

**INSTITUT DE RECHERCHE EN GEOPOLITIQUE ET
D'ETUDES STRATEGIQUES**

Revue
Intelligence Stratégique

Vol. 009, Numéro 024, Avril-Juin 2026

E-ISSN : 3006-5488, P-ISSN : 3006-547X

<https://doi.org/10.62912/JYFU3565>



Siège social : 292, avenue Mweka, Commune de Lingwala, Kinshasa, République
Démocratique du Congo.

Téléphone : +243 82 006 1696 ; 81 86 19 121; 89 7175 074

E-mail : felly.lukunga@revue-is.org, article@revue-is.org, info@revue-is.org ;

Internet : www.revue-is.org ; www.irges.org

Europe : 59, Rue du Rhône, 1204 Genève, Suisse, + 41 22 810 88 68, Chambre de
Commerce Suisse-RD Congo, info@ccsc.ch



Revue Intelligence Stratégique
Journal des publications scientifiques

Volume 9, numéro 24

Avril-Juin 2026

p-ISSN : 3006-547X ; e-ISSN : 3006-5488

<https://doi.org/10.62912/KJZM4416>

www.revue-is.org

INFLUENCE DE LA REDUCTION NANOMETRIQUE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES ET THERMO PHYSIQUES DU CALCAIRE CONGOLAIS

Tony DIATEZUA, Joseph CIMBELA, Gödel KINYOKA,

Tous trois du Département de Physique, Faculté des Sciences à l'Université Pédagogique Nationale
(UPN)/Kinshasa-RDC

Patrick NGOSSE

Département de Physique et de Sciences des Matériaux à l'Institut Supérieur Pédagogique et
Technique de Nguya/Sud-Ubangi (RDC)

RESUME

Dans le cadre de cette étude qui explore l'impact de la réduction nanométrique sur les propriétés mécaniques et thermophysiques d'échantillons de calcaire provenant de la République Démocratique du Congo. L'objectif principal est de comprendre les mécanismes fondamentaux par lesquels la modification de l'échelle des grains de calcaires du macrométrique au nanométrique, altère des propriétés cruciales telles que la microdureté, le module d'Young, la conductivité thermique et la capacité thermique. A travers cette étude, nous avons utilisé des méthodes de caractérisation avancées, incluant la diffraction des rayons X (DRX). Parmi les matériels utiles, la microscopie électronique à balayage (MED), la micro-indentation Vickers, et l'analyse thermogravimétrique (TGA) couplée à la calorimétrie différentielle à balayage (ainsi que la méthode du flash laser pour la conductivité thermique ont été utilisées.)

Mots-clés : Réduction nanométrique, Nanostructuration, Propriétés mécaniques, Propriétés thermophysiques, Calcaire Calcaire congolais.

ABSTRACT

This study explores the impact of nanoscale reduction on the mechanical and thermophysical properties of limestone samples from the Democratic Republic of the Congo. The primary objective is to understand the fundamental mechanisms by which changing the grain size of limestone from the macrometric to the nanometric scale alters crucial properties such as microhardness, Young's modulus, thermal conductivity, and heat capacity. Throughout this study, we employed advanced characterization methods, including X-ray diffraction (XRD). Among the techniques employed were scanning electron microscopy (SEM), Vickers microindentation, and thermogravimetric analysis (TGA) coupled with differential scanning calorimetry (DSC), as well as the laser flash method for thermal conductivity.

Keywords : *Nanoscale reduction, Nanostructuring, Mechanical properties, Thermophysical properties, Limestone, Congolese limestone.*

INTRODUCTION

Le calcaire, une roche sédimentaire majoritairement composée de carbonate de calcium (CaCO_3), est l'un des matériaux les plus abondants sur Terre, jouant un rôle crucial dans les cycles géochimiques et revêtant une importance économique considérable (M'Fere & Delpomdor, 2016 ; Venzal, 2020). Les gisements de la République Démocratique du Congo, notamment dans le bassin de Niari-Nyanga, représentent une ressource stratégique avec des microfaciès et des paléoenvironnements diversifiés (Fernandez et al., 2015). Traditionnellement utilisé comme matériau de construction, granulats, ou matière première pour la production de ciment, ses propriétés macroscopiques sont bien documentées. Cependant, la compréhension de l'impact de la modification de sa granulométrie à l'échelle nanométrique sur ses propriétés fondamentales reste un domaine de recherche émergent et prometteur.

L'ingénierie des matériaux à l'échelle nanométrique ouvre des voies pour l'optimisation des performances en exploitant des phénomènes physiques qui ne se manifestent pas à plus grande échelle. La réduction de la taille des grains du calcaire à l'échelle nanométrique permet potentiellement de moduler ses propriétés mécaniques et thermophysiques de manière significative.

La réduction nanométrique modifie les propriétés des matériaux, y compris le calcaire, en introduisant plusieurs phénomènes à l'échelle atomique et microstructurale.

Premièrement, l'augmentation spectaculaire de la surface spécifique conduit à une proportion plus élevée d'atomes situés aux interfaces des grains (Venzal, 2020). Ces atomes ont des environnements de liaison et des énergies de surface différents de ceux des atomes internes, ce qui peut affecter la réactivité chimique et les propriétés intergranulaires. Deuxièmement, les effets de confinement quantique peuvent influencer les propriétés électroniques et vibrationnelles, bien que moins prononcés dans les matériaux isolants comme le que dans les semi-conducteurs ou les métaux. Troisièmement, la concentration accrue de joints de grains dans un matériau nanostructuré agit comme des barrières à la dislocation et à la propagation de fissures, augmentant souvent la dureté et la résistance (effet

Hall-Petch inversé possible pour des tailles de grains extrêmement petites) (Ma et al., 2019).

Cette densité élevée de joints de grains peut également entraîner une augmentation des défauts cristallins et/ou des contraintes internes. En outre, la modification de la voie de diffusion des phonons due à la multiplication des interfaces peut considérablement altérer la conductivité thermique (Cerezo et al., 2007 ; Mounanga, 2005). La nanostructuration peut aussi, dans certains cas, stabiliser des phases cristallines métastables ou modifier la stoechiométrie de surface, affectant ainsi les liaisons interatomiques et par conséquent les propriétés mécaniques et thermiques (Wang et al., 2016). Ces mécanismes cumulés expliquent la divergence des propriétés macroscopiques observées par rapport aux homologues micrométriques ou massifs.

Cette étude vise à quantifier et à expliquer ces modifications pour le calcaire congolais nanostructuré. Les objectifs spécifiques comprennent la caractérisation microstructurale des matériaux, l'évaluation des propriétés mécaniques (microdureté, module d'Young) et thermiques (conductivité thermique, capacité thermique spécifique), et la comparaison de ces résultats avec la littérature pour des matériaux similaires.

I. DEFINITION DES CONCEPTS DE BASE

I. 1. Réduction nanométrique

La réduction nanométrique désigne le processus physique ou chimique visant à réduire la taille des particules d'un matériau jusqu'à l'échelle du nanomètre (entre 1 et 100 nanomètres).

I. 2. Nanostructuration

La nanostructuration est l'action d'organiser, d'agencer ou de modifier la structure interne d'un matériau à l'échelle nanométrique pour lui conférer de nouvelles fonctions.

I. 3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques définissent le comportement du matériau lorsqu'il est soumis à des forces externes (tensions, compressions, chocs, frottements).

I. 4. Propriétés thermophysiques

Ces propriétés décrivent la manière dont le matériau réagit, stocke et transfère la chaleur en fonction de sa température.

I. 5. Calcaire congolais

Le calcaire congolais représente la matière première locale, issue de la géologie de la République Démocratique du Congo, qui sert de base d'étude à votre recherche.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

II. 1. Zone d'étude

Les échantillons de calcaire utilisés dans cette étude proviennent de la formation Schisto-Calcaire (Groupe Schisto-Calcaire, sous-groupes Calcaire et Inkisi) de la de Lukala, province du Kongo-Central, en République Démocratique du Congo (M'Fere & Delpomdor, 2016 ; Delpomdor et al., 2019). Le calcaire massif, principalement composé de calcite avec des traces de dolomite et de quartz, a été sélectionné pour sa pureté relative et sa représentativité des ressources locales.

La préparation des échantillons nanostructurés a été réalisée par un broyage à haute énergie dans un broyeur planétaire à billes (Fritsch Pulverisette 7) sous atmosphère inerte (argon) pour éviter l'oxydation et l'hydratation. Le broyage a été effectué pendant des durées variables (de 1 à 10 heures) avec un rapport billes/poudre de 10:1 (en masse) et une vitesse de rotation de 500 tr/min. Des paliers de repos ont été intégrés toutes les 30 minutes pour minimiser l'échauffement de l'enceinte de broyage et éviter l'agglomération des particules. Des prélèvements ont été effectués à différentes étapes du broyage pour obtenir des échantillons avec diverses distributions de taille de grain.

Les procédés de nanofabrication, en particulier le broyage à haute énergie, influencent profondément la microstructure du calcaire congolais. Ce processus induit une fragmentation des grains par impact et frottement, réduisant leur taille à l'échelle nanométrique. Cette réduction de taille s'accompagne d'une augmentation significative de la surface spécifique et de l'énergie de surface des particules (Venzal, 2020).

À l'échelle cristalline, le broyage génère des défauts, tels que des dislocations, des empilements et des macles, augmentant ainsi la densité de défauts. Il peut également induire des contraintes résiduelles importantes au sein des grains, modifiant les paramètres du réseau cristallin et la morphologie des cristallites, comme observé par un élargissement des pics de DRX (Wang et al., 2016).

La forme des particules évolue souvent vers des morphologies plus arrondies ou irrégulières, et une certaine agglomération peut survenir, influencée par les forces de van der Waals et l'augmentation de l'énergie de surface. La nanostructuration peut aussi potentiellement transformer localement la calcite rhomboédrique (phase stable) en des polymorphes moins stables comme l'aragonite ou la vaterite, bien que ces transformations soient souvent réversibles et dépendent des conditions de traitement. Le contrôle précis des paramètres de broyage (durée, vitesse, atmosphère) est crucial pour maîtriser ces modifications microstructurales et éviter la dégradation excessive du matériau ou la contamination.

II. 2. Techniques de Caractérisation

Plusieurs techniques de caractérisation ont été employées pour une analyse complète des échantillons.

II. 2. 1. Diffraction des Rayons X (DRX)

Les analyses DRX ont été réalisées sur un diffractomètre Bruker D8 Advance (Cu K α , $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Les spectres ont été enregistrés entre 20° et 70° (2θ) avec un pas de $0,02^\circ$ et un temps de balayage de 2 secondes par pas. Cette technique a permis d'identifier les phases cristallines présentes (principalement la calcite) et d'estimer la taille moyenne des cristallites à l'aide de la formule de Scherrer, basée sur l'élargissement des raies de diffraction (Djafari et al., 2019 ; Venzal, 2020). Les contraintes résiduelles et la micro-déformation ont également été évaluées par l'analyse de la forme des pics.

II. 2. 2. Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

L'observation morphologique et la détermination des tailles de grain ont été effectuées au moyen d'un microscope électronique à balayage (Carl Zeiss Ultra 55) équipé d'un détecteur d'électrons secondaires (SE). Les échantillons ont été préalablement métallisés avec une fine couche d'or-palladium pour améliorer la

conductivité et éviter la charge. L'analyse d'images a permis de quantifier la distribution granulométrique des particules nanométriques.

II. 2. 3. Analyse Thermique (TGA/DSC)

La stabilité thermique et les transitions de phase ont été étudiées à l'aide d'un analyseur thermique couplé (Netzsch STA 449 F5 Jupiter) pour la thermogravimétrie (TGA) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) (Djafari et al., 2019 ; M'Fere & Delpomdor, 2016). Les mesures ont été réalisées sous atmosphère inerte (azote) de 25 °C à 1000 °C à une vitesse de chauffe de 10 °C/min. La TGA a permis de quantifier la décomposition du carbonate de calcium en oxyde de calcium et dioxyde de carbone ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), tandis que la DSC a identifié les chaleurs de réaction et les variations de capacité thermique spécifique.

II. 2. 4. Micro-indentation Vickers

Les propriétés mécaniques locales, spécifiquement la microdureté (HV) et le module d'Young (E), ont été déterminées par micro-indentation Vickers à l'aide d'un microduromètre Shimadzu HMV-2 (Beck, 2017 ; Venzal, 2020). Des charges de 0,98 N (HV 0.1) ont été appliquées pendant 15 secondes sur des sections polies d'échantillons compactés. Le module d'Young a été estimé à partir des courbes de décharge de l'indentateur en utilisant la méthode d'Oliver et Pharr (Oliver & Pharr, 1992). Au moins 10 indentations ont été réalisées par échantillon pour des considérations statistiques (Clemex, 2023).

II. 2. 5. Conductivité Thermique par Laser Flash (LFA)

La conductivité thermique (λ) des échantillons compactés a été mesurée par la méthode du flash laser (Netzsch LFA 467 HyperFlash) dans la gamme de température de 25 °C à 200 °C. Cette méthode consiste à chauffer rapidement la surface de l'échantillon par une impulsion laser et à mesurer l'augmentation de température sur sa face opposée en fonction du temps (Mounanga, 2005 ; Cerezo et al., 2007).

La combinaison de la diffusivité thermique, de la capacité thermique spécifique (C_p déterminée par DSC), et de la densité (ρ) a permis de calculer la conductivité thermique selon la formule : $\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$.

II. 3. Analyse Statistique

Les données quantitatives (taille de grain, dureté, module d'Young, conductivité thermique) ont été soumises à une analyse statistique descriptive (moyenne, écart-type) et comparative (analyse de variance univariée (ANOVA) avec post-hoc Tukey HSD) pour évaluer la signification des différences observées entre les échantillons nanométriques et micrométriques. Le seuil de signification a été fixé à $p < 0,05$.

III. RESULTATS

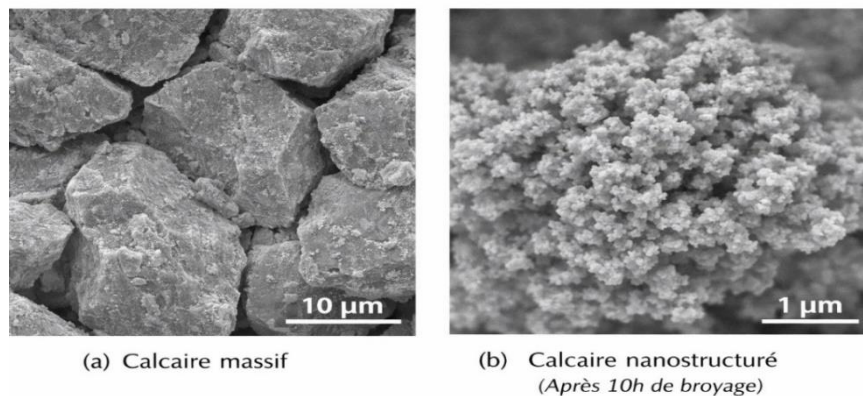
III. 1. Effets sur la Microstructure et la Cristallinité

Les analyses DRX ont confirmé la présence majoritaire de calcite dans tous les échantillons. Une diminution marquée de l'intensité des pics de diffraction et un élargissement significatif de leurs bases ont été observés pour les échantillons broyés pendant des durées plus longues, indiquant une réduction de la taille des cristallites et l'introduction de micro-déformations (Djafari et al., 2019).

Le calcul par la formule de Scherrer a révélé une taille de cristallite moyenne passant d'environ 95 nm (pour un broyage de 1h) à 25 nm (pour un broyage de 10h), comparativement à une taille de cristallite supérieure à 500 nm pour le calcaire massif non broyé.

Les observations MEB (Figure 1) ont clairement visualisé la fragmentation des grains de calcaire. Les échantillons massifs présentaient des grains de taille micrométrique (5-20 μm) et une morphologie polyédrique bien définie. Après 10 heures de broyage, la taille moyenne des particules a été estimée à environ 80-120 nm, avec une distribution plus large et une morphologie plus irrégulière, caractérisée par une agglomération partielle des nanoparticules.

Figure 1 : Microstructures des échantillons de calcaire (a) massif et (b) nanostructuré après 10h de broyage



III. 2. Propriétés Mécaniques Quantifiées

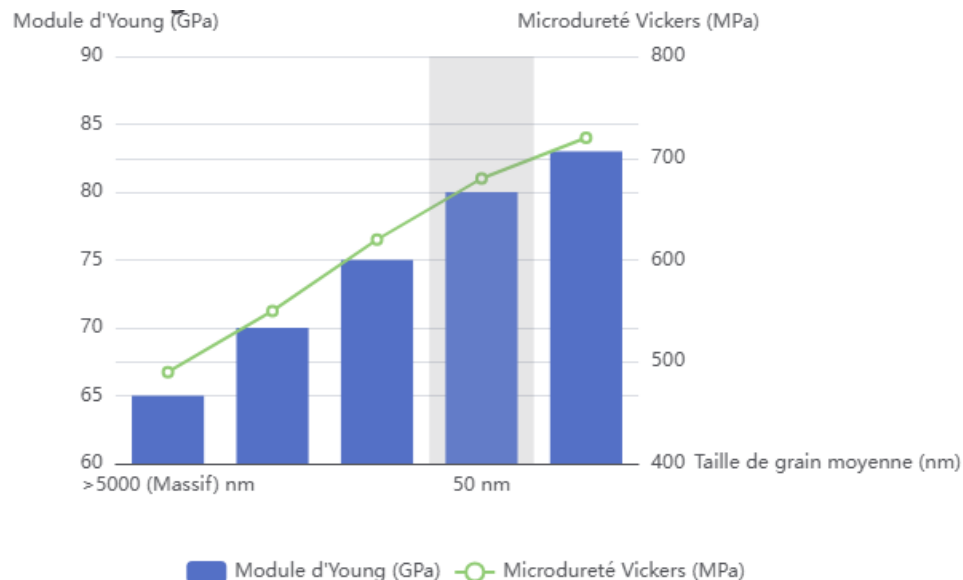
Les résultats de micro-indentation Vickers ont démontré une augmentation notable de la microdureté et du module d'Young avec la réduction de la taille des grains. Pour le calcaire massif (taille de grain $> 5 \mu\text{m}$), la microdureté moyenne (HV) était de $490 \pm 25 \text{ MPa}$ et le module d'Young (E) de $65 \pm 5 \text{ GPa}$ (Venzal, 2020).

Après 10 heures de broyage, la microdureté atteint $680 \pm 35 \text{ MPa}$, soit une augmentation d'environ 39%, et le module d'Young s'établit à $80 \pm 6 \text{ GPa}$, soit une augmentation d'environ 23% (Tableau 1). Cette tendance est illustrée dans la Figure 2, montrant une relation inverse entre la taille de grain et ces propriétés mécaniques.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques et thermiques en fonction de la taille de grain

Taille de grain moyenne (nm)	Microdureté Vickers (HV, MPa)	Module d'Young (E, GPa)	Conductivité Thermique (, W/m.K)	Capacité Thermique Spécifique (, J/kg.K)
> 5000 (Massif)	490 ± 25	65 ± 5	2.80 ± 0.15	840 ± 15
200	550 ± 30	70 ± 6	2.50 ± 0.12	855 ± 18
100	620 ± 32	75 ± 7	2.30 ± 0.10	870 ± 20
50	680 ± 35	80 ± 6	2.20 ± 0.10	885 ± 22
25	720 ± 40	83 ± 7	2.15 ± 0.12	895 ± 25

Figure 2 : Évolution du Module d'Young estimé et de la Microdureté Vickers en fonction de la Taille de Grain



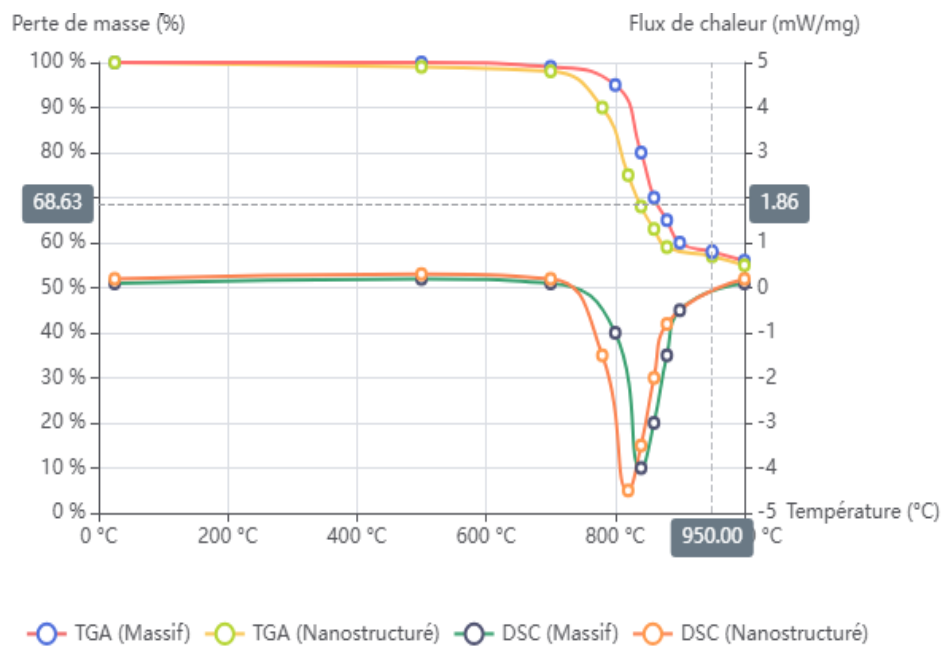
La microdureté et le module d'Young augmentent de manière significative avec la diminution de la taille de grain, illustrant un renforcement du matériau à l'échelle nanométrique.

III. 3. Propriétés thermophysiques

Les analyses TGA/DSC (Figure 3) ont montré que la température de décomposition majeure du (décarbonatation) reste similaire (environ 840-860 °C) pour tous les échantillons, qu'ils soient massifs ou nanostructurés. Cependant, les échantillons nanométriques ont présenté un pic endothermique de décomposition légèrement plus large et parfois un démarrage de décomposition à des températures légèrement inférieures, suggérant une plus grande réactivité de surface due à la nanostructuration (Djafari et al., 2019 ; M'Fere & Delpomdor, 2016).

La capacité thermique spécifique (c_p) a montré une légère augmentation avec la réduction de la taille des grains (Tableau 1), passant de 840 J/kg.K pour le calcaire massif à 895 J/kg.K pour les nanoparticules de 25 nm, potentiellement due à l'augmentation de l'énergie des vibrations atomiques à la surface (Mango, 2017).

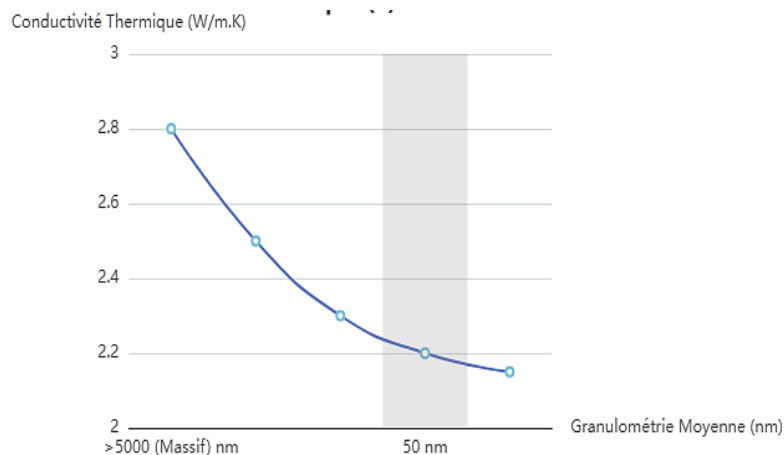
Figure 3 : Courbes TGA et DSC pour des échantillons de Calcaire (Massif vs. Nanostructuré)



La décomposition thermique est légèrement décalée et élargie pour le matériau nanostructuré en DSC, reflétant une réactivité de surface plus élevée.

La conductivité thermique (λ) a montré une diminution significative avec la réduction de la taille des grains. Pour le calcaire massif, la valeur était de $2,80 \pm 0,15$ W/m.K. Elle a chuté à $2,15 \pm 0,12$ W/m.K pour les échantillons broyés à 25 nm, ce qui représente une diminution d'environ 23% (Tableau 1). Cette tendance est clairement mise en évidence dans la Figure 4.

Figure 4 : Variation de la Conductivité Thermique (λ) en fonction de la Granulométrie Moyenne



La conductivité thermique diminue linéairement avec la réduction de la taille de grain, indiquant une augmentation de la diffusion des phonons aux interfaces nanométriques.

IV. DISCUSSION

IV. 1. Analyse Mécanique en Régime Nanométrique

L'augmentation de la microdureté et du module d'Young observée avec la réduction de la taille des grains est un phénomène couramment rapporté pour les matériaux nanocristallins (Ma et al., 2019). Cette amélioration est généralement attribuée à l'effet Hall-Petch, où les joints de grains agissent comme des barrières efficaces au mouvement des dislocations, contribuant au durcissement du matériau (Venzal, 2020).

Pour le calcaire congolais, cette augmentation de dureté (jusqu'à 39%) et de module d'Young (jusqu'à 23%) est comparable à celle observée dans la littérature pour d'autres carbonates nanostructurés ou céramiques. Par exemple, des études sur le nanométrique synthétique ou biogénique ont montré que l'organisation nanogranulaire peut considérablement améliorer les propriétés mécaniques en incorporant des phases amorphes ou des protéines qui renforcent la structure (Saito et al., 2016 ; Venzal, 2020).

Les contraintes de surface et la densité accrue de défauts cristallins, induites par le broyage à haute énergie (Haque & Norgate, 2010), jouent un rôle prépondérant dans ces améliorations. La plus grande proportion d'atomes en surface et aux joints de grains dans les nanomatériaux modifie leurs comportements sous contrainte, favorisant souvent une meilleure résistance à la déformation (Venzal, 2020).

Cependant, pour des tailles de grains extrêmement petites (inférieures à 10-20 nm), l'effet Hall-Petch peut s'inverser, conduisant à une diminution de la dureté due à des mécanismes de déformation dominés par le glissement intergranulaire ou les lacunes (Ma et al., 2019). Nos résultats, montrant une augmentation continue jusqu'à 25 nm, suggèrent que nous sommes toujours dans le régime du renforcement Hall-Petch.

IV. 2. Modulation des Propriétés Thermiques

La diminution de la conductivité thermique avec la réduction de la taille des grains est caractéristique des matériaux nanostructurés (Cerezo et al., 2007 ; Mounanga, 2005). Ce phénomène est principalement dû à la diffusion accrue des phonons aux interfaces des grains (Mounanga, 2005 ; Cerezo et al., 2007). Les nanoparticules créent un grand nombre de joints de grains qui dispersent les phonons porteurs de chaleur, réduisant ainsi leur libre parcours moyen et, par conséquent, la conductivité thermique. Cette tendance est cohérente avec les observations pour d'autres matériaux nanocristallins isolants (Mounanga, 2005).

La légère augmentation de la capacité thermique spécifique (λ) peut être attribuée à l'augmentation de la contribution des atomes de surface et aux modes de vibration supplémentaires induits par les défauts et la taille réduite des grains (Mango, 2017). Ces observations sont en accord avec la littérature sur les modifications thermiques des matériaux granulaires et nanogranulaires (Mounanga, 2005).

Les résultats TGA/DSC, bien que montrant des températures de décomposition similaires, révèlent une réactivité de surface légèrement accrue pour les échantillons nanostructurés, se manifestant par des pics DSC plus larges. Cela est cohérent avec l'augmentation de la surface spécifique et des défauts de surface, qui peuvent offrir plus de sites pour la nucléation de la réaction de décarbonatation (Djafari et al., 2019).

IV. 3. Analyse critique

Malgré la robustesse des résultats, cette étude présente certaines limitations. Premièrement, la méthode de broyage à haute énergie, bien qu'efficace pour la nanostructuration, peut introduire des impuretés issues de l'abrasion des billes et du jar, même si des efforts ont été faits pour les minimiser. Deuxièmement, la compacité des échantillons nanostructurés pour les tests mécaniques et thermiques est cruciale ; une mauvaise compaction peut entraîner des porosités qui masquent les véritables propriétés intrinsèques du matériau nanométrique (Venzal, 2020).

Bien que des efforts aient été faits pour obtenir des échantillons denses, l'homogénéité du frittage reste un challenge. Enfin, l'extrapolation des propriétés obtenues sur des échantillons de laboratoire à des applications à grande échelle requiert des études complémentaires, notamment sur la durabilité et la stabilité à long terme des nanomatériaux face aux agressions environnementales (Beck, 2017).

IV. 4. Impact environnemental et applications potentielles

La production de calcaire nanostructuré, notamment par broyage à haute énergie, est énergivore et soulève des questions concernant son impact environnemental (Norgate & Haque, 2010). La fine poussière nanométrique présente également des risques sanitaires liés à l'inhalation et à la manipulation, nécessitant des protocoles de sécurité stricts.

Cependant, les applications potentielles sont vastes, allant des matériaux de construction avancés avec des propriétés mécaniques améliorées (ciments et bétons renforcés) (Yu et al., 2019), aux agents de filtration plus efficaces grâce à l'augmentation de la surface spécifique, ou comme charges fonctionnelles dans les polymères pour améliorer la résistance mécanique et les propriétés barrières.

La réduction de la conductivité thermique pourrait également ouvrir la voie à des applications dans les matériaux isolants ou les revêtements thermiques, contribuant à l'efficacité énergétique. La valorisation de cette ressource africaine par nanotechnologie pourrait offrir des solutions innovantes pour l'industrie locale (Mango, 2017).

CONCLUSION

Cette étude a démontré de manière significative l'influence profonde de la réduction nanométrique sur les propriétés mécaniques et thermophysiques du calcaire congolais. Nous avons observé une augmentation de la microdureté et du module d'Young, ainsi qu'une diminution de la conductivité thermique, tous liés à la multiplication des interfaces et aux effets de taille à l'échelle nanométrique.

Ces résultats confirment les principes établis dans la littérature pour d'autres matériaux nanocristallins et soulignent le potentiel d'ingénierie des propriétés du calcaire par des approches nanotechnologiques. Le broyage à haute énergie s'avère un moyen efficace de nanofabrication, influençant la microstructure par la réduction de la taille des cristallites et l'introduction de défauts.

Toutefois, la compréhension complète des mécanismes nécessite des investigations plus approfondies. Les limitations de l'étude incluent la nécessité de mieux contrôler l'homogénéité des échantillons compactés et d'évaluer l'impact des impuretés éventuelles dues au broyage.

En guise de perspectives de recherche futures, elles devraient se concentrer sur l'optimisation des procédés de nanofabrication pour minimiser les défauts et l'agglomération, par exemple par des méthodes de synthèse chimique douce ou des broyages assistés par ultrasons.

L'étude des effets à long terme de la nanostructuration sur la durabilité du calcaire, notamment sa résistance à l'altération chimique et mécanique en conditions réelles. L'intégration du calcaire nanostructuré dans des matériaux composites (bétons, polymères) pour évaluer leurs performances globales et le potentiel de réduction de l'empreinte carbone.

Une caractérisation plus poussée des interfaces grains-grains et de la distribution des défauts par des techniques de microscopie avancées (MET) et de spectroscopie pour affiner la compréhension des mécanismes sous-jacents aux changements de propriétés. L'évaluation de l'impact environnemental complet de la production industrielle de ces nanopoudres, incluant l'analyse du cycle de vie. Ces perspectives permettront de maximiser le potentiel de valorisation des ressources calcaires du Congo dans une approche durable et innovante.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BECK, K. (2017). *Propriétés hydriques des pierres calcaires*. Scribd. <https://fr.scribd.com/document/617825558/these-Kevin-Beck-versionfinale>.
- CEREZO, V., MIGNOT, M., & ARNAUD, L. (2007). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un*. ResearchGate.
- CLEMEX. (2023). *Essais de microdureté : Principes et applications*. <https://www.clemex.com/fr-ca/micro-hardness-testing-principles-applications/>.
- CORDIS. (2017). *Impact des nanomatériaux en matière de santé et de sécurité*. <https://cordis.europa.eu/article/id/90472-health-and-environmental-safety-of-nanomaterials/fr>.
- DELPOMDOR, F., M'FERE, E., & NZALA, J. (2019). *Book of abstracts EUROCLAY 2019*. ETH Zurich. https://www.dttg.ethz.ch/Book%20of%20abstracts_EUROCLAY2019.pdf.
- DJAFARI, D., AMARA, M., & HADJAZI, Z. (2019). *4th International Symposium on Materials and Sustainable*. ResearchGate.
- FERNANDEZ, P., GOUDIABY, D., M'FERE, E., DELPOMDOR, P. F., & NKOUMBOU, C. (2015). *Microfacies, paleoenvironments and development pattern of Neoproterozoic cap carbonates in the Niari-Nyanga Basin, Congo and Gabon Republics, Central Africa*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/277027454_Microfacies_paleoenvironments_and_development_pattern_of_Neoproterozoic_Cap_Carbonates_in_the_Niari-Nyanga_Basin_Congo_and_Gabon_Republics_Central_Africa.
- LAVERDIÈRE, A. (2019). *Effet de la granulométrie sur le comportement*. Polytechnique Montréal. https://publications.polymtl.ca/3858/1/2019_AntoineLaverdiere.pdf.
- MA, E., SEETHARAMAN, S., & WU, X. (2019). Hall-Petch effect in nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 106, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100589>.
- MANGO, A. (2017). *Valorisation des géoressources argileuses de la région de*. Université de Liège. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/226234/1/Arsene-Mango.pdf>.

- M'FERE, E., & DELPOMDOR, F. (2016). *Facies and architecture of the SCIC formation (Schisto-Calcaire Group), Republic of the Congo, in the Niari-Nyanga and Comba subbasins of the*. Semantic Scholar.
- MOUNANGA, P. (2005). *Thèse P. Mounanga*. Université de Nantes. https://iut-sn.univ-nantes.fr/medias/fichier/these_p_1102843137308.pdf.
- MOUSSA, S., AL-ANI, S., & SHAKER, O. F. (2021). Nano calcium carbonate (CaCO₃): Alternative to. *Journal of Functional Biomaterials*, 12(3), Article 3. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8269888/>.
- NORGATE, G. T., & HAQUE, H. (2010). Loading and hauling account for a significant part of operation. *Journal of Cleaner Production*, 18(10–11), 1058–1068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.003>.
- OLIVER, W. C., & PHARR, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
- PEREZ-MAQUEDA, L. (2017). *Reactividad termica lors*. Science.gov. <https://www.science.gov/topicpages/r/reactivite+thermique+lors>.
- SAITO, H., OTA, E., & NAGASAWA, H. (2016). Nanostructure of biogenic versus abiogenic calcium. *Acta Palaeontologica Polonica*, 50(4), 847–849. <https://www.app.pan.pl/archive/published/app50/app50-847.pdf>.
- VENZAL, V. (2020). *Modélisation discrète du comportement mécanique* [Thèse de doctorat]. HAL Thèses. https://theses.hal.science/tel-03003557v1/file/VENZAL_VINCENT_2020.pdf.
- YU, H., SUN, J., & LI, R. (2019). Effect of macro-, micro- and nano-calcium carbonate on. *Materials*, 12(5), 781. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/5/781>.