

Analyse comparative de l'incorporation de nanoparticules et de matériaux recyclés issus de la démolition dans les formulations de béton : étude de l'influence des sables standardisés et des sables naturels alluvionnaires

Daniel Lepadatu

Département de Génie civil
Faculté de Génie Civil et Installations de
Iasi, Université Technique Gheorghe
Asachi de Iasi, Roumanie
ORCID - 0000-0002-5411-0542

Loredana Judele

Département de Béton, Matériaux,
Technologie et Management, Faculté de
Génie Civil et Installations de Iasi,
Université Technique Gheorghe Asachi de
Iasi, Roumanie
ORCID - 0000-0002-5443-001X

Eduard Proaspat

Département de l'Ingénierie de
l'Infrastructures de Transports, Faculté de
l'Architecture et Urbanisme, Université
Technique de Moldavie, Chişinău,
République de Moldavie
ORCID - 0000-0003-4900-1154

Dana Roxana Bucur

Département Contrôle, expertise et
services, Faculté de Génie des Ressources
Animales et Alimentaires, l'Université de
Sciences de la Vie de Iasi, Roumanie,
ORCID - 0000-0002-5074-8872

Andrei Axinte

Département de Génie civil
Faculté de Génie Civil et Installations de
Iasi, Université Technique Gheorghe
Asachi de Iasi, Roumanie
ORCID - 0000-0003-1871-8427

Albina Eletchih

Département de l'Ingénierie de
l'Infrastructures de Transports, Faculté de
l'Architecture et Urbanisme, Université
Technique de Moldavie, Chişinău,
République de Moldavie
ORCID - 0000-0002-6960-3104

Pavel Ciubarca

Département de l'Ingénierie de
l'Infrastructures de transports, Faculté de
l'Architecture et Urbanisme, Université
Technique de Moldavie, Chişinău,
République de Moldavie
ORCID - 0000-0001-8406-9993

Abdessamad Kobi

Angevin Laboratory for Systems
Engineering Research Polytech Angers
LARIS,
University of Angers,
Angers, French
ORCID 0000-0003-4079-1989

Daniel Lepadatu

Département de l'Ingénierie de
l'Infrastructures de transports, Faculté de
l'Architecture et Urbanisme, Université
Technique de Moldavie, Chişinău,
République de Moldavie
ORCID - 0000-0002-5411-0542

Résumé— Cette étude analyse comparativement l'incorporation de nanoparticules – nano-silice en poudre et nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT) – ainsi que de matériaux recyclés issus de la démolition, dans différentes formulations de béton. L'accent est mis sur l'influence du type de sable employé : le sable poli-granulaire obtenu artificiellement, plus coûteux et difficile à produire, est comparé au sable naturel alluvionnaire, directement issu des dépôts fluviaux et plus accessible mais moins homogène.

Les résultats révèlent que la nano-silice et les MWCNT améliorent significativement la compacité de la matrice cimentaire, réduisent la porosité et accélèrent les réactions d'hydratation, conférant au béton une résistance et une durabilité accrues. Lorsque ces nanoparticules sont associées au sable poli-granulaire artificiel, les performances sont nettement supérieures : la granulométrie optimisée favorise une meilleure compaction et limite les vides capillaires. Bien que ce sable soit plus onéreux, ses avantages structuraux justifient son emploi dans des formulations avancées.

En revanche, l'usage du sable alluvionnaire, bien que plus économique, introduit une variabilité qui réduit légèrement l'efficacité des ajouts nanométriques. Enfin, l'incorporation de matériaux recyclés tend à abaisser la résistance initiale, mais cette baisse est largement compensée par la synergie entre nano-silice, MWCNT et sable poli-granulaire.

En conclusion, l'association de nanoparticules et de sable poli-granulaire artificiel constitue une solution optimale pour développer des bétons innovants, performants et durables.

Mots-clés— nanotubes de carbone, nano-silice, béton recycle, eco-matériau, caractéristiques mécaniques, sable poli-granulaire

I. INTRODUCTION

La construction durable impose aujourd'hui de repenser les formulations traditionnelles du béton en intégrant des approches innovantes visant à améliorer ses performances tout en réduisant son impact environnemental. Dans ce contexte, deux axes de recherche se distinguent : d'une part, l'utilisation de nanoparticules [1-4] telles que la nano-silice et les

nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT), capables de modifier la microstructure de la matrice cimentaire ; d'autre part, la valorisation de matériaux recyclés issus de la démolition, contribuant à une économie circulaire dans le secteur du bâtiment.

Un autre facteur essentiel concerne le choix des sables, dont la granulométrie influence directement la compacité, la porosité et, par conséquent, les propriétés mécaniques et durables du béton. Deux types principaux sont généralement considérés : le sable alluvionnaire naturel, largement disponible mais hétérogène, et le sable poli-granulaire obtenu artificiellement, plus coûteux mais présentant une granulométrie optimisée.

L'étude proposée vise ainsi à analyser l'effet combiné de l'incorporation de nanoparticules (nano-silice et MWCNT), de matériaux recyclés et du type de sable employé, afin d'identifier les conditions optimales pour la production de bétons à hautes performances et à faible empreinte environnementale.

Plusieurs études récentes ont également examiné l'utilisation de déchets et de matériaux recyclés dans le béton afin d'améliorer ses performances mécaniques et environnementales [5].

Malgré les progrès récents dans l'utilisation des nanoparticules et des matériaux recyclés dans le béton, peu d'études ont analysé simultanément l'effet combiné de nanoparticules (nano-silice et nanotubes de carbone) et de granulats issus de déchets de démolition, en tenant compte également de l'influence du type de sable utilisé.

La présente étude vise ainsi à combler cette lacune en proposant une analyse comparative entre sable naturel alluvionnaire et sable standardisé poly-granulaire. Cette approche permet d'identifier les conditions optimales pour

améliorer les performances mécaniques et la durabilité des mortiers.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Introduction

Dans cette étude, l'objectif principal consiste à mettre en évidence les avantages liés à l'utilisation du sable standardisé, en comparaison avec le sable de rivière, dans la préparation des mortiers. L'intérêt de cette approche réside dans la garantie d'une meilleure reproductibilité et fiabilité des résultats expérimentaux. Par ailleurs, l'analyse s'attache également à évaluer l'influence de l'incorporation de nanoparticules dans la formulation du mortier, en vue d'optimiser ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

B. Poudre de nano-silice

L'optimisation des matériaux de construction constitue un enjeu central en génie civil. L'introduction de nanoparticules, et plus particulièrement de poudre de nano-silice [6], offre de nouvelles perspectives grâce à sa réactivité pouzzolanique et à son rôle dans l'affinement de la microstructure. Son incorporation dans les mortiers et bétons permet d'améliorer la compacité, la résistance mécanique et la durabilité.

La présente étude vise à analyser l'effet de la poudre de nano-silice dans des mortiers élaborés avec du sable standardisé, en comparaison avec le sable de rivière, afin d'évaluer son impact sur les propriétés physico-mécaniques et la performance globale du matériau.

C. Nanotubes de carbone multiparois

Le développement de nanomatériaux ouvre de nouvelles perspectives pour l'amélioration des propriétés des matériaux de construction [7, 8]. Les nanotubes de carbone [9] multiparois (MWCNTs) se distinguent par leur exceptionnelle résistance mécanique, leur rigidité et leur conductivité électrique et thermique. Incorporés dans les matrices cimentaires, ils favorisent le renforcement de la microstructure, améliorent la résistance à la fissuration et contribuent à accroître la durabilité des mortiers et bétons.

Cette étude s'attache à évaluer l'influence des MWCNTs sur les propriétés physico-mécaniques de mortiers élaborés avec du sable standardisé, en comparaison avec le sable de rivière, dans le but d'optimiser la performance globale du matériau pour des applications en génie civil.

D. Sable naturel ou de rivière

Le sable naturel, souvent appelé sable de rivière (Figure 1), est un matériau granulaire d'origine alluviale, extrait directement des lits ou des berges des cours d'eau. Il est largement utilisé dans la formulation des mortiers et bétons en raison de sa disponibilité locale et de son coût relativement faible. Toutefois, ses caractéristiques granulométriques et minéralogiques peuvent varier considérablement en fonction de la provenance, ce qui influence la qualité et la reproductibilité des matériaux obtenus. De plus, l'extraction intensive du sable de rivière soulève des problématiques environnementales, telles que l'érosion des berges et la perturbation des écosystèmes aquatiques. Ces limites justifient de plus en plus le recours à des alternatives comme le sable standardisé, permettant une meilleure maîtrise des propriétés mécaniques et une reproductibilité accrue des essais.

Quelques caractéristiques :

- Provient des lits de rivières, extrait naturellement.
- Grains arrondis, usés par l'eau.
- Granulométrie souvent plus uniforme.
- Moins d'adhérence à cause des grains lisses.



Fig. 1. Sable naturel ou de rivière.

E. Sable standardisé ou poly-granulaire

Le sable standardisé, également appelé sable poly-granulaire (Figure 2), est un matériau artificiellement préparé afin de respecter des courbes granulométriques normalisées et reproductibles. Contrairement au sable naturel de rivière, ses caractéristiques physico-granulométriques sont contrôlées, ce qui garantit une homogénéité et une constance dans la formulation des mortiers et bétons. Son utilisation est particulièrement privilégiée dans les essais de laboratoire et les recherches scientifiques, car elle permet de réduire les variations liées à la qualité des granulats et d'assurer la comparabilité des résultats expérimentaux. Ainsi, le sable standardisé constitue une référence indispensable pour l'évaluation fiable des performances mécaniques et durables des matériaux cimentaires.



Fig. 2. Sable standardisé ou poly-granulaire.

Quelques caractéristiques

- Mélange industriel ou naturel de grains de différentes tailles.
- Grains de formes variées (ronds, anguleux).
- Granulométrie hétérogène (multi-tailles).
- Meilleure adhérence grâce aux grains anguleux.

F. Les plans d'expériences de type TAGUCHI

Les plans d'expériences proposés par Genichi Taguchi [10] constituent une méthode efficace pour l'optimisation des

procédés [11] et l'amélioration de la qualité. Fondés sur l'utilisation de tableaux orthogonaux, ils permettent de réduire considérablement le nombre d'essais nécessaires tout en identifiant les facteurs influents et leurs interactions. Parmi ces plans, le plan L8, qui autorise l'étude simultanée de 7 facteurs en seulement 8 essais, illustre de manière exemplaire l'efficacité et la simplicité de la démarche Taguchi.

Avantages :

1. **Efficacité** : Le plan L8 permet d'évaluer les effets de plusieurs facteurs avec un nombre réduit d'expériences, ce qui économise du temps et des ressources.
2. **Orthogonalité** : Les facteurs sont équilibrés et orthogonaux, garantissant que les effets individuels peuvent être estimés sans confusion.
3. **Simplicité** : Il est facile à mettre en place et à analyser, même pour ceux qui ne sont pas experts en conception d'expériences.
4. **Robustesse** : Aide à identifier les facteurs qui ont le plus d'impacts sur la variabilité du système, permettant ainsi d'améliorer la robustesse du processus.

Inconvénients :

1. **Limitation des niveaux** : Le plan L8 est limité à 2 niveaux par facteur, ce qui peut ne pas être suffisant pour certaines études où plus de niveaux sont nécessaires.
2. **Interactions limitées** : Bien que le plan L8 puisse identifier les interactions entre les facteurs, il ne peut pas les étudier de manière approfondie - plans plus complexes.
3. **Taille limitée** : Adaptée pour un nombre limité de facteurs. Pour des études avec plus de facteurs, des plans plus larges comme L16, L32, etc., seraient nécessaires.
4. **Simplification excessive** : Peut parfois simplifier excessivement les problèmes complexes, ce qui pourrait entraîner une compréhension insuffisante des interactions plus complexes entre les facteurs.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Introduction

Les éprouvettes ont été soumises à un processus de durcissement d'une durée de 28 jours, réalisé dans des conditions optimales et conformément aux prescriptions de la norme européenne [12] (Fig. 3). À l'issue de cette période, une campagne d'essais a été conduite sur un ensemble de 24 échantillons, organisés en 8 séries de 3 éprouvettes, en vue de l'évaluation de la résistance à la traction par flexion (Y1) ainsi que de la résistance en compression (Y2). Les essais de traction par flexion ont été réalisés selon la norme EN 196-1, [12] à l'aide d'un dispositif de flexion en trois points appliqué sur des éprouvettes prismatiques. La charge maximale enregistrée lors de l'essai a permis de déterminer la résistance à la traction par flexion (Y1), tandis que les deux demi-prismes obtenus après rupture ont été utilisés pour les essais de compression afin de déterminer la résistance à la compression (Y2).

Les résultats obtenus sont consignés dans les Tableaux II et IV.



Fig. 3. Les éprouvettes en nano-béton.

B. Résultats pour le sable naturel ou de rivière - SR

Dans cette étude, huit formulations de mortier ont été analysées, élaborées de manière systématique selon la méthode de Taguchi à l'aide d'un plan orthogonal de type L8 (Tableau II). Ce plan expérimental a pris en compte sept paramètres variables : X1 (nanoparticules de silice), X2 (nanotubes de carbone), X3 (granulats issus de déchets de démolition), X4 (adjuvant plastifiant), X5 (ciment), X6 (eau) et X7 (fibres de polypropylène issues de déchets), chacun étant étudié à deux niveaux (Tableau I).

TABLE I. PARAMÈTRES ET NIVEAUX

Niveau	Paramètres - SR						
	X ₁ g	X ₂ g	X ₃ g	X ₄ ml	X ₅ g	X ₆ ml	X ₇ g
<i>Bas</i>	2	1	100	1.5	200	200	0.5
<i>Haut</i>	4	3	200	1.5	300	220	0.5

Les paramètres présentés dans le Tableau I représentent les facteurs expérimentaux retenus pour l'élaboration des différentes formulations de mortier. Ces paramètres ont été sélectionnés afin d'évaluer l'influence combinée des nanoparticules, des granulats recyclés et des conditions de formulation sur les propriétés mécaniques des matériaux étudiés.

Les niveaux « bas » et « haut » définissent les limites des valeurs expérimentales adoptées pour chaque facteur. Cette approche permet d'identifier les effets principaux des variables étudiées et d'optimiser la composition des mortiers dans le cadre du plan expérimental de type Taguchi.

TABLE II. PLAN D'EXPÉRIENCES DE TYPE TAGUCHI L8

No.	Paramètres /Facteurs							Réponse - SR	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	Y ₁	Y ₂
1	2	2	1	2	1	1	2	6,01	44,59
2	1	2	2	2	2	1	1	5,44	47,06
3	2	2	1	1	2	2	1	5,4	45,35
4	1	2	2	1	1	2	2	4,83	43,32
5	1	1	1	1	1	1	1	6,67	45,66
6	2	1	2	2	1	2	1	6,28	45,91
7	2	1	2	1	2	1	2	5,52	44,99
8	1	1	1	2	2	2	2	5,71	46,88

C. Les résultats pour le sable standardisé - SS ou poly-granulaire

Les mêmes notations et distributions des paramètres et résultats sont présentées dans les tableaux III et IV.

TABLE III. PARAMÈTRES ET NIVEAUX

Niveau	Paramètres - SS						
	X_1 g	X_2 g	X_3 g	X_4 ml	X_5 g	X_6 ml	X_7 g
Bas	2	1	100	1.5	250	125	0.5
Haut	4	3	200	2.5	350	175	0.5

TABLE IV. PLAN D'EXPÉRIENCES DE TYPE TAGUCHI L8

No.	Paramètres /Facteurs							Réponse - SS	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	Y_1	Y_2
1	2	2	1	2	1	1	2	8.2	60.8
2	1	2	2	2	2	1	1	7.36	52.1
3	2	2	1	1	2	2	1	6.66	38.6
4	1	2	2	1	1	2	2	7.4	53.2
5	1	1	1	1	1	1	1	7.12	54.8
6	2	1	2	2	1	2	1	7.93	54.6
7	2	1	2	1	2	1	2	7.95	54.1
8	1	1	1	2	2	2	2	7.91	53.2

D. Discussions

L'analyse comparative effectuée entre les deux types d'éprouvettes pour la résistance à la traction révèle une différence notable, atteignant jusqu'à 53 % dans le cas de la recette 4, et s'avérant minimale pour la recette 6. Cette variation significative met en évidence l'apport considérable de l'utilisation du sable normalisé, tant sur le plan de la performance mécanique que sur celui de la fiabilité des résultats expérimentaux. Il s'agit donc d'un avantage certain, qui justifie pleinement le recours à un matériau de référence dans les essais de caractérisation.

En ce qui concerne la résistance à la compression, on observe une tendance à l'augmentation similaire à celle relevée précédemment, mais de manière plus modérée. La valeur maximale, d'environ +36 %, est enregistrée pour l'éprouvette 1, dans laquelle les deux types de nanoparticules ont été incorporés aux dosages les plus élevés.

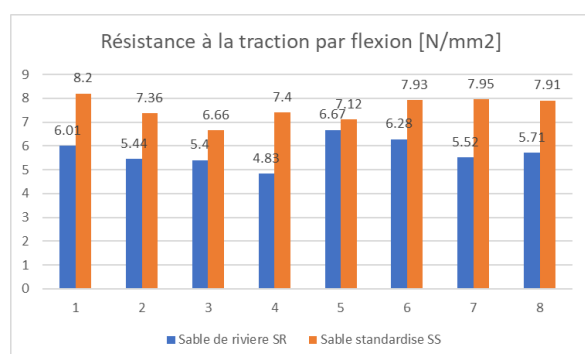


Fig. 4. Etude comparative pour les résistances à la traction par flexion

À l'inverse, la valeur minimale, d'environ -15 %, correspond à l'éprouvette 3, où le rapport eau/ciment n'était pas optimal, ce qui a entraîné une diminution notable des performances mécaniques.

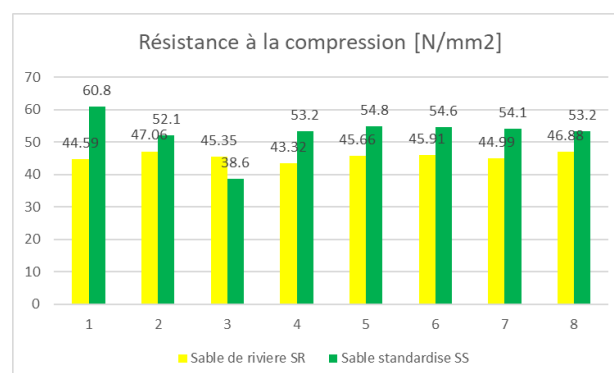


Fig. 5. Etude comparative pour les résistances en compression

Ces résultats confirment que l'effet bénéfique des nanoparticules est fortement conditionné par le rapport E/C et par la synergie entre les différents additifs. Une proportion équilibrée permet non seulement d'améliorer la compacité de la matrice cimentaire, mais aussi de limiter la formation de pores capillaires, ce qui se traduit par une augmentation progressive et durable de la résistance à la compression.

IV. CONCLUSIONS

L'étude a montré que l'utilisation du sable standardisé assure une meilleure reproductibilité des performances que le sable naturel alluvionnaire. L'incorporation de nanoparticules, notamment la nano-silice et les nanotubes de carbone, améliore la compacité de la matrice cimentaire et conduit à des gains significatifs en résistance mécanique, avec un maximum de +36 % observé lorsque les dosages sont optimisés. En revanche, un rapport eau/ciment inadéquat peut entraîner des baisses de performance allant jusqu'à -15 %. Ces résultats confirment que la combinaison judicieuse du type de sable, du rapport E/C et des nanoparticules constitue un levier essentiel pour le développement de bétons plus performants et durables.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'Agence universitaire de la Francophonie AUF¹ pour l'opportunité offerte, ayant permis de développer ce projet de recherche et de constituer une équipe internationale et pluridisciplinaire dont les travaux ont abouti à des résultats d'excellente qualité.

Les recherches concernant ce papier font partie du projet ECONANODERE² qui a été subventionné par AUF dans le cadre de l'appel - Soutien à la recherche scientifique francophone en Europe Centrale et Orientale – RESCI – ECO édition 2024.

RÉFÉRENCES

- [1] Suvasch Chandra Paul, Algurnon S. van Rooyen, Gideon P.A.G. van Zijl, Leslie Felicia Petrik, Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review, Construction and Building Materials, Volume 189, pp 1019-1034, 2018.

¹ <https://www.auf.org/>

² Méthodes modernes d'optimisation et de planification des essais expérimentaux des processus sous environnements contraints : application

aux bétons ÉCOlogiques obtenus à partir de mélanges des NANOparticules et additions de DÉchets REcyclable de bâtiments

- [2] Zhao, Z., Qi, T., Zhou, W., Hui, D., Xiao, C., Qi, J., Zheng, Z. & Zhao, Z. (2020). A review on the properties, reinforcing effects, and commercialization of nanomaterials for cement-based materials. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), pp 303-322.
- [3] Abhilash P. P., Dheeresh Kumar Nayak, Bhaskar Sangoju, Rajesh Kumar, Veerendra Kumar, Effect of nano-silica in concrete; a review, *Construction and Building Materials*, Volume 278, 2021, 122347.
- [4] Muhd Norhasri M.S., Hamidah M.S., Mohd Fadzil A, Applications of using nano material in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 133, pp 91-97, 2017.
- [5] Manan, A., Zhang, P., Majdi, A., Alattiyh, W., & Ahmad, J. Utilizing waste materials in concrete: a review on mechanical and sustainable performance. *Green Materials*, 1-18. 2025.
- [6] Adetukasi, A.O., Fadugba, O.G., Adebakin, I.H., Omokungbe, O. Strength characteristics of fibre-reinforced concrete containing nano-silica, *Materials Today: Proceedings*, Volume 38, Part 2, pp.584-589, 2021.
- [7] Lepadatu D., Judele L., Entuc I., Proaspat E., Sandulache G., Nanoparticles and recyclable waste in construction materials. from practical necessity to advanced solutions *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 24 (6.2), pp. 231 - 238, 2024.
- [8] Judele L., Lepadatu D., Antonescu I., Boboc A., Morariu D.I., Nanotechnology in concrete materials-a powerful macro-material influenced by its nano-properties, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 18 (6.1), pp. 331 – 338, 2018.
- [9] Wang Z., Bai E., Ren B., Du Y., Liu C., Mechanical properties and cross-scale synergistic modification mechanism of micro-nano carbon fiber modified concrete, *Materials Today Communications*, 41, art. no. 110401, 2024.
- [10] Taguchi, G. *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.
- [11] Uray, E.; Carbas, S.; Geem, Z.W.; Kim, S. Parameters Optimization of Taguchi Method Integrated Hybrid Harmony Search Algorithm for Engineering Design Problems. *Mathematics* 2022, 10, 327.
- [12] EN 196-1:2016 *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. European Committee for Standardization, Brussels.