

# Optimisation de la formulation d'un béton autoplaçant destiné à la préfabrication des Produits Sur Mesure à base des granulats de sols excavés

Lara SAAD

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

*UMR 6183, GeM—Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), École Centrale de Nantes, Nantes Université, 44600 Saint-Nazaire, France*

**RESUME** La substitution des granulats naturels dans le béton par des matériaux alternatifs issus de déchets de construction est une approche prometteuse pour réduire l'impact environnemental de la construction. Les granulats issus des sols excavés restent encore peu explorés, contrairement aux granulats recyclés de béton, qui ont fait l'objet de nombreuses études. Cette étude explore l'incorporation des sables issus des déchets de sols excavés inertes dans un béton autoplaçant destiné à la préfabrication, tout en préservant ses propriétés rhéologiques et mécaniques, ainsi que sa durabilité. La méthodologie globale repose sur une approche mutli-échelle intégrant les différents niveaux : sable, pâte, mortier et béton. Une première étape consiste à caractériser la variabilité de plusieurs gisements de sables excavés et à évaluer leur impact sur les performances des mortiers de béton équivalent, en faisant varier les pourcentages de remplacement de sable. Ces résultats sont validés à l'échelle du béton. Une étude à l'échelle de la pâte a été réalisée pour étudier l'effet des fines de ces sables inférieur à 80 µm. Des corrélations sont établies entre les propriétés des sables, leur état de saturation, ainsi que les propriétés du mortier et celles du béton. Cette approche a permis de fixer des limites d'incorporation garantissant des performances robustes et conformes aux exigences de l'industrie de préfabrication.

**Mots-clefs** béton autoplaçant, sable de sol excavé, mortier de béton équivalent, préfabrication

## I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment et des travaux publics produit chaque année 224 Mt de déchets, constituant la principale source de déchets en France et faisant du pays le premier producteur de déchets de construction en Europe (Chiffres-clés déchets Édition 2023). L'excavation des sols génère une quantité considérable de déchets inertes, estimée à environ 150 Mt/an, tandis que la démolition de structures en béton représente environ 19 millions de tonnes par an.

D'autre part, la demande en granulats pour la production de béton représente 27% de la demande totale en France, estimée à 453 Mt/an, dont seuls 5,5% sont couverts par des granulats recyclés (Étude CERA, 2012). Un écart significatif dépend encore des matériaux vierges. Cet écart souligne l'importance d'intensifier l'utilisation de matériaux alternatifs dans le béton.

Les granulats, allant de 0,063 à 22 mm, représentent entre 60 et 75% du volume total du béton (SachinPrabhu et al., 2019). Il est crucial que les granulats soient propres, aient des propriétés

régulières et soient dépourvus de produits chimiques ou de contaminants qui pourraient affecter les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du béton (A.M. Neville, 2011).

Selon (Oshodi et al., 2020), de nombreuses études de recherche ont été menées sur les granulats de béton recyclé (GBR) pour étudier leur impact d'incorporation dans le béton. Le nombre total de publications sur ce sujet a atteint environ 2500 en 2020 (Oshodi et al., 2020). Néanmoins, l'utilisation de sable recyclé dérivé de déchets de bâtiments démolis dans le béton reste très limitée, en raison de sa porosité intrinsèque, sa tendance à la formation de microfissures et sa teneur élevée en particules fines (Al-Bayati et al., 2016; Tam et al., 2007). Le projet national PN Recybéton (2012-2018) a contribué à l'évolution de la norme NF EN 206/CN publiée en 2022, qui a fixé des nouvelles limites pour l'utilisation de ces GBR. Malgré que l'incorporation des gravillons recyclés est autorisé jusqu'à 40% pour les bétons des classes d'exposition XC1 et XC2, le sable recyclé est limité à 10% (article NA.5.1.3 granulats).

Bien que de nombreuses études aient été menées sur les GBR, les granulats dérivés de sols excavés sont relativement peu explorés dans la littérature. Les recherches existantes se concentrent principalement sur le mortier ou le béton ordinaire et n'ont pas encore abordé leur utilisation dans le contexte du béton autoplaçant (BAP). Les sols excavés présentent une teneur élevée en fines (<80  $\mu\text{m}$ ), caractérisée notamment par la présence d'argile, cette présence peut varier largement, par exemple de 7% (Wu and Xiong, 2024) à 64% (Priyadharshini et al., 2017). La présence excessive des fines et de l'argile entraîne une forte absorption d'eau dans les sols, pouvant varier de 10 à 35% (Ghorbel and Nouali, 2022; Guan et al., 2023; Xiong et al., 2023), bien plus élevée que celle des granulats naturels. Xu and Huang ont montré que la séparation des fines par le tamisage améliorerait les propriétés des granulats fins issus de sols excavés utilisés dans les mortiers, avec des performances optimales à 30 % de substitution, bien que la porosité et le retrait aient augmenté. Wu and Xiong, 2024 ont noté que le sol résiduel altéré de granite tamisé maintenait la maniabilité et la résistance dans les mortiers jusqu'à 30% de substitution. Guan et al., 2023 ont montré que l'utilisation de sols séchés à l'air et tamisés dans le béton mousse réduisait la maniabilité (15,79%) et la résistance à la compression (80,73%) lorsque la teneur en sol augmentait de 25 à 50%.

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. L'étude prend en considération différentes échelles telles que la pâte, le mortier et le béton. La méthode du mortier de béton équivalent est adoptée pour étudier l'effet de l'incorporation de sable d'excavation avec différents taux de remplacement sur les propriétés du mortier de béton autoplaçant. Ces résultats sont ensuite validés à l'échelle du béton, avec une étude complémentaire sur le comportement de la pâte en présence des fines des sables. Enfin, des essais de validation industrielle seront réalisés pour la production des éléments en préfabrication. Cette méthodologie permet de définir des limites d'incorporation adaptée aux propriétés distinctes des sables.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux et formulations

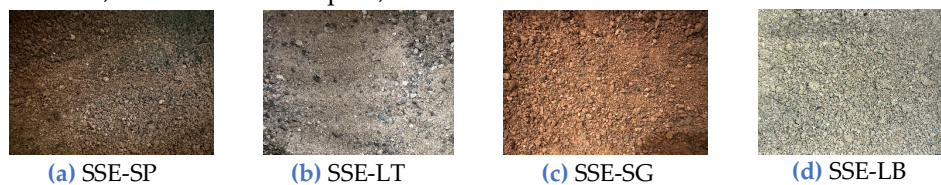
Le béton de référence est fabriqué à base d'un ciment Portland CEM I 52.5 R CE CPE NF (Lafarge, France) d'une masse volumique de 3,13  $\text{g}/\text{cm}^3$  et d'une surface spécifique de 4815  $\text{cm}^2/\text{g}$ , complété

par un filler calcaire (FACO, France) d'une masse volumique de 2,7 g/cm<sup>3</sup> et d'une surface spécifique de 4050 cm<sup>2</sup>/g. Les adjuvants comprennent un superplastifiant (MasterGlenium ACE 550) et un accélérateur de prise (MasterX-SEED 100), fournis par Master Builders Solutions, BASF France, pour répondre aux exigences du béton autoplaçant et de l'industrie de préfabrication. Cette formulation est basée sur des sables alluvionnaires naturels (SN) (0-4 mm) provenant de gisements du Pliocène dans la région des Pays de la Loire et des graviers de carrière SOCMA de classe 11/22 mm. Les rapports des paramètres clés de la formulation sont présentés dans le **TABLEAU 1** (Rapport eau efficace sur ciment, eau efficace sur liant et gravillons sur sable).

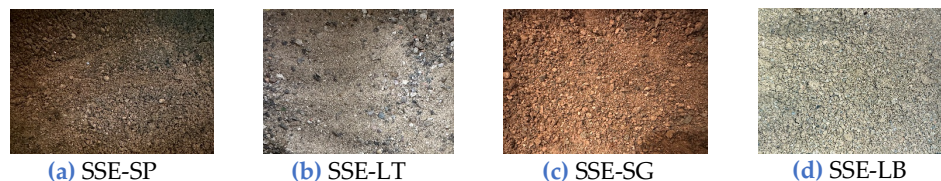
**TABLEAU 1.** Formulation du béton de référence

	Efficace/C	Efficace/Liant	G/S
Paramètres clés	0,56	0,334	1,16

L'étude a porté sur quatre sables obtenus à partir de sols excavés (SSE) sur différents sites : Saint-Prouant, Le Boupère, Saint-Germain et La Tranche-sur-Mer (



**FIGURE 1.** Ces sables ont été récupérés auprès de la société AlainTP, après avoir subi un traitement par immersion, centrifugation et sédimentation, afin de réduire les teneurs en argile et en chaux (Alain TP).



**FIGURE 1.** Gisements de sable de sols excavés – AlainTP

### B. Plan expérimental

La première phase est consacrée à la détermination des propriétés des sables de sols excavés. Les essais réalisés comprennent plusieurs essais normalisés sur des granulats ou adaptés en fonction de la nature des granulats : granulométrie par tamisage (NF EN 933-1), masse volumique réelle et apparente (NF EN 1097-6 et NF EN 1097-3), absorption d'eau à 24 heures (NF EN 1097-6), qualification et nature des fines (NF EN 933-8 et NF EN 933-9) et teneur en chlorures, sulfates et alcalins solubles (NF EN 1744-1 et NF P18-544).

Considérant que l'étude se focalise sur la partie sable du béton, la méthode de mortier de béton équivalent (MBE) (A. Schwartztruber et C. Catherine) a été adopté afin d'étudier l'effet de l'incorporation de différents pourcentages de sables sur les propriétés rhéologiques du mortier tel que l'étalement, ainsi que les propriétés mécaniques, comme la résistance à la compression et de flexion. Le calcul des MBE implique le remplacement des gravillons (diamètre supérieur à 4 mm) par du sable ayant une surface spécifique équivalente à celle des gravillons.

21 mélanges granulaires de différentes propriétés sont obtenus en variant les pourcentages de remplacement volumique de sable : 10, 30, 50, 75 et 100% afin d'étudier leur effet sur les propriétés du mortier (M-SSE-Y-X%) où Y est la référence du sable (SP, LT, SG, LB) et X le taux de remplacement. Les sables sont introduits à l'état sec. L'eau totale ajoutée a été ajustée en fonction de l'absorption d'eau des différents sables afin de maintenir un rapport  $E_{efficace}/C$  fixe. A la suite de cette étude expérimentale, des modèles statistiques ont été élaborés pour tenir compte de l'impact des propriétés du sable, et de son pourcentage sur l'étalement du mortier à l'état frais, ainsi que sur sa résistance à la flexion et à la compression à l'état durci. Cette étude est réalisée en utilisant le langage R dans le logiciel R Studio (version 4.3.2, 2023), en employant la fonction de modèle de régression linéaire, par la méthode de moindre carrée ordinaire. Ces modèles visent à prédire les propriétés du mortier à partir des propriétés du sable et son état hydrique.

Une validation des résultats obtenus à l'échelle du mortier a été menée à l'échelle du béton. Huit formulations de béton à base de SSE ont été choisies en tenant compte de la variation de l'étalement observée pour le mortier et les quatre gisements de sable, en plus de la formulation de référence. Les propriétés rhéologiques et mécaniques de ces formulations ont été évaluées aussi. Pour établir les corrélations entre l'étalement du BAP et celui de son MBE, des tests de compacité ont été réalisés selon la méthode LCPC N°61 (De Larrard et al., 2004), permettant de calculer le volume et l'épaisseur de la pâte en excès selon méthode proposée par Kabagire et al. (2015) et, en appliquant respectivement les équations suivantes :

$$\gamma = \frac{\rho_{app}}{\rho_{granulats}}, \quad (1)$$

$$V_{CP} = \text{Volume}_{granulats > 80 \text{ microns}} \times (1 - \gamma) \quad (2)$$

$$V_{EP} = \text{Volume}_{p\hat{a}te} - V_{CP} \quad (3)$$

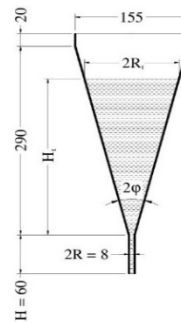
$$T_{EP} = \frac{V_{EP}}{CSSA_{>80 \mu m}} \quad (4)$$

avec  $\rho_{granulats}$  la masse volumique de la totalité des granulats (i.e. sable « S » et gravillons « G ») calculée à partir de la valeur de  $S/(S + G)$  les volumes de pâte compacte ( $V_{CP}$ ) et le volume de pâte en excès ( $V_{EP}$ ), ensuite l'épaisseur de la pâte en excès ( $T_{EP}$ ) la surface spécifique calculée des particules solides (Sable + Gravillons) d'un diamètre supérieur à 80  $\mu m$  ( $CSSA_{>80 \mu m}$ ).

Les modèles statistiques établis entre les propriétés du mortier et du béton ont permis d'établir des relations directes entre les propriétés différentes des SSE et celle du béton directement. Des limites de pourcentage d'incorporation ont été fixées pour garantir des performances mécaniques robustes et conformes aux exigences de l'industrie de la préfabrication.

Afin d'assurer des propriétés rhéologiques autoplaçantes à l'échelle du béton (étalement, ségrégation statique et dynamique, évaluées respectivement par les essais L-box et stabilité au tamis), une étude a été réalisée à l'échelle de la pâte. Cette démarche tient compte de l'état de saturation naturel des sables ainsi que de l'influence marquée des fines, en particulier celles à caractère argileux, sur la demande en adjuvants. Les particules de sables inférieur à 80 microns ont été intégrées avec la pâte formée du ciment, filler calcaire et superplastifiant. Pour cette phase, la demande en eau de la pâte et les fines des sables a été étudié par l'essai de consistance normalisée suivant la norme NF EN 196-3 (FIGURE 2(a)). Ainsi, le temps d'écoulement au cône de Marsh a été

évalué (De LARRARD et al.), et la teneur en adjuvants a été ajustée afin d'avoir un écoulement similaire de celle de la pâte de référence. Les dimensions du cône de Marsh utilisées sont présentées dans la [FIGURE 2](#) Erreur ! Source du renvoi introuvable.(b), (Nguyen, 2007).



(a) Essai de consistance normalisée (b) Dimensions en mm du cône de Marsh (Nguyen, 2007)

**FIGURE 2.** Essais réalisés à l'échelle de la pâte

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

#### A. Propriétés des gisements de sable

Les résultats de caractérisation des gisements de SSE ont montré une variation sur leurs propriétés (Saad et al., 2025). Le test au bleu de méthylène (NF EN 933-9) a révélé la nature argileuse des sables SSE-LB, SSE-SG et SSE-SP, avec des valeurs respectives de 1,77, 1,12 et 1 mg/g, nettement supérieures à celle du sable naturel (0-4). Le sable SSE-LT a présenté une valeur de 0,52 mg/g proche de celle du sable naturel. Les absorptions d'eau à 24h (NF EN 1097-6) confirment cette tendance : 10,9%, 6,22% et 5,49% pour SSE-LB, SSE-SG et SSE-SP, contre 1,31% pour SSE-LT, également proche du sable naturel (0,4%). Une corrélation a été établie entre la valeur au bleu de méthylène et l'absorption d'eau, avec une précision prédictive atteignant 99%.

#### B. Comportement des mortiers à base des SSE

La variation de l'étalement des mortiers en fonction du taux de remplacement diffère selon la nature des sables étudiés ([FIGURE 3](#)). Avec les sables SSE-SG et SSE-SP, l'augmentation du taux de remplacement entraîne une augmentation de l'étalement. Ces sables, ayant une absorption d'eau de 6,22% et 5,49% respectivement, nécessitent un ajustement significatif de l'eau ajoutée lors du malaxage. Pour le sable SSE-LB, on observe que l'augmentation du taux de remplacement entraîne une diminution de l'étalement avec le temps. Par exemple, à l'issue du malaxage, les mélanges avec des taux de substitution élevés (75% et 100%) présentent un étalement initial supérieur à celui du mortier de référence. Cependant, cette tendance s'inverse rapidement : après 30 minutes, ces mélanges affichent une réduction significative de leur étalement par rapport à leur valeur initiale, avec une diminution d'environ 20% pour un taux de substitution de 75% et jusqu'à 40% pour un taux de 100%. Cette réduction est beaucoup plus marquée que celle observée pour les taux de substitution faibles. Ce phénomène est attribué à la teneur élevée en fines (6,84%) et à leur nature argileuse, caractérisée par une valeur au bleu de 1,77 mg/g, ainsi qu'à leur forte capacité d'absorption d'eau (10,9%). Ces propriétés amplifient la perte d'étalement au fil du temps, en

particulier pour les substitutions élevées, rendant les mélanges progressivement moins fluides. Les M-SSE-LT-X % présentent des étalements plus faibles que le M-SN, et cette diminution s'accroît avec l'augmentation du taux de remplacement. Le sable SSE-LT présente une absorption d'eau de 1,31%, impliquant ainsi un ajustement léger de l'eau totale de mélange.

Il est important de noter que ces résultats ont été obtenus avec des matériaux secs. L'eau d'ajout, censée compenser l'absorption, reste donc partiellement disponible dans la pâte, ce qui peut expliquer l'augmentation initiale de l'étalement. Cet effet pourrait ne pas se reproduire avec des sables à teneur en eau naturelle, car une partie de l'eau serait déjà piégée dans les grains. Ce paramètre sera pris en compte lors de la validation en conditions industrielles.

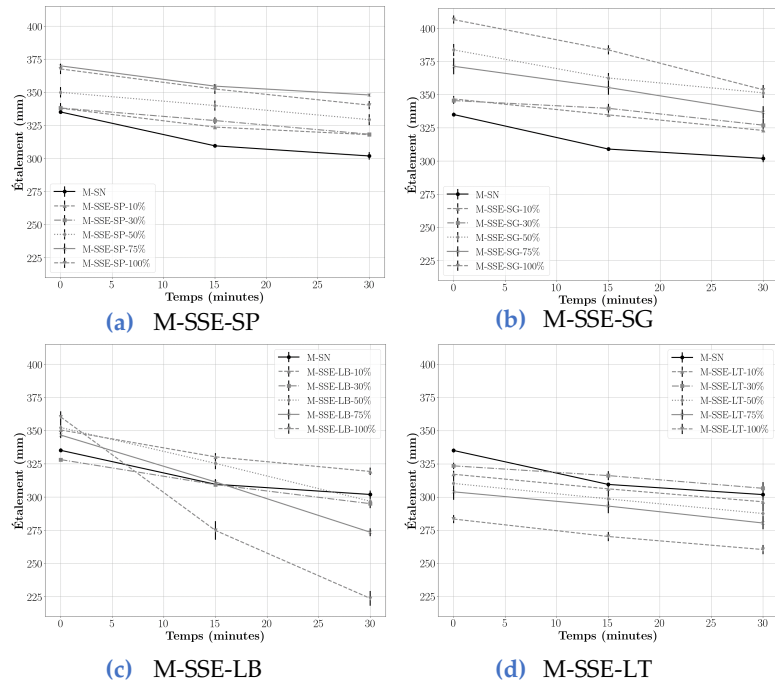


FIGURE 3. Variation de l'étalement en fonction du temps pour les 21 mélanges MBE

La FIGURE 4 illustre l'évolution de la résistance à la compression des MBE en fonction des taux de substitution des SSE. Un code couleur met en évidence, en rouge, les variations supérieures à 4 MPa, seuil considéré comme significatif au regard de la variabilité expérimentale (écarts types observés).

La résistance à la compression du M-SSE-LB-10% reste comparable à celle du mortier de référence. Une tendance similaire est observée pour le M-SSE-LB-30%, avec une diminution légèrement plus marquée à 14 et 28 jours. Au-delà de 30 % de substitution (50, 75 et 100%), la résistance diminue progressivement, avec une perte maximale de  $46 \pm 2\%$  pour 100 % de substitution, observée à 2, 7, 14 et 28 jours. À l'inverse, Le M-SSE-SP-10% présente une augmentation de la résistance à la compression dès 48 heures (+14%) par rapport au M-SN et cette amélioration se maintient avec le temps. Les résistances du M-SSE-SP-30% restent équivalentes à celles du M-SN, tandis qu'un remplacement à 50% entraîne une réduction acceptable. En revanche, des taux de 75% et 100% conduisent à une diminution de  $20 \pm 2\%$  à 2 jours. Les mortiers M-SSE-SG présentent des tendances similaires à celles des M-SSE-SP. Un remplacement jusqu'à 30% de SSE-LT génère une augmentation de la résistance de  $7 \pm 1\%$  par rapport au M-SN, tandis qu'un remplacement à 50% reste similaire et qu'à 75%, une légère diminution est observée mais reste acceptable.

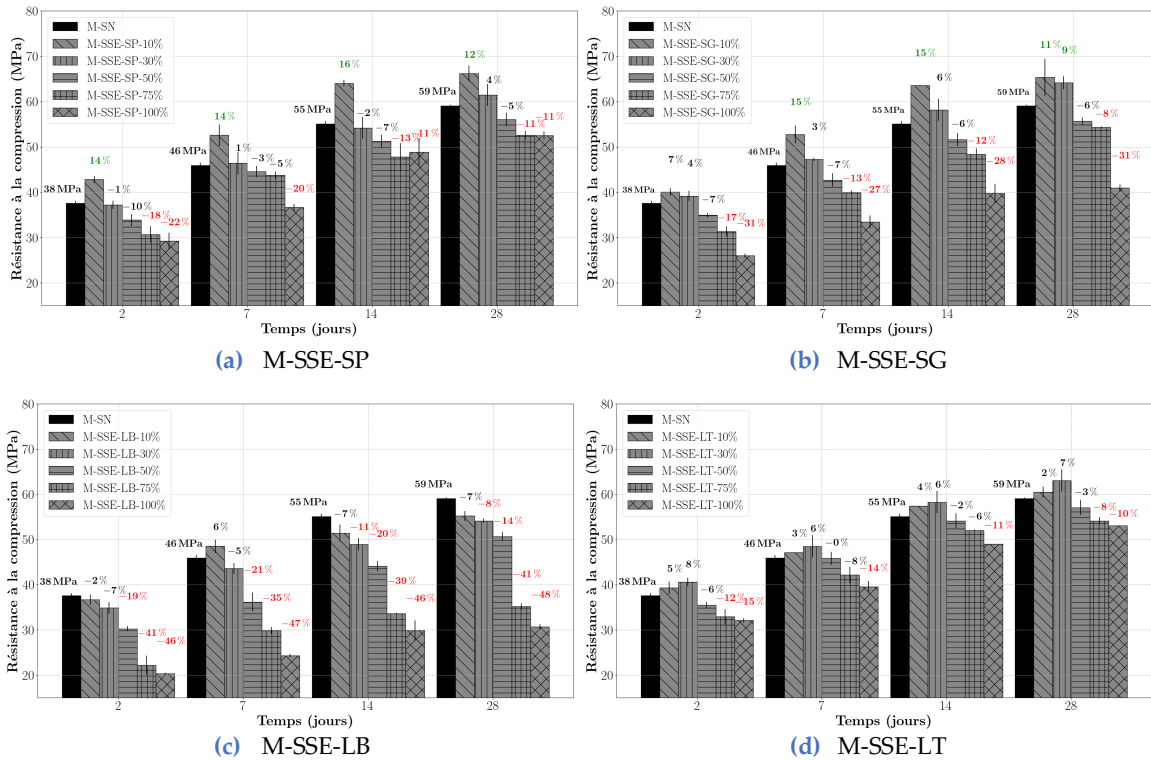


FIGURE 4. Variation de l'étalement en fonction du temps pour les 21 mélanges MBE

Pour approfondir notre compréhension des facteurs influençant l'étalement du mortier (SF), une analyse statistique a été réalisée à l'aide du langage R dans l'environnement R Studio. Cette analyse a modélisé l'étalement du mortier en fonction de plusieurs variables par régression linéaire (Eq. 5) : le temps « T » (0, 15 et 30 minutes), le pourcentage des fines « %F » (NF EN 933-1), la porosité intergranulaire « PI » (NF EN 1097-3) et le rapport d'eau totale ajoutée sur l'eau efficace «  $\frac{E_{ajoutée}}{E_{efficace}}$  ».

$$SF_{\text{mortier}} = 954,52 - 1,17 \times T - 40,77 \times \%F - 1564,81 \times PI + 126,64 \times \frac{E_{ajoutée}}{E_{efficace}} \quad (5)$$

La diminution de l'étalement avec le temps reflète une perte de fluidité due à l'absorption d'eau par les fines et à la thixotropie, en l'absence de remalaxage au fil du temps. Une porosité intergranulaire plus élevée réduit également l'étalement, car davantage de pâte est mobilisée pour combler les vides, limitant celle disponible pour fluidifier le mortier. Enfin, le coefficient positif du ratio  $\frac{E_{ajoutée}}{E_{efficace}}$  confirme que l'ajout d'eau augmente l'étalement.

Le modèle développé à partir de cette analyse (FIGURE 5(a)) a montré une corrélation significative entre ces variables et l'étalement du mortier, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 82%. Les résultats de l'analyse statistique ont indiqué des valeurs de p très significatives, notamment pour le modèle global, où  $p = 2,2e-16$ , bien inférieure au seuil de 0,05. L'erreur standard résiduelle du modèle, de 13 mm, est proche de l'écart-type maximal des valeurs expérimentales (10 mm), ce qui valide l'efficacité et la fiabilité du modèle développé.

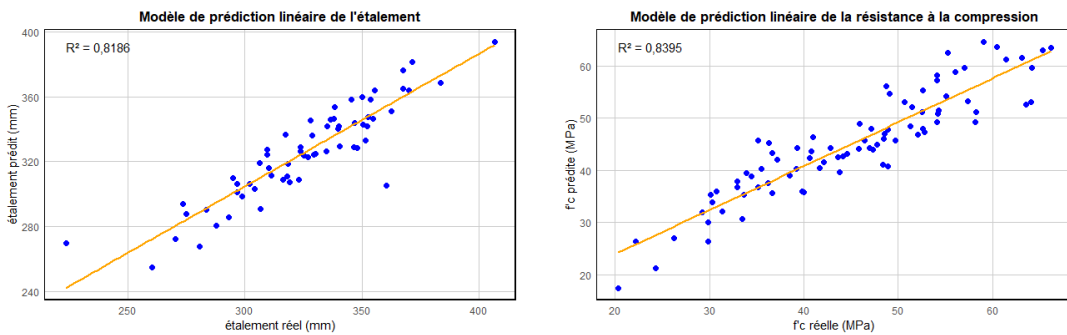
En parallèle, une analyse statistique est menée à l'état durci pour modéliser la résistance à la compression du mortier en fonction de plusieurs variables (Eq. 6) : le temps (2, 7, 14 et 28 jours), la

masse volumique apparente «  $\rho_{app}$  » (NF EN 1097-6), la porosité intergranulaire, ainsi que la valeur au bleu de méthylène.

$$f'_{C_{mortier}} = 49,4 + 0,74 \times T + 0,02 \times \rho_{app} - 109,6 \times PI - 22,72 \times VB \quad (6)$$

Le modèle présenté dans la FIGURE 5(b) a un  $R^2$  de 84%. La p-value est inférieure à  $2,2e-16$ . L'erreur standard résiduelle entre les valeurs observées et celles prédites par le modèle est de 4,5 MPa. Ces résultats confirment que la porosité intergranulaire et la teneur en argiles sont des facteurs pénalisants pour la résistance mécanique, tandis que la masse volumique et le temps de cure y contribuent positivement.

Ces modèles permettent d'identifier les propriétés des sables impactant les propriétés du mortier à l'état frais et durci. Toutefois, ils restent valides dans les plages de caractéristiques des sables étudiés, et une variabilité plus large des propriétés serait nécessaire pour renforcer leur robustesse.



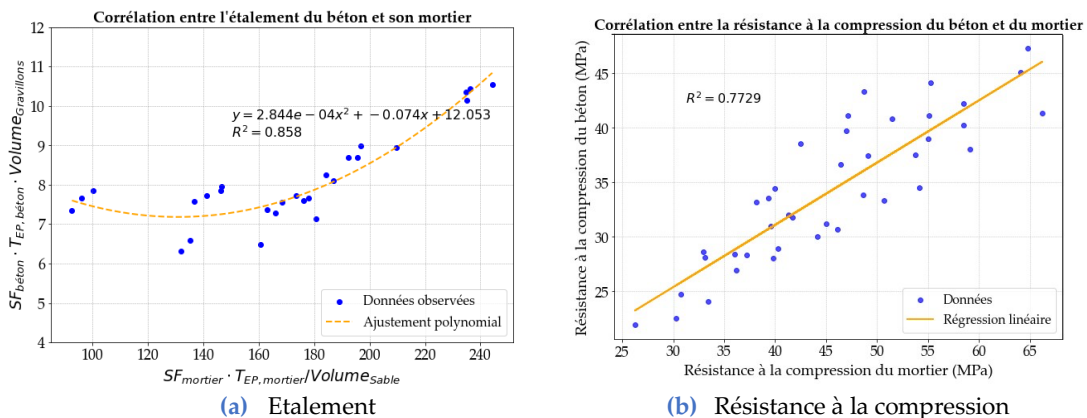
(a) Modèle prédictif - Etalement

(b) Modèle prédictif - Résistance à la compression

FIGURE 5. Modèle de régression linéaire de l'étalement et de la résistance à la compression des différents mélanges de mortiers

### C. Validation à l'échelle du béton

La FIGURE 6(a) présente une bonne corrélation entre l'étalement du mortier et du béton avec un  $R^2$  de 85,8% après la prise en considération de l'épaisseur de la pâte en excès.



(a) Etalement

(b) Résistance à la compression

FIGURE 6. Relation entre les propriétés du BAP et de son MBE

La corrélation entre la résistance à la compression du béton et celle du mortier a été établie (FIGURE 6(b)). Les résultats montrent une relation linéaire décrite par l'équation de régression  $f'c$  (béton) =

$0,744 \times f'c(\text{mortier})$  et un  $R^2 = 77\%$ . L'analyse des erreurs indique une erreur moyenne de 3,65 MPa, cette erreur est jugée acceptable puisqu'elle reste inférieure à 4 MPa (EN NF 206+A2).

Après l'établissement de ces corrélations, il a été montré qu'un remplacement à 100% par le SSE-LT, 50% SSE-SP et 50% SSE-SG, ainsi que 30% SSE-LB, pourrait fournir des résistances à la compression respectant le cahier des charges des bétons de préfabrication. Ces résultats ont été validés expérimentalement sur le béton, confirmant ainsi leur applicabilité. Les essais réalisés à l'échelle de la pâte ont permis de déterminer la quantité d'adjuvant nécessaire pour obtenir des propriétés rhéologiques adaptées aux bétons autoplaçants. Des ajustements ont été réalisés afin d'optimiser la formulation.

#### IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a démontré que la substitution partielle ou totale de sable naturel par des sables de sols excavés dans la formulation de bétons autoplaçants est une solution prometteuse pour réduire l'impact environnemental de la construction, tout en s'adaptant aux propriétés spécifiques du sable utilisé pour maintenir des performances mécaniques et rhéologiques conformes aux exigences de l'industrie :

- Les sables issus des sols excavés ont montré une variabilité significative dans leurs propriétés.
- Cette variabilité est observée à l'échelle du mortier et du béton, où le comportement du béton diffère en fonction des gisements. Certains sables peuvent remplacer totalement le sable naturel, tandis que d'autres présentent des limites d'incorporation.
- La corrélation établie entre les propriétés des sables, des mortiers et des bétons permet de prédire efficacement les performances du matériau final.

En perspective, des vérifications à l'échelle du chantier seront effectuées pour évaluer la faisabilité des procédés dans des conditions réelles. Des pièces en béton seront produites dans des conditions de chantier habituelles et soumises aux différentes étapes de fabrication, notamment le retournement, le transport, le levage et le montage sur le chantier, afin de valider leur performance et leur conformité aux exigences techniques. Parallèlement, une étude de durabilité sera menée sur les formulations de béton en adoptant une approche performantielle (Gilles ESCADEILLAS et al., 2023). Plusieurs essais seront réalisés pour analyser des paramètres spécifiques tels que la carbonatation (EN V2), la porosité et l'absorption capillaire (NF P18-459 et NF EN 13057), la perméabilité aux gaz (XP P18-463) et le coefficient de migration des chlorures (XP P18-462 et EN 12390-18).

Par ailleurs, il serait intéressant d'appliquer la méthodologie sur d'autres gisements de sables excavés afin d'élargir la gamme des matériaux utilisables dans la formulation des bétons autoplaçants. L'analyse de la variabilité d'autres gisements de sables de sols excavés permettra de renforcer les modèles de prédiction et de capitaliser sur ces données pour développer et appliquer des modèles basés sur l'intelligence artificielle. Par ailleurs, l'utilisation des gravillons issus de sols excavés pourrait ouvrir ainsi de nouvelles opportunités pour valoriser ces matériaux.

## REFERENCES

- A M Neville, 2011. *Properties of Concrete*. Pearson (October 28, 2011) © 2012.
- A Schwartzentruberet, C Catherine, n.d. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Materials and Structures*.
- Al-Bayati, H.K.A., Das, P.K., Tighe, S.L., Baaj, H., 2016. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 112, 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176>
- Chiffres-clés déchets Édition 2023 - L'infographie [WWW Document], n.d. . La librairie ADEME. URL <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6546-chiffres-cles-dechets-edition-2023-l-infographie.html>
- de LARRARD, F., Bosc, F., Catherine, C., Deflorenne, F., n.d. La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances.
- Ghorbel, E., Nouali, M., 2022. Characterization of tunnel excavated earth-based mortars for rammed earth repair. *E3S Web Conf.* 353, 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235301001>
- Gilles ESCADEILLAS, Didier BRAZILLIER, François CUSSIGH, 2023. Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton, EYROLLES. ed.
- Guan, L., Chen, Y., Ye, W., Wu, D., Deng, Y., 2023. Foamed concrete utilizing excavated soil and fly ash for urban underground space backfilling: Physical properties, mechanical properties, and microstructure. *Tunnelling and Underground Space Technology* 134, 104995. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.104995>
- Kabagire, D., Diederich, P., Yahia, A., 2015. New insight into the equivalent concrete mortar approach for self-consolidating concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 4, 215–224. <https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1018983>
- Nguyen, V.H., 2007. Influence du comportement rhéologique des coulis cimentaires sur leur écoulement au cône de Marsh.
- Oshodi, O.S., Awuzie, B.O., Akotia, J., Ademiloye, A.S., Ngowi, A., 2020. A bibliometric analysis of recycled concrete research (1978–2019). *BEPAM* 10, 725–736. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-01-2020-0009>
- Priyadharshini, P., Ramamurthy, K., Robinson, R.G., 2017. Excavated soil waste as fine aggregate in fly ash based geopolymer mortar. *Applied Clay Science* 146, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.038>
- Saad, L., Nouri, M., Tahlaiti, M., Khelidj, A., Fruchet, J., Suraneni, P., 2025. Analysis of the Influence of Excavated Soil Sand Characteristics on the Rheological and Mechanical Properties of Hydraulic Mortars. *Buildings* 15, 353. <https://doi.org/10.3390/buildings15030353>
- SachinPrabhu, P., Nishaant, H.A., Anand, T., 2019. Behaviour of Self-Compacting Concrete with Cement Replacement Materials.
- Source étude CERA (Cellule économique de la région Rhône-Alpes) -, 2012.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Wang, Y., 2007. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials* 21, 1928–1939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.040>
- Traitement des déchets et recyclage en Vendée | Alain TP [WWW Document], n.d. URL <https://www.alaintp.fr/gestion-dechets-saint-prouant>
- Wu, B., Xiong, Y., 2024. Influence of sandstone sand manufactured by excavated waste on properties of cement mortar. *Case Studies in Construction Materials* 20, e02777. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02777>
- Xiong, W., Zhu, H., Xu, J., Ma, J., Luo, C., 2023. 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* 18, e02057. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02057>
- Xu, R., Huang, T., 2024. Comparison of the Use of Excavated Soil Recycled Fine Aggregate as a Substitute for River Sand in Mortar Mixing. *Buildings* 14, 1917. <https://doi.org/10.3390/buildings14071917>