



MASTER RECHERCHE MEGA
SPÉCIALITÉ MÉCANIQUE DES FLUIDES
Université Claude Bernard Lyon I

Stage 2009-2010
Damien Frelat
M2 Recherche

Déformation de la surface libre d'un fluide non newtonien induite par un vortex

Résumé : *Un des domaines de recherche du groupe Matière Molle du Laboratoire de Physique de l'E.N.S. de Lyon est l'étude des fluides non newtoniens. La création de vortex au sein d'un de ces fluide a permis de faire apparaitre toute une zoologie de comportements de la surface libre dont un tout particulier où la surface libre prend la forme d'une quille de bateau.*

Stage encadré par :

Jean-Christophe Géminard
jean-christophe.geminard@ens-lyon.fr
tél. (+33) 4 72 72 80 00

Eric Freyssingéas
eric.freyssingéas@ens-lyon.fr
tél. (+33) 4 72 72 80 00

École Normale Supérieure de Lyon
46, allée d'Italie
69007 Lyon
<http://www.ens-lyon.fr/>



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Christophe Gémard et Éric Freyssingas qui m'ont encadré durant ce stage. Par leur patience et leur pédagogie, ils m'ont permis d'effectuer un stage très intéressant. Merci encore à Valérie Vidal, Pierre Borgnat, Thibaut Divoux et Vincent Grenard pour leur grande disponibilité et l'aide qu'ils m'ont apportée sur les "petites" choses pourtant indispensables à un travail de recherche : amélioration du dispositif expérimental, logistique, Matlab, L^AT_EX... Enfin merci aux techniciens du laboratoire de physique pour leurs conseils sur la réalisation de pièces nécessaires à mon expérience.

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Procédé expérimental | 3 |
| 1.1 | Le fluide étudié | 3 |
| 1.2 | Obtention du vortex | 3 |
| 1.2.1 | La cuve | 3 |
| 1.2.2 | Les effets de bord | 4 |
| 1.2.3 | Tachymétrie | 4 |
| 1.3 | Techniques d'observation | 5 |
| 1.3.1 | Obtention du profil | 6 |
| 1.3.2 | Vue de dessus | 7 |
| 1.3.3 | Vue plongeante | 7 |
| 1.3.4 | Vue en contre-plongée | 8 |
| 2 | Résultats expérimentaux | 9 |
| 2.1 | Les comportements qualitatifs majeurs | 9 |
| 2.1.1 | Le renflement | 9 |
| 2.1.2 | La calotte positive | 9 |
| 2.1.3 | La calotte négative | 10 |
| 2.1.4 | La quille | 10 |
| 2.1.5 | Le point singulier | 12 |
| 2.2 | Diagrammes de phase | 12 |
| 2.3 | Tentative d'explication de l'origine de ces comportements | 15 |
| 2.3.1 | Observation | 15 |
| 2.3.2 | Analyse | 15 |
| 3 | Une étude approfondie de la quille | 17 |
| 3.1 | Caractérisation des transitions entre les comportements majeurs | 17 |
| 3.1.1 | Caractérisation des comportements majeurs | 17 |
| 3.1.2 | Transition entre les comportements majeurs | 18 |
| 3.1.3 | Courbes de transition | 18 |
| 3.2 | Zone d'existence de la quille | 21 |

Introduction

Le liquide qui nous est le plus familier, l'eau, est un exemple de fluide dit newtonien. En effet, sous écoulement, les contraintes de cisaillement au sein du fluide sont proportionnelles au gradient de vitesse [1]. Le coefficient de proportionnalité entre ces deux grandeurs est appelé viscosité. Cette définition restrictive implique qu'au sein d'un fluide newtonien :

- Dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes créées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté.

Ainsi, les propriétés rhéologiques d'un fluide newtonien, caractéristiques de la manière dont il s'écoule, sont faciles à décrire. Et c'est pourquoi la description théorique mais aussi expérimentale de vortex créés au sein de ces fluides et fréquemment rencontrés dans les écoulements turbulents a déjà été largement réalisée et décrite [2].

A contrario très peu d'observations ont été réalisées pour les fluides dits non newtoniens, qui sont pourtant parmi les fluides les plus courants (dentifrice, ketchup, gel à cheveux...). Cette deuxième classe de fluides regroupe tous ceux qui dérogent à la définition du fluide newtonien et décrit donc une grande richesse de comportements :

- La viscosité peut dépendre de la contrainte.
- Les comportements du fluide peuvent présenter un phénomène d'hystérèse.
- ...

L'objectif de notre étude était la caractérisation d'un écoulement commun, un vortex, créé au sein d'un fluide commun, un fluide non newtonien. On a en particulier centré notre étude sur la description de la déformation de la surface libre du fluide. Celle-ci présente dans certaines conditions expérimentales des formes où la symétrie axiale est brisée et notamment une en forme de quille de bateau.

L'intérêt pour cette forme de la surface libre réside tout d'abord dans sa ressemblance avec la forme de bulles montant dans un fluide non newtonien (cf. figure 1). Andrew Belmonte, au laboratoire Pritchard en Pennsylvanie, a montré que des bulles s'élevant dans une solution micellaire pouvait présenter une queue en forme de quille [3]. C'est également la forme que prend la surface libre d'un gel non newtonien après la pénétration d'une sphère, étudié T. Podgorski et A. Belmonte [4] (cf. figure 1). Nous avons donc au cours de notre étude tenté de cerner les conditions d'obtention de cette quille

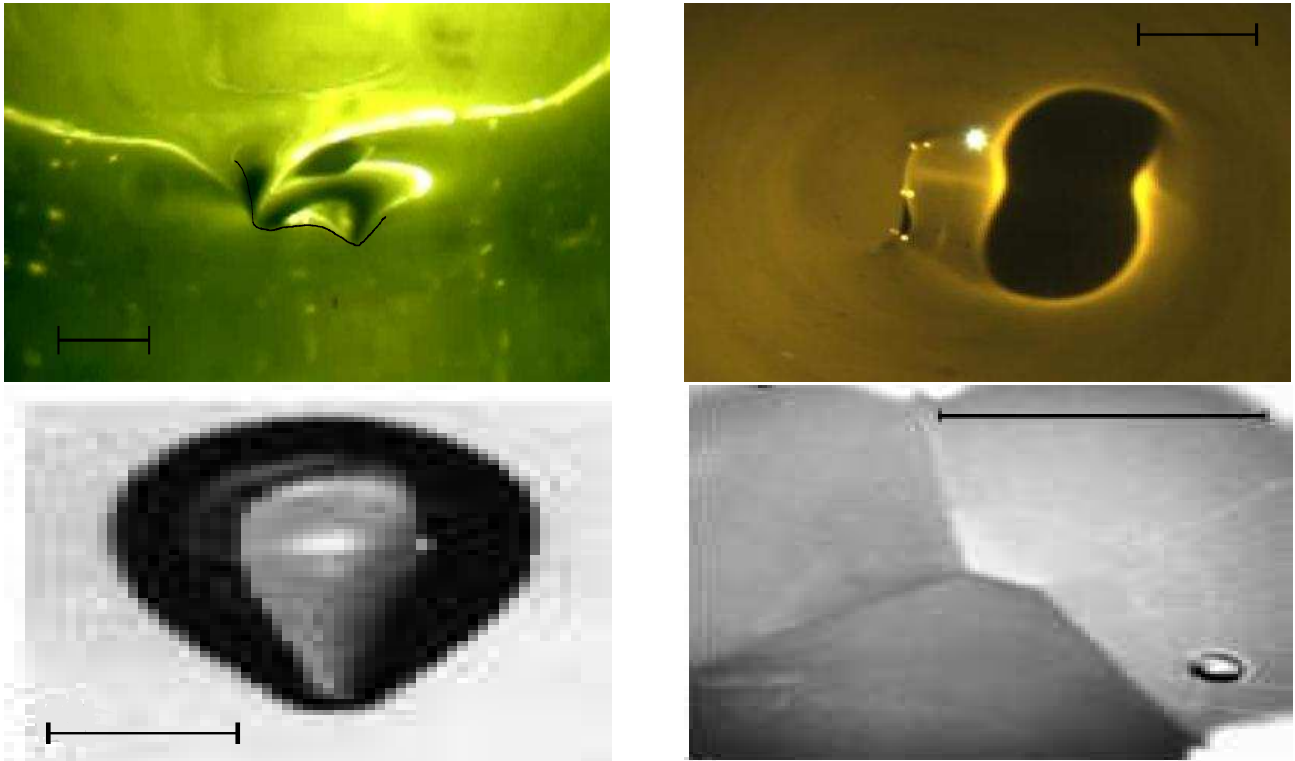


FIGURE 1: (Haut Gauche) Photo d'une vue du dessous de "la quille" : forme de la surface libre observée lors de notre étude. Le trait représente 1cm. (Haut Droite) Photo du dessus de la surface libre dans le cas où la surface libre prend la forme d'une quille. Sur la gauche de l'image, apparaît une forme de "S" correspondant au dessus de la "quille". La tache sombre sur la droite de l'image correspond à l'ombre de la "quille" sur le fond du dispositif expérimental. Le trait représente 2cm. (Bas Gauche) Bulle s'élevant dans une solution micellaire. La queue de la bulle présente une forme de quille. Le trait représente 3mm. Figure extraite de [3]. (Bas Droite) Vue du dessus de la surface libre d'un fluide non newtonien après pénétration d'une sphère. Le trait représente 1cm. Figure extraite de [4].

Chapitre 1

Procédé expérimental

1.1 Le fluide étudié

Les fluides non newtoniens utilisés ici sont différentes concentrations en masse d'un même gel à cheveux ("Gel coiffant fixation extra forte", Auchan Production) dilué dans de l'eau distillée. L'intérêt de ce produit est une obtention facile, une longue conservation même à l'air libre et une grande stabilité de composition. Nous avons mené des expériences sur des solutions de concentrations, notée C , de 40% et 45% en masse de gel. D'un point de vue rhéologique, ces solutions étudiées sont des fluides à seuil, rhéofluidifiants et présentant un phénomène d'hystérèse (cf. Annexe). En raison de ce phénomène d'hystérèse, nous préciserons toujours, dans ce rapport, si les valeurs des paramètres expérimentaux ont été atteintes par valeurs inférieures ou supérieures.

Afin d'éviter une perturbation de l'écoulement généré dans les solutions de gels, nous avons, avant toute expérience dans la cuve, centrifugée chaque solution de gel à 1100 tours par minute pendant 5 minutes afin d'en extraire les bulles d'air.

1.2 Obtention du vortex

1.2.1 La cuve

Nous avons utilisé une cuve parallélépipédique dans laquelle une ouverture circulaire, de diamètre 10.2cm, a été aménagée au fond. Afin de créer un vortex au sein du gel, un disque placé dans l'ouverture de manière à affleurer le fond de la cuve, est mis en rotation à l'aide d'un moteur dont l'axe de rotation est relié à celui du disque par une courroie. Grâce à un système d'adaptateurs, le diamètre de la partie mobile du disque est réglable par l'expérimentateur. Nous avons, durant cette étude, travaillé avec un disque de diamètre 10.1cm. La vitesse de rotation du disque, ajustable de 0.45Hz à 5.65Hz, est contrôlée par la valeur de la tension d'alimentation du moteur. Le disque tournant entraîne alors le fluide placé dans la cuve, créant ainsi un vortex (cf. figure 1.1). De taille 20 * 20 * 10cm, la cuve a été faite en verre afin de permettre la visualisation de l'écoulement. C'est la même raison qui a conduit au choix d'une cuve parallélépipédique afin d'éviter la déformation d'images de l'écoulement prises depuis l'extérieur de la cuve.

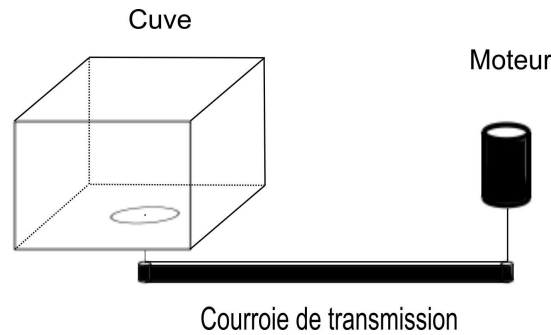


FIGURE 1.1: Schéma de principe : un disque affleurant le fond de la cuve est mis en rotation à l'aide d'un moteur dont l'axe de rotation est relié à celui du disque par une courroie.

1.2.2 Les effets de bord

Quel que soit l'écoulement se produisant dans la cuve, on constate qu'au delà d'une zone où la surface libre se déforme lors de la rotation du disque, il existe une zone qui s'étend jusqu'aux bords de la cuve et pour laquelle on n'observe aucun mouvement malgré la rotation du disque (cf. figure 1.2). Lorsqu'on verse le gel dans la cuve, des reliefs apparaissent à sa surface. La zone cisailée du gel est donc facilement repérée par la disparition de ces reliefs. L'absence de mouvement dans la zone non cisailée nous permet de dire que les bords de la cuve n'influent pas sur l'écoulement.



FIGURE 1.2: Photo en plongée de la surface libre du gel. Les bords de la cuve n'influent pas l'écoulement du gel. Lorsqu'on verse le gel dans la cuve, des reliefs apparaissent à sa surface. La zone cisailée du gel est donc facilement repérable par la disparition de ces reliefs. Le trait représente 6cm.

1.2.3 Tachymétrie

Un système optique couplé à un système occultant permet de déterminer rapidement (et non seulement à l'aide de la tension d'alimentation du moteur) la fréquence de rotation du disque tournant.

Le système optique est composé d'une diode électroluminescente et d'une photodiode détectant la lumière émise par la L.E.D. Sur l'axe du moteur est fixé un disque percé. La lecture, à l'aide d'un oscilloscope, de la fréquence d'occultation de la lumière émise par la L.E.D. par le disque percé permet de connaître la fréquence de rotation du moteur (cf. figure 1.3). L'axe du moteur étant relié à celui du disque par une courroie, la fréquence de rotation du disque tournant est directement proportionnelle à la fréquence de rotation du moteur.

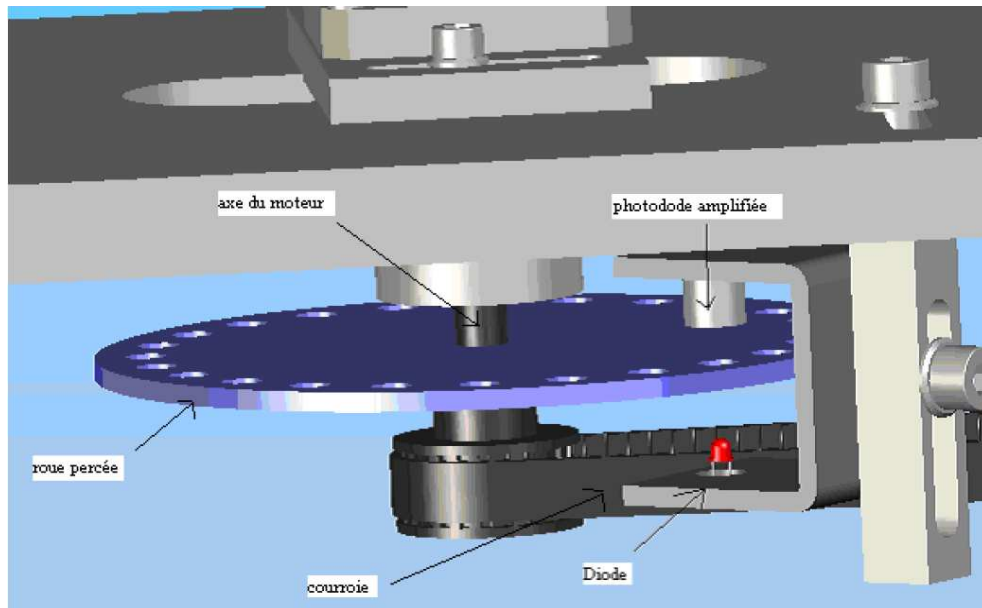


FIGURE 1.3: Schéma du capteur tachymétrique. Schéma extrait de [5].

1.3 Techniques d'observation

Pour l'ensemble de nos observations, nous avons utilisé quatre caméras et deux systèmes d'éclairage (cf. figure 1.5). Notre but était l'obtention d'une vue de face, d'une vue de dessus et de deux vues subjectives des écoulements générés dans la cuve.

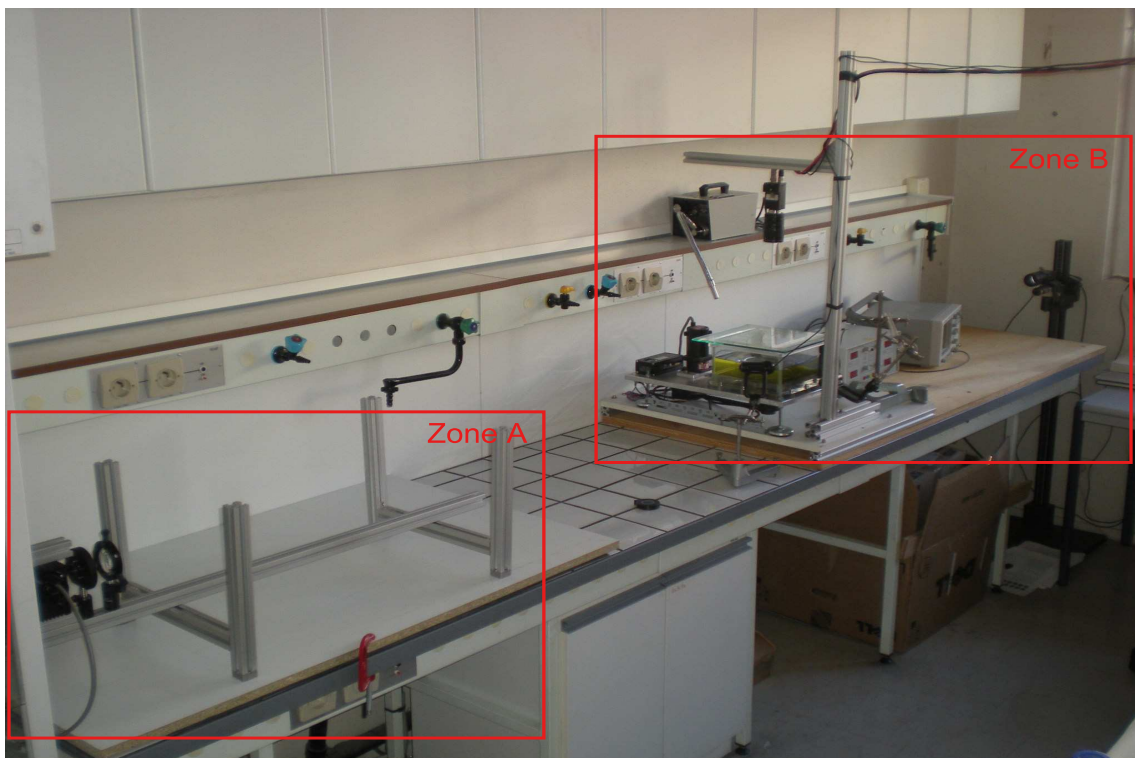


FIGURE 1.4: Photo d'ensemble de l'expérience.

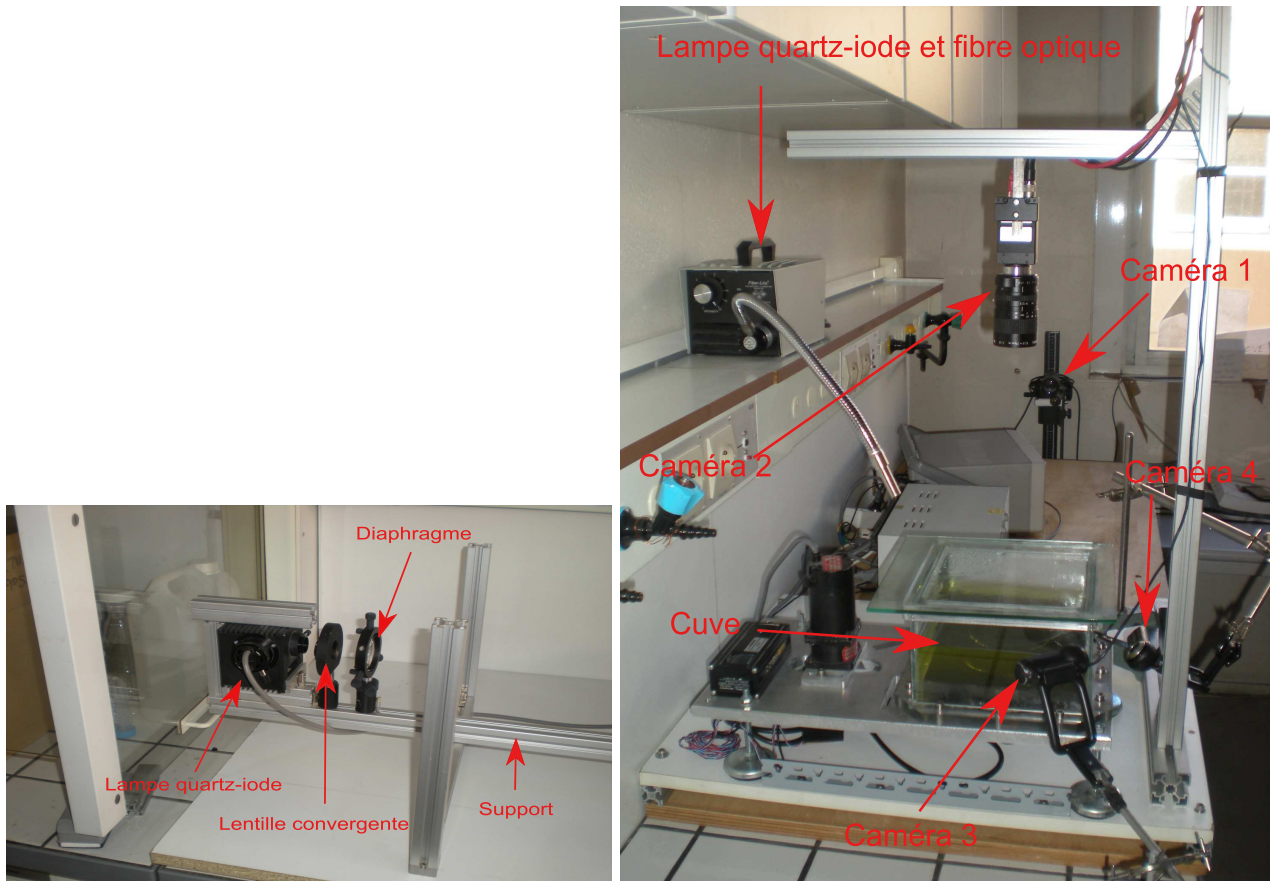


FIGURE 1.5: Photo légendée des zones A (Gauche) et B (Droite).

1.3.1 Obtention du profil

Afin d'étudier la forme de la surface libre (largeur, profondeur, forme ...), nous avons souhaité obtenir son profil. Dans ce but nous avons réalisé un faisceau de lumière parallèle par l'association d'une lampe quartz-iode et d'un diaphragme placé au foyer objet d'une lentille convergente (cf. figure 1.5, Gauche). Le diaphragme permet de créer une source ponctuelle nécessaire à l'obtention, à la sortie de la lentille, d'un faisceau de lumière parallèle. Ce système a ensuite été placé le plus loin possible de la cuve pour éliminer le maximum de rayons divergents. Les rayons ainsi créés le plus parallèles possibles arrivent perpendiculairement à une face de la cuve et pénètrent dans le gel sans phénomène de réfraction. Tous les rayons qui n'ont pas été déviés dans la cuve continuent à décrire une trajectoire rectiligne et sortent perpendiculairement à la face de sortie de la cuve. Par contre les rayons qui rencontrent la surface libre sont déviés et ne sortent pas de la cuve parallèlement aux autres. Un papier calque placé sur la face de sortie des rayons, à l'extérieur de la cuve, permet d'intercepter les rayons qui n'ont pas été déviés. Le profil de la surface libre apparaît donc noir sur fond lumineux sur le papier calque (cf. figure 1.6). Une caméra C.C.D. (Caméra vidéo de marque *i\lambda i*, modèle CB-080 GE) munie d'un objectif (Cosmicar, TV zoom Lens 12.5~75mm 1 :18), placée loin de la cuve sur l'axe formé par la lampe et la cuve, enregistre l'image formée sur le papier calque (cf. figure 1.5, Gauche).

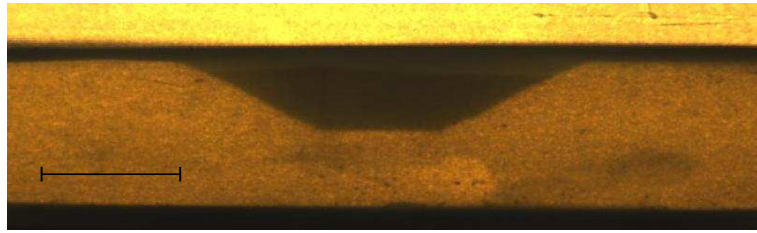


FIGURE 1.6: Exemple d'un profil de surface. Les rayons qui ont rencontrés la surface libre ont été déviés. Le profil de la surface libre apparaît en noir. Le trait représente 2cm.

On constate sur la photo 1.6 que le vortex observé peut se décomposer en deux parties : une partie où la surface libre plonge (au centre) et une autre où la surface libre est horizontale (sur les côtés). Bien que ceci rejoint la discussion sur les effets de bord du paragraphe 1.2.2, concentrons nous ici sur l'épaisseur de la surface libre dans sa partie horizontale. Elle s'explique par la hauteur du ménisque que forme le fluide étudié sur le verre de la cuve. De taille environ 2mm, celui-ci apparaît sur toutes les photos de profil.

1.3.2 Vue de dessus

Souhaitant également étudier la vue de dessus du vortex, nous avons éclairé la surface libre du gel directement à l'aide d'une lampe quartz-iode associée à une fibre optique (cf. figure 1.5, Droite). La fibre permet la canalisation et le guidage de la lumière facilitant l'obtention d'images de qualité souhaitée. Une caméra C.C.D. (Caméra vidéo de marque *iλi*, modèle CB-080 GE) munie d'un objectif (Cosmicar, TV zoom Lens 12.5~75mm 1 :18), placée au dessus de la cuve (cf. figure 1.5, caméra 2), détecte la lumière diffusée par la surface (cf. figure 1.7). L'extrémité de l'objectif de la caméra était placée à 40cm à la verticale du centre du disque tournant et l'axe de caméra était incliné de 15° par rapport à la verticale.

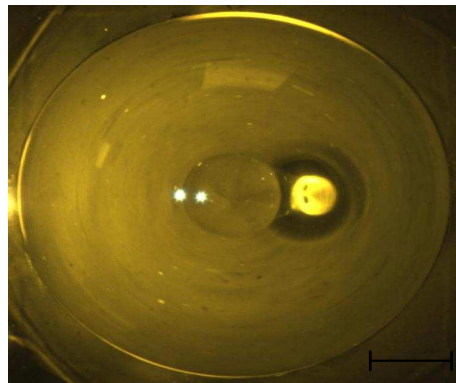


FIGURE 1.7: Exemple de vue du dessus du vortex créé dans la cuve. Le trait représente 2cm.

1.3.3 Vue plongeante

Les vues de dessus et du profil du vortex ne permettent de visualiser sur chaque image que deux dimensions de la forme de la surface libre. Afin de palier à ce manque, nous avons souhaité photographier une vue plongeante de la surface libre (cf. figure 1.8). On visualise ainsi les trois dimensions de la surface libre permettant de bien appréhender sa forme. Nous avons ainsi placé une caméra web (Logitech Pro 9000) à 5cm de la face d'entrée du faisceau de lumière parallèle (cf. figure 1.5, caméra 3). L'axe de la caméra était incliné de 20° par rapport à l'horizontale



FIGURE 1.8: Photo de principe : exemple de vue en plongée de la surface libre du gel. Le trait représente 2cm.

1.3.4 Vue en contre-plongée

Dans certaines conditions expérimentales, la surface libre du gel s'enfonce. La vue plongeante ne permet alors plus de visualiser l'intégralité de la surface libre. Nous avons donc souhaité photographier une vue en contre-plongée de la surface libre (cf. figure 1.9). Nous avons ainsi placé une caméra web (Logitech Pro 9000) à 5cm de la face de droite de la cuve dans le sens de propagation du faisceau de lumière parallèle (cf. figure 1.5, caméra 4). L'axe de la caméra était incliné de 20° par rapport à l'horizontale

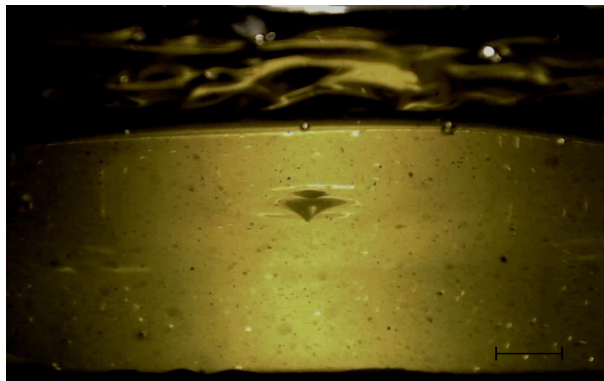


FIGURE 1.9: Exemple de vue en contre plongée de la surface libre du gel. Le trait représente 1cm.

Chapitre 2

Résultats expérimentaux

2.1 Les comportements qualitatifs majeurs

De notre caractérisation du vortex, nous avons déduit que les deux paramètres clés à l'apparition des différents comportements sont : *la hauteur de gel dans la cuve*, notée h , *la vitesse de rotation du disque tournant*, notée f et *la concentration en masse de gel du fluide étudié*, notée C . En fonction de la valeur de ces paramètres nous avons observé toute une zoologie de formes de la surface libre. Nous en avons repérés cinq majeurs.

2.1.1 Le renflement

Un des comportements majeurs observé est un gonflement de toute la surface libre du gel cisailé (cf. figure 2.1). Ce "renflement", figure axisymétrique, est en rotation solide autour de l'axe vertical passant par le centre du disque tournant. La surface libre du gel cisailé est entraînée par la rotation du gel en profondeur.

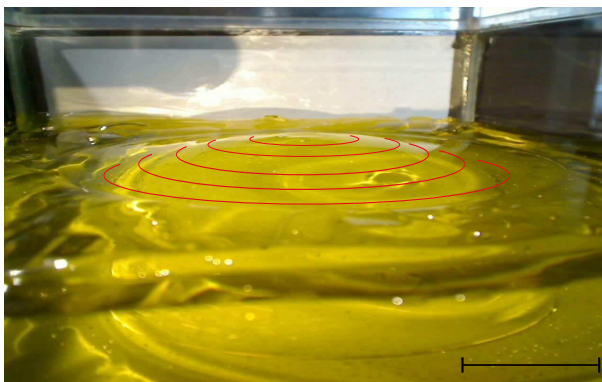


FIGURE 2.1: Photo d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "le renflement" où a été mise en valeur la partie gonflée de la surface libre. Ce profil a été obtenu avec $h = 3.5\text{cm}$, $C = 45\%$ et $f = 1.2\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 6cm.

2.1.2 La calotte positive

Un deuxième comportement majeur correspond à l'apparition d'une calotte, en rotation solide autour de l'axe vertical passant par le centre du disque tournant, au centre de la surface libre du gel cisailé (cf. figure 2.2). Le gel formant la surface libre autour de la calotte s'écoule. Contrairement au "renflement", où toute la partie cisailée de la surface libre gonfle, la "calotte positive" ne mesure typiquement que quelques centimètres de diamètre.

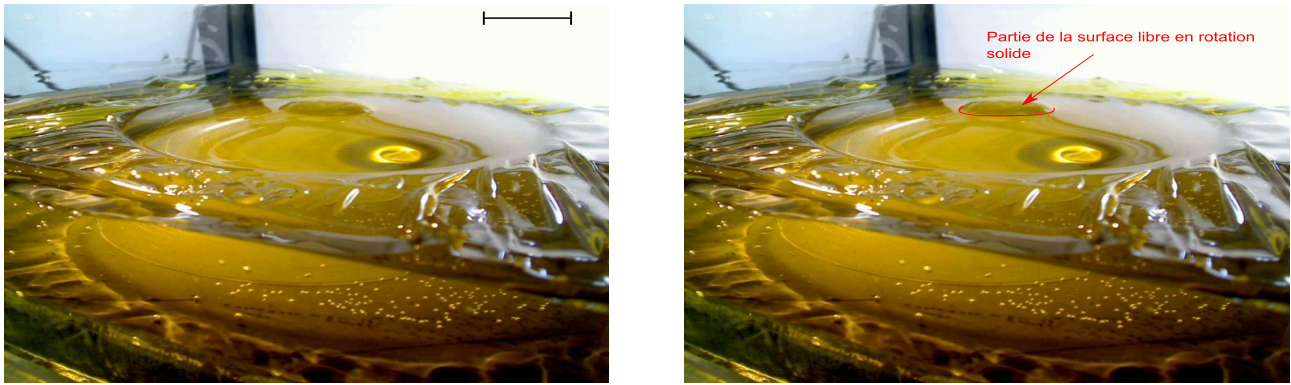


FIGURE 2.2: (Gauche) Photo d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "la calotte positive". Ce profil a été obtenu avec $h = 3.5\text{cm}$, $C = 45\%$ et $f = 2.9\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 2cm. (Droite) Mise en valeur d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "la calotte positive".

2.1.3 La calotte négative

Un troisième comportement majeur correspond à ce qu'on a appelé : la "calotte négative". Celle-ci est créée par l'enfoncement, à travers la surface libre du gel, de "la calotte positive" (cf. figure 2.3).



FIGURE 2.3: Profil d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "la calotte négative". Ce profil a été obtenu avec $h = 2.5\text{cm}$, $C = 45\%$ et $f = 4.0\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 2cm.

2.1.4 La quille

Un quatrième comportement majeur, déjà présenté dans l'introduction, correspond à l'apparition de ce qu'on a appelé : "la quille". En effet la surface libre du gel cisailé prend la forme d'une quille de bateau, légèrement vrillée, en rotation autour de l'axe vertical passant par le centre du disque tournant (cf. figure 2.4).

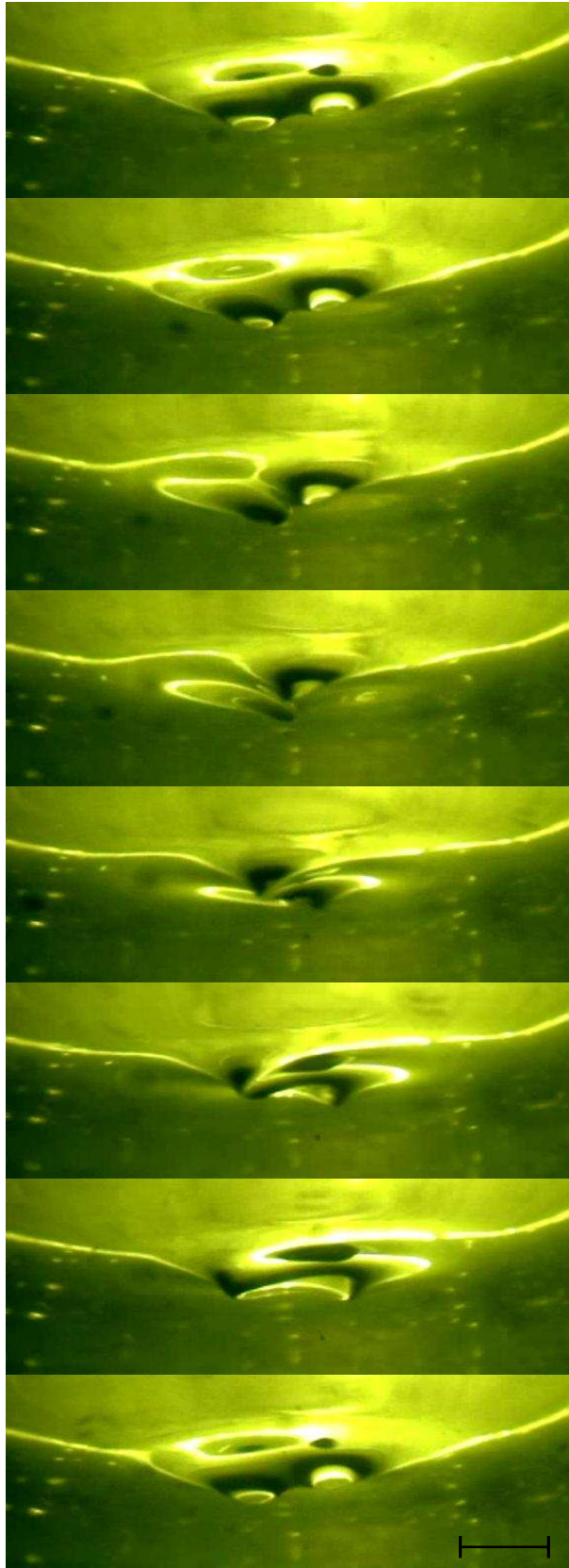


FIGURE 2.4: Photos successives (de haut en bas) d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "la quille". On observe la rotation de "la quille" autour de l'axe vertical passant par le centre du disque tournant. Ce profil a été obtenu avec $h = 3.5\text{cm}$, $C = 45\%$ et $f = 4.2\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 1cm.

Notre expérience, où "la quille" est une forme stable, permet une observation sur la durée de ce phénomène.

2.1.5 Le point singulier

Un dernier comportement majeur est "le point singulier". Celui-ci correspond à la rotation, autour de l'axe vertical passant par le centre du disque tournant, d'une figure ayant la forme d'une pyramide à base triangulaire, non régulière (les angles au sommet ne font pas 120°), inversée et légèrement torsadée (cf. figure 2.5).

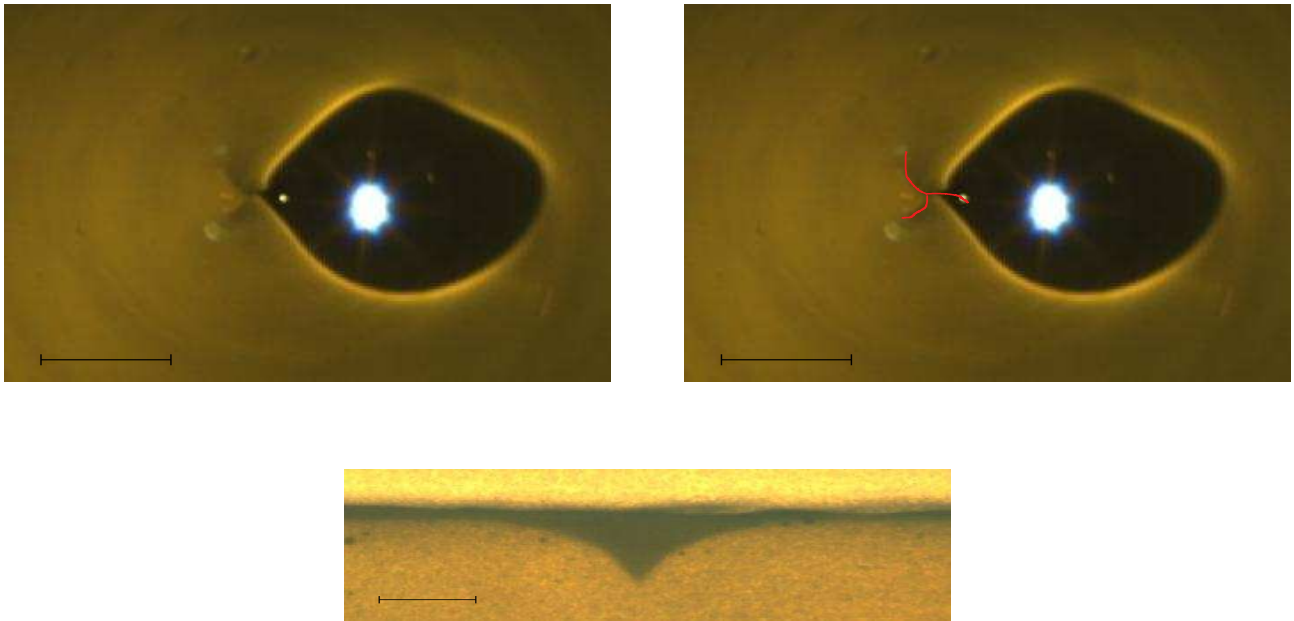


FIGURE 2.5: (Gauche) Vue du dessus de la surface libre dans le cas d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "le point singulier". Ce profil a été obtenu avec $h = 4.4\text{cm}$, $C = 40\%$ et $f = 5.3\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 2cm. (Droite) Vue du dessus de la surface libre dans le cas d'un des principaux comportements de la surface libre observés lors de notre étude : "le point singulier". Ici la forme de la surface libre a été mise en valeur. Ce profil a été obtenu avec $h = 4.4\text{cm}$, $C = 40\%$ et $f = 5.3\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 2cm. (Bas) Profil de la surface libre d'un des principaux comportements observés lors de notre étude : "le point singulier". Ce profil a été obtenu avec $h = 4.4\text{cm}$, $C = 40\%$ et $f = 5.3\text{Hz}$. Cette valeur de fréquence a été atteinte par valeurs inférieures. Le trait représente 1cm.

2.2 Diagrammes de phase

Dans le but de caractériser les réponses du gel au vortex créée en son sein, nous avons souhaité tracer le diagramme de phase (f en fonction de h à C fixée) des cinq principaux comportements vus précédemment. Nous avons bien sûr centré notre étude sur la zone d'existence de la quille.

Nous avons tracé les diagrammes de phase pour les deux concentrations en masse de gel où apparaît la quille : 40% et 45%. Ces deux solutions étant des fluides présentant un phénomène d'hystérèse, nous avons tracé les deux diagrammes à fréquence de rotation croissante puis décroissante. Partant de $f = 0.45\text{Hz}$, nous avons augmenté la fréquence par pas de 0.225Hz . À chaque palier, nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer une vidéo du profil et de la surface libre et de passer au palier suivant.

À hauteur de gel et fréquence de rotation du disque fixées, nous avons attendu l'établissement d'une forme stable de la surface libre. En fonction du comportement de la surface libre que nous avons observé, nous avons placé sur le diagramme un "triangle" dans le cas du "point singulier", un carré dans le cas de "la quille", un symbole "multiplié" dans le cas de "la calotte négative", une étoile dans le cas de "la calotte positive" et un "plus" dans le cas du "renflement".

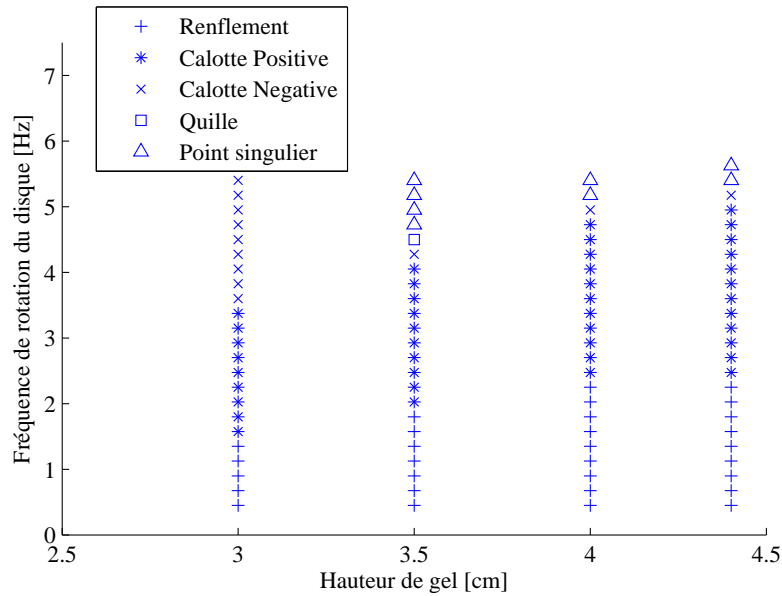


FIGURE 2.6: Diagramme de phase de la solution à 40% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à vitesse de rotation croissante par paliers de 0.225Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

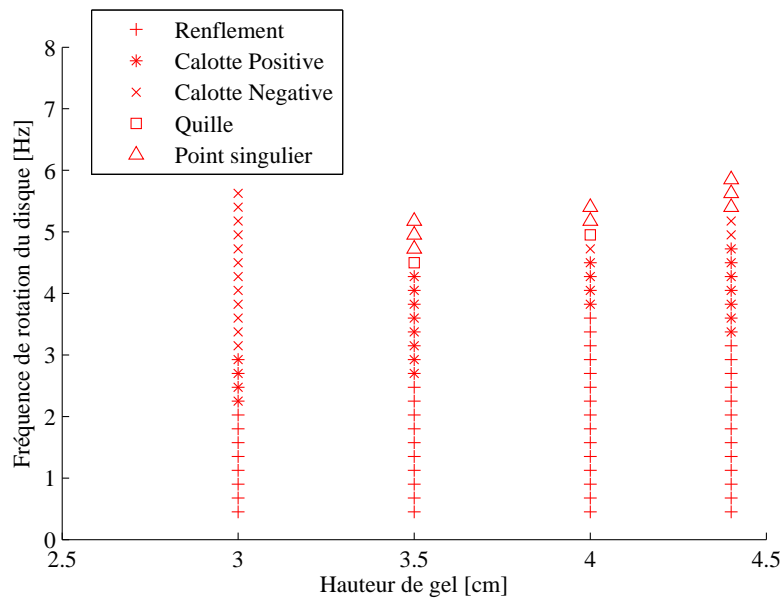


FIGURE 2.7: Diagramme de phase de la solution à 40% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à vitesse de rotation décroissante par paliers de 0.225Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

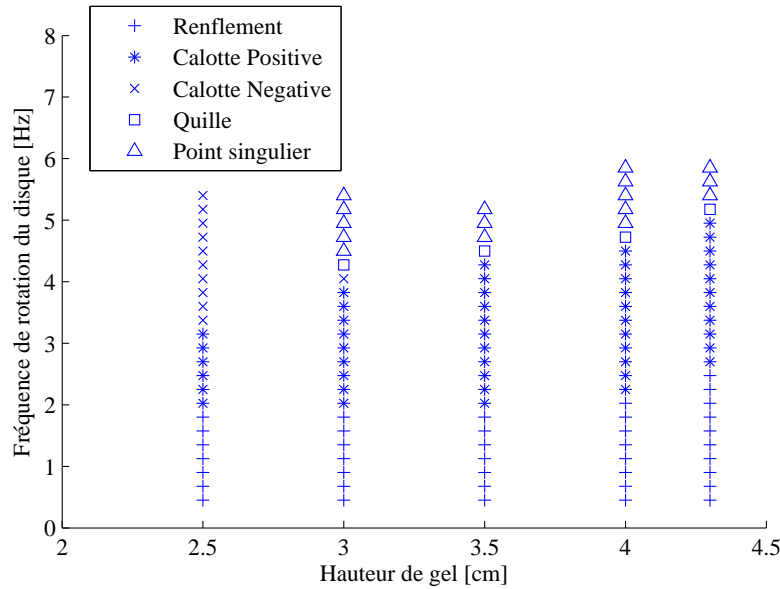


FIGURE 2.8: Diagramme de phase de la solution à 45% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à vitesse de rotation croissante par paliers de 0.225Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

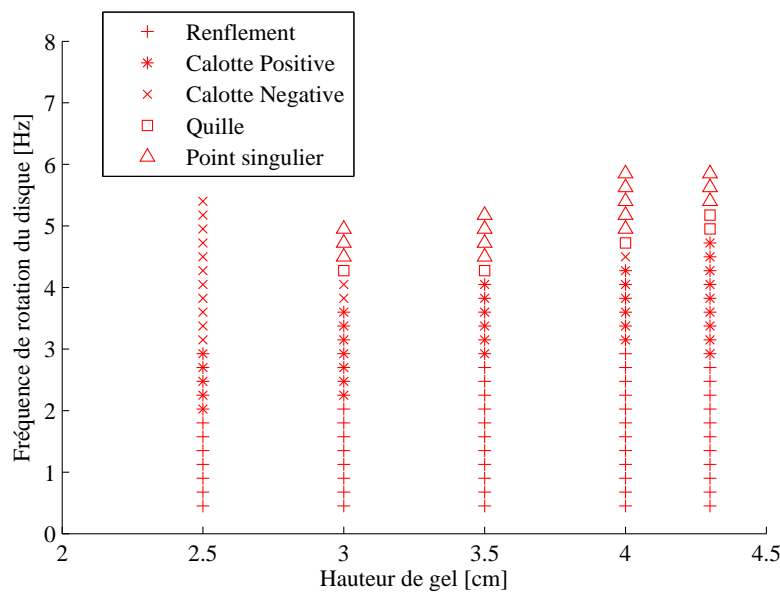


FIGURE 2.9: Diagramme de phase de la solution à 45% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à vitesse de rotation décroissante par paliers de 0.225Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

La première similitude que l'on note entre ces diagrammes est l'ordre d'apparition des comportements majeurs. À hauteur fixée et fréquence de rotation du disque croissante on constate l'apparition, à quelques exceptions près où un comportement majeur est manquant, des comportements dans l'ordre suivant : "renflement" puis "calotte positive" puis "calotte négative" puis "quille" et enfin "point singulier". On constate également en comparant les diagrammes réalisés à fréquence de rotation du disque croissante et décroissante une différence dans les zones d'existence des différents comportements majeurs. Ceci est lié au phénomène d'hystérèse inhérent au gel. Une autre remarque que l'on peut faire sur ces diagrammes est la plus grande étendue de la zone

d'existence de la "quille" dans le gel à 45% en masse de gel que dans celui à 40%.

2.3 Tentative d'explication de l'origine de ces comportements

2.3.1 Observation

Au cours d'une étape de tracé des diagrammes de phase, nous avons obtenu, à l'aide de la caméra 1 (cf. figure 1.5), une photo de profil de la cuve où apparaissent des formes de rouleaux (cf. figure 2.10).

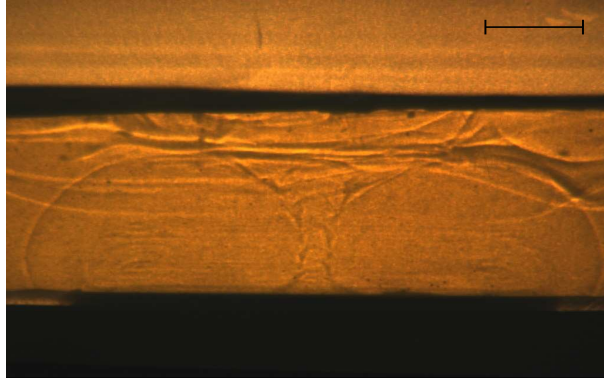


FIGURE 2.10: Photo de profil de la surface libre du gel où est visible une structure de rouleaux au sein du gel. Le trait représente 2cm.

Cette photo a été obtenue alors que du gel venait d'être ajouté dans la cuve. Ce gel supplémentaire, certainement plus froid que le gel déjà présent dans la cuve, a permis de créer des variations d'indices optiques au sein du gel. On peut ainsi visionner une partie des lignes de courant s'établissant dans le gel. En observant attentivement l'enregistrement vidéo dont est issu la photo 2.10, on constate que les lignes de courant prennent la forme de rouleaux de convection partant du centre du disque vers ses bords et revenant vers le centre du disque par le haut.

2.3.2 Analyse

On peut tenter d'expliquer cette observation par l'analyse suivante : le disque tournant, de par sa rotation, exerce une contrainte de cisaillement sur le gel situé juste au dessus de lui en $H = 0$ (on notera par la suite H l'altitude du gel dans la cuve par rapport au fond de la cuve). Cette contrainte, liée à la force centrifuge, s'écrit sous la forme $\sigma = \rho * r^2 * \omega^2$ où σ est la contrainte exercée par le disque sur le gel à une position r du centre du disque et à l'altitude $H = 0$, ρ la masse volumique du gel et ω la pulsation de rotation du disque. Les fluides étudiés étant des fluides à seuil (cf. Annexe), ceux-ci ne s'écoulent que si, localement, σ est supérieur à la contrainte seuil du gel σ_{seuil} . Considérons une portion de gel située à la position $(r, H = 0)$. Celle-ci s'écoulera si $r \geq r_{seuil}$ où $r_{seuil} = \sqrt{\sigma_{seuil}/(\rho * \omega^2)}$. Dans le cas où cette condition est vérifiée, la portion liquide de gel située à $r \geq r_{seuil}$ est expulsée vers l'extérieur du disque jusqu'à se heurter à la portion de gel à l'état solide située au delà des limites du disque. Bloquée par le gel solide d'une part et par le disque d'autre part, la portion liquide de gel n'a plus comme solution que de remonter dans la cuve. À partir d'une certaine altitude, les effets du disque ne se font plus suffisamment sentir et la portion liquide de gel se heurte de nouveau à du gel à l'état solide. La partie liquide de gel revient vers le centre de la cuve (cf. figure 2.11). Un système de rouleaux s'établit dans la cuve.

On a vu à la section 2.2 qu'en fonction de la fréquence de rotation du disque et de la hauteur de gel dans la cuve, différents comportements majeurs apparaissent. Ceci peut s'expliquer en raisonnant sur la taille des rouleaux présents dans le gel. En effet le comportement majeur sera déterminé par la compétition entre l'élasticité de la surface et la tendance qu'ont les rouleaux à faire plonger cette surface.

- Dans le cas du "renflement", à faible vitesse de rotation, les rouleaux sont de faible taille. Ceux-ci n'exercent pas une force suffisante sur la surface pour la faire plonger. Par contre le mouvement du gel au sein de ces rouleaux va conduire à un afflux de gel au centre du disque tournant et delà à une force sur la surface tendant à la faire gonfler (cf. figure 2.11).

- Dans le cas de la "calotte positive", les rouleaux de taille plus importante, mettent en mouvement le gel de la surface libre créant un afflux de gel au centre de la partie cisailée de la surface libre. La taille des rouleaux est suffisante pour mettre en mouvement la surface mais l'élasticité de la surface reste cependant suffisante pour compenser l'effet qu'ont les rouleaux de faire plonger la surface. On observe ainsi ce qu'on a appelé "la calotte positive" (cf. figure 2.11).
- Dans le cas de la "calotte négative", de la "quille" et du "point singulier", l'élasticité ne compense plus l'effet qu'ont les rouleaux de faire plonger la surface. La surface libre du gel s'enfonce (cf. figure 2.11).

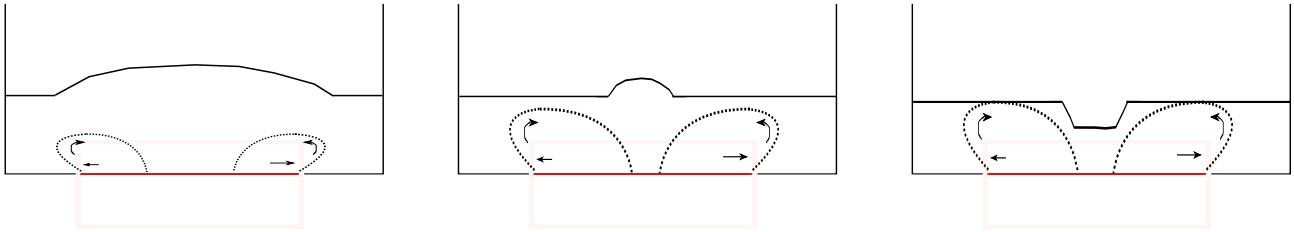


FIGURE 2.11: Schéma de principe de l'existence de rouleaux dans la cuve. En rouge, le disque tournant et en pointillé une modélisation de la frontière entre la partie du gel à l'état liquide et la partie du gel à l'état solide. (Gauche) Dans le cas du "renflement", à faible vitesse de rotation, les rouleaux sont de faible taille. Ceux-ci n'exercent pas une force suffisante sur la surface pour la faire plonger. Par contre le mouvement du gel au sein de ces rouleaux va conduire à un afflux de gel au centre du disque tournant et delà à une force sur la surface tendant à la faire gonfler. (Milieu) Dans le cas de la "calotte positive", les rouleaux de taille plus importante, mettent en mouvement le gel de la surface libre créant un afflux de gel au centre de la partie cisailée de la surface libre du gel. L'élasticité de la surface reste cependant suffisante pour compenser l'effet qu'ont les rouleaux de faire plonger la surface. On observe ainsi ce qu'on a appelé "la calotte positive". (Droite) Dans le cas de la "calotte négative", de la "quille" et du "point singulier", l'élasticité ne compense plus l'effet qu'ont les rouleaux de faire plonger la surface. La surface libre du gel s'enfonce.

Chapitre 3

Une étude approfondie de la quille

3.1 Caractérisation des transitions entre les comportements majeurs

3.1.1 Caractérisation des comportements majeurs

Nous avons souhaité évaluer avec précision la zone d'existence de la quille. Nous avons donc choisi des critères géométriques pour caractériser certains comportements majeurs et avons étudié les transitions entre ces comportements. Nous nous sommes concentrés sur les transitions entre la "calotte positive", la "calotte négative", la "quille" et enfin le "point singulier".

- Nous avons caractérisé la "calotte positive" par son diamètre D , la hauteur de la déformation par rapport au fond de la cuve (altitude du disque tournant) et sa fréquence de rotation (cf. figure 3.1).

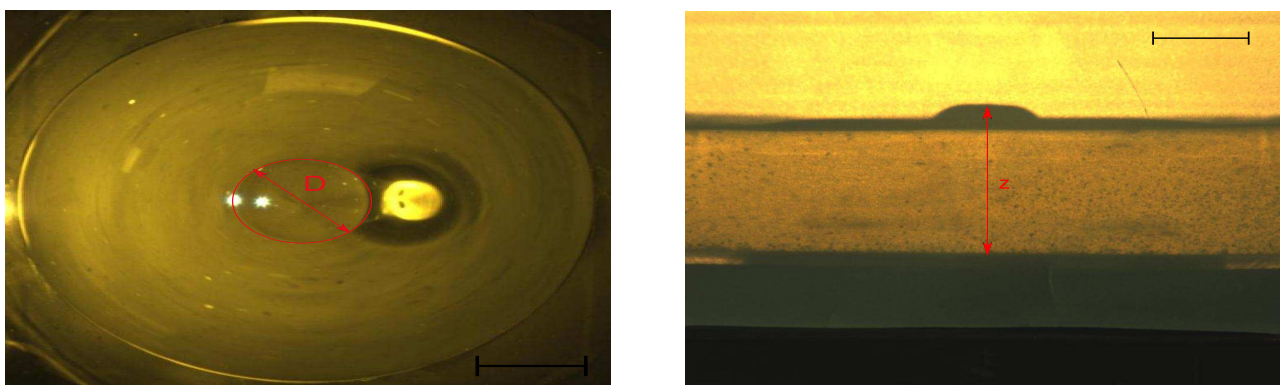


FIGURE 3.1: (Gauche) Photo de principe : caractérisation d'un des comportements majeurs, la "calotte positive", grâce à son diamètre D . Le trait représente 2cm. (Droite) Photo de principe : caractérisation d'un des comportements majeurs, la "calotte positive", grâce à la hauteur de la déformation par rapport au fond de la cuve, notée z . Le trait représente 1cm.

- Nous avons caractérisé la "quille" par la distance entre les deux points les plus profonds de la surface libre, appelés "point focaux", la hauteur de la déformation (prise sur la médiatrice du segment reliant les deux points focaux) par rapport au fond de la cuve et sa fréquence de rotation (cf. figure 3.2).

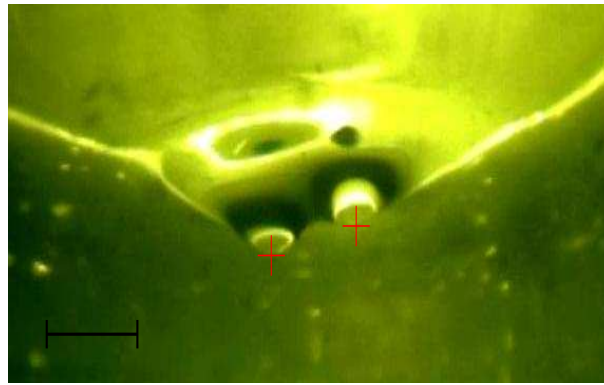


FIGURE 3.2: Photo de principe : mise en évidence des points les plus profonds de la surface libre dans le cas d'un des comportements majeurs observé durant notre étude : la "quille". Le trait représente 1cm.

- Nous avons caractérisé la "calotte négative" par son diamètre, la hauteur de la déformation par rapport au fond de la cuve (altitude du disque tournant) et sa fréquence de rotation (cf. figure 3.3). Il est à noter que dans bien des cas, la hauteur de "la calotte négative" n'était pas mesurable en raison du ménisque du gel sur les parois de la cuve.

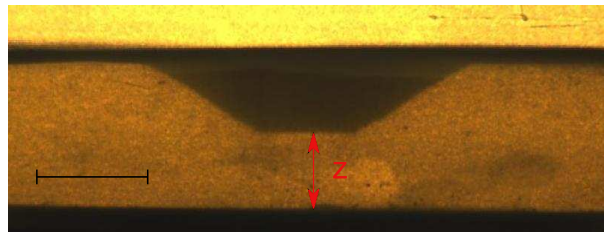


FIGURE 3.3: Photo de principe : caractérisation d'un des comportements majeurs, la "calotte négative", grâce à la hauteur de la déformation par rapport au fond de la cuve, notée z . Le trait représente 2cm.

- Nous avons caractérisé "le point singulier" par la hauteur de la déformation par rapport au fond de la cuve.

3.1.2 Transition entre les comportements majeurs

Nous avons remarqué au cours de notre étude que certains critères quantitatifs pouvaient être utilisés pour décréter une transition entre deux comportements majeurs.

- Pour la transition entre la "calotte positive" et la "calotte négative" on étudiait la hauteur respective de ces deux calottes. Si la hauteur du comportement étudiée est supérieure à la hauteur de la surface libre, le comportement majeur observé est la "calotte positive". Inversement si la hauteur du comportement étudiée est inférieure à la hauteur de la surface libre, le comportement majeur observé est la "calotte négative".
- Pour la transition entre la "calotte négative" et la "quille", nous avons observé que le diamètre de la "calotte négative" tend vers zéro au fur et à mesure que l'on augmente la fréquence de rotation du disque. On a ainsi choisi comme critère de transition entre la "calotte négative" et la "quille", l'annulation du diamètre de la "calotte positive".
- Pour la transition entre la "quille" et le "point singulier", nous avons remarqué qu'à fréquence de rotation croissante du disque tournant, les points focaux de la "quille" se rapprochent de plus en plus jusqu'à fusionner et donner naissance au comportement majeur : le "point singulier". Nous avons donc choisi comme critère de transition entre la "quille" et le "point singulier" l'annulation de la distance entre les points focaux de la quille.

3.1.3 Courbes de transition

Afin d'étudier les transition entre les différents comportements nous avons tracé, à hauteur fixée, l'évolution des paramètres caractéristiques des comportements majeurs lors de variation par pas de 0.045Hz de la fréquence de rotation du disque. Les gels présentant un phénomène d'hystérèse, nous avons réalisé ces graphiques pour

une fréquence de rotation du disque croissante et décroissante. Nous avons attendu un état stationnaire de la surface libre du gel avant chaque acquisition.

On a ainsi tracé pour chaque hauteur de gel, pour une fréquence de rotation du disque croissante puis décroissante, la hauteur de la déformation du comportement majeur observé (cf. figure 3.4), sa fréquence de rotation (cf. figure 3.5) et sa longueur horizontale caractéristique (diamètre dans le cas de la "calotte positive" et de la "calotte négative" et distance entre les deux point focaux dans le cas de la "quille") (cf. figure 3.6).

Afin d'apporter un élément de comparaison, nous avons également tracé (cf. figure 3.4) pour $h=4.3\text{cm}$ et une fréquence de rotation du disque décroissante, la hauteur de la déformation de la surface libre (par rapport au fond de la cuve) d'un gel à 20% en masse en fonction de f . Le gel à 20% n'a été étudié que durant cette expérience. La forme de sa surface libre ne correspond à aucun des comportements majeurs décrits (cf. paragraphe 2.1). L'intérêt de ce gel, suffisamment visqueux pour éviter toutes ondes de surface mais suffisamment dilué pour présenter un σ_{seuil} faible, est de montrer les différences qualitatives majeures de comportements entre un gel permettant d'obtenir la "quille", le 45%, et un gel ne permettant pas d'obtenir la "quille" comme le gel à 20%.

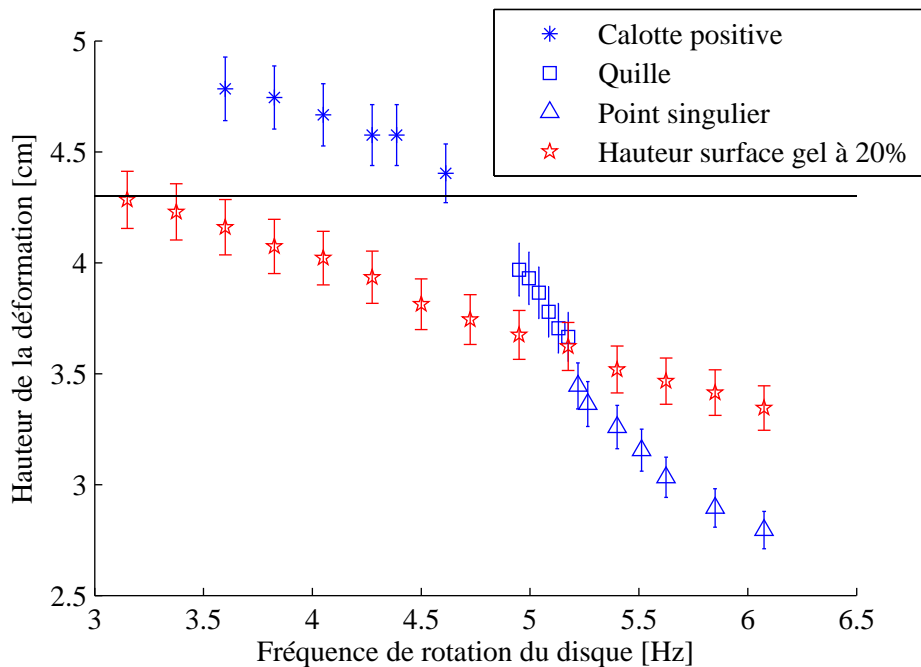


FIGURE 3.4: Tracé sur un même graphique des hauteurs respectives de "la calotte positive", de "la calotte négative", de la "quille" et du "point singulier". Ici la hauteur de gel à 45% dans la cuve est de 4.3cm, la courbe a été réalisée pour une fréquence de rotation du disque décroissante. Dans ce cas précis, la hauteur de la "calotte négative" n'était pas mesurable en raison du ménisque du gel sur les parois de la cuve. À titre de comparaison est également tracé pour $h=4.3\text{cm}$ et une fréquence de rotation du disque décroissante, la hauteur de la déformation de la surface libre (par rapport au fond de la cuve) d'un gel à 20% en masse en fonction de f .

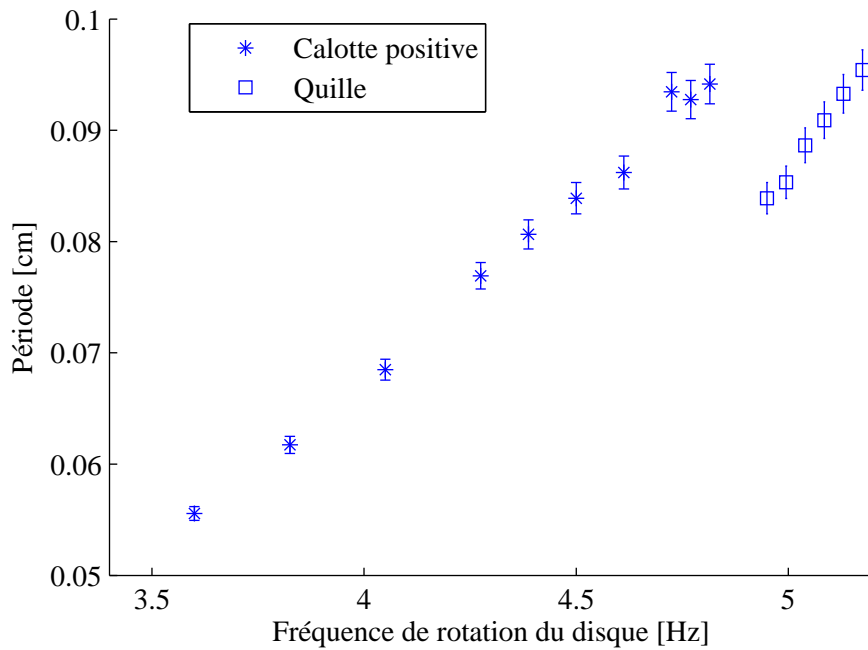


FIGURE 3.5: Tracé sur un même graphique des périodes de rotation respectives de "la calotte positive", "la calotte négative" et "la quille". Ici la hauteur de gel à 45% dans la cuve est de 4.3cm, la courbe a été réalisée pour une fréquence de rotation du disque décroissante. Dans ce cas précis, la période de la calotte négative n'était mesurable.

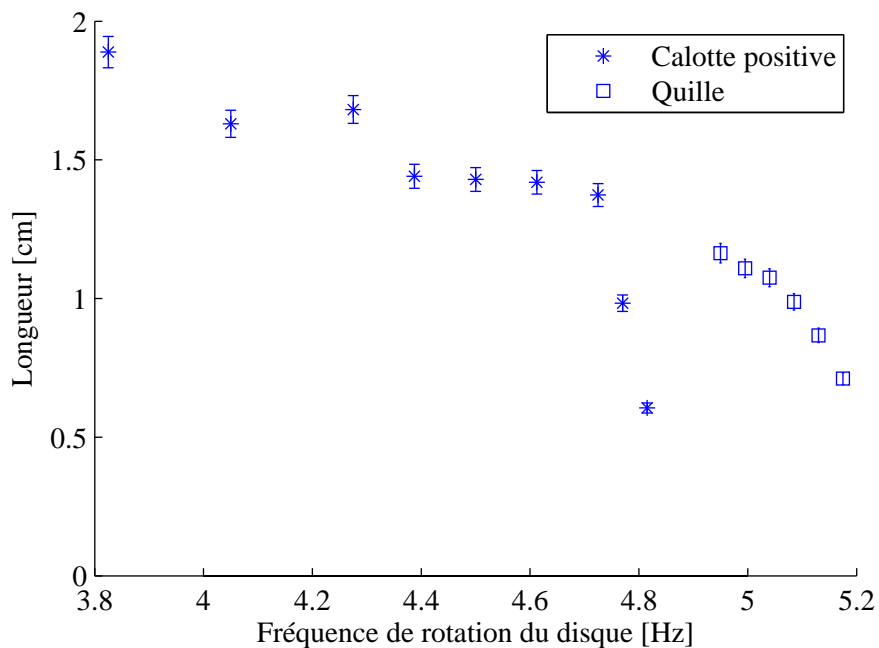


FIGURE 3.6: Tracé sur un même graphique des longueurs horizontales caractéristiques de "la calotte positive" et de "la quille" (diamètre dans le cas de la "calotte positive" et de la "calotte négative" et distance entre les deux point focaux dans le cas de la "quille"). Ici la hauteur de gel à 45% dans la cuve est de 4.3cm, la courbe a été réalisée pour une fréquence de rotation du disque décroissante. Dans ce cas précis, le diamètre de la calotte négative n'était mesurable.

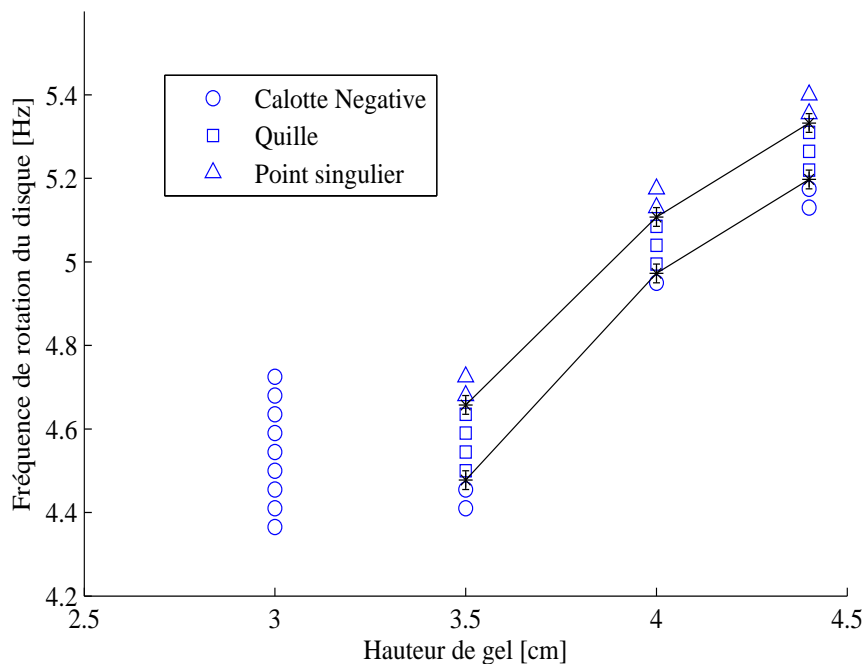
On constate sur la figure 3.4 des différences notables de comportements entre le gel à 45% en masse de gel et celui à 20%. Tout d'abord, on note que contrairement au gel à 20% où la surface libre ne gonfle pas, celle du gel à 45% se bombe (cf. "calotte positive", paragraphe 2.1) conduisant à une hauteur de déformation dépassant h , ici égale à 4.3cm. Par ailleurs les valeurs de la hauteur de la déformation de surface libre pour le gel à 20% semblent présenter une évolution plus ou moins affine, contrairement au gel à 45% pour lequel on observe un point d'inflexion des valeurs de la hauteur de la déformation la surface libre.

3.2 Zone d'existence de la quille

Afin de déterminer avec précision la zone d'existence de la quille, nous nous sommes basés sur les courbes de transitions décrites précédemment pour réaliser des diagrammes de phases où les paliers de fréquence sont distants de 0.045Hz (cf. figure 3.7, figure 3.8, figure 3.9 et figure 3.10).

À l'aide de ces diagrammes, on peut situer précisément la zone d'existence de la quille, l'atteindre directement et l'étudier plus en détails.

On observe sur les figures 3.7 à 3.10 que la zone d'existence de la quille n'est atteinte que pour des gammes de valeurs de h et f très restreintes. La quille n'a par ailleurs été observée que pour deux valeurs de concentration en masse de gel $C = 40\%$ et $C = 45\%$. La "quille" semble donc être une forme de la surface libre difficile à obtenir. Ceci est d'autant plus vrai que les valeurs des grandeurs rhéologiques des gels à 40% et à 45% sont très proches (cf. Annexe) traduisant des caractéristiques rhéologiques de gels très précises pour obtenir la quille.



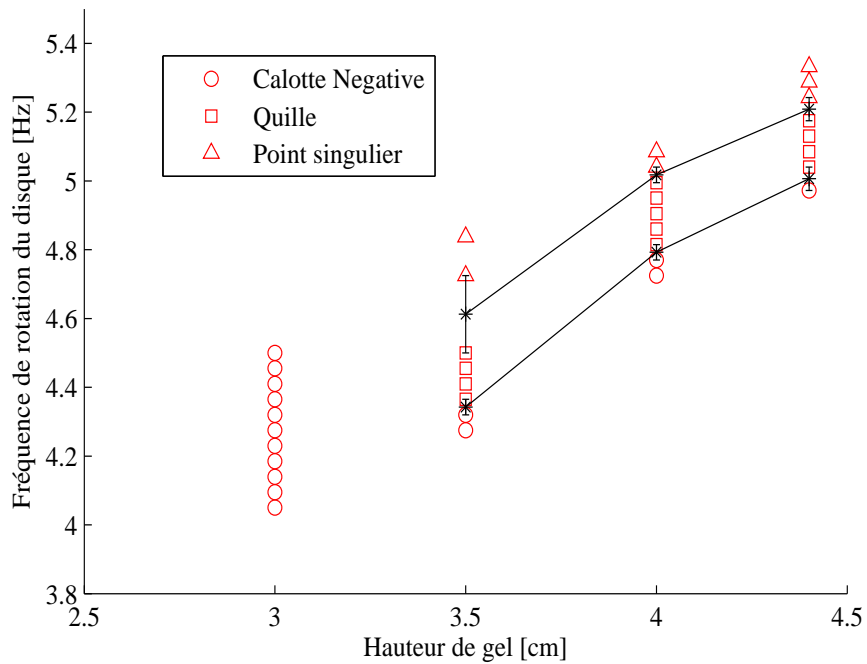


FIGURE 3.8: Diagramme de phase de la solution à 40% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à fréquence de rotation décroissante par paliers de 0.045Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

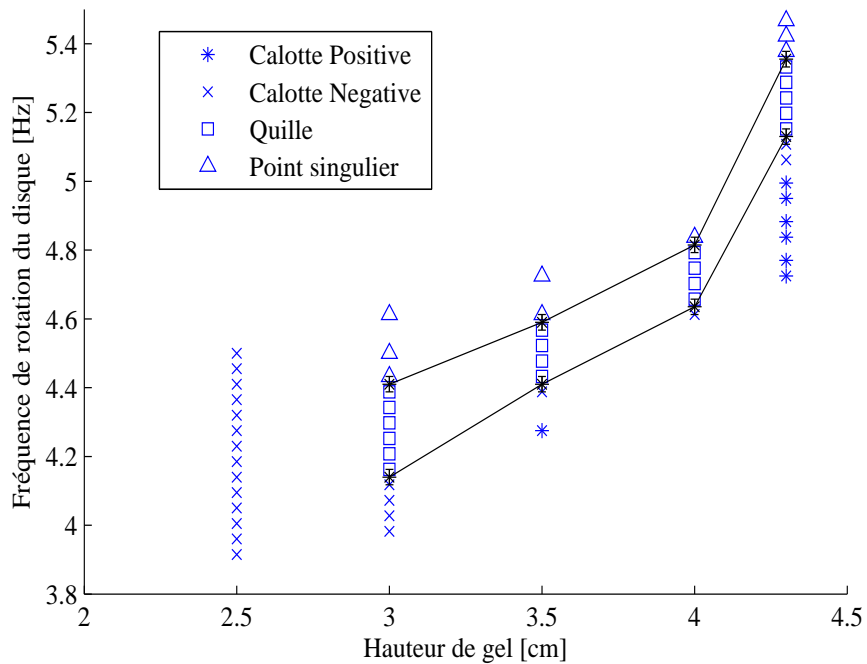


FIGURE 3.9: Diagramme de phase de la solution à 45% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à fréquence de rotation croissante par paliers de 0.045Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

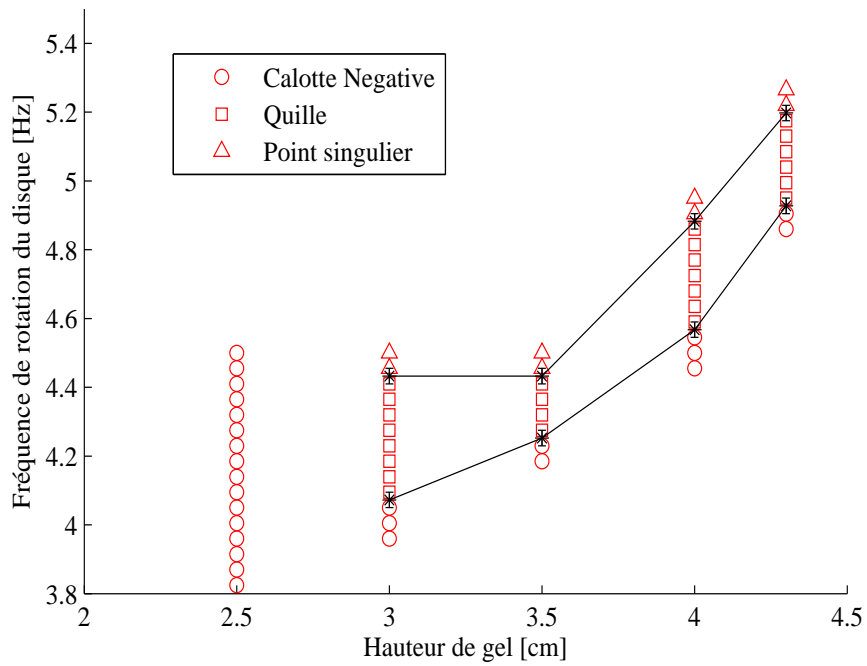


FIGURE 3.10: Diagramme de phase de la solution à 45% en masse de gel. Ce diagramme a été tracé à fréquence de rotation décroissante par paliers de 0.045Hz. Nous avons attendu un état stable avant d'enregistrer et d'analyser la vidéo du profil et celle de la surface libre.

Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons étudié les déformations de la surface libre d'un gel non newtonien induites par un vortex.

Basée sur l'observation, notre expérimentation nous a conduit à utiliser un certain nombre de caméras dont l'une permettait l'acquisition du profil de la surface et une seconde, une vue du dessus de la surface libre. De ces observations, nous avons mis en évidence cinq comportements qualitatifs dont l'un tout particulier où la surface libre prend la forme d'une quille de bateau. Cette forme, brisant la symétrie de rotation du vortex, a déjà été observée dans d'autres circonstances au sein de fluides non newtoniens mais toujours de manière instationnaire. Dans notre expérience, cette forme de quille est stable, stationnaire et peut ainsi être étudiée dans le temps. Aussi avons nous centré notre étude sur l'étude de cette particularité. Notre but a été de déterminer les conditions expérimentales d'obtention de cette quille. Nous avons ainsi tracé des diagrammes de phase mettant en évidence les zones d'existence des cinq comportements qualitatifs identifiés.

Pour créer le vortex, nous avons utilisé une cuve au fond de laquelle un disque tournant met en rotation le gel contenu dans le récipient. De nombreux paramètres interviennent dans les conditions d'obtention des cinq comportements : diamètre du disque, caractéristiques rhéologiques du gel utilisé, concentration du gel, hauteur de gel dans la cuve, et fréquence de rotation du disque. Lors de notre étude, nous avons seulement fait varier les trois derniers paramètres en fonction desquels nous avons tracé les diagrammes de phase.

Au cours d'une deuxième étude, nous avons souhaité trouver des critères quantitatifs pour décréter, parmi les cinq comportements, l'apparition et la disparition de la quille. Grâce au traitement d'image, nous avons pu déterminer, avec précision et rigueur, la zone d'existence de cette forme de la surface libre.

On pourrait maintenant étudier que devient cette zone d'existence si on change le diamètre du disque tournant ou encore en utilisant des fluides présentant d'autres propriétés rhéologiques. Cette forme de quille a, par exemple, été observée dans des fluides viscoélastiques (cf. [4]). On peut également se placer directement, à l'aide des diagrammes de phase, dans la zone d'existence de la quille et l'étudier plus en détails et pourquoi pas tenter une description mathématique du phénomène.

Bibliographie

- [1] *Cours de Mécanique des Fluides*, École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris.
- [2] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon, J-P. Hulin, L. Petit, Ed. CNRS
- [3] Adrew Benlmonde (2000), *Self-oscillations of a cusped bubble rising through a micellar solution*, Rheol Acta, **39**, 554-559
- [4] Thomas Podgorski (2002), *Surface folds during the penetration of a viscoelastic fluid by a sphere*, J. Fluid Mech., **460**, 337-348
- [5] *Déformation de la surface libre induite par un vortex dans un fluide non-newtonien*, rapport de stage de Yvan Dossmann, alors stagiaire de M1, disponible à l'adresse suivante : <http://perso.ens-lyon.fr/jean-christophe.geminard/accueil2.htm>
- [6] *Rhéologie ou comment coule la matière*, P. Oswald, Ed. Belin.

Annexe : étude rhéologique

Grandeurs rhéologiques

Les différents états de la matière

L'état solide

À l'état solide, la matière garde sa forme indéfiniment en l'absence de force appliquée. Considérons le cas d'un solide sous cisaillement constant.

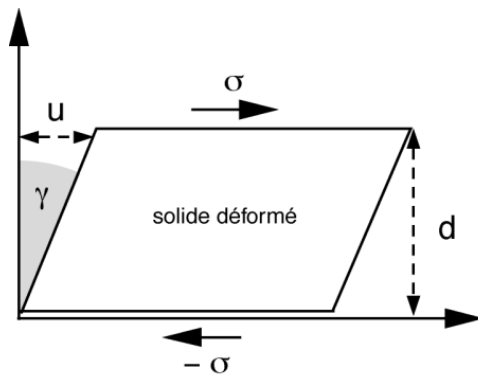


FIGURE 3.11: Déformation de cisaillement d'un solide élastique sous l'action d'une contrainte σ . Figure extraite de [6].

Si de faibles contraintes sont appliquées, la déformation du solide est faible (de l'ordre du pourcent) et réversible. On parle alors de déformation élastique ou de régime linéaire caractérisé par le *module élastique de cisaillement*, G en Pascal, du solide. Celui-ci est défini par :

$$\sigma = G * \gamma \quad (3.1)$$

Où σ est la contrainte, force par unité de surface et $\gamma = u/d$ le cisaillement (ou gradient de la déformation).

Au-delà d'une certaine contrainte, appelée *contrainte seuil d'écoulement*, le solide commence à s'écouler de manière irréversible.

L'état liquide

À l'état fluide, la matière épouse, au bout d'un certain temps, la forme du récipient qui la contient. Ce temps est d'autant plus long que le fluide est visqueux. Considérons la cas d'un fluide sous cisaillement constant.

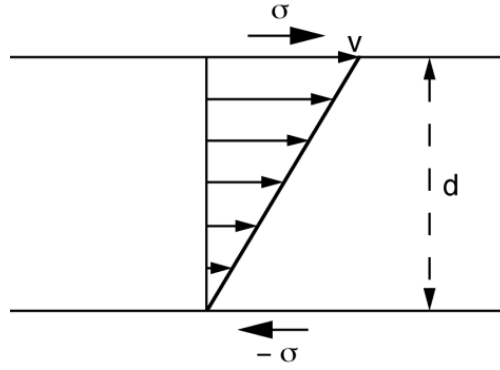


FIGURE 3.12: Fluide sous cisaillement continu : v est la vitesse de la lame supérieure par rapport à celle de la lame inférieure et d , l'épaisseur de la couche fluide . Figure extraite de [6].

Cet état est caractérisé par la viscosité du fluide en *Pa.s*, définie par :

$$\sigma = \eta * \dot{\gamma} \quad (3.2)$$

Où σ est la contrainte, force par unité de surface et $\dot{\gamma} = v/d$, la gradient de vitesse (ou taux de cisaillement) au sein du fluide.

Cas d'un cisaillement oscillatoire en régime linéaire

Considérons le cas où un échantillon de matière, en phase solide ou liquide, est soumis à une contrainte sinusoïdale d'amplitude σ_0 et de pulsation ω :

$$\underline{\sigma}(t) = \sigma_0 \exp(i\omega t) \quad (3.3)$$

Si σ_0 reste suffisamment petite, la déformation reste proportionnelle à σ_0 . On peut donc écrire la déformation sous la forme :

$$\underline{\gamma}(t) = \gamma_0 \exp(i\omega t + i\phi) \quad (3.4)$$

Où ϕ est le déphasage entre le cisaillement et la contrainte.

On définit alors le module de cisaillement complexe G^* , à partir du cisaillement et de la contrainte en notation complexe :

$$\underline{\sigma}(t) = G^*(\omega) \underline{\gamma}(t) \quad (3.5)$$

Où on pose habituellement $G^*(\omega) = G'(\omega) + iG''(\omega)$, avec respectivement G' , le module élastique et G'' , le module de perte.

Dans le cas limite solide, $G' = G$ et $G'' = 0$; dans le cas limite fluide, $G' = 0$ et $G'' = G$.

Le rhéomètre rotatif

Principe de fonctionnement

Il existe de nombreux types de rhéomètres. Ceux que nous utilisons dans cette étude sont des rhéomètres dits *rotatifs* en raison de leur dispositifs de mesure, composé de deux parties : une partie mobile, qui tourne, et

la seconde fixe. Ces deux pièces forment ce qu'on appelle la géométrie. Nous en considérons une : la géométrie plan-plan.

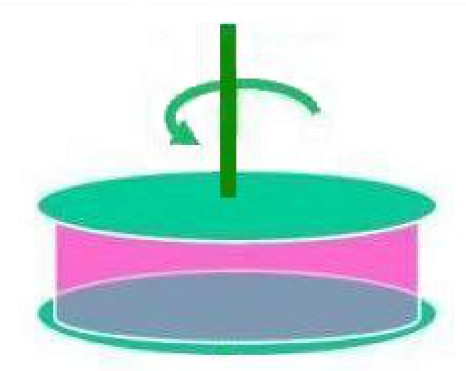


FIGURE 3.13: Géométrie utilisée dans cette étude : la géométrie plan-plan.

Un rhéomètre rotatif à contrainte imposée est un appareil qui mesure la déformation du fluide, placé entre la partie mobile et la partie fixe de l'instrument, sous contrainte choisie par l'utilisateur et imposée par le rhéomètre. De cette mesure, l'appareil en déduit, sous contrainte non oscillante, η grâce à la relation :

$$\eta = \dot{\gamma} / \sigma \quad (3.6)$$

De même, sous contrainte oscillante, l'appareil déduit G' et G'' grâce à la relation :

$$G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \exp(-i\phi) \quad (3.7)$$

Géométrie et appareil utilisé

Durant l'étude, nous utilisons une géométrie plan-plan de diamètre 60mm avec le rhéomètre CVOR 150 de Bohlin. L'écartement entre les deux plans de la géométrie a été fixé à $500\mu\text{m}$ puis $1000\mu\text{m}$.

Résultats

Viscosimétrie

Afin de caractériser les solutions de gel utilisées lors de notre étude, nous avons étudié l'évolution de leur viscosité en fonction de la contrainte appliquée. Nous avons étudié leurs réponses à contrainte croissante puis décroissante. Par ailleurs la viscosité dépendant de la température, nous avons mené l'étude rhéologique à la température ambiante du laboratoire : 22°C (cf. figure 3.14 et 3.15). L'écartement entre les deux plans de la géométrie était fixé à $500\mu\text{m}$.

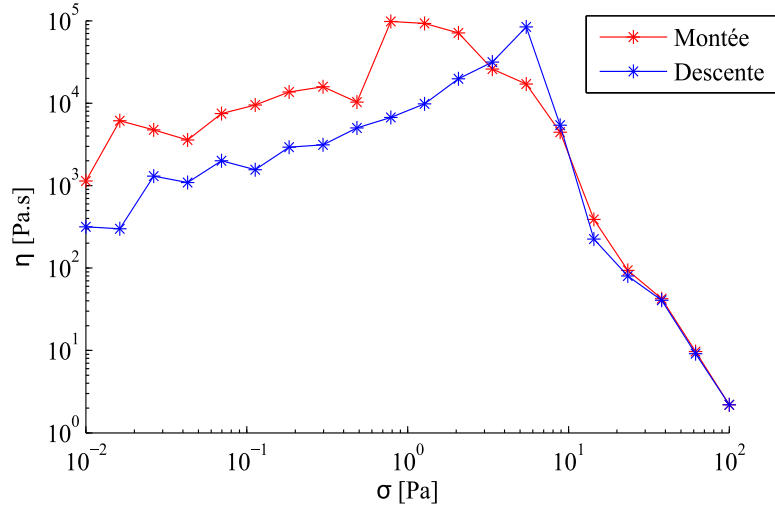


FIGURE 3.14: Étude de l'évolution de la viscosité, η , en fonction de la contrainte, σ , pour le gel à $C=40\%$ et une température de 22°C . Nous avons étudié sa réponse à contrainte croissante (rouge) puis décroissante (bleue). La viscosité dépendant de la température, nous avons mené l'étude rhéologique à la température ambiante du laboratoire : 22°C . L'écartement entre les deux plans de la géométrie était fixé à $500\mu\text{m}$.

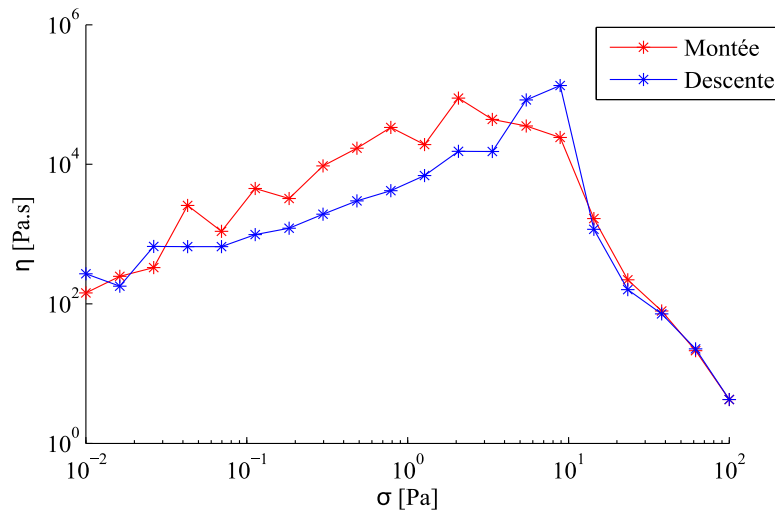


FIGURE 3.15: Étude de l'évolution de la viscosité, η , en fonction de la contrainte, σ , pour le gel à $C=45\%$ et une température de 22°C . Nous avons étudié sa réponse à contrainte croissante (rouge) puis décroissante (bleue). La viscosité dépendant de la température, nous avons mené l'étude rhéologique à la température ambiante du laboratoire : 22°C . L'écartement entre les deux plans de la géométrie était fixé à $500\mu\text{m}$.

On constate tout d'abord sur ces figures que les valeurs prises par la viscosité pour des valeurs croissante et décroissante de σ ne sont pas les mêmes. Ceci traduit le phénomène d'hystérèse inhérent aux gels. Par ailleurs, on constate qu'au fur et à mesure que σ augmente, la viscosité, η , diminue. Les gels utilisés sont donc rhéofluidifiants. Enfin la viscosité décroît fortement pour $\sigma = 10^{0.7}\text{Pa}$ pour $C=40\%$ et pour $\sigma = 10^{0.9}\text{Pa}$ pour $C=45\%$. Il apparaît ici le caractère de fluides à seuil des gels utilisés. En effet, aux vues de ces courbes, on peut dire qu'il existe une valeur σ_{seuil} au dessus de laquelle le gel est à l'état fluide et en dessous de laquelle le gel est à l'état solide. Nous avons pris comme définition du seuil la valeur de la contrainte où la viscosité est maximale lors du tracé à σ décroissante.

En plus des valeurs proches de σ_{seuil} , on constate que les valeurs de la viscosité aux différentes contraintes,

du gel à 40% et celles du gel à 45%, sont du même ordre de grandeurs. Ceci traduit une grande similitude entre les propriétés rhéologique des deux gels.

Les conditions aux limites entre le gel et la géométrie du rhéomètre étant capitales lors d'études rhéologiques, nous avons également tracé les courbes précédentes pour un écartement entre les pièces de $1000\mu\text{m}$ (courbes non présentées dans ce rapport). On constate que les courbes n'ont pas sensiblement changées. En effet les valeurs de seuil trouvées précédemment, $\sigma_{seuil} = 10^{0.7}\text{Pa}$ pour $C=40\%$ et pour $\sigma_{seuil} = 10^{0.9}\text{Pa}$ pour $C=45\%$, n'ont pas changé. On peut donc penser qu'au delà de la valeur σ_{seuil} , une rupture apparaît, à une certaine distance du rotor, au sein du matériau entre une partie du gel à l'état solide, avançant en bloc, et l'autre à l'état liquide. Puisque les valeurs de σ_{seuil} sont identiques entre $500\mu\text{m}$ et $1000\mu\text{m}$, on peut penser que la rupture a lieu dans les deux cas à la même distance du rotor (cf. figure 3.16). Au delà de σ_{seuil} , l'écoulement se produisant entre les deux pièces de la géométrie ne correspondant plus au modèle (cf. paragraphe 3.2) utilisé par le rhéomètre pour le calcul de la viscosité, on ne peut donc accorder aucune crédibilité aux valeurs de viscosité déterminée au delà de σ_{seuil} bien que σ_{seuil} et les valeurs de la viscosité avant ce seuil traduisent une réalité physique.

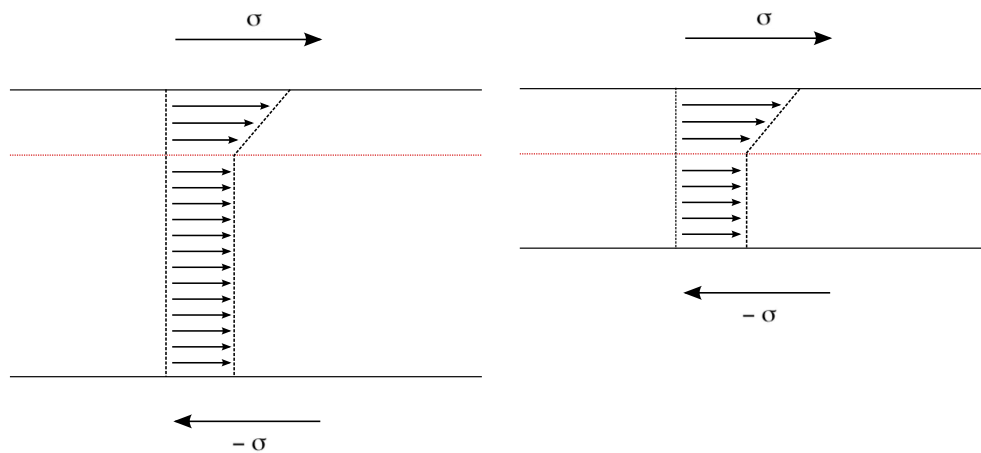


FIGURE 3.16: Schéma de principe : au delà de la valeur σ_{seuil} , une rupture apparaît, à une certaine distance du rotor, au sein du matériau entre une partie à l'état solide, avançant en bloc, et l'autre à l'état liquide. Puisque les valeurs de σ_{seuil} sont identiques entre $500\mu\text{m}$ (Droite) et $1000\mu\text{m}$ (Gauche), on peut penser que la rupture a lieu dans les deux cas à la même distance du rotor.

Excitation sinusoïdale

Afin de caractériser les solutions de gel utilisées lors de notre étude, nous avons étudié l'évolution de leurs modules élastique et de perte en fonction de l'amplitude de la contrainte à pulsation fixée. Nous avons étudié leurs réponses à amplitude de contrainte croissante puis décroissante. Par ailleurs G' et G'' dépendant de la température, nous avons mené l'étude rhéologique à la température ambiante du laboratoire : 22°C (cf. figure 3.17 et 3.18). L'écartement entre les deux plans de la géométrie était fixé à $500\mu\text{m}$ et la pulsation de l'excitation fixée à $2\pi\text{rad/s}$.

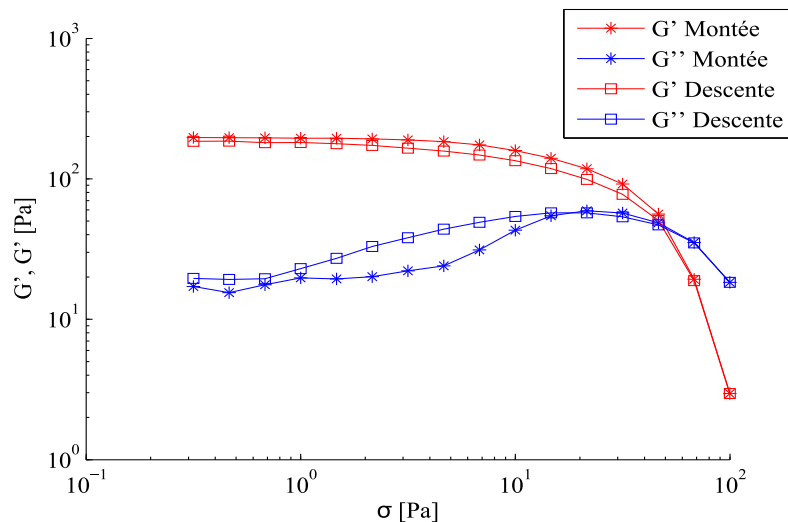


FIGURE 3.17: Étude de l'évolution de G' et G'' en fonction de l'amplitude de la contrainte à pulsation fixée, pour le gel à $C=40\%$ et une température de 22°C . Nous avons étudié sa réponse à amplitude de contrainte croissante (rouge) puis décroissante (bleue). G' et G'' dépendant de la température, nous avons mené l'étude rhéologique à la température ambiante du laboratoire : 22°C . L'écartement entre les deux plans de la géométrie était fixé à $500\mu\text{m}$ et la pulsation de l'excitation fixée à $2\pi\text{rad/s}$.

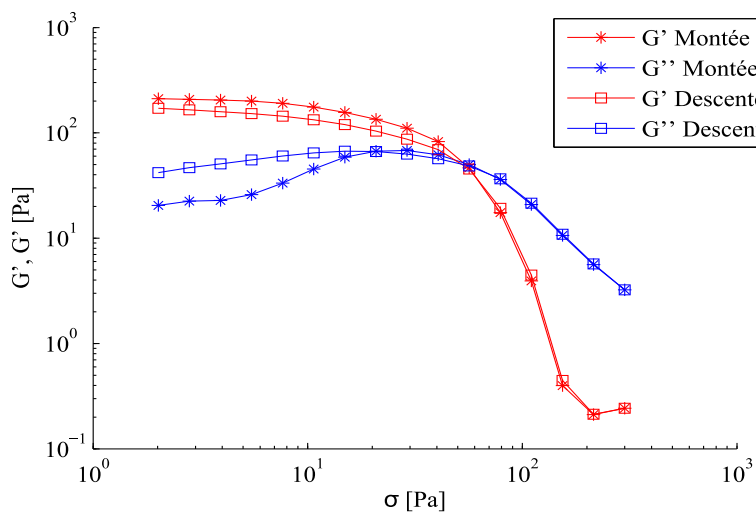


FIGURE 3.18: Étude de l'évolution de G' et G'' en fonction de l'amplitude de la contrainte à pulsation fixée, pour le gel à $C=45\%$ et une température de 22°C . Nous avons étudié sa réponse à amplitude de contrainte croissante (rouge) puis décroissante (bleue). G' et G'' dépendant de la température, nous avons mené l'étude rhéologique à la température ambiante du laboratoire : 22°C . L'écartement entre les deux plans de la géométrie était fixé à $500\mu\text{m}$ et la pulsation de l'excitation fixée à $2\pi\text{rad/s}$.

On constate tout d'abord sur ces deux courbes une différence entre les valeurs de G' et de G'' à amplitude de contrainte croissante et décroissante. Ceci est lié au phénomène d'hystérese inhérent aux gels. On note par ailleurs une grande similitude entre la figure 3.17 et la figure 3.18. En effet les valeurs de G' et de G'' à faible amplitude de contrainte ($\sigma \leq 10^1\text{Pa}$) sont du même ordre de grandeur (environ $10^{1.1}\text{Pa}$). De même les valeurs d'intersection de G' et de G'' sont du même ordre de grandeur sur les deux courbes (environ $10^{1.7}\text{Pa}$). Ceci traduit une grande similitude entre les propriétés rhéologique des deux gels.