

Aptitude à l'écoulement de poudres alimentaires : impact des propriétés physicochimiques des particules

Jeremy PETIT, Jennifer BURGAIN, Claire GAIANI & Joël SCHER
Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules (LIBio)

Université de Lorraine

2, avenue de la forêt de Haye – BP 20163
54505 Vandœuvre-lès-Nancy – France

La détermination des principaux facteurs influençant l'aptitude à l'écoulement de poudres alimentaires est primordiale pour la bonne mise en œuvre de ces dernières lors de procédés de fabrication, transport ou stockage. L'utilisation d'un rhéomètre à poudre permet de caractériser l'écoulement des poudres dans différentes conditions environnementales et de procédé et de lier l'aptitude à l'écoulement aux propriétés physicochimiques des particules. Cet article s'attache à décrire l'influence des principales propriétés physiques (distribution de taille, forme des particules...) et chimiques (composition globale et de surface) sur les propriétés d'écoulement (énergie d'écoulement, compressibilité, cohésion, facteur d'écoulement...) à travers des exemples de poudres alimentaires plus ou moins complexes (sucres glace et cristal, laits en poudre, cacao, produits alimentaires amylicés). Cette description phénoménologique de l'écoulement de poudres alimentaires constitue une première étape vers la modélisation de la rhéologie des poudres, qui est actuellement au cœur de projets de recherche pluridisciplinaires.

ABSTRACT

The identification of the main factors influencing the flowing of food powders is crucial for their correct handling during manufacturing processes, transport and storage. The use of a powder rheometer allows characterizing powder flowing under various environmental and process conditions, as well as linking powder flowability to physicochemical properties of particles. This paper intends to describe the influence of the main physical (particle size distribution, particle shape, etc.) and chemical properties (bulk and surface compositions) of particles on flowing properties (basic flowability energy, compressibility, cohesion, flow factor, etc.) through examples of more or less complex food powders (icing and crystal sugars, powdered milks, cocoa, starchy foods). This phenomenological description of food powders constitutes the first step towards the modelling of powder flowing, which is currently at the heart of pluridisciplinary research projects.

Mots-clés : poudres alimentaires, rhéologie, écoulement, physicochimie.

INTRODUCTION

Au cours des nombreuses opérations unitaires mises en œuvre dans leurs procédés de fabrication, les poudres sont manipulées, transportées et stockées. Elles subissent des contraintes thermomécaniques variées susceptibles d'affecter leurs propriétés fonctionnelles, en particulier leur aptitude à l'écoulement. Or, les poudres sont des matériaux complexes présentant un comportement rhéologique original, se rapprochant selon la situation du comportement des solides, des liquides ou des gaz. En effet, lorsqu'une poudre est versée dans un récipient, elle épouse la forme et se comporte alors comme un liquide. Si ce récipient est incliné de quelques degrés seulement, la poudre reste immobile et se comporte comme un bloc solide. En augmentant encore l'angle d'inclinaison du récipient, le seuil d'écoulement de la couche de

particules de la surface libre peut-être dépassé et la poudre se comporte alors à nouveau comme un liquide. Enfin, l'application d'une contrainte normale sur un lit de poudre induit une diminution de son volume : une poudre est donc compressible, de manière analogue aux gaz.

L'aptitude à l'écoulement d'une poudre peut être définie comme le **mouvement relatif de particules voisines entre elles ou le long de la surface de la paroi du récipient**. Le comportement rhéologique des poudres influence fortement les performances des procédés industriels et la qualité des produits finaux. L'aptitude à l'écoulement est la résultante des interactions interparticulaires, ainsi que des interactions de la poudre avec l'environnement. Par exemple, une poudre cohésive ne s'écoule généralement pas librement puisque les interactions interparticulaires surpassent l'action de la gravité. Les interactions interparticulaires sont de plusieurs types :

- les **forces de van der Waals**, qui correspondent à une interaction électrique de faible intensité, sont particulièrement significatives pour les particules fines ;
- les **forces capillaires**, qui résultent de la présence d'une fine couche d'eau à la surface des particules ;
- les **forces électrostatiques**, qui peuvent être attractives ou répulsives selon les charges des particules.

Les interactions interparticulaires et donc l'aptitude à l'écoulement dépendent des caractéristiques physicochimiques intrinsèques de la poudre (composition chimique globale et de surface, teneur en eau, distribution granulométrique et forme des particules...), mais aussi des conditions environnementales (température, humidité...) et de procédé (séchage, agglomération, broyage, tamisage...) auxquelles elle est soumise (Figure 1).

La rhéologie des poudres, c'est-à-dire le comportement en écoulement, a été étudiée par différentes approches : une poudre a pu être considérée



Figure 1 : Principaux facteurs influençant le comportement rhéologique des poudres.

comme un fluide ou un corps solide soumis à une déformation élastique/plastique ou à une rupture mécanique. Ces deux dernières approches permettent une meilleure description de l'écoulement de poudres [1]. Cependant, le manque de modèles mathématiques permettant de décrire la rhéologie de tous les types de poudres dans les différentes conditions environnementales et de procédé auxquelles elles sont soumises restreint la caractérisation de l'écoulement des milieux granulaires à une approche purement phénoménologique. Ainsi, il est actuellement difficile de prédire l'impact d'un changement de taille, de forme ou de composition des particules sur l'aptitude à l'écoulement de la poudre considérée. Le présent article propose de recenser et classer les facteurs susceptibles d'influencer l'écoulement de poudres alimentaires, afin de permettre aux lecteurs néophytes de mieux appréhender l'écoulement de poudres alimentaires, mais aussi aux utilisateurs réguliers de poudres de mieux maîtriser leurs pratiques en prenant en compte tous les facteurs susceptibles de modifier leurs propriétés d'écoulement.

RHÉOMÈTRE À POUDRE

Un rhéomètre à poudre est un équipement qui a pour objectif de mesurer les propriétés d'écoulement des poudres. L'un des plus utilisés à l'heure actuelle est probablement le « FT4 Powder Rheometer » développé par Freeman Technology [2], puisqu'il offre une large gamme de tests d'écoulement standardisés adaptés aux différentes situations rencontrées dans les procédés industriels : écoulements à surface libre ou sous contrainte, fluidisation... Il permet notamment la mesure de « l'énergie d'écoulement », autrement dit, l'énergie requise pour induire l'écoulement d'un volume calibré de poudre placé dans un récipient cylindrique avec une hélice de forme et de taille standardisées. L'énergie d'écoulement est déduite des mesures de couple, force verticale et positionnement de l'hélice réalisées lors d'un aller-retour de l'hélice dans le lit de poudre (Figure 2). Avant chaque essai, l'historique des contraintes subies par le lit de poudre (éventuel tassement lors du versement de la poudre dans le cylindre...) est effacé par une étape de conditionnement consistant en un mélange doux du lit de poudre par l'hélice : le lit de poudre se trouve alors dans un même état de consolidation préalablement à chaque test, ce qui permet ainsi d'assurer une bonne répétabilité à l'analyse (voir figure 2).

Le rhéomètre à poudre FT4 possède également une cellule de cisaillement permettant de mesurer la résistance au cisaillement de la poudre (test de Jenike [3], Figure 3).

Cette méthode consiste à déterminer la contrainte tangentielle τ_r à

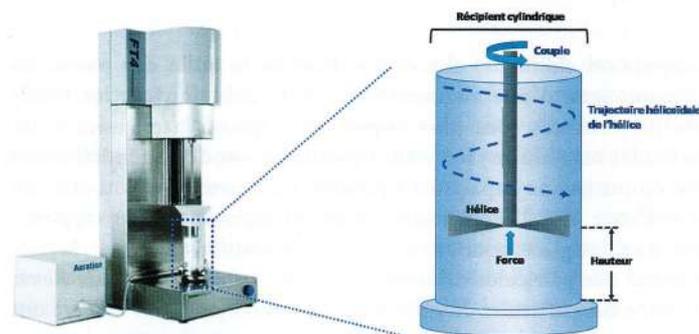
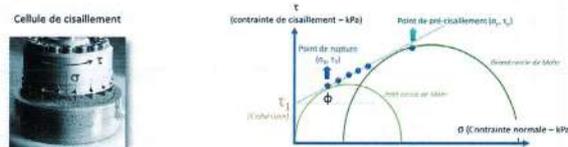


Figure 2 : Principe de mesure de l'énergie d'écoulement avec le rhéomètre à poudre FT4.

appliquer à un lit de poudre préalablement consolidé, soumis à une contrainte normale σ_N , afin de déstructurer l'empilement de particules et ainsi mettre en mouvement la poudre. Plusieurs mesures sont effectuées à des niveaux de contrainte normale différents, ce qui permet de caractériser l'aptitude à l'écoulement sous contrainte.



Paramètres	Symbole	Description	ffc	Comportement
Résistance à la compression	σ_c	Contrainte provoquant le déplacement du lit de poudre consolidé		
Contrainte maximale de consolidation	σ_r	Contrainte normale maximale pendant l'écoulement		
Fonction d'écoulement	ffc	Plus la ffc est grande, meilleur est l'écoulement de la poudre		
Angle de friction interne	ϕ	Angle formé entre le plan de rupture et le plan horizontal (→ forces de friction existantes au sein de la poudre)		

ffc < 1	Pas d'écoulement
1 < ffc < 2	Très cohésive
2 < ffc < 4	Cohésive
4 < ffc < 10	Écoulement facile
10 < ffc	Écoulement libre

Figure 3 : Utilisation d'une cellule de cisaillement dans le but de déterminer les propriétés d'écoulement des poudres en milieu confiné.

Enfin, des accessoires fournis avec le rhéomètre à poudres FT4 permettent d'évaluer de nombreux paramètres comme les densités aérée, tassée et compactée, la compressibilité et la perméabilité des poudres. Un panorama des possibilités de caractérisation physicochimique et du comportement rhéologique des poudres du rhéomètre à poudres FT4 est présenté dans la Figure 4.

INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES

La taille des particules est un paramètre majeur contrôlant l'aptitude à l'écoulement des poudres. Généralement, pour une poudre de même

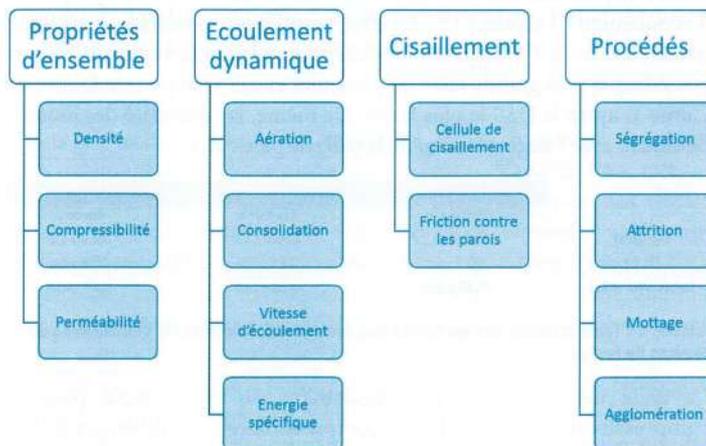
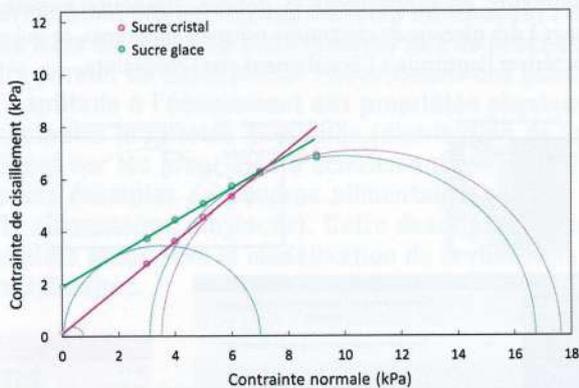


Figure 4 : Exemples d'informations fournies par le rhéomètre à poudre.

composition chimique, une diminution de la taille des particules s'accompagne d'une augmentation de la cohésion car les forces interparticulaires sont plus importantes quand la distance entre particules est réduite ; les petites particules ont donc généralement une moins bonne capacité à s'écouler. Ceci peut aisément être mis en évidence avec l'écoulement facilité du sucre cristal par rapport à celui du sucre glace, pourtant de même composition chimique : la taille médiane des particules de sucre cristal ($D_{50} = 570 \mu\text{m}$), plus élevée que celle des particules de sucre glace ($D_{50} = 85 \mu\text{m}$), leur confère une cohésion plus faible et donc une meilleure aptitude à l'écoulement (Figure 5).

Sur la base du facteur d'écoulement ffc , le premier type de sucre peut ainsi être qualifié de cohésif ($2 < ffc < 4$), alors que le second présente un écoulement libre ($ffc > 10$). Également, la cohésivité du sucre glace est largement plus grande (environ 10 fois) que celle du sucre cristal, ce qui confirme la meilleure aptitude à l'écoulement de ce dernier.



	Cohésivité (kPa)	σ_c (kPa)	σ_1 (kPa)	ffc (-)	Densité tassée ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Sucre glace	1,90	7,0	17,5	2,4	0,75
Sucre cristal	0,17	0,7	17,7	24,1	0,93

Figure 5 : Résultats du test de cisaillement standard (précontrainte normale de 9 kPa) du rhéomètre à poudre FT4 pour le sucre glace et le sucre cristal.

Cette influence majeure de la taille de particules sur l'aptitude à l'écoulement a déjà été mise en évidence pour de nombreux aliments en poudre. Par exemple, il a été montré que les poudres de fofou (un aliment traditionnel d'Afrique de l'Ouest et des Grands Lacs préparé à partir de banane plantain) avaient une taille de particules différentes selon la variété de plantain utilisée, ce qui influençait directement leurs propriétés d'écoulement (Tableau 1) [4]. En effet, parmi les trois variétés de plantain testées, le facteur d'écoulement ffc était maximal pour le fofou d'Orishele possédant la plus grande taille de particules et minimal pour le fofou de Corne 1, ayant le D_{50} le plus faible. De même, la cohésivité des fofous diminuait avec l'augmentation de la taille de particules.

	Variété		
	Orishele	French 2	Corne 1
D_{50} (μm)	$131,3 \pm 2,1$	$116,3 \pm 3,0$	$75,6 \pm 1,1$
ffc (-)	$40,2 \pm 0,0$	$18,5 \pm 0,2$	$15,3 \pm 0,6$
Cohésivité (kPa)	$0,10 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,00$	$0,28 \pm 0,01$

Tableau 1 : Taille médiane des particules D_{50} , facteur d'écoulement ffc et cohésivité de poudres de fofou

La taille des particules joue également un rôle crucial pour la compressibilité d'une poudre. La compressibilité d'un milieu granulaire est liée aux propriétés d'écoulement car elle est représentative des forces intergranulaires et donc, indirectement, de la cohésion du milieu.

En effet, une poudre cohésive versée en pluie conduit à un empilement lâche. La compression du lit de poudre par application d'une contrainte normale rompt les liens entre particules et permet le réarrangement du lit de poudre. Plus les forces interparticulaires sont importantes (i.e. plus les poudres sont cohésives), plus le lit de poudre peut se comprimer et plus il faut fournir d'énergie à la poudre pour la faire s'écouler. Ainsi, le sucre glace étant une poudre cohésive, sa compressibilité est beaucoup plus importante que celle observée pour le sucre cristal à une contrainte normale donnée (Figure 6). Les particules de sucre cristal, de grande taille, ont une masse élevée ainsi qu'une surface de contact réduite, ce qui favorise l'action des forces de gravité au détriment des forces de cohésion et permet un écoulement aisé du sucre cristal.

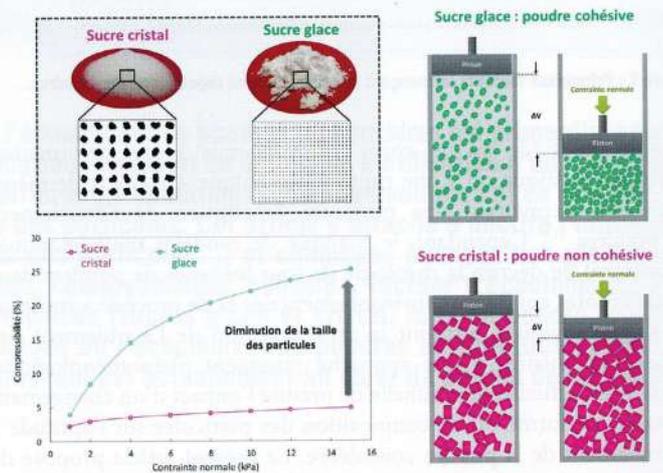


Figure 6 : Évaluation de la compressibilité du sucre cristal et du sucre glace.

INFLUENCE DE LA MORPHOLOGIE DES PARTICULES

La morphologie des particules est un autre paramètre important pour l'écoulement des poudres. En effet, un meilleur écoulement est attendu pour des particules sphériques, minimisant le nombre de points de contacts et donc l'intensité des forces interparticulaires, que pour des particules irrégulières : par exemple, des particules allongées, en forme de bâtonnets ou d'aiguilles, sont souvent plus cohésives que des particules sphériques, à cause de leur plus grande surface de contact. De même, la présence d'aspérités ou d'angles saillants à la surface des particules, ainsi que les particules à surface rugueuse sont défavorables à l'écoulement de la poudre. Le lien entre les propriétés d'écoulement de poudres de lactose et la taille et la forme des particules a été exploré [5]. Si la taille des particules est le principal facteur affectant l'écoulement des poudres, la forme des particules intervient à un second niveau, en particulier lorsque deux poudres de même taille présentent des particules de formes différentes.

L'effet de la forme des particules peut être illustré avec les poudres de banane plantain [4] : la poudre de fofou obtenue avec la variété Corne 1 possédait des particules de taille similaire, mais légèrement plus sphériques et convexes que la poudre de fofou (un autre mets traditionnel d'Afrique de l'Ouest et des Grands Lacs à base de plantain) produite à partir de la variété French 2, ce qui pouvait expliquer le meilleur écoulement (ffc plus élevé, cohésivité plus faible) et la plus faible compressibilité du fofou.

INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE

L'aptitude à l'écoulement d'une poudre est également influencée par la distribution granulométrique des particules, et plus particulièrement par la proportion de fines. Ainsi, une proportion importante de fines est souvent défavorable à l'écoulement. En effet, les fines peuvent s'adsorber à la surface des particules plus grosses, créant ainsi des

aspérités à la surface se traduisant par une rugosité plus importante des particules. Des forces de friction supplémentaires apparaissent alors, rendant l'écoulement de la poudre plus difficile. Également, la présence d'une population significative de particules fines (par exemple formées par l'attrition des particules lors de leur transport) rend généralement la poudre plus cohésive et plus sensible à la compression, ce qui altère ses propriétés d'écoulement. De plus, la présence de fines accroît la largeur de la distribution de taille de particules, ce qui est généralement défavorable à l'écoulement de la poudre. En effet, une poudre constituée de particules de tailles très variables est souvent plus compressible, moins fluidisable et plus difficile à mettre en mouvement. Cet impact des particules fines sur l'écoulement peut être illustré par une étude sur l'écoulement de poudres de kishk (un plat traditionnel libanais à base de yaourt et de céréales). Le kishk mixte (à base de laits de vache et de chèvre) possédait une taille médiane de particules plus petite que les kishks de vache ou de chèvre mais ses propriétés d'écoulement étaient meilleures, paradoxalement. Ceci a pu être expliqué par sa distribution de particules plus étroite, due à une proportion de fines plus faible que pour les autres kishks [6].

Cependant, la présence de fines peut aussi avoir un effet favorable sur l'aptitude à l'écoulement d'une poudre, en particulier si la surface des grosses particules est rugueuse. Dans ce cas de figure, les fines peuvent combler les creux et ainsi lisser la surface des grosses particules, ce qui peut permettre de diminuer les forces de friction et ainsi d'améliorer l'écoulement de l'ensemble de la poudre. Certains chercheurs ont justement mis en évidence que la présence de particules fines au sein d'une population de grandes particules pouvait induire **une amélioration de l'écoulement par un effet de « roulement à billes » : les particules fines à la surface limitent le contact entre les grandes particules, diminuant ainsi la friction et améliorant l'écoulement.** Leturia et al. [7], travaillant avec des poudres cohésives non alimentaires, ont par exemple montré que les nanoparticules de noir de carbone, s'adsorbant sur des particules microscopiques d'oxyde métallique, facilitent l'écoulement de ces dernières. Meyer et Zimmermann [8] ont également mis en évidence l'effet de « roulement à billes » avec l'amélioration de l'écoulement de la fécule de maïs par ajout de nanoparticules de silice. Enfin, l'étude sur les farines de fofou et foutou produits à partir de plantain de Gnagne et al. [4] a montré que les poudres de fofou nécessitaient une énergie d'écoulement plus faible que les poudres de fofou, ce qui était inattendu au vu de la plus petite taille médiane, la forme plus irrégulière et la plus grande hétérogénéité des particules de fofou. Ce résultat a pu être expliqué par le fait que les particules fines des poudres de fofou, issues du procédé de production et présentes en proportion significative, permettait de réduire la friction entre les plus grandes particules de fofou, améliorant ainsi leur aptitude à l'écoulement.

COMPOSITION CHIMIQUE

Un autre paramètre intrinsèque peut se révéler très important pour l'écoulement d'une poudre : il s'agit de la composition chimique des particules, et plus précisément la composition chimique de la surface de la particule. En effet, **certaines composantes alimentaires, lipides et glucides surtout, sont susceptibles d'être collants à la température ambiante et/ou aux températures mises en œuvre lors de la fabrication ou la reconstitution des poudres, nuisant ainsi à l'écoulement des poudres.**

D'une part, la présence d'une teneur significative en lipides rend les poudres collantes à des températures proches et supérieures à la gamme de températures de fusion des lipides de la poudre (généralement entre -55 et +80 °C pour les acides gras et triglycérides alimentaires [9]). Ce phénomène est exacerbé par la répartition préférentielle des lipides à

la surface des particules, conséquence de la migration des lipides au cours du procédé de production ou du stockage de la poudre. Il a ainsi été mis en évidence que les conditions de séchage par atomisation de poudre de lait écrémé modulent la teneur en lipides résiduels à la surface des particules, ce qui influence leur aptitude à l'agglomération, modifie la taille des particules et est susceptible de modifier les propriétés d'écoulement, même si la composition chimique globale est identique [10]. De même, la migration des lipides au cours du vieillissement d'une poudre de cacao affecte légèrement la taille des particules et induit un phénomène de mottage, particulièrement délétère pour l'écoulement de cette poudre [11].

D'autre part, une poudre contenant une proportion importante de glucides est susceptible d'être collante à des températures avoisinant ou dépassant légèrement les températures de transition vitreuse des glucides (entre +30 et +110 °C pour une large gamme de poudres alimentaires [12]). En effet, le phénomène de transition vitreuse désigne le passage d'un état vitreux (solide amorphe) à un état collant (liquide viscoélastique de très forte viscosité) lorsqu'on plastifie le matériau (*i.e.* on donne de la mobilité aux molécules le constituant) par augmentation de température ou de teneur en eau. Ce phénomène de transition vitreuse est d'ailleurs minutieusement contrôlé lors du séchage par atomisation de matières alimentaires à forte teneur en glucides (telles que des maltodextrines), afin d'éviter le collage de la poudre sur les parois de la chambre de séchage [13], qui limiterait très fortement sa progression jusqu'à la sortie du séchoir et diminuerait drastiquement le rendement de séchage.

Enfin, la présence préférentielle de certains constituants en surface serait également susceptible de conférer aux particules un aspect plus lisse et ainsi d'améliorer l'écoulement de la poudre. L'influence de la composition chimique de surface est complexe et doit être considérée simultanément avec les propriétés physiques de la surface des particules, telle que la rugosité, définie comme la dimension spatiale des aspérités de surface.

Des mesures d'énergie d'écoulement ont été réalisées sur des poudres de lait écrémé et entier afin de mettre en évidence l'influence de la composition de surface sur l'écoulement des poudres (Figure 7). Dans un premier temps, l'hélice pénétrait sept fois dans le lit de poudre à une vitesse de -100 mm.s⁻¹ afin de déterminer l'énergie nécessaire pour mettre en mouvement un volume donné de lit de poudre (énergie d'écoulement, Basic Flowability Energy, BFE). Les valeurs de BFE étaient similaires pour les deux poudres de lait, alors que les particules de lait entier étaient de plus grande taille et il était donc attendu qu'elles s'écoulaient plus facilement : ceci pouvait très vraisemblablement être expliqué par la très forte teneur en lipides (a priori très proche de 100 % au vu de l'analyse par microscopie confocale montrant une épaisse couche de lipides, en rouge, à la surface des particules, cf. Figure 7) à la surface des particules de lait entier, les rendant particulièrement collantes.»

Dans un second temps, la sensibilité de la poudre à la vitesse d'écoulement a été déterminée avec le test « Variable flow rate » : l'hélice pénétrait quatre fois dans le lit de poudre avec des vitesses tangentielles décroissantes de -100, -70, -40 et -10 mm.s⁻¹ et l'énergie d'écoulement BFE a été mesurée, afin de quantifier l'impact de la vitesse de l'hélice sur l'énergie d'écoulement. Celui-ci a été quantifié par le Flow Rate Index FRI, calculé en divisant l'énergie d'écoulement à une vitesse de -10 mm.s⁻¹ à l'énergie d'écoulement à une vitesse de -100 mm.s⁻¹. Le FRI de la poudre de lait écrémé, 1,65 ± 0,08, témoignait d'une sensibilité moyenne à la vitesse d'écoulement (1,5 < FRI < 3,0). Ce comportement était comparable à celui de la majorité des poudres alimentaires, pour lesquelles une diminution de la vitesse d'écoulement

induit un temps de contact interparticulaire plus grand, et donc une friction plus importante, menant à une **dégradation des propriétés d'écoulement à petite vitesse**. En revanche, les poudres de lait entier étaient quasiment insensibles à la vitesse de rotation de l'hélice : le FRI de $1,08 \pm 0,01$ obtenu signifiait que l'énergie nécessaire à -100 mm.s^{-1} et -10 mm.s^{-1} était quasiment identique. D'une manière générale selon la documentation technique du rhéomètre à poudres FT4 fournie par Freeman Technology, des valeurs de FRI proches de 1 sont retrouvées pour des poudres possédant des grandes particules (donc peu de points de contact interparticulaires) ou pour les particules ayant subi un traitement de surface. La présence d'une couche de matière grasse en surface des particules pourrait ainsi expliquer les résultats observés pour les poudres de lait entier.

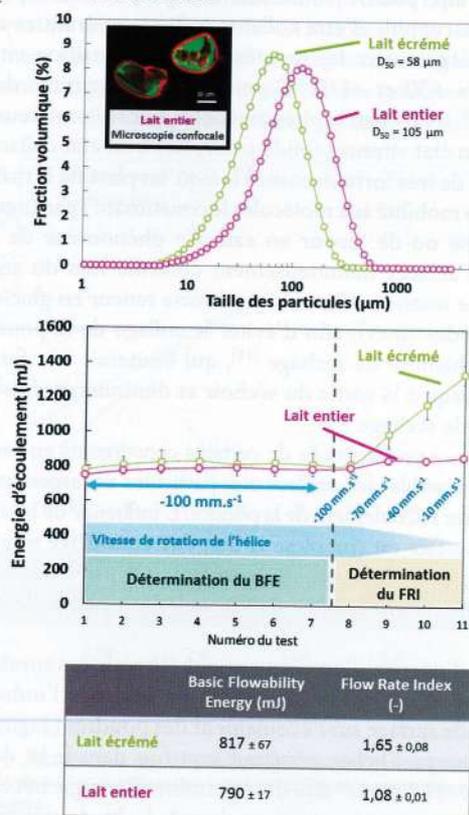


Figure 7 : Distribution granulométrique et aptitude à l'écoulement en milieu non confiné des poudres de lait entier et de lait écrémé.

Les barres d'erreur non visibles sont inférieures à la taille des marqueurs.

CONCLUSION

L'écoulement des poudres est un phénomène complexe mettant en jeu un grand nombre de paramètres physicochimiques propres à la poudre et à l'environnement, et dépendant des sollicitations thermomécaniques auxquelles est soumise la poudre dans les procédés de fabrication, lors de son transport et au cours du stockage. Depuis les premiers travaux majeurs d'Andrew Jenike à la fin des années 1960, de nombreux travaux ont été menés pour tenter d'établir des lois rhéologiques pour les milieux granulaires, mais la complexité des interactions interparticulaires à prendre en compte et la grande variété des milieux granulaires est encore un frein à une modélisation pertinente de l'écoulement des poudres dans les différents procédés et les différentes situations où elles sont mises en œuvre.

Des initiatives de collaboration pluridisciplinaire, mêlant entre autres physique des milieux granulaires, physicochimie et biochimie des poudres, génie des procédés et biophysique de la surface de particules, ont récemment vu le jour récemment pour tenter d'élucider les facteurs clés dans l'écoulement de poudres d'origines variées, dont les poudres complexes de l'industrie agroalimentaire. A ce titre, il convient de citer

le projet européen PowderReg (<http://powderreg.fr/>), impliquant les universités de Lorraine, de Liège, du Luxembourg, de Kaiserslautern et de la Sarre, ainsi que deux industriels concernés par les problématiques d'écoulement des poudres, Novacarb et Granutools. Ce projet de recherche collaboratif a pour objectif de mieux comprendre et maîtriser l'aptitude à l'écoulement des poudres lors de leur fabrication, de leur transport et de leur stockage. Pour ce faire, un démonstrateur expérimental pilote (comprenant tapis vibrant, trémie, plan incliné, compacteur...) et des outils numériques seront développés au cours de ce projet se déroulant de 2017 à 2020.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article tiennent à remercier le consortium du projet régional Lorraine ExtraPole (<http://agritech-france.fr/projet-extrapole/>) pour le financement du rhéomètre à poudres FT4 et le Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO) pour le financement de la thèse d'Eliane Gnagne.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Juliano, V. Barbosa-Canovas, Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications, Annu. Rev. Food Sci. Technol. 1 (2010) 211–239. doi:10.1146/annurev.food.102308.124155.
- [2] R. Freeman, Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders — A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell, Powder Technol. 174 (2007) 25–33. doi:10.1016/j.powtec.2006.10.016.
- [3] A.W. Jenike, Quantitative design of mass-flow bins, Powder Technol. 1 (1967) 237–244. doi:10.1016/0032-5910(67)80042-1.
- [4] E.H. Gnagne, J. Petit, C. Gaiani, J. Scher, G.N. Amani, Characterisation of flow properties of foutou and fofou flours, staple foods in West Africa, using the FT4 powder rheometer, J. Food Meas. Charact. (2017) 1–9. doi:10.1007/s11694-017-9489-2.
- [5] X. Fu, D. Huck, L. Makein, B. Armstrong, U. Willen, T. Freeman, Effect of particle shape and size on flow properties of lactose powders, Particology. 10 (2012) 203–208. doi:10.1016/j.partic.2011.11.003.
- [6] C. Salameh, J. Scher, J. Petit, C. Gaiani, C. Hosri, S. Banon, Physico-chemical and rheological properties of Lebanese kishk powder, a dried fermented milk-cereal mixture, Powder Technol. 292 (2016) 307–313. doi:10.1016/j.powtec.2016.01.040.
- [7] M. Leturia, M. Benali, S. Lagarde, I. Ronga, K. Saleh, Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods, Powder Technol. 253 (2014) 406–423. doi:10.1016/j.powtec.2013.11.045.
- [8] K. Meyer, I. Zimmermann, Effect of glidants in binary powder mixtures, Powder Technol. 139 (2004) 40–54. doi:10.1016/j.powtec.2003.09.007.
- [9] D. Strayer, M. Belcher, T. Dawson, B. Delaney, J. Fine, B. Flickinger, P. Friedman, C. Heckel, J. Hughes, F. Kincaid, Food Fats and Oils, Institute of Shortening and Edible Oils, Wash. DC. (2006).
- [10] Y. Nikolova, J. Petit, C. Sanders, A. Gianfrancesco, N. Desbenoit, G. Frache, G. Francius, J. Scher, C. Gaiani, Is it possible to modulate the structure of skim milk particle through drying process and parameters?, J. Food Eng. 142 (2014) 179–189. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.05.026.
- [11] J. Petit, F. Michaux, C. Jacquot, E. Chávez Montes, J. Dupas, V. Girard, A. Gianfrancesco, J. Scher, C. Gaiani, Storage-induced caking of cocoa powder, J. Food Eng. 199 (2017) 42–53. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.12.005.
- [12] P. Schuck, R. Jeantet, A. Dolivet, Analytical Methods for Food and Dairy Powders, John Wiley & Sons, 2012.
- [13] A. Gianfrancesco, Spray drying engineering: particle stickiness in relation with agglomeration, Ph. D. thesis, AgroParisTech, 2009.