



INSPE Académie de Limoges

Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation

Master MEEF Second degré

Professeur de Physique et de Chimie

2020–2021

Mesurer une molécule d'huile avec Benjamin Franklin, lord Rayleigh,
Agnes Pockels, Henri Devaux, Irving Langmuir, etc.

Rémi Metzdorff

Lycée Suzanne Valadon



Table des matières

Introduction	3
1 L'expérience historique et son interprétation	3
1.1 Benjamin Franklin (1706–1790)	3
1.2 Lord Rayleigh (1842–1919) et Agnes Pockels (1862–1935)	3
1.3 Henri Devaux (1862–1956)	5
1.4 Irving Langmuir (1881–1957)	5
2 Proposition d'activité en classe de seconde générale	7
2.1 Dans le programme	7
2.2 Objectif	7
2.3 Prérequis	8
2.4 L'activité	8
2.4.1 Déroulement de la séance	8
2.4.2 Matériel	9
2.4.3 Évaluations	9
2.4.4 Recherche biographique	11
2.5 Analyse a priori	11
2.6 Analyse a posteriori	12
Conclusion	13
Références	14
Annexes	15
A Sujet élève	15
B Aides	18
C Fiche de suivi des élèves pendant la séance	20

Introduction

Vers la fin du XVIII^{ème} siècle, Benjamin Franklin verse une petite cuillère d'huile dans un étang près de Londres. Il remarque que la tache d'huile s'étend rapidement à la surface jusqu'à recouvrir une bonne partie du plan d'eau. En divisant le volume d'huile renversé par la surface recouverte, on trouve l'épaisseur de la tache d'huile qui s'avère être de l'ordre du nanomètre, c'est à dire la taille d'une molécule d'huile. Mais ce n'est pas Franklin qui eu l'idée de ce calcul. Lui avait d'autres préoccupations à son époque.

L'expérience est belle : en mesurant deux quantités réellement macroscopiques, on accède à la taille caractéristique d'un des plus petits constituants de la matière. Il y a quelques années, elle était couramment reproduite à petite échelle au lycée et il existe de nombreuses ressources et activités sur le sujet. Par exemple, on peut trouver plusieurs articles du bulletin de l'union des physiciens (BUP) sur ce thème [Car92, Sch00, Bac02, Ser02]. L'expérience est toutefois plus subtile qu'il n'y paraît peut-être, ce qui explique à la fois son interprétation tardive et les difficultés rencontrées parfois pour la reproduire.

1 L'expérience historique et son interprétation

Le billet de blog de David Louapre [Lou12] constitue une bonne introduction au sujet. À sa lecture on se rend bien compte qu'attribuer tout le mérite de cette expérience à Benjamin Franklin est un peu exagéré. C'est grâce à un article du bulletin de l'union des physiciens [Bol01] que j'ai pu orienter mes recherches sur les différents auteurs ayant contribué à la compréhension de cette expérience et cibler les articles utiles.

1.1 Benjamin Franklin (1706–1790)

L'expérience est relatée par Benjamin Franklin lui-même dans une lettre adressée à William Brownrigg [Fra73] :

« At length being at Clapham where there is, on the common, a large pond, which I observed to be one day very rough with the wind, I fetched out a cruets of oil, and dropped a little of it on the water. I saw it spread itself with surprising swiftness upon the surface; [...] the oil, though not more than a tea spoonful, produced an instant calm over a space several yards square, which spread amazingly and extended itself gradually till it reached the lee side, making all that quarter of the pond, perhaps half an acre, as smooth as a looking-glass. ».

Le reste de la lettre montre que la préoccupation de Franklin n'est pas la mesure de la taille des molécules d'huile. Lui s'intéresse plutôt au calme produit par l'huile sur une surface d'eau agitée par le vent [Mer06].

1.2 Lord Rayleigh (1842–1919) et Agnes Pockels (1862–1935)

Il faut attendre la fin du XIX^{ème} siècle pour que Rayleigh reprenne le principe de cette expérience et en déduise l'épaisseur de la couche d'huile [Ray90]. Pour cet article, il mesure¹ la masse d'huile d'olive nécessaire pour stopper le mouvement de copeaux de camphre² à la surface d'une bassine

1. Avec une balance précise au vingtième de milligramme !

2. À cette époque, il semble que le camphre soit couramment utilisé comme indicateur de la valeur de la tension de surface de l'eau. Dans un autre article [Ray92], on peut lire que si la tension de surface d'une eau contaminée diminue en dessous de 0,72 fois celle d'une surface propre, le camphre ne bouge plus. Si on prend la valeur d'une interface eau-air à 20°C ($\gamma_{\text{eau-air}} = 72,8 \text{ mN/m}$), on trouve une valeur seuil de 52,4 mN/m appelée « camphor point ». La précision de cette valeur est remise en question plus tard par Rayleigh qui proposera [Ray99] 0,78 au lieu de 0,72 donnant un point camphre de 56,8 mN/m. C'est cette dernière valeur qui est retenue pour reproduire la figure 1.

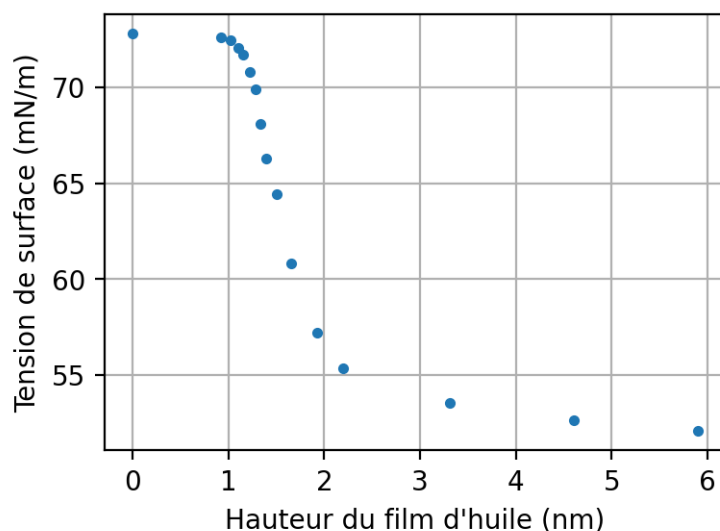


FIGURE 1 – Évolution de la tension de surface d'une interface eau-air contaminée par de l'huile de castor, en fonction de la hauteur du film d'huile calculée comme s'il était continu. On remarque que : la tension superficielle reste constante pour une épaisseur inférieure à 1 nm et quasi-constante au delà de 2 nm. D'après les données de [Ray99].

d'eau. D'après la masse volumique de l'huile, il calcule le volume d'huile déposé à la surface de l'eau et, connaissant la surface de la bassine, il calcule l'épaisseur de la couche d'huile nécessaire pour immobiliser le camphre et trouve une valeur de l'ordre du nanomètre :

« The thickness of oil required to take the life out of the camphor movements lies between one and two millionths of a millimetre, and may be estimated with some precision at 1.6 micro-millimetre. ».

Les expériences menées par Agnes Pockels [Poc91, Poc94] permettent d'améliorer ces mesures. Elle propose de diluer l'huile dans un solvant volatil (le benzène) pour en introduire une quantité très faible à la surface d'un récipient d'eau et met en place un dispositif expérimental permettant de faire varier la surface d'une interface eau-air contaminée.

En 1899, Rayleigh réitère donc son expérience à l'aide d'un nouveau dispositif inspiré de celui de Pockels :

« The water is contained in a trough modelled after that of Miss Pockels. It is of tin-plate, 70cm long, 10cm broad, and 2cm deep, and it is filled nearly to the brim. The partitions, by which the oil is confined, are made of strips of glass resting upon the edge of the trough in such a manner that their lower surfaces are wetted while the upper surfaces remain dry. »

Après avoir introduit une quantité mesurée d'huile diluée à la surface de ce dispositif, il peut donc faire varier la « densité »³ d'huile en modifiant l'aire de l'interface. Pour différentes valeurs de densité, il mesure la tension superficielle à l'aide d'une balance de Wilhelmy. Finalement on peut calculer la hauteur du film d'huile comme s'il était continu en comparant la quantité d'huile introduite et la surface disponible comme précédemment.

Avec les données de l'article, on peut tracer l'évolution de la tension superficielle d'une interface contaminée en fonction de la hauteur du film d'huile (Fig. 1).⁴ Dans ses conclusions, Rayleigh donne pour la première fois une interprétation moléculaire aux résultats obtenus :

« It is obvious therefore that the present phenomena lie entirely outside the scope of a theory

3. Pour reprendre les termes de l'article. Il serait peut-être plus judicieux de parler de concentration surfacique comme suggéré par les remarques de Pockels [Poc91].

4. Les valeurs exactes des tensions de surface et de l'épaisseur du film d'huile sont sujettes à caution. En particulier, elles sont différentes de celles de Freundlich [Fre09], qui devait avoir de très bonnes raisons de tracer la courbe comme il l'a fait, mais elles m'échappent.

such as Laplace's, in which matter is regarded as continuous, and that an explanation requires a direct consideration of molecules. »

et en déduit ainsi le diamètre d'une molécule d'huile en supposant la présence d'un film mono-moléculaire :

« [...] we conclude that the first drop in tension corresponds to a complete layer one molecule thick, and that the diameter of a molecule of oil is about 1 nm. »

1.3 Henri Devaux (1862–1956)

Au début du XX^{ème} siècle, Devaux s'intéresse aussi à ces expériences et mène ses propres mesures [Dev04]. Le raisonnement mené sur une expérience réalisée plus tardivement reste le même [Dev31] :

« On a ainsi la surface moyenne occupée par une lame. Cette surface était, dans les expériences faites le 18 avril 1912 de 363,71 cm². Or, cette surface d'huile a été produite par deux gouttes de la solution, c'est-à-dire par 400 × 10⁻⁷ cm³ d'huile. L'épaisseur de la lame était donc de :

$$e = \frac{V}{S} = \frac{400 \times 10^{-7}}{363,71} = 1,10 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

avec une approximation allant de 1,04 à 1,15 × 10⁻⁷ cm. On peut donc dire que la plus mince lame d'huile cohérente qui peut exister sur l'eau possède 1,1 millionième de millimètre. »

Il parvient ainsi à obtenir une valeur de la taille d'une molécule d'huile (l'oléine) de 1,1 nm, qu'il compare à la valeur théorique calculée sur la base des travaux de Nernst. L'accord est suffisamment bon pour que la présence de films mono-moléculaires soit confirmée.

Le protocole expérimental est différent [Mar14, Dev31] et peut également s'appliquer aux films solides. Pour l'huile, s'il l'utilise toujours diluée dans du benzène, la mesure de la surface occupée par l'huile est réalisée grâce à du talc saupoudré avant l'introduction de l'huile (Fig. 2) sur une interface eau-air nettoyée à l'aide de bandelettes de papier. C'est probablement cette expérience qui a inspiré les versions de l'expérience de Franklin réalisées en lycée.

1.4 Irving Langmuir (1881–1957)

Jusqu'alors, les raisons qui poussent l'huile à s'étendre à la surface de l'eau restent mystérieuses. C'est Langmuir qui propose une explication théorique [Lan17].⁵ En prenant l'exemple de l'acide oléique (Fig. 3), il explique l'extension du liquide à la surface de l'eau comme le résultat d'une affinité du groupement carboxyle avec l'eau (tête hydrophile) et d'une affinité des chaînes carbonées les unes avec les autres (queue hydrophobe) :

« [...] when oleic acid is placed on water, it is probable that the carboxyl groups do actually dissolve in water; that is, they combine with the water chemically (by secondary valence). The long hydrocarbon chains have too much attraction for each other, however, and too little for water, to be drawn into solution merely because of the affinity of the carboxyl for the water. [...] The spreading of an oil upon water is thus due to the presence of an "active group" in the molecule; that is, some group which has a marked affinity (secondary valence) for water. »

S'inspirant des travaux de Devaux et Marcellin, il mène ses propres expériences et pousse l'interprétation des résultats encore plus loin pour déterminer la forme des molécules à la surface de l'eau. Connaissant cette fois le nombre de molécules déposées à la surface de l'eau, il peut calculer la surface occupée par une seule molécule sur l'interface eau-air. Avec l'acide oléique, il trouve que la dimension latérale de la molécule est environ deux fois plus faible que sa hauteur, ce qui tend à confirmer ses hypothèses.

5. Son article est aussi une excellente revue des différentes contributions présentées jusqu'ici.

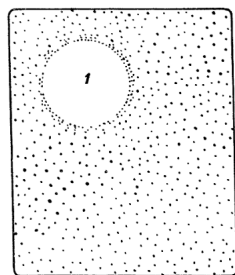


Fig. 8. — *L'extension de l'huile est limitée.* — Surface d'eau légèrement talquée comme dans la figure 7. On la touche en un point avec un fil de verre très fin portant une trace d'huile : un cercle très brusque se produit, à extension nettement limitée, entouré d'une bordure de talc serrée, tandis qu'au delà les grains de talc sont restés épars, sans aucun déplacement.

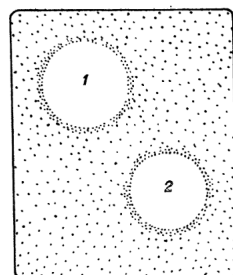


Fig. 9. — *Même surface portant la tache d'huile n° 1, en extension maxima.* Je touche cette surface en un autre endroit et j'obtiens un deuxième cercle très brusque. Le premier n'est pas modifié. Il n'y avait donc aucune impureté entre les deux.

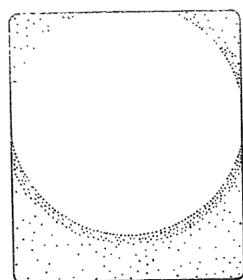


Fig. 11. — *Un grand cercle d'huile en extension maxima formé au milieu d'une surface d'eau très légèrement talquée.*

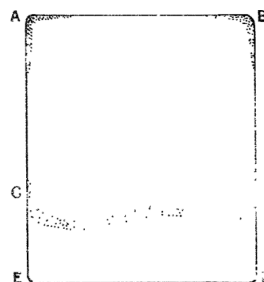


Fig. 12. — *En soufflant doucement le voile d'huile est rassemblé à un bout de la cuvette. Le talc est aussi rassemblé dans les deux coins A et B, et, en travers, selon une ligne irrégulière CD. En ECF, la surface d'eau est rigoureusement pure.*

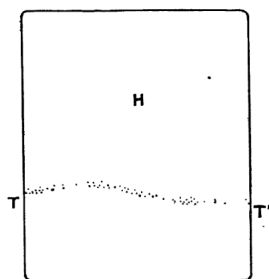


Fig. 14. — *Rassemblement de la lame d'huile.*

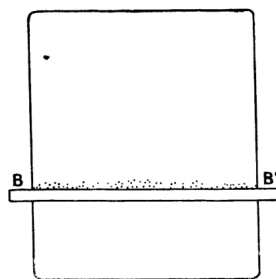


Fig. 15. — *Etablissement de la surface par une barrière mobile.*

FIGURE 2 – Figures issus de [Dev31] pour décrire les expériences de Devaux sur l'extension finie d'une quantité d'huile à la surface de l'eau et pour la mesure de la surface occupée par une quantité connue d'huile.

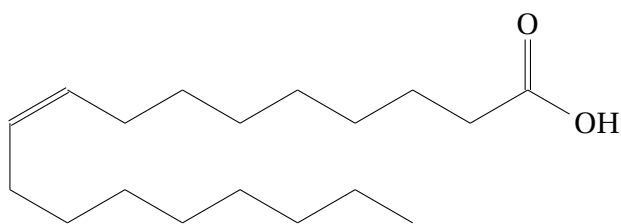


FIGURE 3 – Formule topologique de l'acide oléique, de formule brute $C_{18}H_{34}O_2$.

L'ensemble de ces travaux a ouvert la voie au procédé de déposition Langmuir-Blodgett qui permet encore actuellement d'obtenir des films mono ou multicouche de composés variés [Bio11].

2 Proposition d'activité en classe de seconde générale

La lecture des documents précédemment cités est très éclairante quant à la manière dont l'expérience était traitée et reproduite expérimentalement au lycée. L'activité présentée dans ce document est une tâche complexe, inspirée de l'expérience décrite dans la lettre de Benjamin Franklin [Fra73]. Il s'agit d'une approche documentaire, éventuellement mais pas nécessairement étayée par des mesures expérimentales pour déterminer certaines grandeurs non précisées dans le sujet. L'objectif n'est pas de reproduire l'expérience comme l'ont fait Rayleigh, Pockels, Devaux, Marcelin ou Langmuir. Cette séquence est divisée en deux temps :

- l'activité proprement dite où les élèves se confrontent au problème pendant toute la durée d'une séance de TP (1h30). Le sujet élève de l'activité est présenté en annexe de ce document (Annexe A) ;
- une conclusion en classe entière après que les élèves aient réalisé un travail biographique sur deux des principaux acteurs de cette expérience : Franklin et Rayleigh.

2.1 Dans le programme

Cette activité rentre dans le cadre de la première partie du thème « Constitution et transformations de la matière » et plus particulièrement au début de l'étude de la « Modélisation de la matière à l'échelle microscopique ». Voici l'extrait du programme concerné :

Du macroscopique au microscopique, de l'espèce chimique à l'entité.	Définir une espèce chimique comme une collection d'un nombre très élevé d'entités identiques.
Espèces moléculaires, espèces ioniques, électroneutralité de la matière au niveau macroscopique.	Exploiter l'électroneutralité de la matière pour associer des espèces ioniques et citer des formules de composés ioniques.
Entités chimiques : molécules, atomes, ions.	Utiliser le terme adapté parmi molécule, atome, anion et cation pour qualifier une entité chimique à partir d'une formule chimique donnée.

Le cheminement suggéré dans le programme est ici suivi à la lettre puisque cette expérience nécessite de décrire l'huile d'olive⁶ dans un premier temps comme une espèce chimique puis de s'intéresser aux entités chimiques qui la composent. On part d'un volume macroscopique d'une espèce pour en déduire la taille microscopique des entités correspondantes.

S'agissant d'une tâche complexe, l'ensemble des compétences de la démarche scientifique sont mobilisées. Toutefois, j'ai pris le parti d'en cibler certaines pour les évaluer lors de la séance car elles me paraissaient particulièrement mobilisées.

Enfin, cette activité est évidemment une occasion de suivre la recommandation générale du programme concernant la « mise en perspective des savoirs avec l'histoire des sciences ».

2.2 Objectif

En plus des éléments précédant, l'objectif de cette activité est d'ancrer l'ordre de grandeurs des entités microscopiques constituant la matière, idéalement en confrontant les élèves à leurs

6. Que l'on assimilera à de la trioléine, puisqu'il s'agit de l'espèce largement majoritaire dans l'huile d'olive.

conceptions initiales. Ceci rejoint à la capacité exigible du programme « Citer l'ordre de grandeur de la valeur de la taille d'un atome ».

2.3 Prérequis

Les élèves ont déjà été confrontés à des activités similaires notamment lors des séances de TP, où l'objectif est de répondre à une question plus ou moins ouverte. Ce n'est donc pas la première fois qu'ils doivent s'appuyer sur la méthode de résolution dont les étapes sont rappelées dans le sujet.

Dans le chapitre qui précède, les élèves ont revu les termes molécule et atome, les entités qui composent les espèces chimiques.

Pour pouvoir rapprocher l'épaisseur du film d'huile de la taille d'une molécule, les élèves doivent avoir une idée correcte de la taille d'un atome. Cette valeur a été donnée dans le cours précédant cette activité. Ils ont aussi fait un exercice consistant à estimer la taille du personnage de la vidéo [A boy and his atom](#) en comptant les « atomes » qui le composent. Par analogie, ils peuvent ainsi compter les atomes des chaînes carbonées de la trioléine pour émettre leur hypothèse.

La manipulation des puissances de dix ne doit pas être un obstacle majeur lors des applications numériques. Ceci a été revu également peu de temps avant l'activité.

Certaines capacités expérimentales sont également requises :

- mesurer un volume à l'aide d'une éprouvette ;
- mesurer des distances sur un schéma en s'aidant d'une échelle de longueur.

2.4 L'activité

2.4.1 Déroulement de la séance

Accueil (5')

- Accueil des élèves, désinfection des mains, placement imposé par trinôme (la composition des groupes est projetée au tableau), « Bonjour à tous, asseyez-vous. »
- Appel.
- Contextualisation :
« Rappelez vous le titre du chapitre 3, du macroscopique au microscopique : on part d'une description de la matière à notre échelle pour en venir à l'étude des particules qui composent la matière. Avec l'activité d'aujourd'hui c'est exactement le chemin que l'on va suivre : on va interpréter une expérience macroscopique, à notre échelle, pour déterminer la taille d'une molécule d'huile. On va essayer de répondre à la question : Quelle est la taille d'une molécule d'huile ? » (la question est écrite au tableau).

Présentation de la séance (2')

- « Tout le monde écoute, je vous donne les consignes générales. »
- Consignes :
 - Objectif : répondre à la question « Quelle est la taille d'une molécule d'huile ? »
 - « Vous rédigerez un compte-rendu chacun, j'en ramasserai un par groupe au hasard à la fin. »
 - « Servez-vous de l'aide à la rédaction du compte-rendu rappelée dans le sujet. La première étape sera comme d'habitude de donner votre hypothèse « Je pense qu'une molécule d'huile mesure ... car ... »
- « Est-ce qu'il y a des questions ? C'est bon pour tout le monde ?
Vous avez quinze minutes pour parcourir le sujet et formuler votre hypothèse. Appelez moi quand c'est fait.
Je vous distribue le sujet et c'est parti. »

Préparer la fiche de notation avec le nom des binômes.

Au bout de quinze minutes, vérifier les hypothèses, puis aide en fonction de chaque groupe.

Première aide

- Coup de pouce : Commencez par déterminer le volume d'une cuillère à café.
- Aide : Quelle verrerie peut-on utiliser pour mesurer un volume ?
- Aide : Mesure le volume d'une cac d'huile avec une éprouvette.
- Aide : Une cac fait 2 mL.

Deuxième aide

- Coup de pouce : Dessinez la tache d'huile en 3D puis formule du volume du cylindre.
- Aide : À quoi correspondent les différentes grandeurs dans la formule, lesquelles sont connues ?
- Aide : Mesure l'aire sur le schéma
- Aide : L'aire de la flaque est 2000m^2

Troisième aide

- Coup de pouce : Pourquoi la tache arrête-t-elle de s'étendre ?
- Aide : Ça vous semble normal de trouver un chiffre aussi petit ?
- Aide : Le professeur verse des haricots sur la table
- Aide : L'huile forme une couche haute comme une seule molécule

Nettoyage

Ramasser les compte-rendus

Fin de la séance

2.4.2 Matériel

Le matériel est à disposition des élèves mais pas directement sur leur paillasse :

- bécher 100mL ;
- éprouvettes graduées 10mL et plus ;
- balance ;
- cuillère à café ;
- entonnoir ;
- eau ;

2.4.3 Évaluations

Lors de la séance, l'évaluation est portée sur trois compétences en particulier : analyser-raisonner (ANA-RAI), réaliser (REA) et valider (VAL).⁷ Le niveau de maîtrise de ces compétences est graduée selon quatre niveaux identifiables d'après l'aide apportée lors de la séance : A (bien maîtrisée), B (maîtrisée), C (insuffisamment maîtrisée) et D (non maîtrisée) (Tab. 1).

Le compte-rendu est aussi évalué sur la base des compétences mobilisées (Tab. 2).

7. Puisque l'activité est une tâche complexe, d'autres compétences sont inévitablement mobilisées mais il est possible de les évaluer après la séance sur la base du compte-rendu rédigé par les élèves. Ce n'est pas sur celles-ci que l'accent est mis pour cette activité.

Compétence	Aptitude / Observable	Niveau
ANA-RAI	Élaborer un protocole qui répond à la question L'élève mesure le volume de 10 cac L'élève mesure le volume d'une cac Aide : Avec quelle verrerie peut-on mesurer un volume ? Aide : Mesure le volume d'une cac d'huile avec une éprouvette Aide : Une cac fait 5 mL	A+ A B C D
REA	Faire des observations utiles à l'activité L'élève réalise la mesure de l'aire sur le schéma Aide : Dans la formule, quelles sont les valeurs connues ? Aide : Mesure l'aire sur le schéma Aide : L'aire de la flaque est 2000m ²	A B C D
VAL	Avoir un regard critique sur ses résultats L'élève fait le lien avec son hypothèse Aide : Ça vous semble normal de trouver un chiffre aussi petit ? Aide : Le professeur verse des haricots sur la table Aide : L'huile forme une couche haute comme une seule molécule	A B C D

TABLE 1 – Observables utilisées pour l'évaluation du niveau de maîtrise des compétences travaillées lors de la séance. ANA-RAI : analyser-raisonner. REA : réaliser. VAL : valider.

Compétence	Aptitude
ANA-RAI	Faire une hypothèse, la justifier
REA	Réaliser un schéma correspondant à la manipulation réalisée Effectuer des procédures classiques (calculs, etc.)
VAL	Dire si mes résultats sont en accord avec ceux attendus Avoir un regard critique sur ses résultats
COM	Rendre compte de façon écrite ou orale

TABLE 2 – Compétences mobilisées et évaluées lors de la rédaction du compte-rendu. ANA-RAI : analyser-raisonner. REA : réaliser. VAL : valider. COM : communiquer.

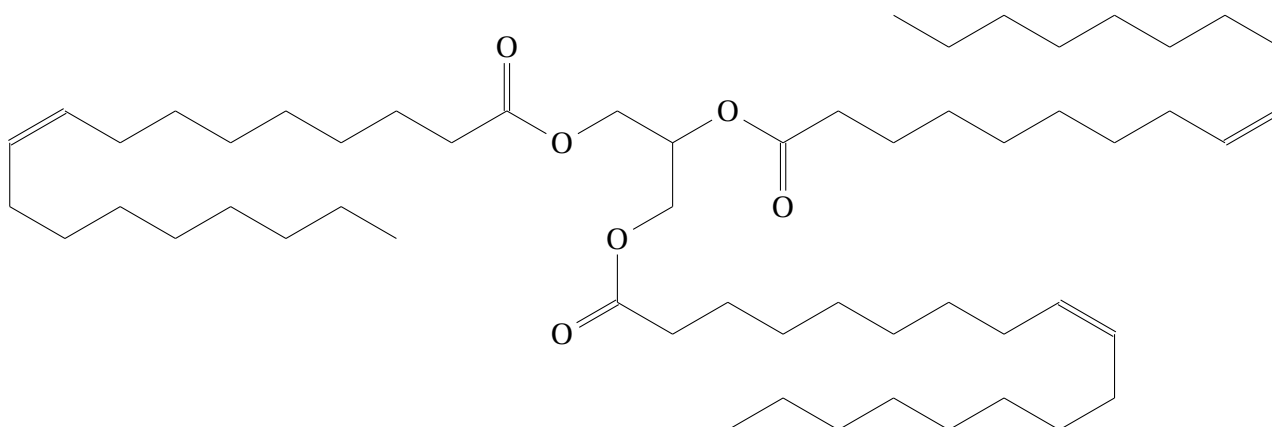


FIGURE 4 – Formule topologique de la trioléine, de formule brute C₅₇H₁₀₄O₆.

2.4.4 Recherche biographique

Après cette séance et avant le retour en classe entière pour conclure l'activité, un travail biographique est demandé aux élèves en ciblant deux des acteurs majeurs : Franklin et Rayleigh. De façon à orienter les recherches, ils doivent répondre à trois questions :

- Où et quand ont-ils vécu ?
- Qui étaient-ils ?
- Quels étaient leurs domaines de prédilection ?

De cette manière, il sera possible de remettre chaque personnage dans son contexte et se rendre compte que la compréhension de l'expérience historique relève d'un long processus.

2.5 Analyse a priori

La formulation de l'hypothèse concernant la taille d'une molécule d'huile peut être difficile car les élèves ne connaissent a priori pas l'allure de cette molécule, ni même la composition de l'huile. On peut alors montrer une molécule d'oléine (aide 5 en annexe B) sous la forme d'une aide ponctuelle apportée au besoin. La formule topologique de cette molécule (Fig. 4) permet de mieux mettre en valeur les chaînes carbonées qui donnent réellement sa taille à la molécule, mais cette représentation n'a jamais encore été utilisée par les élèves et ne sera abordée que plus tard. Pour faciliter la représentation dans l'espace de cette molécule, on peut construire un modèle moléculaire en se limitant par exemple à une molécule de glycérol et en indiquant qu'il ne s'agit que d'une partie de la trioléine (car il faudrait tout de même quelques boîtes pour reproduire entièrement la trioléine !). On pourrait aussi utiliser un modèle informatique et ainsi « manipuler » la molécule avec une application comme JSmol par exemple.⁸ La dimension d'un atome ayant été donnée en cours, on peut alors s'attendre à ce que l'élève compte les atomes qui composent la « molécule d'huile » pour estimer sa taille. Il se pourrait alors que la forme allongée de la molécule induise un questionnement sur la bonne dimension à prendre en compte. On peut différer la réponse à cette question en attendant de voir ce que donne les résultats des mesures et calculs et en reparler à la fin du TP en s'inspirant des calculs réalisés par Langmuir [Lan17] : « D'après vous, comment s'orientent les molécules à la surface de l'eau ? ».

Après la formulation de l'hypothèse, il est vraisemblable que les élèves soient déstabilisés par le sujet et ne sachent pas comment utiliser les documents pour avancer. On peut alors apporter une aide sous la forme d'un coup de pouce : « Déterminer le volume d'une petite cuillère ». Ici le choix du verbe *déterminer* me paraît plus judicieux que *mesurer* qui limiterait le choix des chemins de résolutions. On peut en effet s'attendre à ce que l'élève connaisse la valeur du volume d'une petite cuillère, ce qui relève plutôt de la compétence s'approprier et plus particulièrement de la capacité : évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. Ceci est d'autant plus probable que quelques semaines auparavant, les élèves ont fait un exercice leur demandant de relier différents volumes à la contenance de plusieurs récipients, dont une cuillère à café. Si la valeur est bonne et que l'élève termine l'activité trop rapidement, on peut toujours l'orienter sur la mesure du volume de la cuillère en l'encourageant à vérifier la valeur utilisée. Pour la mesure du volume de la cuillère à café, on peut s'attendre à deux méthodes : mesure « directe » à l'aide d'une éprouvette graduée ou mesure « indirecte » à l'aide d'une balance en passant par la masse volumique.⁹ Pour ne pas limiter les options des élèves, ils disposent de balances et d'éprouvettes graduées. Dans les deux cas, l'idée de mesurer le volume de plusieurs cuillerées pour diminuer les incertitudes de mesure pourra être valorisée.

Après avoir déterminé le volume de la petite cuillère, si le groupe est bloqué, il convient d'attirer rapidement l'attention des élèves sur la deuxième grandeur inconnue du sujet : la surface du film

8. La base de donnée <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> est très utile pour accéder à des modèles déjà réalisés.

9. La masse volumique a été traitée lors du premier chapitre de l'année.

d'huile. « Dans le sujet, on parle aussi d'une surface : déterminez la valeur de cette surface. » Le calcul de la surface du disque ne doit pas poser problème dans le deuxième cas : la formule est donc rappelée au besoin sans attendre (aide 3 en annexe B). Le schéma du document 2 peut induire un biais : l'étendue de la tache d'huile est simplement repérable par l'absence de vague et pas par sa couleur. L'épaisseur finale de l'ordre du nanomètre est beaucoup trop faible pour qu'on puisse la repérer optiquement.

Une fois les deux grandeurs déterminées, le lien entre les deux n'est pas forcément limpide. Les considérations dimensionnelles dépassent pour l'instant les élèves. Pour aider à faire ce lien, la formule donnant le volume du cylindre est donnée (aide 4 en annexe B). L'attention est portée sur les unités pour éviter de diviser des millilitres par des mètres carrés.

Finalement, le lien entre l'aspect réellement macroscopique de cette expérience et son interprétation microscopique est sans doute une des principales difficultés de cette activité. Si le lien entre espèce chimique et entité chimique présent dans les programmes a été abordé en cours, il reste flou pour les élèves et il est probable que cette transition gêne la conclusion de l'activité. Le dernier coup de pouce est apporté en ce sens, afin de pousser l'élève à s'interroger sur le résultat obtenu.

2.6 Analyse a posteriori

Cette séance a été réalisée à quatre reprises, ce qui a permis d'apporter différentes modifications à l'activité initialement proposée.

En raison notamment des contraintes sanitaires, l'activité était proposée initialement à des binômes libres. Avec des disparités de niveau importantes, certains groupes avancent plus lentement que d'autres et rares sont ceux qui arrivent à la conclusion de l'activité. Pour remédier à cela, la dernière séance a été faite avec des trinômes imposés, en tachant de répartir les élèves de manière à obtenir des groupes de niveau plus homogène. Dans cette configuration, tous les groupes sont parvenus à la conclusion, au moins pour ce qui est du compte-rendu. Le suivi de la séance est aussi plus facile mais l'individualisation des évaluations est presque impossible puisque les contributions de chacun sont attribuées au groupe. Les échanges entre les élèves d'un même groupe semblent toutefois très profitables.

Pour la majorité des groupes, l'hypothèse formulée donne le bon ordre de grandeur pour la taille d'une molécule d'huile. Pour un groupe en particulier, la notion de molécule semble particulièrement déconnectée de l'espèce chimique (« l'huile ») : pour eux les petites gouttes d'huile qui tombent lorsqu'on laisse couler doucement l'huile sont des molécules. Certains groupes confondent molécule et cellule. Pour d'autres encore, la différence entre atome et molécule n'est pas claire. Pour ces derniers, la question « De quoi sont formées les molécules ? » a généralement suffi pour qu'ils se corrigent eux-même. En utilisant la représentation de la trioléine, plusieurs groupes comptent tous les atomes composants la molécule ce qui aboutit à une estimation un peu haute de la taille de la molécule : $167 \times 0,1 \text{ nm} = 16,7 \text{ nm}$. Certains rapprochent la taille d'une molécule au volume donné comme aide à la conversion : « La taille d'une molécule d'huile est 1 mL. ». Il faudrait peut-être modifier la question du sujet pour « Quelle est la *longueur* d'une molécule d'huile ? » afin d'éviter cela.

Après avoir émis leur hypothèse, quelques groupes (~ 15%) décident eux-même de mesurer l'aire du film d'huile en s'aidant du schéma. Initialement, l'aide « Déterminer le volume d'une petite cuillère » était proposée collectivement. Pour les groupes mentionnés avant, cette aide n'a aucun sens à ce stade, ce qui justifie d'apporter cette aide ponctuellement. La majorité des groupes a cependant besoin du coup de pouce pour avancer dans l'activité. Environ 30% des élèves sont capables de retrouver la valeur de la contenance d'une petite cuillère sans avoir besoin de faire la mesure. Pour les autres, la mesure du volume de la cuillère ne pose pas de problème particulier. Sans doute habitués à avoir sur leur paillasse le matériel nécessaire, certains groupes prennent tout le matériel à leur disposition avant de voir ce dont ils ont réellement besoin pour leur mesure. La

plupart des groupes optent finalement pour une éprouvette graduée.

Lors de la première séance, le deuxième coup de pouce était apporté simplement en distribuant l'aide 4 (Annexe B) donnant le volume du cylindre. La plupart des élèves sont alors embrouillés par cette aide qui ne semble avoir aucun rapport avec le sujet. Pour les aider à faire le lien lors des séances suivantes, les élèves sont d'abord invités à représenter l'allure de la flaque d'huile en trois dimensions, en perspective. Il est alors bien plus clair que le cylindre représente le film d'huile. Souvent à ce stade, les élèves n'ont déterminé que le volume d'huile versé dans l'étang et doivent encore trouver la surface. Mais dans la formule, il y a aussi e et c'est une longueur qui est affichée sur la vue aérienne de l'étang. La détermination de la taille de la tache ou de celle de l'étang est parfois difficile : plusieurs fois l'utilisation de l'étalon de longueur n'est pas immédiate. Elle devient évidente pour eux quand le problème est posé sous la forme d'un produit en croix. En cela, les critères choisis pour l'évaluation de la compétence réaliser lors de la séance me semblent mal gradués et ne rendent pas compte des difficultés réelles des élèves. Plusieurs groupes ne mesurent pas directement la taille de la tache d'huile mais plutôt celle de l'étang et se reposent sur le texte qui dit que l'huile recouvre un quart de l'étang ce qui paraît effectivement plus simple mais que je n'avais pas envisagé initialement.

Avec l'aide 4 (Annexe B), environ 40% des élèves parviennent à trouver la bonne valeur pour l'épaisseur du film d'huile. En revanche un seul élève énonce clairement que l'épaisseur limite du film est dû à la taille des molécules d'huile et que l'épaisseur du film correspond donc à la taille de ces molécules. Pour les autres, la réponse à la question est simplement donnée comme le résultat du calcul effectué mais sans que les discussions ou les commentaires dans le compte-rendu ne permettent d'affirmer que le lien est établi. En classe entière, le retour sur cette conclusion n'a semblé perturber personne.

Lors des recherches biographiques demandées aux élèves, il aurait été intéressant de parler davantage d'Agnes Pockels, notamment pour aborder les questions de diversité dans le monde scientifique. Cependant, sa contribution à l'expérience, bien qu'essentielle, m'a semblé difficile à expliquer sans rentrer dans les détails de la manipulation réalisée, loin de la simplicité de l'expérience de Benjamin Franklin.

Conclusion

L'activité proposée dans ce rapport est finalement assez longue à réaliser et le bénéfice à long terme est difficile à juger pour le moment. Il sera intéressant d'interroger à nouveau les élèves dans quelques temps afin d'évaluer ce qu'il reste de cette activité et voir si l'objectif d'ancrer une valeur raisonnable de la taille d'un atome ou d'une molécule est rempli.

L'expérience permettant de réaliser et mesurer l'épaisseur de films mono-moléculaire est finalement assez subtile, à la fois dans sa reproduction et dans son interprétation. Le matériel et les méthodes employés sont toutefois plutôt abordables et il semble possible d'élaborer un protocole rigoureux, en s'inspirant notamment des travaux de Devaux. À suivre ???

Références

- [Bac02] Bacciochini, J.-M. "Réussir l'expérience de Franklin." *BUP*, **96**, 433 (2002).
- [Bio11] Biolin Scientific. "Fabricating Highly Organized Nanoparticle Thin Films." Technical report (2011).
- [Bol01] Bolmont, É. "« L'expérience de Franklin », encore..." *BUP*, **95** (1) (2001).
- [Car92] Carron, R. "Dimensions des molécules." *BUP*, **86**, 1483 (1992).
- [Dev04] Devaux, H. "Comparaison de l'épaisseur critique des lames très minces avec le diamètre théorique des molécules." In "Procès verbal des séances de la Société des Sciences Physiques et Naturelles," (1904).
- [Dev31] Devaux, H. "Les lames très minces et leurs propriétés physiques." *Journal de Physique et le Radium*, **2** (8), 237 (1931). URL <http://dx.doi.org/10.1051/jphysrad:0193100208023700>.
- [Fra73] Franklin, B. "Of the stilling of waves by means of oil." (1773).
- [Fre09] Freundlich, H. *Kapillarchemie* (1909).
- [Lan17] Langmuir, I. "The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids." *Journal of the American Chemical Society*, **468** (1917).
- [Lou12] Louapre, D. "L'expérience de la tache d'huile de Franklin." (2012). URL <https://scienceetonnante.com/2012/09/10/lexperience-de-la-tache-dhuile-de-franklin/>.
- [Mar14] Marcelin, A. "Épaisseur des couches très minces à la surface de l'eau (huiles, résines et camphre);". *Annales de Physique* (1914).
- [Mer06] Mertens, J. "Oil on troubled waters : Benjamin Franklin and the Honor of Dutch seamen." *Physics Today*, **59** (1), 36 (2006). URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.2180175>.
- [Poc91] Pockels, A. "Surface Tension." (1891).
- [Poc94] Pockels, A. "On the Spreading of Oil upon Water." *Nature* (1894).
- [Ray90] Rayleigh, L. "Measurements of the amount of oil necessary in order to check the motions of camphor upon water." *Proceedings of the Royal Society of London*, **47** (286-291), 364 (1890). URL <http://dx.doi.org/10.1098/rspl.1889.0099>.
- [Ray92] Rayleigh, L. "Experiments upon surface-films." *Philosophical Magazine*, **33**, 363 (1892).
- [Ray99] Rayleigh, L. "Investigations in capillarity." *Philosophical Magazine*, **48**, 321 (1899).
- [Sch00] Schwob, M. "L'expérience de Franklin revisitée..." *BUP*, **94**, 1 (2000).
- [Ser02] Serra, G. "Mesure de la longueur d'une molécule d'acide oléique." *BUP*, **96**, 429 (2002).

A Sujet élève

Mesurer la taille d'une molécule

Objectif

En vous appuyant sur l'expérience historique de Benjamin Franklin décrite ci-dessous, vous devrez répondre à la question :

Quelle est la taille d'une molécule d'huile ?

L'expérience historique de Benjamin Franklin

Au XVIII^{ème} siècle, Benjamin Franklin se promène au bord de l'étang de Clapham en Angleterre, et décide de verser un peu d'huile dans l'eau. Il observe alors qu'une tache se forme à la surface et s'étend rapidement jusqu'à couvrir une partie de la surface du plan d'eau.

Il faudra attendre 1890 pour que Lord John Rayleigh reprenne cette expérience et en déduise la taille des molécules d'huile.



L'étang agité un jour venteux.



La tache d'huile forme une étendue lisse.

Document 1 : extrait d'une lettre de Benjamin Franklin à la Royal Society (1774)

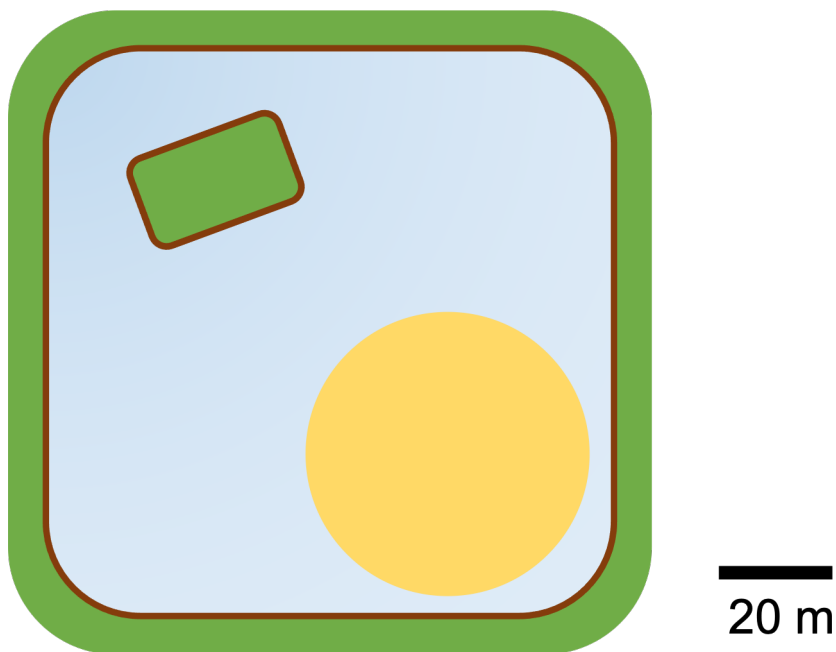
Texte original :

« At length being at Clapham where there is, on the common, a large pond, which I observed to be one day very rough with the wind, I fetched out a cruet of oil, and dropped a little of it on the water. I saw it spread itself with surprising swiftness upon the surface ; [...] the oil, though not more than a **tea spoonful**, produced an instant calm over a space **several yards square**, which spread amazingly and extended itself gradually till it reached the lee side, making all that quarter of the pond, perhaps half an acre, as smooth as a looking-glass. »

Traduction :

Et lorsque j'étais à Clapham où il y a, sur la commune, un grand étang que j'observai agité un jour de grand vent, je cherchai une burette d'huile et en laissai tomber un peu sur l'eau. Je la vis se répandre sur la surface avec une rapidité surprenante ; [...] l'huile, bien que moins d'**une cuillère à café**, produisit un calme immédiat sur une surface de **plusieurs mètres carrés**, qui se propagea incroyablement et s'étendit progressivement jusqu'à la côte rendant ce quart de l'étang, peut-être une demie acre, aussi lisse qu'un miroir.

Document 2 : vue aérienne de l'étang de Clapham à la fin de l'expérience de Benjamin Franklin



Donnée

$$1 \text{ mL} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Aide à la rédaction du compte-rendu

1. **Hypothèse.** Donnez votre hypothèse et justifiez-la : « Je pense que ... car ... ». ANA-RAI

2. **Protocole.**

APP

ANA-RAI

REA

Mettre en place un protocole pour vérifier votre hypothèse. Il peut contenir :

- une expérience :
 - (a) liste du matériel ;
 - (b) schémas ;
 - (c) observations et mesures ;
- un calcul :
 - (a) formule littérale ;
 - (b) conversion ;
 - (c) application numérique ;
- un raisonnement, une étude de documents, etc.

3. **Conclusion.** Pour terminer le compte-rendu :

VAL

- donner les conclusions en reprenant ce qui a été trouvé dans le protocole ;
- dire si les conclusions sont en accord avec votre hypothèse ;
- répondre à la question posée !

B Aides

Mesurer une molécule – Aides

1. Pour son expérience, Benjamin Franklin utilise une petite cuillère à café qui contient un volume V_{cac} de liquide. On prendra comme valeur du volume d'une telle cuillère :

$$V_{\text{cac}} = 2,0 \text{ mL.}$$

2. L'aire S de la tache d'huile est :

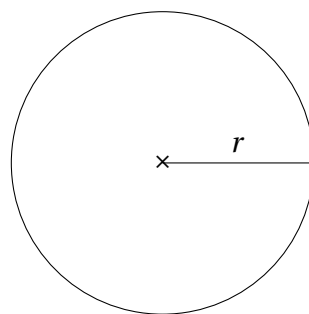
$$S = 2000 \text{ m}^2.$$

3. Aire S d'un cercle de rayon r :

$$S = \pi r^2$$

Attention aux unités :

- r est en mètres (m) ;
- S est en mètres carrés (m^2).

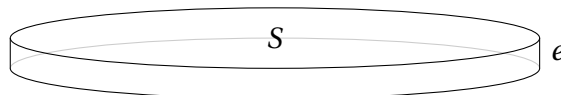


4. Volume V d'un cylindre de section S et d'épaisseur e :

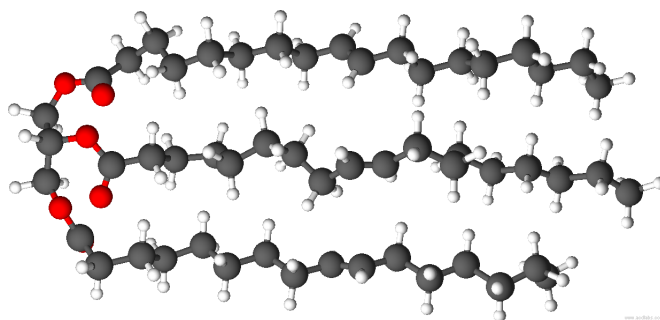
$$V = S \times e$$

Attention aux unités :

- e est en mètres (m) ;
- S est en mètres carrés (m^2) ;
- V est en mètres cubes (m^3).



5. L'huile d'olive est composée majoritairement d'oléine, aussi appelée trioléine, dont la formule est $\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$. Une molécule d'oléine est représentée ci-dessous. Les boules grises représentent les atomes de carbone, les blanches représentent les atomes d'hydrogène et les rouges représentent les atomes d'oxygène.



C Fiche de suivi des élèves pendant la séance

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		

Nom du binome :		
ANA-RAI	REA	VAL
A	A	A
B	B	B
C	C	C
D	D	D
Observations:		