

## Rhéophysique, la matière dans tous ses états

La peinture, le dentifrice ou la purée ont parfois des propriétés surprenantes, entre liquide et solide. La rhéophysique étudie les comportements des polymères, des émulsions ou encore des colloïdes, que vous découvrirez dans ce dossier.

### Page 1 / 7 - Rhéophysique, la matière dans tous ses états

Vous êtes-vous déjà demandé pourquoi le dentifrice formait une belle pâte sur la brosse à dents avant de se liquéfier dans la bouche ? Une question parmi d'autres que la rhéophysique aide à décrypter. Cette discipline analyse les propriétés de toutes sortes de fluides, dits non newtoniens, à la frontière solide-liquide.



Peintures formant des gouttes arrêtées. © Philippe Coussot , DR

Certains matériaux correspondent à des états de la matière qui sortent du cadre habituel de la [popupdefinition id=15839]physique[/popupdefinition] des [popupdefinition id=15336]gaz[/popupdefinition], liquides ou solides moléculaires puisqu'ils sont composés d'éléments plus gros : [popupdefinition id=803]polymères[/popupdefinition], cellules, grains, bulles, [popupdefinition id=7808]gouttes[/popupdefinition], etc. En pratique, on cherche à analyser leurs évolutions internes telles que le vieillissement, la déstructuration, ou encore la [popupdefinition id=17942]séparation[/popupdefinition] de phases, à mettre au point les matériaux en fonction des propriétés recherchées, ou bien à en inventer de nouveaux aux

propriétés plus originales.



**Dentifrice étalé sur une brosse à dents et mousse à raser : deux matériaux du quotidien facilement modelables, et qui peuvent s'écouler. © Philippe Coussot, DR**

### **Interactions : la matière dans tous ses états**

Pour cela, il est essentiel de comprendre comment se déforment ou s'écoulent ces matériaux en fonction des interactions et des structures formées par les éléments qu'ils contiennent.



**Peintures formant des gouttes arrêtées sur un mur vertical et étalement d'un mortier colle. Ces deux matériaux, proches d'un liquide, durcissent et prennent les propriétés d'un solide. © Philippe Coussot, DR**

Avec ce dossier, l'ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et Forêts [popupbiographie id=1250]Philippe Coussot[/popupbiographie] détaille quelques grandes classes de matériaux (les polymères, les [popupdefinition id=3304]émulsions[/popupdefinition], les [popupdefinition id=3553]colloïdes[/popupdefinition]) qui jouent un rôle fondamental dans notre vie quotidienne. Dans chaque cas, il montre comment la structure interne particulière de chacun de ces matériaux est à l'origine de comportements mécaniques originaux et parfois surprenants. Le tout grâce à la technique de mesure de ces comportements : la rhéométrie.

### **À lire aussi sur Futura**

- Kézako : de quoi est composée la matière ? Pourquoi est-ce solide, liquide ou gazeux ?
- Un nouvel état exotique de la matière ?
- Dynamique des fluides : cinq images de toute beauté
- Einstein n'a pas toujours raison, comme le prouve le mouvement brownien

## Page 1 / 7 - La viscoélasticité : des polymères élastiques qui coulent

La propriété la plus spectaculaire des [popupdefinition id=803]polymères[/popupdefinition] est leur [popupdefinition id=2096]viscoélasticité[/popupdefinition], autrement dit un comportement mécanique en partie élastique et en partie visqueux.



**Ballons de baudruche.** © HarshLight, Wikipedia, CC by 2.0

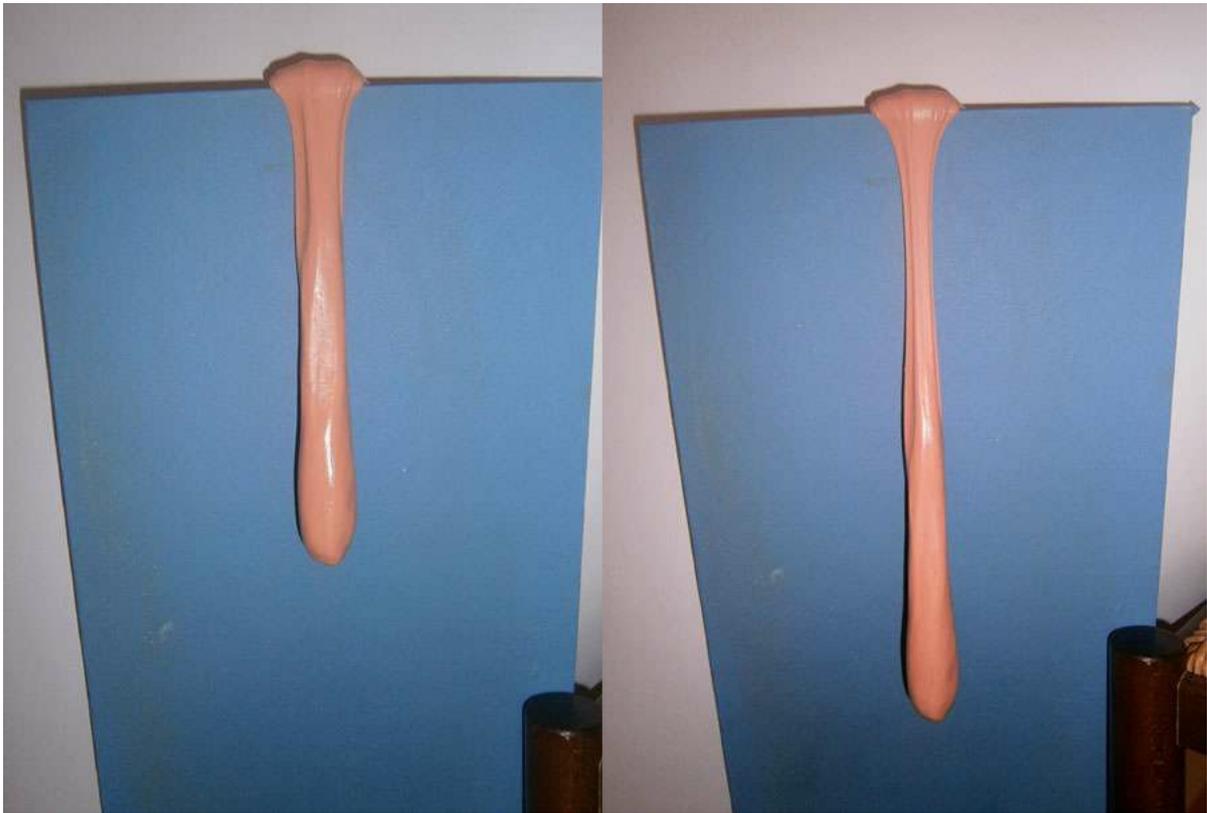
On peut observer cette propriété avec des solutions diluées de polymères, mais le caractère viscoélastique est particulièrement marqué pour des solutions concentrées ou des polymères fondus. En pratique, lorsqu'on impose une contrainte à un tel [popupdefinition id=15914]matériau[/popupdefinition], on constate qu'il se comporte comme un [popupdefinition id=15332]solide[/popupdefinition] élastique sur un temps assez court. Si on maintient la sollicitation, il finit par s'écouler indéfiniment comme un [popupdefinition id=15334]liquide[/popupdefinition].

Les conséquences pratiques de ce comportement sont observables avec un mélange d'huile de [popupdefinition id=2847]silicone[/popupdefinition] et d'[popupdefinition id=750]acide[/popupdefinition] borique, une pâte commercialisée sous la forme d'un jouet appelé Silly Putty.



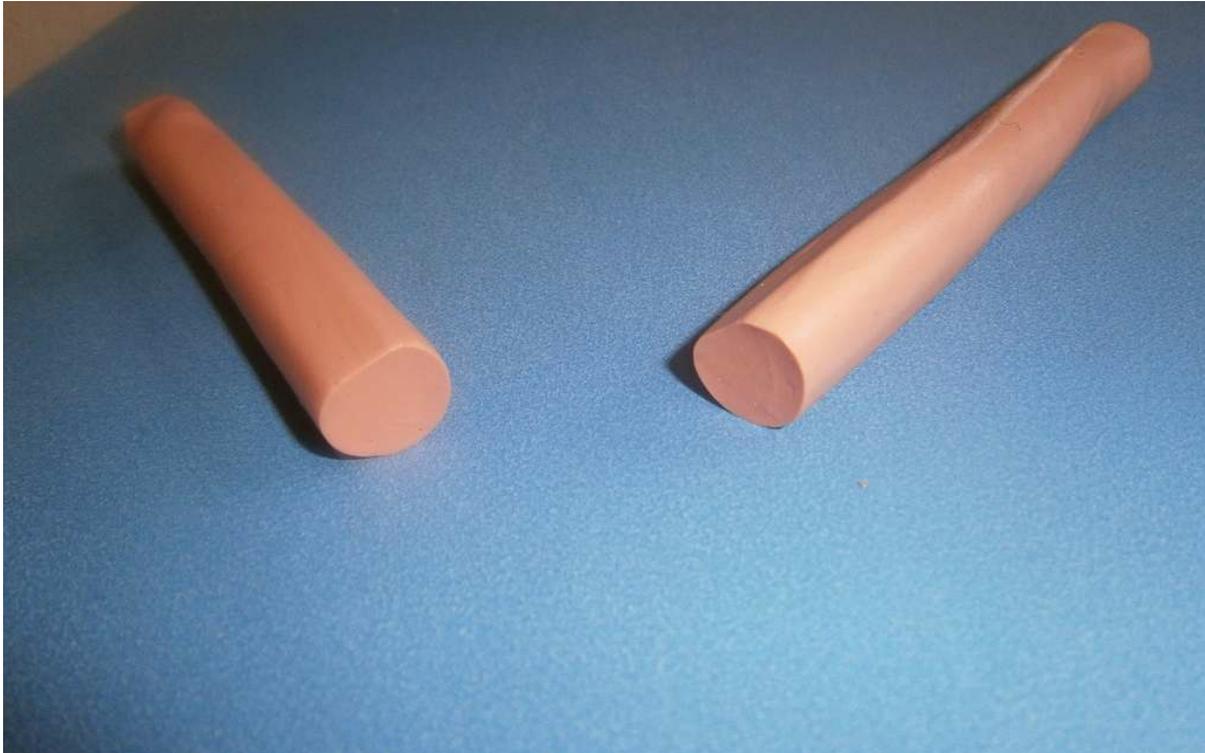
**Une boule de pâte Silly Putty rebondit sur le sol aussi bien qu'une balle de caoutchouc. © Philippe Cousot**

Lorsqu'on laisse tomber cette boule par [popupdefinition id=4725]terre[/popupdefinition], celle-ci rebondit aussi haut qu'un ballon ou une balle en [popupdefinition id=12055]caoutchouc[/popupdefinition] (voir Figure 2a,b ci-dessus). Par contre, si on applique une sollicitation moins forte mais maintenue dans le temps, par exemple en posant la balle sur le sol et en la laissant évoluer sous l'action de la gravité, on constate qu'elle se déforme lentement jusqu'à s'étaler et former une flaque.



**Réponse d'une boule de pâte Silly Putty à un étirement progressif. La pâte se déforme sous l'effet de la gravité. © Philippe Cousot**

On peut également la mettre en traction sous l'action de son propre poids, elle s'étire alors très largement (voir ci-dessus). Enfin, si on donne un coup de marteau dessus ou si on lui impose une traction brutale, la boule peut littéralement se fracturer (voir ci-dessous).



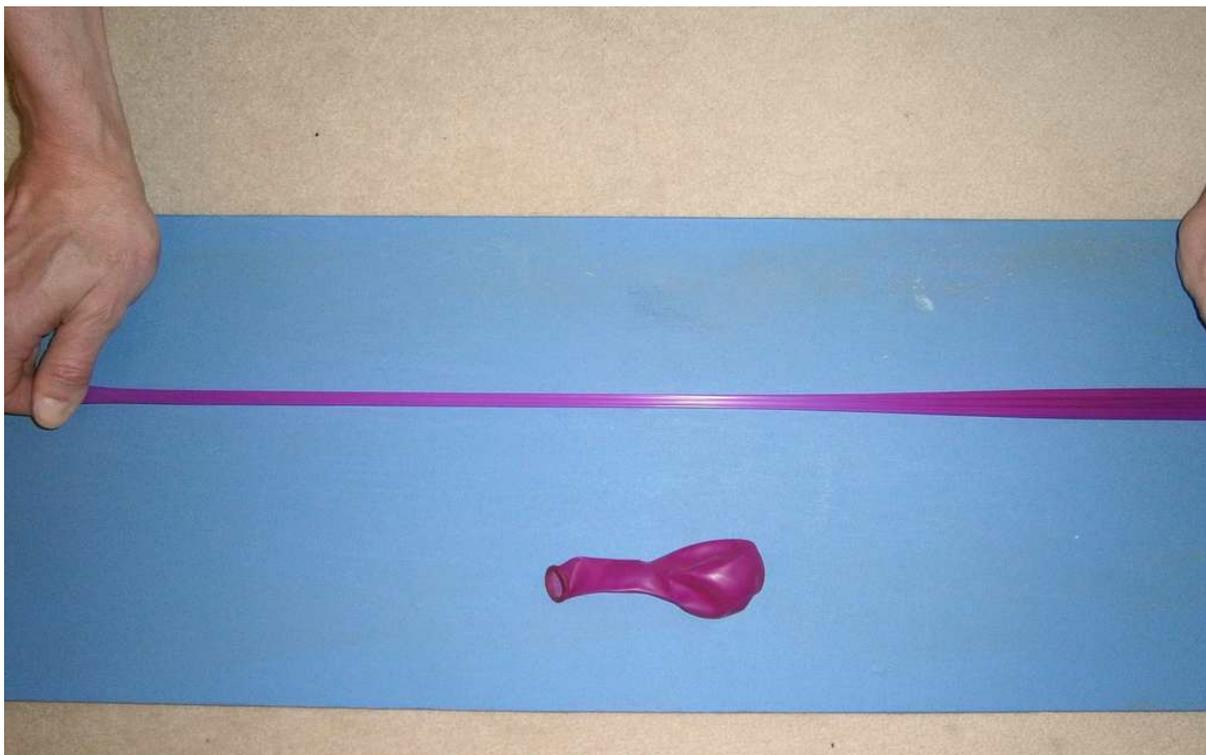
**Soumise à un étirement violent, la pâte Silly Putty casse et forme des morceaux. © Philippe Coussot**

### Un réseau de chaînes, clé de l'élasticité des polymères

Que se passe-t-il dans le matériau durant cette expérience ? Lorsqu'on applique une contrainte au matériau, on déforme d'abord l'ensemble du réseau de chaînes, dont le comportement est, comme celui de chaque chaîne, essentiellement élastique. En effet, sur des temps trop courts, les chaînes n'ont pas le temps de glisser les unes par rapport aux autres pour permettre l'écoulement : elles s'étirent ou s'écrasent sous l'action de la sollicitation mécanique en maintenant leur organisation initiale (elles conservent leurs voisins). Si la sollicitation est trop rapide, on ne laisse même pas le temps aux chaînes de se déformer. On peut alors briser la structure. À l'inverse, si on applique une sollicitation d'une [popupdefinition id=14966]durée[/popupdefinition] suffisante, on laisse le temps au réseau de se réorganiser par divers [popupdefinition id=316]mouvements[/popupdefinition] relatifs des chaînes. Sous l'action de la contrainte, la structure va donc se déformer inexorablement, comme le fait un liquide.

Cette description a suggéré un mécanisme qui n'a pourtant pas d'explication évidente : comment un enchevêtrement de [popupdefinition id=783]molécules[/popupdefinition] peut-il s'écouler ? En fait, les mouvements relatifs des chaînes sont possibles grâce à l'agitation thermique du système : chaque chaîne évolue dans un environnement constitué de chaînes voisines et qui lui-même évolue. Tout se passe comme si cette chaîne était enfermée, mais libre de bouger dans un tube dont les parois évoluent au cours du temps au gré de l'agitation thermique du système. Finalement, ceci permet à la chaîne de se déplacer au bout d'un temps d'autant plus court que l'agitation thermique est grande, c'est-à-dire que la température est élevée.

On peut rapprocher cela d'un grand panier de serpents plus ou moins emmêlés : chaque serpent se déplace selon sa propre volonté indépendante de celles des autres, mais son parcours est contraint par la présence de ses voisins. Au gré des petits mouvements des uns et des autres, il peut finalement se déplacer de façon significative. En suivant cette [popupdefinition id=2182]analogie[/popupdefinition], il est naturel de considérer que la chaîne est animée d'un mouvement de reptation, comme Pierre-Gilles de Gennes l'a proposé. On peut également rigidifier la structure en soudant les chaînes en quelques points par des [popupdefinition id=1990]atomes[/popupdefinition] de [popupdefinition id=14521]soufre[/popupdefinition] : c'est le procédé de vulcanisation.



**La déformation élastique d'un polymère est due au déplacement des chaînes le constituant, elles-mêmes élastiques. © Philippe Coussot**

Tant que ces liens ou les chaînes ne sont pas brisés, le matériau est solide mais déformable, car sa structure est constituée de chaînes elles-mêmes déformables (voir photo ci-dessus). Le caoutchouc à l'état naturel est un polymère liquide que l'on solidifie par ce procédé. Évidemment, lorsqu'on applique un effort trop important, associé à une déformation trop importante, on brise la structure en cassant soit des chaînes, soit des points de jonction.

---

## Page 1 / 7 - Les colloïdes, des bouts de solide dans le liquide

**Les suspensions sont des mélanges de particules [popupdefinition id=15332]solides[/popupdefinition]**

dans un [popupdefinition id=15334]liquide[/popupdefinition]. Lorsque ces particules sont suffisamment grosses, leur impact principal sur la [popupdefinition id=2018]viscosité[/popupdefinition] du mélange est une augmentation (assez lente avec la concentration solide), simplement liée au fait qu'elles occupent un [popupdefinition id=15919]volume[/popupdefinition] précédemment occupé par du liquide et qui ne peut désormais plus s'écouler.



Verre de lait. © Moritz320, Pixabay, DP

L'effet de la simple présence de particules dans un liquide peut cependant devenir négligeable devant d'autres effets si les particules sont suffisamment petites, car elles développent alors des interactions à distance, autrement dit des interactions colloïdales, au sein du liquide. Ces effets colloïdaux commencent à jouer un rôle lorsque la taille des particules est inférieure à environ 100  $\mu\text{m}$ , mais ne deviennent prédominants de façon certaine que pour des particules d'une taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$ . On trouve des particules colloïdales dans une multitude de produits industriels. Il en est ainsi des particules de [popupdefinition id=15955]silice[/popupdefinition] dans les dentifrices, des billes de [popupdefinition id=12051]latex[/popupdefinition] et des [popupdefinition id=2376]pigments[/popupdefinition] dans les peintures, des [popupdefinition id=1053]argiles[/popupdefinition] dans les crèmes cosmétiques, des [popupdefinition id=6478]nanoparticules[/popupdefinition] dans les pâtes de [popupdefinition id=4696]ciment[/popupdefinition], etc.



**Parmi les colloïdes de la vie quotidienne figure le lait. Il s'agit d'une suspension colloïdale de molécules de graisse dans une suspension à base d'eau. © Janine Chedid, Wikipédia, CC by-sa 3.0**

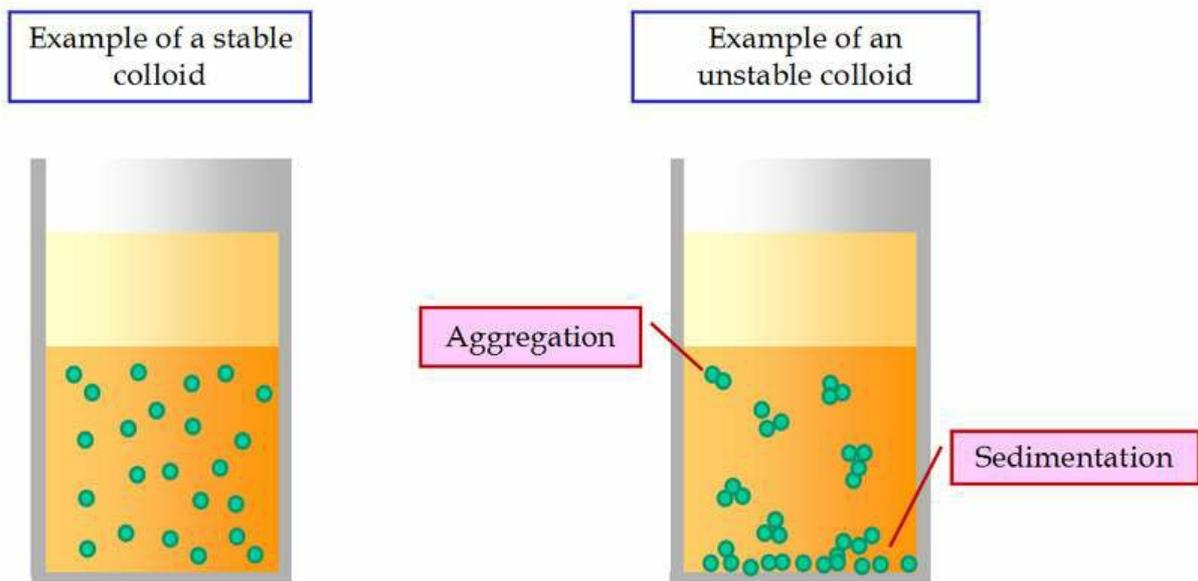
Les particules colloïdales naturelles les plus répandues à la surface de la [popupdefinition id=4725]Terre[/popupdefinition] sont les argiles, issues de la décomposition chimique ou mécanique des roches. Les argiles sont l'un des composants fondamentaux des boues naturelles, des boues de forage, et entrent dans la composition de nombreux produits industriels (cosmétiques, [popupdefinition id=16686]céramiques[/popupdefinition], papeterie, enduits, etc.).

### Forces de van der Waals et colloïdes

Les interactions colloïdales sont en premier lieu les forces de van der Waals, qui tendent à faire s'agréger les particules entre elles, comme deux [popupdefinition id=1990]atomes[/popupdefinition] ou deux [popupdefinition id=783]molécules[/popupdefinition] dans un liquide. Lorsque ces forces sont prédominantes, la suspension n'est pas stable, les particules tendent à se « coller » les unes aux autres pour finalement former un amas compact au fond du récipient de liquide. Dans ce cas, un simple mélange ne suffit pas à disperser à nouveau les particules, car les forces d'attraction dans ces collages sont très élevées.

Pour assurer une dispersion homogène des particules dans le liquide, il est nécessaire d'introduire des forces de répulsion suffisantes entre les particules colloïdales. C'est notamment le cas lorsque des [popupdefinition id=861]ions[/popupdefinition] sont adsorbés à la surface des particules : des forces de répulsion [popupdefinition

id=10656]électrostatiques[/popupdefinition] peuvent ainsi se développer entre les surfaces chargées de particules voisines. Une autre solution consiste à couvrir les particules de polymères qui, attachés à la surface de la particule par l'une de leurs extrémités, forment alors une sorte de « chevelure ». Les chevelures de deux particules voisines s'interpénètrent difficilement et tendent à maintenir à distance ces particules, les empêchant de se coller les unes aux autres. La superposition de ces différentes interactions peut conduire à un mécanisme d'agrégation faible : les particules voisines se placent à une distance qui correspond à l'équilibre des forces répulsives et attractives. On peut alors considérer que les particules sont en lien les unes avec les autres, mais ces liens peuvent facilement être brisés puis se reformer au cours de l'écoulement du [popupdefinition id=15914]matériau[/popupdefinition]. Ces différentes techniques permettent d'assurer la stabilisation de la dispersion colloïdale.



**Exemple de dispersions colloïdes stable (à gauche) et instable (à droite). Dans le deuxième cas, on remarque que les particules se rassemblent (*aggregation*) et sédimentent (*sedimentation*). © SunKart, Wikipédia, CC by 3.0**

Si les particules sont assez nombreuses, elles forment un réseau continu de liens à travers tout l'échantillon. Ce réseau conduit à un comportement complètement différent de celui du liquide seul. Désormais, au repos, on a affaire à une structure solide que l'on ne peut briser qu'en appliquant un effort supérieur à une valeur critique : le fluide possède ce que l'on appelle un seuil de contrainte. Tant que la contrainte appliquée est inférieure à ce seuil, le matériau se comporte comme un solide : il se déforme de manière finie. Lorsqu'on applique une contrainte supérieure à ce seuil, le matériau s'écoule comme un fluide visqueux. Cependant, cette transition est [popupdefinition id=3900]réversible[/popupdefinition] : si on abaisse progressivement la contrainte sous le seuil durant l'écoulement le fluide s'immobilise. Il ne se remettra à couler que lorsqu'on imposera une contrainte supérieure au seuil.

### Des colloïdes parfois solides, parfois liquides

On est ainsi en présence d'un comportement assez déroutant par rapport au cadre de connaissances habituel qui sépare la [popupdefinition id=15841]matière[/popupdefinition] en deux classes principales, les solides et les liquides. Ces fluides à

seuil se comportent comme des solides dans certaines circonstances, et comme des liquides dans d'autres circonstances. En dépit de ce comportement original, ces matériaux sont des fluides au sens où nous les avons définis plus haut : ils sont déformables à volonté sans perdre leurs propriétés mécaniques. Ce comportement à seuil n'est pas spécifique des suspensions colloïdales concentrées. On le rencontre également avec les [popupdefinition id=5908]mousses[/popupdefinition], les [popupdefinition id=1496]gels[/popupdefinition], les [popupdefinition id=3304]émulsions[/popupdefinition] concentrées. Il présente l'intérêt pratique de pouvoir donner au matériau une forme quelconque qu'il conserve en dépit des effets de la [popupdefinition id=1014]gravité[/popupdefinition] : placer un tronçon de dentifrice sur la brosse à dents, étaler une peinture sur [popupdefinition id=10786]mur[/popupdefinition], étaler un [popupdefinition id=5834]béton[/popupdefinition], appliquer un [popupdefinition id=5408]mortier[/popupdefinition], décorer un gâteau avec de la crème chantilly, modeler des objets en pâte à sel, etc.

Une propriété remarquable de ces particules colloïdales est qu'une faible fraction volumique de telles particules en suspension dans un liquide peut donner un mélange ayant un seuil de contrainte très élevé, du fait que les particules exercent des forces mutuelles à des distances qui peuvent être de l'ordre de leur propre taille. Cet effet est utilisé par exemple pour toutes sortes de produits de revêtement et en cosmétique. La dispersion d'une faible fraction de particules de Laponite (une argile de synthèse) dans des peintures, gels, ou crèmes, a pour effet d'augmenter leur viscosité, voire leur donner un seuil de contrainte significatif. Néanmoins, ces particules très petites et en très faible concentration dans le mélange ont un impact négligeable sur les caractéristiques du produit final sec.

---

## Page 1 / 7 - Les émulsions, mélanges de liquides visqueux

**Dans de nombreuses situations pratiques, on souhaite répartir un [popupdefinition id=15334]liquide[/popupdefinition] sur une surface [popupdefinition id=15332]solide[/popupdefinition] ou le faire pénétrer dans un milieu poreux de façon progressive. C'est par exemple le cas de médicaments que l'on administre par voie cutanée.**



**Mayonnaise. © Jason Terk, Wikimedia commons, CC by 2.0**

Si ce liquide a une faible viscosité, il ne sera pas aussi facile de le manipuler, de le répartir sur une surface ou de lui donner une forme quelconque. Pour remédier à ce problème, on utilise un procédé qui place le liquide dans un mélange globalement beaucoup plus visqueux : il s'agit de la mise en [popupdefinition id=3304]émulsion[/popupdefinition]. Ce procédé consiste à disperser le liquide en gouttelettes au sein d'un autre liquide. Le mélange ainsi obtenu est une suspension de gouttelettes, dont la [popupdefinition id=2018]viscosité[/popupdefinition] augmente en général avec la concentration. C'est un fluide à seuil à des concentrations en gouttelettes suffisamment élevées. On utilise notamment cette technique en cosmétique (crèmes hydratantes), en pharmaceutique ([popupdefinition id=3058]baumes[/popupdefinition], crèmes diverses), en génie civil (fluides pétroliers), en agroalimentaire (mayonnaise, vinaigrette, beurre) et dans le domaine des explosifs (émulsions explosives).



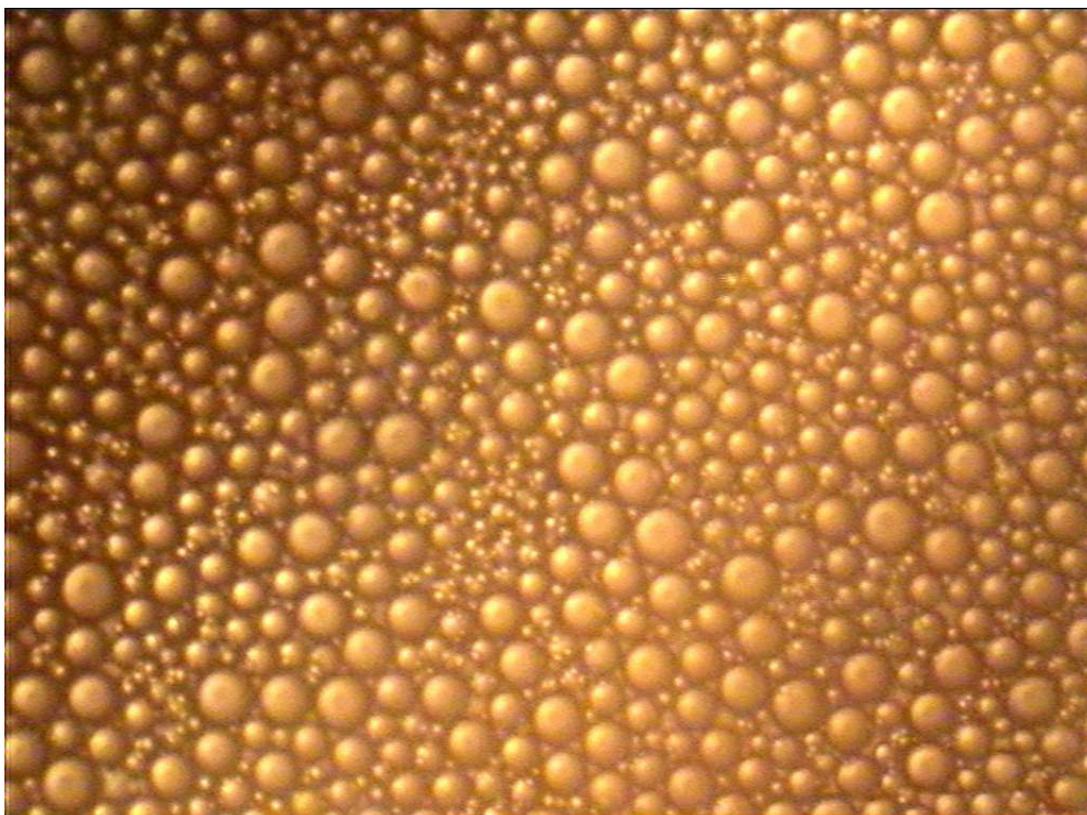
**La mayonnaise est une émulsion typique que l'on rencontre dans la vie quotidienne. © DP**

En fait, la préparation d'une émulsion dans un liquide n'a rien d'évident. La division d'une [popupdefinition id=7808]goutte[/popupdefinition] en deux plus petites gouttes augmente l'aire totale de leur interface avec le liquide ambiant. La création de gouttes à partir d'un [popupdefinition id=15919]volume[/popupdefinition] compact de liquide implique donc une augmentation très importante de l'aire des interfaces entre les deux liquides. Ce qui demande en

général de fournir de l'énergie au système, car on place un plus grand nombre de molécules de chaque phase en contact. En outre, lorsqu'on prépare une émulsion en la mélangeant vigoureusement, l'énergie nécessaire à la division des gouttes en plus petites gouttes est transmise via les forces visqueuses au sein du liquide ambiant.

### Émulsions, instabilité et coalescence

À une vitesse de cisaillement donnée, on atteint au bout d'un moment une taille de goutte critique, qui dépend de cette vitesse et du rapport des viscosités du liquide et des gouttes. À partir de cette taille, il n'est plus possible de diviser les gouttes sous la seule action des forces visqueuses. Le défaut majeur de ce type de mélange est son instabilité : deux gouttes qui se rencontrent fusionnent rapidement pour former une plus grosse goutte, de façon à minimiser l'énergie de surface. On appelle ce processus la coalescence. Il est donc nécessaire d'ajouter des produits stabilisants pour ralentir ce phénomène, les surfactants, qui se placent le long des interfaces et empêchent que les liquides de deux gouttes voisines ne coalescent.



Émulsion huile (dodécane) dans eau à concentration modérée (75 %, à gauche). Les bulles d'huile sont bien régulières. À concentration élevée (85 %, à droite), les gouttes sont alors écrasées les unes contre les autres. © L. Ducloué

La mayonnaise est une émulsion élaborée en dispersant des gouttes d'huile dans une solution aqueuse de jaune d'œuf, constitué d'eau à 50 %, et de moutarde. Lorsque seuls les ingrédients de base (eau et huile) sont fouettés dans un récipient, on peut pendant quelques instants créer de grosses gouttes d'huile. Mais celles-ci se regroupent à nouveau rapidement en remontant à la surface du mélange. Le jaune d'œuf et la moutarde

contenant notamment de la lécithine, ils jouent le rôle de surfactant, stabilisant l'émulsion. La consistance du produit final dépend ensuite du rapport des volumes d'huile et de solution aqueuse. Une faible proportion d'huile donne un mélange très liquide, dont la viscosité est peu différente de celle de l'eau, car les gouttes d'huile sont éloignées les unes des autres. Pour que la viscosité du mélange augmente significativement, il faut que la proportion d'huile en volume par rapport au volume total soit de l'ordre de 80 %. Dans ce cas, les gouttes sont si près les unes des autres qu'elles sont obligées de se déformer pour tenir dans le volume de l'échantillon.

### Mayonnaise et seuil de contrainte

Chaque goutte étant coincée entre ses voisines comme dans une cage, le réseau de gouttes forme finalement une structure solide qui ne peut être brisée qu'en lui appliquant une force suffisamment grande permettant à un certain nombre de gouttes de sortir de leur cage. En maintenant cette force, on va poursuivre le processus sur d'autres gouttes, ce qui va induire au bout du compte une déformation macroscopique inexorable du [popupdefinition id=15914]matériau[/popupdefinition] : il s'écoule. Ainsi une émulsion concentrée est un fluide à seuil : solide sous une certaine contrainte, liquide au-delà.

Le seuil de contrainte joue un rôle déterminant lors de l'utilisation de la mayonnaise, car il conditionne la force nécessaire pour la manipuler et la forme qu'elle prendra sous l'action de la [popupdefinition id=1014]gravité[/popupdefinition] : si le seuil est faible, les dépôts ne conservent pas leur forme initiale, la mayonnaise forme une flaque dans l'assiette. La valeur de ce seuil est ajustable par la taille des gouttes. Cependant, contrairement à une idée reçue, on ne modifie pas la concentration en gouttes en réduisant leur taille, autrement dit en brassant plus longtemps ou plus violemment le mélange. En effet, en observant chaque système à une échelle proportionnelle à la taille des gouttes qu'il contient, on retrouve les mêmes caractéristiques géométriques, donc les mêmes rapports de volumes des différentes phases. En revanche, en réduisant leur taille, on augmente la résistance élastique de chaque goutte, qui est directement reliée au comportement macroscopique du système. On augmente ainsi le seuil de contrainte du matériau.

---

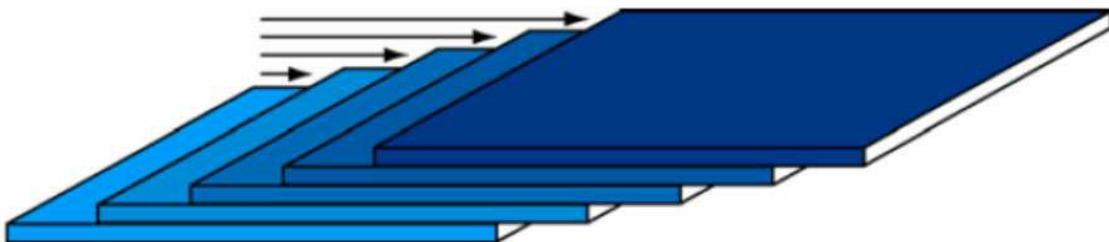
## Page 1 / 7 - La rhéométrie, ou mesurer les déformations d'un matériau

**L'objectif de la rhéométrie est la mesure des propriétés rhéologiques des matériaux, autrement dit les relations entre les contraintes au sein du [popupdefinition id=15914]matériau[/popupdefinition] (force par unité de surface) et l'histoire des déformations qu'il a subies.**



**La déformation d'un matériau. © Raniramli, Pixabay, DP**

Si on la considère dans son sens le plus général, cette problématique est cependant trop vaste : en pratique, il n'est pas envisageable de suivre l'histoire des déformations en chaque point du fluide et de mesurer les différentes composantes du tenseur des contraintes. Les techniques de rhéométrie courantes mettent en jeu des écoulements suffisamment simples pour que d'une part, la loi de comportement du matériau dans ces conditions s'écrive sous la forme d'une relation entre un petit nombre de variables, et d'autre part, il soit possible de mesurer directement ces variables par des mesures « macroscopiques », autrement dit sans mesures locales à l'intérieur du matériau.



**Lors d'une déformation en cisaillement simple, tout se passe comme si les couches de liquides glissaient les unes parallèlement aux autres. © Philippe Coussot**

Le principal type d'écoulement répondant à ces critères est le cisaillement simple (voir dessin ci-dessus). Dans ce cas, les couches de matériau tendent à glisser les unes parallèlement aux autres sous l'action d'une contrainte tangentielle, induisant un [popupdefinition id=15141]gradient[/popupdefinition] de [popupdefinition id=324]vitesse[/popupdefinition] (vitesse relative en fonction de l'épaisseur). Différentes géométries permettent un tel écoulement : cône-plan, plans parallèles, cylindres coaxiaux, conduite, plan incliné.

### Précautions pour les expériences rhéologiques

Une expérience de rhéométrie avec un fluide complexe n'a rien d'une technique facile à mettre en œuvre. Il reste très délicat d'obtenir des mesures fiables, qui représentent effectivement le comportement du matériau ; de nombreux phénomènes perturbateurs des mesures peuvent en effet survenir en cours d'expérience. Les calculs théoriques permettant d'interpréter les mesures macroscopiques en [popupdefinition id=15841]matière[/popupdefinition] de comportement intrinsèque du matériau s'appuient sur des hypothèses d'homogénéité, de forme de l'échantillon et de caractéristiques d'écoulement. Si ces hypothèses ne sont plus valides du fait de phénomènes perturbateurs ([popupdefinition id=2843]sédimentation[/popupdefinition], bandes de cisaillement, évaporation, déformation de la surface libre de l'échantillon, glissement aux parois, etc.), les calculs ne fournissent pas d'informations exactes concernant le matériau considéré. De nombreuses précautions expérimentales s'imposent donc. S'ajoute à cela le fait que les procédures expérimentales (c'est-à-dire l'histoire de l'écoulement imposé au matériau) doivent être adaptées au type de comportement étudié.



**L'outil privilégié pour mesurer la viscosité d'un liquide est le rhéomètre rotatif, qui utilise diverses géométries de mesure telles que des disques parallèles qui, après s'être rapprochés en écrasant quelque peu l'échantillon, tournent l'un par rapport à l'autre autour du même axe.**

**© Philippe Cousot**

Finalement, de nombreuses précautions expérimentales doivent être prises. Il faut surveiller les évolutions de l'échantillon, adapter les procédures appliquées en fonction des réactions du matériau, etc. La rhéométrie des fluides complexes reste un art.

Pour pallier ces difficultés et également disposer d'informations concernant les évolutions de la structure interne en cours d'écoulement, dans l'esprit de la rhéophysique, on applique de plus en plus souvent depuis environ une quinzaine d'années des techniques de [popupdefinition id=1020]diffusion[/popupdefinition] de [popupdefinition id=326]lumière[/popupdefinition] ou de [popupdefinition id=3498]neutrons[/popupdefinition] pour étudier la structure des suspensions. On utilise aussi des techniques de vélocimétrie (PIV pour *particle image velocity*, IRM) pour obtenir des informations sur les champs de vitesse au sein des fluides.

Certaines suspensions d'argile ou de silice forment le type de structure décrite à la page consacrée aux colloïdes et se comportent comme des fluides à seuil, mais elles donnent l'impression de se liquéfier au-delà du seuil de contrainte. Il est possible de les maintenir en écoulement en imposant une contrainte inférieure à celle qu'il a fallu appliquer pour briser la structure initiale.



**Bitume.** © *U.S. Department of Defense Current Photos, Wikimedia commons, DP*

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, cet effet est réversible : en laissant le matériau au repos, la structure initiale se reforme progressivement au cours du temps, et le seuil de contrainte apparent du matériau augmente en conséquence. On dit que ces matériaux sont thixotropes.

Cette propriété étrange s'explique par un autre phénomène physique résultant de la petite taille des particules colloïdales : le mouvement brownien, du nom du botaniste écossais Robert Brown, l'un des premiers à avoir observé et décrit ce phénomène pour des grains de pollen. Du fait de l'agitation thermique, les molécules du liquide entrent en collision avec les particules solides en suspension. La direction et l'amplitude des forces exercées sur la particule et résultant de ces chocs sont imprévisibles si on les considère individuellement. En revanche, la moyenne de la force sur l'ensemble des collisions possibles à un instant donné est reliée à la température du système, laquelle est associée à l'agitation des molécules du liquide. Cette force totale instantanée induit un mouvement de la particule à travers le liquide d'autant plus important que l'inertie de la particule est faible. Finalement, du fait des variations au cours du temps de la force totale, les particules sont animées de mouvements erratiques qui les conduisent à diffuser plus ou moins largement à

travers le liquide.

### Forces d'interaction dans la suspension et renfort

Cette agitation est d'autant plus importante que les particules sont de petite taille. Grâce au mouvement brownien couplé aux forces d'interaction entre particules, le réseau d'interactions à l'origine du seuil de contrainte du matériau se renforce progressivement au fil du temps : les particules explorent et atteignent des positions sans cesse plus stables, autrement dit associées à des puits de potentiel plus profonds, ou bien forment un réseau d'interactions de plus en plus étendu. Finalement, la structure est de plus en plus résistante. Durant l'écoulement, ce réseau se brise en partie, mais commence sa reconstruction dès que le matériau est arrêté.



**Origine du comportement thixotrope. Monocouche de billes de polystyrène (3.1 nm) sur une interface eau-huile. À l'instant initial, les particules se repoussent à courte distance, l'arrangement a tendance à s'ordonner. On ajoute alors du sel qui réduit les forces de répulsion électrostatique, permettant aux particules de s'agréger. La vue de gauche montre la désorganisation induite après quelques instants, les particules ont commencé à s'agréger par couple ou triplets. La vue de droite montre le même système après 1.400 minutes, les particules sont alors agrégées en flocons s'étendant largement à travers le liquide. La suspension de droite ne comporte aucune structure, son comportement est celui d'un liquide simple. Lorsque la structure de la suspension de droite est complètement formée, son comportement est celui d'un solide. Ce type de phénomène se produit dans des suspensions thixotropes (boues, peintures, ciment) qui se structurent au repos, et voient donc leur viscosité apparente augmenter, mais se déstructurent dès qu'on les agite suffisamment. Elles se liquéfient alors (c'est-à-dire que leur viscosité chute). © Reproduit à partir de Park *et al.*, *Langmuir*, 2008, *American Chemical Society***

Ce comportement thixotrope est utile en pratique lorsque l'on souhaite disposer d'un fluide très visqueux au repos, mais offrant une très faible [popupdefinition id=10889]résistance[/popupdefinition] à l'écoulement. C'est en particulier le cas des peintures : l'utilisateur préfère une peinture qui imprègne facilement le pinceau et qui s'étale sans effort sur le [popupdefinition id=10786]mur[/popupdefinition], mais aussi qui devient rapidement plus visqueuse dès qu'elle a été étalée, autrement dit au repos, de façon à ce qu'elle ne coule pas sur le mur.

La formulation des [popupdefinition id=5834]bétons[/popupdefinition] dits autoplaçants a des objectifs analogues : ces matériaux ont une faible viscosité apparente lorsqu'ils coulent, si bien qu'ils sont facilement pompables et épousent bien la forme des [popupdefinition id=10595]coffrages[/popupdefinition] qui leur donnent leur forme finale. Dès que l'écoulement s'arrête, ils se restructurent rapidement, ce qui permet d'éviter que les particules grossières ([popupdefinition id=6009]sable[/popupdefinition], graviers) ne sédimentent. Les boues de forage offrent un autre exemple de matériau thixotrope : elles sont notamment utilisées pour faciliter le creusement et l'extraction de la roche. Elles doivent par conséquent pouvoir s'écouler facilement lors de leur injection dans le puits et pour la lubrification des outils de forage. Mais il faut aussi qu'elles soient capables de supporter des éléments de roches en suspension lors d'un arrêt du système, ce qui est possible grâce à une augmentation suffisamment rapide du seuil de contrainte au repos.

---

### Page 1 / 7 - Un livre de Philippe Coussot : Rhéophysique, la matière dans tous ses états

À découvrir aux éditions EDP Sciences : *Rhéophysique, la [popupdefinition id=15841]matière[/popupdefinition] dans tous ses états*, un livre de Philippe Coussot.

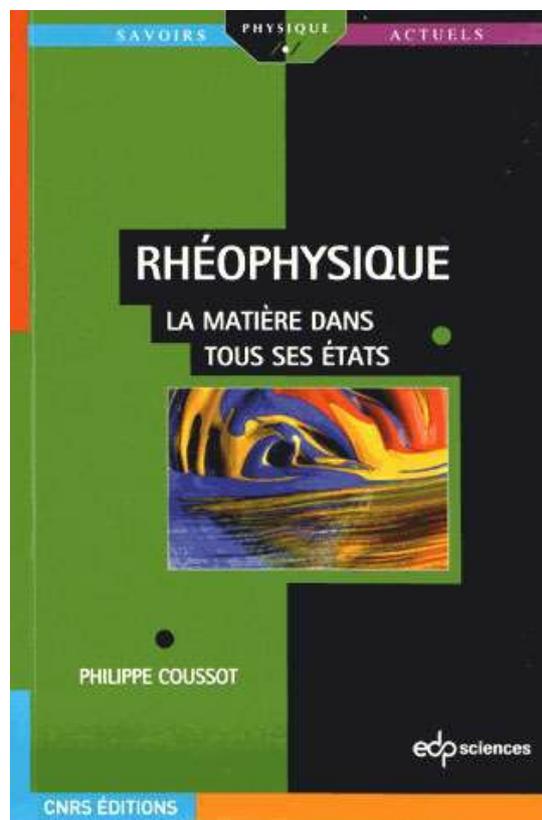


**Mousse de la bière. © Hans, Plxabay, DP**

Les peintures, encres, [popupdefinition id=4696]ciments[/popupdefinition], boues, mousses, [popupdefinition id=3304]émulsions[/popupdefinition], dentifrices, [popupdefinition id=1496]gels[/popupdefinition], purées ont des structures complexes et des comportements parfois surprenants, souvent intermédiaires entre ceux des [popupdefinition id=15332]solides[/popupdefinition] et ceux des [popupdefinition id=15334]liquides[/popupdefinition] simples. Par exemple, la [popupdefinition id=5908]mousse[/popupdefinition], la boue ou le dentifrice réagissent comme des solides si l'on ne leur applique pas des contraintes trop fortes. Ils conservent alors la forme qu'on leur a donnée, mais dès qu'on les sollicite

suffisamment, ils coulent comme des liquides ordinaires, ce qui est bien utile lorsqu'il s'agit de se raser ou de se brosser les dents.

Ces matériaux correspondent à des états de la matière qui sortent du cadre habituel de la [popupdefinition id=15839]physique[/popupdefinition] des [popupdefinition id=15336]gaz[/popupdefinition], des liquides ou des solides moléculaires, puisqu'ils sont composés d'éléments plus gros : [popupdefinition id=803]polymères[/popupdefinition], cellules, grains, bulles, [popupdefinition id=7808]gouttes[/popupdefinition], etc. En pratique, on cherche à analyser leurs évolutions internes telles que le vieillissement, la déstructuration ou encore la [popupdefinition id=17942]séparation[/popupdefinition] de phases, à mettre au point les matériaux en fonction des propriétés recherchées, ou bien à en inventer de nouveaux aux propriétés plus originales. Pour cela, il est essentiel de comprendre comment s'écoulent ou se déforment ces matériaux en fonction des interactions et des structures formées par les éléments qu'ils contiennent.



[Cliquez pour acheter le livre de l'auteur](#)

### **L'ouvrage de Philippe Coussot : *Rhéophysique, la matière dans tous ses états***

Cet ouvrage paru aux éditions EDP Sciences s'adresse à un large public : étudiants à partir de la licence, ingénieurs ou chercheurs en mécanique, physique, [popupdefinition id=15837]chimie[/popupdefinition], biologie, etc. Il présente une vision unifiée de l'origine physicochimique des comportements mécaniques des gaz, solides ou liquides simples, suspensions, polymères, [popupdefinition id=3553]colloïdes[/popupdefinition], émulsions, mousses, [popupdefinition id=1507]granulaires[/popupdefinition], ainsi que les techniques de mesure de ces comportements. Le formalisme mathématique a été allégé au maximum afin de se focaliser sur les explications physiques des phénomènes.

