

Analyse de l'Influence des Caractéristiques du Sable Recyclé sur les Propriétés Rhéologiques du Béton Autoplaçant par la Méthode du Mortier de Béton Équivalent

Lara Saad^{1,2}, Mustapha Nouri¹, Mahfoud Tahlaiti^{1,3}, Abdelhafid Khelidj²

¹Icam site de Nantes, 35 av. du Champ de Manœuvres, 44470 Carquefou

²Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire, France

³Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

RESUME Ce travail étudie les effets de la substitution du sable naturels par des sables de terre d'excavation dans la formulation d'un béton autoplaçant (BAP) destiné à l'industrie de la préfabrication. Un total de quatre différents gisements de sables de terre excavée a été étudiés afin d'évaluer leurs propriétés. En utilisant l'approche du mortier de béton équivalent, le mortier de référence (MR) avec du sable alluvionnaire a été développé à partir d'un béton autoplaçant avec une classe de résistance C30/37. L'étude prend en compte trois conditions d'humidité du sable : l'état naturel en stockage, l'état sec et l'état saturé surface sèche du sable. Quinze mortiers ont été élaborés en remplaçant 30% du sable naturel par quatre différents sables, tout en maintenant les autres paramètres de la formulation constants. Des essais d'étalement ont été réalisés pour évaluer la fluidité et observer comment les propriétés rhéologiques évoluent dans le temps. Les résultats ont montré que certains sables avaient des masses volumiques similaires à celles du sable naturel alluvionnaire, tandis que d'autres avaient des masses volumiques plus faibles. Cependant, les niveaux d'absorption d'eau varient considérablement d'un sable à l'autre, certains présentant des niveaux allant de 1 à 6 %, d'autres sables avaient des niveaux allant jusqu'à 10 %. En outre, la granulométrie du sable peut varier en fonction de la source des granulats. Les résultats des essais d'étalement indiquent que la fluidité du mortier fabriqué avec du sable à l'état saturé surface sèche est supérieure à celle du mortier fabriqué avec du sable à l'état sec. Dans toutes les conditions, on observe que tous les mortiers perdent leur fluidité avec le temps. L'étude statistique a révélé une forte relation entre les propriétés du sable ainsi que son état de saturation et l'étalement de son mortier.

Mots-clefs Granulats de terre d'excavation, béton autoplaçant, propriétés des granulats, mortier du béton équivalent

I. INTRODUCTION

Selon les études réalisées par Eurostat en décembre 2020 [1], l'Allemagne se positionne en tête des producteurs de déchets en Europe, suivi par la France qui occupe la deuxième place parmi les 10 principaux pays européens producteurs de déchets [2]. Chaque année, la France génère environ 326 millions de tonnes de déchets, dont une part substantielle de 213 millions de tonnes provient exclusivement du secteur du BTP. Cette prédominance du secteur du BTP en tant que premier

producteur de déchets en France confère au pays le statut de premier producteur de déchets BTP en Europe [2]. Parmi ces déchets, la démolition de structures en béton représente environ 19 millions de tonnes par an [3]. En outre, l'excavation du sol génère une quantité considérable de déchets inertes, estimée à environ 110 Mt/an [4], ce qui représente plus que 50 % du total des déchets de BTP produits.

D'autre part, les besoins annuels du pays en granulats sont estimés à 453,1 MT [5]. La demande de granulats, en particulier pour la production de béton, représente 125 millions de tonnes par an, seuls 6,8 millions de tonnes sont couverts par des granulats recyclés [6]. Un écart important de 118 millions de tonnes dépendent encore de matériaux vierges. La norme NF EN 206+A2/CN prévoit l'utilisation de granulats de béton recyclés issus de la déconstruction pour la fabrication des bétons destinés aux structures en précisant des limites d'utilisation (articles NA.5.1.3 Granulats) par type de granulat recyclé, tel que les taux de substitution de granulats naturels maximum autorisé en fonction de la classe d'exposition à laquelle est soumise la partie d'ouvrage en béton, un pourcentage de remplacement de 10% maximale de sable de béton recyclé est autorisé pour les bétons de classes d'exposition XC1 et XC2. La quantité de déchets inertes mentionnée précédemment souligne l'importance de la valorisation des déchets des sols d'excavation et de démolition pour répondre à la demande de granulats tout en réduisant l'impact sur l'environnement.

Le recyclage du béton de démolition pour produire des granulats de béton recyclé "GBR" est la voie de recyclage le plus reconnu. Les granulats de béton recyclé contiennent une partie du mortier adhérent (MA) du béton d'origine. Des études [7]-[9] ont montré que le MA augmente la porosité des granulats. Il est le siège de l'apparition de micro-fissures pendant le concassage du béton, ainsi qu'il présente une adhérence plus faible au niveau de l'auréole de transition. Les granulats de béton recyclé se caractérisent par leur forme angulaire, leurs propriétés mécaniques plus faibles, une masse volumique généralement plus basse et une capacité d'absorption d'eau plus élevée. La taille des granulats est directement liée au pourcentage volumique du mortier. Akbarnezhad et al [10] ont montré que les granulats recyclés de 4 à 8 mm présentaient une plus grande quantité de mortier que ceux de plus grande taille. À ce jour, de nombreuses études de recherche ont été menées sur les granulats de béton recyclé (GBR) [11]-[19] pour étudier leur impact lorsqu'ils sont incorporés dans le béton. Selon Carro-López et al. [20], la fluidité des BAP avec 50 % et 100 % de sable recyclé a subi une réduction significative par rapport au béton de référence, soit 25 % et 35 % respectivement, même avec l'ajout de l'eau absorbée par le sable. Des études antérieures ont montré que les résistances mécaniques du mortier sont presque similaires jusqu'à un remplacement de 30% de sable recyclé [21]. Cette augmentation de la résistance peut être attribuée à la meilleure homogénéité du mélange, particulièrement notable lorsqu'on mélange 70% de sable naturel avec 30% de sable recyclé [21].

Afin d'améliorer la valorisation totale des déchets de construction et de démolition dans le béton, l'idée d'intégrer les déchets des sols excavés comme substitut au sable alluvionnaire dans le béton commence à être étudié. Bien que de nombreuses études aient été menées sur les granulats de béton recyclé et le mortier de ciment commence à être étudiée. Les granulats issus de sols excavés sont relativement peu explorés dans la littérature Les sols excavés ont une masse volumique variant de 2300 à 2700 kg/m³ [22]-[26]. En ce qui concerne l'absorption d'eau, les sols excavés ont une absorption variant de 10 à 35% [22], [26], [27], bien plus élevée que celle des granulats naturels. Ces propriétés peuvent varier en fonction de la composition des sols excavés ayant des natures minéralogiques différentes. Pour améliorer les propriétés des sols excavés, plusieurs méthodes ont été explorées dans la littérature. Priyadharshini et al. [25] ont proposé un tamisage humide à cet effet. Wu et al. [28] ont opté pour un processus de séchage, de broyage et de tamisage. Huang et al. [29] ont utilisé un équipement de séparation des sédiments et un tamisage du sol pour extraire le sable de sol excavé. Selon Wu et al. [28], la teneur en argile a diminué de 36% à 5,5% et le module de finesse a augmenté de

1,7 à 2,05, lorsque le sol a été traité par un broyage et tamisage à sec. Wu et al. [28] ont adopté le sable de sol excavée pour remplacer partiellement ou totalement le sable de rivière dans la préparation du mortier de ciment, trois lots de sol excavé provenant de différents sites de construction ont été étudiés, un tamisage à sec et un broyage ont été adoptés pour traiter le sol résiduel. Les sols de type I et II sont des sols résiduels composés de granite, tandis que les sols de type III sont des dépôts alluviaux diluviaux. Le dosage de l'agent réducteur d'eau est augmenté avec l'augmentation du ratio de remplacement du sol excavée par rapport au total des granulats fins. Pour les résultats de la résistance à la flexion, deux tendances ont été observées : pour un pourcentage de remplacement inférieur à 30%, une augmentation du taux de remplacement entraîne une augmentation de la résistance à la flexion. Pour les sols excavés de type I et II, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de remplacement, alors que le mortier de ciment à base de sol excavé de type III présente une résistance à la compression comparable à celle d'un mortier de référence. De nombreuses études ont montré que l'état de saturation des granulats de béton recyclés ont un impact significatif sur la maniabilité du béton, selon Brand et al. [30]. Les granulats à l'état saturé surface sèche présentent un affaissement similaire à un béton traditionnel, limitant ainsi l'absorption d'eau lors du malaxage. Cyr et al. [31] ont étudié l'évolution de la rhéologie du béton entre 0 et 90 minutes, en fonction de la teneur en eau des granulats recyclés (absorption - Ab), dans le cas où 30% du sable naturel était substitué par du sable à béton recyclé. Trois états hydriques du sable recyclé ont été caractérisés, toujours définis sur la base de la teneur en eau Ab mesurée à 24 heures (NF EN 1097-6) : teneurs en eau de 120% d'Ab, 87% d'Ab et 33% d'Ab. La perte d'affaissement dans le temps est moindre lorsque les granulats recyclés sont dans un état hydrique très inférieur à la saturation. L'état d'humidité proche du coefficient d'absorption est celui qui donne au béton la meilleure fluidité. Les sables de sols excavés, ayant des taux d'absorption élevés similaires à ceux des granulats de béton de démolition, peuvent affecter la maniabilité du béton.

Schwartzentruber et Catherine [32] ont proposé l'utilisation du concept de mortier équivalent au béton (MBE) pour étudier la rhéologie du béton frais en supposant que les propriétés rhéologiques du MBE devraient être corrélées à celles du béton correspondant. Pour la conception du MBE, il est considéré que tous les phénomènes de friction se produisent à l'interface pâte de ciment/granulats. Par conséquent, la surface spécifique totale des granulats est une variable fondamentale pour comprendre le niveau de maniabilité du béton. Khadraoui Safa et al. [33] offre une perspective comparative de l'étalement entre le MBE et le Béton Autoplaçant (BAP). Les observations montrent un étalement du MBE de 31,5 cm à 38,25 cm, tandis que le BAP présente une plage variant de 60,5 cm à 67,25 cm. Une corrélation significative de 0,92 souligne la cohérence des propriétés rhéologiques, en particulier en ce qui concerne l'étalement.

L'objectif de cette étude est d'explorer le potentiel de l'incorporation de sable d'excavation dans la formulation du béton autoplaçant destiné à l'industrie de la préfabrication, un sujet qui n'a pas été étudié auparavant dans la littérature. Tout d'abord, les propriétés du sable d'excavation ont été caractérisées afin de comprendre leurs caractéristiques et leur variabilité en vue d'évaluer leur efficacité potentielle en tant que remplacement du sable alluvionnaire dans le béton autoplaçant. Deuxièmement, la méthode du mortier de béton équivalent est adaptée pour étudier l'effet de l'incorporation de sable de terre d'excavation avec un pourcentage de substitution de 30% sur les propriétés du mortier de béton autoplaçant, en considérant trois états d'humidité du sable.

II. METHODES ET ESSAIS

A. Matériaux

1. Ciment, filler et adjuvant

Le ciment Portland, désigné sous le nom de CEM I 52,5 R CE CPE NF, présentant une densité de 3,13 g/cm3 et une surface de Blaine de 4815 cm²/g, a été utilisé. La fraction en poudre a été complétée avec des fillers calcaires ayant une surface spécifique de 4050 cm²/g et une densité de 2,7 g/cm³. Pour répondre aux exigences du béton autoplaçant, un superplastifiant, le MasterGlenium ACE 550, adapté aux bétons préfabriqués, a été utilisé, ainsi qu'un accélérateur de durcissement, le MasterX-SEED 100.

2. Sables

Deux types différents de sable ont été utilisés : le sable naturel alluvionnaire et le sable d'excavation provenant de divers sites. La référence de chaque sable est mentionnée dans le tableau 1.

La carte des aléas de "Retrait-gonflement des sols argileux" du BRGM indique que le terrain excavé à Saint-Germain se trouve dans une zone présentant un aléa moyen. Quant au terrain du site de La Tranche-sur-Mer, il est situé dans une zone où l'aléa est a priori nul. Les sites de Saint-Prouant et Le Boupère se trouvent quant à eux dans des zones où l'aléa est considéré comme faible.

TABLEAU 1. Liste des gisements de granulats

Abréviation	Classe de Particules (mm)	Type	Provenance
SA_0-4	0/4	Alluvionnaire	Pays de La Loire
SER_0-4_A_SP	0/4	Sol d'Excavation	Saint-Prouant
SER_0-4_A_B	0/4	Sol d'Excavation	Boupère
SER_0-4_A_SG	0/4	Sol d'Excavation	Saint-Germain
SER_0-4_A_LT	0/4	Sol d'Excavation	La Tranche

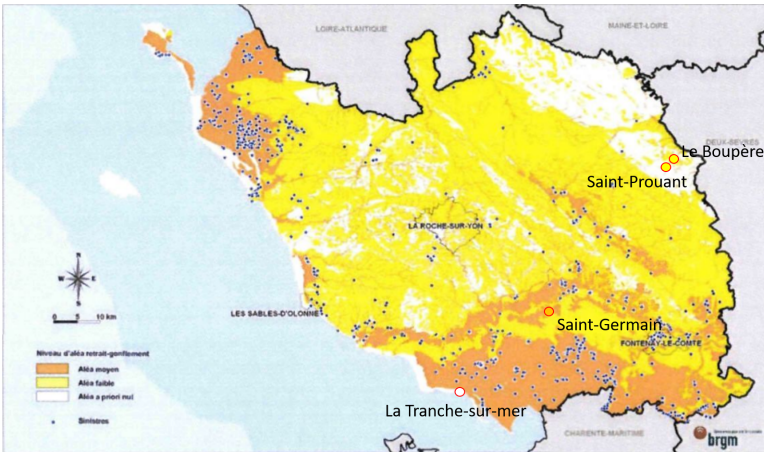


FIGURE 1. La carte des aléas « Retrait-gonflement des sols argileux » du BRGM

B. Caractérisation physique du sable

La norme NF EN 933-1, 2012 [34] a été utilisée pour déterminer la distribution granulométrique des sables. Pour calculer la masse volumique réelle saturé surface sèche et l'absorption d'eau des sables, la norme NF EN 1097-6, 2014 [35] a été utilisée. Le module de finesse ainsi que la teneur en fines ont été calculés en fonction des pourcentages de matériau retenu sur une série prédéterminée de tamis et en utilisant la norme NF EN 13139, 2003 [36]. Les quantités relatives de fines argileuses ou plastiques et de poussières dans le sable ont été déterminés à l'aide du test d'équivalent de sable, qui a été réalisé conformément à la norme NF EN 933-8, 2015 [37]. Afin de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration, l'essai au bleu de méthylène a été effectué suivant la norme NF EN 933-9 [38].

C. Composition des mélanges de mortier

Dans ce travail, la méthode du mortier du béton équivalent (MBE) développée par Schwartzentruber et al. [32] a été adoptée pour évaluer l'impact du remplacement du sable naturel par du sable de terre d'excavation à hauteur de 30% sur les caractéristiques du mortier à l'état frais. L'effet des différents états hydriques du sable sur les propriétés du mortier est également étudié, y compris l'état sec, l'état saturé surface sèche et état naturel de stockage. Pour parvenir à l'état sec, le sable est séché dans une étuve ventilée à une température de 105°C jusqu'à ce qu'une masse constante soit obtenue, conformément à la méthode préconisée dans la norme NF 1097-6. Lorsque le sable est considéré à l'état saturé surface sèche, le sable est séché de la même manière, ensuite, une quantité d'eau équivalente à sa capacité d'absorption est ajoutée dans un pycnomètre fermé pendant 24 heures à une température de 20°C avant formulation. Le pycnomètre est bien agité pendant les premières heures afin d'assurer une répartition homogène de l'eau dans le sable. L'état naturel de stockage du sable est sujet à une variation de température et d'humidité relative, car il est entreposé à l'extérieur. Quinze mélanges de MBE ont été évalués, comprenant trois mortiers de référence fabriqués avec du sable naturel, en tenant compte des trois états hydriques, ainsi que douze mortiers avec un taux de remplacement de 30% en volume du sable naturel pour chacun des quatre différents sables dans différents états hydriques.

Le mortier de référence fabriqué avec du sable naturel correspond au mortier équivalent d'un béton autoplaçant conçu pour avoir un écoulement d'affaissement de 650 ± 30 mm et une classe de résistance à la compression de C30/37.

Les formulations pour les différents sables sont présentées dans le tableau ci-dessous (tableau 2). Le mortier a été formulé en maintenant un rapport constant de 0,56 pour l'eau efficace sur le ciment (E_{eff}/C) et de 0,335 pour l'eau efficace sur le ciment et le filler (E_{eff}/F). Le rapport sable sur ciment (S/C) est ajusté en fonction de la masse du sable recyclé nécessaire pour maintenir un volume de sable constant à celui du mortier de référence.

TABLEAU 2. Formulation du mortier de béton équivalent

Constituants	M-SN	M-SER-SP-30	M-SER-LT-30	M-SER-SG-30	M-SER-B-30
E_{eff}/C	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
E_{eff}/F	0,335	0,335	0,335	0,335	0,335
S/C	2,74	2,55	2,71	2,65	2,51

1. Propriétés du mortier à l'état frais

Les propriétés du mortier frais sont actuellement évaluées uniquement à travers des essais d'étalement effectués à des intervalles spécifiques : à un temps $t=0$ min juste après le malaxage, à $t=15$ min et à $t=30$ min, sans aucun malaxage ultérieur au fil du temps du mélange dans le récipient. Lorsque le temps de test arrive, le mortier est versé dans le cône pour l'essai, afin de simuler une situation réelle où le béton repose dans la benne avant d'être coulé. Le test d'étalement, réalisé conformément à la norme NF EN 12350-2 (2010) [39], a été utilisé pour contrôler la maniabilité des mortiers autoplacants et l'évolution de leur étalement au fil du temps (figure 2). L'étalement est mesuré à l'aide d'un mini-cône spécial adopté pour la caractérisation du MBE, dont les dimensions sont déduites du cône d'Abram selon un rapport homothétique de deux (diamètre supérieur $D_{\text{supérieur}} = 50$ mm, diamètre inférieur $D_{\text{inférieur}} = 100$ mm, et hauteur $h = 150$ mm) [32], [40].

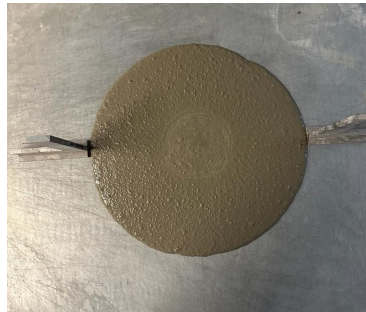


FIGURE 2. Essai d'étalement du mortier à l'état frais

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Propriétés du sable

Les propriétés des différents sables sont résumées dans le tableau 3. Trois échantillons ont été testés pour chaque essai.

TABLEAU 3. Propriétés des gisements de sable

Propriétés	NS	SER_0-4_A_SP	SER_0-4_A_LT	SER_0-4_A_SG	SER_0-4_A_B
Masse volumique réelle en condition saturée surface sèche (Kg/m ³)	2600	2106 ± 21	2535 ± 3	2348 ± 56	2093 ± 98
Absorption d'eau (%)	0,4	5,49 ± 0,53	1,31 ± 0,2	6,22 ± 0,58	10,9 ± 0,47
Module de finesse	2,73	2,74	2,27	3	3,32
Pourcentage de fines (%) ≤ 63 μm	1,17	3,6	1,31	1,66	6,84
Valeur d'équivalent de sable (%)	80	72,64 ± 2,94	88,16 ± 2,03	82,12 ± 1,71	63,17 ± 1,54
Test au bleu	0,4	1	0,52	1,12	1,77

Le graphe 3 montre que certains sables ont une distribution granulométrique étalée similaire à celle du sable naturel.

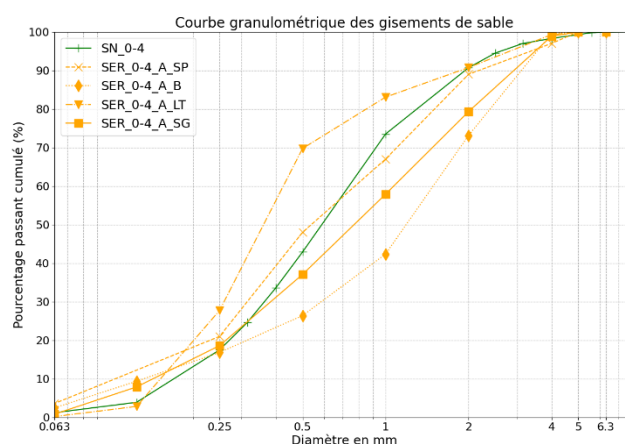


FIGURE 3. Distribution granulométrique des différents types de sable

Les valeurs du module de finesse pour les divers types de sable ont montré que les sables de SER_A_B et SER_A_SG, suggèrent un sable plus grossier, tandis que les autres sables présentent des valeurs comprises entre 1,5 et 2,8, ce qui indique un sable de finesse moyenne.

Le pourcentage de fines est particulièrement important et peut avoir un impact significatif sur les propriétés du sable, telles que la demande en eau. Le sable d'excavation SER_0-4_A_LT présente un contenu en fines similaire à celui du sable naturel. Le sable d'excavation SER_0-4_A_B affiche le contenu en fines le plus élevé parmi diverses sources de sol. Selon le test d'équivalent de sable (norme NF EN 933-8), tous les sables ont été jugés adaptés à l'utilisation dans le béton. Les fines identifiées par le test d'équivalent de sable ne sont pas nécessairement de l'argile. Le test au bleu de méthylène (norme NF EN 933-9) est réalisé pour déterminer l'activité et de la quantité de la fraction argileuse du sable. Une réactivité suggère que ces fines soient en effet constituées d'argile. Les résultats indiquent que tous les sables sont conformes à la norme NF P 18-545, qui fixe une limite pour le test au bleu de méthylène à moins de 1,5. Cependant, SER_A_B dépasse cette limite avec une valeur de 1,77.

Le sable SER_0-4_A_LT a la masse volumique réelle la plus élevée et l'absorption d'eau la plus faible, et est relativement similaire au sable naturel. En revanche, le sable SER_0-4_A_B présente la masse volumique réelle la plus basse et l'absorption d'eau la plus élevée, atteignant jusqu'à 10 fois celle des granulats naturels. Ces résultats sont cohérents avec le pourcentage de fines dans les sables.

2. Relation entre l'absorption d'eau, la valeur de bleu de méthylène

Notre étude se penche sur l'interaction des variables influençant l'absorption d'eau (ABS) dans les échantillons de sable. Les analyses statistiques sont basées sur des régressions linéaires et réalisées par le biais du logiciel R studio à l'aide de la fonction `lm()` (pour Linear Model) utilisée pour ajuster des modèles de régression linéaire. La Valeur de bleu de méthylène (MB), indique la teneur en argile du sable, un facteur critique influençant l'absorption d'eau. La validation de l'estimation de la valeur de l'absorption d'eau est réalisée à l'aide de la fonction `lm`, et en s'appuyant sur une seule propriété prédictive, le bleu de méthylène "MB". Le modèle se formule comme suit :

$$ABS = -2,5661 + 7,7236 \times MB \quad (1)$$

La capacité du modèle à prédire la valeur est de 99% (coefficient de détermination R^2). L'écart-type des résidus, mesuré par la racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE), est d'environ 0,203 et sont calculées comme suit :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

Où $\hat{y}$ et $\bar{y}$ sont respectivement la valeur prédite et la valeur moyenne de la valeur mesurée y au i ème instant, et N représente le nombre de prédictions.

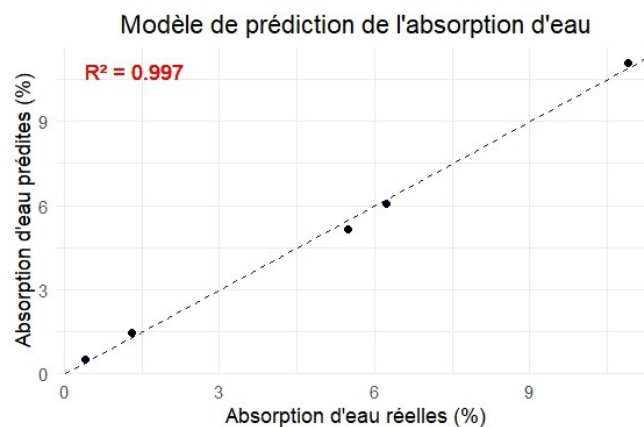


FIGURE 4. Valeurs prédites du modèle d'absorption d'eau par rapport aux valeurs réelles

B. Résultats du mortier à l'état frais

Les résultats des essais d'étalement des mortiers frais sont présentés dans la figure 5. Les observations d'étalement indiquent que l'état saturé du sable se caractérise par un étalement plus significatif, en comparaison avec les autres états, particulièrement pour les sables présentant un taux d'absorption élevé, Hung et al. [41] ont trouvé que l'utilisation du sable recyclé dans l'état SSS peut être considérée comme une solution efficace pour améliorer la consistance du mortier. Il est pertinent de noter que les mortiers formulés avec des sables à l'état naturel de stockage dépend étroitement de l'état de saturation du sable, qu'il soit sous-saturé ou sursaturé. En ce qui concerne l'état sec, on constate que l'étalement présente une tendance à maintenir sa valeur initiale à $T = 0$ min au fil du temps, avec un pourcentage de perte à $T = 30$ minutes entre 5 et 10 % alors que pour les autres états, la perte atteint 20 % à $T = 30$ minutes. La nature des fines affecte les propriétés d'étalement, surtout l'évolution avec le temps. Le sable SER_A_LT, ayant une valeur au bleu de 0.51 similaire au SN, présente une perte d'étalement à 30 min d'environ 10 % de façon similaire à la perte attribuée au mortier avec du SN. Tandis que les sables SER_A_SP, SER_A_SG et SER_A_B, ayant des valeurs au bleu de 1, 1,12 et 1,77 respectivement, présentent une perte de 15,22 %, 14,37 % et 20,16 % respectivement.

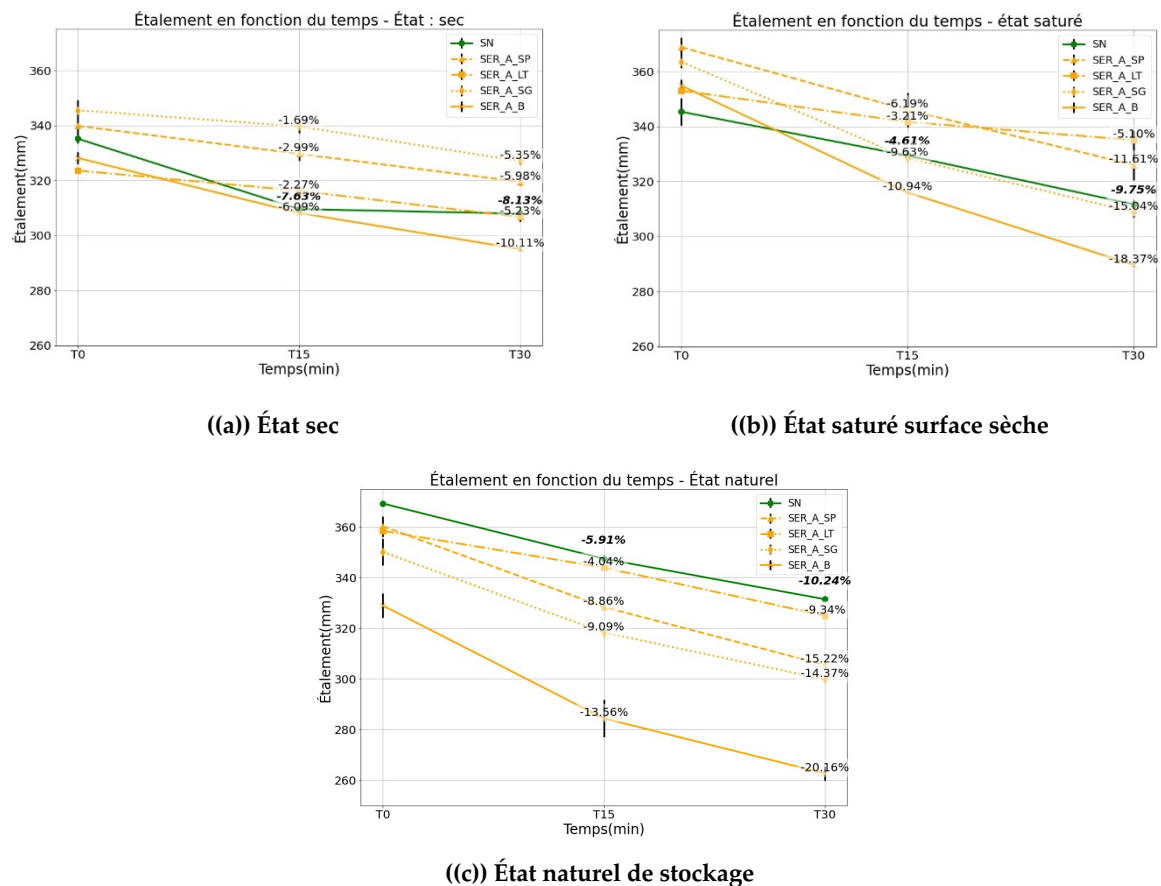


FIGURE 5. Variation de l'étalement pour chaque état hydrique pour les différents types de sable

1. Étude statistique des résultats à l'état frais

Les propriétés du sable influencent certainement les caractéristiques du mortier à l'état frais, telles que son étalement. Ainsi, selon les résultats, l'état de saturation et la quantité totale d'eau ajoutée pendant le malaxage ont un impact non négligeable. Dans cette section, nous explorons l'application de la régression linéaire (méthode statistique précisée dans la section III A. 1) pour comprendre l'effet de la substitution des sables naturels par des sables recyclés sur les valeurs d'étalement, en fonction des paramètres suivant : la valeur au bleu de méthylène du sable "MB", la porosité intergranulaire, la surface spécifique, rapport de l'eau ajoutée dans le mélange et l'eau efficace et l'état de saturation du sable (0 pour un état sec, 1 pour un état saturé, <1 état sous-saturé, >1 état sursaturé). Le choix des paramètres est fait après une étude tenant compte de plusieurs variables et en générant plusieurs modèles, le nombre de paramètres minime (de 9 à 5) et le R^2 sont pris en considération pour le choix du modèle. L'analyse des résultats de la régression linéaire présentés dans la figure 6 révèle que le modèle explique bien les variations de T_0 , avec un coefficient de détermination (R^2) de 80%. La valeur du RMSE (Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne), indiquant un écart-type moyen entre les valeurs prédites et les valeurs réelles du modèle, est de 6,28 mm. Cette mesure d'écart est considérée comme relativement acceptable, en tenant compte des écarts-types observés dans les essais expérimentaux d'étalement des différents mélanges avec un intervalle de [0,24 ; 7,36 mm], cet écart-type est déterminé en se basant sur trois mélanges effectués

pour une formulation identique. Cette cohérence entre les prédictions du modèle et les observations réelles suggère que la régression linéaire peut efficacement prédire T_0 en fonction des propriétés du sable ainsi que son état de saturation.

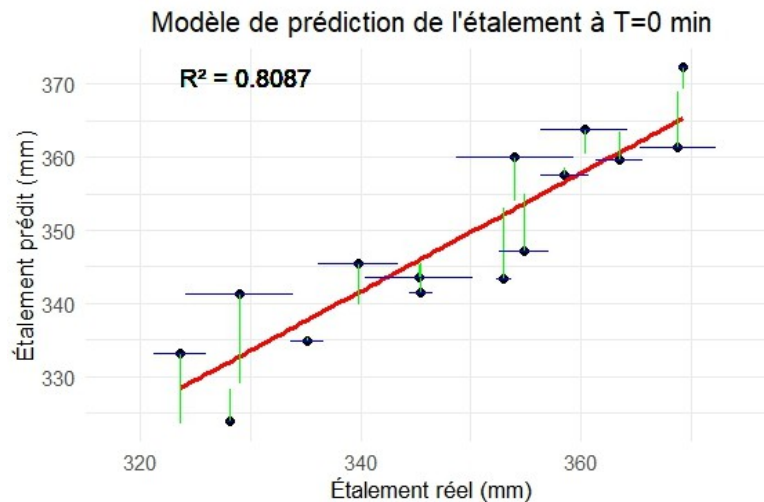


FIGURE 6. Valeurs prédites du modèle de l'étalement à T=0 min par rapport aux valeurs réelles

IV. CONCLUSION

Cette étude a examiné de manière approfondie les propriétés physiques des granulats de sable, fournissant une analyse détaillée de leurs caractéristiques et de leurs relations.

L'exploration de diverses propriétés, en tenant compte de la distribution granulométrique, la teneur en fines, l'absorption d'eau et la composition chimique, a révélé la nature variée de ces matériaux. La présence de fines et leurs propriétés ont influencé l'absorption d'eau, une plus grande quantité de fines étant corrélée à une absorption accrue.

La méthode du mortier du béton équivalent (MBE) a été utilisée pour évaluer le remplacement du sable naturel par du sable de terre d'excavation à hauteur de 30%. L'état hydrique des sables a été pris en compte. Cette étude a révélé l'importance de l'état de saturation du sable dans le contexte de l'étalement, en particulier pour les sables à fort taux d'absorption. L'approche de la régression linéaire apporte une contribution significative en fournissant un modèle statistique robuste. Les résultats indiquent que le modèle est capable d'expliquer efficacement les variations d'étalement en fonction de divers paramètres, avec des coefficients de détermination significatifs (80%) suggérant une perspective solide pour comprendre et anticiper l'étalement dans ce contexte spécifique.

Ces premiers résultats expérimentaux ont montré que les sables de sols excavés pouvaient être utilisés pour remplacer le sable de rivière lors de la production du mortier de béton autoplaçant, offrant ainsi une alternative écologique qui contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des déchets de BTP.

REFERENCES

- [1] « Vue d'ensemble - Déchets - Eurostat. » (), adresse : <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/waste> (visité le 15/05/2023).
- [2] « Chiffres-clés déchets Édition 2023 - L'infographie, » La librairie ADEME. ().
- [3] A. Geldron, P. Galio, R. Galin, D. Nicklaus et M. Gauvain, « Le service de l'observation et des statistiques (SOeS), »
- [4] « Guide du commissariat général du développement durable (CGDD) de janvier 2018. » ().
- [5] « GRANULATS : PARUTION DES CHIFFRES CLÉS 2019 | UNICEM. » (), adresse : <https://www.unicem.fr/2021/12/03/granulats-parution-des-chiffres-cles-2019/>.
- [6] Source Étude CERA (Cellule Économique de La Région Rhône-Alpes) -, 2012-2014.
- [7] V. W. Tam, C. Tam et Y. Wang, « Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, » *Construction and Building Materials*, t. 21, no 10, p. 1928-1939, oct. 2007, issn : 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.040.
- [8] H. K. A. Al-Bayayi, P. K. Das, S. L. Tighe et H. Baaj, « Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, » *Construction and Building Materials*, t. 112, p. 284-298, juin 2016, issn : 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176.
- [9] T. Le, S. Rémond, G. Le Saouy et E. Garcia-Diaz, « Fresh behavior of mortar based on recycled sand – Influence of moisture condition, » *Construction and Building Materials*, t. 106, p. 35-42, mars 2016, issn : 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.071.
- [10] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, C. T. Tam et M. H. Zhang, « Effects of the Parent Concrete Properties and Crushing Procedure on the Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregates, » *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 25, no 12, p. 1795-1802, déc. 2013, issn : 0899-1561, 1943-5533. doi : 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000789.
- [11] J. Sivamani et N. T. Renganayhan, « Effect of fine recycled aggregate on the strength and durability properties of concrete modified through two-stage mixing approach, » *Environmental Science and Pollution Research*, 19 mai 2021, issn : 0944-1344, 1614-7499. doi : 10.1007/s11356-021-14420-5.
- [12] İ. B. Topçu et S. Şengel, « Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, » *Cement and Concrete Research*, t. 34, no 8, p. 1307-1312, août 2004, issn : 00088846. doi : 10.1016/j.cemconres.2003.12.019.
- [13] D. Mayias, J. de Briyo, A. Rosa et D. Pedro, « Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers, » *Construction and Building Materials*, t. 44, p. 101-109, juill. 2013, issn : 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011.
- [14] I. Nováková et K. Mikulica, « Properties of Concrete with Partial Replacement of Natural Aggregate by Recycled Concrete Aggregates from Precast Production, » *Procedia Engineering*, t. 151, p. 360-367, 2016, issn : 18777058. doi : 10.1016/j.proeng.2016.07.387.

- [15] L. Señas, C. Priano et S. Marfil, « Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes, » *Construction and Building Materials*, t. 113, p. 498-505, juin 2016, issn : 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.079.
- [16] Z. el abidine TAHAR, Adrien BOUVET et E.-H. KADRI, « Etude de l'influence Des Granulats Recyclés Sur Le Comportement Des Bétons, »
- [17] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhayyacharyya et S. V. Barai, « Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, » *Materials and Structures*, t. 44, no 1, p. 205-220, jan. 2011, issn : 1359-5997, 1871-6873. doi : 10.1617/s11527-010-9620-x.
- [18] M. Eyxeberria, E. Vázquez, A. Marí et M. Barra, « Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, » *Cement and Concrete Research*, t. 37, no 5, p. 735-742, 1er mai 2007, issn : 0008-8846. doi : 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [19] M. Nedeljković, J. Visser, B. Šavija, S. Valcke et E. Schlangen, « Use of fine recycled concrete aggregates in concrete : A critical review, » *Journal of Building Engineering*, t. 38, p. 102 196, juin 2021, issn : 23527102. doi : 10.1016/j.jobbe.2021.102196.
- [20] D. Carro-López, B. González-Fonyeboa, F. Maryínez-Abella, I. González-Taboada, J. De Briyo et F. Varela-Puga, « Proportioning, Microstructure and Fresh Properties of Self-compacting Concrete with Recycled Sand, » *Procedia Engineering*, t. 171, p. 645-657, 2017, issn : 18777058. doi : 10.1016/j.proeng.2017.01.401.
- [21] B. Layachi, M. Laureny, N. Van-Minh et M. Houria, « Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé, » t. 34, no 1, 2016.
- [22] W. Xiong, H. Zhu, J. Xu, J. Ma et C. Luo, « Experimental investigation on physical and mechanical properties of excavated soil- and fine recycled concrete aggregate-based unfired clay bricks containing compound additives, » *Case Studies in Construction Materials*, t. 18, e02057, juill. 2023, issn : 22145095. doi : 10.1016/j.cscm.2023.e02057.
- [23] B. Wu et Y. Xiong, « Influence of sandstone sand manufactured by excavated waste on properties of cement mortar, » *Case Studies in Construction Materials*, t. 20, e02777, juill. 2024, issn : 22145095. doi : 10.1016/j.cscm.2023.e02777.
- [24] P. Priyadharshini, K. Ramamurthy et R. Robinson, « Excavated soil waste as fine aggregate in fly ash based geopolymer mortar, » *Applied Clay Science*, t. 146, p. 81-91, sept. 2017, issn : 01691317. doi : 10.1016/j.clay.2017.05.038.

- [25] P. PriyAdharshIni, K. RAMAMUrYhy et R. ROBINson, « Sustainable reuse of excavation soil in cementitious composites, » *Journal of Cleaner Production*, t. 176, p. 999-1011, mars 2018, Issn : 09596526. doi : 10.1016/j.jclepro.2017.11.256.
- [26] L.-l. GUAn, Y.-g. ChEn, W.-m. YE, D.-b. WU et Y.-f. DEnG, « Foamed concrete utilizing excavated soil and fly ash for urban underground space backfilling : Physical properties, mechanical properties, and microstructure, » *Tunnelling and Underground Space Technology*, t. 134, p. 104 995, avr. 2023, Issn : 08867798. doi : 10.1016/j.tust.2023.104995.
- [27] E. GhorBEL et M. NOUALI, « Characterization of tunnel excavated earth-based mortars for rammed earth repair, » *E3S Web of Conferences*, t. 353, R. ABsi et I. EL ABBAssi, éd., p. 01 001, 2022, Issn : 2267-1242. doi : 10.1051/e3sconf/202235301001.
- [28] WU Bo, CAO HUIxUAN, Lin Lang, ZhAng TAO et ZhAng HUIYIng, « Experimental Study on Mechanical Behaviors of Cement Mortar Containing Excavated Soil, » *J. South China Univ. Technol. (Nat. Sci. Ed.)* 48 (5) (2020) 1–8,
- [29] T. HUAng, S. KOU, C. WU, W. Tang et F. Xing, « Comparison of the Use of Excavated Soil Recycled Fine Aggregate as a Substitute for River Sand in Mortar Mixing, » SSRN, preprint, 2023. doi : 10.2139/ssrn.4665356.
- [30] A. S. BrAnd, J. R. ROESLER et A. SALAS, « Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete, » en, *Construction and Building Materials*, t. 79, p. 83-89, mars 2015, Issn : 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.047.
- [31] M. Cyr, M. MOUreY, F. CassAGnABErE et V. NgUYEn, « Evolution de la rhéologie du béton frais en fonction du pourcentage et de l'état de présaturation des granulats recyclés, et en fonction du malaxage, » fr.
- [32] A SchWArYZEnYrUBEReY et C CAYhErInE, « La mdthode du mortier de bdtou quivalent (MBE) - Un nouvel outil d'aide h la formulation des bdtou adjuvants, » *Materials and Structures*,
- [33] KHADRAOUI SaFa et GHRIB ChAhIndA, « NFLUENCE DU VOLUME DE PÂTE SUR LA PERFORMANCE RHÉOLOGIQUE DU BÉTON AUTOPLAÇANT ET LE MORTIER DE BÉTON ÉQUI- VALENT, » 2021.
- [34] NF EN 933-1. (2012). *Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 1 : Determination of Particle Size Distribution—Sieving Method.*
- [35] NF EN 1097-6. (2014). *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 6 : Determination of Particle Density and Water Absorption.*
- [36] NF EN 13139. (2003). *Aggregates for Mortar.*
- [37] NF EN 933-8 p A1. (2015). *Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 8 : Assessment of Fines—Sand Equivalent Test.*
- [38] NF EN 933-9+A1 - *Tests for Determining the Geometrical Properties of Aggregates - Part 9 : Assessment of Fines - Methylene Blue Test.*
- [39] NF EN 1235-60-2. (2010). *Testing Fresh Concrete—Part 2 : Slump Test.*

- [40] M. A. S. MOHAMED, E. GHORBEL et G. WARDÉH, « Valorization of Micro-Cellulose Fibers in Self-Compacting Concrete, » *Construction and Building Materials*, Special Issue on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5), t. 24, n° 12, p. 2473-2480, 1^{er} déc. 2010, Issn : 0950-0618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.009.
- [41] HUNG, P. T. BUI et T. L. K. LAI, « Influence of moisture states of recycled sand from construction sites on mechanical strengths of cement-based mortar, » *JOURNAL OF MATERIALS & CONSTRUCTION*, t. 13, n° 02, 02 14 nov. 2023, Issn : 2734-9438. doi : 10.54772/jomc.v13i02.590.