



HAL
open science

Le génie particulière : une priorité stratégique pour le développement des industries alimentaires

Joel Abecassis, Ali Benhassaine, D. Chulia, John A. Dodds, Jacques Fages, Pierre Guigon, J. L. Ilari, Jean Pierre Melcion, J. Vasseur

► To cite this version:

Joel Abecassis, Ali Benhassaine, D. Chulia, John A. Dodds, Jacques Fages, et al.. Le génie particulière : une priorité stratégique pour le développement des industries alimentaires. *Industries Alimentaires et Agricoles*, 1997, 114 (9), pp.579-585. hal-01845795

HAL Id: hal-01845795

<https://hal.science/hal-01845795>

Submitted on 28 Aug 2018

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.

LE GÉNIE PARTICULAIRE : UNE PRIORITÉ STRATÉGIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES *

J. ABECASSIS⁽¹⁾, A. BENHASSAINE⁽²⁾, D. CHULIA⁽³⁾, J. DODDS⁽⁴⁾, J. FAGES⁽⁴⁾, P. GUIGON⁽⁵⁾, J.-L. ILARI⁽⁶⁾, J.-P. MELCION⁽⁷⁾, J. VASSEUR⁽⁸⁾.

1. DÉFINITION DU DOMAINE ET PROBLÉMATIQUE DES RECHERCHES

Le génie particulaire relève du domaine des solides divisés. Il touche des populations de particules, éventuellement hétérogènes, de taille comprise entre le micromètre et le millimètre (pulvérulents, poudres), voire plus dans certains cas (grains, granulés). Ces populations sont susceptibles de s'écouler et/ou de se consolider mais se traitent toujours en vrac.

Cette définition conduit à déterminer les trois niveaux principaux d'intérêt du génie particulaire :

- L'obtention de particules : cristallisation, précipitation, broyage, séparation ;
- Leur stockage et leur manutention : écoulement, transfert, mélange, ségrégation ;

- Leur mise en forme avec ou sans contrainte : mélange, émulsification, agglomération et séchage ;

La limite du domaine du génie particulaire se situe à la disparition de l'état discontinu au niveau de l'échelle d'observation retenue (de l'ordre du micromètre). C'est ainsi que dans le domaine des céréales, on s'intéressera aux farines jusqu'à leurs propriétés d'hydratation et de mélange au cours du pétrissage, mais en laissant de côté la fin des opérations unitaires de la panification comme le façonnage, la fermentation et la cuisson.

Le génie particulaire va s'intéresser à des opérations unitaires très diverses touchant aux poudres alimentaires comme non alimentaires en cherchant à caractériser les produits et les procédés suivant des méthodes généralisables, quel que soit le domaine d'utilisation. Si les deux filières principalement concernées dans les Industries Alimentaires sont celles des céréales et du lait, le champ d'application du génie particulaire est cependant très vaste. Le Tableau 1 présente quelques unes des principales opérations unitaires liées au génie particulaire dans les industries alimentaires.

Cette très large diversité d'utilisation des poudres par les industries alimentaires ne suffit pourtant pas à en justifier l'intérêt et l'importance économique. Traditionnellement, les poudres restent encore trop souvent considérées comme des produits à faible valeur ajoutée. Dans la plupart des entreprises, l'empirisme prévaut et le principal souci vise à trouver des solutions techniques permettant d'obtenir un rendement technique élevé et/ou un produit d'une pureté minimale pour satisfaire une réglementation ou un marché. On doit toutefois considérer que les tonnages traités sont importants et que les coûts engendrés peuvent alors devenir considérables. Le broyage peut ainsi représenter jusqu'à 50 % du prix de revient de certaines poudres alimentaires. Par ailleurs, l'obtention de propriétés fonctionnelles particulières constitue souvent un enjeu décisif. Par exemple, si la valeur ajoutée du stockage est faible, voire négative, la maîtrise des propriétés

d'écoulement représente bien un enjeu déterminant pour la commercialisation des produits en vrac. Chaque métier a donc développé une certaine maîtrise de la technologie du pulvérulent qu'il fabrique, prépare ou même utilise. L'importance du savoir faire en matière de technologie des poudres a donc conduit la plupart des techniciens mais aussi des scientifiques à considérer que ce domaine relevait de « l'art » et qu'on ne pouvait y trouver de concept unificateur. L'art entraîne la confidentialité ; il n'y a eu que peu d'échanges entre des métiers dont on sait que la connaissance, même approfondie, reste difficile à transférer.

C'est probablement pourquoi les connaissances scientifiques dans le domaine des poudres restent encore aujourd'hui limitées et ne permettent pas de concevoir des équipements capables de produire des poudres ayant les propriétés spécifiques désirées. On commence seulement à réaliser que les poudres sont composées de particules possédant une série de caractéristiques particulières et que ce sont les caractéristiques de ces particules qui vont déterminer le comportement de la matière granulaire dans son ensemble. Cependant certaines avancées récentes dans ce domaine indiquent qu'une meilleure connaissance des propriétés des pulvérulents devrait permettre de développer des technologies capables de conférer aux poudres des propriétés fonctionnelles particulières (encapsulation, enrobage, systèmes multi-couches, etc.) et d'accroître ainsi fortement leur valeur ajoutée. Cette voie nouvelle pourrait constituer dans les prochaines années une large réserve d'innovation pour les industries alimentaires.

Le domaine des solides divisés se caractérise donc par une technologie extrêmement riche et foisonnante mais qui ne peut s'appuyer sur une méthodologie scientifique générale et validée. Compte tenu de ce décalage important entre la science et la technologie ainsi que des enjeux industriels, le développement du Génie Particulaire dans les industries alimentaires doit être considéré comme une priorité stratégique.

* La présente étude a été demandée par le GIS-RIA (GIS-Recherche Industries Alimentaires) à un groupe de travail coordonné par Joël ABECASSIS, dans le cadre d'une étude entreprise par le groupement sur les priorités de la recherche publique sur les industries alimentaires.

Créé en 1993 avec le soutien des Ministères en charge de l'Agriculture et de la Recherche, le GIS-RIA résulte de la volonté de 11 organismes de recherche et d'enseignement supérieur spécialisés dans les industries alimentaires (INRA, CEMAGREF, CIRAD, CNEVA, IFREMER, ENITIA, ENSAIA, ENSBANA, ENSIA, ISIM, ISTAB), d'assurer une meilleure concertation sur la stratégie menée, la définition des programmes et leur mise en œuvre par chacun d'entre eux dans le domaine de la recherche sur les industries alimentaires.

Contact : P. Feillet, Fax : 04 67 61 26 45

(1) INRA-Montpellier

(2) Ecole des Mines d'Alès

(3) Université de Limoges

(4) Ecole des Mines d'Albi

(5) Université de Compiègne

(6) ENITIA-Nantes

(7) INRA-Nantes

(8) ENSIA-Massy

Tableau 1 - Quelques opérations unitaires relevant du génie particulaire alimentaire

Objet	Opérations Unitaires	Industries Alimentaires	Phénomènes concernés/Propriétés recherchées
Obtention de particules	Cristallisation Précipitation Broyage	Sucrierie Amidonnerie Meunerie, Alimentation animale	Nucléation, énergie de surface, solubilité densité, ségrégation, pureté propagation de la fracture, dureté, défauts de structure, distribution granulométrique
Séparation	Nettoyage - triage Classification Filtration Décantation Centrifugation Tamisage Elutriation	Fruits, légumes, café Laiterie, Ind. diverses Sucrierie, brasserie Huilerie, vinification Levurerie, laiterie Meunerie, ind. diverses Semoulerie, Ind. diverses	Taille, forme, propriétés aérodynamiques Taille, forme, flottation, propriétés aérodynamiques Ségrégation Taille, densité, Séparation, densité, Classement granulométrique, séparation, Densité, propriétés aérodynamiques
Mélange	Mélange à sec Dispersion Emulsification	Alimentation animale Chocolaterie Laiterie, œufs, etc.	Distribution granulométrique, forme, homogénéité Taille, friction, homogénéité Stabilité, dimensions particulaires, tension de surface
Mise en forme	Granulation Compaction Enrobage Pétrissage Extrusion Séchage - atomisation	Couscous Potages deshydratés Biscuiterie, Confiserie, etc. Panification, biscuiterie Pâtes alimentaires Laiterie, etc.	Tension de surface, accroissement de taille, Dureté, friction, réduction de volume Énergie de surface, adhérence, Hydratation, propriétés rhéologiques Hydratation, viscosité, Viscosité, stabilisation
Transport	Transport pneumatique Fluidisation	Toutes industries Toutes industries	Interactions particulaires, transport solide Écoulement, mélange, ségrégation, séchage

2. LES STRUCTURES DE RECHERCHE

Les principales équipes de la recherche publique, industrielle et des centres techniques concernées par le génie particulaire dans les industries alimentaires sont présentées en Annexe.

Les moyens consacrés par la recherche publique dans le domaine du génie particulaire et plus particulièrement dans les poudres alimentaires restent encore extrêmement limités et n'ont fait l'objet d'aucun effort de structuration. L'INRA, par exemple, ne mobilise guère que quelques chercheurs, géographiquement dispersés, et dont la pyramide des âges est déséquilibrée vers les valeurs élevées. Mais les potentialités d'application industrielle conduisent dans le même temps les Ecoles des Mines (Albi et Alès notamment) à redéployer leurs compétences au-delà de leurs secteurs traditionnels.

Du côté de la recherche industrielle, la situation est aussi très disparate en raison de l'existence de structures de tailles très diverses. Les grandes sociétés ou celles associées à des groupes pharmaceutiques pour la fabrication et la commercialisation d'additifs ont développé de fortes compétences internes mais les connaissances ont du mal à diffuser en raison d'une concurrence industrielle très forte. Pour les autres entreprises, la faible part de leur effort de R&D conjointement à une approche très empirique laisse à penser que les problèmes de génie particulaire ne sont guère abordés avec des moyens internes. Les problèmes sont plutôt sous-traités afin de

résoudre les difficultés ponctuelles rencontrées. Ce sont les équipementiers qui pourraient constituer, aujourd'hui, le principal moteur de la demande vers la recherche publique. Malheureusement, aucun grand équipementier européen du secteur (NIRO, APV, STORK, BUHLER, ALPINE) n'est français.

Les centres techniques spécialisés sur les poudres et additifs (INNOV'IA, BIONOV) développent une approche très pragmatique tournée vers la demande industrielle surtout centrée sur les problèmes de caractérisation et de formulation des produits. Les autres Centres Techniques concernés par ces problèmes (ADRIA, TECALIMAN, CTUC) cherchent à développer la même approche pour satisfaire des demandes particulières de leur filière.

Bien que la thématique « Génie particulaire » rencontre un écho de plus en plus favorable, les relations entre la recherche publique, les Centres Techniques et la recherche industrielle ne se sont guère développées au cours de ces dernières années. Tout le monde s'accorde pour souligner que ces relations sont marquées par l'importance accordée aux problèmes de confidentialité et par l'absence quasi totale d'appels d'offre publique dans ce secteur.

Cet état traduit aussi probablement la difficulté d'une animation transversale par rapport à une animation par filière. Les demandes industrielles peuvent ou non être satisfaites sans toutefois susciter une offre vers la recherche publique. En outre, la grande hétérogénéité du domaine joint

te à des demandes trop ponctuelles ont constitué un frein à la diffusion des connaissances et à l'organisation de structures visant à réunir les compétences nationales dans le secteur des industries alimentaires. Cependant, il existe au niveau national des instances et structures fédératives (GFGP², PARTEC³, Colloque Poudres de Lyon SCI) prêtes à accepter une forte participation des industries alimentaires. Ces instances sont encore des relais vers le niveau européen (EFGC⁴) ou international (IFPRI⁵).

En Europe, la France fait figure de parent pauvre dans le domaine de la recherche sur le génie particulaire. Celle-ci s'est largement développée notamment en Allemagne, Hollande, Angleterre et même en Norvège. Sur le plan mondial, on note une forte dynamique de cette thématique au Japon et un développement plus dispersé aux États-Unis. La faiblesse de la France dans ce secteur proviendrait surtout de l'insuffisance d'osmose entre la recherche, l'industrie et les équipementiers. Cette carence ne semble pas permettre de prendre l'initiative de créer un réseau européen dans ce domaine avant qu'une meilleure structuration ne soit intervenue au niveau national.

2. GFGP : Groupe Français de Génie des Procédés, secteur poudres.

3. PARTEC : Consortium basé à UTC Compiègne.

4. EFGC : Fédération Européenne de Génie Chimique ; groupes de travail : (1) Broyage et classification ; (2) Stockage des poudres ; (3) Caractérisation des poudres.

5. IFPRI : International Fine Particle Research Institute (Consortium d'industries multinationales).

3. PRINCIPAUX RÉSULTATS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Le groupe de travail n'a pas disposé de moyens lui permettant de faire une étude bibliométrique sur le sujet. L'analyse qu'il a menée en la matière fait ressortir que la poussée générale des connaissances a fait bénéficier le secteur des industries alimentaires d'une avancée sur les trois principaux points suivants : les méthodes instrumentales de caractérisation des poudres, par exemple les techniques d'analyses d'images ; l'essor des statistiques multidimensionnelles en tant qu'outil de gestion et de prédiction des propriétés des poudres, le développement du concept de transformation de phase.

- En faisant passer la caractérisation des particules de une à deux dimensions, l'analyse d'images a permis d'ouvrir un nouveau et vaste champ d'analyse mésoscopique particulièrement bien adapté au génie particulaire. La très rapide diminution des coûts des équipements en même temps que le développement exponentiel de la vitesse de calcul ont permis une généralisation de l'usage de ces techniques dans les industries alimentaires. La tendance la plus récente vise à utiliser ces techniques en ligne en vue de développer des capteurs et des systèmes d'aide à la décision pour le contrôle des procédés de fabrication (ex : contrôle des broyeurs ou de la conduite des fours de biscuiterie). En parallèle, se sont développées la mise au point et l'amélioration des méthodes de caractérisation des propriétés des poudres en vrac. On dispose aujourd'hui de méthodes spécifiques de caractérisation de la coulabilité, de l'aptitude à la reconstitution ou à la rehydratation, au séchage (sans coller aux parois), à encore à l'agglomération humide ou à sec. Des méthodes sont aussi proposées pour mesurer la capacité des poudres à s'instantanéiser ou à retenir des arômes.

- Dans l'état actuel de nos connaissances, la caractérisation d'une poudre nécessite un grand nombre de déterminations analytiques (de 20 à 80 suivant les produits). Malgré le développement des méthodes de caractérisation, cette complexité analytique a commencé à être surmontée grâce au progrès des moyens de calculs et des méthodes de la statistique multidimensionnelle. Une meilleure gestion des données a permis de réduire le nombre de données pertinentes nécessaires pour caractériser les poudres et établir des modèles empiriques permettant de prédire leur comportement. Ces développements se sont révélés très utiles pour optimiser la conduite de nombreuses lignes de fabrication. Cette approche apparaît très précieuse et bien acceptée dans les industries alimentaires qui souhaitent en adopter les concepts.

- D'un point de vue scientifique, c'est probablement le concept de transformation de phase (ex : température de transition vitreuse) qui a représenté la principale percée conceptuelle. Ce concept issu de la science des polymères peut

s'appliquer à de nombreux procédés des industries alimentaires qui mettent en œuvre des polymères (amidon, protéines) et au cours desquels, la température et la teneur en eau varient (séchage, mise en forme ou cuisson). L'application de ce concept permettrait d'expliquer dans de nombreux cas l'apparition du caractère « collant ». Ce phénomène est éventuellement gênant pour un bon fonctionnement (collage aux parois, pertes de produit, dispersion des temps de séjour), mais il peut aussi être utile pour l'agglomération des poudres par voie humide ou leur compaction lorsqu'il est combiné avec une certaine pression. L'apparition du caractère collant serait reliée au franchissement de la température de transition vitreuse (Tg) qui correspond à un changement d'état du matériau se traduisant par une augmentation de la mobilité des molécules révélée par un léger pic endothermique en AED. Au cours d'un procédé, passer au-delà de la Tg a en général les conséquences suivantes : le matériau devient plus déformable, voir plastique, visqueux et/ou collant ; la diffusivité des molécules adsorbées (eau, arômes) augmente, et leur rétention diminue ; la mobilité du substrat autorise une certaine (re) cristallisation si le produit est en partie amorphe, ou des réactions biochimiques impossibles à l'état solide (réactions enzymatiques, changements d'état cristallin). L'étude de la transition vitreuse apparaît donc comme un concept utile pour expliquer et prévoir le comportement d'une poudre au cours d'un procédé, en particulier pour décrire les phénomènes de collage et d'agglomération entre particules.

Toutefois pour les matériaux polymériques alimentaires, outre la teneur en eau et la température, d'autres facteurs exercent une influence sur le comportement des poudres (la pression, le cisaillement, la durée) montrant que le domaine d'étude du comportement des poudres est multidimensionnel.

4. ÉTAT DE LA SCIENCE ET DES TECHNOLOGIES

Le nombre et la variabilité biophysique de ses constituants représentent la première difficulté de caractérisation des poudres alimentaires. Les particules qui constituent un solide divisé peuvent être caractérisées par leur structure, leur morphologie ainsi que par certaines propriétés physico-chimiques internes et de leur surface. Ce sont ces 4 groupes de facteurs qui confèrent à une poudre ses propriétés comportementales. Si pendant longtemps on a multiplié le nombre de mesures pour chercher la méthode pertinente de caractérisation d'une poudre pour sa valeur d'usage, on considère, aujourd'hui, que l'information pertinente ne peut venir que du croisement de différentes méthodes et de leurs corrélations ou non avec des résultats attendus.

D'un point de vue structural, les particules peuvent être sous forme individualisées ou intégrées dans des agrégats ou des agglomérats. A la dif-

férence des minéraux dans lesquels de fortes interactions coulombiennes permettent de stabiliser des structures cristallines, les particules organiques sont caractérisées par des interactions de type Van der Waals de plus faible énergie qui ne peuvent conduire à de vrais cristaux. Des particules identiques vont s'associer pour former des agrégats. Les forces de Van der Waals qui dépendent directement de la composition chimique vont y jouer un rôle déterminant en contribuant à la fois à l'adhérence entre les surfaces et aux interactions interparticulaires. Les agrégats sont très difficiles à broyer en raison de leur faible surface spécifique interne. Au contraire, les agglomérats sont formés de particules identiques ou non, associées d'abord par des ponts liquides suivis d'un séchage. La présence de défauts et d'irrégularités dans ces structures sont susceptibles de modifier les propriétés chimiques ou biologiques des poudres. Ces défauts peuvent être générés en introduisant des adjuvants ou des actions mécaniques comme, par exemple des hautes pressions pour fissurer les produits, en vue de mieux les broyer. Un approfondissement des connaissances de la microstructure et de la composition des poudres alimentaires devrait favoriser l'émergence du génie particulaire alimentaire. Ce qui pourrait conduire, à terme, à produire des particules dont la morphologie, les propriétés et l'état de surface pourraient être modelées pour obtenir les propriétés désirées et/ou à la synthèse de nouvelles particules ayant des propriétés spécifiques.

Les propriétés morphologiques en particulier la taille et la forme des particules sont celles qui ont été le plus étudiées. On sait qu'en modifiant la taille on fait varier le rapport entre la surface et le volume d'une particule ce qui permet de contrôler l'importance relative des propriétés physico-chimiques internes par rapport à celles de la surface. Pourtant, mesurer la taille de particules n'est pas une opération triviale. En effet, peu de particules sont sphériques et on ne connaît pas toujours quelles sont les grandeurs pertinentes de caractérisation de la taille des particules (surface/volume pour les plus petites, diamètre médian de masse pour les plus grosses). Les mesures de la forme des particules ont beaucoup progressé avec le développement des techniques d'analyse image. La détermination de la taille et de la forme des particules permettent d'en déduire leur aire spécifique. Sinon, on doit avoir recours à des mesures plus globales telles que les mesures d'adsorption gazeuse ou de porosimétrie par mercure qui permettent, en outre, de quantifier l'aire spécifique interne ainsi que la distribution de la taille des pores. Des progrès récents ont permis de développer des méthodes de caractérisation de la taille des particules en continu. Certaines de ces méthodes sont d'un coût compatible avec les budgets des industries alimentaires et devraient donc pouvoir être rapidement appliquées à la gestion de procédés (ex : contrôle en ligne de la granulométrie des produits de mouture). D'autres caractéris-

tiques seront bientôt mesurables grâce au couplage de différentes méthodes analytiques (aire spécifique, propriétés rhéologiques...). Le développement d'une instrumentation de mesure en ligne pouvant s'intégrer dans une boucle de régulation constitue, à court terme, un des facteurs principaux d'amélioration du contrôle des procédés, de la productivité et de la qualité des produits finis dans les industries alimentaires.

La composition d'une poudre est souvent décrite en fonction de son pourcentage de pureté. Cependant, une composition moyenne décrit surtout l'intérieur de la particule plutôt que sa surface. Or, c'est davantage de la composition de leur surface que dépendent les propriétés des particules et des pulvérulents. De plus, au cours des procédés, les phénomènes de transfert peuvent entraîner des modifications de composition de la surface des particules. Comme les interactions moléculaires conduisent à une réduction de l'énergie libre, l'énergie de surface d'un solide résulte de l'excès d'énergie des molécules à la surface des particules qui ont un moindre voisinage que celles qui sont situées dans la masse. C'est cette énergie de surface qui contribue de manière significative aux phénomènes d'adhérence et de friction. Son contrôle et sa modification trouveraient de nombreuses applications dans les secteurs des industries alimentaires (mouvabilité, dispersibilité, adhésion, etc.). La caractérisation et la mesure de ces phénomènes de surface restent la difficulté majeure. La plupart des méthodes utilisées sont descriptives ne permettant d'étudier qu'un effet moyen pour une surface donnée :

- Les mesures d'angle de contact permettent d'estimer empiriquement les tensions de surface de solides en particulier de polymères mais ces mesures restent difficiles à appliquer sur des poudres.
- Les mesures électrocinétiques comme le potentiel zêta ou la densité de charge de surface sont utilisées pour caractériser la surface des particules et comparer des poudres entre elles. Toutefois, l'interprétation de ces données reste délicate pour connaître précisément la surface de particules.
- Les mesures d'adsorption constituent d'excellentes mesures pour analyser la surface des poudres mais restent souvent limitées à des études académiques, car elles sont très consommatrices en temps.
- Des techniques de microspectrophotométrie UV et IR à transformée de Fourier sont de plus en plus utilisées pour caractériser les groupes chimiques à la surface des particules. La microcalorimétrie de flux pourrait constituer une voie nouvelle de grand intérêt. Avec cette technique une molécule témoin peut être choisie pour tester un groupe chimique (hydrophobe, acide ou basique) à la surface de particules.

6. Johnson, K.L. ; Kendall, K. ; Roberts R. 1971. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings Roy. London. Ser. A.*, 324, p. 301.

- Les microscopes à force atomique et à effet tunnel ont été développés pour étudier des surfaces très petites. Ces techniques qui permettent d'étudier des forces à l'échelle microscopique et la topographie de la particule plutôt que des effets nets devraient néanmoins se révéler d'un grand intérêt pour mieux connaître les surfaces de grande complexité (argiles, par exemple). Enfin, si l'emploi de techniques analytiques utilisant le vide se trouve limité sur des produits biologiques dans lesquels les interactions hydrophobes dominent, la mise au point de la microscopie électronique environnementale laisse espérer le développement de nouveaux outils de caractérisation mieux adaptés aux produits des industries alimentaires.

Les propriétés de surface des particules dépendent non seulement de la composition chimique de la surface mais aussi de sa topographie qui va influencer l'encombrement stérique, le frottement et les interactions mécaniques avec les autres particules et d'autres surfaces. Le développement très rapide de l'emploi des surfactants dans les industries alimentaires (enrobages mono ou multicouches) montre l'intérêt d'une meilleure maîtrise de la topographie des particules en vue de modifier les propriétés de surface des pulvérulents. Poursuivre dans cette voie offrirait donc la possibilité de développer de nouvelles fonctionnalisations des poudres et la création de nouveaux additifs.

Comme les propriétés collectives des particules dépendent de la nature des interactions de contact entre les particules, il est essentiel de comprendre ce qui contrôle la mécanique des contacts interparticulaires. La prise en compte de la théorie JKR⁶ qui considère les forces intermoléculaires (de type Van des Waals) pourrait s'avérer fort utile pour mieux comprendre la mécanique de contact notamment dans les milieux biologiques déformables (adhérence). D'autres applications pourraient en être tirées en particulier dans le domaine du transport des poudres denses au cours desquelles les interactions de friction jouent un rôle important. Par ailleurs, l'utilisation de la microscopie à champ proche permettrait de mieux comprendre l'origine de la friction à l'échelle microscopique. Ces études devraient conduire à une meilleure compréhension de la cohésion d'un agglomérat en relation avec sa résistance au broyage. La combinaison de ces connaissances avec la mesure des vitesses des particules au cours des procédés de transformation constituerait un bon axe de recherche pluridisciplinaire avec comme application non seulement la compréhension de l'aptitude au fractionnement des matières premières biologiques solides, mais aussi celle des phénomènes d'érosion des particules au cours de leur manutention, ou encore de l'aptitude à la compaction des poudres.

Le génie particulaire embrasse donc une foule d'industries alimentaires qui utilisent des opérations unitaires similaires. La maîtrise et l'amélioration de ces opérations unitaires devront passer,

à terme, par une meilleure prise en compte des phénomènes physico-chimiques décrits ci-dessus. Or ce transfert ne pourra se faire que lorsque les méthodes analytiques qui y sont associées pourront être prises en compte dans les industries alimentaires. Ce qui est loin d'être le cas. Aujourd'hui, la plus grande difficulté vient du fait que les méthodes utilisées sont très globales et ne permettent pas d'isoler une des propriétés particulières d'un poudre. Comment peut-on, par exemple, interpréter un angle de talus ? Néanmoins, ces méthodes empiriques sont indispensables pour caractériser les changements dus aux procédés et restent aujourd'hui tout à fait pertinentes même si elles ne permettent ni de comprendre ni de prédire le comportement des solides divisés. Un effort devra donc être entrepris dans le domaine analytique pour permettre aux industries alimentaires de s'approprier ces nouvelles techniques de caractérisation.

Les procédés alimentaires se sont, d'une manière générale, « construits sur l'empirisme » mais ils ont bénéficié d'une très longue expérimentation qui semble aujourd'hui ne laisser qu'une voie étroite pour l'amélioration et l'innovation. Pourtant dans le domaine des poudres, compte tenu des faibles efforts entrepris jusqu'à ce jour, les démarches de type boîte noire se révèlent encore suffisantes dans bien des cas pour optimiser chaque procédé ou chaque produit mais ne permettent pas de généraliser. C'est ainsi, par exemple, que sont aujourd'hui traités de manière satisfaisante, d'un point de vue concurrentiel, les problèmes de rétention d'arômes dans le séchage des poudres. Pour une installation donnée, cette démarche permet, en effet, d'optimiser les quantités de cyclodextrine et de gomme arabique ajoutées. Mais, si on accepte aujourd'hui que près des 2/3 des arômes initiaux soient perdus au cours des opérations de séchage, on mesure aussi davantage la marge importante de progrès restant à faire dans ce domaine ainsi que les avantages compétitifs y afférents. Bien évidemment, une réduction significative de ces pertes nécessitera des recherches plus amont. Mais pour progresser de manière notable, il faudra, dans certains cas, probablement aller jusqu'à remettre en cause les fondements des procédés actuels.

Le génie particulaire appliqué aux procédés alimentaires doit aussi prendre en compte certains problèmes spécifiques des industries alimentaires liés à la très grande réactivité des composants biologiques à température ambiante alors que dans les industries minérales ces réactivités ne sont obtenues qu'après avoir élevé fortement la température des produits. L'influence des variations de température et de teneur en eau sont prépondérantes, susceptibles de provoquer des changements de phase au sein des particules en modifiant profondément leurs propriétés. De plus, ces deux facteurs vont aussi entraîner des modifications des activités biochimiques (catalyse enzymatique, oxydoréduction...) pouvant conduire à des transformations irréversibles des

produits. Cette très grande réactivité reste encore aujourd'hui subie dans la plupart des industries alimentaires.

La prise en compte de l'ensemble des facteurs décrits ci-dessus apparaît donc indispensable si l'on désire fabriquer des poudres alimentaires possédant des propriétés spécifiques et contrôlées.

5. RECOMMANDATIONS

Beaucoup de nos industries alimentaires sont aujourd'hui considérées comme matures. Par conséquent, leurs Directions Générales et leurs Directions Industrielles se préoccupent prioritairement de problèmes de rendement et de productivité ou s'attachent aux questions de développement de produits pour renouveler leur offre. Par ailleurs, l'accès au marché se trouve de plus en plus assujéti au respect strict des cadres imposés par la définition des produits (réglementation) et la normalisation des procédures (ISO 9002 ou équivalent). Cette tendance lourde de l'évolution des Industries Alimentaires vers une plus grande standardisation va-t-elle brider toute innovation ?

En réalité, non, si on considère que le procédé de fabrication constitue un moyen privilégié pour construire la qualité. C'est bien cette démarche qui prévaut aujourd'hui dans le secteur de la Pharmacie où les caractéristiques des matières premières et les procédures sont encore plus précises que dans celui de l'alimentation. Dans les entreprises pharmaceutiques, on considère en effet qu'une meilleure valorisation des produits passe par une meilleure compréhension et une meilleure maîtrise des procédés. Le génie particulaire y est devenu une priorité de développement pour les prochaines années. La démarche n'est plus de chercher à utiliser des poudres à faible prix de revient mais de fabriquer des particules possédant des caractéristiques requises pour leur usage final. C'est cette démarche qu'il conviendrait d'initier et soutenir au sein des industries alimentaires pour chercher à améliorer la maîtrise de la qualité des poudres alimentaires et développer un élément de compétitivité pour le long terme. Le principal obstacle à cette démarche est que la part consacrée par les industries alimentaires à la recherche et plus particulièrement celle concernant les procédés est extrêmement faible comparée à la part qui y est consacrée par les industries pharmaceutiques.

L'innovation dans le domaine du génie particulaire alimentaire ne pourra donc passer, dans un premier temps, que par un effort de la recherche publique ainsi que par un transfert intersectoriel des connaissances. Les besoins de recherche en matière de génie particulaire sont nombreux et concernent pratiquement l'ensemble des industries alimentaires.

Sans entrer dans les détails programmatiques, les efforts qui devront être soutenus peuvent se

répartir suivant 5 propositions principales :

1. Caractériser les particules et les pulvérulents

La maîtrise des procédés passe par l'introduction dans les équations et/ou les algorithmes à la fois de données énergétiques mais aussi de valeurs de caractéristiques physico-chimiques des particules. Or, si la quantification des transferts de masse et de chaleur est déjà bien prise en compte par le génie des procédés alimentaires, la caractérisation des propriétés physiques des poudres alimentaires reste encore à développer compte tenu du nombre de propriétés (près d'une centaine) qu'il convient de mesurer pour caractériser une poudre. Comme cet effort constitue une priorité scientifique et une forte attente industrielle, le groupe de travail propose de répartir cette charge sur plusieurs laboratoires en mettant en place un programme fédérateur dont l'objectif finalisé serait de constituer une banque de données et rédiger un ouvrage regroupant l'ensemble des propriétés physiques des poudres alimentaires « Handbook of food particles ». La rédaction d'un ouvrage collectif présenterait le grand intérêt de faire collaborer des équipes alimentaires et non alimentaires et d'initier, au sein du GIS-RIA, la structuration d'un réseau scientifique sur le génie particulaire alimentaire.

Au-delà des déterminations détaillées de l'ensemble des caractéristiques des poudres, par des méthodes globales et empiriques nécessaires à la caractérisation des pulvérulents, ou par des méthodes permettant de mieux appréhender les phénomènes de friction et d'énergie de surface des particules, l'utilisation d'outils mathématiques et statistiques devrait permettre d'extraire de l'ensemble des données l'information pertinente en vue de développer des capteurs et des méthodes de caractérisation en ligne qui seront indispensables pour maîtriser les procédés de transformation et garantir la qualité des produits finis.

2. Comprendre comment les propriétés singulières des particules se traduisent dans le comportement collectif d'un pulvérulent et comment agir pour modifier ces propriétés

Passer des propriétés des particules aux propriétés collectives constitue probablement le principal enjeu scientifique des prochaines années pour le développement du génie particulaire dans les secteurs alimentaires comme non alimentaires. En effet, les principales opérations de transformation des solides divisés (écoulement, broyage, ségrégation, mélange, agglomération ou mise en forme) mettent en jeu des interactions particulières de nature et d'intensité différentes dont il convient de faire la part suivant les opérations unitaires et les matières premières mises en œuvre. Cette approche devrait permettre de

mieux rendre compte des effets d'échelle et dégager des lois d'extrapolation du comportement de la matière granulaire en tas. Dans ce sens, prenant en compte les problèmes plus particuliers liés aux produits biologiques, il conviendrait d'orienter les travaux vers une meilleure prise en compte de :

– *L'hétérogénéité morphologique des particules en passant de la caractérisation de la taille à celle de la forme (analyse d'image) puis du volume (structure 3D à haute résolution).*

– *Les propriétés rhéologiques des poudres en y intégrant l'incidence des changements de phases (sous l'effet de la température et de l'hydratation) et de manière à simuler les traitements subis par les poudres en vue d'établir des modèles de connaissance à partir de variables universelles.*

– *La composition de la surface des particules en vue de mieux comprendre les interactions physico-chimiques (Van der Waals, hydrogènes et hydrophobes) et analyser leurs rôles dans les procédés de transformation, en particulier de ségrégation, mélange et mise en forme.*

L'observation et le suivi de l'évolution des interactions particulières constitue une priorité qui nécessite toutefois une instrumentation scientifique lourde (camera à positrons). Un tel équipement est déjà disponible à l'Université de Birmingham mais son accès en est saturé. Le groupe de travail se déclare prêt à poursuivre la réflexion pour définir le cahier des charges d'un gros équipement à vocation nationale, de sa localisation et de sa gestion.

3. Développer de nouveaux procédés et des poudres à haute valeur ajoutée

Les connaissances acquises suivant les axes de recherches définis ci-dessus pourront être utilisées pour générer et modifier des particules afin d'obtenir des pulvérulents aux propriétés désirées. Cette « fonctionnalisation » des particules pourra être obtenue par voie chimique (additifs) ou par des traitements physiques mettant en œuvre des équipements et des procédés appropriés. Ce volet pourra facilement donner lieu à des recherches contractualisables entre les équipes de la recherche publique, des centres techniques et de l'industrie. Trois domaines apparaissent prioritaires pour les industries alimentaires :

– *Le fractionnement par voie sèche des matières premières végétales de manière à obtenir des produits mieux définis du point de vue de leur structure et de leur composition. Cette maîtrise doit s'accompagner d'une réduction du coût énergétique et des rejets industriels en réduisant ou en court-circuitant les opérations de fractionnement par voie humide.*

– *La mise en forme associée aux opérations d'hydratation et de séchage. C'est probablement dans ce domaine que l'on peut s'attendre à la plus forte innovation produit avec le développe-*

ment de nouvelles textures, saveurs et couleurs ou encore l'introduction de molécules dont on voudra contrôler l'efficacité biologique (aliment santé).

- La stabilisation des systèmes pulvérulents biologiques de manière à en faciliter le stockage (conservation des propriétés physiques), leur transport (compactage, décompactage), leur mise en œuvre et leur utilisation (conservation des propriétés physico-chimiques).

Un renforcement des moyens humains et matériels de la recherche publique dans le secteur des industries alimentaires est souhaité. Un appel d'offres spécifique dans ce champ, s'appuyant sur des contraintes nutritionnelles ou hédoniques, permettrait à ces équipes de se structurer, de développer des collaborations intersectorielles, d'initier et renforcer leurs relations avec les centres techniques et l'industrie.

4. Favoriser une démarche intégrée et la mise en réseau des compétences

Le groupe de travail recommande d'aborder les problèmes de génie particulaire par une approche intégrée alors que jusqu'à présent le génie des procédés a plutôt eu tendance à privilégier l'optimisation séparée de chaque étape de la transformation. Une trop forte focalisation sur les opérations unitaires a probablement conduit à perdre de vue que les propriétés des particules obtenues au moment de leur fabrication se répercutaient tout au long de la chaîne de transformation avec pour conséquence une sous-estimation voire l'ignorance de leur incidence dans les étapes ultérieures de la transformation. Or, la compétitivité de nos industries passera demain par leur capacité à fabriquer à faible coût des produits de qualité supérieure ce qui implique une optimisation globale des chaînes de production. La mise en place d'un comité « génie particulaire » au sein du GIS-RIA faciliterait cette approche interdisciplinaire grâce à la mise en réseau des laboratoires concernés et le lancement de grands programmes fédérateurs capables de prendre en compte l'ensemble des problèmes de la transformation depuis la caractérisation des matières premières jusqu'aux attentes des consommateurs.

5. Développer l'image du Génie Particulaire Alimentaire

Enfin, le groupe de travail insiste sur le nécessaire effort de vulgarisation scientifique qu'il convient d'engager vers les industries alimentaires. En effet, le développement de la Technologie des poudres ne pourra intervenir sans que la R & D des entreprises mais aussi et surtout leur Direction Générale n'aient pris conscience de son importance stratégique pour

le développement de leur entreprise. Deux actions complémentaires sont proposées pour engager cette démarche : le développement de séminaires de formation continue et l'organisation de journées scientifiques et techniques sur les poudres alimentaires. Pour faciliter le lancement de ces actions, il conviendrait de rapprocher et dynamiser les structures existantes : le GFGP⁷ (groupe solide divisé) et l'ACIA⁸. Ces activités de vulgarisation scientifique devraient faciliter les échanges Recherche-Industrie et créer progressivement un courant de demande des entreprises pour des programmes plus finalisés. Cette vulgarisation scientifique passe aussi par la prise en compte du génie particulaire dans la formation de base des ingénieurs pour les industries alimentaires.

6. Bibliographie

- BEDOW J.K. : Particulate science and technology, Chemical Publishing Co., 1980.
- IINOYA K., GOTOH K., HIGASHITANI K. Powder Technology Handbook, Dekker M, 1991.
- RUMPF H. : Particle technology, Chapman and Hall, 1990.
- ALLEN T.A. : Particle size measurement, Chapman and Hall, 4th Edition.
- NEDDERMAN R.M. : Statics and kinematics of granular media, Cambridge-University Press, 1992 ; Lavoisier, 1992.
- SVAROVSKY L. : Powder testing guide, Elsevier, 1987.
- GUYON E., TROADEC J.-P. : Du sac de billes au tas de sable, Ed. O. Jacob, 1994.
- RHODES M. : Principles of powder technology, Wiley J. & Sons, 1990.
- PRASHER C.L. : Crushing and grinding process Handbook, Wiley J, 1987.
- PELEG M., BAGLEY E.B. : Physical properties of foods, Avi Pub. Co. Inc, 1983.
- Anonyme : Bulk solids physical property test guide, British materials handling board, 1983.
- SVAROSKY : Powder testing guide : methods of measuring the physical properties of bulk powders, British materials handling board by Elsevier applied science, 1987.
- GRIFFITH E.J. : Cake formation in particulate systems, VCH, 1991.
- YVON J. Minéraux finement divisés, ULP, 1993.

Annexe : principaux centres européens en génie particulaire

FRANCE

- ÉCOLE DES MINES D'ALBI-CARMAUX, Campus Jarlard, 81013 Albi Cedex 09
J.A. Dodds, e-mail : dodds@enstimac.fr
Tél. : (33) 05 63 49 31 22
Fax : (33) 05 63 49 30 99
- DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE, Université Technologique de Compiègne, B.P. 529, 60205 Compiègne
P. Guigon, e-mail : Pierre.Guigon@utc.fr
Tél. : (33) 03 44 23 44 23

Fax : (33) 03 44 23 19 80
•LABORATOIRE DE GÉNIE CHIMIQUE, ENSIGC,

18, chemin de la Loge,
31078 Toulouse
D. Steinmetz
Tél. : (33) 05 62 25 23 00
Fax : (33) 05 62 25 23 18

•GROUPE DE MATIÈRE CONDENSÉE ET MATÉRIAUX,

UNIVERSITÉ DE RENNES I,
Campus Beaulieu, Bat 11
35042 Rennes Cedex
D. Bideau, J.P. Troadec
Tél. : (33) 02 99 28 62 05
Fax : (33) 02 99 28 67 17

•LABORATOIRE DE PHARMACIE GALÉNIQUE, FACULTÉ DE PHARMACIE DE LIMOGES,

2, rue du Dr. Marchand
87025 Limoges
Prof. D. Chulia,
Tél. : (33) 05 55 43 58 52
Fax : (33) 05 55 43 59 01

•INRA, UNITÉ TECHNOLOGIE DES CÉRÉALES,

2, place Viala,
34060 Montpellier Cedex
J. Abecassis, e-mail : abecassis@ensam.inra.fr
Tél. : (33) 04 99 61 22 03
Fax : (33) 04 67 52 20 94

•ENSIA,

1, avenue des Olympiades,
91305 Massy
J. Vasseur, e-mail : vasseur@massy.inra.fr
Tél. : (33) 01 69 93 50 51
Fax : (33) 01 69 20 02 30

•ENITIAA, GÉNIE ALIMENTAIRE ET PARTICULAIRE,

rue de Géraudière,
44072 Nantes Cedex 03
Prof. J.L. Ilari,
Tél. : (33) 02 51 78 54 62
Fax : (33) 02 51 78 54 55

•INRA,

Laboratoire de Technologie Appliquée à la Nutrition,
Rue de la Géraudière, B.P. 1627,
44316 Nantes Cedex 03
J.P. Melcion, e-mail : jp.melcion@nantes.inra.fr
Tél. : (33) 02 40 67 50 00
Fax : (33) 02 40 67 50 12

•LABORATOIRES POUDRES, ÉCOLE DES MINES D'ALES,

6, avenue des Clavières,
30319 Ales Cedex,
Prof. A. Benhassaine,
Tél. : (33) 04 66 78 50 00
Fax : (33) 04 66 78 50 34

•LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES SOLIDES, ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

91128 Palaiseau,
Prof. M.P. Luong
Tél. : (33) 01 69 33 33 68

7. Groupe Français de Génie des Procédés.

8. Association des Chimistes, Ingénieurs et Cadres des Industries Agricoles et Alimentaires.

Fax : (33) 01 69 33 20 29

•**INNOVIA**

175, rue de Courcelles
17 000 La Rochelle
C. Chessé
Tél. : (33) 05 46 45 45 11
Fax : (33) 05 46 44 84 76

•**TECALIMAN**

Rue de la Géraudière
B.P. 527
Y. Riou
Tél. : (33) 02 40 67 51 20
Fax : (33) 02 40 67 51 27

•**RHÔNE POULENC RORER**

Centre de Recherche de Vitry-Alfortville
13, quai Jules Guesde - B.P. 14
94403 Vitry-sur-Seine Cedex
Deleuil
Tél. : (33) 05 45 73 74 75
Fax : (33) 05 45 73 80 34

•**GÉNÉRALE SUCRIÈRE**

Laboratoire FIT
27550 Nassandres
J. Benchimol
Tél. : (33) 02 32 46 72 85
Fax : (33) 02 32 46 73 52

Grande-Bretagne

•**The Wilfson Centre
for Bulk Solids Handling Technology,
University of Greenwich,**

Wellington Street,
Woolwich,
London SE 18 6 PF
Dr Stephen Woodhead, e-mail : S.R. Woodhead
@greenwich.ac.uk
Tél. : (44) 0181 331 8646
Fax : (44) 0181 331 8647

IFPRI

•**International Fine Particle Research Institute
Inc. Office G1,**

Waterloo Centre,
Waterloo Road,
Widnes WA8 0PR,
L.J. Ford,
Tél. : (44) 0151 420 1850
Fax : (44) 0151 424 1495

•**Dept Chemical Engineering,
University of Bradford,**

Bradford, BD 17 DP,
Grande-Bretagne
Dr N. Hamby,
Tél. : (44) 01274 383 710
Fax : (44) 01274 385 700

•**Dept Chemical Engineering,
University of Birmingham,**

Edgbaston,
Birmingham B15 2TT
Prof. J. Seville
Tél. : (44) 0121 414 53 54
Fax : (44) 0121 414 53 77

•**Dept Chemical Engineering,
University of Cambridge,**

Pembroke Street
Cambridge CB2 3 RA
Prof. J. Bridgewater
Tél. : (44) 01223 330 141
Fax : (44) 01223 330 140

•**Satake Centre for Grain Process Engineering,
UMIST,**

Dept Chemical Engineering,
P.P. Box 88,
Manchester M 60 1QK,
Dr S. McKee,
Tél. : (44) 0161 200 4429
Fax : (44) 0161 200 4399

•**Dept Chemical Engineering,
University of Surrey,**

Guildford GU2 5XH,
Dr M. Ghadiri,
Tél. : (44) 01483 259 270
Fax : (44) 01483 259 510

•**Dept Chemical Engineering,
University of Technology,**

Loughborough, LE11 3TU,
Prof. R.J. Wakeman,
Tél. : (44) 01509 223 506
Fax : (44) 01509 223 923.

Suisse

Pharmaceutical Institut der Universitat,

Togengässlein 3,
CH-4051
Basel, Suisse

Prof. Dr H. Luenenberger
Tél. : (41) 61 261 79 40
Fax : (41) 61 261 79 07.

Pays-Bas

•**Dept Chemical Process Technology,
TU Delft,**

P.O. 5045,
Julianalaan 136,
Delft 2628 BL
Pays-Bas
Prof. B. Scarlett
Tél. : (31) 152 783 540
Fax : (31) 152 784 452.

Allemagne

•**Institut für Mechanische Verfahrenstechnik,
Technische Universität Braunschweig,**

Volkmaroder Strasse 4-5,
Braunschweig D-38104,
Prof. dr. Ing Joerg Schwedes e-mail j.theuer-
kauf@tui-bs.de
Tél. : (49) 531 391 9610
Fax : (49) 531 391 9633

Norvège

•**Telemark Technological R & D Centre
Postec,**

Teknologisenteret,
Kjølnes Ring,
Porsgrunn, N-3914,
Prof. Sunil de Sliva, e-mail : Sunil.
Desilva@hit.no
Tél. : (47) 35 57 40 00
Fax : (47) 35 57 40 10

Italie

•**Dipartimento di Ingegneria Chimica ed
Alimentare,**

Universita' di Salerno,
Via Ponte Don Melillo,
I-84084 Fisciano,
Prof. G. Ferrari,
Tél. : (39) 089 96 41 34
Fax : (39) 089 96 40 57