019).

Pour le pH, la stabilité est assurée au-delà de 10,77, avec des plages optimales qui varient en fonction de la température :

- 25 °C : pH entre 10,43 et 12,25
- 50 °C : pH entre 10,52 et 12,41
- 85 °C : pH entre 10,87 et 12,25

Enfin, en présence de CO₂ et d'eau, l'ettringite peut se décomposer en gypse, gibbsite et carbonate de calcium, selon la réaction :



Cette transformation accroît la porosité, diminuant ainsi la résistance mécanique du sol.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les aspects théorique nécessaire pour la compréhension des MAR.

Nous avons tout d'abord commencé par la généralités des MAR, là nous avons défini les MAR puis nous avons évoqué les performances attendues ainsi que les types de MAR. Nous avons ensuite listé les différents domaines d'application, l'étude s'est poursuivie en exposant les limites et un exemple type qui est le fluidoroc. Dans la suite de la revue, nous avons étudié deux types de formulations et comme le travail a pour objectif le développement d'un écoliant, nous avons terminé par une étude sur l'ettringite.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire les différents matériaux qui seront utilisés ainsi les essais de caractérisation qui ont été menés sur ces matériaux.

3 Matériel et méthodes

Le chapitre précédent a présenté une revue de littérature approfondie portant sur les concepts, les matériaux et les techniques liés à la stabilisation des sols et au traitement des matériaux alternatifs.

Dans le présent chapitre, l'accent est mis sur la description détaillée des matériaux utilisés et des méthodes mises en œuvre pour mener les essais expérimentaux. Les protocoles suivis sont issus de normes reconnues (ASTM, EN, etc.) afin de garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

Les sections qui suivent précisent successivement les caractéristiques des matériaux, les procédures d'essai (notamment l'essai de saturation à la chaux conformément à la norme ASTM D6276 – 99a et l'essai de compression selon la norme ASTM C42/C42M), ainsi que les modalités de préparation et de mesure. Cette approche méthodologique constitue la base indispensable à l'interprétation des résultats présentés dans le chapitre suivant.

3.1 Les matériaux

3.1.1 Les granulats

Les granulats utilisés (figure 8) dans le cadre de ce travail, sont des granulats recyclés dont les tailles sont les suivantes : 0/4 ; 4/7 et 7/14.



FIGURE 8 – Les granulats (LMC, 2025)

3.1.2 Le ciment

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé un ciment de CEM II 42.5 N.

Ce ciment est composé de cendres volantes (V), de calcaire (L) ou de composés (M) (Technologie des bétons et matériaux nouveaux, COURARD Luc 2022)



FIGURE 9 – Ciment (LMC, 2025)

3.1.3 Les cendres volantes

Les cendres étudiées proviennent d'une centrale de cogénération fonctionnant à partir de biomasse. Cette installation produit simultanément de la chaleur et de l'électricité en brûlant différents types de combustibles issus de la valorisation de déchets organiques. Parmi les combustibles utilisés, on retrouve des bois usés non dangereux, des plaquettes de palettes, des résidus de compostage ainsi que des écorces. Les cendres prélevées sont qualifiées de pures, car elles n'ont subi aucun traitement chimique après leur production. Elles proviennent d'un four à grilles, un dispositif couramment utilisé pour la combustion de biomasse, dont la température de fonctionnement avoisine les 1000°C.

Composant	Formule chimique	Teneur
Amorphacité		48 %
Quartz	SiO_2	40 %
Anhydrite	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	3 %
Pseudowollastonite	CaSiO_3	3 %
Akermanite	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Traces
Gehlenite	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$	Traces
Calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Traces
Albite	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	2 %
Lime	CaO	2 %

TABEAU 7 – Composition minéralogique des cendres volantes (LMC, 2025)

3.1.4 La chaux

La chaux SuperCalco est un produit industriel développé par la société Lhoist, reconnu pour sa haute réactivité et sa pureté élevée en oxyde de calcium (CaO). Il s'agit d'une chaux vive, généralement composée à plus de 90% de CaO , utilisée dans diverses applications telles que la stabilisation des sols, le traitement des boues, la neutralisation des effluents acides, ou encore l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux en génie civil. Elle est particulièrement appréciée pour sa capacité à augmenter rapidement le pH et à réagir fortement avec l'humidité du sol, ce qui favorise la réduction de la plasticité et le gain de portance. Grâce à sa granulométrie fine et sa réactivité élevée, la SuperCalco est utilisée dans les chantiers nécessitant une action immédiate et durable(Lhoist Group – Fiche technique produit SuperCalco, 2023).



FIGURE 10 – chaux hydratée (Lhoist)

3.1.5 Les boues de potabilisation :

Compte tenu de leur teneur élevée en aluminium comme l'indique le tableau 8, les boues de potabilisation à savoir dans le cadre de ce travail les **boues d'Eupen** qui viennent de la station de potabilisation d'Eupen et les **boues de Stembert** qui viennent de la station de potabilisation de Verviers, sont utilisées comme une source d'aluminium. . Ces deux boues sont les sources d'aluminium, car le procédé de potabilisation, d'où elles sont issues, utilise des sels d'aluminium (CTP 2023).

Le Tableau 8 mentionne les teneurs en % des éléments majeurs présents dans les boues.

Échantillons	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄	S _{tot}
Boues Eupen	15,4	0,15	2,27	0,027	0,015	0,21	0,020	0,034	1,05	1,49	0,30
Boues Stembert	14,9	0,14	3,20	0,18	0,046	0,023	0,041	0,041	1,84	3,86	1,09

TABLEAU 8 – Teneurs (%) en éléments majeurs (CTP, 2023)

Le Tableau 9 reprend les pH des boues

Boues	pH
Eupen	8.01
Stembert	7.92

TABLEAU 9 – pH des boues (CTP 2023)

Des essais de lixiviation conformes à la norme EN 12457-2 ont été réalisés sur des boues issues du traitement de potabilisation. Les résultats sont repris dans le tableau 10 où les teneurs des éléments sont exprimées en mg/l. La procédure consiste à placer 100 g de matière sèche en contact avec 1 L d'eau durant une période de 24 heures. Ces tests ont pour objectif d'évaluer la libération des éléments majeurs, en particulier l'aluminium (Al), le calcium (Ca) et les sulfates (SO₄²⁻), ainsi que celle d'éléments mineurs susceptibles d'être présents dans les matériaux finaux (CTP 2023).

Échantillons	pH	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄
Boues Eupen	8,01	0,18	7,3	< 0,1	0,44	1,42	14,5	9,5	< 0,1	27,5	0,61
Boues Stembert	7,92	< 0,1	8,4	< 0,1	1,3	1,28	0,80	8,0	< 0,1	35,1	0,70

TABLEAU 10 – Teneurs en éléments majeurs dans les lixiviats des boues de potabilisation (CTP 2023)

Vu que l'ettringite se forme en milieu basique, des essais de lixiviation des boues en milieu basique ont aussi été menés. Les résultats repris dans le tableau 11, où les teneurs des éléments sont exprimées en mg/l,

Échantillons	pH	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄
Boues Eupen	9,49	56,1	3,3	22,3	40,7	0,3	2,9	n.a.	0,6	2,7	1,407
Boues Stembert	8,43	2,51	2,6	0,3	4,4	0,2	< 0,1	n.a.	0,3	0,3	2,698

TABLEAU 11 – Teneurs(mg/l) en éléments majeurs dans les lixiviats après lixiviation basique des boues de potabilisation alumineuse (CTP 2023)



FIGURE 11 – boues d'Eupen



FIGURE 12 – boues de Stembert

3.1.6 Le papier gypse :

Les résidus de papiers à forte teneur en gypse, constituant une source notable de sulfate et de calcium, proviennent de la ligne de traitement des plaques de plâtre REPLIC, implantée sur le port de Pecq. Pour ce travail nous avons utilisé 2 types de gypse, le premier est obtenu grâce au refus de criblage appelé **gypse B** et le second grâce au refus de circulation appelé **gypse C**. Ce dernier permet d'obtenir une concentration en ettringite plus élevée (CTP 2023).

Le Tableau 12 reprend les teneurs des éléments dans les deux gypses.

Échantillons	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄	S _{tot}
Gypse B	0,24	18,01	0,11	0,11	0,13	0,0029	0,071	0,007	0,69	37,3	15,32
Gypse C	0,41	20,72	0,18	0,16	0,24	0,0066	0,107	0,023	2,10	40,4	18,03

TABLEAU 12 – Résultats de l'analyse des éléments majeurs (%) dans le brut des déchets de papiers riches en gypse (CTP 2023)

On remarque que les éléments majeurs sont le calcium et les sulfates.

Comme les boues, un essai de lixiviation (tableau 13) a été mené sur les papiers gypse.

Échantillons	pH	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄
Gypse B	7,08	0,7	680,2	0,2	54,9	20,0	0,3	46,5	< 0,1	1,5	1 712,2
Gypse C	7,12	0,3	649,7	< 0,1	22,5	11,5	< 0,1	29,9	< 0,1	3,4	1 557,6

TABLEAU 13 – Teneurs en éléments majeurs (mg/L) dans les lixiviats de déchets de papier riches en gypse (CTP 2023)



FIGURE 13 – gypse B



FIGURE 14 – gypse C

Le gypse B est passé en aval d'un broyeur primaire. Cette origine justifie également son large spectre granulométrique : les particules s'étendent de 5 mm à 80 mm, avec une médiane (d₅₀) avoisinant les 25 mm. Par ailleurs, entre 10 et 15 % du matériau présente une taille inférieure à 1 mm.

En revanche, le gypse C, issu du déchet de papier à forte teneur en gypse, est collecté après trois étapes successives de broyage au sein de la même ligne. Cette particularité confère à l'échantillon une granulométrie nettement plus fine, majoritairement inférieure à 5 mm. La majorité des particules se situe entre 2 mm et 10 mm, tandis que la fraction de matière très fine (inférieure à 1 mm) dépasse légèrement les 20 % (CTP 2023).

3.1.7 Le sédiment B

La matrice de l'éco-matériau que nous voulons formulé est constitué par des sédiments de dragage pollués appelés dans le cadre de ce travail **sédiment B** en provenance de Sédisol. Ces sédiments sont majoritairement siliceux et contiennent des concentrations notables en aluminium et calcium (CTP 2023).

Le tableau 14 reprend les teneurs des éléments majeurs dans le sédiment B

composant	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄
teneur	6.24	2.28	10.03	1.70	0.58	0.112	0.35	0.253	21.3	0.42

TABLEAU 14 – Résultats de l'analyse des éléments majeurs (%) dans le brut des sédiments de dragage (CTP 2023)

Le comportement à la lixiviation (tableau 15) montre qu'on un pH neutre et égal à 8,26.

Échantillons	pH	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄
Sédiment B	8,26	< 1	573,9	< 1	72,4	81,6	2,3	89,8	1,3	59,7	1 100,2

TABLEAU 15 – Teneurs en éléments majeurs dans les lixiviats des sédiments de dragage (CTP 2023)

Comme pour les boues, vu que l'ettringite se forme en milieu basique, un essai de lixiviation en milieu basique (tableau 16) a aussi été mené.

Échantillons	pH	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	SO ₄
Sédiment B	10,5	102,7	60,6	95,1	103,9	10,6	1,5	n.a	278,7	372,5	3528,7

TABLEAU 16 – Teneurs en éléments majeurs dans les lixiviats après lixiviation basique des sédiments de dragage (CTP 2023)

Le sédiment B présente une teneur nettement plus élevée en minéraux argileux, ceci pourrait expliquer les concentrations plus élevées en polluants observées dans ce sédiment.

Comme l'indique la figure 16, la teneur en eau des sédiments est très élevée, il a fallu donc les sécher (figure 15).

La méthode de séchage à la figure 15 est celle à l'air libre, cette méthode est très longue elle peut aller jusqu'à 2 semaines. Elle a été utilisée pour sécher les sédiments, qui seront ensuite broyés avant le mélange.



FIGURE 15 – sédiment B sec



FIGURE 16 – sédiment B humide

3.2 Essais granulométriques des granulats et du sédiment B

Dans cette partie, deux essais complémentaires seront réalisés afin de caractériser la distribution des diamètres des particules composant le sol étudié. Le premier, appelé granulométrie par tamisage, permet de classer les grains jusqu'à une taille de 74 μm . Le second, connu sous le nom de sédimentométrie, est destiné à analyser les particules plus fines, c'est-à-dire de diamètre inférieur à 74 μm . Les résultats issus de ces deux essais permettront de tracer la courbe granulométrique, indispensable pour identifier le type de sol selon sa composition granulométrique [Fanara, 2021].

3.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est un essai de laboratoire visant à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un matériau granulaire. Elle permet d'évaluer la proportion des différentes fractions en fonction de leur taille. L'essai a été mené en deux étapes. La première, effectuée à sec, consiste à faire passer le matériau à travers une série de tamis disposés selon un ordre décroissant de mailles. Cette méthode permet de séparer les particules en classes granulométriques distinctes. La figure ci-dessous illustre le dispositif utilisé pour le tamisage mécanique réalisé au cours de cet essai.

La masse de l'échantillon est obtenue par :

$$0,2 \cdot D \leq M \leq 0,6 \cdot D \quad (7)$$

avec :

- D diamètre du plus gros granulat et exprimé en mm
- M la masse de l'échantillon exprimée en kg

Ensuite, l'essai par voie sèche est réalisé selon la procédure suivante (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnologies) :

- (a) Peser l'échantillon dans un récipient taré ;
- (b) Sélectionner une série de tamis de manière à ce que chaque taille soit le double de la précédente ;
- (c) Brosset les tamis pour éliminer tous les résidus potentiels ;
- (d) Peser et empiler les tamis de manière à avoir la plus grande taille de maille au-dessus ;
- (e) Verser l'échantillon progressivement ;
- (f) Placer la pile de tamis sur la table vibrante pour s'assurer qu'aucun grain ne reste bloqué dans des tamis qui ne correspondent pas à leur diamètre ;
- (g) Peser chaque tamis afin de déterminer la masse de l'échantillon retenu (le refus) pour chacun d'eux.



FIGURE 17 – Dispositif pour le tamisage mécanique en voie sèche

Nous avons ainsi réalisé une analyse granulométrique sur les granulats que nous avons utilisé, et les résultats sont repris dans les tableaux 17, 18 et 19.

Nous pouvons donc calculé le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c .

Avec

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \text{ et } C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (\text{Géotechnique Expérimentale Essais de caractérisation mécanique}) \quad (8)$$

où d_x est le diamètre des granulats pour lequel x% du poids total est inférieur à d_x (Géotechnique Expérimentale Essais de caractérisation mécanique).

En fonction des deux coefficients, nous pouvons donc déterminer le type granulométrie (Géotechnique Expérimentale Essais de caractérisation mécanique).

- Si $C_u > 3$, on a une granulométrie étalée (courbe aplatie).
- Si $C_1 < 3$ une granulométrie étroite et uniforme (courbe redressée).
- Si $C_u > 3$ et $1 < C_c < 3$, le sol est bien gradué, si non le sol est mal gradué.

En se basant donc sur l'équation (8), le tableau 17 reprend les différentes valeurs pour les coefficients C_u et C_c .

Granulats	$d_{10}(mm)$	$d_{30}(mm)$	$d_{60}(mm)$	C_u	C_c
0/4	0,18	0,406	1,040	5,7	0,88
4/7	2,08	3,4	4,276	2,06	1,3
7/14	6,3	7,066	9,006	1,43	0,88

TABLEAU 17 – Résultats pour la granulométrie des granulats 0/4, 4/7 et 7/14

En se basant sur le tableau 20, nous pouvons donc affirmer que :

- pour les granulats 0/4 on a une granulométrie étalée mais mal graduée ;
- pour les granulats 4/7 on a une granulométrie étroite et uniforme, et mal graduée ;
- pour les granulats 7/14 on a une granulométrie étroite et uniforme, et mal graduée ;

La figures 18 représente la courbe granulométrique des granulats 0/4, 4/7 et 7/14.

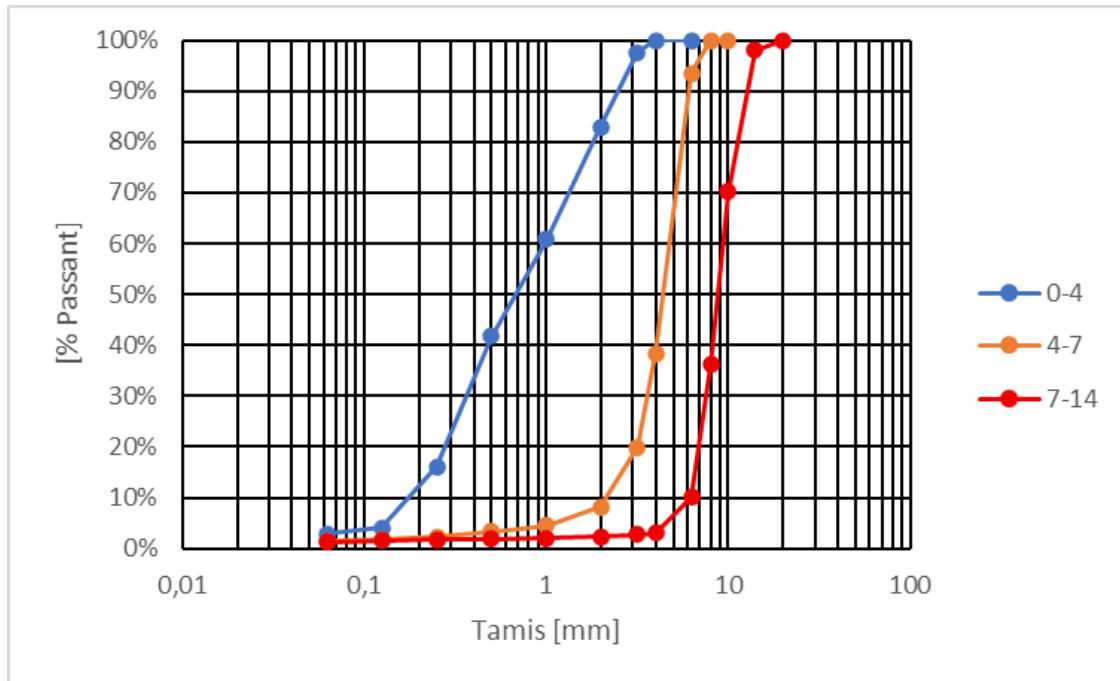


FIGURE 18 – Courbe granulométrique

3.2.2 Analyse sédimentométrique des sédiments B

Norme : NF P94-057.

Dans un second temps, l'analyse par sédimentométrie a été réalisée afin de déterminer la distribution des particules fines, non retenues par les tamis. Cette méthode repose sur le principe de la loi de Stokes, qui décrit la vitesse de sédimentation d'une particule dans un fluide en fonction de sa taille et de sa densité. Pour cela, les particules sont mises en suspension dans de l'eau à laquelle un défloculant est ajouté, afin d'éviter l'agglomération des grains. Sous l'effet de la gravité, les particules de tailles différentes décantent à des vitesses variables. Des prélèvements sont effectués à intervalles de temps réguliers pour mesurer la concentration des particules en suspension. À la fin de l'essai, l'échantillon est séché à l'étuve. Une nouvelle phase de tamisage à sec est ensuite réalisée, ciblant les fractions comprises entre 2,36 mm et 74 µm (ArGenC-Laboratoire de Géotechnologies).

Pour réaliser cet essai, nous allons suivre les étapes décrites ci-dessous (ArGenCo-Laboratoire de géotechnologies) :

- **Avant la préparation de la suspension :**

Le but de cette étape est de déterminer la teneur en eau après 24 heures dans une étuve à 105°C.

Pour ce faire, nous allons préalablement tarer un cristalliseur et noter sa tare (T) ainsi que son numéro, puis nous prélevons une petite quantité du sol étudié que nous posons ensuite et noter ici ce poids sera le poids humide (Ph), nous mettons ensuite le sol dans l'étuve(105°C) pendant 24 heures, nous le pesons ensuite pour obtenir la masse sèche (Ps).

Ainsi nous pouvons déterminer la teneur en eau comme ci-dessous

$$w(\%) = \frac{Ph - Ps}{Ps - T} \cdot 100 \quad (9)$$

- **Préparation de la suspension :**

Cette étape est divisée en 3 sous étapes :

- **Le sol :** Nous allons commencer par placer un contenant adapté, puis prendre un tamis dont les mailles carrées ont un diamètre de 2.38 mm, par lequel le sol sera tamisé pour obtenir 100 g de sol tamisé. Il faut ensuite définir la quantité de sol avec laquelle on travaille, puis peser et notifier le poids humide.
- **La solution :** Nous allons ensuite préparer la solution dans le mixeur. Pour cela nous avons besoin des éléments ci-dessous :
 - Le sol préalablement tamisé ;
 - un Berlin de 500 ml rempli d'eau distillé ;
 - 125 ml de défloculant (solution d'Hexa-méta-phosphate de sodium)

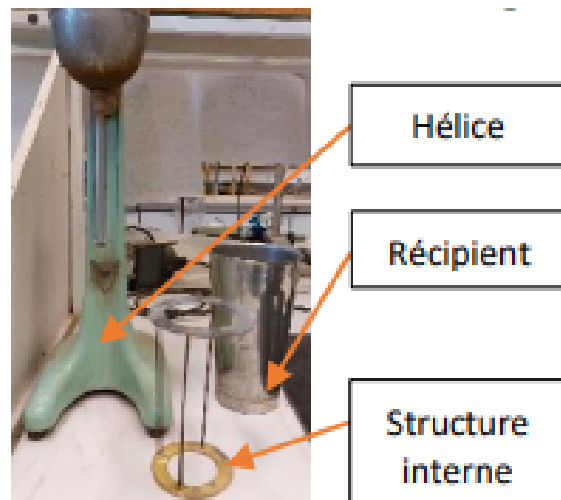


FIGURE 19 – Mixeur (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnique)

— **La suspension :**

- Commencer par mettre les 125 ml de défloculant dans le mixeur ;
- ajouter un peu d'eau distillée ;
- le sol tamisé en alternant avec l'eau ;
- une fois tout le sol a été ajouté, compléter le volume restant du récipient par de l'eau distillée ;
- mixer pendant 1 minute et bien rincer l'hélice du mixeur avec de l'eau distillée ;
- transvaser la solution dans une éprouvette d'1 L tout veillant à récupérer toutes les particules et compléter le volume restant de l'éprouvette par de l'eau distillée jusqu'à arriver à 1L et fermer l'éprouvette ;
- mettre la solution (figure 22) dans un bain thermostatique préalablement allumé et dont l'eau circule de façon homogène, et attendre 24 heures pour que le bain et la solution soit à la bonne température (21°C).



FIGURE 20 – Solution

○ **La sédimentométrie :**

Maintenant que toutes les étapes préalables ont été réalisées, on peut alors réaliser la sédimentométrie.

- Préparer préalablement un chronomètre ;
- mettre des rubans adhésifs autour du bouchon de l'éprouvette et retirer la solution du bain thermostatique pour ensuite la mélanger énergétiquement en mettant une main au sommet de l'éprouvette ;
- remettre ensuite l'éprouvette dans le bain et retirer le bouchon ;
- réaliser les mesures aux temps suivant : (1', 2', 5', 15', 45', 120'/2h, 300'/5h et 1440'/24h). Pour ce faire procéder comme suit :
 - insérer le densimètre dans la suspension pour mesurer sa masse volumique ;
 - laisser le densimètre se stabiliser pour relever la mesure et ensuite le sortir de la solution ;
 - procéder de la même manière jusqu'à la dernière mesure et ensuite coupe le bain thermostatique et la pompe.

La figure 23 montre les différents éléments utilisés pour la sédimentométrie.

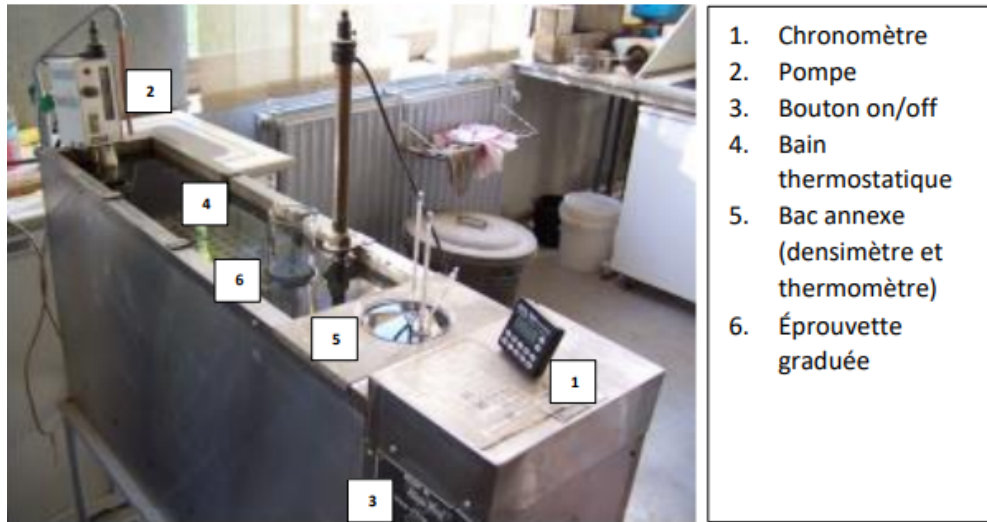


FIGURE 21 – éléments utilisés pour la sédimentométrie (ArGenC-Laboratoire de Géotechnique)

◦ **Le tamissage à $80 \mu\text{m}$:**

- Tarer et noter le poids et le numéro du tamis de $80 \mu\text{m}$;
- vider la solution contenue dans l'éprouvette sur le tamis, dont un sceau est placé en dessous ;
- rincer le tamis jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de traces de défloculant ;
- placer le tamis dans l'étuve pendant 24 à 72 heures.

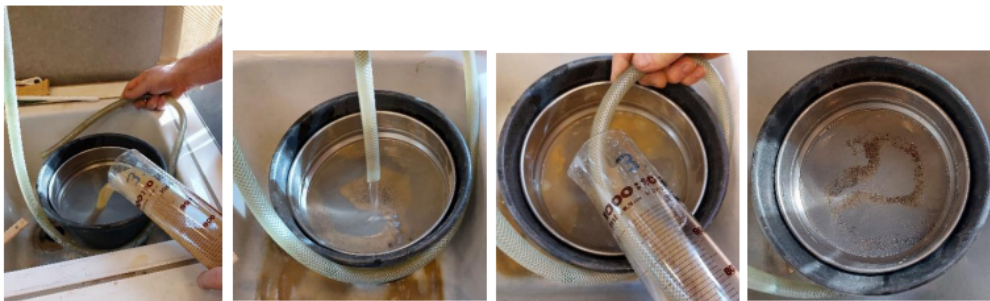


FIGURE 22 – tamisage humide

◦ **La granulométrie par voie sèche**

- Retirer le tamis de l'étuve et le laisser refroidir ;
- peser le tamis avec les particules ;
- réaliser la granulométrie par voie sèche en passant les particules à travers les tamis suivants : 2.38 mm, 1.19 mm, $600 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, et $75 \mu\text{m}$.

Pour réaliser la sédimentométrie des sédiments B on a utilisé une masse humide = 50 g, une masse sèche = 49.68 g pour une teneur en eau de $(w) = 0.6\%$ Masse vol. de grain = 2.600 g/cm^3 La figure 23 montre la courbe granulométrique obtenue à l'issue de l'essai et ainsi que les coefficients C_u et C_c . La partie inférieure de la courbe en rouge clair représente la sédimentométrie, et la partie supérieure de la courbe en rouge foncé représente l'analyse granulométrique

Au vu de ces résultats, nous pouvons donc dire que nous avons une granulométrie étalée et bien graduée. Près de 70% des passants passe au tamis $75 \mu\text{m}$, comme l'indique la figure 23. Le sédiment B est majoritairement constitué des particules fines.

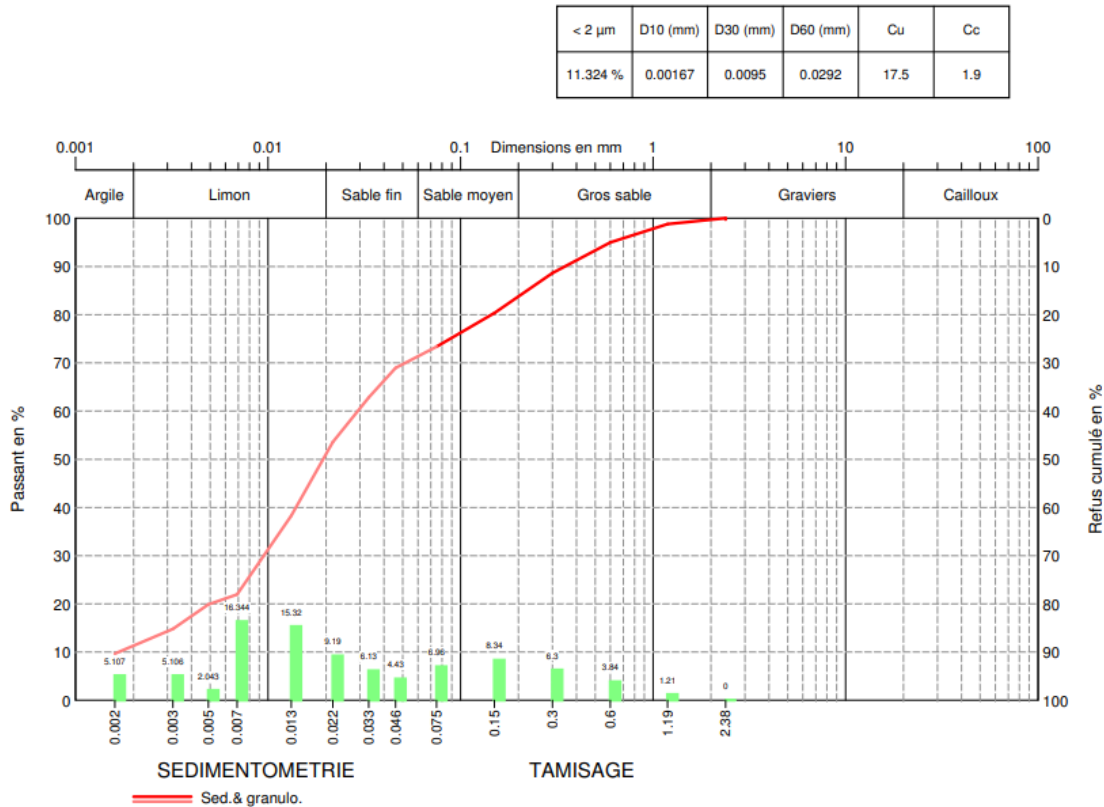


FIGURE 23 – Sédimentométrie des sédiments B

3.3 Limites d'Atterberg

Nous allons déterminer les limites d'Atterberg des sédiments B.

Les limites d'Atterberg sont des paramètres fondamentaux pour la classification des sols fins c'est à dire dont le diamètre est inférieur à $425\mu m$ (limoneux ou argileux), en fonction de leur consistance. Elles permettent de caractériser l'état du sol en fonction de sa teneur en eau, et d'évaluer son comportement en conditions naturelles ou de mise en œuvre (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnique) .

Trois limites principales sont définies (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnologies) :

- La limite de liquidité (W_L) : correspond à la teneur en eau à partir de laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide. Elle est déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande ou par la méthode du cône (ArGenCo-Laboratoire de géotechnique).
- La limite de plasticité (W_P) : représente la teneur en eau à partir de laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état solide (état semi-dur). Elle est déterminée par roulage de filaments de sol jusqu'à rupture à 3 mm de diamètre (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnique).
- L'indice de plasticité ($IP = W_L - W_P$) : il indique l'étendue de la plage de consistance plastique du sol. Plus l'IP est élevé, plus le sol présente un comportement plastique marqué, ce qui est souvent caractéristique des argiles (ArGenCo-Laboratoire de Géotechnologies).

La figure 24 indique les différents éléments utilisés pour réaliser l'essai.



FIGURE 24 – : matériel utilisé pour l'essai de la limite d'Atterberg(ArGenCo-Laboratoire de Géotechnique)

3.3.1 Limite de liquidité w_L

La limite de liquidité est déterminée comme suit(Fanara, 2021 ; ArGenCo Laboratoire de Géotechnologies) :

- Étaler l'échantillon de sol sur une plaque en verre ;
- Malaxer et sécher légèrement l'échantillon à l'aide d'une spatule ;
- Déposer la matière dans la coupelle de Casagrande, en éliminant les bulles d'air en appuyant fermement avec la spatule ;
- Créer une fente au centre de la coupelle à l'aide de l'outil adapté ;
- Actionner la manivelle à un rythme d'environ un coup par seconde, jusqu'à ce que la fente se referme sur une longueur de 10 mm ;
- Noter le nombre de coups nécessaires à la fermeture de la fente ;
- Prélever un échantillon de la zone refermée et le placer dans un cristallisoir taré à l'avance ;
- Peser le cristallisoir rempli, puis le placer à l'étuve pendant 24 heures ;
- Reprendre la pesée après séchage pour calculer la teneur en eau ;
- Répéter la procédure jusqu'à obtenir au moins trois résultats, en s'assurant que l'écart entre chaque mesure soit compris entre 5 et 10 coups, et que l'un des essais donne un nombre de coups proche de 25.

Le Tableau 18 reprend les différentes teneurs en eau obtenues pour chaque nombre de coup.

Nombre de coups NC	Teneur en eau $w(\%)$
11	68,8 %
15	59,3 %
20	56,5 %
36	53,9 %
35	52,1%

TABLEAU 18 – Résultats expérimentaux pour w_L

On peut donc représenter (figure 25) la teneur en eau en fonction du nombre de coup.

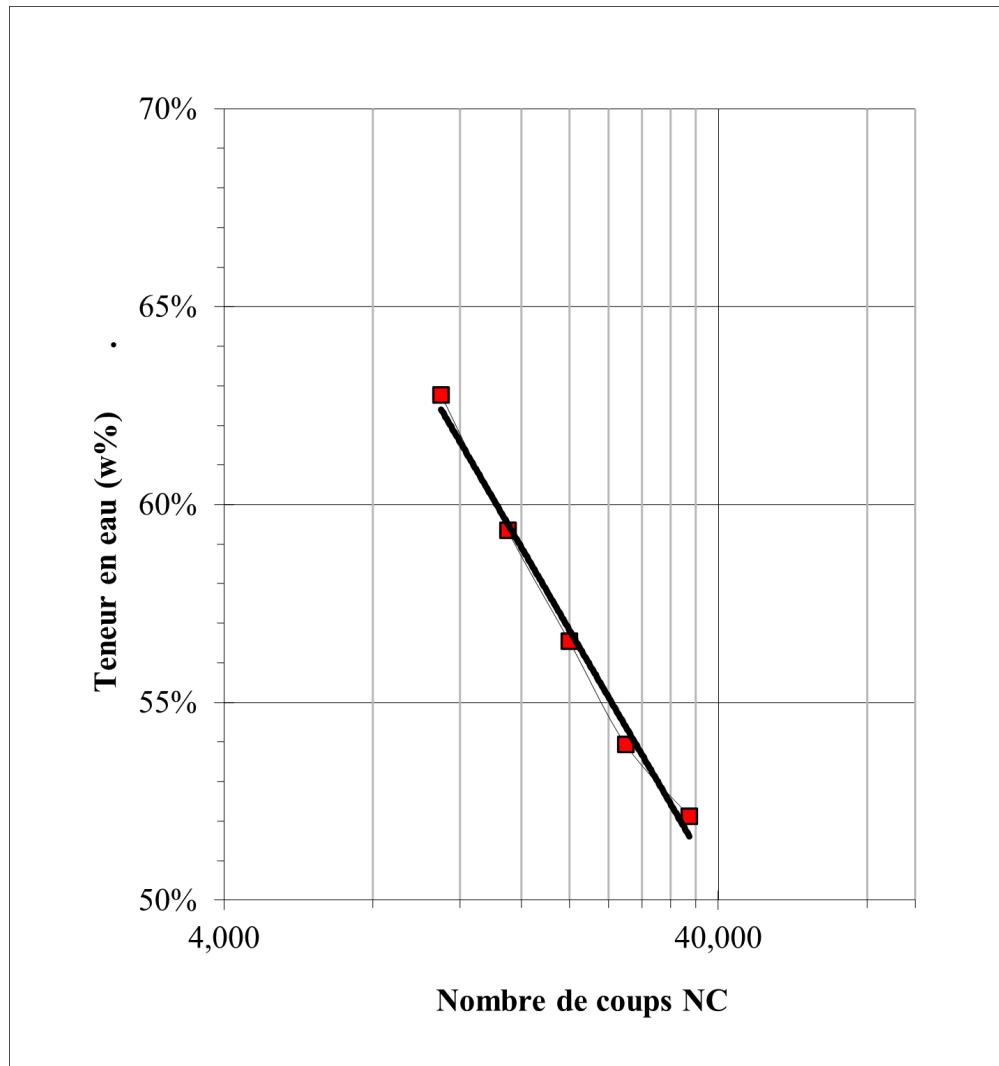


FIGURE 25 – Limite de liquidité des sédiments B

Ainsi on trouve une limite de liquidité $w_L = 55,38\%$ à 25 coups

3.3.2 Limite de plasticité w_P

La limite de plasticité est déterminée comme suit (Fanara, 2021 ; ArGenCo Laboratoire de Géotechnologies) :

- Malaxer l'échantillon à la main ou sur une plaque en verre à l'aide d'une spatule, jusqu'à ce qu'il ne colle plus ;
- Prélever une petite portion de sol et former une boule homogène ;
- Transformer cette boule en un boudin grossier sur la plaque ;
- Rouler le boudin jusqu'à obtenir un cylindre fin de 3 mm de diamètre et de 100 mm de longueur ;
- Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que le boudin s'effrite ou se casse avant d'atteindre la taille souhaitée ;
- Placer les fragments obtenus dans un cristalliseur taré à l'avance ;
- Peser le cristalliseur avec l'échantillon, puis le placer à l'étuve pendant 24 heures ;
- Peser l'échantillon sec afin de déterminer sa teneur en eau ;

(i) Répéter l'ensemble de l'essai pour obtenir au moins trois mesures valides.

Nos résultats expérimentaux sont repris dans le tableau 19. Ainsi on trouve la limite de plasticité en faisant

Numéro d'échantillon	Teneur en eau $w(\%)$
1	31,1 %
2	29 %
3	28,9 %
Moyenne	29,7%

TABLEAU 19 – Teneur en eau des échantillons pour w_P

la moyenne : $w_P = 29,7\%$

Nous pouvons à présent déterminer l'index de plasticité I_P qui défini comme l'étendue de la gamme plastique.

$$I_P = w_L - w_P = 25,68\% \quad (10)$$

En fonction de la valeur de l'index de plasticité, nous pouvons déterminer la nature du sol.

Le Tableau 20 reprend les différentes natures du sol en fonction de l'index de plasticité.

$I_P(\%)$	Dégré de plasticité
$0 < I_P < 5$	Sol non plastique(l'essai perd sa signification dans cette zone)
$5 < I_P < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_P < 50$	Sol plastique
$I_P > 50$	Sol très plastique

TABLEAU 20 – Classification du sol selon la valeur IP (Géotechnique Expérimentale Essais de caractérisation mécanique)

Sur base des résultats, nous pouvons donc conclure que les sédiments B sont peu plastiques.

Nous pouvons utiliser le CRR 2009 pour interpréter la valeur de I_p (tableau 21).

Indice de plasticité (I_p)	Classification du sol
Non mesurable	Sol non argileux
< 12	Sol limoneux à teneur en argile faible
$12 - 25$	Sol limoneux à teneur en argile moyenne
$25 - 40$	Sol argileux
> 40	Sol très argileux

TABLEAU 21 – Classification des sols selon l'indice de plasticité (CRR, 2009)

Les sédiments B sont donc limoneux à teneur en argile moyenne.

3.4 Test du pycnomètre à gaz

Le test du pycnomètre à gaz est un essai de laboratoire permettant de déterminer la masse volumique réelle des grains d'un sol (également appelée densité des solides), notée ρ_s . Cette grandeur est essentielle pour de nombreux calculs en géotechnique, notamment ceux liés à la porosité, au degré de saturation et à la compacité relative du sol. Contrairement à la méthode traditionnelle du pycnomètre à eau, le pycnomètre à gaz utilise l'hélium ou l'azote comme fluide, ce qui permet une mesure plus précise, notamment pour les matériaux poreux ou sensibles à l'eau. En mesurant les variations de pression dans des chambres de volumes connus, on peut en déduire le volume réel occupé par les grains du sol, sans inclure les vides internes. Cet essai présente l'avantage d'être rapide, non destructif et particulièrement fiable, notamment pour les sols fins et les matériaux contenant des microcavités. Il est souvent utilisé pour améliorer la précision des calculs de

caractéristiques physiques du sol (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies).
Les figures 26 et 27, montrent l'appareil utilisé pour réaliser l'essai.



FIGURE 26 – Pycnomètre

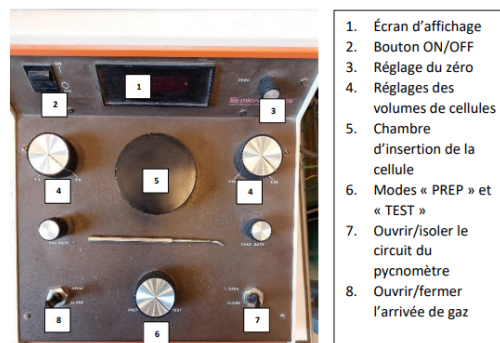


FIGURE 27 – Tableau de commande

Les résultats que nous avons obtenus sont consignés dans le tableau 22 :

Matériaux	Densités (g/cm ³)
Ciment	3.04
Chaux	3.13
Cendres volantes	2.21
Granulats(0/4, 4/7 et 7/14)	2.61

TABLEAU 22 – Résultats des tests au pycnomètre

3.5 Essai au bleu de méthylène

Nous allons réaliser l'essai au bleu de méthylène pour les sédiments B.

Norme : NF P 94-0468, EN 933-9 :2022.

L'essai au bleu de méthylène est utilisé pour évaluer la teneur en argiles actives d'un sol fin, en mesurant sa capacité à adsorber un colorant : le bleu de méthylène. Cet essai permet ainsi d'estimer la quantité de particules très fines, notamment les argiles de type montmorillonite ou illite, connues pour leur forte activité physico-chimique. Le principe de l'essai repose sur l'adsorption du colorant par les surfaces spécifiques des particules fines. Le bleu de méthylène est ajouté progressivement à une suspension de sol dans de l'eau, jusqu'à ce qu'un halo bleuté stable apparaisse autour d'une goutte déposée sur du papier filtre. La quantité totale de bleu consommée est ensuite rapportée à la masse sèche du sol, ce qui permet de calculer la valeur au bleu de méthylène (VBS), généralement exprimée en g/100g. Cette valeur est un indicateur clé dans la classification des sols et est également utilisée pour contrôler la qualité des matériaux destinés aux couches de forme ou aux couches de fondation. Une valeur de VBS élevée indique une présence importante d'argiles actives, pouvant entraîner des problèmes de gonflement, de réactivité à l'eau, ou de sensibilité mécanique (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies).

La figure 28 montre la réalisation de l'essai au laboratoire.

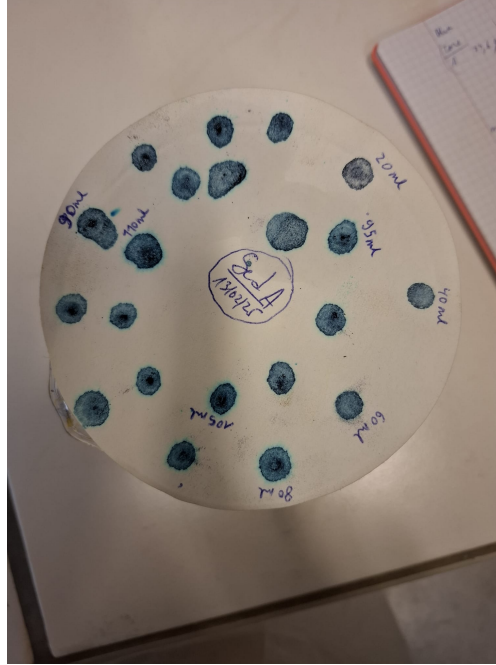


FIGURE 28 – Essai au bleu de méthylène du sédiments B

Nous pouvons remarquer sur l'image, que l'auréole apparaît à 110 ml, ce qui constitue donc le volume du mélange.

Nous pouvons donc calculer la VBS selon la norme EN 933-9 :2022

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10 = \frac{110}{50} \cdot 10 = 22\text{g/kg} \quad (11)$$

On trouve donc $VBS = 2,2\text{g}/100\text{g}$

Avec M_1 la masse sèche du mélange et V_1 le volume total de bleu ajouté.

Selon le CRR 2009, on peut déterminer la teneur en argile en fonction de MB.

- $MB \leq 25$: sols faiblement argileux ;
- $MB > 60$: sols très argileux.

A l'occurrence ici, les sédiments B sont faiblement argileux.

3.6 Essai Proctor

L'essai Proctor a pour objectif de déterminer la relation entre la teneur en eau et la densité sèche d'un matériau granulaire soumis à un compactage normalisé (ArGenCo - Laboratoire de Géotechnologies).

Bien qu'il soit historiquement destiné à évaluer la compacité des remblais traditionnels, cet essai peut également servir de référence pour comparer les performances de portance des MAR.

Il permet d'obtenir deux paramètres clés :

- (a) La densité sèche maximale ($\gamma_{d,max}$) : correspondant au compactage optimal du matériau,
- (b) La teneur en eau optimale (w_{opt}) : humidité à laquelle cette densité maximale est atteinte.

Les étapes pour l'essai sont (Fanara, 2021) :

1. Mesurer les dimensions du moule Proctor et déterminer son volume ;
2. Identifier la tare du moule vide (sans rehausse) ;
3. Installer la rehausse et placer un papier filtre au fond du moule ;

4. Disposer le moule dans la machine Proctor en le fixant correctement ;
5. Introduire le sol en 3 ou 5 couches successives :
 - Remplir un tiers du moule et compacter légèrement ;
 - Effectuer 56 chutes de dame ;
 - Scarifier la surface avant d'ajouter la couche suivante.
6. Après la dernière couche, araser la surface et retirer la rehausse ;
7. Peser le moule rempli pour calculer la masse de sol compacté ;
8. Prélever un échantillon au centre pour déterminer la teneur en eau :
 - Placer l'échantillon dans un cristalliseur taré ;
 - Sécher à l'étuve pendant 24 heures ;
 - Reprendre la pesée pour déterminer la teneur en eau réelle.
9. Répéter l'opération pour plusieurs teneurs en eau afin de tracer la courbe Proctor.

En suivant donc la procédure susmentionnée, nous avons donc réalisé un essai de Proctor normal (figure 29) et un essai de Proctor modifié (figure 30).

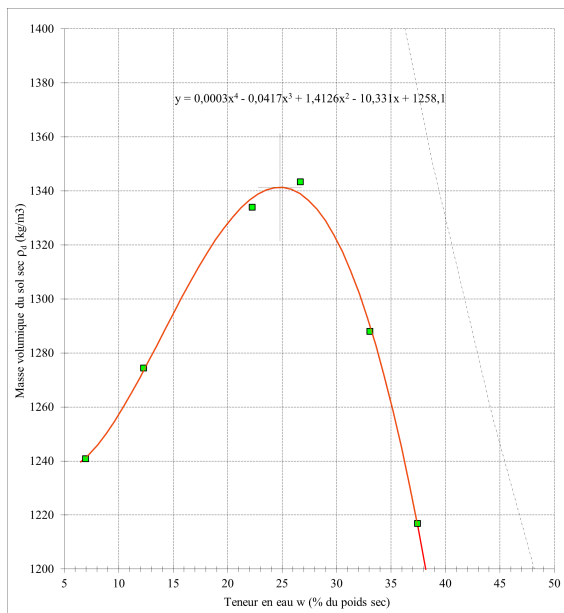


FIGURE 29 – Proctor normal des sédiments B

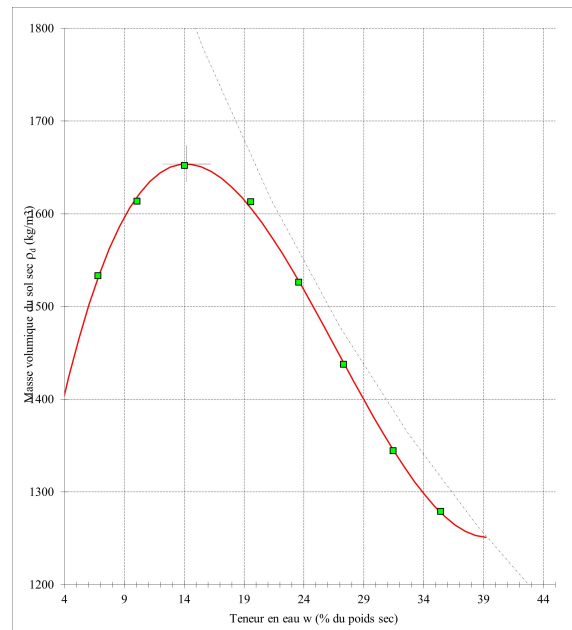


FIGURE 30 – Proctor modifié des sédiments B

L'analyse des deux courbes met en évidence des différences notables entre les essais Proctor modifié et Proctor normal.

Pour le Proctor modifié, la masse volumique sèche maximale obtenue est de 1654 kg/m^3 pour une teneur en eau optimale de 14,2%. La courbe montre une compaction plus élevée et un optimum à une teneur en eau plus faible, traduisant une énergie de compactage plus importante.

En revanche, pour le Proctor normal, la masse volumique sèche maximale atteint 1341 kg/m^3 avec une teneur en eau optimale de 24,8%. L'optimum est donc atteint à une teneur en eau plus élevée et avec une densité sèche plus faible, caractéristique d'un compactage à énergie moindre.

Ces résultats illustrent l'impact direct de l'énergie de compactage sur la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale du sol.

3.7 Essai Los Angeles

Normes : NF EN 1097-2 ; NF P 18-573 ; ASTM C 131 ; AASHTO T 96.

L'essai Los Angeles est couramment utilisé pour évaluer la résistance des granulats à l'usure par choc et

abrasion. Il est particulièrement pertinent dans le cadre de la formulation des MAR, qui peuvent intégrer des granulats recyclés ou issus de déchets, parfois plus sensibles à la dégradation mécanique. Le principe de l'essai consiste à introduire un échantillon de granulats dans un tambour métallique contenant des billes d'acier, puis à le faire tourner à vitesse normalisée pendant un nombre défini de tours (généralement 500). (figures 31 et 32).



FIGURE 31 – Tambour (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies)



FIGURE 32 – boules d'acier (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies)

À l'issue du test, on mesure la perte de masse subie par les granulats, ce qui permet de calculer l'indice de Los Angeles (LA), exprimé en pourcentage (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies).

Un indice LA faible traduit une bonne résistance à l'usure, tandis qu'une valeur élevée indique une sensibilité accrue à l'écrasement et à l'abrasion. Dans le cas des MAR, cet essai permet de vérifier si les granulats utilisés conservent une résistance suffisante pour garantir la durabilité mécanique minimale attendue, tout en maintenant la réexcavabilité du matériau. En général, une valeur d'indice Los Angeles inférieure à 40 % est recherchée pour assurer une tenue correcte à court et moyen terme, sans compromettre la facilité de reprise ultérieure (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies).

Le Tableau 23 reprend les différentes masses à considérer en fonction de la granulométrie.

Coupure granulaire	3500 g de la fraction	1500 g de la fraction	Nombre de boulets
25/50	60% 25/40	—	12
16/31.5	40% 16/25	—	12
10/25	60% 10-16	—	11
10/14	10/12.5	12.5/14	11
6.3/10	8-10	6.3/8	9
4/6.3	5/6.3	4-5	7

TABLEAU 23 – Données granulométriques et nombre de boulets pour l'essai Los Angeles (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies)

En suivant donc la procédure d'essai, nous avons réalisé deux essais un pour la fraction 4/6.3 (tableau 24) et l'autre pour la fraction 6.3/10 (tableau 25).

fraction	masse initiale (g)
5/6.3	3500.8
4/5	1500.1
refus au 1.6 mm	3576.2

TABLEAU 24 – Fraction 4/6.3 pour l'essai Los Angeles

fraction	masse initiale (g)
8/10	3500.4
6,3/8	1500.3
refus au 1.6 mm	3470.6

TABLEAU 25 – Fraction 6.3/10 pour l'essai Los Angeles

Le coefficient Los Angeles est :

$$LA = \left(\frac{M - m}{M} \right) \times 100 \quad (12)$$

avec m masse du refus à 1.6 mm, et M masse de l'échantillon initial.

Nous avons donc trouvé pour les fractions 4/6.3 et 6.3/10 respectivement $LA = 28.5\%$ et $LA = 30.6\%$.

Comme les deux coefficients sont inférieurs à 30%, alors selon Qualiroutes, la résistance des granulats est moyenne.

3.8 Essai Micro-Deval

Normes de référence : NF EN 1097-1, EN 13450, NF P18-572, NF P18-576, UNE 83115, CNR N.109.

L'essai Micro-Deval permet d'évaluer la résistance à l'usure par frottement humide des granulats. Contrairement à l'essai Los Angeles qui sollicite principalement les granulats par chocs, l'essai Micro-Deval se concentre sur l'effet d'abrasion dans un milieu humide, ce qui est particulièrement représentatif des conditions rencontrées dans les matériaux hydrauliques, notamment les MAR.

Le principe consiste à placer un échantillon de granulats dans une jarre en acier contenant des billes d'acier et une quantité d'eau déterminée. La jarre est ensuite soumise à une rotation à vitesse constante pendant un nombre défini de tours (généralement 12 000 tours) (figure 33).

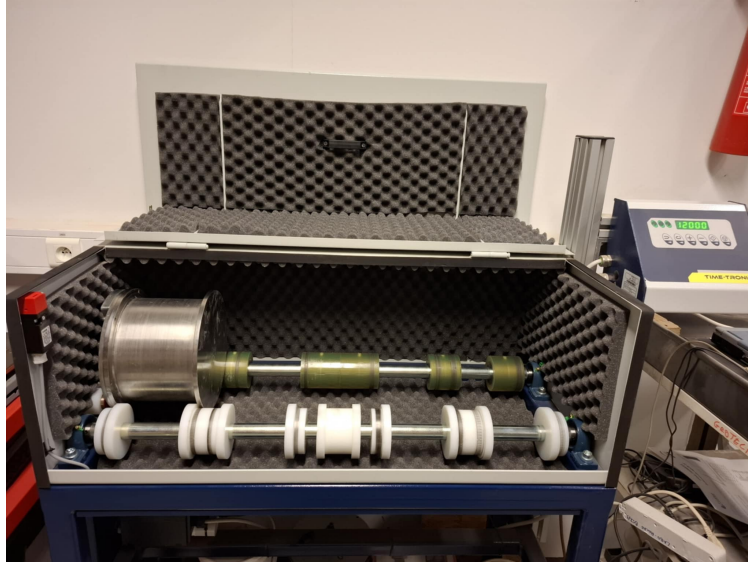


FIGURE 33 – Essai Micro-Deval

À l'issue de l'essai, les granulats sont tamisés et la perte de masse subie est mesurée. Cette perte est exprimée sous forme d'un coefficient de micro-usure (M_{DE}), correspondant au pourcentage de matériaux détruits par abrasion (ArGEnCo - Laboratoire de Géotechnologies).

Le Tableau 26 reprend les différentes masses à peser selon les granulats.

Fraction granulaire (mm)	3500 g (grande série)	1500 g (petite série)	Masse de billes (g)
12.5/16	60% 12.5/14	12.5/14	5000
10/14	60% 10/12.5	10/12.5	5000
8/12.5	60% 8/10	8/10	5000
6.3/10	8-10	6.3/8	5000
4/6.3	5/6.3	4-5	5000

TABLEAU 26 – Préparation des échantillons selon la fraction choisie pour l'essai Micro Deval

Dans le cadre de l'utilisation de matériaux recyclés ou alternatifs dans les MAR, cet essai est essentiel pour juger de la durabilité des granulats en milieu humide. Un coefficient de Micro-Deval élevé indique une faible résistance à l'usure par frottement, ce qui pourrait entraîner une dégradation prématurée du matériau en service ou au moment de sa réexcavation. En général, une valeur inférieure à 20 % est souhaitée pour les granulats utilisés dans des matériaux sollicités mécaniquement ou exposés à des environnements humides.

$$M_{DE} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \cdot 100 \quad (13)$$

avec m_1 et m_2 respectivement la masse initiale sèche de l'échantillon et la masse sèche du refus au tamis 1,6 mm. Nous avons réalisé deux dont les résultats sont repris au tableau 27, notons ici que pour ces deux essais la masse initiale sèche est de 500 g.

	Essai 1	Essai 2
refus au 1.6 mm (g)	351.92	350.8
$M_{DE}(\%)$	29,62	29,84

TABLEAU 27 – Les essais Micro Deval

Nous trouvons un coefficient M_{DE} moyen de 29,73

Le guide Qualiroutes autorise pour un coefficient $M_{DE} < 35$, son utilisation pour les routes.

3.9 Essai d'absorption

Norme : NF EN 1097-6.

L'essai d'absorption d'eau permet de déterminer la quantité d'eau qu'un matériau poreux, tel qu'un granulat, est capable d'absorber lorsqu'il est immergé. Cette propriété est essentielle dans le cadre de la formulation des MAR, car elle influence directement le rapport eau/solide effectif, la consistance du mélange, ainsi que la formation des liaisons hydrauliques, notamment lorsqu'une phase d'ettringite est recherchée. L'essai consiste à immerger un échantillon sec de granulats dans l'eau pendant une durée normalisée (généralement 24 heures). Après égouttage, la masse humide des granulats est mesurée. Le coefficient d'absorption est alors calculé comme suit : Les figures 34 et 35 montrent le séchage des granulats et leur immersion dans des bouteilles.



FIGURE 34 – immersion des granulats



FIGURE 35 – séchage des granulats

Le coefficient d'absorption est donc déterminé par :

$$w_{A24} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \quad (14)$$

avec :

- M_1 la masse des granulats saturés et superficielle secs ;

- M_4 la masse des granulats séchée à l'étuve

Nous avons réalisé pour chaque granulat trois essais qui sont repris dans les tableaux 28, 29 et 30.

La figure 36 montre l'évolution du coefficient d'absorption en fonction des granulats.

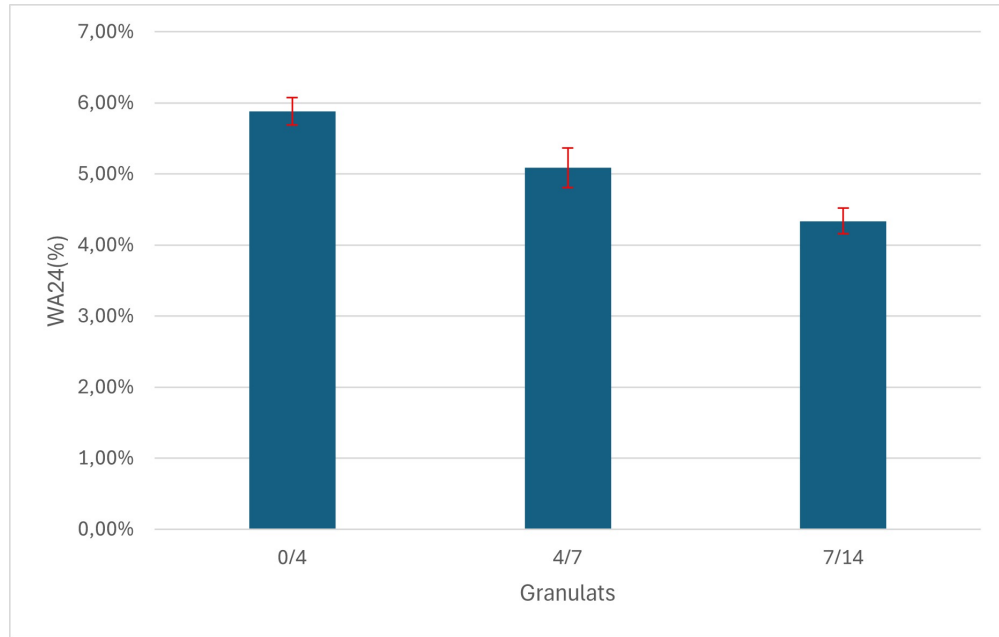


FIGURE 36 – Évolution du coefficient d'absorption en fonction des granulats

3.10 Essai de compression

Norme ASTM C42/C42M.

La norme ASTM C42/C42M – Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete décrit la méthode de référence pour évaluer la résistance à la compression du béton. Elle définit les conditions de prélèvement, de préparation et d'essai des échantillons afin de garantir la fiabilité et la comparabilité des résultats. Cette norme souligne également l'importance de paramètres tels que le rapport longueur/diamètre (tableau 28) ou l'état d'humidité des éprouvettes, qui peuvent influencer de manière significative la résistance mesurée. En fournissant un cadre méthodologique rigoureux, l'ASTM C42/C42M permet d'obtenir une estimation fiable de la performance mécanique du béton en compression. (ASTM International. (2023). ASTM C42/C42M-23).

L/D	Facteur correctif
2	1
1,75	0,98
1,5	0,96
1,25	0,93
1	0,87

TABLEAU 28 – Tableau du facteur de correction en fonction de L/D (ASTM International. (2023). ASTM C42/C42M-23)

3.11 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter de manière structurée les différents matériaux entrant dans la composition des mélanges étudiés, ainsi que les méthodes d'essai appliquées pour évaluer leurs propriétés.

Les étapes expérimentales, menées conformément aux normes en vigueur, assurent la fiabilité des données recueillies et permettent de comparer objectivement les performances des formulations.

Les informations détaillées sur la procédure, le matériel et les conditions de réalisation constituent un socle méthodologique solide pour l'analyse et la discussion des performances mécaniques et physiques des échantillons.

Le chapitre suivant sera consacré à l'expérimentation et aux résultats, où seront présentées et interprétées les données obtenues à partir des essais décrits ici.

4 Formulation d'un MAR : résultats et analyses

Ayant maintenant terminé l'identification des différents matériaux que nous allons utiliser, nous allons maintenant formuler dans un premier temps un MAR classique (à base de ciment), puis dans un second temps nous utiliserons l'ettringite comme un liant pour ainsi voir son impact sur le comportement du MAR.

4.1 Etude de la formulation

Cette formulation que nous allons développer, sera basée les 2 formulations que nous avons préalablement présentées (formulations de Nonet et américaine). L'objectif de la formulation à développer, est d'optimiser la compacité, la fluidité et la résistance.

4.1.1 Optimisation de la compacité

Vu que pour notre cas d'étude nous utilisons 3 classes de granulats différents, il serait donc très difficile d'utiliser une méthode d'optimisation basée sur l'essai Proctor en vue de déterminer la proportion de chaque classe de granulats. Le choix judicieux sera donc d'utiliser la courbe idéale de Fuller Thompson pour voir quelle composition se rapprocherait le plus de la courbe idéale.

Pour rappel le fuseau granulométrique de Fuller et Thompson est donné par :

$$p = 100 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (15)$$

avec :

- p (%) représente la fraction passante ;
- d(mm) le diamètre des tamis ;
- D(mm) le diamètre maximal ;
- n est un facteur expérimental compris entre 0,30 et 0,55

Le brevet de Nonet recommande un diamètre maximal de 10 mm, donc malgré que le diamètre maximal des granulats utilisés est de 14 mm, nous nous limiterons à 10 mm.

Pour l'optimisation de compacité, la première étape consiste à d'abord faire varier le n, car pour chaque valeur de n, correspond une courbe idéale. Après le but sera de faire varier les proportions des granulats pour une valeur de n fixe, jusqu'à obtenir la courbe qui se rapproche le mieux de la courbe idéale correspondant à la valeur de n fixée. Le tableau 29, reprend les différentes proportions des granulats en fonction des valeurs de n.

Valeur n	0/4	4/7	7/14
0,3	70%	15%	15%
0,4	60%	25%	15%
0,45	55%	25 %	20
0,5	50%	30%	20%
0,55	45%	35%	20%

TABLEAU 29 – Proportions des granulats en fonction de n

Nous allons considérer que nous avons une seule classe de granulat à savoir 0/14. Le tableau 30 reprend les données granulométriques ainsi obtenues.

Tamis (mm)	Refus non cum (g)	Refus cum (g)	Passant (%)
20	0,00	0,00	100,00
14	7,48	7,48	100,00
10	124,90	132,37	94,66
8	175,83	308,21	87,58
6,3	183,26	491,47	80,19
4	436,57	928,03	62,59
3,15	169,62	1097,65	55,76
2	287,10	1384,75	44,18
1	317,39	1702,14	31,39
0,5	253,31	1955,44	21,18
0,25	324,93	2280,37	8,08
0,125	145,22	2425,59	2,23
0,063	17,21	2442,80	1,54
0	38,13	2480,93	0,00

TABLEAU 30 – Granulométrie des granulats 0/14

Après avoir effectué plusieurs itérations, la courbe qui se rapproche le mieux de la courbe idéale, est celle obtenue avec $n=0,5$ et la proportion correspondante est : 50% pour les granulats 0/4, 30% pour les granulats 4/7 et 20% pour les granulats 7/14. Notons que nous maintiendrons cette proportion pour les 3 mélanges que nous allons effectuer. Les figures 37, 38 et 39 représentent les différentes courbes en fonction de n et de la proportion.

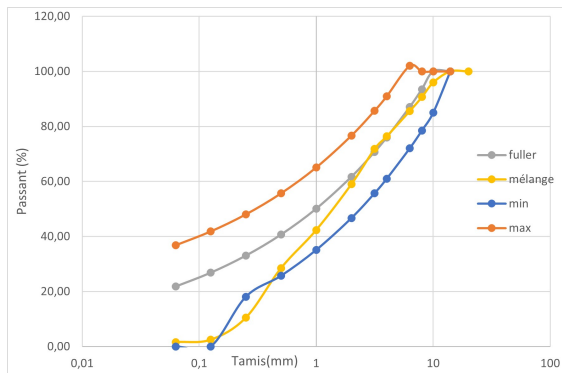


FIGURE 37 – $n=0,3$

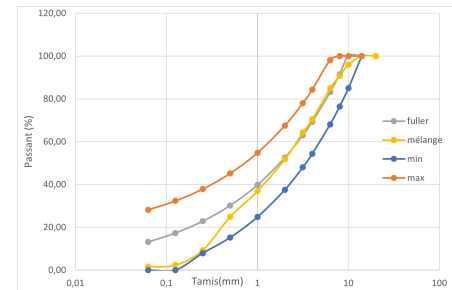


FIGURE 38 – $n=0,4$

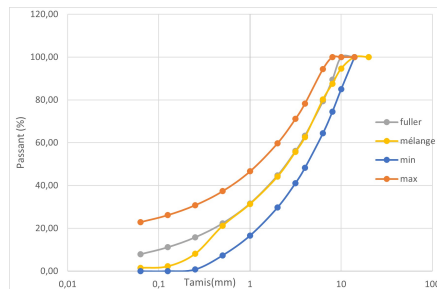


FIGURE 39 – $n=0,5$

Nous remarquons que la courbe $n=0,5$, est celle qui se rapproche le mieux de la courbe idéale.

4.1.2 Optimisation de la fluidité

Pour déterminer la fluidité du MAR, nous allons nous baser sur le rapport eau-solide(w/s), tout en gardant la même proportion des granulats que nous avons obtenue précédemment.

L'idée est de fixer la quantité de liant, tout en gardant la bonne proportion des granulats obtenue et faire varier le rapport eau-solide. Pour une fluidité optimale le diamètre moyen (essai à l'étalement) doit être compris entre 60 et 75 cm.

La fluidité a été évaluée en mesurant le diamètre d'étalement du mélange selon la norme ASTM C1611/C1611M – 2008(voir section 2.4.2.2)

Les Figures 40 et 41 montrent les mesures des diamètres d'étalement.



FIGURE 40 – diamètre 1



FIGURE 41 – diamètre 2

4.1.3 Optimisation de la résistance

Nous sommes maintenant à la dernière étape de la définition de la formulation. Il s'agit de déterminer la quantité de liant tout en gardant fixe le rapport w/s et la proportion des granulats.

Après avoir déterminé la bonne proportion des granulats et le bon rapport eau-solide(w/s), nous ferons varier la quantité de ciment pour élever la résistance en compression.

Pour ce faire nous allons réaliser un essai de compression selon la norme ASTM C42/C42M et nous nous baserons sur les critères de Qualiroutes et du brevet Nonet pour ainsi classer le MAR selon sa résistance à la compression. Les Figures 42 et 43 montrent l'essai de compression sur le mélange et après l'essai de compression.



FIGURE 42 – essai de compression



FIGURE 43 – après la comprssion

Nous avons établi les différentes étapes de la formulation que nous utiliserons. Nous nous baserons sur les critères d'optimisation pour faire 3 mélanges de MAR. Nous ferons 2 MAR classiques avec comme liant le ciment, les cendres volantes et la chaux et un dernier mélange de MAR où le liant sera composé de ciment et d'un écoliant à base d'étringite.

4.2 MAR classique

Pour cette première partie, nous allons effectuer 2 mélanges de MAR classiques tout en suivant les étapes décrites à la section 4.2.

Pour les 2 mélanges que nous allons formulerv le MAR qui sera composé de :

- (a) granulats ;
- (b) chaux ;
- (c) ciment ;
- (d) cendres volantes (biomasse) ;
- (e) eau.

La Figure 44 représente les granulats, l'eau et le liant(ciment+cendres volantes+chaux)



FIGURE 44 – éléments MAR classique

La procédure de malaxage est la suivante (Durability of Recycled Aggregate Concrete Zhang, H., Wang, Y. (2018)) :

- mélanger les granulats pendant 30 secondes ;
- ajouter la moitié de l'eau et laisser tourner pendant 30 secondes ;
- ajouter le ciment laisser tourner pendant 1 minute ;
- ajouter la moitié de l'eau restante et laisser tourner pendant 2 minutes.

L'appareil utilisé pour ce malaxage (Figures 45 et 46) est le mélangeur CreteAngle (Edward Benton) qui dispose d'une cuve cylindrique verticale (14 L) tournant sur elle-même à 70 t/min (non modulable). Le capot de la cuve dispose de différents racleurs, permettant d'obtenir un mélange homogène.



FIGURE 45 – mélangeur fermé



FIGURE 46 – mélangeur ouvert

4.2.1 MAR classique 1

Ce premier mélange de MAR sera composé de granulats, d'eau, de ciment, de cendres volantes provenant de la métallurgie et de chaux.

Optimisation de la compacité :

Comme nous l'avons déjà annoncé, la proportion des granulats restera inchangée tout long de la procédure d'expérimentation.

Optimisation de la fluidité :

Avant de commencer les mesures d'étalement, nous nous assurons d'abord nous respectons bien les plages définies par le brevet de Nonet pour le liant, les granulats et l'eau.

Le tableau 31 reprend les plages idéalement définies par le brevet de Nonet.

Liant	6-10%
Granulats	80,5 et 95%
Eau	7%

TABLEAU 31 – Composition idéale du brevet de Nonet.

En se basant sur le tableau 31, le tableau 32 reprend les compositions en masse sèche, le dosage ainsi que les densités trouvées avec le pycnomètre.

Ingrédient	Composition en matière sèche (%)	Dosage (kg/m ³)	Densité (g/cm ³)
Ciment	1,30	30,1	3,04
Chaux	0,14	3,3	3,12
Cendre volante	6,56	152,5	2,21
GR 0/4	42,50	988,1	2,61
GR 4/7	26,00	592,9	2,61
GR 7/14	17,00	395,3	2,61
Eau	7,00	162,8	1,00

TABLEAU 32 – Composition en matière sèche, et densité des ingrédients pour $w/s = 0,2$

Dans cette étape, nous savons que nous avons déjà la bonne proportion des granulats, il faut donc fixer la quantité de ciment pour en suite prendre les mesures d'étalement.

La quantité de ciment fixe qui a été choisie ici est de 30kg/m^3 . Il est important de noter que vu c'est le rapport eau-solide (w/s) que nous cherchons, la quantité d'eau est alors modifiée mais la quantité de solide reste inchangée. Notons ici que le volume total du mélange considéré est le volume du cône d'Abrams(5,5 l) avec une marge de 20% , ce qui revient donc à 6,6 l

Le Tableau 33, reprend les différents dosages en fonction des valeurs de w/s .

Ingrédients	w/s	0,45	0,5	0,55
Ciment	kg/m ³	30	30	30
Chaux	kg/m ³	3,3	3,3	3,3
Cendre volante	kg/m ³	152, 5	152,5	152,5
0/4	kg/m ³	795,3	765,6	737,9
4/7	kg/m ³	476,6	458,8	442,3
7/14	kg/m ³	318,1	306,2	295,2
eau	kg/m ³	310,6	333,3	354,5

TABLEAU 33 – Les dosages en fonction de w/s

Le Tableau 34 reprend les mesures d'étalement en fonction du w/s .

w/s	d_1	d_2	d
0.45	51	50	50,5
0,5	68	65	66,5
0,55	74	72	73

TABLEAU 34 – Étalement en fonction du w/s

La Figure 47 montre l'évolution du diamètre d'étalement en fonction du w/s .

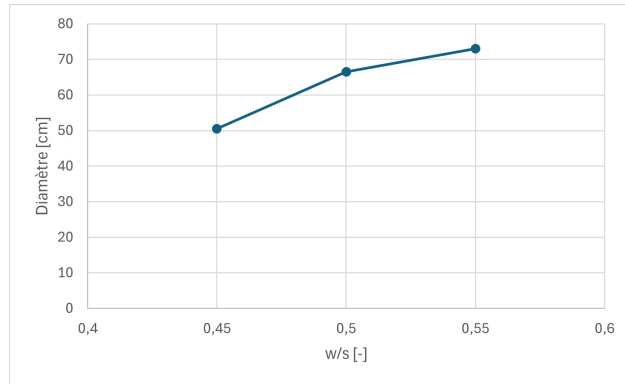


FIGURE 47 – Évolution du diamètre d'étalement en fonction du w/s

Nous remarquons que le diamètre augmente avec le w/s, et comme nous cherchons un diamètre compris entre 60 et 75 cm, le w/s idéal serait donc 0,5

Optimisation de la résistance :

Grâce à diverses quantités de ciment, nous allons à présent déterminer la quantité de liant et ensuite réaliser l'essai de compression pour pouvoir classer le MAR obtenu.

Notons toujours que la proportion de granulats reste la même et que le w/s idéale est 0,5.

Il est important de noter, pour cette partie que les proportions des ingrédients ont été changées. On aura 9% de liant, 75% de granulats et 16% d'eau. Nous avons augmenté pour cette dernière partie la quantité du liant et d'eau ce qui fait que la proportion des granulats sort de la gamme définie par le brevet de Nonet.

Nous avons utilisé des cubes de 15×15 cm, pour chaque mélange nous avons préparé 2 cubes (figure 48) , en considérant une marge de 20% nous obtenons un volume total pour chaque mélange de 8,1 L.



FIGURE 48 – moules cubiques de $15 \times 15\text{cm}$

Le Tableau 35 reprend les nouvelles proportions.

Ingrédient	Composition en matière sèche (%)	Dosage (kg/m^3)	Densité (g/cm^3)
Ciment	1,47	30,1	3,04
Chaux	0,16	3,3	3,12
Cendre volante	7,44	152,5	2,21
GR 0/4	37,35	765,6	2,61
GR 4/7	22,5	458,8	2,61
GR 7/14	15,00	306,2	2,61
Eau	16,00	333,3	1,00

TABLEAU 35 – Composition en matière sèche, et densité des ingrédients pour $w/s = 0.5$

Le Tableau 36 reprend les différents dosage pour les 4 mélanges qui ont été effectués.

Ingrédients	Dosage	1	2	3	4
Ciment	kg/m ³	30,1	39,85	49,82	59,94
Chaux	kg/m ³	3,3	4,43	5,53	6,66
Cendre volante	kg/m ³	152, 5	201,72	252,15	303,42
0/4	kg/m ³	765,6	731,91	697,39	662,3
4/7	kg/m ³	458,9	438,64	417,95	396,92
7/14	kg/m ³	306,3	292,76	278,96	264,92
eau	kg/m ³	333,3	333,3	333,3	333,3

TABLEAU 36 – Les dosages en fonction des mélanges pour le MAR classique 1

Nous allons réaliser l'essai de compression (figure 49) des différents mélanges obtenus. La résistance obtenue à l'issue de cet essai nous permettra de classer le MAR selon les exigences de Qualiroutes et du brevet Nonet.



FIGURE 49 – Essai de compression

Outre l'essai de compression, nous avons aussi vérifié la fluidité pour s'assurer que le MAR reste bien fluide. Le Tableau 37 reprend les mesures d'étalement pour chaque dosage en ciment.

Dosage en ciment (kg/m^3)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d (cm)
30	64	65	64,5
40	67	69	68
50	74	76	75
60	74	76	75

TABLEAU 37 – La fluidité en fonction du dosage en ciment

Nous remarquons l'étalement n'est pas constant comme on le voit sur la figure 50.

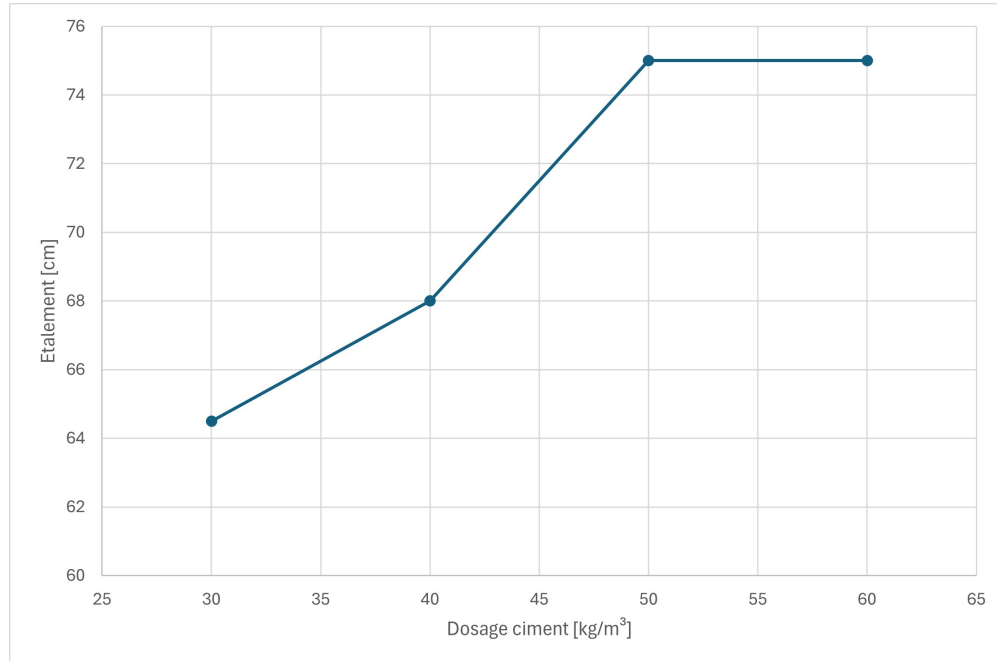


FIGURE 50 – Etalement en fonction du dosage en ciment pour le MAR classique 1

Nous allons à présent analyser les résultats des essais de compression pour chaque dosage en ciment.

Dosage en ciment $c = 30\text{kg}/\text{m}^3$

Deux essais de compression simple ont été réalisés à 28 jours, le premier essai affiche une résistance à la compression uniaxiale corrigée (UCS) de 0,61 MPa, tandis que le second atteint 0,6 MPa, une résistance moyenne de 0,605 MPa et un écart type de 0,07 MPa. Ces valeurs traduisent un bon développement des résistances mécaniques à 28 jours pour ce dosage relativement faible en ciment.

Avec ces valeurs, cette formulation s'inscrit sans ambiguïté dans la classe MAR-1. Elle est donc considérée comme facile à excaver et nécessite une exécution manuelle selon les exigences de Qualiroutes et du brevet de Nonet. Cela traduit un compromis intéressant entre facilité d'excavation et portance, rendant cette formulation adaptée à des couches de forme ou des remblais techniques stabilisés à faible impact environnemental.

Dosage en ciment $c = 40\text{kg}/\text{m}^3$

Les essais de compression simple réalisés sur cette formulation révèlent des valeurs mécaniques modérées. Le premier échantillon atteint une résistance à la compression uniaxiale corrigée de 0,33 MPa, quant au second essai, les résultats indiquent une résistance légèrement supérieure, à 0,35 MPa. Nous obtenons donc une résistance moyenne de 0,34 MPa et un écart type de 0,01 MPa. Nous remarquons une baisse de la résistance

comparativement au dosage de 30kg/m^3 , ce qui n'est pas du tout normal car l'augmentation du dosage en ciment devrait en réalité augmenter la résistance en compression. Ceci peut être dû au fait de la conservation des proportions et pas des quantités.

Selon les critères de classement définis dans le guide Qualiroutes et le brevet de Nonet, ces valeurs de résistance à 28 jours placent la formulation dans la classe MAR-1, correspondant à une excavabilité facile et une exécution manuelle.

Dosage en ciment $c = 50\text{kg/m}^3$

Les essais de compression simple réalisés sur cette formulation montrent une amélioration notable des propriétés mécaniques. Le premier échantillon a atteint une résistance uniaxiale corrigée de 0.75 MPa, le second essai présente une résistance légèrement supérieure, de 0.78 MPa, avec une résistance moyenne de 0,765 MPa et un écart type de 0,02 MPa. Nous pouvons noter une amélioration nette de la résistance en compression face aux deux premiers essais.

Cette amélioration fait aussi changer la classe du MAR obtenu. Ces résultats traduisent une progression significative par rapport aux formulations à plus faible teneur en liant.

Selon les critères de classification définis dans le guide Qualiroutes et de Nonet, ces valeurs de résistance à 28 jours situent la formulation dans la classe MAR-2, correspondant à un matériau à excavabilité moyenne et exécution manuelle ou légèrement mécanisée.

Dosage en ciment $c = 60\text{kg/m}^3$

Les résultats mécaniques obtenus sur cette formulation montrent une amélioration modérée mais significative des propriétés du matériau. Le premier essai affiche une résistance à la compression uniaxiale corrigée (UCS corrigé) de 0,903 MPa, le second essai indique une résistance très proche, de 0,870 MPa, avec une résistance moyenne de 0,885 et écart type de 0,02. Selon les critères de classement du guide Qualiroutes (chapitre E, section E3.7), ces résultats positionnent la formulation dans la classe MAR-2, correspondant à une excavabilité moyennement facile et à une mise en œuvre manuelle ou légèrement mécanisée. Ce positionnement traduit une efficacité satisfaisante du traitement. Il permet une amélioration mécanique nette du matériau de départ tout en conservant des conditions de travail sur chantier relativement souples.

Pour les formulations les moins dosées, à 30 et 40 kg/m^3 , les résultats obtenus en compression simple corrigée s'établissent respectivement entre 0,60 et 0,61 MPa pour le premier cas, et entre 0,33 et 0,35 MPa pour le second. Ce qui n'est pas du tout normal, car l'augmentation du dosage en ciment devrait augmenter la résistance. Cette baisse de la résistance entre les 2 premiers mélanges peut s'expliquer outre le fait de ne pas conserver les quantités, par le fait qu'il y ait beaucoup de vides et beaucoup plus d'eau dans le dosage à 40kg/m^3 , qu'à 30kg/m^3 . Néanmoins, ces niveaux de performance correspondent aux critères définis dans le guide Qualiroutes pour la classe MAR-1, caractérisée par une excavabilité aisée et une exécution adaptée aux moyens manuels ou faiblement mécanisés. Cette catégorie de traitement permet une amélioration structurale suffisante pour de nombreuses applications, tout en maintenant des contraintes de mise en œuvre limitées.

En revanche, à partir du dosage de 50 kg/m^3 , on observe une augmentation sensible des résistances mécaniques, atteignant 0,75 à 0,78 MPa. Ces performances situent clairement cette formulation dans la classe MAR-2, traduisant une amélioration marquée des propriétés mécaniques et une meilleure aptitude à supporter des charges ou des sollicitations plus importantes, tout en restant compatible avec une excavabilité moyenne.

La tendance se confirme avec la formulation à 60 kg/m^3 , dont les résistances corrigées dépassent 0,87 MPa et atteignent jusqu'à 0,90 MPa. Ce positionnement consolide le classement en MAR-2, témoignant d'un traitement plus poussé et d'un comportement mécanique renforcé du matériau.

La Figure 51 montre l'évolution des résistances moyennes pour les 4 essais réalisés.

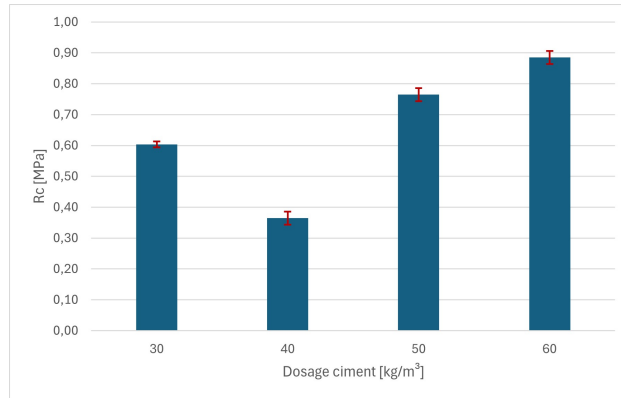


FIGURE 51 – Histogramme des résistances moyennes

En résumé, la progression des dosages en liant hydraulique permet de franchir le seuil entre MAR-1 et MAR-2 aux alentours de 50 kg/m^3 , marquant un point d'équilibre entre efficacité technique et exigences de mise en œuvre. Le choix du dosage dépendra donc de l'usage prévu, des contraintes d'exécution et du niveau de performance recherché.

Le fait de conserver seulement les proportions et pas les quantités dans ce premier mélange, impacte négativement les résultats, c'est pourquoi nous avons fait un second mélange de MAR classique, mais cette fois en conservant les proportions et les quantités.

4.2.2 MAR classique 2

Dans ce second mélange, nous utilisons les mêmes étapes que pour le MAR classique 1, sauf que cette fois nous conservons les proportions et les quantités.

Pour ce second mélange on s'intéressera surtout sur l'optimisation de la résistance. Les 2 premières étapes restent les mêmes que pour le premier mélange. Il est important de noter que les cendres volantes utilisées ici sont d'origine biomasse. Nous ne disposons plus de cendres volantes issues de la métallurgie pour continuer les mélanges

Optimisation de la compacité :

la proportion des granulats est toujours la même.

Optimisation de la fluidité :

Le rapport w/s idéal qui a été trouvé pour le premier était de 0.5. Les cendres volantes biomasses étant plus absorbantes que les cendres volantes de la métallurgie, on a ajusté le w/s. Pour la suite du mélange, on considère $w/s = 0,52$.

Optimisation de la résistance :

Ici en plus de conserver les proportions, nous allons aussi conserver les quantités de granulats pour le mélange de 8,1 L. Le tableau 38 reprend les différentes quantités en fonction du dosage en ciment.

Ingrédient	Unité	5	6	7
Ciment	kg/m ³	30	60	90
Chaux	kg/m ³	3	3	3
Cendre volante	kg/m ³	150	129	107
0/4	kg/m ³	767	766	765
4/7	kg/m ³	460	459	458
7/14	kg/m ³	307	306	306
eau	kg/m ³	344	344	343
Total	[kg/m ³]	2061	2067	2072

TABLEAU 38 – Dosages en fonction des mélanges pour le MAR classique 2

Dosage en ciment $C = 30\text{kg/m}^3$:

Les résultats ont conduit à des UCS corrigées respectives de 0,404 MPa et 0,389 MPa. La moyenne est de 0,396 MPa et l'écart-type vaut 0,011 MPa. En se basant donc sur les critères de classification de Qualiroutes et du brevet Nonet, ce MAR serait donc de classe 1.

Dosage en ciment $C = 60\text{kg/m}^3$

Pour ce second dosage, les résultats à l'essai de compression a permis d'obtenir 0,867 MPa et 0,890 MPa avec une moyenne de 0,879 MPa et un écart type de 0,011 MPa.

En basant sur ces résultats, les critères nous indiquent que le MAR est de classe 2.

Dosage en ciment $C = 90\text{kg/m}^3$

Pour ce dernier dosage, les résultats à l'essai de compression à permis d'obtenir 1,71 MPa et 1,662 MP avec une moyenne de 1,687 MPa et un écart type de 0,034 MPa.

Ce qui en basant sur ces résultats et sur les critères de classification de classer comme un MAR de classe 2.

Nous remarquons que contrairement au MAR classique 1, la résistance à la compression croit toujours avec le dosage en ciment.

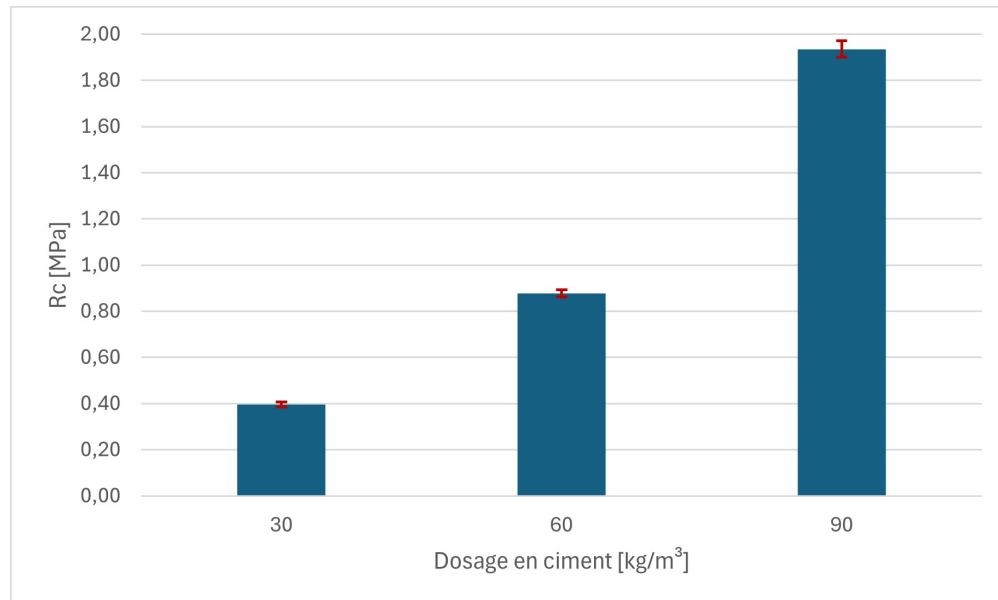


FIGURE 52 – Caption

4.3 MAR avec éco-liant

L'objectif de ce travail étant de produire un MAR avec un éco-liant à base d'ettringite. Nous utiliserons ensuite cet éco-liant combiné au ciment pour ainsi évaluer l'effet de l'éco-matériau.

4.3.1 Formulation d'éco-matériau à base d'ettringite

L'ettringite joue un rôle clé dans la formulation des MAR en raison de ses propriétés physico-chimiques particulières. Sa formation rapide, généralement en moins de quatre heures, permet un développement précoce de la portance, ce qui est essentiel pour les travaux de remblayage nécessitant une remise en service rapide, comme les tranchées de voirie. Contrairement aux liants hydrauliques traditionnels, l'ettringite forme une structure cristalline peu cohésive, ce qui facilite la réexcavation du matériau une fois durci, sans avoir recours à des moyens mécaniques lourds. Par ailleurs, l'ettringite contribue également à la stabilisation des polluants, notamment certains métaux lourds, en les fixant dans sa structure cristalline. Cette capacité de rétention lui confère un rôle environnemental important, particulièrement dans les MAR élaborés à partir de déchets contenant des sulfates et des aluminates (CTP 2023).

Rappelons l'équation de formation de l'ettringite :



Son utilisation permet de valoriser efficacement des déchets industriels riches en calcium, en aluminium et en sulfates, réduisant ainsi la dépendance aux liants conventionnels et contribuant à une démarche d'économie circulaire.

La formation de l'ettringite requiert donc une grande quantité d'aluminium qui sera apportée par les boues de potabilisation et une grande quantité de sulfates qui sera apportée par les papiers gypse.

L'éco-matériau sera donc composé de :

- boues de potabilisation ;
- gypse ;
- sédiment B ;
- chaux

La chaux a pour but de stabiliser l'ettringite. L'ettringite devient stable pour un pH est compris entre 11,5 et 12. Pour un obtenir un pH situé dans ce intervalle on ajoute de la chaux (CTP 2023). Dans le cadre de ce travail, les cendres volantes ont été remplacées par les sédiments B.

D'autres facteurs comme la température et l'hydratation peuvent aussi influencer la stabilité de l'ettringite. Pour ce qui est de la température, jusqu'à 80°C maximum l'ettringite est stable (Poupelloz, 2019).

Le Tableau 39, reprend les différentes proportions en masse sèche des ingrédients.

Matériaux	% Masse sèche
Sédiment B	86,5
Boues Eupen	2,2
Boues Stembert	1,4
Gypse B	1,8
Gypse C	4
Chaux	4,1

TABLEAU 39 – % Masse sèche pour l'éco-matériau

Le mélange des différents matériaux se fait comme suit :

- peser les quantités ;
- ajouter les sédiments B dans le mélangeur(creatangle) et laisser tourner pendant 10 minutes afin d'homogénéiser ;
- prendre la teneur en eau et le pH des sédiments ;

- ajouter les boues d'Eupen et de Stembert et laisser tourner pendant 20 minutes et prendre la teneur en eau ;
- ajouter le gypse B et C et laisser tourner pendant 20 minutes, prendre ensuite le pH et la teneur en eau ;
- ajouter la chaux et laisser tourner pendant 20 minutes, ensuite prendre le pH ;

Après cette étape, on vient gratter les parois du mélangeur pour obtenir un mélange homogène. Après avoir terminé, le mélange est laissé au repos dans seau fermé pendant au moins une heure.

4.3.2 Caractérisation du liant

Le liant à base d'ettringite, sera caractérisé à travers les essais de :

- saturation à la chaux ;
- Proctor ;
- pycnomètre ;
- stabilisation du liant dans le temps

Essai de saturation de la chaux à la chaux

Norme : D 6276 – 99a.

Cette méthode d'essai fournit un moyen d'estimer la proportion de chaux nécessaire à la stabilisation d'un sol. La proportion optimale de chaux pour la stabilisation du sol est déterminée à partir d'essais portant sur des caractéristiques spécifiques du sol stabilisé, telles que la résistance à la compression simple ou l'indice de plasticité (ASTM. (1999). Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization) Le but est de déterminer la teneur minimale en chaux nécessaire pour atteindre un pH d'au moins 12,4.

Les étapes de l'essai sont les suivantes : ((ASTM. (1999). Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization)

- Préparer 5 échantillons représentatifs du mélange séché à l'air libre ou à l'étuve à une température de : $T \leq 60^{\circ}\text{C}$
- Déterminer la masse de chaque échantillon de sol séché à l'air équivalente à 25,0 g de sol sec, à l'aide de la formule suivante :

$$Ma = 25 \times \left(1 + \frac{W}{100}\right)$$

où :

Ma = masse de l'échantillon de sol séché à l'air (g)

W = teneur en eau (%) de l'échantillon séché à l'air (déterminée en 10.4)

- Placer chaque échantillon dans une **bouteille en plastique sèche**, et fermer hermétiquement.
- Prélever **six échantillons représentatifs de chaux**. Cinq de ces échantillons doivent représenter **2 %, 3 %, 4 %, 5 % et 6 %** de la masse équivalente de 25 g de sol sec. Le sixième échantillon contiendra **2,0 g de chaux**, destiné à préparer une **solution saturée de chaux**. Placer les 2,0 g de chaux dans une bouteille sèche et fermer hermétiquement.
- Ajouter chacun des cinq échantillons de chaux à un échantillon de sol correspondant, dans une bouteille en plastique. Fermer hermétiquement, **marquer le pourcentage** de chaux sur la bouteille, et **mélanger soigneusement** en agitant. Répéter cette procédure pour les quatre autres paires sol-chaux.
- Ajouter **100 mL d'eau** dans chacune des bouteilles contenant les mélanges sol-chaux, ainsi que dans celle contenant uniquement **2,0 g de chaux**.
- Fermer les bouteilles et **agiter chacune** des préparations sol-chaux-eau et chaux-eau pendant **au moins 30 secondes** ou jusqu'à ce que le mélange soit homogène. Ensuite, **agiter pendant 30 secondes toutes les 10 minutes pendant 1 heure**.

- (h) Si nécessaire, chauffer ou refroidir les échantillons pour amener la température à $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (i) Dans les 15 minutes avant la fin des 1h, mesurer le pH des échantillons.

En suivant donc la procédure susmentionnée, nous avons donc réalisé au laboratoire la teneur en chaux du mélange (Tableau 40).

Matériaux	Masse sèche (g)
Sédiment B	90,17
Boues Eupen	2,25
Boues Stembert	1,49
Papier gypse B	1,88
Papier gypse C	4,20

TABLEAU 40 – Mélange pour la saturation en chaux

Les résultats des mesures de pH sont repris dans le tableau 41.

% Chaux	Ph
2	11,33
3	11,97
4	12,20
5	12,25
6	12,29
2g	12,38

TABLEAU 41 – Résultats pour la saturation en chaux

Nous remarquons donc que l'échantillon 2g fournit un ph proche de 12,4, et que le pH commence à se stabiliser à partir de 4% de chaux environ. Cela signifie que le mélange est saturé. Cela montre bien que la teneur en chaux reprise dans le tableau 43 est bien plausible.

La Figure 53 montre l'évolution du pH en fonction de la teneur en chaux.

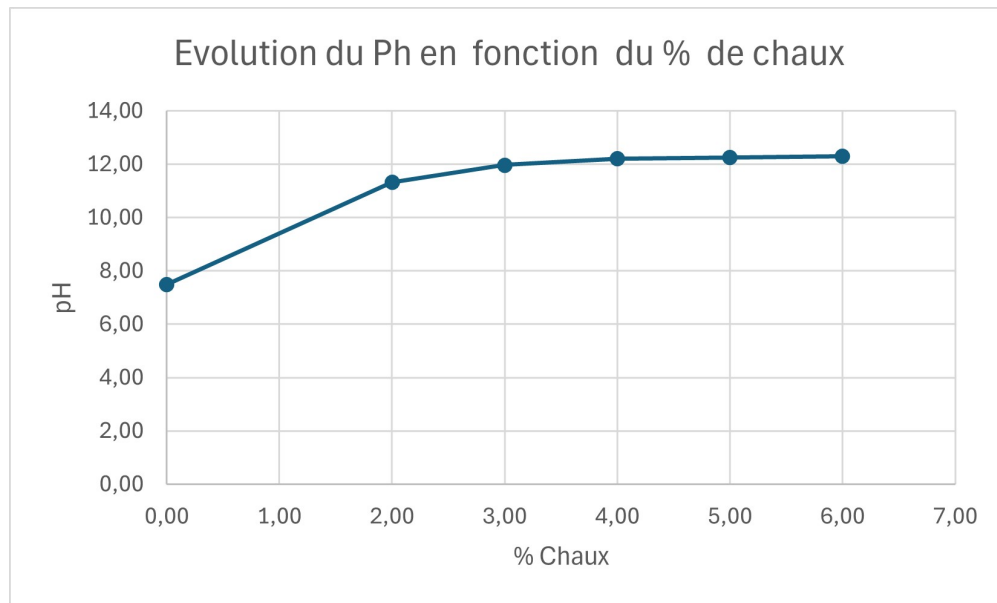


FIGURE 53 – Evolution du % de chaux en fonction du Ph

Essai Proctor :

nous avons effectué un essai de Proctor modifié dont la courbe est représentée à la figure 54 et nous avons obtenu les résultats repris dans le tableau 42.

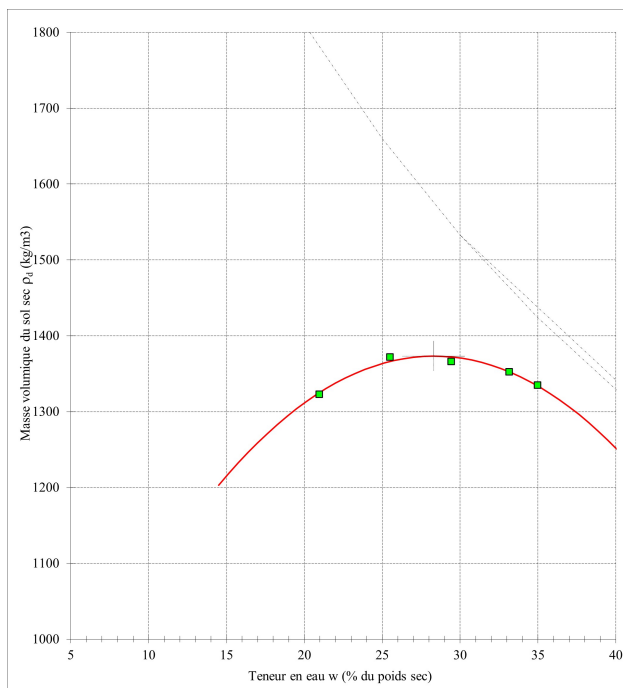


FIGURE 54 – courbe de l’essai Proctor modifié pour l’éco-matériau

teneur en eau optimum	28.3%
Masse volumique sèche maximum	1373 kg/m ³

TABLEAU 42 – Résultats de l’essai Proctor modifié pour l’éco-matériau

Essai au pycnomètre

En suivant la procédure décrite à la section 3.4, l’essai au pycnomètre nous a permis de trouver une densité de $2,8 \text{ g/cm}^3$

Stabilisation du liant dans le temps

Pour évaluer la stabilisation du liant à base d’ettringite, nous avons effectué des mesures de pH à 7, 28, 60 et 90 jours.

Le Tableau 43, reprend les pH moyens évalué à 7, 28 et 60 jours. Notons que les résultats pour les pH à 90 jours n’étaient pas encore disponibles.

Durée (jours)	pH
7	12,24
28	12,12
60	11,63

TABLEAU 43 – Évolution du pH au cours du temps

La Figure 55 représente l'histogramme de l'évolution du pH.

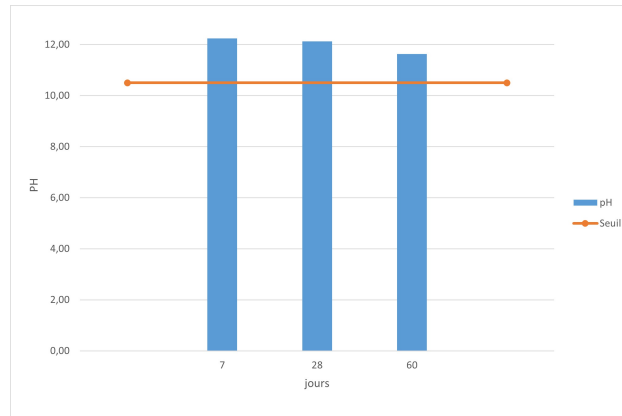


FIGURE 55 – évolution de ph

Nous remarquons une diminution graduelle du pH au cours du temps qui traduit un processus de réaction chimique et de stabilisation dans le matériau. L'ettringite reste bien stable car le $\text{pH} > 10,5$ (valeur seuil).

4.3.3 Utilisation de l'éco-matériau et du ciment

Nous allons à présent suivre les 3 étapes de la formulation pour obtenir un MAR avec un liant à base d'ettringite et du ciment.

Optimisation de la compacité

Elle est la même que pour les 2 précédents mélanges.

Optimisation de la fluidité

Nous allons faire varier le w/s (tableau 44), pour un dosage en ciment à l'occurrence 0 ici, et mesurer l'étalement.

Ingrédient	Dosage	0,5	0,55	0,6
Ciment	kg/m ³	0	0	0
Liant circulaire	kg/m ³	327	317	306
0/4	kg/m ³	702	679	657
4/7	kg/m ³	420	407	394
7/14	kg/m ³	281	272	263
eau	kg/m ³	333	355	376
Total	kg/m ³	2063	2029	1996

TABLEAU 44 – Optimisation de la fluidité pour le MAR avec éco-liant

Le Tableau 45 reprend les diamètres d'étalement pour chaque rapport w/s.

w/s	diamètre(cm)
0,5	31
0,55	45,5
0,6	57

TABLEAU 45 – diamètre moyen d'étalement pour l'optimisation de la fluidité du MAR avec l'éco-liant

Le w/s optimal (figure 56) est de 0,6.

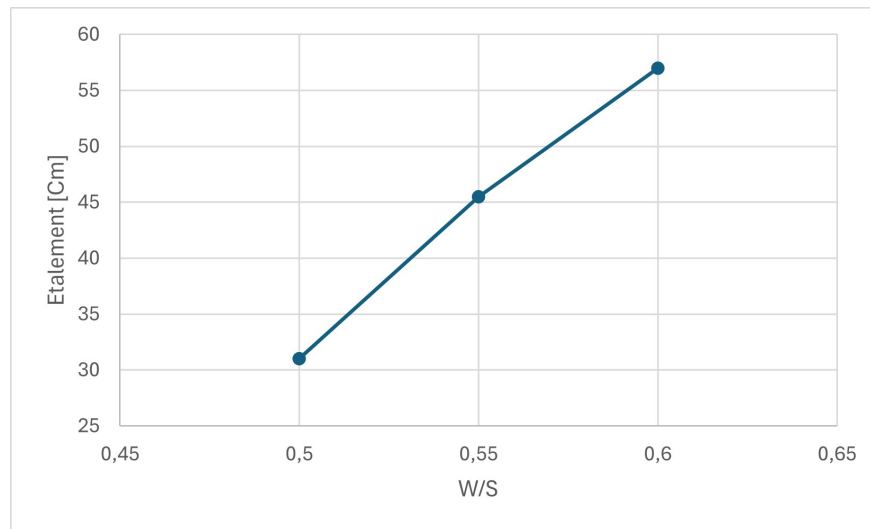


FIGURE 56 – Étalement pour l'optimisation de la fluidité MAR+éco-liant

Optimisation de la résistance

En vue de faire une étude comparative sur l'influence de l'éco-liant, nous avons adopté les mêmes dosages en ciment pour évaluer la résistance en compression tout en commençant par un dosage sans ciment. Ces dosages sont repris dans le tableau 46.

Ingrédient	Unité	8	9	10	11
Ciment	kg/m ³	0	30	60	90
Liant circulaire	kg/m ³	307	282	257	232
0/4	kg/m ³	658	658	658	658
4/7	kg/m ³	394	394	394	394
7/14	kg/m ³	263	263	263	263
eau	kg/m ³	375	375	375	375

TABLEAU 46 – Dosages pour l'optimisation de résistance du MAR l+éco-liant

Le Tableau 47 reprend les mesures d'étalement pour les différents dosages.

Dosage en ciment kg/m ³	Étalement	Valeur (cm)
0	D	59
	d	62
30	D	62
	d	64
60	D	61
	d	63
90	D	60
	d	62

TABLEAU 47 – Étalement en fonction du dosage en ciment pour l’optimisation de la résistance du MAR avec éco-liant

Nous remarquons que l’étalement est plutôt constant (figur 57).

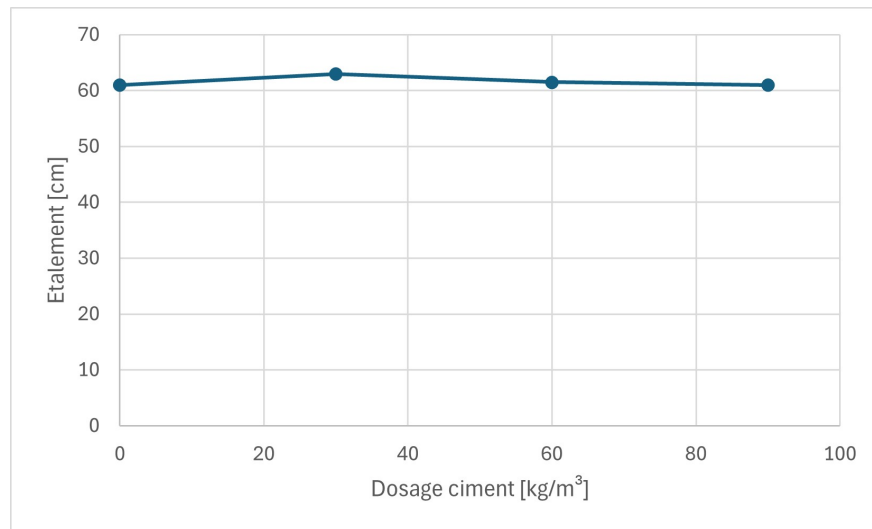


FIGURE 57 – Étalement en fonction du dosage en ciment pour l’optimisation de la résistance du MAR avec éco-liant

Nous allons passer maintenant aux essais de compression après 28 jours. Précisons que pour chaque dosage on a un seul essai.

Dosage en ciment 0kg/m³ :

Le liant est exclusivement constitué de la formulation à base d’ettringite, intégrant chaux, boues d’aluminium, gypse et sédiment de dragage. Le module de résistance à la compression simple corrigé (UCS corrigé) mesuré est 0,135 MPa.

Selon Qualiroutes et Nonet, le MAR obtenu est de classe 1. Cette faible résistance peut être attribuée à l’absence totale de ciment et à la nature même de la formulation à base d’ettringite, dont la prise et le développement de résistance reposent sur des réactions différentes de l’hydratation des liants hydrauliques classiques.

Dosage en ciment : 30kg/m³ :

Un essai de compression simple a été réalisé sur cube ($L/D = 1$) et corrigé selon ASTM 42/C42M (facteur 0,87). La résistance corrigée obtenue est 0,186 MPa.

Au regard des critères de classification de Qualiroutes E 3.7 : $0,186 \text{ MPa} < 0,7 \text{ MPa}$ classe MAR 1 (réexclavabilité aisée). et du brevet Nonet, le MAR est de classe 1.

Par rapport au mélange 0 kg/m^3 , la résistance passe de $0,135 \text{ MPa}$ à $0,186 \text{ MPa}$, cette amélioration confirme l'effet du ciment sur la cohésion, mais le niveau absolu de résistance reste modeste.

La comparaison entre la formulation classique et celle à base d'ettringite, met en évidence que la formulation classique atteint environ le double de la résistance de la formulation ettringitique ($0,397 \text{ MPa}$ contre $0,186 \text{ MPa}$). Ces différences peuvent s'expliquer par une porosité plus importante et une compaction moins efficace dans la matrice ettringitique.

Dosage en ciment : 60 kg/m^3 :

Pour ce dosage, nous avons obtenu une résistance en compression de $0,333 \text{ MPa}$ ce qui classe ce MAR de type 1 selon les exigences de qualiroutes ou pour le brevet de Nonet. Nous pouvons remarquer une hausse de la résistance à la compression par rapport aux deux premières compositions.

L'ajout de ciment dans la formulation à base d'ettringite améliore sensiblement la résistance mécanique entre 30 kg/m^3 et 60 kg/m^3 , mais les performances restent faibles comparées aux formulations classiques à base de ciment, chaux et cendres volantes. Cela suggère que la matrice à base d'ettringite, bien que potentiellement avantageuse pour des raisons environnementales (valorisation de déchets), présente une cinétique ou une structure finale moins favorable à la résistance mécanique à 28 jours.

Dosage en ciment : 90 kg/m^3

L'essai de compression simple a donné une résistance corrigée selon ASTM C42, de $0,558 \text{ MPa}$ pour tenir compte du rapport L/D égal à 1. Selon les exigences de Qualiroutes et le brevet de Nonet, nous avons donc un MAR de classe 1.

En comparaison avec les compositions à 60 kg/m^3 de ciment + ettringite, la résistance maximale progresse (de $0,383 \text{ MPa}$ à $0,642 \text{ MPa}$), ce qui suggère que l'augmentation de ciment améliore la cohésion et la résistance globale.

Nous remarquons que pour les quatre compositions que nous avons testées (le liant est composé de la formulation de l'éco matériau et du ciment), la classe du MAR demeure toujours la même (classe 1). Il y a certes une augmentation de la résistance de compression au fur et à mesure que le dosage en ciment mais la classe ne change, contrairement au MAR classique.

La Figure 58 montre l'évolution de la résistance du MAR avec éco-liant en fonction du dosage en ciment.

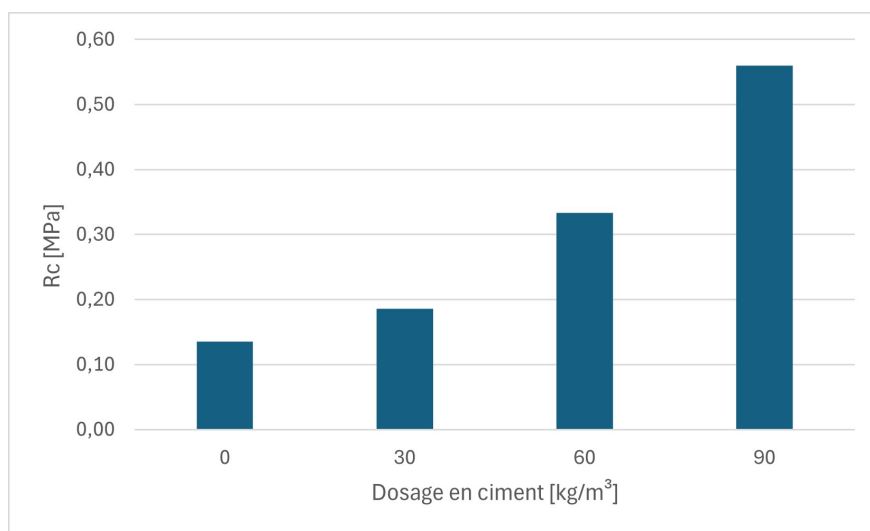


FIGURE 58 – Evolution de la résistance du MAR+2éco-liant en fonction du dosage en ciment

Les figures 59 et 60 montrent respectivement l'évolution de la résistance des 2 types en fonction du dosage en ciment et de la densité en fonction du dosage en ciment.

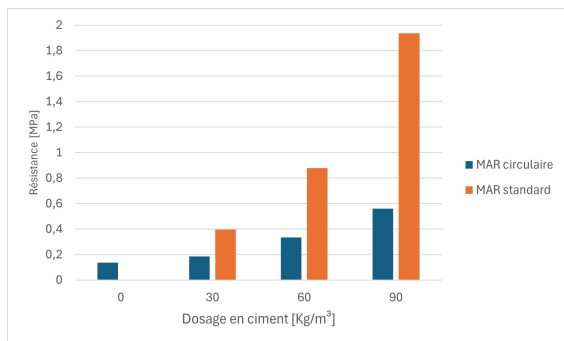


FIGURE 59 – Comparaison selon la résistance des 2 types de MAR

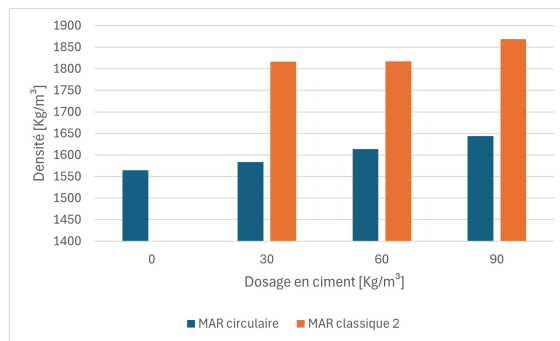


FIGURE 60 – Comparaison selon la densité des 2 types de MAR

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord établi la formulation de base utilisée pour la préparation des mélanges. À partir de cette formulation, trois mélanges distincts ont été réalisés. Le premier mélange a conduit à des résultats relativement peu satisfaisants, ce qui nous a amenés à effectuer un second essai. Ces deux premiers mélanges correspondaient à des formulations de MAR classiques. Enfin, afin d'étudier plus spécifiquement l'influence de l'ettringite, un troisième mélange a été réalisé avec un ajout de liant destiné à favoriser sa formation.

Les résultats des essais de compression ont mis en évidence que les MAR classiques présentent une résistance mécanique nettement supérieure à celle des MAR formulés avec de l'ettringite. En effet, les mélanges classiques offrent une structure plus dense et homogène, avec une proportion d'eau mieux maîtrisée, ce qui favorise le développement de résistances plus élevées. À l'inverse, les mélanges à base d'ettringite se sont révélés beaucoup plus poreux et moins performants, car leur faible densité et leur forte teneur en eau entraînent une réduction significative de la résistance en compression.

Ainsi, il apparaît que l'incorporation d'ettringite, dans les conditions expérimentales adoptées, diminue sensiblement la qualité mécanique des MAR. Les formulations classiques semblent donc plus adaptées lorsque la résistance constitue un critère déterminant. Dans le chapitre suivant, nous proposerons une conclusion générale à l'issue de ce travail et esquisserons quelques pistes d'amélioration et de perspectives de recherche en vue d'optimiser la performance et la durabilité des MAR.

5 Conclusion et perspectives

5.1 Conclusion

Ce travail avait pour objectif de formuler un **MAR (Matériau Autocompactant Réexcavable)** en privilégiant un **liant circulaire fondé sur la formation d’ettringite**, tout en évaluant en parallèle des formulations cimentaires de référence, afin d’identifier le compromis optimal entre **portance, ouvrabilité, réexcavabilité** et **durabilité** au regard des exigences de **Qualiroutes** et des recommandations du **brevet de Nonet**.

Caractérisation des constituants. Les sédiments B présentent un indice de plasticité modéré ($IP \approx 25,68\%$), typique d’un sol limoneux à teneur en argile moyenne, et une valeur au bleu faible ($\approx 2,2 \text{ g}/100\text{g}$), indiquant une faible activité argileuse. Les granulats affichent des performances mécaniques compatibles avec les usages MAR : Los Angeles $\approx 28\text{--}31\%$ et Micro-Deval $\approx 30\%$. Enfin, l’essai de saturation à la chaux montre que l’environnement $\text{pH} \geq 12,3\text{--}12,4$ est atteint, condition favorable à la formation d’ettringite.

Comportement au compactage. Les essais Proctor révèlent une teneur en eau optimale élevée ($w_{opt} \approx 28\text{--}30\%$) et une masse volumique sèche maximale de l’ordre de $1,35\text{--}1,40 \text{ Mg}/\text{m}^3$. Ce comportement s’explique par la granulométrie fine et la présence de fines réactives, cohérentes avec l’objectif MAR (matériau fluide, auto-nivelant).

Résistance mécanique et réexcavabilité. Les formulations cimentaires offrent des résistances élevées mais parfois excessives à moyen terme, risquant de compromettre la réexcavabilité. À l’inverse, les formulations ettringitiques montrent un compromis équilibré : elles atteignent des résistances conformes aux exigences Qualiroutes, tout en conservant une certaine réversibilité.

Lecture globale au regard de Qualiroutes. Le matériau élaboré satisfait les critères d’ouvrabilité, de portance initiale et de réexcavabilité. Il démontre ainsi une pertinence technique et environnementale : valorisation de co-produits, réduction de la teneur en ciment et meilleure maîtrise de la montée en résistance.

Bilan. Le MAR à liant circulaire ettringitique constitue une alternative crédible et durable aux formulations purement cimentaires. Il contribue à l’économie circulaire et ouvre la voie à une utilisation plus systématique de matériaux réexcavables performants et respectueux de l’environnement.

5.2 Perspectives

Au regard des résultats obtenus, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- **Optimisation des dosages et de la réactivité** : ajuster les proportions chaux/sulfates/alumine-silice pour piloter la cinétique de formation d’ettringite. L’introduction de superplastifiants pourrait réduire la quantité d’eau de gâchage, améliorer la compacité et l’ouvrabilité, tout en maintenant des résistances maîtrisées.
- **Vers un liant circulaire plus dense et plus stable** : substituer partiellement ou totalement le sédiment B par des cendres volantes afin d’augmenter la densité, réduire la demande en eau et favoriser une ettringite plus homogène.
- **Maîtrise du comportement en service** : compléter les essais par des tests de durabilité ciblés (cycles gel/dégel, immersion/séchage, exposition à l’eau agressive) et définir un seuil de résistance garantissant la réexcavabilité, validé par des tests instrumentés (pénétrométrie, sciages).

En résumé, les prochaines étapes consistent à **intégrer les superplastifiants, substituer les sédiments B par des cendres volantes** pour densifier les formulations, et **valider en conditions réelles** les performances mécaniques, environnementales et économiques. Ces perspectives permettront de confirmer le potentiel du MAR à liant circulaire ettringitique comme solution innovante, durable et conforme aux exigences de Qualiroutes.

6 Bibliographie

- ASTM International. (2005). *Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete (ASTM C1611/C1611M – 05)*. ASTM International. <https://www.astm.org>
- ASTM International. (2023). *ASTM C42/C42M-23 : Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete*. West Conshohocken, PA : ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0042M-2>
- Blanco, A., Pujadas, P., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2014). Methodology for the design of controlled low-strength materials : Application to the backfill of narrow trenches. *Construction and Building Materials*. [à compléter avec volume/pages]
- Courard, L. (2022). *Cours GCIV0184-5 : Matériaux de construction*. [Support de cours, Université de Liège].
- CRR. (2009). *Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Recommandations R81/10)*. Bruxelles : Centre de Recherches Routières.
- CSTC, CRR, SPW, & FEREDCO. (2012). *M.A.R. – Matériaux autocompactants réexcavables : Guide de bonnes pratiques*. Namur : SPW.
- Fanara, A. (2021). *Mécanique des sols et des roches – Manuel de laboratoire*. [Éditeur à compléter].
- Hublet sprl. (2017). *FLUIDOROC® – Remblai autocompactant réexcavable : Fiche technique*. Floreffe, Belgique.
- Kwan, A. K. H., & Fung, W. W. S. (2009). Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar. *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.03.021>
- Lhoist Group. (2023). *Fiche technique produit SuperCalco*. <https://www.lhoist.com>
- Laboratoire LMC 2025
- Nonet, A. (Inventeur), & Établissements Hublet (Titulaire). (2014). *Dispositif et procédé pour la stabilisation et/ou la solidification de sols et de matériaux granulaires* (Brevet n° WO 2014/122217 A1).
- Parhi, S. K., Dwibedy, S., Panda, S., & Panigrahi, S. K. (2023). A comprehensive study on controlled low-strength material. *Journal of Building Engineering*, 76, 107086. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107086>
- Poupelloz, E. (2019). Étude des processus de germination-croissance de l’ettringite, seule ou dans un système aluminat tricalcique/sulfate de calcium (Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté). <https://www.theses.fr/2019UBFCK055>
- Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2015). Performance-based procedure for the definition of controlled low-strength mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(8), 0001083. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001283)
- Qualiroutes. (2011). *Cahier des charges type Qualiroutes : Chapitre E 3.7*. SPW.
- Zhang, H., & Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>

7 Annexes

Temps (min)	Lecture	Diamètre (mm)	Refus (%)	Refus cumulé (%)	Passant cumulé (%)
1	38.0	0.0460	4.43	31.1	68.92
2	35.0	0.0333	6.13	37.2	62.79
5	30.5	0.0217	9.19	46.4	53.60
15	23.0	0.0132	15.32	61.7	38.28
60	15.0	0.0069	16.34	78.1	21.936
120	14.0	0.0049	2.04	80.1	19.893
283	11.5	0.0032	5.11	85.2	14.787
1210	9.0	0.0016	5.11	90.3	9.68

TABLEAU 48 – Sédimentométrie des sédiments B

Tamis (mm)	Refus pot 1 (g)	Passant (%)
8	0,00	100,00 %
4	0,36	99,88 %
3,15	7,89	97,39 %
2	54,61	81,94 %
1	123,70	59,09 %
0,5	182,53	39,64 %
0,25	259,63	14,14 %
0,125	293,76	2,85 %
0,063	297,08	1,75 %
0	302,38	0,00 %

TABLEAU 49 – tableau granulométrique 0-4

Tamis (mm)	Refus pot 1 (g)	Passant (%)
10	0,00	100,00 %
8	0,00	100,00 %
6,3	47,75	94,05 %
4	478,85	40,29 %
3,15	626,05	21,94 %
2	726,55	9,41 %
1	761,85	5,01 %
0,5	774,10	3,48 %
0,25	782,65	2,41 %
0,125	787,45	1,81 %
0,063	790,20	1,47 %
0	791,15	1,35 %

TABLEAU 50 – tableau granulométrique 4-7

Tamis (mm)	Refus pot 1 (g)	Passant (%)
20	0,00	100,00 %
14	37,38	98,49 %
10	661,87	73,32 %
8	1541,03	37,88 %
6,3	2235,76	9,88 %
4	2410,81	2,83 %
3,15	2421,40	2,40 %
2	2432,25	1,96 %
1	2438,24	1,72 %
0,5	2441,24	1,60 %
0,25	2444,75	1,46 %
0,125	2448,52	1,31 %
0,063	2453,68	1,10 %
0	2458,79	0,89 %

TABLEAU 51 – tableau granulométrique 7-14

Temps (min)	Lecture	Diametro (mm)	Refus (%)	Relus cumul6(%)	Passant cumule(%)
1	38.0	0.0460	4.43	31.1	68.92
2	35.0	0.0333	6.13	37.2	62.79
5	30.5	0.0217	9.19	46.4	53.60
15	23.0	0.0132	15.32	61.7	38.28
60	15.0	0.0069	16.34	78.1	21.936
120	14.0	0.0049	2.04	80.1	19.893
283	11.5	0.0032	5.11	85.2	14.787
1210	9.0	0.0016	5.11	90.3	9.68

TABLEAU 52 – Sédimentométrie des sédiments B

Teneur	Ph+T (g)	Ps+T (g)	T (g)	w(%)
11%	1113,50	1058,35	264,20	6.9
14%	1550,70	1410,56	269,10	12.3
18%	1494,60	1270,70	264,80	22.3
22%	1189,20	994,85	266,50	26.7
26%	1324,40	1061,00	264,00	33
30%	1124,70	891,00	266,80	37.4

TABLEAU 53 – Tableau des valeurs pour l'essai Proctor normal sédiment B

Teneur	Ph+T (g)	Ps+T (g)	T (g)	w(%)
8%	1102,70	1049,44	264,10	6.8
12%	1344,70	11245,39	264,50	10,1
16%	1304,70	1117,56	264,30	14,0
20%	1437,70	1245,72	264,10	19,6
24%	1239,10	1053,70	266,90	23,6
28%	1226,30	1020,25	265,80	27.3
32%	1240,10	1008,08	270,10	31,4
36%	1205,90	959,54	264,00	35,4

TABLEAU 54 – Tableau des valeurs pour l'essai Proctor modifié sédiment B

Mesures	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Moyenne
Masse du pot (g)	261,30	260,60	267,00	—
Pycnomètre eau + éch. / 24h (g)	2299,95	2311,79	2337,92	—
N° pycnomètre	2	3	15	—
Pycnomètre eau (g)	1677,34	1705,24	1719,85	—
Masse pot + éch. SSD (g)	1305,73	1297,98	1323,45	—
Masse saturé et séché (g)	1044,43	1037,38	1056,45	—
Masse pot + éch. sec (g)	1247,94	1242,03	1262,84	—
Masse sèche (g)	986,64	981,43	995,84	—
Masse volumique abs (kg/m³)	2710,36	2618,02	2636,14	2654,84
Masse volumique réelle (kg/m³)	2339,03	2278,02	2271,66	2296,24
Masse volumique saturée (kg/m³)	2476,04	2407,89	2409,92	2431,28
Coef. abs. Eau – WA24 (%)	5,86%	5,70%	6,09%	5,88%

TABLEAU 55 – Résultats de l'essai d'absorption pour les granulats 0/4

Mesure	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Moyenne
Masse du pot (g)	260,80	264,80	263,20	—
Pycnomètre eau + échantillon / 24h (g)	4293,35	4310,63	4303,74	—
N° pycnomètre	8	11	13	—
Pycnomètre eau (g)	3113,43	3116,13	3105,83	—
Masse pot + échantillon SSD (g)	2256,89	2267,02	2260,65	—
Masse saturé et séché (g)	1996,09	2002,22	2003,63	—
Masse pot + échantillon sec (g)	2154,49	2172,93	2172,86	—
Masse sèche (g)	1893,69	1908,13	1909,66	—
Masse volumique absolue (kg/m³)	2653,10	2673,86	2683,05	2670,00
Masse volumique réelle (kg/m³)	2320,23	2362,38	2370,01	2350,87
Masse volumique saturée (kg/m³)	2445,69	2478,87	2486,68	2470,42
Coef. abs. Eau – WA24 (%)	5,41%	4,93%	4,92%	5,09%

TABLEAU 56 – Résultats de l'essai d'absorption pour les granulats 4/7

Mesures	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Moyenne
Masse du pot (g)	265,40	268,30	260,80	—
Pycnomètre eau + éch. / 24h (g)	4670,70	4678,97	4664,22	—
N° pycnomètre	8	11	13	—
Pycnomètre eau (g)	3113,43	3116,13	3105,83	—
Masse pot + éch. SSD (g)	2849,02	2865,16	2854,00	—
Masse saturé et séché (g)	2583,62	2596,86	2593,00	—
Masse pot + éch. sec (g)	2746,50	2755,00	2743,50	—
Masse sèche (g)	2481,10	2486,70	2482,70	—
Masse volumique abs (kg/m³)	2685,68	2691,66	2686,00	2687,78
Masse volumique réelle (kg/m³)	2417,41	2404,90	2399,18	2407,17
Masse volumique saturée (kg/m³)	2517,30	2511,43	2505,97	2511,57
Coef. abs. Eau – WA24 (%)	4,13%	4,43%	4,45%	4,34%

TABLEAU 57 – Résultats de l'essai d'absorption pour les granulats 7/14

Tamis (mm)	P	P min(%)	P max (%)
14	100,00	100,00	100,00
10	100,00	85,00	100,00
8	93,52	78,52	100,00
6,3	87,06	72,06	102,06
4	75,97	60,97	90,97
3,15	70,71	55,71	85,71
2	61,70	46,70	76,70
1	50,12	35,12	65,12
0,5	40,71	25,71	55,71
0,25	33,07	18,07	48,07
0,125	26,86	0,00	41,86
0,063	21,87	0,00	36,87

TABLEAU 58 – n=0,3

Tamis (mm)	P	P min(%)	P max(%)
14	100,00	100,00	100,00
10	100,00	85,00	100,00
8	91,46	76,46	100,00
6,3	83,13	68,13	98,13
4	69,31	54,31	84,31
3,15	63,00	48,00	78,00
2	52,53	37,53	67,53
1	39,81	24,81	54,81
0,5	30,17	15,17	45,17
0,25	22,87	7,87	37,87
0,125	17,33	0,00	32,33
0,063	13,17	0,00	28,17

TABLEAU 59 – n=0,4

Tamis (mm)	P	P min(%)	P max (%)
14	100,00	100,00	100,00
10	100,00	85,00	100,00
8	89,44	74,44	100,00
6,3	79,37	64,37	94,37
4	63,25	48,25	78,25
3,15	56,12	41,12	71,12
2	44,72	29,72	59,72
1	31,62	16,62	46,62
0,5	22,36	7,36	37,36
0,25	15,81	0,81	30,81
0,125	11,18	0,00	26,18
0,063	7,94	0,00	22,94

TABLEAU 60 – n=0,5