La nano-intégration : un besoin d'adaptation des procédés de fabrication actuels

Jean-Philippe Guillemin, Olivier Bonnefoy

▶ **To cite this version:**

Jean-Philippe Guillemin, Olivier Bonnefoy. La nano-intégration : un besoin d'adaptation des procédés de fabrication actuels. Lettre Techniques de l'Ingénieur, 2008, 9, pp.10-11. emse-00518062

HAL Id: emse-00518062

https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-00518062

Submitted on 16 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La Lettre Techniques de l'Ingénieur, Risques Industriels et Environnement, 2008 (mars), 9, 10-11

La nano-intégration : un besoin d'adaptation des procédés de fabrication actuels

GUILLEMIN JEAN-PHILIPPE[(1),(2)], OLIVIER BONNEFOY[(2)]*

[(1)] *Nexter Munitions, Engineering Direction, 7 route de Guerry, 18023 Bourges, France**
[(2)] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Centre SPIN ; Département PMCC ; LPMG -UMR CNRS 5148, 158 Cours Fauriel ; 42023 Saint-Étienne Cedex 2, France*

Résumé

L'arrivée des nanomatériaux parmi les objets du quotidien semble porteuse de fonctions d'usage innovantes, mais pose de nombreux problèmes de mise en œuvre lors de l'intégration de particules nanométriques dans des procédés de fabrication standardisés. Il semble donc impératif d'adapter les procédés de transformation habituels.

R. Feynman [1] lors du congrès annuel de *l'American Physical Society*, en 1959, annonçait qu'une nouvelle ère de recherche était à la portée des scientifiques qui sauraient synthétiser, contrôler, et caractériser les nanomatériaux. Il avait cependant oublié qu'une autre étape primordiale était nécessaire pour conférer à ces matériaux les promesses technologiques attendues, celle de leur intégration, sans risque, dans les procédés industriels actuels employant des micro-charges.

Quels usages des nanomatériaux au quotidien ?

Les nanomatériaux ne sont plus seulement une curiosité de laboratoire, mais ont maintenant atteint le stade de commercialisation. Ils touchent tous les secteurs industriels et intègrent déjà des produits de tous les jours : nanoparticules dans les cosmétiques, les bétons, les peintures...et, peut être un jour voire, dans nos assiettes.
Si les nanomatériaux reçoivent une attention particulière de la communauté scientifique sur leurs propriétés finales (électrique, mécanique ou thermique), le besoin d'évolution des procédés de mise en œuvre intégrant des nanopoudres n'est que rarement évoqué.

Micro-nano : des comportements différents.

Les mots clés liés aux nanomatériaux peuvent se résumer ainsi :

- une taille de grain de l'ordre de 10^{-9} m (1-100 nm) ;
- une surface spécifique très élevée ;
- des matériaux améliorant les propriétés mécaniques ;
- - des matériaux chimiquement très réactifs [2].

* Auteur à qui la correspondance devait être adressée : obonnefoy@emse.fr

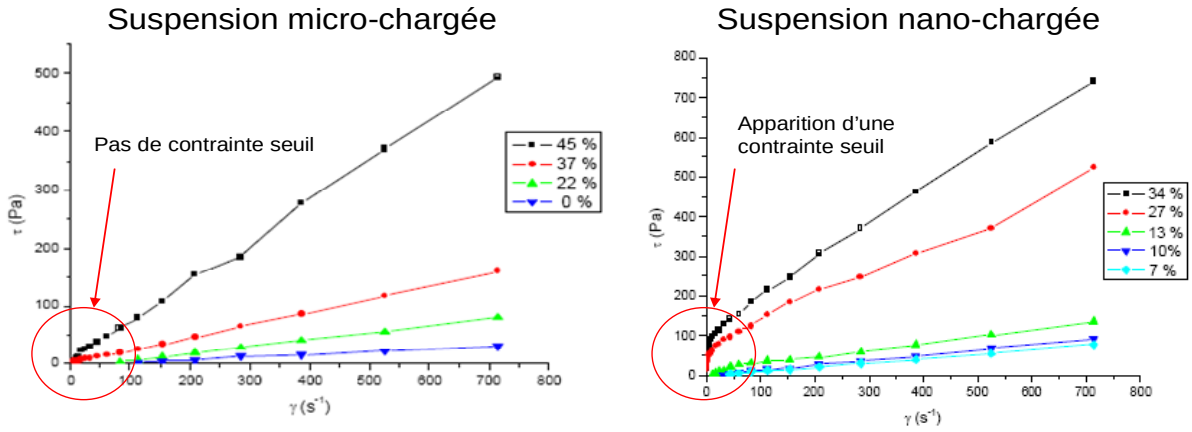

Figure 1: Mesures de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la vitesse de cisaillement γ pour différentes fractions volumiques solides ϕ d'aluminium. Les courbes montrent clairement les modifications du comportement à l'écoulement d'une suspension micro-chargée ou nano-chargée. L'apparition d'une contrainte seuil révèle que la suspension nano-chargée ne pourra s'écouler qu'au dessus de cette valeur.

Crédit : J.P. GUILLEMIN et al. d'après [3], dessin : P. Bouillon.

Toutes ces caractéristiques confèrent aux nanomatériaux des comportements spécifiques, fonction de la taille, qui les diffèrent des entités micrométriques. Ces différences peuvent s'observer, par exemple, sur les propriétés rhéologiques (propriétés d'écoulement) d'une suspension micro-chargée ou nano-chargée. Dans un souci d'anticipation des conséquences de l'intégration de tels matériaux au sein d'une suspension, Nexter Munitions, le CNRI (Centre national des risques industriels) et le laboratoire SPIN de *l'Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne* ont mené une étude comparative sur le comportement à l'écoulement de suspensions concentrées intégrant une poudre d'aluminium dont les grains se présentent sous deux échelles de tailles différentes : micrométriques ou nanométriques [3].
Les résultats expérimentaux ont montré que le changement d'échelle de la matière pulvérulente engendre une évolution de la loi de comportement à l'écoulement des suspensions. Ainsi, pour les suspensions micro-chargées utilisées dans cette étude, le comportement reste newtonien alors que, pour les suspensions nano-chargées, l'écoulement devient non newtonien, avec notamment l'apparition d'une contrainte seuil au delà de laquelle la matière peut s'écouler (voir Figure 1).
Autre particularité due, en partie, à l'excédent de surface spécifique offert par les entités nanométriques : pour un même volume de matière solide au sein de la phase liquide, la suspension nano-chargée est plus visqueuse que la suspension micro-chargée (voir Figure 2).

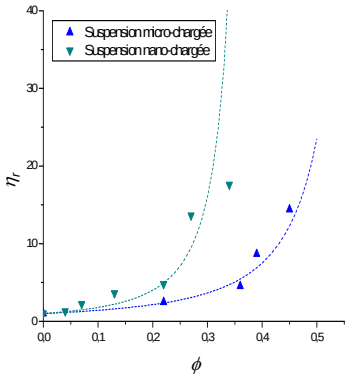

Figure 2: Augmentation de la viscosité relative η_r en fonction de la fraction volumique solide en aluminium ϕ. Pour un même volume de solide au sein de la phase liquide, la suspension nano-chargée sera plus visqueuse

Crédit : J.P. GUILLEMIN et al., d'après [3], dessin : P. Bouillon.

De même que les propriétés d'écoulement, les propriétés mécaniques obtenues en compression uniaxiale diffèrent selon que l'entité considérée est nanométrique, ou micrométrique. Ces observations ont été modélisées par Lamy et *al.* [4] lors de la réalisation de comprimés intégrant des nanomatériaux ou des micromatériaux. L'auteur a particulièrement constaté que la diminution de porosité lors de l'étape de compression évoluait de manière totalement différente selon l'échelle de grain utilisée.

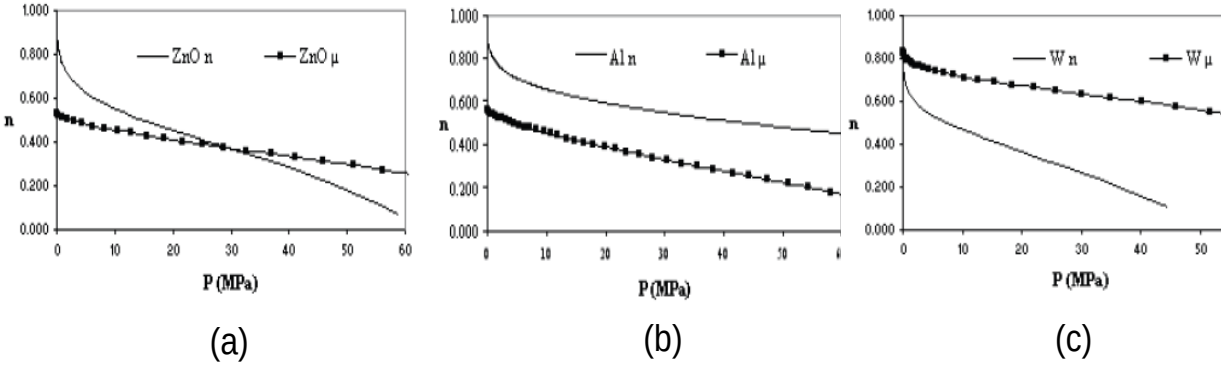

Figure 3: Evolution de la porosité d'un lit de poudre nanométrique ou micrométrique lors de la réalisation de comprimés par compression uniaxiale. Les matériaux considérés sont l'oxyde de zinc (a) (micrométrique (ZnO µ) ou nanométrique (ZnO n)), l'aluminium (b) (micrométrique (Al µ) ou nanométrique (Al n)) et le tungstène (c) (micrométrique (W µ) ou nanométrique (W n)).

Crédit : P. LAMY et J.P. GUILLEMIN, d'après [4], dessin : P. Bouillon

Une évidence d'adaptation pour les procédés actuels de fabrication.

Les observations faites de l'influence du changement d'échelle de taille de grains sur une réponse donnée (viscosité, porosité...) et selon un procédé donné (écoulement de la matière intervenant, par exemple, dans la coulée, l'injection ou l'extrusion de composites et la compression) montrent clairement la nécessité de prendre en considération les connaissances sur le comportement des nanomatériaux.

De plus, la modification des comportements physiques des produits finis intégrant des nanomatériaux induit des modifications à plusieurs niveaux dans une chaine de production : étanchéité des installations, temps de flux de matière, et élimination des déchets. La mise en œuvre de ces matériaux conduit trivialement à une analyse du cycle de vie du couple matière / procédé.

Il est donc important de garder à l'esprit les fondamentaux suivants, c'est-à-dire :

- dans un souci de processabilité, démontrer la faisabilité connective risque/technique/économie permettant la compatibilité des nanomatériaux et des procédés de transformation ;
- comprendre comment bien disperser les nanomatériaux dans une matrice pour une mise en œuvre optimisée à l'intérieur de différents procédés ;
- adapter les procédés industriels de transformation habituels aux contraintes des nanomatériaux.

C'est en gardant ces principes rationnels à l'esprit que les nanomatériaux auront des propriétés finales d'un grand intérêt en vue de l'optimisation des fonctions d'usage d'un produit fini.

Références

[1] FEYNMAN (R.).- There's plenty of room at the bottom, discours prononcé le 29 décembre 1959 au congrès annuel de l'American Physical Society, http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html.

[2] LINES (M.G.).- Nanomaterials for practical functional uses,. Journal of Alloys and Compounds, 448, 242-245 (2008).

[3] GUILLEMIN (J.P.), LAMY (P.), BONNEFOY (O.).- et THOMAS (G.) – Micro-Nano : des comportements différents, des procédés à adapter, 8ème CIMATS (Colloque industriel sur les matériaux et traitement de surface) (nanomatériaux, nanocomposites, nanostructures : un point sur la réalité industrielle), Belfort-Monbéliard, 7 et 8 décembre 2005.

[4] LAMY (P.), BRUNET (L.), THOMAS (G.).- Modeling the porosity evolution of powder under uniaxial compression, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol30, issue 6, 397-403, (2005).

[5] LAMY (P.), GUILLEMIN (J.P.).- Mechanical behaviour of nanomaterials for energetic compounds, 34th International Pyrotechnics Seminar, from october 8 to 11, Beaune, France, (2007).