



HAL
open science

RHÉOLOGIE

Xavier Chateau

► **To cite this version:**

Xavier Chateau. RHÉOLOGIE. Michel Lebouché, président du HCM, Mansour Afzali, Pierre Devalan et Claude Hauviller,. Livre blanc de la recherche en mécanique, AFM, 2014., Association Française de Mécanique, 2014, Livre blanc de la recherche en mécanique: Enjeux industriels et sociétaux, Recherche, Innovation, Formation. hal-01079898

HAL Id: hal-01079898

<https://enpc.hal.science/hal-01079898>

Submitted on 4 Nov 2014

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.

RHÉOLOGIE

Xavier Chateau

Introduction

La création du mot Rhéologie est attribuée à Bingham en 1922¹ qui définit la Rhéologie comme la science des déformations et des écoulements de la matière. A l'origine la Rhéologie se définit donc comme une science pratiquement identique à la Mécanique des Milieux Continus dont l'objet est d'observer, décrire et modéliser les déformations de la matière sous l'action de différentes forces. De nos jours la Rhéologie se distingue de la Mécanique des Milieux Continus par son caractère essentiellement pluridisciplinaire, par le fait qu'elle s'intéresse plus particulièrement aux comportements non linéaires des matériaux à l'état solide, à l'état fluide et lors des transitions entre ces deux états et qu'elle s'efforce de relier les propriétés macroscopiques des matériaux étudiés à leurs propriétés à l'échelle microscopique, voire nanoscopique (composition, interactions entre constituants, structuration, ...). Les matériaux étudiés par les rhéologues sont extrêmement divers : suspensions (peintures, boues de forage, bétons et plâtres à l'état frais, magmas et laves, sang, minerais, ...), émulsions (sauces alimentaires, cosmétiques, médicaments, ...) fluides complexes (polymères, adhésifs, fluides biologiques, adjuvants, ...), mousses, matériaux granulaires, poudres, etc. On trouve donc la Rhéologie dans pratiquement tous les domaines d'activité humaine et ses applications vont de la mise en forme des matériaux aux comportements de la matière vivante, en passant par la tenue des pneumatiques, la qualité des produits cosmétiques, le génie pétrolier, l'industrie alimentaire, l'industrie papetière, l'industrie textile, le traitement des eaux ou l'industrie des matériaux de construction². Son impact économique est donc considérable. La Rhéologie n'est cependant pas uniquement une science aux visées applicatives puisque de nombreuses équipes de recherche développent des travaux de nature plus fondamentale sur le comportement des fluides complexes.

La Rhéologie aujourd'hui

De nombreuses équipes de recherche développent aujourd'hui des approches expérimentales combinant des moyens d'observation ou de caractérisation de la matière à des dispositifs de sollicitations mécaniques ou autres. Les techniques d'observation sont extrêmement diverses : microscopie (classique, confocale, AFM), RMN, rayonnement X ou Gamma, diffusion ou diffraction de la lumière, vélocimétrie par imagerie de particules, émission sonore, etc. En parallèle, les dispositifs de sollicitation mécanique permettent d'appliquer des chargements complexes réellement tridimensionnels avec des gammes de sollicitations très larges³. Ces outils, en permettant d'une part d'observer les liens existants entre composition, microstructure et comportement des matériaux et d'autre part de caractériser les matériaux à différentes échelles d'espace et de temps, ouvrent des perspectives importantes pour une approche réellement multi-échelle et multi-physique du comportement des fluides complexes.

De façon concomitante, les progrès réalisés en chimie permettent aujourd'hui la synthèse d'objets de tailles très variées (typiquement du nanomètre au millimètre) dont les propriétés de surface (hydrophobicité, charge électrique, interaction répulsive ou attractive, etc) et de volume (porosité, densité, sphéricité, etc) sont finement contrôlées. Il est donc possible d'étudier expérimentalement le comportement rhéologique de matériaux modèles aux propriétés microstructurales bien définies en observant simultanément leur structuration à l'échelle des constituants. Ces approches permettent de mieux connaître et comprendre les liens entre composition et propriétés globales des matériaux.

1 E. C. Bingham, *Fluidity and Plasticity*, McGraw-Hill, New York, 1922.

2 Cette liste est évidemment non exhaustive.

3 Vitesses de rotation comprise entre 10^{-9} et 10^3 radians par seconde, vitesses de translation comprises entre 10^{-7} à 10^3 millimètres par seconde, fréquences comprises entre 10^{-6} et 10^4 Hertz, température imposée entre -100° et 200° Celsius par exemple pour un rhéomètre de laboratoire combinant sollicitation de compression et de cisaillement.

Une autre tendance observée est la diminution régulière de la taille des dispositifs utilisés par les rhéologues (microrhéologie et/ou microfluidique) permise par l'utilisation des techniques de l'industrie électronique. Le développement de la Rhéologie à cette échelle ouvre de très nombreuses perspectives (observation de comportements particuliers en situation confinée, élaboration de matériaux aux propriétés finement contrôlées notamment dans le domaine médical, rhéométrie embarquée⁴, etc.).

La possibilité de mesurer à différentes échelles la réponse de matériaux soumis à des chargements multi-physiques complexes permet de proposer et valider des lois de comportement de plus en plus élaborées prenant en compte couplages multi-physiques et non linéarités matérielles ou géométriques. Ces lois sont utilisées pour construire des outils de simulation numérique du type éléments finis ou volumes finis qui, tirant profit des développements récents dans ce domaine en plus de l'accroissement continu de la puissance de calculs des ordinateurs, permettent de traiter des problèmes de plus en plus réalistes. Ces outils trouvent de nombreuses applications dans l'industrie comme la plasturgie (simulation du moulage de pièces), le génie des procédés, le génie civil, l'industrie pétrolière, etc.

Les outils de simulation numérique sont également utilisés pour modéliser la réponse des matériaux à diverses sollicitations à partir d'une description de leurs constituants et de leurs interactions en utilisant des approches discrètes du type dynamique moléculaire ou éléments distincts. Ces outils permettent de progresser dans la compréhension fondamentale du lien entre constituants d'un matériau et comportement global. Comme pour les simulations numériques continues, la puissance des ordinateurs utilisés conditionne la qualité des prédictions de ces outils. Ces outils sont notamment appliqués pour étudier le comportement des matériaux granulaires, des suspensions colloïdales ou non, des verres métalliques, etc.

Les laboratoires de recherche travaillant dans le domaine de la Rhéologie ont traditionnellement de nombreuses relations avec les entreprises. Cette situation s'explique d'une part par les nombreuses applications de la Rhéologie (contrôle des propriétés des matériaux, identification et optimisation de leurs propriétés d'usage, simulation des procédés d'élaboration, des procédés de mise en œuvre, de l'utilisation et de la fin de vie des matériaux, etc.) mais également par les défis sociétaux actuels qui obligent à optimiser les techniques et à rechercher des solutions alternatives compatibles avec les impératifs du développement durable.

Sous la dénomination Rhéologie sont donc rassemblés des travaux expérimentaux, théoriques et numériques se plaçant à des échelles d'espace et de temps très diverses, pouvant appartenir à des champs disciplinaires différents et dont les finalités vont du fondamental à l'application. Le positionnement des laboratoires travaillant dans le domaine de la Rhéologie est un bon indicateur de cette diversité : certains affichent clairement leur appartenance au domaine de la Rhéologie⁵, d'autres se réclament plutôt de la Mécanique⁶, de la Physique⁷ ou la Chimie⁸ ; des laboratoires revendiquent explicitement leur interdisciplinarité⁹, alors que d'autres se définissent par leurs domaines d'application¹⁰. A cette liste il eut été évidemment possible d'ajouter d'autres laboratoires utilisant les outils de la Rhéologie mais le choix a été fait

4 Appelé parfois rhéométrie « on a chip ».

5 Laboratoire de Rhéologie et Procédés à Grenoble, Équipe Structure et Rhéologie des Polymères, Modélisation et Procédés à Lyon/Saint Étienne.

6 Laboratoire Navier à Marne la Vallée, Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne à Brest, l'Institut de Recherche en Mécanique et Génie Civil à Nantes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique à Rennes, Centre de mise en forme des Matériaux à Sophia-Antipolis.

7 Laboratoires Matières et Systèmes Complexes, Physico-chimie des Polymères et Milieux Dispersés à Paris, Laboratoire de la Matière Condensée à Nice.

8 Laboratoire Matière Molle et Chimie à Paris ou Laboratoire Réactions et Génie des Procédés - Équipe GEMICO à Nancy.

9 Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Environnement et Matériaux à Pau, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles à Mulhouse.

ici de se limiter aux laboratoires actifs dans la communauté des scientifiques se réclamant explicitement de la Rhéologie.

La Rhéologie demain

Alors que les moyens d'observer, de comprendre et de simuler le comportement des fluides complexes ouvrent des perspectives très larges, de nombreux défis restent à relever.

Tout d'abord, comme dans beaucoup d'autres domaines, il convient « d'apprendre » à gérer les quantités importantes d'informations générées par les dispositifs expérimentaux couplés aux moyens d'observation et les outils de simulations numériques. Les résultats obtenus doivent être traités, analysés puis synthétisés afin d'en dégager une compréhension globale des systèmes étudiés.

Si l'on se place du point de vue fondamental, la mise en évidence d'un lien entre des propriétés microscopiques et une propriété globale ou la mise en évidence d'un comportement particulier constitue déjà un résultat remarquable qui peut éventuellement être valorisé pour des applications (élaboration de nouveaux matériaux ou dispositifs, identification des origines microstructurales d'un comportement, compréhension d'un phénomène, etc). L'acquisition de nouvelles connaissances passent par le développement d'outils expérimentaux permettant d'appliquer des gammes de sollicitations toujours plus larges (fortes vitesses de cisaillement ou d'élongation, hautes pressions, températures élevées, ..) sur des matériaux modèles aux propriétés toujours mieux contrôlées en couplant observations et rhéométrie.

En revanche, si l'on souhaite utiliser les résultats obtenus pour développer un outil prédictif du comportement d'un matériau en situation (passage classique de l'échelle du matériau à l'échelle de la structure ou du procédé), il convient de développer des modèles « manipulables »¹¹. Si l'on cherche à développer un modèle « classique » reposant par exemple sur les outils de la Mécanique des Milieux Continus, il est nécessaire d'identifier un nombre limité de variables d'état pertinentes pour décrire le système puis de proposer des lois d'évolution pour ces variables en fonction des sollicitations appliquées au système matériel étudié et enfin de valider le modèle par comparaison aux résultats expérimentaux et/ou numériques. Si cette problématique n'est pas nouvelle¹² l'abondance des informations disponibles à l'échelle microscopique ou nanoscopique combinée à la volonté de disposer d'outils de modélisation qui restent simples à mettre en œuvre tout en étant capables de rendre compte de la richesse des comportements observés compliquent sérieusement cette étape. Des solutions alternatives cherchant à mieux prendre en compte les différents phénomènes pertinents pour décrire le comportement d'un matériau en couplant plusieurs modèles agissant à différentes échelles d'espace ou de temps dans un même outil de simulation sont actuellement en cours de développement. Ces approches permettent évidemment de mieux rendre compte des différents phénomènes agissant au sein du matériau mais nécessitent des moyens de calculs assez voire très lourds et restent complexes à mettre en œuvre. L'accroissement de la puissance des moyens de calcul numérique (calcul parallèle en particulier) est évidemment une condition au développement de ces approches. Cette remarque est évidemment valable pour les approches continues plus classiques puisque la mise en œuvre de modèles multi-physiques tridimensionnels capables de reproduire de façon réaliste des systèmes réels nécessite des puissances de calcul qui ne sont pas encore couramment disponibles.

Cette tendance à la complexification des approches et des modèles ne facilite évidemment pas le transfert des connaissances acquises et des méthodes développées dans les entreprises. Si les grandes entreprises

10 Institut Charles Sadron à Strasbourg, IFPEN à Rueil-Malmaison, IRSTEA (ex CEMAGREF)^o, Unité de Recherche Biopolymères, Interactions & Assemblages de l'INRA à Nantes, Unité Mixte de Recherche Ingénierie Procédés Aliments à Massy, Institut des Molécules et Matériaux du Mans.

11 C'est-à-dire qui peut être mis en œuvre avec des moyens et des délais adaptés à l'usage qui en sera fait.

12 Cette question s'est posée dès les premiers travaux de changement d'échelles d'espace traitant du comportement des matériaux, qu'ils relèvent de la physique statistique ou de l'homogénéisation en mécanique ou en physique.

ont en général les moyens de développer des collaborations à long terme avec les laboratoires de recherche ou les Universités (laboratoires communs, chaires d'enseignement et de recherche, contrat cadre, thèses cifre, etc) qui facilitent ce transfert, la situation est plus délicate pour les petites et moyennes entreprises. La réduction/simplification des modèles élaborés dans un contexte académique, qu'ils soient « classiques » ou « multi-échelles » pour une utilisation en recherche-développement ou en contrôle de la production est une condition nécessaire pour la valorisation des approches de modélisation.

Le dialogue entre approches expérimentales et modélisations et entre les différents champs disciplinaires est évidemment une condition nécessaire à la réussite de ces travaux. Dans un contexte de spécialisation toujours plus poussée des chercheurs et ingénieurs, l'existence d'un dialogue fructueux entre des chercheurs appartenant à des disciplines différentes (grossièrement de la Physique de la matière condensée aux Mathématiques Appliquées en passant par la Chimie, le Génie des Procédés ou le Génie Civil,) est une condition nécessaire pour progresser dans la connaissance des propriétés rhéologiques des fluides complexes puis pour transférer ces connaissances d'un champ disciplinaire à un autre ou du monde de la recherche académique vers les applications et les entreprises. Ce dialogue ne peut évidemment exister que s'il existe au sein de la communauté scientifique des chercheurs ou ingénieurs capables d'établir les liens entre les disciplines. Parce qu'elle est une science de modélisation visant à prédire le comportement de systèmes à l'échelle intéressant l'Ingénieur ayant développé depuis bientôt un siècle des outils d'approche multi-échelles du comportement des matériaux, la Mécanique des Milieux Continus apparaît comme le champ disciplinaire approprié pour porter ces échanges¹³.

Cette position « centrale » de la Mécanique des Milieux Continus ne doit pas occulter les liens nécessaires de la Rhéologie avec d'autres disciplines. Comme il a été dit plus haut, il est de fait très difficile de délimiter une frontière indiscutable entre Rhéologie, Physique de la matière molle, Mécanique, Physico-Chimie ou Génie des Procédés. En pratique, les différents acteurs de la communauté se classent dans l'une ou l'autre des disciplines en fonction de leur formation initiale, du positionnement de leur structure de rattachement ou de leur goût. La Rhéologie ne peut évidemment se développer et répondre aux questions qui lui sont adressées qu'en conservant ce caractère pluridisciplinaire.

La nécessité de sonder de plus en plus finement la structure de matériaux étudiés nécessite un renforcement des liens avec la physique instrumentale pour permettre un accroissement des résolutions spatio-temporelles de caractérisation des matériaux s'écoulant, se déformant ou vieillissant. Ces progrès peuvent passer par un accès plus important à des grands instruments permettant d'observer la matière à une échelle fine du type ESRF à Grenoble ou SOLEIL à Gif-sur-Yvette ou par le développement et/ou l'amélioration de dispositifs dédiés utilisant la RMN, les rayonnements X, la microscopie optique, la microscopie confocale, la diffraction ou diffusion de lumière, etc.

Le développement de modèles numériques de plus en plus complexes et les difficultés rencontrées pour traiter les données générées par les expériences invitent à un rapprochement avec les mathématiciens appliqués et les informaticiens. La mise au point d'algorithmes efficaces permettant d'une part de résoudre les problèmes numériques issus des modèles continus ou discrets et d'autre part de manipuler puis d'analyser les données (images, champs de grandeurs physiques, etc) issues des expériences permettra de continuer à progresser dans ces directions. La mise en œuvre ou le développement de méthodes inverses pour permettre l'identification de modèles à grands nombres de paramètres à partir des résultats expérimentaux est une condition à la fiabilité des outils de simulation. Enfin, la mise au point d'outils de modélisation ou d'analyse simplifiés aisément manipulables dans un contexte applicatif à partir des outils plus complexes développés dans les laboratoires peut bénéficier des méthodes de réduction de modèles développés par les mathématiciens appliqués.

La Rhéologie face aux enjeux industriels et sociétaux

13 L'application fructueuse récente des concepts de la Mécanique des Milieux Continus à des échelles d'espace (typiquement le nanomètre) réputées jusqu'à récemment hors de son domaine d'application est un argument fort en ce sens.

Comme science des procédés, la Rhéologie a évidemment un rôle très important à jouer dans l'élaboration des réponses aux défis du développement durable. Dans le domaine du Génie Civil et de la Construction l'amélioration du bilan carbone de la filière passe par une meilleure ouvrabilité¹⁴ des matériaux de construction (bétons autoplaçants et autonivelant, enduits de rénovation, etc), par l'élaboration de matériaux plus isolants (bétons et plâtres moussés, matériaux nano poreux, etc), par une meilleure prise en compte des risques naturels (écoulements géophysiques, laves torrentielles) ou par une meilleure maîtrise des matériaux en fin de vie (déconstruction, évacuation, etc). Pour tous ces sujets, la maîtrise des propriétés des matériaux à l'état pâteux ou sous forme granulaire en lien avec leur composition est évidemment essentielle.

Le même constat s'applique en Génie Industriel pour tous les procédés de mise en œuvre, d'élaboration ou d'utilisation des matériaux sous forme de poudre, de pâte, à l'état fluide, ou sollicitant les matériaux dans le domaine des grandes déformations.(mise en forme plastique, coulage, frittage, injection, emboutissage, forge, ...) ou dans le domaine de l'énergie pour les procédés de mise en œuvre et de valorisation de la biomasse, le transport et la transformation des matériaux pour leur valorisation et/ou leur stockage ou l'optimisation des procédés d'extraction et de récupération des énergies fossiles ou des minerais.

Les applications sont également très importantes dans le domaine agro-alimentaire, toujours pour les procédés de fabrication¹⁵ mais également pour l'optimisation des propriétés sensorielles (relation texture-rhéologie en particulier), voire nutritionnelles.

Le domaine des biotechnologies est également un secteur d'applications des résultats de la Rhéologie très important. La compréhension et la maîtrise du comportement des fluides complexes est essentielle pour le domaine médical pour des problèmes classiques comme l'écoulement du sang ou la diffusion de médicaments dans les fluides corporels, mais également pour la mise en œuvre de procédés plus innovants comme l'encapsulation de médicaments ou le tri d'organismes vivants par des procédés microfluidiques. Ces techniques, dont l'application dépasse largement le domaine de la médecine ne pourront atteindre un stade de développement satisfaisant sans une maîtrise complète des écoulements des fluides complexes utilisés.

Cette liste n'épuise évidemment pas toutes les applications de la Rhéologie comme l'illustrent, par exemple, les récentes études consacrées aux liens entre la composition des peintures du patrimoine, leurs propriétés rhéologiques et leur rendu visuel.

La Rhéologie en France

En France les liens entre Rhéologie et Mécanique sont réels et originaux, la Rhéologie s'étant développée initialement à partir de la Mécanique académique indépendamment de toute filière d'applications. Aujourd'hui, le Groupe Français de Rhéologie reste lié à l'Association Française de Mécanique en tant que Groupe Scientifique et Technique.

La situation est différente dans le monde anglo-saxon et plus particulièrement aux Etats-Unis puisque la « Society of Rheology », membre de l'« American Institute of Physics », se définit comme une branche de la Physique. En comparaison avec la France, les travaux menés par les rhéologues anglo-saxons paraissent par certains côtés plus fondamentaux mais les liens avec les entreprises semblent plus forts. Ce constat s'applique à la plupart des pays où la Rhéologie est bien développée (Grande Bretagne, Australie, Allemagne, Suisse, Pays-Bas, Japon, Canada, etc)

Le Groupe Français de Rhéologie est l'un des groupes européens les plus importants. La discipline est bien reconnue au niveau international (bonne présence dans les organisations et manifestations internationales) et les liens avec les chercheurs des autres pays sont nombreux et dynamiques.

14 L'ouvrabilité est la propriété d'un matériau à être travaillé, mis en œuvre.

15 Beaucoup d'aliments sont des pâtes, des suspensions, des émulsions, des gels, des mousses ou sont élaborés sous une de ces formes avant de se solidifier.

Recommandations

Science fédérative de divers champs disciplinaires orientée vers les applications, la Rhéologie a vocation à participer aux réponses apportées aux défis posés à nos sociétés. Les conditions pour son développement découlent directement de l'exposé donné dans ce chapitre. Du côté de la formation, il convient de favoriser une pluridisciplinarité efficace¹⁶. En effet, les formations en Mécanique des Milieux Continus offrent un cadre idéal pour développer ces formations. Pour ce qui concerne la recherche, les deux principaux obstacles à lever sont d'une part le cloisonnement disciplinaire¹⁷ et d'autre part la faible perméabilité entre le monde académique et les entreprises. Des outils permettant d'une part une meilleure reconnaissance des travaux aux frontières des champs disciplinaires classiques et d'autre part d'inciter au développement de ces recherches peuvent contribuer de façon positive au développement de la Rhéologie. Pour être efficace, ces outils devront également contribuer à simplifier la gestion administrative la recherche française.

¹⁶ Attention, la pluridisciplinarité ne doit pas être comprise comme un saupoudrage de diverses disciplines au sein d'une même formation mais comme l'enrichissement d'une formation de base solide dans une matière (la Mécanique en l'occurrence) par des outils issus d'autres disciplines. Idéalement, cette pluridisciplinarité doit être mise en place au niveau master ou doctorat.

¹⁷ Au CNRS, on trouve des chercheurs travaillant dans le domaine de la Rhéologie dans les sections 5, 9, 10, 11.