

De la coalescence d'une goutte... à la dualité onde corpuscule...



TABLE DES MATIÈRES

I) Introduction

- Qui sommes nous ?
- Pourquoi ce sujet ?
- Le projet lutétium
- De la coalescence d'une goutte à la dualité onde particule

II) De la non-coalescence vers la dualité onde particule

1) Un principe physique de base : La coalescence

- Définition
- Expériences préliminaires

2) Principe de non coalescence

- Définition
- Preuves expérimentales
 - Tensioactif
 - Convection thermique
 - Ressaut hydraulique

III) Les manipulations du projet

1) Reproduction du projet lutétium

- Dispositif expérimental
- Instabilité de Faraday

2) Les liquides

- Les propriétés du silicone
- Propriétés d'autres liquides
- Calculs de viscosité
- Structure chimique

IV) Démonstration de la dualité onde corpuscule

Les marcheurs

Introduction

Qui sommes-nous ?

Nous sommes 2 élèves en classe de terminale S au lycée st Jacques à Hazebrouck (59). Les Olympiades de Physique nous ont toujours attirées. En effet nous avons toujours aimé la découverte de phénomènes physiques ainsi que la recherche. De plus notre lycée participe depuis une dizaine d'année aux olympiades c'était donc pour nous l'opportunité de monter un projet qui nous tient à cœur.

Pourquoi ce sujet ?

Nous recherchions un projet pour les Olympiades, et c'est par hasard qu'un jour nous sommes tombées sur une vidéo d'une goutte d'huile de silicone qui rebondissait indéfiniment sur un bain de cette même huile : le projet Lutétium. Cela nous a tout de suite intriguées. Nous avons donc décidé de tenter de comprendre ce phénomène.

De la coalescence d'une goutte à la dualité onde corpuscule...

Après de multiples recherches sur le sujet, nous avons trouvé une thèse sur le silicone sur le site archives-ouvertes.fr. Nous avons eu du mal à comprendre la documentation étant donné que nous ne connaissions pas le vocabulaire technique utilisé.

Intuitivement nous avons constaté que le phénomène des gouttes qui rebondissent indéfiniment était lié à une notion de notre programme de terminale S : la dualité onde particule aussi appelé la dualité onde corpuscule. Celle-ci correspond au fait que tous les objets de notre univers présentent des propriétés d'ondes et de particules.

En effet ondes et particules sont différentes et ne peuvent être dissociées. Pour notre projet cela signifie que l'onde n'existe pas sans la goutte et la goutte n'avance pas sans onde.

Nous nous sommes ainsi appuyées sur la thèse trouvée pour comprendre le phénomène ; ce qui nous a permis de pouvoir étendre notre réflexion, et de ne pas simplement chercher à expliquer la vidéo.

Nous nous sommes de cette manière demandées :

Quelles sont les caractéristiques d'un liquide qui lui permet de réaliser la dualité onde corpuscule ?

Pour mener à bout à notre projet nous nous sommes réunies quelques samedis matin, mercredis après-midi, durant nos heures de temps libre mais aussi tous les vendredis matin lors des heures d'accompagnement personnalisé afin de bénéficier des laboratoires dans lesquels nous avons pu effectuer nos expériences.

I) De la non-coalescence vers la dualité onde-corpuscule

1- Un principe physique de base : La coalescence

Définition

La coalescence est un principe physique par lequel deux substances identiques dispersées ont tendance à se réunir. Ce phénomène découvert et défini par Lord Rayleigh en 1899 touche particulièrement les fluides mais se rencontre aussi parfois chez les solides. Dans le cas de notre projet, nous exploiterons le phénomène sur des fluides. Elle se rencontre dans divers phénomènes, le plus courant étant la formation de gouttes de pluies.



gouttes

Le phénomène se produit donc à la surface d'un milieu (dense ou liquide). Il est associé à une énergie par unité de surface (en joules par mètres carrés). Cette énergie est liée à la force de cohésion entre molécules identiques. Dans notre projet il sera donc important de se référer à la définition d'une goutte pour y appliquer la coalescence :

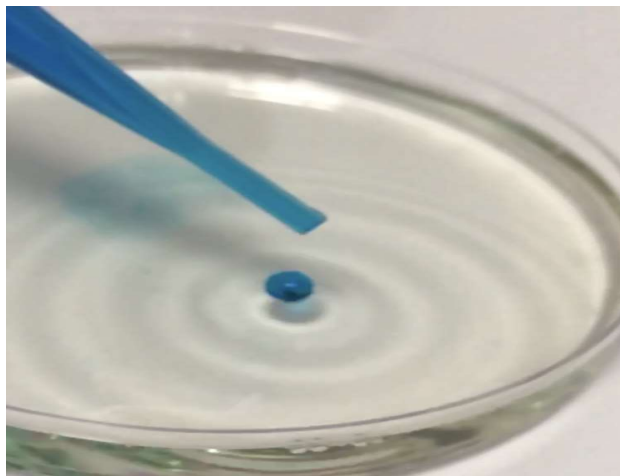
Goutte : (ici de liquide) faible quantité de matière de forme sphérique et de diamètre moyen de 1 mm. Sa forme sphérique est due à sa tension de surface.

Expérience préliminaire :

Nous avons mis en place une expérience préliminaire afin de prouver la coalescence d'un fluide (ici l'eau). Cette expérience nous montre bien que lorsqu'on dépose une goutte à la surface d'un bain du même liquide, la goutte fusionne avec lui.

On dispose d'une boîte de pétri remplie d'eau à température ambiante. On dépose à la surface de cette eau une goutte d'eau également à température ambiante (préalablement colorée à l'aide d'un colorant bleu pour rendre plus visible le phénomène).

On observe que la goutte bleue s'étale à la surface de l'eau en formant une onde qui se propage à cette surface.



Coalescence d'une goutte d'eau

Suite à nos recherches nous avons compris que lorsqu'une goutte arrive à la surface du bain, un film d'air existe entre la goutte même et l'interface du bain. Par le principe de coalescence, ce film est lentement évacué sur les côtés de la goutte. Après quoi le film est si fin que les forces attractives de Van der Waals* entrent en jeu. Les 2 surfaces (du bain et de la goutte) entrent donc en contact en un point. Ce contact crée une onde progressive à la surface du bain.

*Les interactions de Van Der Waals sont des interactions de nature électrostatique qui ont lieu entre les nuages électroniques. Cette force généralement attractive n'intervient qu'à très courte distance, elle est donc plus intense lorsque les molécules qui interagissent sont proches et volumineuses.



Onde de surface émise par la particule

2- Principe de non coalescence

Définition

La coalescence étant la réunion de 2 substances identiques dispersées ; la non coalescence est donc le fait que 2 substances identiques dispersées ne se réunissent pas. Nous supposons donc que pour empêcher un liquide de coalescer il faudrait empêcher l'évacuation du film d'air existant entre la goutte et le bain.

Suites à de nouvelles recherches et des expériences répétées, nous avons compris que la coalescence d'une goutte d'eau ne pouvait qu'être retardée et difficilement inhibée.

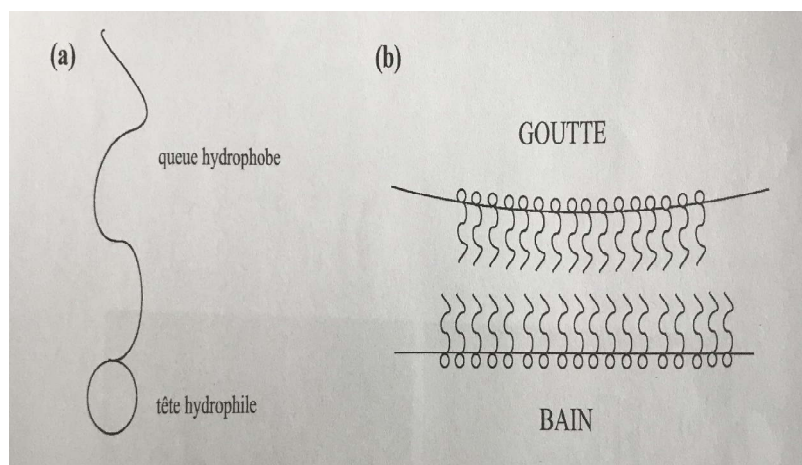
Nous avons réussi à retarder la coalescence d'une goutte d'eau dans 3 situations différentes que voici.

Preuve expérimentale

Situation 1 : Tensioactif

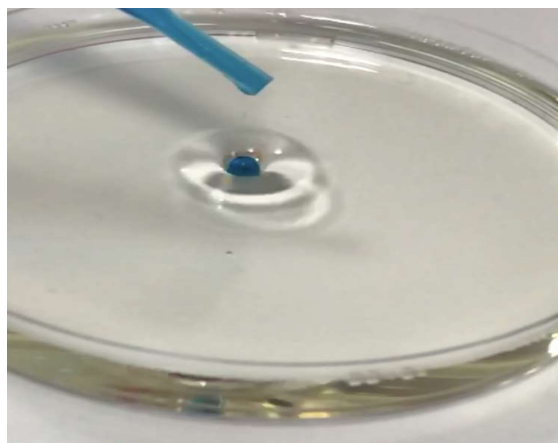
Nous reprenons les mêmes conditions que lors de l'expérience de coalescence à la différence que l'eau qui se trouve dans la boîte de pétri est mélangée à un tensioactif* (ici du savon).

*Un tensioactif ou agent de surface (surfactant en anglais) est un composé qui modifie la tension superficielle entre deux surfaces.



Principe du tensioactif

Les composés tensioactifs sont des molécules amphiphiles, c'est-à-dire qu'elles présentent deux parties de polarité différente, l'une lipophile (qui retient les matières grasses) est apolaire, l'autre hydrophile (miscible dans l'eau) est polaire. Ils permettent ainsi de solubiliser deux phases non miscibles, en interagissant avec l'une apolaire (c'est-à-dire lipophile donc hydrophobe), par sa partie hydrophobe ; tandis qu'avec l'autre phase qui est polaire, il interagira par sa partie hydrophile. Dans notre expérience il présente alors une résistance au flux d'air piégé. On constate ainsi que la goutte reste à la surface du bain quelques instants avant de fusionner avec celui-ci.



Non coalescence d'une goutte d'eau et de tensioactif

Situation 2 : convection thermique

L'expérience suivante s'appuie sur le principe de la convection thermique afin de ralentir la coalescence de la goutte.

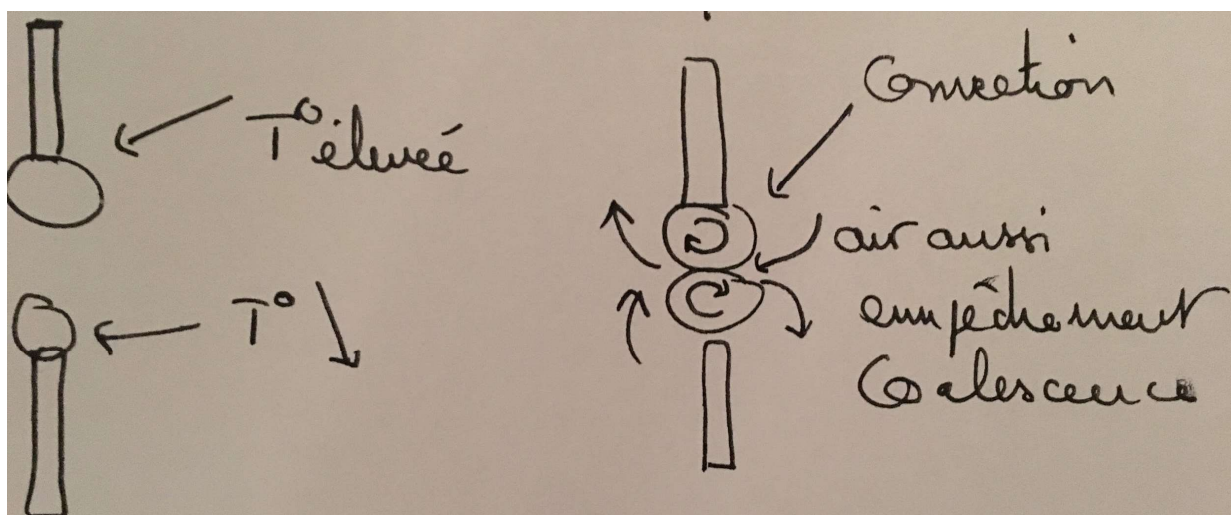


Illustration du principe de convection thermique

*La convection (thermique) désigne le transfert d'énergie thermique au sein d'un fluide en mouvement ou entre un fluide en mouvement et une paroi solide. Ici le transfert d'énergie est représenté par l'eau très chaude contenue dans la boîte de pétri mise au contact d'une goutte d'eau glacée (la convection aurait également lieu dans des conditions inverses).

Le transfert d'énergie entre les 2 fluides aux températures différentes permet de conserver pendant un court laps de temps le film d'air entre la goutte et l'interface.

Situation 3 : ressaut hydraulique

Nous avons enfin pu constater l'inhibition de la coalescence de la goutte dans un cas de figure que nous avons déjà tous pu rencontrer, le ressaut hydraulique.

Un jet d'eau frappe verticalement une surface horizontale. Il s'étale alors en une mince nappe circulaire de vitesse élevée. A partir d'une certaine distance au jet (qui dépend de la pression du jet) un ressaut hydraulique circulaire se forme : l'épaisseur de la nappe augmente brutalement et sa vitesse diminue.



Illustration d'un ressaut hydraulique.

Principe du

Lorsque l'on crée un ressaut hydraulique et que l'on dépose une goutte d'eau en amont du ressaut hydraulique, on observe dans un premier temps qu'elle est entraînée radicalement vers celui-ci.

Ensuite elle reste immobile devant le ressaut. La nappe de fluide qui passe en dessous de la goutte à grande vitesse entraîne un film d'air avec elle qui permet à la goutte de rester en suspension sur le fluide. Après un certain temps la goutte fini par coalescer avec le ressaut hydraulique. (L'énergie de celui-ci est trop forte pour que la goutte puisse résister ainsi que son film d'air).

Suite à ces expériences préliminaires nous constatons que le film d'air joue un rôle primordial dans la coalescence ou non coalescence d'un fluide.

II) Les manipulations du projet

1- Reproduction du projet lutétium

Dispositif expérimental :

Pour comprendre le phénomène des gouttes qui rebondissent indéfiniment, nous avons essayé de le reproduire avec de l'huile siliconée dans un premier temps mais nous avons remarqué par la suite que ce phénomène ne se produisait pas toujours. C'est pourquoi nous avons ensuite réalisé cette expérience avec de l'huile de silicone pure.

Première expérience :

- Pour cette 1^{ère} expérience nous nous sommes munies d'une cuve rectangulaire posée sur un haut-parleur relié à un générateur basse fréquence et un voltmètre.



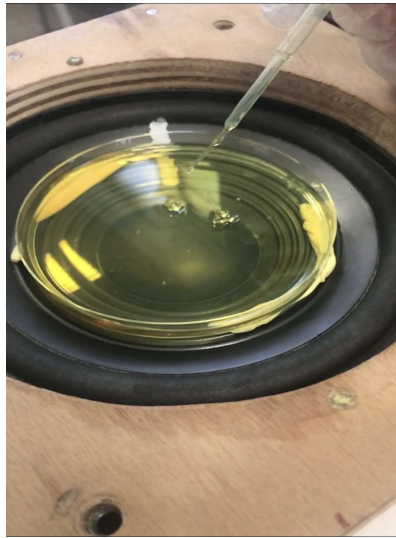
Dualité onde particule de l'huile de silicone, cuve rectangulaire

Nous avons fait varier la fréquence et l'amplitude on a pu remarquer qu'il fallait une certaine fréquence (ici 19 Hz) pour que la goutte rebondisse mais aussi une certaine amplitude (1,45 V). En effet, si l'amplitude ou la fréquence de l'onde étaient trop élevée ou faible la goutte coalesçait.

A partir d'une certaine fréquence (19 Hz), nous avons pu voir apparaître des ondulations de l'huile. Lorsque l'ondulation n'était pas trop rapide, la goutte pouvait rebondir seulement si on la posait dans un creux mais au bout d'un certain temps la goutte s'éliminait. En revanche si l'ondulation était trop rapide il n'y avait pas de rebondissement de gouttes.

De plus les grosses gouttes avaient plus de difficultés à rebondir que les petites.

- Nous avons donc choisi de réaliser cette expérience avec une boîte de pétri à la place de la cuve rectangulaire que nous avons posé sur un haut-parleur relié à un GBF.



Goutte d'huile siliconée, boîte de pétri

De même sorte que pour la cuve nous avons fait varier la fréquence et l'amplitude de telle sorte que la goutte puisse rebondir sur l'huile le plus longtemps possible. Soit avec une fréquence de 19 Hz et une amplitude de 0,66 V. De ce fait si la fréquence et l'amplitude de l'onde étaient trop faibles ou trop élevée la goutte coalesçait.

Contrairement à la cuve, l'huile dans la boîte de Pétri ne formait aucune ondulation mais la goutte rebondissait plus longtemps sur l'huile. On a également pu voir des déplacements de gouttes.

On a pu observer le même phénomène qu'avec la cuve : les grosses gouttes ont plus de difficultés à rebondir que les petites.

Grâce à cette expérience on a pu mettre en évidence le fait que la goutte rebondit pour une fréquence seuil où l'accélération fournie à la goutte est suffisante pour la faire rebondir selon la taille de la goutte.

Nos recherches nous ont permis de comprendre pourquoi les grosses gouttes coalesçaient plus vite que les petites.

En effet cela est dû au fait que les grosses gouttes ont un film d'air plus fin que les petites. Puisque le film d'air permet le rebondissement de la goutte, plus celui-ci est fin, plus la goutte a de chances de coalescer.

Instabilité de Faraday :

Lors de la réalisation de cette expérience (avec cuve rectangulaire ou boîte de pétri) nous avons pu constater qu'à partir d'une certaine fréquence des ondes visibles se propageaient à la surface du liquide.

Cette déformation de surface du fluide est appelée instabilité de Faraday.

Elle est définie comme instabilité hydrodynamique. Découverte en 1831 par Michael Faraday, cette instabilité est observée lorsque l'on fait vibrer verticalement un liquide avec une accélération suffisamment grande. Dans ces conditions, il est possible d'observer la déformation de la surface du fluide qui se réorganise en un réseau d'ondes.

Dans la cuve rectangulaire cette instabilité est manifestée par la formation de « creux » et « ventres » à la surface du liquide.



Creux et ventres à la surface du liquide, cuve rectangulaire

Dans la boîte de pétri l'instabilité est manifestée par des ondes qui déforment la surface du liquide.



Instabilité de Faraday dans une boîte de pétri avec l'huile de silicone

Nous avons donc cherché à relier l'instabilité de Faraday à l'amplitude de l'onde. Nous avons constaté que pour l'huile d'olive l'instabilité de Faraday était atteinte à une amplitude de 0.60V. Nous avons également réalisé l'expérience avec l'huile de silicone et l'huile de voiture. Seulement, nous constatons que l'instabilité se réalisait à partir d'une amplitude supérieure à 1V. Or dans nos conditions expérimentales il est impossible de conserver une amplitude supérieure à 1V puisque la boîte de pétri ainsi que la cuve ne sont pas assez profondes. Nous verrons par la suite que l'instabilité de Faraday est liée à la viscosité du liquide.

2- Les liquides

Les propriétés de l'huile de silicone :

L'huile de silicone est le liquide utilisé dans la vidéo comme dans la thèse pour montrer et expliquer le phénomène de la dualité onde particule.

Mais pourquoi cette huile et pas une autre ?

Nous nous sommes ainsi intéressées aux caractéristiques de cette huile afin de déterminer quelles particularités permettent à cette huile de mettre en évidence ce principe physique.

Les propriétés de l'huile de silicone (47V350) à une température de 25°C sont les suivantes :

- Aspect liquide, limpide, incolore
- Viscosité 350 mm²/s
- Densité : 0,970
- Congélation à -50°C
- Coefficient de dilatation entre 25 et 100°C : $9,45 \cdot 10^{-4}$
- Bonne stabilité thermique
- Faible variation de la viscosité avec la température
- Faible tension superficielle

Propriétés d'autres liquides :

Nous avons réalisé l'expérience avec différents liquides qui par intuition nous faisaient penser à l'huile de silicone. Nous avons alors choisi :

- l'huile de voiture
- l'huile d'olive
- le miel

- eau et surfactant (savon vaisselle)
- l'eau
- savon vaisselle
- huile isio4

Liquide/ conditions de non coalescence	Fréquence en Hz	Amplitude en V
Eau + surfactant	19	0.35
Eau	19	0,45
Huile d'olive	19	0,80
Huile de voiture	19	0,90
Huile isio 4	19	0,73
surfactant	coalescence	coalescence
Miel	coalescence	coalescence
Glycérol	coalescence	coalescence

On constate qu'une fréquence de 19 Hz est nécessaire à la réalisation de gouttes (petites et grosses) pour presque tous les liquides.

DÉTAILS DES EXPÉRIENCES SUR LE MIEL ET LE SURFACTANT:

Nous avons chauffé et refroidi le miel, le glycérol ainsi que le surfactant afin de trouver un rebondissement de la goutte, en vain. C'est pourquoi nous ne nous sommes plus intéressées à la non coalescence pour ces liquides. Néanmoins, nous reviendrons vers ces liquides pour comprendre les facteurs de la coalescence.

DIAMÈTRES DES GOUTTES:

- Petites gouttes: diamètre 3mm
- Grosses gouttes: diamètre 5mm

La viscosité :

Sachant que la viscosité est l'ensemble des phénomènes de résistance au mouvement d'un fluide nous nous sommes intéressées aux viscosités de nos liquides utilisés.

Suite aux constats précédents nous avons retenu des liquides (les liquides qui nous permettaient d'obtenir des gouttes qui rebondissent le plus longtemps, le mieux dans diverses conditions) qui nous ont permis de réaliser ces mesures.

Nous avons constaté que les variations de températures des différents liquides permettaient de faciliter le phénomène de non coalescence ou non.

Nous cherchons alors à déterminer les caractéristiques de ces liquides qui permettraient la non coalescence de la goutte créée grâce à savoir la viscosité et la densité en fonction de la température du liquide.

Huile de silicone :

Températures	5°C	15°C	20°C	30°C	50°C
Vitesse	$4,09 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$3,80 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$4,74 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$8,375 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$2,78 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
Masse volumique en g /ml		1,0026	0,9505	0,9191	0,881
Viscosité (Pa.s)		5059	223,3	196,7	91,5

Huile de voiture :

Températures	5°C	15°C	20°C	30°C	50°C
Vitesse	$2,89 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$4,31 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$5,48 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$8,55 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$0,023 \times 10^{-1} \text{ m/s}$
Masse volumique en g /ml	0,8306	0,795	0,785	0,77	0,950
Viscosité (Pa.s)	122	101,7	83,9	57,5	46

Huile d'olive :

Températures	5°C	15°C	20°C	30°C	50°C
Vitesse	$4,80 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$3,88 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$4,87 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$8,17 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$0,01 \text{ m/s}$
Masse volumique en g /mL		0,9058	0,9007	0,8575	0,8504
Viscosité (Pa.s)		51,9	43,9	37,4	32

Détails expérimentaux et calculatoires :

La rubrique vitesse de chacun des tableaux a été déterminée dans les conditions suivantes :

Les 3 liquides utilisés sont des huiles. Ainsi nous utilisons du permanganate de potassium non miscible avec l'huile. De cette manière nous pouvons calculer la vitesse à laquelle se déplace la goutte de permanganate dans chacune des huiles.

Nous avons formé une goutte de permanganate de potassium que nous déposons à la surface des liquides afin de déterminer le temps nécessaire à la goutte pour parcourir une certaine distance dans le liquide.

CARACTÉRISTIQUES DE LA GOUTTE DE PERMANGANATE:

- Densité: 1
- Rayon de la goutte: 1mm

Nous utiliserons cette donnée dans le calcul de viscosité de chacun de ces liquides.

Equation de viscosité d'un liquide :

$$\text{Viscosité} = \frac{2(p_s - p_i)(Ga)^2}{9v}$$

Dans cette équation nous savons que :

P_s= la densité de a goutte de permanganate en Kg/m³

Soit 1000kg /m³

P_i= la densité du liquide dont on cherche à déterminer la viscosité en Kg /m³

G= L'accélération fournie à la goutte de permanganate par la gravité.

Soit 9.81m/s²

a= le diamètre de la goutte de permanganate en m.

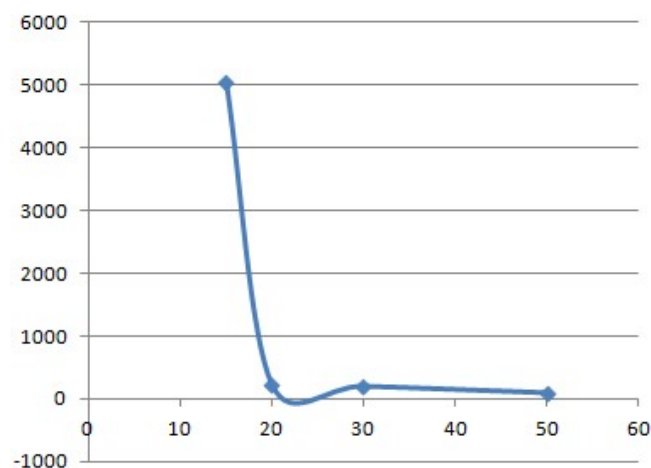
Soit 1x10⁻³

V= La vitesse de la goutte de permanganate dans le liquide en m/s

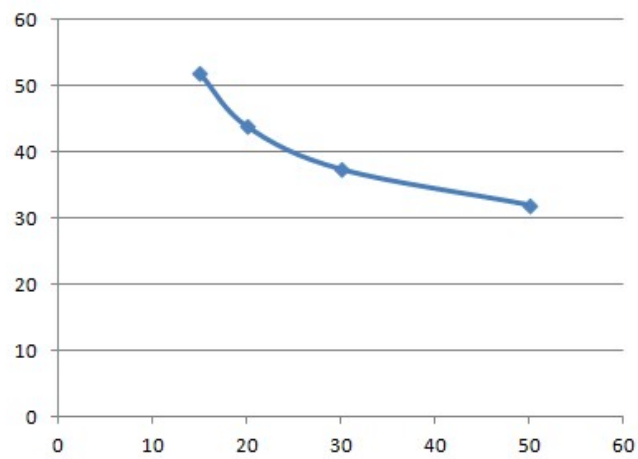
Suite aux calculs de viscosités nous constatons que celle-ci diminue quand la température augmente.

Nous avons fait les représentations graphiques suivantes pour illustrer le phénomène.

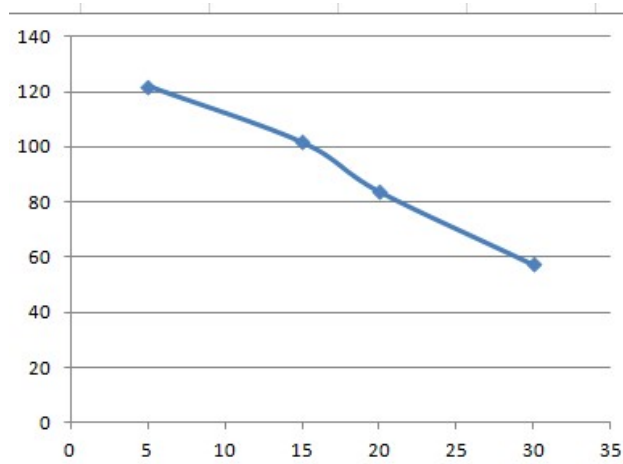
Viscosité de l'huile de silicone en fonction de sa température

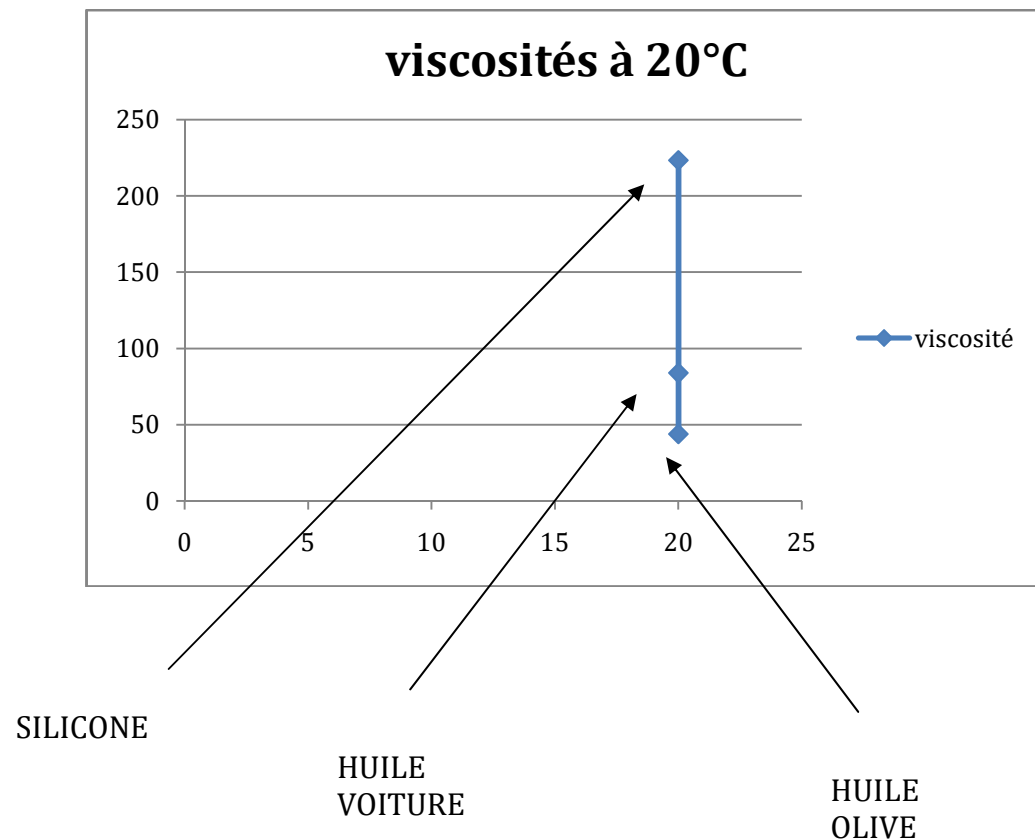


Viscosité de l'huile d'olive en fonction de sa température



Viscosité de l'huile de voiture en fonction de sa température





Nous avons choisi de réaliser ce graphique avec des viscosités à température ambiante car l'expérience de base est réalisée à température ambiante.

Après chaque changement de température on fait réaliser aux liquides la dualité nous constatons alors que l'instabilité de Faraday est reliée à la viscosité du liquide.

En effet, l'huile d'olive réalise l'instabilité pour une amplitude d'onde relativement basse étant donné que sa viscosité est faible.

Au contraire des huiles plus visqueuses telles que l'huile de silicone et l'huile olive nécessitent une amplitude supérieure à 1 volt pour réaliser cette instabilité.

III) Démonstration de la dualité onde particule

Les marcheurs

Les marcheurs peuvent être utilisés pour démontrer la dualité onde particule. En effet les marcheurs désignent les déplacements des gouttes sur la surface liquide. En ce sens les marcheurs sont la preuve de la dualité onde particule puisqu'en rebondissant la goutte crée une onde et c'est cette onde même qui lui permet de se déplacer.

Suite à nos expériences nous avons constaté que les gouttes se déplaçaient pour se rapprocher voir fusionner avec d'autres. Il est possible d'observer le phénomène mais il est difficile à maintenir en l'état car notre huile, si elle trop mise en vibration, déborde de la boîte de pétri. Il nous faut maintenant travailler avec un autre dispositif.

Conclusion :

Pour conclure, nous avons vu que les liquides qui permettaient de réaliser au mieux la dualité onde particule sont les liquides qui ont une structure chimique semblable à une huile.