

L'équipe Rhéophysique et Milieux Poreux compte 15 chercheurs, 4 ingénieurs et techniciens et une quinzaine de doctorants et postdoctorants. Elle s'est spécialisée dans l'étude et la modélisation des propriétés physiques des matériaux divisés, constitués de particules solides, de gouttes ou de bulles, empilées ou suspendues en présence d'un ou plusieurs fluides. Nos travaux combinent des approches expérimentales et théoriques, ainsi que des simulations numériques d'éléments discrets. Ils portent principalement sur les matériaux granulaires, les pâtes, les suspensions colloïdales et non colloïdales, les mousses et matériaux aérés, les gels, les matériaux fibreux, les systèmes capillaires, les milieux poreux, .... L'une de nos spécificités est de privilégier les matériaux modèles, élaborés à dessein pour représenter une version simplifiée mais générique de la classe de matériaux étudiée, avec des paramètres physiques clairement identifiés et contrôlés. Ce type d'expérimentation autorise généralement une comparaison quantitative avec des modélisations physiques ou des simulations numériques développées dans ce but. Nos objectifs scientifiques concernent la bonne compréhension des propriétés génériques des matériaux dans le but d'éclairer la voie d'un large spectre d'applications dans de nombreux domaines, comme par exemple la construction et l'habitat, l'environnement, ...

## Transfert et transport dans les milieux poreux

### Transports d'humidité dans les matériaux biosourcés

P. Coussot, B. Maillet, R. Sidi-Boulenouar, L. Brochard, S. Caré

Comment l'eau pénètre-t-elle dans le bois et le fait gonfler ? Pourquoi se sent-on plus à l'aise dans des vêtements en coton, en lin ou en chanvre ? Pourquoi est-il si long de sécher du bois ou du papier ? Pourquoi est-il plus sain de vivre dans une maison faite de murs biosourcés ? A l'origine de ces phénomènes on trouve la remarquable capacité de ces matériaux à absorber l'eau liquide ou la vapeur de l'environnement grâce à des liaisons hydrogène, et ainsi former des inclusions d'eau à l'échelle nanométrique entre les microfibrilles de cellulose. Cette eau dite « liée » peut représenter jusqu'à 30 % de la masse sèche du matériau ; elle s'évapore dans un air ambiant sec, régulant ainsi l'humidité ambiante ; et elle induit le gonflement ou le retrait de ces matériaux à peu près proportionnellement à sa quantité. Une autre propriété remarquable de cette eau liée est qu'elle peut diffuser assez rapidement à l'intérieur des fibres de cellulose. Le transport de l'eau liée et ses échanges avec les phases liquide et vapeur (standard) conduisent à des propriétés de transport de l'eau complexes et originales dans les matériaux cellulosiques ou les fibres végétales. Par exemple, l'imbibition spontanée de l'eau dans le bois n'est pas régie par des effets capillaires mais par une diffusion d'eau liée en avant du front liquide, ce qui ralentit la dynamique de plusieurs ordres de grandeur dans le temps [1-3]. De son côté, le séchage du bois est contrôlé par la diffusion de l'eau liée qui extrait l'eau libre en profondeur dans l'échantillon, conduisant là encore à un processus de diffusion (lent) en deux étapes [4-5].

L'observation et la quantification de ces phénomènes nécessitent des techniques ou des approches spécifiques, la RMN et l'IRM étant particulièrement utiles car elles permettent de détecter les quantités moléculaires d'eau à l'intérieur des solides, et de distinguer l'eau dans ses différentes phases [6]. Nos approches nous ont permis de déterminer le coefficient de transport et de diffusion de l'eau liée dans une pièce de bois, dans un réseau de fibres (l'eau liée sautant d'une fibre à l'autre au contact de celle-ci) [7-8], et même le long d'une seule fibre cellulosique [9]. Ces travaux vont notamment se poursuivre dans le cadre de l'ERC Advanced Grant PHYBBIOMAT, qui a pour objectif de prédire le comportement hygrothermique des matériaux de construction biosourcés. Ceci s'appuiera sur des caractérisations des processus de transport élémentaires, sur des matériaux modèles et des matériaux réels, ainsi qu'une modélisation détaillée des couplages entre transferts de chaleur et d'humidité. Les premiers travaux publiés dans ce cadre montrent comment on doit envisager les mesures de dynamique de sorption de façon contrôlée [10], et comment il est possible de déterminer séparément les coefficients de diffusion de la

vapeur et de l'eau liée dans une structure à base de fibres de cellulose, puis d'en déduire un modèle de transport global, tenant compte des échanges entre les deux phases [11].

## Relaxométrie dynamique RMN pour l'étude des transferts en milieux poreux

P. Coussot, B. Maillat, R. Sidi-Boulenouar

Les milieux poreux sont omniprésents dans notre vie quotidienne : sols, bois, briques, béton, éponges, textiles, etc. Il est crucial de pouvoir identifier comment un liquide, éventuellement transportant des particules ou des ions, peut pénétrer dans le milieu poreux ou en être extrait. La microtomographie à rayons X à haute résolution, l'imagerie neutronique ou l'imagerie par résonance magnétique ne fournissent en général pas d'informations quantitatives à l'échelle des micro- ou nano-pores. Au fil du temps nous avons développé une approche originale qui fournit diverses informations directes et quantitatives sur la distribution du liquide à l'intérieur de la structure poreuse et ses variations dans le temps associées à des transports de fluides et/ou des changements de phase. Cette technique, que nous avons appelé relaxométrie dynamique par RMN [12] s'appuie sur des mesures successives de la densité de probabilité du temps de relaxation RMN, obtenue par transformée de Laplace du signal RMN durant sa relaxation. Nous analysons alors les évolutions au cours du temps de cette densité de probabilité, en nous appuyant sur l'évolution de la largeur des pics, de leur position, ou encore des fractions de fluide associées à chaque pic. Nous avons ainsi pu analyser et décrire en détails les mécanismes physiques (hétérogénéités spatiales, couche moléculaire adsorbée, mouillage ou démouillage, transferts eau libre-eau liée, etc) régissant l'imbibition et le séchage dans des milieux nanoporeux [13], dans la cellulose [14], dans des milieux bi-poreux [15], ou encore dans le bois [16-17].

## Séchage d'une émulsion

P. Coussot, M. Goavec (doctorante 2015-2018)

Collaborations : V. Gaudefroy (dépt MAST-MIT, Univ Eiffel)

Afin de comprendre les mécanismes du séchage des émulsions de bitume utilisées dans certains matériaux de chaussée, nous avons utilisé l'IRM pour visualiser directement les évolutions des différentes phases du matériau. En étudiant une émulsion modèle, nous avons montré que, contrairement au séchage de beaucoup de poreux rigides, le processus dans le cas de tels matériaux mous induit le développement de fortes hétérogénéités (gradient de concentration en eau) qui finalement provoquent une forte décroissance du taux de séchage [18]. Une étude analogue a ensuite été menée sur des émulsions de bitume [19] puis sur une chaussée modèle constituée d'un mélange de grains et d'une émulsion de bitume.

## Transferts hydriques à l'interface entre une pâte et un milieu poreux

P. Coussot, N. Ben Abdelouahab (doctorant 2016-2019)

Collaboration : A. Gossard (CEA)

L'objectif de ce travail (thèse de Nidal Ben Abdelouahab) est de tester la possibilité d'utiliser des compresses (pâte d'argile ou cellulose) pour la décontamination des murs de sites nucléaires. Le procédé consiste à placer une compresse humide sur un mur, qui va absorber une partie de cette humidité, puis à laisser sécher la compresse. Durant ce séchage l'eau absorbée dans la paroi est aspirée (par effets capillaires) vers la compresse et peut transporter avec elle des contaminants qui vont se fixer sur la compresse. Afin de comprendre les mécanismes en jeu dans ce procédé nous avons d'abord étudié les transferts de liquide (imbibition puis séchage) lors de l'application d'une compresse (pâte de cellulose et de kaolin) humide sur un mur modèle (empilement granulaire). Nous avons ainsi notamment montré qu'après une phase d'imbibition contrôlée par la compresse (et non par l'imbibition capillaire spontanée) [20], le séchage s'opère dans tous les cas par vidanges successives des plus gros pores (quelle que soit leur profondeur par rapport à la surface libre ventilée) tandis que les autres pores restent saturés [21]. L'IRM et la RMN sont largement utilisées dans ce cadre et fournissent les informations clé, par exemple concernant les caractéristiques détaillées du séchage d'une pâte de cellulose [22]. Ce travail a été poursuivi dans le cadre de la thèse de Hicham Dialla, avec l'objectif d'étudier les mêmes phénomènes mais désormais avec une paroi en mortier. Il a été possible de suivre la distribution d'eau dans les différents matériaux au cours de l'imbibition et du séchage, mais les résultats se sont avérés plus difficilement généralisables.

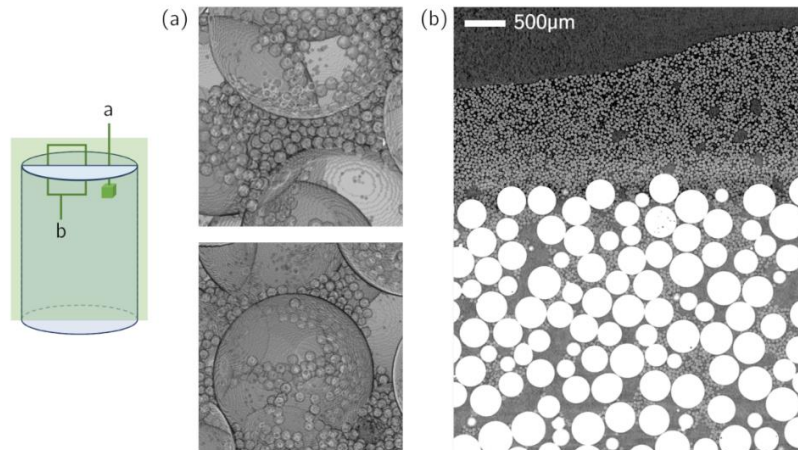
## Transport et dépôt de colloïdes en milieu poreux

P. Coussot, G. Gerber [doctorant 2016-2019]

Collaboration : D. Weitz (Harvard)

Les transports et dépôts éventuels de particules colloïdales jouent un rôle majeur dans une multitude de situations : filtration, transports et accumulation de polluants dans les sols, processus d'injection, filtration, nettoyage de solutions pour des applications biologiques ou médicales, etc. Dans ces situations, des particules en général sub-microniques (agents chimiques, métaux lourds, micro-organismes, argiles, etc) se déplacent en suspension dans un liquide à travers une matrice poreuse sur les parois de laquelle elles peuvent éventuellement s'adsorber. Dans ce domaine on cherche généralement à prédire globalement ou à interpréter, à partir de simulations numériques, l'histoire des effluents à la sortie du milieu poreux (« courbe de percée »), sans une vision claire des évolutions de la distribution des dépôts à l'intérieur du milieu. Dans le cadre de la

thèse de G. Gerber (ENPC-Harvard ; prix de thèse UPE 2020) nous avons développé des approches fondamentales permettant de caractériser complètement l'évolution de ces dépôts à l'intérieur de l'échantillon. Nous avons utilisé des matériaux modèles : empilements de billes pour les milieux poreux, et particules colloïdales aux interactions contrôlées en suspension dans un liquide d'indice optique adapté (lorsque nécessaire) ; et les mesures internes ont été réalisées principalement à l'aide de deux techniques : l'IRM et la microscopie confocale. Ces travaux ont permis de montrer que lors d'une filtration (de particules non-colloïdales) les particules pénètrent à de grandes profondeurs jusqu'au moment où un blocage complet se développe à l'entrée de l'échantillon. Ces caractéristiques peuvent être prédites par un simple modèle probabiliste [23]. Nous avons également montré le fonctionnement interne des transports-dépôts-reprises au sein d'un poreux en fonction du rapport des interactions colloïdales (particule-paroi ou particule-particule) et de la force de traînée du liquide sur les particules [24]. Enfin il s'est avéré possible de décrire la dynamique de propagation d'un dépôt de particules du fait d'une injection continue, à partir de « travelling waves », et de reproduire ainsi les observations à l'échelle locale au cours du temps [25].



Images obtenues par microtomographie RX sur des empilements de billes de verre (415 μm) préalablement soumis à un écoulement de suspension de billes de polystyrène (40 μm) n'interagissant avec les premières que par effet d'exclusion stérique. A gauche : schéma montrant la configuration géométrique dans laquelle les images ont été obtenues. (a) Image 3D des particules piégées colmatant le réseau liquide entre les grains. (b) Coupe 2D du système (les grains sont blancs, les particules sont grises)

## Mousses solides : perméabilité, imbibition liquide, acoustique

V. Langlois, O. Pitois, X. Chateau, Y. Khidas, A. Kaddami [doctorante 2016-2019]  
Collaboration : C. Perrot (MSME)

Nous nous sommes intéressés à plusieurs phénomènes de transport au sein de mousses solides produites au laboratoire. Nous avons étudié et modélisé la perméabilité au fluide saturant de mousses monodisperses à cellules totalement ouvertes [26]. L'effet d'une proportion de cellules fermées a également été mesuré et modélisé sur réseaux à partir de la loi locale décrivant le comportement d'une ouverture et d'une théorie de percolation de Kirkpatrick modifiée [27,28]. Une extension des approches numériques aux calculs de la tortuosité (haute fréquence) en fonction du taux d'ouvertures a également été proposée [29]. L'effet de la polydispersité des cellules a été étudié numériquement [30]. Nous avons montré en particulier que la polydispersité permet de réduire le seuil de percolation de la porosité selon un paramètre d'ordre fondé sur le nombre de voisins.

Nous nous sommes intéressés à la vitesse à laquelle un liquide (eau) peut envahir la porosité des diverses mousses solides à cellules ouvertes. Nous avons mesuré cette vitesse d'imbibition, ainsi que la perméabilité au liquide et la pression capillaire de ces mousses. Bien que nous obtenions un accord qualitatif avec la classique loi de Washburn, les vitesses d'imbibition sont un ordre de grandeur plus petites que les valeurs prédites [31]. Cet écart a été attribué à un excès de temps passé par l'interface liquide-gaz à travers les ouvertures entre les pores, pour lequel nous avons fourni une expression empirique faisant intervenir la taille des pores et la fraction volumique de solide. Ce résultat constitue une première étape pour comprendre en profondeur le processus d'imbibition dans les matériaux moussés.

Enfin, nous avons étudié les propriétés acoustiques des mousses solides [28, 32-35]. Dans le cas de mousses solides minérales à cellules totalement ouvertes, nous avons montré qu'un modèle Johnson Champoux Allard Lafarge, supposant le squelette solide rigide, permet une prédiction précise de l'absorption acoustique [33]. En revanche, en présence d'une proportion significative de cellules fermées, un fort couplage entre le fluide et le squelette solide rend nécessaire la prise en compte de l'élasticité du squelette solide [35].

## Mousses liquides en milieux poreux

O. Pitois, V. Langlois, M. Ceccaldi (doctorante 2020-2023), Ali Salamé (doctorant 2022-2025)

Collaboration : M. Guéguen (CPDM, Univ Eiffel), S. Vincent-Bonnieu (Agence Spatiale Européenne, Nordwick)

L'injection de mousse dans des milieux poreux a été étudiée pour l'industrie pétrolière et récemment pour des procédés de dépollution des sols afin d'éliminer les contaminants. L'effet recherché porte sur la rhéologie complexe de la mousse liquide, qui lui permet d'envahir le milieu de façon plus homogène qu'un liquide simple, surtout si la perméabilité du milieu est relativement importante. Pour les applications de dépollution/remédiation il est aussi important de connaître la vitesse à laquelle le liquide de la mousse va circuler dans l'ensemble formé par le milieu poreux rempli de mousse liquide. Nous nous sommes intéressés à cette question à partir d'une expérience modèle permettant de contrôler la taille des pores, celle des bulles, la fraction volumique de liquide, ainsi que le comportement des interfaces (mobile/immobile en fonction du tensioactif choisi).

La perméabilité au liquide des échantillons, adimensionnée par le carré de la taille des bulles, décroît sur plusieurs ordres de grandeurs à mesure que le rapport  $r$ , formé entre la taille des bulles et celle des grains du milieu, augmente. La perméabilité relative (celle du milieu poreux rempli de mousse sur celle du milieu poreux rempli de liquide) mesurée pour les mousses à interfaces immobiles présente une valeur optimale en fonction de  $r$ , alors qu'elle augmente de manière significative pour les mousses à interfaces mobiles. Ainsi, le rapport des perméabilités relatives mobile/immobile révèle deux régimes en fonction de  $r$  : pour  $r \leq 0,25$ , le rapport de perméabilité est égal au rapport mesuré pour les mousses en volume (non confinées), tandis que pour des valeurs de  $r$  plus importantes, le rapport de perméabilité est augmenté d'un ordre de grandeur [36]. Ce résultat semble relié au changement de microstructure qui s'opère lorsque le rapport  $r$  augmente jusqu'à 0,5 : en effet un réseau liquide différent de celui de la mousse non-confinée s'active, composé de canaux de surface et de ponts liquides, les premiers reliant les seconds même en cas de faibles fractions en liquide. Nous avons proposé une modélisation de ces changements. Le résultat principal est que la mousse se trouvant dans les pores est relativement « asséchée » par rapport à la mousse non-confinée, du fait de la mobilisation du liquide dans les canaux de surface et dans les ponts liquides [37]. Ceci explique au premier ordre la forte réduction mesurée pour la perméabilité au liquide de la mousse. Au-delà du drainage du liquide, on s'attend à ce que toutes les propriétés de la mousse confinée s'en trouvent impactées.

## **Rhéologie des pâtes et suspensions**

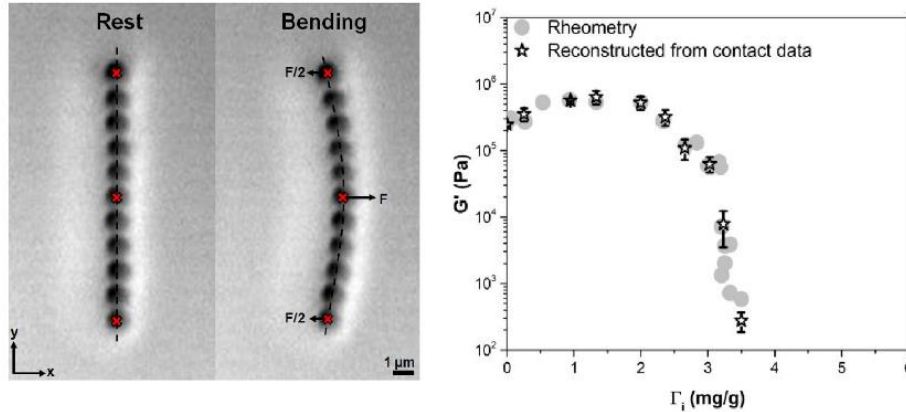
### Rhéologie et vieillissement des suspensions colloïdales denses

X. Chateau, J. Goyon, A. Lemaître, F. Bonacci (doctorant 2016-2019), A. Auel (doctorant 2020-2023)

Collaboration : E. Furst (CPDM, Univ Delaware)

Les suspensions denses de particules microniques ont des caractéristiques rhéologiques complexes faisant souvent apparaître un seuil d'écoulement et un comportement thixotrope dont l'origine microscopique demeure mal comprise. Nous avons mis en évidence que pour des suspensions denses de silice colloïdale dans une solution ionique, la thixotropie mesurée se produit sans modification de la microstructure. À l'aide d'expériences de flexion trois points sur des bâtonnets de particules manipulés avec des pinces optiques, nous avons montré que les contacts entre particules résistent au roulement et que les propriétés mécaniques des contacts (rigidité et résistance) augmentent avec l'âge du contact. Ceci nous a permis de décrire les propriétés macroscopiques à partir des propriétés des contacts en utilisant des fonctions scalaires ne dépendant que de la microstructure de la suspension.

Nous avons ensuite montré qu'un tensioactif non ionique ajouté à la suspension modifie fortement les propriétés de roulement des contacts entre particules et la rhéologie globale de la suspension. La modification des propriétés des contacts est attribuée à l'adsorption du surfactant qui provoque le passage d'un contact adhésif résistant au roulement à un contact non adhésif. Comme pour la suspension de silice non adjuvantée, la parfaite concordance entre les résultats de rhéométrie et ceux des essais réalisés sur des bâtonnets de particules démontre que les propriétés de contact entre grains contrôlent les propriétés globales de la suspension. Ces résultats amènent à reconsidérer en profondeur la compréhension de l'origine des comportements rhéologiques des suspensions colloïdales denses, ouvrant ainsi la voie à de potentielles avancées dans l'optimisation de leurs formulations.



A gauche : test de flexion à trois points sur une tige de billes de silice manipulée avec les pinces optiques (les pièges optiques sont représentés par les croix rouges) permettant de mesurer les propriétés de contact entre particules. A droite : Comparaison du module élastique de cisaillement ( $G'$ ) de suspensions denses de silice mesuré par rhéométrie (symboles gris) avec les valeurs calculées à partir de la rigidité des contacts mesurée en utilisant les pinces optiques (étoiles) en fonction de la masse de tensioactif ajoutée par unité de masse de bille ( $\Gamma_1$ ) (fraction volumique de la suspension : 45 %, force ionique : 0,15 M).

## Impression 3D des fluides à seuil

P. Coussot, N. Roussel

L'impression 3D de fluides à seuil (c'est-à-dire de matériaux capables de s'écouler comme des liquides seulement au-delà d'une contrainte critique) ouvre de nouvelles possibilités dans les domaines de la construction, de l'alimentation ou de la médecine. La technique d'impression habituelle consiste à extruder puis à déposer un filament de fluide à seuil sur la couche précédente. Une difficulté majeure est que, lors du processus de dépôt, certaines instabilités peuvent apparaître et avoir un impact catastrophique sur la structure 3D finale. Nous avons montré que ces instabilités peuvent être prédites en fonction des propriétés du matériau et/ou des paramètres d'impression. Nous avons ainsi étudié le dépôt d'un filament à partir d'essais systématiques avec un fluide à seuil modèle, faisant varier la valeur du seuil du matériau, la distance entre la buse et le substrat, la vitesse d'extrusion, le diamètre de la buse et la vitesse de déplacement de la buse. Nous montrons ainsi qu'une diversité de motifs apparaît : des gouttes, des lignes discontinues, des lignes droites, des méandres, des boucles alternées ou des boucles translattées. Nous avons ensuite montré que les transitions (courbes frontières) entre les différents régimes peuvent être prédites par des arguments théoriques, conduisant à proposer un diagramme générique prédisant les modèles observés en fonction de nombres sans dimension des différents paramètres du système [40].

Dans ce cadre nous avons notamment plus précisément étudié la rupture de filaments en gouttes de fluide à seuil (allongées). Nous avons décrit en détail le processus conduisant à la formation d'une zone liquide autour du pincement, ce qui nous a permis d'une part de mettre au point une technique originale de mesure du comportement rhéologique en élongation des fluides à seuil [41], et une technique de détermination du seuil de contrainte à partir de la mesure de la masse des gouttes [42].

## Matériaux cimentaires

Nicolas Roussel

La question au centre de notre travail est celle de matériaux et de procédés innovants permettant à la fois d'atteindre nos objectifs environnementaux et d'augmenter la productivité du secteur tout en ouvrant la porte à la customisation de masse demandée par nos architectes. La valorisation de sous-produits industriels nécessaires à la substitution progressive du ciment Portland ou d'une utilisation croissante de matières premières telles que la terre crue étant extrêmement limitée par les distances de transport, les solutions développées ne peuvent être que locales. Il apparaît ainsi que l'approche la plus efficace consiste à développer une compréhension physique générique pouvant s'adapter à tout déchet ou sous-produit industriel local et permettant la formulation de nouveaux matériaux de construction adaptés à de nouveaux procédés tels que l'impression 3D, par exemple.

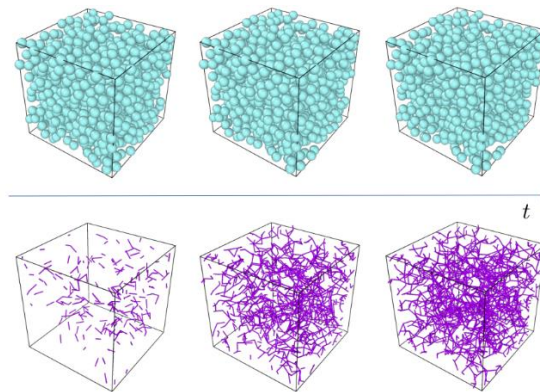
Notre compréhension est d'abord passée par l'étude des modifications potentielles des propriétés physiques de ces poudres alternatives au ciment Portland. Nous avons ainsi étudié l'effet de la polydispersité et des propriétés morphologiques des particules sur la fraction volumique solide maximale et sur la rhéologie de la suspension [43]. Nous avons en parallèle approfondi nos connaissances des incompatibilités chimiques, des compétitions d'adsorption des polymères utilisés comme adjuvants ou, même, de leur dégradation dans le cas d'une activation alcaline de la substitution [44, 45, 46]. Enfin, dans ces

matériaux à la prise plus lente ou en absence de coffrage dans le cas de l'impression 3D de béton, nous avons revisité les phénomènes de migration d'eau et du séchage dans des milieux poreux plus ou moins déformables [47, 48].

## Approche numérique des suspensions colloïdales

A. Lemaître, F. Puosi

Nombre de matériaux du génie civil et de l'environnement sont des pâtes colloïdales denses, impliquant des particules de formes variées, de tailles allant de quelques dizaines de nanomètres à quelques microns. Malgré les énormes efforts de recherche entrepris pour maîtriser leur formulation et leur mise en œuvre, la connaissance des mécanismes physiques qui contrôlent les interactions interparticulaires reste très limitée. La simulation numérique discrète est un outil indispensable pour identifier les mécanismes physiques pertinents et guider l'interprétation d'expériences. Le travail entrepris depuis l'arrivée de F. Puosi (décembre 2022) consiste à développer des modèles numériques capables de prendre en compte la complexité et la richesse des interactions entre les particules, afin de comprendre les mécanismes physiques qui, à l'échelle des particules, déterminent le comportement macroscopique de ces systèmes. Nous nous intéressons tout particulièrement à des suspensions de sphères adhésives, ainsi qu'à la construction de modèles numériques d'argiles à l'échelle des plaquettes.



Simulation numérique du vieillissement d'une suspension colloïdale adhésive

## Matériaux granulaires

### Rhéologie des matériaux granulaires partiellement saturés : écoulements de cisaillement

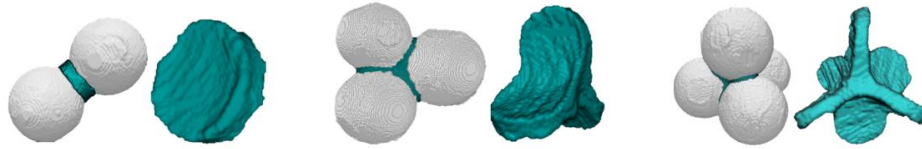
A. Fall, J.-N. Roux, F. Chevoir, C. Chateau, A. Awdi (doctorant 2021-2024)

Collaboration : S. Deboeuf (Institut Jean Le Rond d'Alembert)

Financement : ANR « Rheogranosat », porté par Aboulaye Fall.

Les expériences, pour un matériau modèle constitué de billes de polystyrène mouillées par une huile de silicone, et les simulations par « éléments discrets » (DEM), sont en bon accord quantitatif [49]. Elles conduisent à des modèles rhéologiques de type «  $\mu(I)$  », dont la généralisation aux matériaux cohésifs fait intervenir la pression réduite  $P^*$  définie à partir du diamètre des grains  $d$ , de la contrainte contrôlée  $P$  et de la force intergranulaire attractive (proportionnelle à  $d$  et à la tension interfaciale)  $F_0$  comme  $P^* = P d^2/F_0$ , en sus du nombre inertiel  $I$ . Récemment, l'étude expérimentale de la rhéologie de ces matériaux a été étendue aux écoulements gravitaires sur plan incliné [50], en collaboration avec l'Institut Jean Le Rond d'Alembert. La micromorphologie est observée en DEM et aussi expérimentalement, par microtomographie X dans un dispositif spécialement conçu pour observer l'évolution microstructurale sous cisaillement. Des images 3D détaillées sont ainsi obtenues à différentes étapes de déformation. Des techniques avancées de segmentation d'image, faisant appel à l'intelligence artificielle, permettent une analyse précise de la microstructure (arrangement des grains, évolution de la morphologie des ponts liquides dans la déformation), pouvant aller au-delà du régime pendulaire des ponts liquides isolés (thèse d'Ahmad Awdi, co-encadrée avec C. Chateau de l'équipe Multiéchelle). Un autre développement récent de ces recherches est l'étude des effets visqueux dans les ponts liquides, pour des sollicitations monotones, ou cycliques de grande amplitude [51]. Les résultats montrent notamment que les propriétés rhéologiques sont déterminées par un nombre visco-inertiel  $J$ , combinant le nombre inertiel et le nombre visqueux  $l_v$ , adopté pour décrire la rhéologie des suspensions denses en régime de Stokes, sous la forme  $J = l_v + 2I^2$ .





Ponts liquides isolés dans les images micro-tomographiques d'un matériau granulaire insaturé (huile silicone) sous cisaillement.

## Matériaux granulaires en déformation quasi-statique

A. Fall, J.-N. Roux, F. Chevoir, V. Langlois, A. M. Tang

Le régime quasi-statique, pour les matériaux granulaires solides, peut être approché dans la limite ( $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ ) des écoulements lents. L'étude numérique des matériaux modèles non saturés permet alors de revisiter les notions de cohésion au sens de Mohr-Coulomb et de contrainte effective [52]. Ces mêmes matériaux modèles peuvent se présenter dans des états très lâches, analogues aux gels colloïdaux, et font l'objet d'études numériques systématiques en compression isotrope ou triaxiale [53]. Le rôle important de l'état initial, dont la microstructure isotrope peut varier, à densité donnée, selon le processus d'assemblage a ainsi été mis en évidence. Une synthèse a été publiée sur les propriétés élastiques des matériaux granulaires modèles [54], et les modules élastiques des assemblages granulaires cimentés [55] ont fait l'objet d'une étude numérique systématique motivée par le comportement des sols contenant des hydrates.

## Propagation des ondes

J. Léopoldès, V. Langlois, M. Bornert, I. Awada (doctorant 2022-2025)

La propagation d'ondes élastiques est utilisée dans un modèle numérique simple [56] pour caractériser les propriétés du matériau granulaire à différentes échelles d'espace et de temps et identifier d'éventuelles variables supplémentaires pertinentes (telles les rotations). Par ailleurs, dans la thèse d'Ibrahim Awada nous étudions la diffusion multiple des ondes ultrasonores dans les suspensions granulaires denses. Nous avons montré que la corrélation des signaux ultrasonores transmis permet d'estimer des déformations locales, à l'échelle des grains, de l'ordre de  $10^{-5}$ . Cette méthode a été appliquée à un assemblage granulaire en régime solide plastique, l'échantillon étant placé dans un tambour tournant oscillant en dessous de l'angle de repos. Elle rend compte quantitativement du processus de compaction et détecte les événements locaux précurseurs de l'avalanche. Ces résultats font l'objet d'un article en préparation.

# Matériaux aérés et mousses

## Murissement des mousses liquides

O. Pitois, N. Galvani (doctorant, 2021-2024)

Collaborations : S. Cohen-Addad (INSP), R. Höhler (INSP), D. Langevin (LPS), A. Salonen (LPS), E. Rio (LPS), D. Durian (U. Pennsylvania)

Dans les mousses liquides, on appelle murissement la diffusion du gaz contenu dans les bulles à travers le liquide qui les sépare, conduisant à une diminution de leur nombre et une augmentation de leur taille moyenne. Alors que beaucoup d'applications mettent en jeu des mousses dites « humides », c'est-à-dire avec une fraction volumique de liquide supérieure à 20%, ces mousses n'ont été que très peu étudiées du fait de leur instabilité face au drainage induit par les forces de gravité. Nous avons rejoint le consortium européen piloté par Dominique Langevin dans le cadre d'un contrat MAP (Hydrodynamics of wet foams) avec l'Agence Spatiale Européenne, pour étudier le murissement de mousse liquide à bord de la Station Spatiale Internationale. Les premières expériences menées en 2020 ont permis de déterminer la loi de croissance des bulles pour des valeurs de fraction liquide couvrant la gamme des mousses humides jusqu'aux liquides bulleux (50%) [57]. Nous avons observé un changement de régime de croissance, décrit par un exposant  $\frac{1}{2}$  du temps pour les plus petites fractions en liquide puis par un exposant  $\frac{1}{3}$  pour les plus grandes fractions. Un de nos résultats majeurs est que la valeur de la fraction pour laquelle le changement de régime intervient ( $\approx 0.39$ ) est nettement supérieure à la valeur qui correspond au Random Close Packing des bulles ( $\approx 0.31$ ). Nous avons montré que cet écart est dû à de faibles forces d'adhésion qui maintiennent l'aire moyenne des contacts entre bulles à une valeur non nulle au-delà du RCP [58]. Un deuxième résultat majeur est la mise en évidence d'un large excès de petites bulles (que nous avons baptisées « roaming bubbles ») dans la distribution des tailles, comparée aux distributions théoriques [59]. Nous avons montré que ces bulles ont perdu leurs contacts avec les autres bulles de la mousse et voient leur taille diminuer beaucoup plus lentement. La présence de ces « roaming bubbles » avait été totalement ignorée jusqu'alors.

## Mousses minérales pour la construction et l'habitat

O. Pitois, V. Langlois, N. Roussel, B. Feneuil (doctorante, 2015-2018), A. Kaddami (doctorante, 2016-2019), M. Ceccaldi (doctorante, 2020-2023)

Collaborations : M. Guéguen (MAST-CPDM, Univ Eiffel), Y. Péchaud (LGE, Univ Eiffel)

La thèse de Blandine Feneuil (prix de thèse de l'Université Paris-Est 2019) constitue une contribution de premier plan dans la compréhension des phénomènes mis en jeu dans l'élaboration de mousse de ciment (Portland) : alors que l'on aurait pu s'attendre à bloquer le vieillissement de ces mousses en augmentant la contrainte seuil de la pâte, nous y sommes parvenus pour des contraintes seuil relativement faibles, obtenues par ajout de certains tensioactifs en quantités bien ajustées. Nous avons mis en évidence que la contrainte seuil effective de la pâte confinée entre les bulles de la mousse était beaucoup plus élevée que celle correspondant à la pâte non-confinée, toutes choses égales par ailleurs, et nous avons proposé un critère de stabilité défini à partir de la taille initiale des bulles et de cette contrainte seuil effective [60,61].

Les mousses de géopolymère, formées à partir d'argile calcinée (metakaolin), sont des matériaux prometteurs qui combinent des propriétés classiques d'isolation thermique avec d'intéressantes propriétés mécaniques et de résistance au feu. Durant la thèse d'Asmaa Kaddami (2016-2019) nous avons montré que la microstructure de ces mousses peut être choisie au moment du moussage puis rester figée pendant la phase qui précède la prise (géopolymérisation). Ce comportement singulier est dû à la transition de blocage (jamming) se produisant pour la suspension de metakaolin lorsque celle-ci est confinée entre les bulles, induisant l'apparition d'une relativement forte résistance à la déformation [62]. Par ailleurs, nous sommes parvenus à réduire leur densité sous 200 kg/m<sup>3</sup> [63], qui constituait en quelque sorte une limite basse pour ces matériaux.

Le travail de thèse M. Ceccaldi a porté sur la formulation de mousse liquide bactérienne bio-calcifiante, qui constitue une innovation pour le procédé de Précipitation de Carbonate de Calcium (CaCO<sub>3</sub>) Induite Microbiologiquement (MICP). Les formulations lauréates sont basées sur la bactérie *Sporosarcina pasteurii* et certains tensioactifs de la famille des APG (Alkyl Poly Glucosides) comportant deux motifs glucose (maltosides). Nous avons montré que l'application d'une telle mousse dans un empilement de grains permet effectivement la précipitation de CaCO<sub>3</sub> au niveau des contacts entre grains tout en laissant libre la porosité du milieu. La performance mécanique de ce potentiel nouveau procédé, que l'on peut baptiser « FoamMICP », reste à évaluer selon tous ses aspects.

## Revêtements texturés

O. Pitois, Y. Khidas, X. Chateau, A. Mouquet (doctorant, 2016-2019).

Collaboration : T. Saison, J.-Y. Faou, M. Joanicot (Saint-Gobain Recherche)

L'usage de revêtements solides à base de mousse peut être considéré comme une solution simple pour donner de nouvelles propriétés aux surfaces de matériaux conventionnels, comme la superhydrophobie par exemple. Pendant la thèse CIFRE (Saint-Gobain) d'Aymeric Mouquet, nous avons développé une méthode efficace pour déposer des revêtements moussés avec un parfait contrôle de l'épaisseur des dépôts, des distributions de taille de pores, de la fraction volumique en surface [64,65]. L'incorporation de particules fonctionnelles dans la mousse déposée peut permettre d'accroître encore spectre de propriétés de ces revêtements.

## Bulles et Films en armure de particules solides

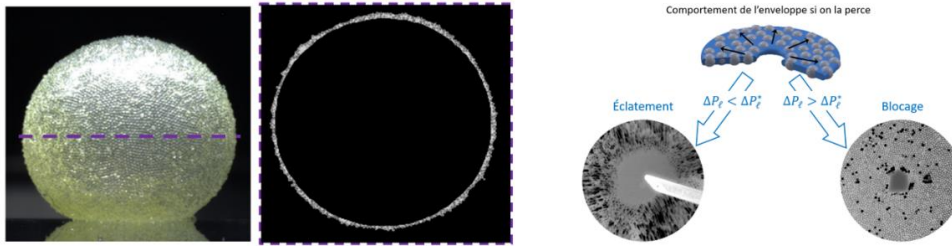
F. Rouyer, Y. Khidas, V. Langlois, N. Retailleau (doctorant 2020-2023), P. Gauthier (doctorant 2022-2025)

Les applications des systèmes présentant des interfaces liquides tapissées de grains solides sont importantes et multiples : réduction de consommation de surfactant, renforcement de bulles par des particules solides dans des matériaux de construction aérés, flottation ou encapsulation pour des procédés de dépollution.

Le projet ANR PhyGaMa (2020-2024, en collaboration avec le laboratoire Fast) s'est consacré à l'étude de la physique d'un objet nouveau, découvert au laboratoire, que l'on peut décrire comme une poche de gaz délimitée par une enveloppe formée de liquide et de particules solides de quelques dizaines de microns. Dans cet assemblage le liquide est en légère dépression, ce qui confère aux grains une cohésion capillaire associée à une résistance mécanique inattendue pour cet objet que nous avons baptisé « gas marble », en référence aux « liquid marbles » étudiées une dizaine d'années plus tôt.

Afin d'étudier l'effet de cohésion de l'enveloppe, nous avons mis au point un dispositif expérimental permettant le contrôle de la pression de ce liquide. Nous avons montré que la dépression capillaire du liquide détermine par exemple la réponse de l'enveloppe lorsqu'on la perce : en dessous d'une valeur critique de dépression, on observe l'éclatement total de l'enveloppe, un peu comme un simple film de savon ; toutefois, la dynamique d'ouverture est bien plus lente que celle qui caractérise ces films (Taylor-Culick). Pour des valeurs de dépression liquide plus importantes, l'enveloppe a un comportement de type solide et le trou percé n'évolue pas. Entre le régime liquide et le régime solide il existe un régime d'ouverture dit « intermittent » [66]. Des simulations numériques réalisées avec le logiciel libre Surface Evolver ont permis de montrer que le critère de rupture de « Mohr-Coulomb cohésif », propre aux empilements granulaires, permet de rendre compte de la transition observée, ce qui apporte un éclairage nouveau sur la résistance mécanique des « gas marbles ».





« Gas marble » (Bille de gaz) réalisée avec des grains de polystyrène de 140 $\mu$ m et un film liquide composé d'un mélange d'eau et de glycérine (20% w/w). Gauche : Image optique vue de face ; Droite : coupe du plan médian obtenue par microtomographie X (Paul Gauthier). Droite : Lorsque l'enveloppe de la « gas marble » est percée avec une fine aiguille, elle peut soit s'ouvrir rapidement et disparaître, soit se comporter comme un solide et se maintenir en place malgré le trou. Cette transition est pilotée par la valeur de pression du liquide au sein de l'enveloppe.

## Bulle(s) dans un fluide à seuil

B. Saint-Michel

Les fluides à seuil piègent des petites bulles en leur sein, faute d'une poussée d'Archimède suffisante pour forcer l'écoulement du fluide. L'évolution du rayon de ces bulles piégées est donnée par l'équation de Rayleigh-Plesset ou d'Epstein-Plesset, où interviennent la pression extérieure, la tension de surface et la rhéologie du fluide. Il est donc théoriquement possible d'exploiter cette dynamique afin de mesurer les propriétés rhéologiques du fluide environnant, c'est-à-dire de transformer les petites bulles en sondes rhéologiques. Une manière de procéder consiste à envoyer des ultrasons qui entraînent des oscillations volumétriques des bulles. La fréquence et la largeur du pic de résonance de ces oscillations sont sensibles à la rhéologie du milieu qui entoure les bulles (Soft Matt. 2017, 13, 3946-3953). Nous avons montré que l'élasticité linéaire et la dissipation visqueuse d'un fluide à seuil modèle – le Carbopol – sont insuffisantes pour être détectées pour des bulles de 100  $\mu$ m. Nous avons toutefois pu mesurer le module élastique du Carbopol en poussant et tirant sur des bulles avec des forces de radiation acoustique [67]. Nous pouvons également sonder les fluides en laissant les bulles se dissoudre, ou en leur insufflant du gaz à l'aide d'une aiguille pour déformer le fluide alentour. Nous avons mesuré directement la pression dans la bulle gonflée et évalué indirectement cette pression en mesurant la dynamique de dissolution des bulles. Les profils expérimentaux de dissolution sont en désaccord quantitatif avec la théorie, ce qui est encore mal compris.

## Stabilité de bulles à une interface liquide

F. Rouyer, E. Lorenceau (Liphy, Univ Grenoble Alpes), E. Rio (LPS, Université Paris Saclay)

La durée de vie et l'éclatement d'une simple bulle à la surface d'un bain liquide reste une question ouverte. Nous avons mesuré les temps de vie de plusieurs milliers de bulles à la surface de mélanges eau-alcool, pour lesquels les contraintes dites de Marangoni sont importantes du fait de l'évaporation d'alcool (bien connus pour les larmes du vin), ce qui a permis de montrer que le temps de vie moyen est une fonction croissante de la concentration en alcool [68]. Par ailleurs, les distributions des temps de vie sont indépendantes de la concentration en alcool et montrent que le phénomène de rupture n'est ni purement diffusif ni totalement indépendant du temps. D'autre part, l'étude de la statistique des temps de vie de bulles en présence de tensioactifs ou d'édulcorant a été menée par Jonas Miguet pendant sa thèse co-encadrée avec E. Rio (LPS UPSud) en partenariat avec PepsiCo. En présence de molécules stabilisantes, le temps de vie moyen des bulles augmente avec leur taille et leur temps de vie maximal est bien décrit par un modèle prenant en compte le drainage et l'évaporation convective autour du bain. Nous avons ainsi mis en évidence l'importance de l'atmosphère sur le temps de vie des bulles et pour la première fois une description quantitative est proposée pour ce phénomène [69,70]. Nous montrons par ailleurs qu'en l'absence d'évaporation la régénération marginale contrôle l'amincissement des films dans son ensemble [71]

## **Matériaux vitreux : relaxation, plasticité, amortissement**

A. Lemaître

Collaborations : équipe g-MAG (Institut lumière matière, Institut des nanotechnologies de Lyon, Institut des nanosciences de Paris)

Du fait du désordre structurel, les verres présentent un ensemble de comportements spécifiques, radicalement différents de ceux connus pour les cristaux. Ainsi, la transition du liquide au solide vitreux n'est pas une transition thermodynamique au sens usuel, mais résulte d'un ralentissement de la cinétique de relaxation, qui s'accompagne de toutes sortes d'anomalies

(exponentielles étirées, comportement non-Arrhenius, non-respect de la relation de Stokes Einstein). La réponse du solide vitreux est aussi fortement influencée par le désordre structural, que ce soit aux faibles déformations (amortissement du son) ou en régime plastique. Les propriétés vibrationnelles s'accompagnent ainsi d'anomalie dans la densité d'état (pic Boson), et de différents types de sources de dissipation liées au désordre (dispersion de Rayleigh, ou par relaxations activées). Nos travaux récents ont porté sur différents types de questions afférentes: la mise en évidence de corrélations de contraintes anisotropes dans les solides désordonnés [72,73], qui jouent un rôle dans le relaxation vitreuse par facilitation, la mise en évidence de contributions non-affines à l'amortissement du son et la construction d'un cadre théorique basé sur le formalisme de projection pour l'étude des vibrations des solides vitreux [74]; la mise en évidence du bruit mécanique dans l'effet Bauschinger [75] et des mécanismes de localisation de la déformation dans les solides amorphes cisailés [76,77]. Enfin, la mise en place d'un algorithme de simulation du dépôt physique d'oxydes en phase vapeur [78], conjointe à nos travaux sur les pertes acoustiques, a motivé le développement d'une collaboration en cours avec Virgo Coating R&D, dans le but d'assister à l'identification de couches minces de faible bruit mécanique, ce qui est un enjeu majeur dans de nombreux domaines liés aux technologies avancées (interférométrie gravitationnelle, technologies quantiques).

## Références citées dans le texte (liste complète sur la page web de l'équipe)

- [1] M. Zhou, S. Caré, D. Courtier-Murias, P. Faure, S. Rodts, P. Coussot, Magnetic resonance imaging evidences of the impact of water sorption on hardwood capillary imbibition dynamics, *Wood Science and Technology*, 52, 929-955 (2018)
- [2] M. Zhou, S. Caré, A. King, D. Courtier-Murias, S. Rodts, G. Gerber, P. Aimedieu, M. Bonnet, M. Bornert, P. Coussot, Liquid uptake governed by water adsorption in hygroscopic plant-like materials, *Physical Review Research*, 1, 033190 (2019)
- [3] D.M. Nguyen, S. Caré, D. Courtier-Murias, M. Zhou, P. Coussot, Mechanisms of softwood imbibition inferred from Magnetic Resonance Imaging, *Holzforschung*, 75, 225-236 (2021)
- [4] H. Penvern, M. Zhou, B. Maillat, D. Courtier-Murias, M. Scheel, J. Perrin, T. Weitkamp, S. Bardet, S. Caré, P. Coussot, How bound water regulates wood drying *Physical Review Applied*, 14, 054051 (2020) - Editor's suggestion – Featured in Physics: <https://physics.aps.org/articles/v13/182> Paper in CNRS News
- [5] M. Cocusse, M. Rosales, B. Maillat, R. Sidi-Boulenouar, E. Julien, S. Caré, P. Coussot, Two-step diffusion in cellular hygroscopic (plant-like) materials, *Science Advances*, 19, eabm7830 (2022)
- [6] B. Maillat, R. Sidi-Boulenouar, P. Coussot, "Dynamic NMR relaxometry" as a simple tool for measuring liquid transfers and characterizing surface and structure evolution in porous media, Featured Article (invited), *Langmuir*, 38, 15009-15025 (2022)
- [7] N. Ben Abdelouahab, A. Gossard, X. Ma, H. Dialla, B. Maillat, S. Rodts, P. Coussot, Understanding mechanisms of drying of a cellulose slurry by magnetic resonance imaging, *Cellulose*, 28, 5321-5334 (2021)
- [8] X. Ma, B. Maillat, L. Brochard, O. Pitois, R. Sidi-Boulenouar, P. Coussot, Vapor-sorption coupled diffusion in clothes revealed by MRI, *Physical Review Applied*, 17, 024048 (2021) Featured in Physics: <https://physics.aps.org/articles/v15/s22> - Paper in CNRS News
- [9] Y.L. Zou, B. Maillat, L. Brochard, P. Coussot, Fast transport diffusion of bound water in cellulose fiber network, *Cellulose*, 30, 7463-7478 (2023)
- [10] Y. Zou, L. Yan, B. Maillat, R. Sidi-Boulenouar, L. Brochard, P. Coussot, Critical Role of Boundary Conditions in Sorption Kinetics Measurements, *Langmuir* (2023) <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c02729>
- [11] Y. Zou, B. Maillat, L. Brochard, P. Coussot, Unveiling moisture transport mechanisms in cellulosic materials: vapor vs. bound water, to appear in *PNAS Nexus*
- [12] B. Maillat, R. Sidi-Boulenouar, P. Coussot, "Dynamic NMR relaxometry" as a simple tool for measuring liquid transfers and characterizing surface and structure evolution in porous media, Featured Article (invited), *Langmuir*, 38, 15009-15025 (2022)
- [13] B. Maillat, G. Ditrach, P. Huber, P. Coussot, Diffusionlike Drying of a Nanoporous Solid as Revealed by Magnetic Resonance Imaging, *Phys. Rev. Applied*, 18, 054027 (2022)
- [14] Y.L. Zou, B. Maillat, L. Brochard, P. Coussot, Fast transport diffusion of bound water in cellulose fiber network, *Cellulose*, 30, 7463-7478 (2023)
- [15] T. Lerouge, B. Maillat, D. Courtier-Murias, D. Grande, B. Le Droumaguet, O. Pitois, P. Coussot, Drying of a Compressible Biporous Material, *Phys. Rev. Applied*, 13, 044061 (2020)
- [16] H. Penvern, M. Zhou, B. Maillat, D. Courtier-Murias, M. Scheel, J. Perrin, T. Weitkamp, S. Bardet, S. Caré, P. Coussot, How bound water regulates wood drying *Physical Review Applied*, 14, 054051 (2020) - Editor's suggestion – Featured in Physics: <https://physics.aps.org/articles/v13/182> Paper in CNRS News
- [17] M. Cocusse, M. Rosales, B. Maillat, R. Sidi-Boulenouar, E. Julien, S. Caré, P. Coussot, Two-step diffusion in cellular hygroscopic (plant-like) materials, *Science Advances*, 19, eabm7830 (2022)
- [18] M. Goavec, S. Rodts, V. Gaudefroy\*, M. Coquil, E. Keita, J. Goyon, X. Chateau, P. Coussot, Strengthening and drying rate of a drying emulsion layer, *Soft Matter*, 14, 8612-8626 (2018)
- [19] M. Goavec, S. Rodts, V. Gaudefroy, P. Coussot, Magnetic Resonance Imaging of drying bitumen emulsions, *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 591, 124512 (2020)
- [20] N. Ben Abdelouahab, A. Gossard, S. Rodts, P. Coussot, Controlled imbibition from a soft wet material (poultice), *Soft Matter*, 15, 6732-6741 (2019)

- [21] N. Ben Abdelouahab, A. Gossard, S. Rodts, B. Coasne, P. Coussot, Convective drying of a porous medium with a paste cover, *Eur. Phys. J. E*, 5, 66 (2019)
- [22] N. Ben Abdelouahab, A. Gossard, X. Ma, H. Dialla, B. Maillet, S. Rodts, P. Coussot, Understanding mechanisms of drying of a cellulose slurry by magnetic resonance imaging, *Cellulose*, 28, 5321-5334 (2021)
- [23] *Physical Review Letters*, 120, 148001 (2018)
- [24] *Physical Review Letters*, 123, 158005 (2019)
- [25] G. Gerber, D. A. Weitz, and P. Coussot, Propagation and adsorption of nanoparticles in porous medium as travelling waves, *Phys. Rev. Research* 2, 033074 (2020)
- [26] Pitois, O., Kaddami, A., & Langlois, V. (2020). Permeability of Monodisperse Solid Foams. *Transport in Porous Media*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01461-6>
- [27] Langlois, V., Trinh, V. H. H., Lusso, C., Perrot, C., Chateau, X., Khidas, Y., & Pitois, O. (2018). Permeability of solid foam: Effect of pore connections. *Physical Review E*, 97(5), 53111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.053111>
- [28] Trinh, V. H., Langlois, V., Guilleminot, J., Perrot, C., Khidas, Y., & Pitois, O. (2019). Tuning membrane content of sound absorbing cellular foams: Fabrication, experimental evidence and multiscale numerical simulations. *Materials and Design*, 162, 345–361. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.023>
- [29] Langlois, V., Trinh, V. H., & Perrot, C. (2019). Electrical conductivity and tortuosity of solid foam: Effect of pore connections. *Physical Review E*, 100(1), 1–25. <https://doi.org/10.1103/physreve.100.013115>
- [30] Langlois, V., Nguyen, C. T., Detrez, F., Guilleminot, J., & Perrot, C. (2022). Permeability of polydisperse solid foams. *Physical Review E*, 105(1), 015101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.015101>
- [31] Capillary imbibition in open-cell monodisperse foams, Pitois O., Kaddami A., Langlois V., *Journal of Colloid and Interface Science* (2020) 571, pp. 166-173
- [32] Langlois, V. (2022). High-frequency permeability of porous media with thin constrictions. I. Wedge-shaped porous media. *Physics of Fluids*, 34(7), 077119. <https://doi.org/10.1063/5.0086257>
- [33] Langlois, V., Kaddami, A., Pitois, O., & Perrot, C. (2020). Acoustics of monodisperse open-cell foam: An experimental and numerical parametric study. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(3), 1767–1778. <https://doi.org/10.1121/10.0001995>
- [34] Langlois, V., Nguyen, C. T., & Perrot, C. (2022). High-frequency permeability of porous media with thin constrictions. II. Porous media containing thin holed membranes. *Physics of Fluids*, 34(7), 077120. <https://doi.org/10.1063/5.0093672>
- [35] Nguyen, C. T., Langlois, V., Guilleminot, J., Detrez, F., Duval, A., Bornert, M., Aïmedieu, P., & Perrot, C. (2022). Polydisperse solid foams: Multiscale modeling and simulations of elasto-acoustic properties including thin membrane effects. *International Journal of Solids and Structures*, 249, 111684. <https://doi.org/10.1016/J.IJSLSTR.2022.111684>
- [36] Liquid relative permeability through foam-filled porous media: Experiments, Ceccaldi M., Langlois V., Guéguen M., Grande D., Vincent-Bonnieu S., Pitois O., *Phys. Rev. Fluids* (2023) 8, 024302
- [37] Daisy-shaped liquid bridges in foam-filled granular packings, Pitois O., Salamé A., Khidas Y., Ceccaldi M., Langlois V., Vincent-Bonnieu S., *Journal of Colloid and Interface Science* (2023) 638, 552-560
- [38] Contact and macroscopic ageing in colloidal suspensions, Bonacci F., Chateau X., Furst E.M., (...), Goyon J., Lemaître A., *Nature Materials* (2020) 19(7), pp. 775-780
- [39] Yield Stress Aging in Attractive Colloidal Suspensions, Bonacci F., Chateau X, Furst E.M., Goyon J., Lemaître A., *Phys. Rev. Lett.* (2022) 128, 018003
- [40] A. Geffrault, H. Bessaies-Bey, N. Roussel, P. Coussot, Printing by yield stress fluid shaping, *Additive Manufacturing*, 75, 103752 (2023)
- [41] A. Geffrault, H. Bessaies-Bey, N. Roussel, P. Coussot, Extensional gravity-rheometry (EGR) for yield stress fluids, *J. Rheology*, 65, 887-901 (2021)
- [42] A. Geffrault, H. Bessaies-Bey, N. Roussel, P. Coussot, Instant yield stress measurement from falling drop size: The "syringe test", *J. Rheology*, 67, 305-314 (2022)
- [43] Ahmadah, O., Bessaies-Bey, H., Yahia, A., Roussel, N., A new mix design method for low-environmental-impact blended cementitious materials: Optimization of the physical characteristics of powders for better rheological and mechanical properties, *Cement and Concrete Research*, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104437
- [44] Bessaies-Bey, H., Khayat, K.H., Palacios, M., Schmidt, W., Roussel, N., Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology, *Cement and Concrete Research*, DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106646.
- [45] Flatt, R.J., Roussel, N., Bessaies-Bey, H., Caneda-Martínez, L., Palacios, M., Zunino, F., From physics to chemistry of fresh blended cements, *Cement and concrete Research*, DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107243
- [46] Bessaies-Bey, H., Massoussi, N., Mulik, S., Baumann, R., Schmitz, M., Radler, M., Gelardi, G., Flatt, R.J., Roussel, N., Polycarboxylate ester adsorption on cement grains: Influence of polydispersity, *Cement and Concrete Research*, DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2021.106383
- [47] Therene, F., Keita, E., Nael-Redolfi, J., Boustingorry, P., Bonafous, L., Roussel, N., Water absorption of recycled aggregates: Measurements, influence of temperature and practical consequences, *Cement and Concrete Research*, DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2020.106196.
- [48] Zuo, W., Dong, C., Belin, P., Roussel, N., Keita, E., Capillary imbibition depth in particle-bed 3D printing-Physical frame and one-dimensional experiments, *Cement and Concrete Research*, DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106740

- [49] David Hautemayou, Michel Badetti, Abdoulaye Fall, Stéphane Rodts, Patrick Aïmedieu, Jean-Noël Roux, and François Chevoir. Rheology and microstructure of unsaturated wet granular materials: Experiments and simulations. *Journal of Rheology*, 62(5) :1175–1186, 2018.
- [50] S. Deboeuf and A. Fall. Cohesion and aggregates in unsaturated wet granular flows down a rough incline. *Journal of Rheology*, 67(4) :909–922, JUL 2023.
- [51] Ahmad Awdi, Camille Chateau, François Chevoir, Jean-Noël Roux, and Abdoulaye Fall. Viscous dissipation in large amplitude oscillatory shear of unsaturated wet granular matter. *Journal of Rheology*, 67(2) :365–372, March 2023.
- [52] Michel Badetti, Abdoulaye Fall, François Chevoir, and Jean-Noël Roux. Shear strength of wet granular materials: Macroscopic cohesion and effective stress. *European Physical Journal E: Soft matter and biological physics*, 41(5), May 2018.
- [53] Walid Lammali, Jean-Noël Roux, and Anh-Minh Tang. Quasistatic response of loose cohesive granular materials. In María Alejandra Aguirre, Stefan Luding, Luis A. Pugnaloni, and Rodrigo Soto, editors, *Powders and Grains 2021- – 9th International Conference on Micromechanics on Granular Media*, volume 249, page 14021, Buenos Aires (virtual), Argentina, July 2021. Association pour l'Etude de la Micromécanique des Milieux Granulaires, EDP Sciences. '2
- [54] Jean-Noël Roux, Mohamed Hassan Khalili, Francesco Froiio, and Chloé Dequeker. Elasticity and Mechanical Behaviour of Granular Materials: Some Insights from Numerical Studies of Simple Systems. In *Views on Microstructures in Granular Materials*, volume 44 of *Advances in Mechanics and Mathematics*, pages 185–224. Springer International Publishing, November 2020.
- [55] Alexandros Theocharis, Jean-Noël Roux, and Vincent Langlois. Elasticity of model weakly cemented granular materials: a numerical study. *International Journal of Solids and Structures*, 193-194 :13–27, 2020.
- [56] A. Buklakov, J. N. Roux, and F. Grekova. Simulation of wave propagation in weakly cohesive powders by discrete element method. In O.V. Motygin, A.P. Kiselev, L. I. Goray, M.V. Rybin, and T.M. Zaboronkova, editors, *2023 Days on Diffraction (DD)*, pages 19–24, St.Petersburg, Russia, June 2023. IEEE.
- [57] Hierarchical bubble size distributions in coarsening wet liquid foams, Galvani N., Pasquet M., Mukherjee A., Requier A., Cohen-Addad S., Pitois O., Höhler R., Rio E., Salonen A., Durian D.J., Langevin D., *PNAS* (2023) 120, e230655112
- [58] Aqueous foams in microgravity, measuring bubble sizes, Pasquet M., Galvani N., Pitois O., Cohen-Addad S., Höhler R., Chieco A.T., Dillavou S., Hanlan J.M., Durian D.J., Rio E., Salonen A., Langevin D., *C. R. Méc.* (2023) 351, 1–23
- [59] Coarsening transitions of wet liquid foams under microgravity conditions, Pasquet M., Galvani N., Requier A., Cohen-Addad S., Höhler R., Pitois O., Rio E., Salonen A., Langevin D., *Soft Matter* (2023) 19, 6267-6279
- [60] B. Feneuil, P. Aïmedieu, M. Scheel, J. Perrin, N. Roussel, O. Pitois, Stability criterion for fresh cement foams, *Cement and Concrete Research* (2019) 125, 105865. 10.1016/j.cemconres.2019.105865
- [61] B. Feneuil, N. Roussel, O. Pitois, Optimal cement paste yield stress for the production of stable cement foams, *Cement and Concrete Research* (2019) 120, 142-151. 10.1016/j.cemconres.2019.03.002
- [62] A. Kaddami, O. Pitois, A physical approach towards controlling the microstructure of metakaolin-based geopolymer foams, *Cement & Concrete Research* (2019) 124, 105807. 10.1016/j.cemconres.2019.105807
- [63] Brevet WO 2019 122678A1, EP3728159
- [64] A. Mouquet, Y. Khidas, T. Saison, J.-Y. Faou, O. Pitois, Well-controlled foam-based solid coatings, *Soft Matter* (2019) 15, 5084-5093. 10.1039/c9sm00786e
- [65] A. Mouquet, Y. Khidas, X. Chateau, T. Saison, J.-Y. Faou, O. Pitois, Tensile mechanics of polymeric foam ribbons, *Polymer Testing* (2020) 86, 106513. 10.1016/j.polymertesting.2020.106513
- [66] Pressure threshold for inhibition of dense granular film opening, Retailleau N., Khidas Y., Rouyer F., *RSC Advances* (2023) 13, 30905-30914
- [67] B. Saint-Michel & V. Garbin, *Soft Matter*, 16, 10405-10418 (2020)
- [68] J. Miguet, F. Rouyer, Y. Fang and E. Rio, "How does the presence of stevia glycosides impact surface bubbles stability? ", 603, 125093, *Colloids and Surfaces A* (2020).
- [69] E. Lorenceau, F. Rouyer, "Lifetime of a single bubble on the surface of a water and ethanol bath", *Phys. Rev. Fluids*, 5, 063603 (2020).
- [70] J. Miguet, M. Pasquet, F. Rouyer, Y. Fang and E. Rio, "Stability of big surface bubbles: impact of evaporation and bubble size", *Soft Matter*, 16, 1082-1090 (2020).
- [71] J. Miguet, M. Pasquet, F. Rouyer, Y. Fang and E. Rio, Marginal regeneration-induced drainage of surface bubbles, *Phys. Rev. Fluids* (2021) 6, L101601.
- [72] Anaël Lemaître. Stress hyperuniformity and transient oscillatory-exponential correlation decay as signatures of strength vs fragility in glasses. *J. Chem. Phys.*, 155(19):194501, November 2021
- [73] A. Lemaître, C. Mondal, I. Procaccia, and S. Roy. Stress correlations in frictional granular media. *Physical Review B*, 103(5):054110, February 2021.
- [74] C. Caroli and A. Lemaître. Key role of retardation and non-locality in sound propagation in amorphous solids as evidenced by a projection formalism. *Journal of Chemical Physics*, 153(14):144502, October 2020.
- [75] Sylvain Patinet, Armand Barbot, Matthias Lerbinger, Damien Vandembroucq, and Anaël Lemaître. Origin of the bauschinger effect in amorphous solids. *Phys. Rev. Lett.*, 124:205503, May 2020.
- [76] Armand Barbot, Matthias Lerbinger, Anaël Lemaître, Damien Vandembroucq, and Sylvain Patinet. Rejuvenation and shear banding in model amorphous solids. *Phys. Rev. E*, 101:033001, Mar 2020.

- [77] Gianfranco Cordella, Francesco Puosi, Antonio Tripodo, Dino Leporini, and Anaël Lemaître. Plastic ridge formation in a compressed thin amorphous film. *Phys. Rev. Mater.*, 6(12):L122601, December 2022.
- [78] S. Gelin, D. Poinot, S. Chatel, P. J. Calba, and A. Lemaitre. Microstructural origin of compressive in situ stresses in electron-gun-evaporated silica thin films. *Physical Review Materials*, 3(5):055608, May 2019.