



LICENCE SCIENCES DE LA MATIÈRE  
*École Normale Supérieure de Lyon*  
*Université Claude Bernard Lyon I*

PROJET EXPÉRIMENTAL  
Antoine SERANDOUR,  
Louhane JACOB  
M1 Physique

---

# Projet expérimental : Fracture d'une goutte d'eau gelée

---

**Résumé :** En partant de l'article *Frozen Impacted Drop : From Fragmentation to Hierarchical Crack Patterns* de Elisabeth Ghabache, Christophe Josserand, and Thomas Séon [1], nous nous sommes intéressés aux régimes de fracture d'une goutte gelée. Nous avons mis en évidence les régimes de fragmentation et hiérarchique présentés dans l'article, ainsi que d'autres régimes que nous avons appelés mixtes. Nous avons vérifié plusieurs conclusions du modèle de fracture présenté dans l'article, comme la pertinence du critère de Griffith ou la loi de puissance caractérisant le temps d'apparition de la première fracture en régime hiérarchique  $t_c \propto \Delta T^{-5}$ . Nous avons également interprété les régimes mixtes comme émanant des inhomogénéités d'épaisseur dans les gouttes gelées. Nous avons enfin proposé des pistes pour poursuivre l'analyse des régimes mixtes.

**Mots clefs :** *fracture, régime hiérarchique, régime de fragmentation*

Projet encadré par :

**Elsa Bayart**

[elsa.bayart@ens-lyon.fr](mailto:elsa.bayart@ens-lyon.fr)

du

**Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon**

équipe : Matière et Complexité

<http://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE/teams/matiere-complexite>



## Introduction

Lorsqu'une goutte d'eau tombe sur un substrat solide de température négative, la goutte d'eau gèle. Des contraintes naissent alors entre partie supérieure et partie inférieure de la goutte. En effet, la partie supérieure, en contact avec l'air, tend à se contracter en refroidissant. La partie inférieure, quant à elle, est fixée sur le support solide et ne peut se contracter. Si les contraintes sont assez importantes, la goutte gelée craque en quelques dizaines de millisecondes. En fonction de paramètres tels que l'épaisseur de la goutte après impact ou la température du substrat, deux régimes de fracture sont observés : un régime de fragmentation et un régime hiérarchique. Nous nous proposons d'étudier ces régimes.

Nous commencerons notre étude par une présentation du modèle théorique développé dans l'article [1] pour décrire la dynamique des fractures. Nous aborderons ensuite les objectifs de ce projet avant de présenter le dispositif expérimental et le protocole que nous avons mis en place. Pour finir, nous exposerons nos résultats, qui seront suivis d'une discussion.

## 1 Éléments théoriques

Nous présentons dans cette partie le modèle proposé dans l'article *Frozen Impacted Drop : From Fragmentation to Hierarchical Crack Patterns* de Elisabeth Ghabache, Christophe Josserand, and Thomas Séon [1].

Soit  $\Delta T = |T_f - T_s|$  avec  $T_f$  la température de fusion de la glace et  $T_s$  la température du substrat. Après impact sur le substrat, la goutte d'eau prend la forme d'un pancake et nous utiliserons donc ce terme dans la suite.

Quand  $\Delta T$  est faible, les contraintes ne sont pas assez importantes pour induire des fractures dans le pancake.

En revanche, quand la différence de température  $\Delta T$  augmente, on entre dans le régime de fragmentation [2]. Dans ce régime, le pancake est entièrement gelé lorsqu'il craque. Il se divise alors en un très grand nombre de domaines. Les fractures s'y propagent simultanément et radialement depuis un point de nucléation.

Enfin, quand la différence de température  $\Delta T$  est plus importante, on entre dans le régime hiérarchique [3]. Dans ce régime, le pancake est encore partiellement liquide lorsqu'il craque. Il se divise alors étape par étape en des domaines plus grands et moins nombreux que pour le précédent régime. Les fractures naissent successivement.

Ces différents régimes sont présentés par la figure 1.

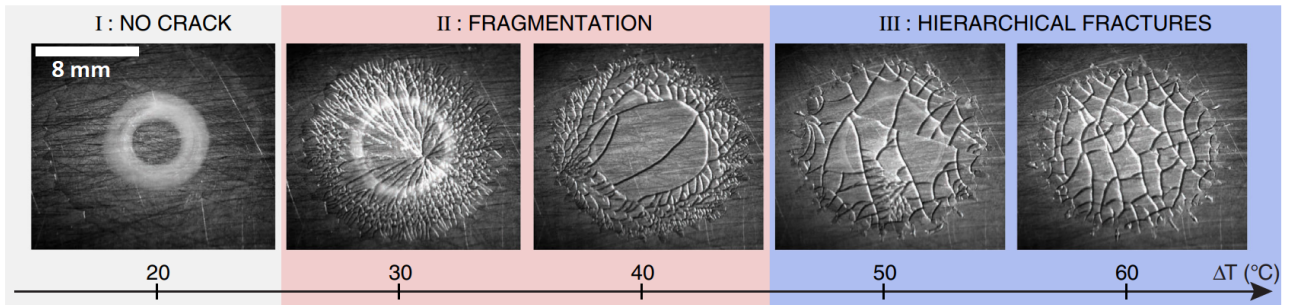


FIGURE 1: Frise présentant des photographies de pancakes congelés formés après l'impact d'une goutte d'eau lâchée d'une hauteur  $H = 360$  mm sur un substrat froid à différentes températures,  $\Delta T = 20.0^\circ\text{C}$ ,  $31.1^\circ\text{C}$ ,  $41.2^\circ\text{C}$ ,  $50.3^\circ\text{C}$  et  $59.6^\circ\text{C}$  de gauche à droite. Figure extraite de [1] dont on a modifié l'échelle.

Notons  $T_{I-II}$  la température de transition entre le régime sans fracture et le régime de fragmentation et  $T_{II-III}$  celle entre le régime de fragmentation et le régime hiérarchique.

Une fracture apparaît dans le pancake lorsque l'énergie nécessaire à la création d'une nouvelle interface est plus faible que l'énergie élastique de contraction thermique. On définit alors  $L_c$ , une longueur caractéristique dite longueur de Griffith [4], telle que si l'épaisseur de la couche de glace dépasse  $L_c$ , il est énergétiquement favorable pour le pancake de craquer. En égalant l'énergie élastique de contraction thermique d'un cube de volume  $L_c^3$  avec l'énergie nécessaire pour créer deux nouvelles interfaces de surface  $L_c^2$ , on trouve (voir détails dans l'article [1]) :

$$L_c = \frac{4G_c}{3E\alpha^2\Delta T^2} \quad , \quad (1)$$

avec  $G_c \sim 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$  l'énergie de fracture de la glace soit l'énergie par unité de surface liée à la création d'une nouvelle interface dans la glace,  $E = 9.33 \text{ GPa}$  le module d'Young de la glace et  $\alpha = 5.3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  le coefficient d'expansion thermique de la glace.

La température  $T_{I-II}$  de transition du régime sans fracture au régime de fragmentation est obtenue en supposant que les fractures apparaissent quand elles sont énergétiquement favorables par rapport à la contraction thermique. On trouve (voir détails dans l'article [1]) :

$$T_{I-II}^2 = \frac{8G_c}{3E\alpha^2 h_0} \quad , \quad (2)$$

où  $h_0$  est l'épaisseur du pancake. L'application numérique donne  $T_{I-II} \sim 22^\circ \text{C}$  avec  $h_0 = 220 \mu\text{m}$ , qui est l'épaisseur de pancake moyenne que nous avons obtenu expérimentalement.

Pour ce qui est de la température  $T_{II-III}$  de transition du régime de fragmentation au régime hiérarchique, le raisonnement énergétique est semblable en notant que le pancake n'est pas entièrement solide et qu'un gradient de température linéaire est présent [1]. On trouve que  $T_{II-III}$  peut s'exprimer en fonction de  $T_{I-II}$  ainsi :

$$T_{II-III} = \sqrt{3} T_{I-II}. \quad (3)$$

L'application numérique donne  $T_{II-III} \sim 37^\circ \text{C}$  quand  $h_0 = 220 \mu\text{m}$ .

De plus, ce modèle donne l'expression du temps caractéristique d'apparition de la première fracture dans le régime hiérarchique  $t_c$  :

$$t_c \propto \frac{8\rho L G_c^2}{9\lambda E^2 \alpha^4 \Delta T^5}, \quad (4)$$

avec  $\rho = 920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  la densité de la glace,  $L = 333.5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  la chaleur latente massique de la glace et  $\lambda = 2.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  la conductivité thermique de la glace.

## 2 Objectifs de notre étude expérimentale

Les objectifs de cette étude sont :

- retrouver les trois régimes présentés précédemment (pas de fracture, fragmentation, hiérarchique) ;
- comparer les températures de transition entre les régimes à celles du modèle et des résultats expérimentaux, tous deux présentés dans l'article [1] ;
- vérifier la pertinence de la longueur de Griffith  $L_c$  pour comprendre la présence de cracks dans un pancake ;
- vérifier la loi de puissance donnant le temps d'apparition de la première fracture en fonction de la température dans le régime hiérarchique :  $t_c \propto \Delta T^{-5}$  (cf équation 4).

### 3 Dispositif expérimental et protocole

#### 3.1 Montage expérimental

Le montage est illustré ci-contre. Il est constitué d'une plaque en acier de dimensions  $(10 \times 10 \times 2) \text{ cm}^3$  déposée sur un support élévateur. La plaque a été polie pour atteindre des rugosités de surface de  $275 \pm 34 \text{ } \mu\text{m}$ . Une seringue de diamètre 2 mm est placée au-dessus de la plaque et produit des gouttes de diamètre  $4.50 \pm 0.05 \text{ mm}$  avant impact (incertitude obtenue en pesant une dizaine de gouttes ainsi formées avec une balance de précision). La seringue est reliée par un tuyau flexible à une autre seringue à portée de main de l'expérimentateur pour plus d'ergonomie. Une règle graduée permet de mesurer la hauteur de chute  $H$ . Enfin, une caméra rapide Fastcam mini WX 50 filme la dynamique de fracture. Elle est placée sur un support et forme un angle  $\theta \leq 90^\circ$  avec la surface de la plaque. De plus, un éclairage LED éclaire la zone d'intérêt. L'azote liquide utilisé pour refroidir la plaque est placé dans un récipient en polystyrène. Des gants et des pinces en bois permettent de manipuler la plaque ainsi refroidie.

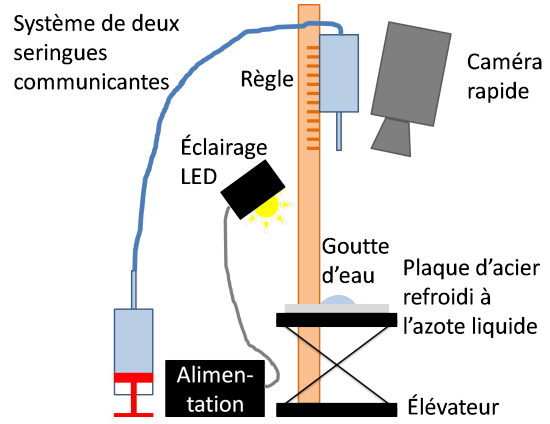


FIGURE 2 : Schéma du montage expérimental

#### 3.2 Protocole générique

Nous détaillons ici le protocole commun à toutes les expériences :

1. mettre en place le montage en fixant la seringue à la hauteur  $H$  voulue ;
2. régler les paramètres d'acquisition de la caméra (1000 images par seconde, résolution minimale de  $500 \times 500$  pixels sur la ROI) et faire la mise au point sur la surface de la plaque ;
3. tremper la plaque dans l'azote liquide jusqu'à descendre à environ  $-60^\circ\text{C}$  puis la placer sous la seringue ;
4. suivre la température de surface à l'aide d'un thermomètre de surface et, lorsque  $T_s$  a la valeur voulue, passer un chiffon pour enlever le givre, re-mesurer et noter la température  $T_s$  ;
5. lancer l'acquisition vidéo dans la foulée et faire tomber la goutte ;
6. déplacer la plaque en vue du prochain lâcher de goutte et refaire les étapes 4. et 5. pour une température plus élevée (la plaque se réchauffe à l'air libre).

### 4 Résultats

#### 4.1 Observation des régimes hiérarchique et de fragmentation

Nous observons bien un régime sans fracture, un régime de fragmentation et un régime hiérarchique, conformément aux observations expérimentales de l'article [1].

Dans le régime sans fracture (voir figure 2), nous observons simplement le pancake gelé. Ce régime est observé pour les  $\Delta T$  les plus faibles.

Nous obtenons également deux régimes de fracture. Tout d'abord, un régime de fragmentation (voir figure 3). Celui-ci est caractérisé par des fractures en arborescence et se propageant sur de longues distances. On observe ce régime pour les  $\Delta T$  intermédiaires. En général, le pancake craque lorsqu'il est

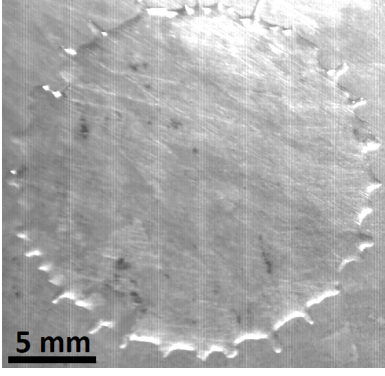


FIGURE 2: Photographie d'un régime sans fracture. La hauteur de la seringue est  $H = 390$  mm et la différence de température est  $\Delta T = 28.0$  °C.

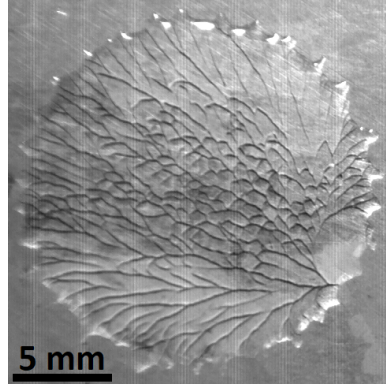


FIGURE 3: Photographie d'un régime de fragmentation. La hauteur de la seringue est  $H = 390$  mm et la différence de température est  $\Delta T = 31.4$  °C. On observe un motif de fracture en arborescence.

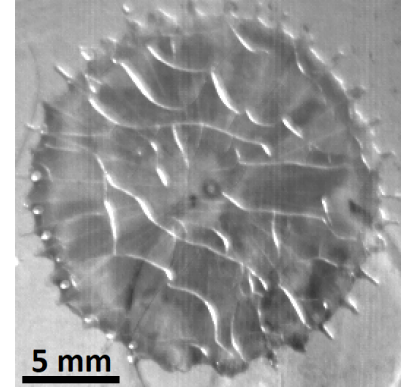


FIGURE 4: Photographie d'un régime hiérarchique. La hauteur de la seringue est  $H = 450$  mm et la différence de température est  $\Delta T = 41.3$  °C. On observe des fractures se joignant à angle droit.

entièrement gelé, après un temps entre 132 et 379 ms. Cela est en accord avec les temps observés dans l'article [1]. Nous observons également un régime hiérarchique caractérisé par des fractures se joignant à environ  $90^\circ$  (voir figure 4). Ce régime est observé pour les  $\Delta T$  les plus élevés. La fracture a lieu en cours de solidification après un temps plus court que pour le régime de fragmentation, entre 20 et 120 ms. Cela est en accord avec les temps observés dans l'article [1].

La mécanique de la dynamique des fractures montrent que si les contraintes sont homogènes à hauteur fixée dans le pancake, alors les fractures se propagent en accélérant (consulter [5]). Les fractures ne s'arrêtent donc que lorsqu'elles rencontrent le bord du pancake. En revanche, si les contraintes sont inhomogènes, les fractures se propagent tant que les contraintes sont suffisantes et s'arrêtent dès que cette condition n'est plus respectée. Les fractures sont donc plus courtes. De plus, elles apparaissent successivement à cause des inhomogénéités en contraintes puisqu'il faut attendre un chargement local suffisant pour craquer. Enfin, lorsque la vitesse de propagation d'une fracture atteint environ 40% de la vitesse des ondes de Rayleigh, cette fracture donne naissance à des fractures secondaires en arborescence. Ce phénomène est appelé branching [6].

Dans le régime de fragmentation, les fractures sont branchées et ne s'arrêtent qu'en rencontrant le bords du pancake. Elles se sont donc propagées en accélérant jusqu'à atteindre au moins 40% de la vitesse des ondes de Rayleigh. On en déduit que le chargement en contrainte est homogène à une hauteur donnée dans le pancake. Dans le régime hiérarchique, les fractures sont courtes et se connectent successivement. On en déduit que le chargement en contrainte est inhomogène.

À  $H$  fixé, le régime de fragmentation est observé pour des températures inférieures à celles du régime hiérarchique. La température  $T_s$  de la plaque d'acier est donc à l'origine des inhomogénéités de contraintes. En effet, plus le gradient de température au sein du pancake est élevé, plus les contraintes sont fortes et moins le pancake aura de temps pour homogénéiser les contraintes avant de craquer. Ainsi, dans le régime hiérarchique, le gradient est fort et donc le pancake craque avant même d'avoir entièrement gelé. Les contraintes sont donc inhomogènes pendant les fractures. En revanche, pour le régime de fragmentation, le faible gradient de température laisse le temps au pancake pour se solidifier entièrement et homogénéiser les contraintes en son sein.



## 4.2 Observation de régimes mixtes

Nous observons également des régimes pour lesquels le pancake craque à la fois en régime de fragmentation et en régime hiérarchique. Nous appellerons ces régimes des régimes mixtes. Nous en avons isolés trois.

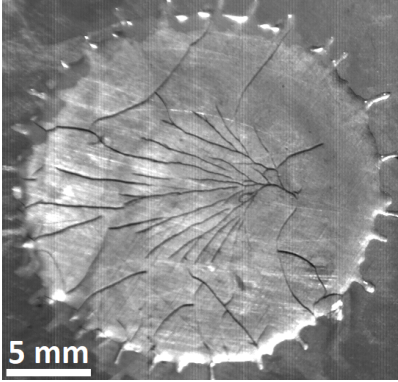


FIGURE 5: Photographie du premier régime mixte. La hauteur de la seringue est  $H = 390$  mm et la différence de température est  $\Delta T = 38.4^\circ\text{C}$ . La fracture de fragmentation est apparue en premier puis les fractures hiérarchiques ont rejoint progressivement le centre depuis la périphérie du pancake.

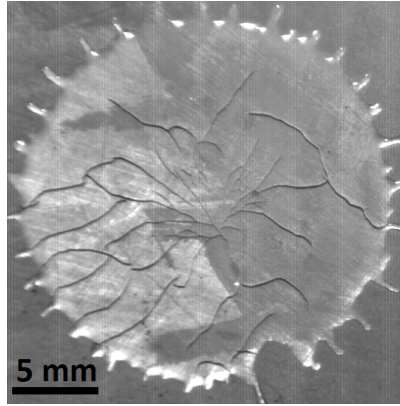


FIGURE 6: Photographie du deuxième régime mixte. La hauteur de la seringue est  $H = 390$  mm et la différence de température est  $\Delta T = 39.7^\circ\text{C}$ . La fracture de fragmentation s'est poursuivie sous forme de fractures hiérarchiques, elles-mêmes rejointes par d'autres fractures hiérarchiques provenant du bord du pancake.

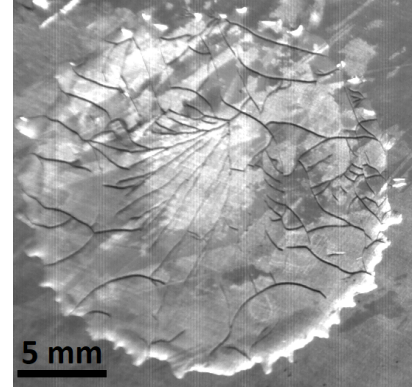


FIGURE 7: Photographie du troisième régime mixte. La hauteur de la seringue est  $H = 390$  mm et la différence de température est  $\Delta T = 40.2^\circ\text{C}$ . Les fractures hiérarchiques se propagent de la périphérie du pancake vers le centre, et une de ces fractures provoque une fragmentation au centre.

Le premier régime (fig 5) correspond à une fracture de fragmentation qui nucléée au centre de la goutte, puis des cracks hiérarchiques naissent en périphérie du pancake. Ces cracks hiérarchiques finissent par rejoindre la fracture centrale. On peut également observer une variante pour laquelle la fracture de fragmentation apparaît après la naissance des cracks hiérarchiques en périphérie.

Le deuxième régime l'on peut observer (cf fig 6) fait apparaître une fracture en fragmentation au centre dont les branches continuent leur propagation avec un comportement hiérarchique. Des fractures hiérarchiques partant de la périphérie du pancake rejoignent ensuite les cracks hiérarchiques provenant du centre.

Enfin, le troisième régime mixte observé (cf fig 7) correspond à des cracks hiérarchiques qui partent de la périphérie du pancake. L'un de ces cracks, une fois arrivé au centre du pancake, continue sa propagation sous la forme d'une fracture de fragmentation. Ce régime est à l'opposé du deuxième régime : un crack hiérarchique donne naissance à un crack de fragmentation.

Dans ces trois régimes mixtes, certaines zones fracturent en fragmentation et d'autres en régime hiérarchique. Cela suggère que la distribution de contrainte n'est pas la même dans tout le pancake. En effet, un crack de fragmentation se propage tant qu'il y a homogénéité de contrainte dans la zone de propagation (d'après ce qui a été dit pour la fragmentation en partie 4.1). Ces régimes mixtes indiquent donc que seule une partie du pancake est homogène en contraintes. Cette zone est, le plus souvent, au centre de la goutte. Pour comprendre la coexistence de zones homogènes et hétérogènes en contrainte au sein d'un pancake, nous avons tracé un diagramme de phase.

### 4.3 Diagramme de phase des régimes et étude de reproductibilité

L'analyse des différents régimes en fonction de la hauteur de chute  $H$  et de la différence de température  $\Delta T$  permet de tracer un diagramme des phases (cf fig 8).

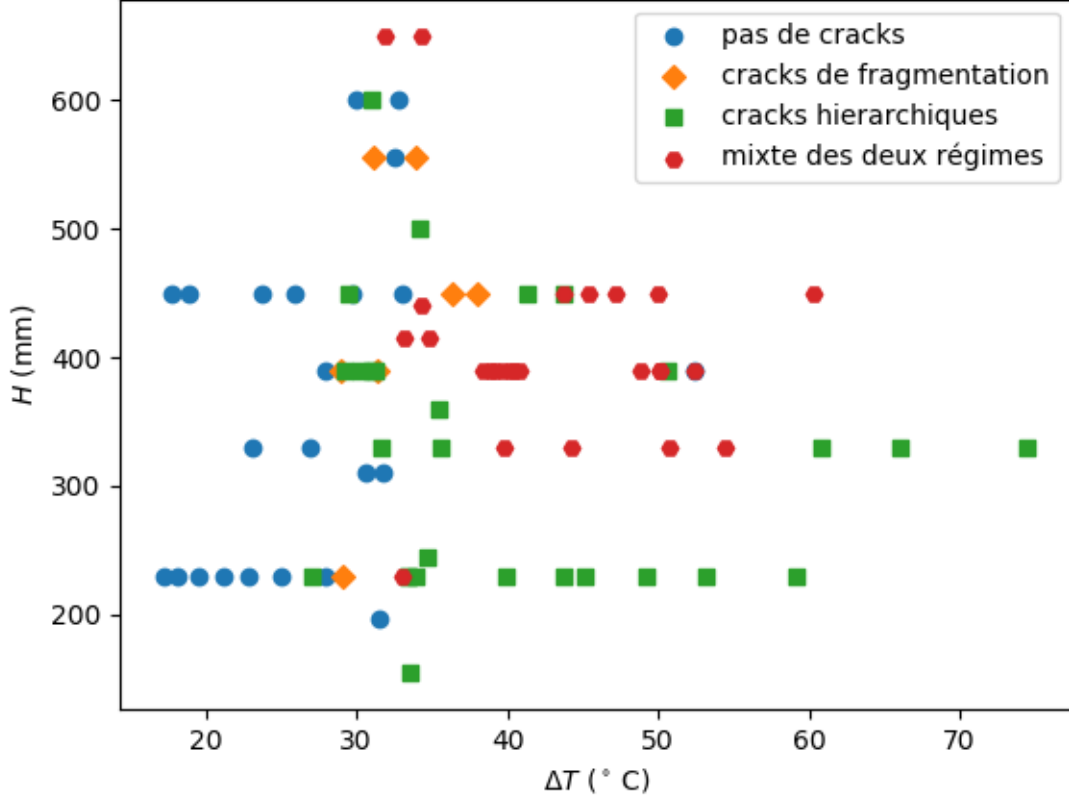


FIGURE 8: Diagramme des phases donnant le régime de fracture observé en fonction de la hauteur de chute  $H$  et de la différence de température  $\Delta T$ . Ce diagramme des phases fait apparaître un défaut de régimes de fragmentation.

Ce diagramme des phases permet d'observer l'absence de cracks pour de basses températures, conformément au modèle. Cependant, nous n'obtenons pas de frontière claire entre les régimes de fragmentation et hiérarchique. De plus, les régimes de fragmentation sont sous-représentés par rapport aux régimes hiérarchiques ou mixtes.

Pour expliquer le défaut de régimes de fragmentation, nous avons analysé la reproductibilité de nos lâchers de goutte. Pour cela, nous avons lâché plusieurs gouttes à  $H = 390$  mm et à température fixée autour de  $30$  °C, puis  $40$  °C et enfin  $50$  °C :

- $\Delta T \sim 30$  °C : on observe tous les régimes de fracture (fragmentation, hiérarchique et mixte).
- $\Delta T \sim 40$  °C : on observe des régimes mixtes uniquement.
- $\Delta T \sim 50$  °C : on observe également que des régimes mixtes.

Pour des températures inférieures à  $40$  °C, les résultats sont donc très sensibles au bruit. Cette plage de paramètres correspond aux pancakes qui devraient craquer en fragmentation (d'après le modèle présenté en partie 1). Or, nous avons supposé que la fragmentation était caractérisée par l'homogénéité des contraintes au sein du pancake. Notre expérience semble donc entraîner des défauts qui rompent cette homogénéité. Ces défauts pourraient provenir d'une inhomogénéité d'épaisseur du pancake. Ils sont donc à l'origine de la sous-représentation des régimes de fragmentation, qui sont remplacés par des régimes mixtes voire hiérarchiques quand les inhomogénéités de contraintes sont généralisées à l'ensemble du pancake. Pour des températures supérieures à  $40$  °C, les expériences sont reproductibles.

Nous sommes en effet sur la plage de paramètres du régime hiérarchique qui n'est pas perturbé par l'inhomogénéité d'épaisseur.

Nous comprenons maintenant les transitions entre les différents régimes de fracture. À  $H$  fixée, quand  $\Delta T$  augmente, le pancake passe d'un régime sans fracture à un régime de fracture. Ce régime peut être un régime de fragmentation, mais les défauts induits par notre expérience peuvent rendre ce régime mixte ou même hiérarchique. Enfin, pour des  $\Delta T$  assez grand, le fort gradient de température entraîne un régime hiérarchique. Ces transitions peuvent être observées dans le diagramme des phases (fig 8), particulièrement pour les hauteurs  $H = 230$  mm et  $H = 330$  mm. Pour  $H = 450$  mm, il semble que nous n'ayons pas atteint les  $\Delta T$  assez élevés pour observer le régime hiérarchique.

Ainsi, nous ne pouvons pas donner les températures de transition entre les régimes. Cela provient d'une part du manque de reproductibilité, et d'autre part de la présence de régimes mixtes qui impliquent une transition continue entre le régime de fragmentation et le régime hiérarchique.

#### 4.4 Caractérisation de la présence des fractures avec la longueur de Griffith

Le modèle présenté en partie 1 introduisait une longueur caractéristique, la longueur de Griffith  $L_c$ . D'après ce modèle, lorsque l'épaisseur de la glace atteint  $L_c$ , les contraintes sont suffisantes pour faire craquer le pancake. Dans cette partie, nous cherchons à vérifier cette affirmation.

La longueur de Griffith  $L_c$  en fonction des  $\Delta T$  expérimentaux a été calculée avec l'équation 1 du modèle. L'épaisseur du pancake  $h_0$ , quant à elle, a été déterminée à partir de nos expériences. Pour cela, nous avons mesuré le diamètre de chaque pancake sur imageJ avec l'outil ellipse. Nous avons tracé deux ellipses, une qui est la plus petite ellipse acceptable pour décrire le pancake et l'autre la plus grande. Puisque la caméra n'était pas exactement à  $\theta = 90^\circ$  avec la surface de la plaque, nous n'avons retenu que le grand axe de l'ellipse car c'est l'axe qui n'est pas affecté par l'inclinaison  $\theta$ . Le diamètre a donc été pris comme la moyenne des grands axes des deux ellipses (cf fig 10). D'autre part, nous avons pesé un dizaine de gouttes d'eau formées avec notre seringue. À partir du volume moyen d'une goutte  $V_{\text{goutte}}$  et du diamètre du pancake  $D$ , nous avons déduit son épaisseur  $h_0$  par conservation du volume :  $h_0 = \frac{4V_{\text{goutte}}}{\pi D^2}$ .

L'incertitude sur  $h_0$  prend en compte l'incertitude de répétabilité sur la masse des gouttes ainsi que l'incertitude de mesure du diamètre du pancake. Pour l'incertitude sur la mesure du diamètre du pancake, nous avons pris la différence des grands axes des deux ellipses divisée par deux.

On observe sur la figure 9 que le quotient  $L_c/h_0$  varie entre 0.06 et 0.8 donc l'épaisseur de pancake  $h_0$  est de l'ordre de la longueur de Griffith  $L_c$ . De plus, on observe qu'un quotient  $L_c/h_0$  supérieur à 0.3 correspond à un régime sans crack alors qu'un quotient inférieur 0.3 correspond à un régime avec cracks. La longueur de Griffith  $L_c$  semble donc être une longueur caractéristique pertinente pour notre étude, comme le proposait le modèle présenté en partie 1. En effet, le pancake craque quand il a emmagasiné assez d'énergie élastique, soit lorsque la couche de glace a pour épaisseur caractéristique  $L_c$ . Donc, plus le quotient  $L_c/h_0$  est élevé, plus  $L_c$  est grand devant  $h_0$  et moins les cracks seront favorables énergétiquement.

Par ailleurs, on observe une loi de puissance reliant  $L_c/h_0$  à  $\Delta T$  telle que :  $L_c/h_0 \propto \Delta T^{-2.06 \pm 0.09}$ . Ceci n'est pas étonnant puisque  $L_c$  est une grandeur du modèle variant en  $L_c \propto \Delta T^{-2}$  et nous avons vérifié expérimentalement que l'épaisseur du pancake  $h_0$  est constante à une hauteur de chute  $H$  fixée (cf fig 10).



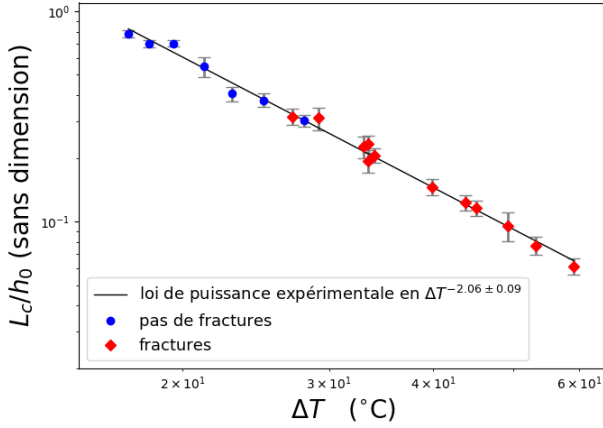


FIGURE 9: Quotient entre la longueur de Griffith définie par l'équation 1 et l'épaisseur du pancake  $L_c/h_0$  en fonction de la différence de température  $\Delta T$ . La hauteur de lâcher de goutte est  $H = 230$  mm. On observe une loi de puissance  $L_c/h_0 \propto \Delta T^{-2.06 \pm 0.09}$  dans un intervalle de confiance à 95 %, ce qui est cohérent avec le modèle qui prédit un exposant -2. Les barres d'incertitude prennent en compte l'incertitude sur le volume des gouttes et l'incertitude sur le diamètre du pancake.

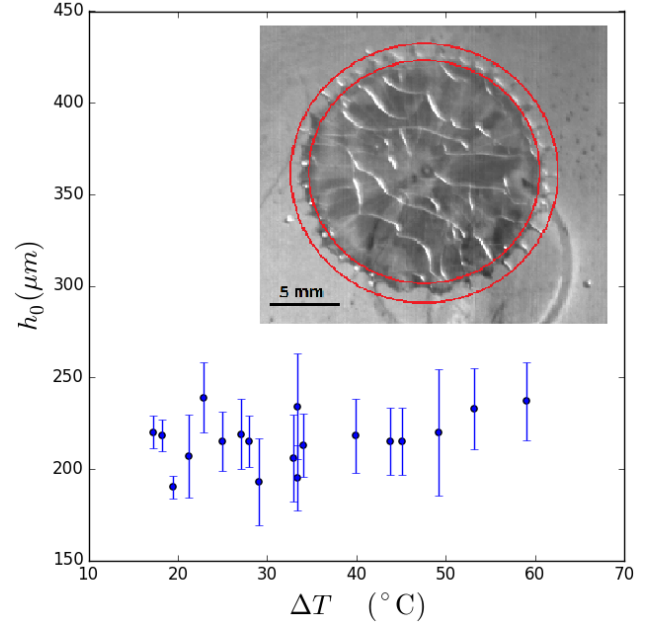


FIGURE 10: Épaisseur du pancake  $h_0$  en fonction de la différence de température  $\Delta T$ . La hauteur de lâcher de goutte est  $H = 230$  mm.  $h_0$  est constante, en cohérence avec les hypothèses du modèle. L'image illustre la procédure de mesure du diamètre des pancakes. Le diamètre  $D$  correspond à la moyenne entre les grands axes des deux ellipses.  $h_0$  est ensuite déterminée par conservation du volume :  $h_0 = \frac{4V_{\text{goutte}}}{\pi D^2}$ . Les barres d'incertitude prennent en compte l'incertitude sur le volume des gouttes et l'incertitude sur le diamètre du pancake.

#### 4.5 Temps d'apparition de la première fracture en régime hiérarchique

Le modèle présenté en section 1 permet de dériver une relation (cf équation 4) donnant le temps d'apparition du premier crack hiérarchique  $t_c$  en fonction de la différence de température  $\Delta T$  sous la forme d'une loi de puissance :  $t_c \propto \Delta T^{-5}$ . De notre côté, nous avons calculé le temps entre le moment où la goutte touche la plaque et le moment du premier crack hiérarchique en fonction de la température (cf fig 11).

En excluant les données à  $\Delta T < 40$  °C qui ne sont pas reproductibles (cf section 4.3), nous obtenons bien une loi de puissance comme prévue par le modèle. En traçant une droite en  $\Delta T^{-5}$ , on peut remarquer que cette droite passe raisonnablement par le nuage de points. Nos résultats sont donc en accord avec l'expression 4 du modèle.

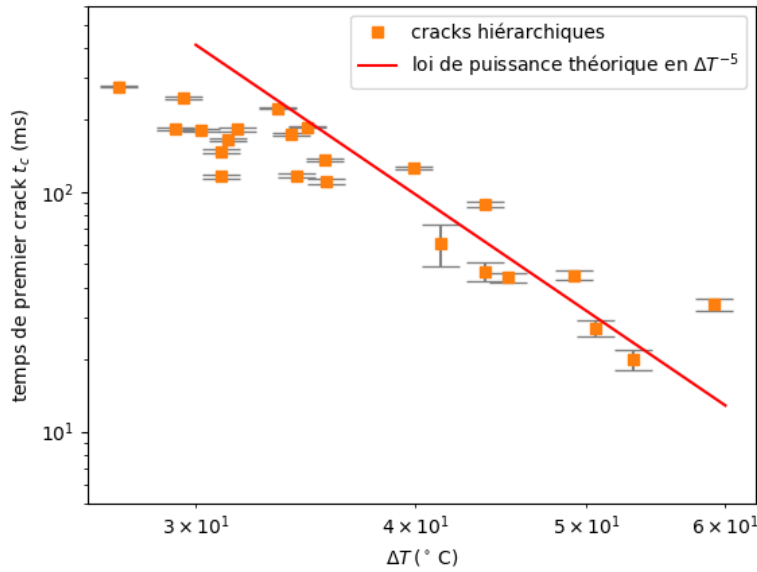


FIGURE 11: Temps d'apparition du premier crack dans le régime hiérarchique en fonction de la différence de température  $\Delta T$ . La loi de puissance en  $t_c \propto \Delta T^{-5}$  prévue par le modèle est bien vérifiée par nos données. Les incertitudes temporelles ont été déterminées en fonction de la fréquence d'image et de l'aisance à déterminer le temps de première fracture sur les séquences d'images.

## 5 Discussion

Précédemment, nous avons mis en évidence une faible reproductibilité de nos expériences que nous imputons à une inhomogénéité d'épaisseur du pancake. Cette inhomogénéité peut provenir de défauts sur la surface de la plaque. Pour commencer, comme l'atmosphère n'a pas été contrôlée, nous avons du givre sur la plaque. Nous l'enlevions avant chaque impact avec un chiffon. Cependant cette méthode ne permet pas de retirer tout le givre. De plus, notre mesure de température s'effectue par un thermomètre de surface que nous posons à l'endroit où la goutte tombe. Ce thermomètre peut déposer des gouttes d'eau à la surface de la plaque qui rompent l'homogénéité d'épaisseur. Enfin, la surface de la plaque possède des rugosités d'usinage de  $275 \pm 34 \mu\text{m}$  qui influent sur le profil d'épaisseur de la goutte.

D'autre part, nous avons des incertitudes très élevées sur la mesure de température. La température est mesurée avec un thermomètre de surface avant de faire chuter la goutte. Ainsi, la plaque se réchauffe entre la mesure de la température et la chute de la goutte. Si, pour des températures de l'ordre de  $30^\circ\text{C}$ , la différence de température est faible (de l'ordre de  $1^\circ\text{C}$ ), elle l'est davantage pour des différences de températures plus élevées. En effet, pour des températures de l'ordre de  $50^\circ\text{C}$ , la différence de température peut atteindre  $5^\circ\text{C}$ . Ces valeurs ont été déterminées en mesurant deux fois la température de surface espacé du temps nécessaire pour former une goutte avec la seringue.

Pour améliorer l'incertitude sur les températures, nous proposons de laisser la plaque dans le récipient où elle a été refroidie. Cela permet de ralentir grandement la diffusion thermique et donc d'allonger le temps de réchauffement de la plaque. Ainsi, la valeur de température mesurée par le thermomètre de surface varie peu entre la mesure et le lâcher de goutte. De plus, nous proposons de souffler un jet d'azote sur la plaque pour assécher l'air et empêcher la formation de givre. En ce qui concerne la plaque d'acier, il faudrait réduire la taille de ses rugosités.

Pour poursuivre notre étude, nous proposons d'étudier la transition entre les régimes de fragmentation et hiérarchique.

Nous proposons d'abord d'étudier les régimes mixtes. En effet, nous avons observé que les régimes mixtes sont des états de transition entre le régime de fragmentation à bas  $\Delta T$  et le régime hiérarchique à haut  $\Delta T$  à  $H$  fixé. Ainsi, en augmentant  $\Delta T$ , on s'attend à une diminution de l'aire des régions qui ont craqué en fragmentation. Le rapport entre cette aire et l'aire totale du pancake pourrait ainsi caractériser les régimes mixtes et donc la transition entre les régimes de fragmentation et hiérarchique.

De plus, nous proposons d'étudier l'influence de la hauteur de chute  $H$  sur la plage de température sur laquelle s'effectue la transition entre le régime de fragmentation et le régime hiérarchique. En effet,

nous pouvons observer sur les diagrammes de phase (cf fig 8) que l'étendue de cette plage de température varie en fonction de  $H$ . Pour des  $H \sim 200$  mm, la plage semble de l'ordre de quelques degrés, alors que pour des  $H$  de l'ordre de  $H \sim 330$  mm, on observe une plage qui s'étend sur une vingtaine de degrés. Enfin, pour une hauteur de l'ordre de  $H \sim 450$  mm, il semble que nous n'ayons pas encore atteint le régime purement hiérarchique. La plage de température pourrait donc être plus étendue que pour  $H \sim 330$  mm. Il semble donc que la plage de température de la transition s'étend d'autant plus que la hauteur de chute est importante. En effet, on peut supposer que plus la hauteur de chute est importante, plus la forme de la goutte après impact différera d'un pancake, et donc plus il y aura d'inhomogénéités d'épaisseur.

Enfin, pour quantifier les inhomogénéités d'épaisseur des pancakes en fonction de la hauteur de chute et la température, nous proposons d'étudier le profil des épaisseurs des pancakes au profilomètre. Pour cela, il faudrait cependant peindre la goutte pour rendre sa surface davantage réfléchissante. On s'attend à un profil d'épaisseur d'autant moins régulier que la hauteur de chute et la température augmentent.

## Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence trois régimes dans la dynamique de fracture des pancakes : pas de fractures, fractures en fragmentation et fractures hiérarchiques. À ces régimes s'ajoutent des régimes mixtes que l'on impute à la transition entre le régime de fragmentation et le régime hiérarchique. L'observation de ces régimes nous a permis de conclure sur l'homogénéité ou l'inhomogénéité en contrainte dans le pancake. Nous avons également pu valider certaines conclusions du modèle présenté dans l'article [1] comme la pertinence du critère de Griffith pour la nucléation de cracks et la loi d'apparition du premier crack dans le régime hiérarchique.

Ces résultats nous ont amené à considérer les régimes mixtes, qui ne sont pas décrits par le modèle. Nous pensons qu'une étude approfondie de ces régimes permettrait de caractériser la transition entre les régimes de fragmentation et hiérarchique, notamment en mesurant le profil d'épaisseurs des pancakes et en observant l'évolution de l'aire des zones de fracture en fragmentation. Pour cela, nous avons proposé des améliorations du montage pour réduire les sources de bruit. Il permettra d'analyser l'évolution des régimes mixtes en fonction de la hauteur de chute et de la température du substrat.

## Références

- [1] Elisabeth Ghabache, Christophe Josserand, and Thomas Séon. Frozen Impacted Drop : From Fragmentation to Hierarchical Crack Patterns. *Physical Review Letters*, 117(7) :074501, August 2016. Publisher : American Physical Society.
- [2] Nicolas Vandenberghe and Emmanuel Villiermaux. Geometry and fragmentation of soft brittle impacted bodies. *Soft Matter*, 9(34) :8162–8176, August 2013. Publisher : The Royal Society of Chemistry.
- [3] A. Groisman and E. Kaplan. An Experimental Study of Cracking Induced by Desiccation. *Europhysics Letters (EPL)*, 25(6) :415–420, February 1994. Publisher : IOP Publishing.
- [4] A. A. Griffith. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 221 :163–198, 1921.
- [5] L. B. Freund. *Dynamic Fracture Mechanics*. Cambridge Monographs on Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [6] K. Ravi-Chandar and W. G. Knauss. An experimental investigation into dynamic fracture : II. Microstructural aspects. *International Journal of Fracture*, 26(1) :65–80, September 1984.