ALBERT Jules
ROUXEL Malo

Compte rendu TP confinés

Peut-on préparer une infusion à la température indiquée sur le sachet, sans utiliser de thermomètre ?

Magistère de Physique Fondamentale d'Orsay

Amatrices et amateurs d’infusions, c’est à vous que nous nous adressons aujourd’hui. Pour préparer un bon thé (ou une bonne tisane) il faut utiliser de l’eau chaude, mais pas bouillante ! La température idéale est indiquée sur les sachets et varie souvent de 70°C à 90°C. Quel calvaire lorsqu’on ne possède pas de thermomètre et qu’on est obligé de laisser la bouilloire s’arrêter une fois que l’eau bout, ou bien l’arrêter approximativement quand on pense que c’est bon… cela donne l’impression de gâcher son infusion ! Aujourd’hui nous allons essayer de résoudre ce problème, pour une eau devant être à 80°C, en utilisant différentes méthodes afin de répondre à la question : Peut-on préparer une infusion à la température indiquée sur le sachet, sans utiliser de thermomètre ?

I – Analyse sonore de l’eau qui bout

Pour commencer nous avons constaté que lorsque nous faisons bouillir de l’eau à la bouilloire, cette dernière émet un son qui varie dans le temps. Ce son semble être plus grave et moins intense lorsque l'eau est proche de l’ébullition. Cette première constatation s’accorde par ailleurs avec les recherches théoriques de L.G. Aslamazov et A.A. Varlamov dans The Wonders of Physics. En effet 2 phénomènes sont responsables du bruit de la bouilloire :

1. Des oscillations excitées dans le liquide lorsque les bulles de vapeur s’échappent des parois de la bouilloire. Leur fréquence peut alors être considérée comme l’inverse du temps que la bulle met à se décoller du fond pour atteindre une hauteur de l’ordre de sa taille. Ce temps de décollage est dû à la compétition entre la poussée d’Archimède et la force de tension de surface qui s’exercent sur la bulle. L'accélération de la bulle dans le liquide étant notée a et son rayon r0, les calculs menés dans le livre donnent :
$$\nu 1 \sim \sqrt{\frac{a}{2*r0}} \sim 100\ Hz$$
2. Les bulles qui s’échappent du fond de la bouilloire éclatent dans les couches hautes du liquide, à cause de la différence de température entre le fond et le haut de l’eau. En effet la température de la vapeur d’eau saturante dans la bulle diminue dans les couches hautes du liquide, faisant chuter la pression interne. La différence de pression entre l’intérieur et l’extérieur de la bulle étant notée ΔP et la masse volumique de l’eau ρ_{eau}, la fréquence varie alors de la façon suivante :
$$\nu 2 \sim \frac{1}{r0}\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho eau}} \sim 1000\ Hz$$

Or proche de l’ébullition, la température de l’eau s’homogénéise donc □□□→ 0 donc ν2 → 0, et c’est le phénomène (1) qui domine, donc les basses fréquences. Les hautes fréquences s’effaçant, l'intensité du son devient plus faible. Pourrait-on en déduire l'instant où l'eau atteint 80°C ? Afin de vérifier expérimentalement ce comportement, nous avons effectué le montage suivant :

Figure 1 : Montage de l'expérience de mesure de la température et acquisition du signal sonore

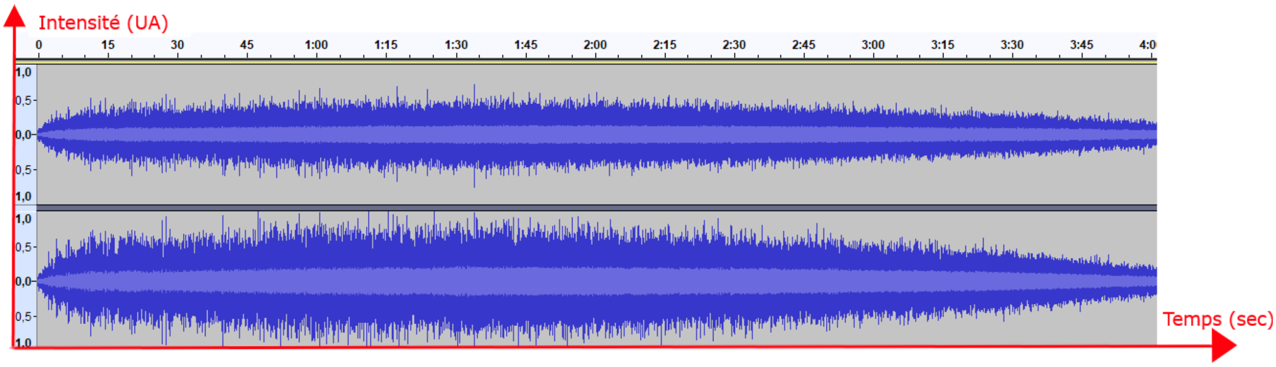


Figure 3 : Graphique intensité-Température en fonction du temps

On constate une décroissance de l'intensité sonore au fil du temps, mais est-elle suffisante et assez brusque pour être exploitée ? Nous avons tracé le graphique de la température de l'eau en fonction du temps et nous l'avons superposé à celui en version plus zoomée. L'origine des temps sur cette courbe est à 2:00 sur le graphique précédent.

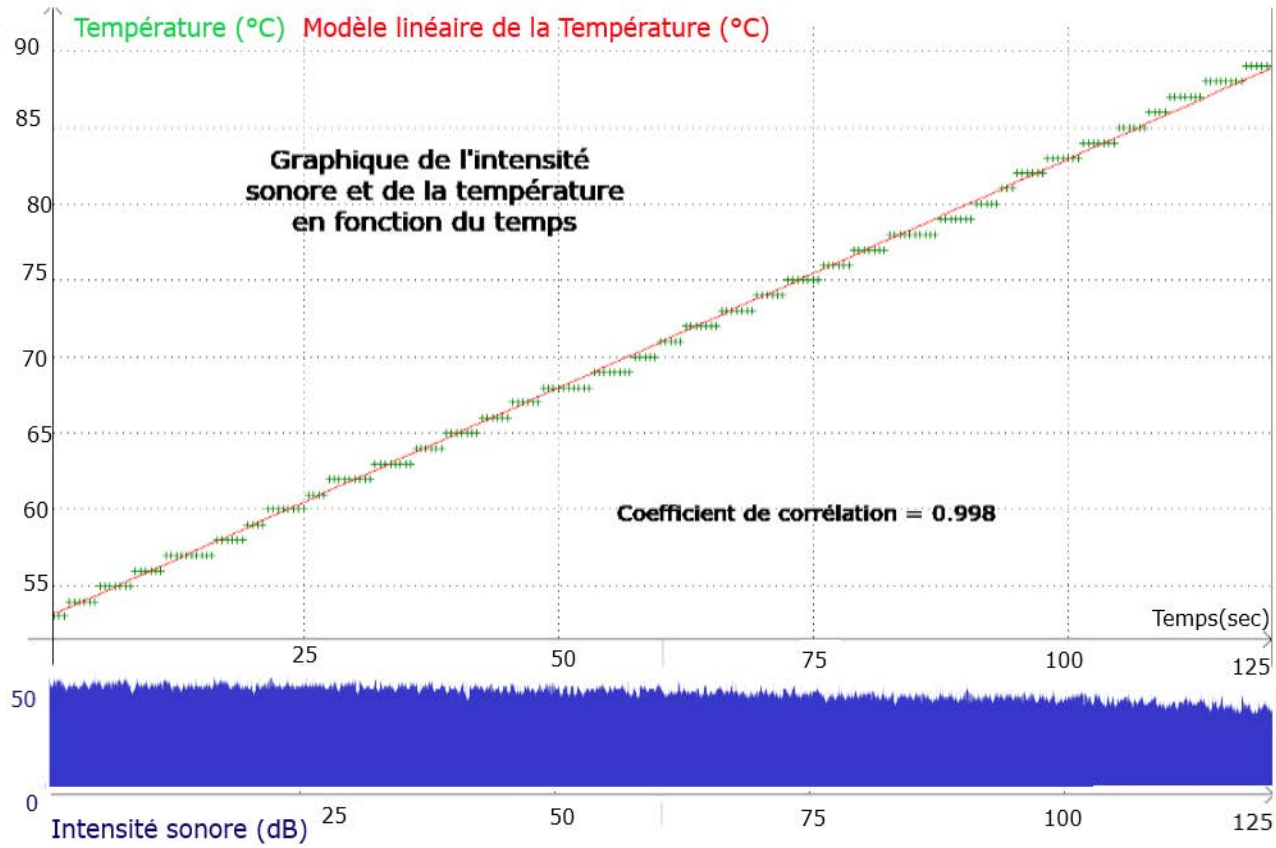
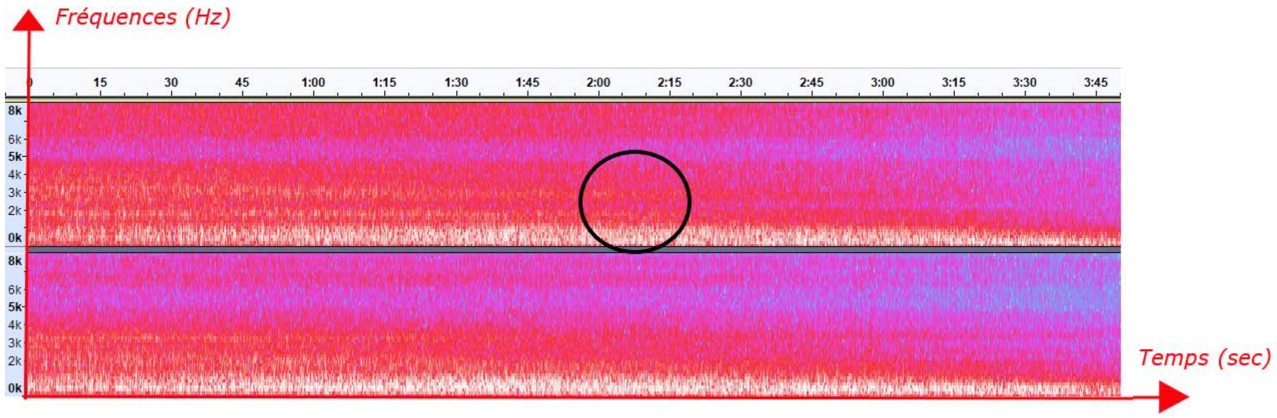


Figure 4 : Graphique intensité-Température en fonction du temps

On s'aperçoit que la baisse de l'intensité sonore est trop progressive, et on ne peut hélas pas en déduire une température de chute de l'intensité. Cependant, on remarque que la température croît linéairement. Ce résultat est logique puisque la puissance apportée par la bouilloire est constante et nous sera utile par la suite.

L'étude de l'intensité n'ayant rien donné, nous nous sommes penchés sur l'étude des fréquences de cette bouilloire et nous avons donc tracer son spectrogramme.

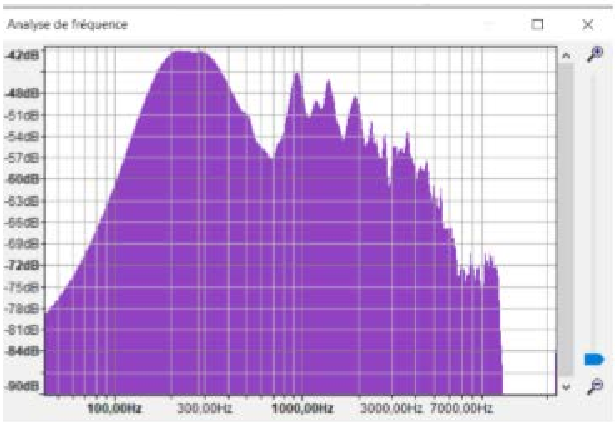
Figure 5 : Spectrogramme du signal sonore produit par une bouilloire

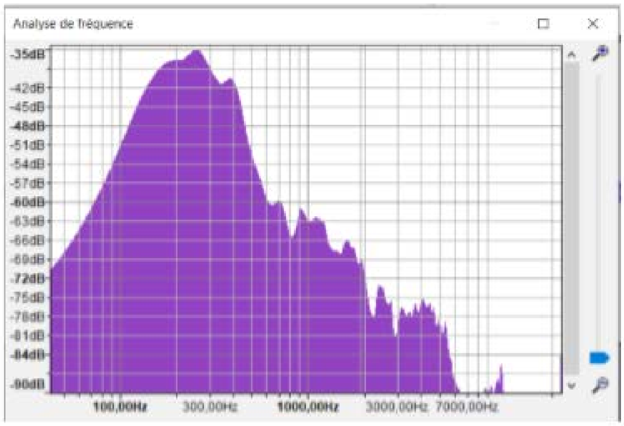


Nous avons aussi comparé les spectres audio tracés par le logiciel à 2 plages temporelles éloignées :

Figure 6 : Spectre du signal autour de une minute

Figure 7 : Spectre du signal après deux minutes





Nous constatons sur la Figure 7 que les hautes fréquences de la Figure 6 ont soit disparues, soit elles ont perdu en intensité. Donc nous avons bien une perte de hautes fréquences proche de l'ébullition. Comme le spectrogramme est peu lisible et afin de s'assurer que l'expérience soit reproductible nous avons réitéré l'enregistrement, et on constate que les hautes fréquences sont tantôt plus marquées, tantôt moins marquées (cela est sûrement dû à des facteurs tels que la position de la bouilloire par rapport au micro de l'ordinateur, du calcaire qui se dépose au fur et à mesure, …) mais que le comportement reste le même, avec un passage d'une zone intense en couleur au niveau des hautes fréquences à une zone plus claire (rond jaune) :

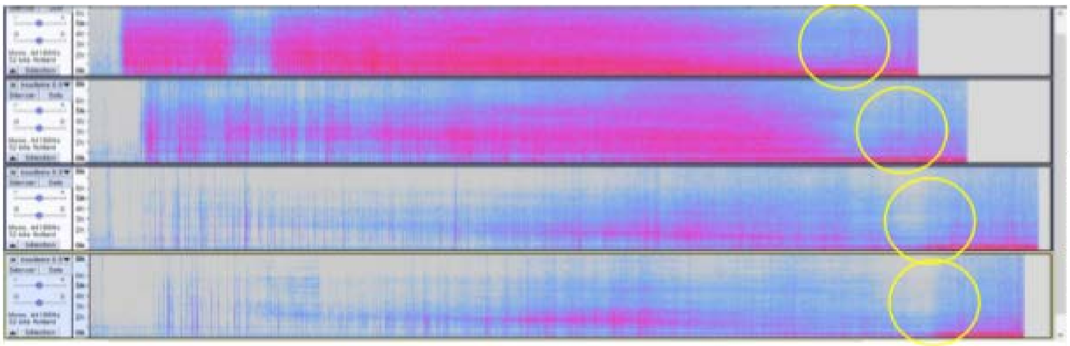
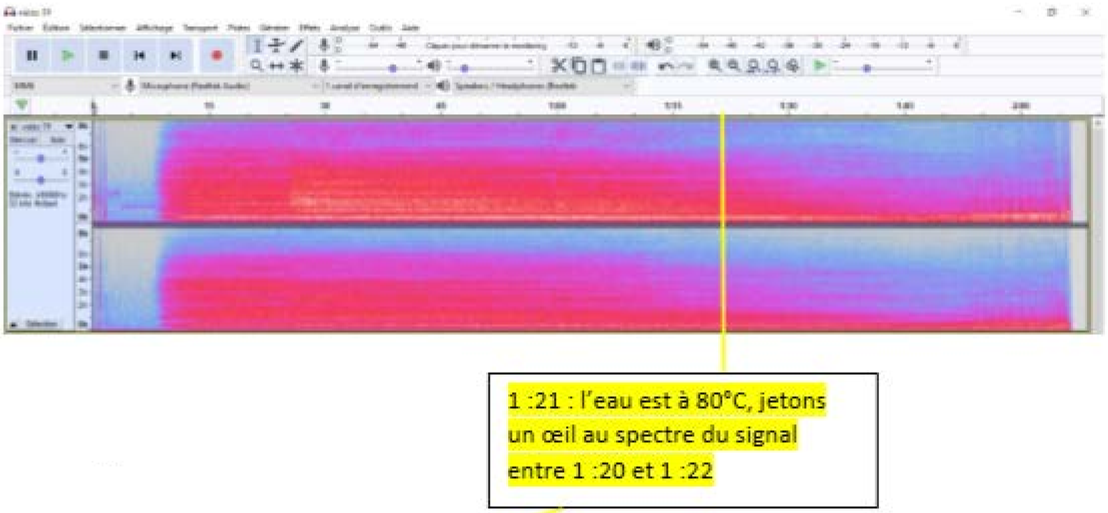


Figure 8 : Comparaison de différents spectrogrammes

Notons que ces zones apparaissent au même endroit seulement pour les 2 derniers spectrogrammes car les conditions initiales (température de l’eau et quantité d’eau dans la bouilloire) pour ceux-ci sont les mêmes. Notons aussi qu’avec un bon micro l’intensité des basses fréquences reste en fait à peu près constante (cf Figure 9).
À ce stade nous constatons alors un comportement global du spectrogramme, mais est-il possible de l’analyser plus en détail et de définir une zone où l’on peut considérer que les hautes fréquences chutent ? Cette tâche n’est en fait pas simple car il faudrait étudier en détail à chaque temps et pour chaque fréquence l’amplitude de la transformée de Fourier, afin de définir une amplitude seuil en dessous de laquelle on ne considère plus l’intervention de certaines fréquences dans le signal sonore. Compte tenu de la difficulté et du manque de précision, nous allons alors plutôt essayer de remarquer des comportements particuliers aux temps qui nous intéressent (i.e. quand l’eau est à 80°C). Pour cela nous réutilisons les valeurs temporelles établies dans l'étude de l'intensité (cf Figure 4) et nous analysons le spectrogramme à l’instant où l'eau est à 80°C.
Pour cette étude nous avons choisi le spectrogramme le plus lisible parmi tous ceux réalisés.

Figure 9 : Spectrogramme avec marquage lorsque l'eau est à 80°C



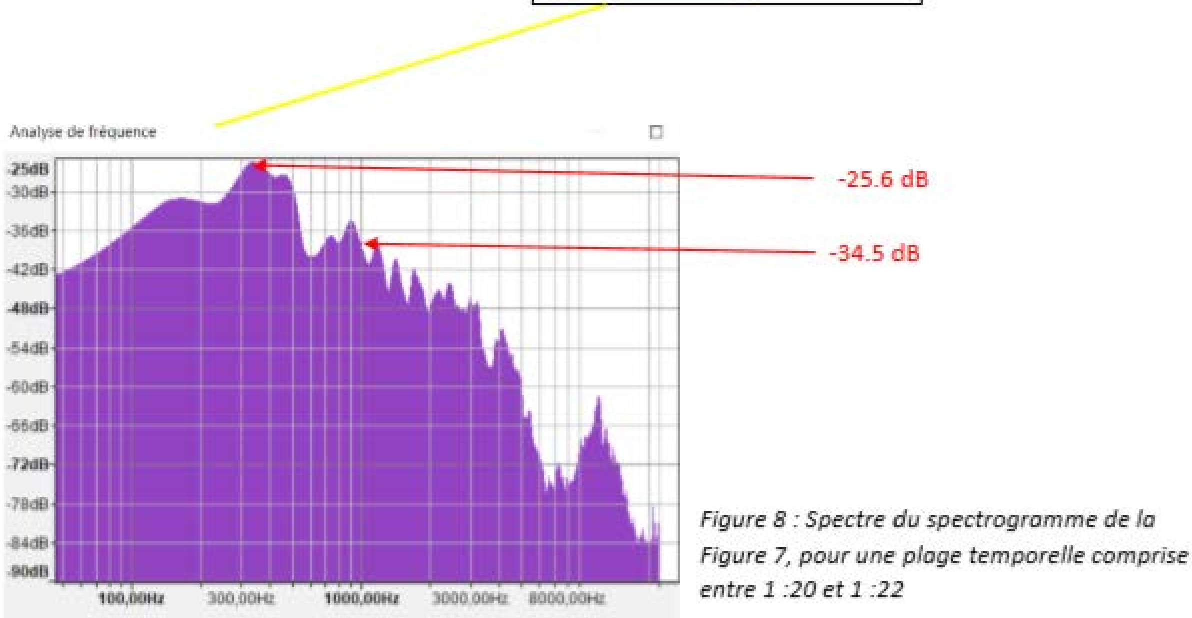


Figure 10 : Spectre audio du signal de la figure 9, pour une plage temporelle comprise en 1:20 et 1:22

Pour l'analyser nous décidons de comparer l'intensité du pic le plus intense du spectre à celle du pic à 1000Hz (ce choix est totalement arbitraire et fait car nous considérons que les hautes fréquences « commencent » à 1000Hz, afin de rester proche de l'étude théorique mentionnée au début). On a entre les deux un rapport de -25,6dB / -34,5dB = 0.74.

En reproduisant l'expérience, le rapport entre l'intensité du pic à 1000Hz et celui de plus forte intensité sur le spectre tracé sur une plage de 2 secondes autour du temps au bout duquel l'eau est à 80°C est de -26,2 / -35,6 = 0.74, comme précédemment ! Coïncidence ou non ? Probablement pas, car cela paraît logique de retrouver le même rapport d'intensité à la même température pour les 2 expériences. Cependant lors d'une 3è expérience, le rapport donne -24,3 / -31,8 = 0.76. On en déduit que ce rapport vaut plutôt 0.75 ± 0.01.

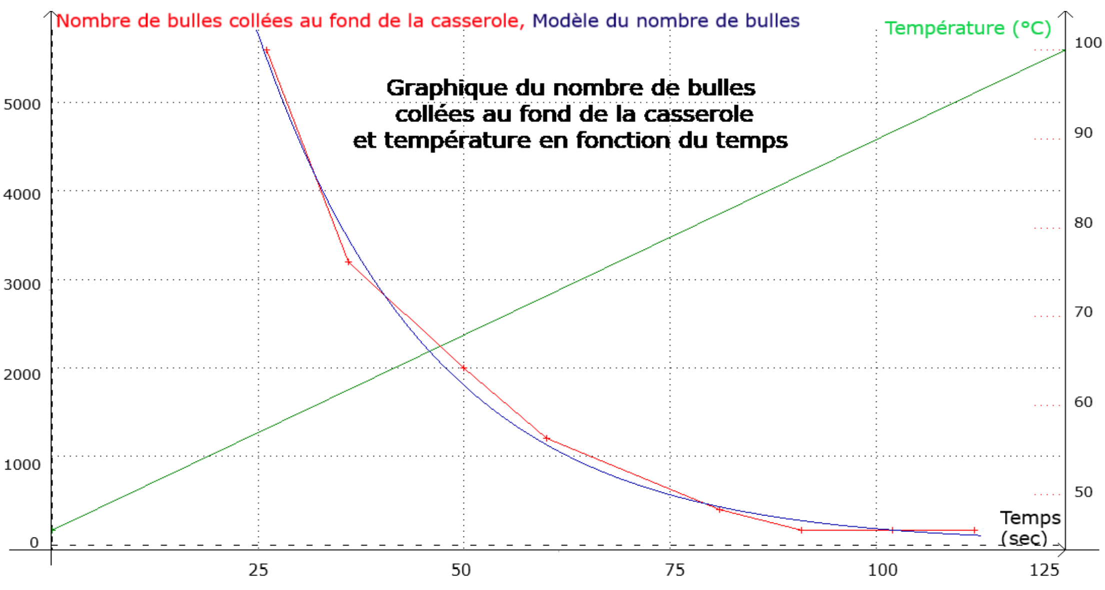
Ainsi lors de l'étude fréquentielle du bruit émis par la bouilloire apparaît un comportement particulier : les basses fréquences dominent proche de l'ébullition. Ce comportement est compliqué à étudier en détail. Mais nous sommes tout de même parvenus à trouver un moyen de corréler le fait que l'eau est à 80°C avec l'étude fréquentielle du signal émis par la bouilloire : si l'eau est à 80°C, alors le rapport entre l'intensité du pic à 1000Hz et l'intensité du plus grand pic dans le spectre vaut 0.75 ± 0.01. Cependant nous ne savons pas si la réciproque est vraie, et même si elle l'était, la méthode pour savoir si notre eau est à 80°C resterait compliquée à mettre en œuvre et beaucoup trop longue pour l'objectif initiale qui est de se préparer un thé. Alors, une analyse autre que sonore, visuelle par exemple, serait-elle plus simple et plus rapide à mettre en œuvre ?

II – Analyse visuelle de l'eau qui bout

Même si l'étude sonore n'a pas abouti comme nous l'espérions, il reste d'autres méthodes à explorer. L'une d'entre elle nécessite d'ouvrir la bouilloire ou bien de faire chauffer l'eau à la casserole. Lorsque l'on chauffe de l'eau à la casserole, des bulles se forment au contact de la surface chauffée, à cause de la différence de température. Ces bulles finissent par se décoller de cette paroi lorsqu'on augmente la température de l'eau mais elles y restent collées longtemps, et plus la température augmente, plus le nombre de bulles collées dans le fond de la casserole diminue. Pourrait-on utiliser cette relation à bon escient afin de connaître la température de l'eau juste en la regardant ?

Pour obtenir un résultat satisfaisant, il faudrait, ou bien observer une disparition soudaine des bulles collées au fond, ou bien que la disparition des bulles collées en fonction du temps soit linéaire. Même si il existe des techniques pour compter un grand nombre d'éléments, ce travail reste fastidieux et donc nous n'avons obtenu qu'un nombre réduit de points pour tracer le graphique suivant :

Figure 11 : Graphique du nombre de bulles collées en fonction du temps



Pour la courbe de température en fonction du temps, nous avons simplement prélevé la température à deux instants, puisqu'on à démontré son caractère linéaire. Le nombre de bulles a été calculé en utilisant une estimation assez précise de la surface occupée par ces bulles dans le fond de la casserole.

Hélas, on observe que le nombre de bulles décroît ni linéairement, ni de façon abrupte. Le modèle utilisé est plutôt celui d'une exponentielle décroissante, ce qui nous aurait été utile si nous cherchions à obtenir une eau d'environ 60 °C.

Il est donc encore une fois très difficile d'utiliser cette méthode pour préparer notre infusion. Toutes les méthodes pour stopper le chauffage de l'eau avant son ébullition ont échoué, car les caractéristiques de l'eau évoluent trop lentement et même si certains phénomènes se produisent, ils sont trop imprécis pour obtenir une eau exactement à 80°C (au degré près). Alors peut-être que cette approche n'est pas la bonne, peut-être faut il faire bouillir de l'eau puis la faire refroidir ensuite ?

III – Analyse thermodynamique de l’eau qui bout

Pour chauffer de l'eau jusqu'à 100°C, il faut lui apporter une certaine énergie thermique E.
E est calculée par la relation thermodynamique suivante : $E = c * m * \Delta T$, avec c la capacité calorifique de l'eau, m la masse de l'eau utilisée, et ΔT la différence de température entre l'état initial et l'état final. L'idée de départ est simple, si on mélange de l'eau froide avec de l'eau bouillante, on va refroidir notre eau. Grâce à la relation ci-dessus, on peut même calculer la quantité d'eau nécessaire à obtenir une eau à 80°C.

Soit m1 la masse d'eau portée à ébullition, v1 son volume et $\Delta T1$ la différence de température entre l'eau bouillante et l'eau froide. Ici, l'eau froide vaut 22,5 ± 2,5 °C. Donc $\Delta T1 = 77{,}5 \pm 2{,}5$ °C.

Soit m2 la masse d'eau froide ajoutée à l'eau bouillante et v2 son volume. Soit $\Delta T2$ la différence de température entre notre eau chaude pour le thé et l'eau froide. Ici, on a $\Delta T2 = 57{,}5 \pm 2{,}5$ °C. Attention, la température de l'eau froide porte une grande incertitude mais elle reste la même, donc les incertitudes de $\Delta T1$ et $\Delta T2$ ne sont pas indépendantes.

On a, par conservation de l'énergie thermique, $E = c * m1 * \Delta T1 = c * (m1+m2) * \Delta T2$. Donc, on obtient $v1 * \Delta T1 = (v2+v1) * \Delta T2$, donc $v2 = v1 * (\Delta T1 / \Delta T2 - 1)$
Le volume d'eau à mélanger à l'eau bouillante est donc : $v2 = v1 * (0{,}35 \pm 0{,}02)$.

Nous avons testé ce résultat en mélangeant 0,5 L d'eau bouillante et 17,5 cL d'eau froide à 22,5 °C (nous avons utilisé un thermomètre pour être précis, et étant donné que l'eau est froide, un thermomètre corporel suffit amplement et il ne va pas être brûlé comme dans de l'eau bouillante). En agitant bien afin d'homogénéiser la température par convection, on obtient une eau à 79,5 °C.

Cette méthode semble donc porter ses fruits !

IV – Conclusion

Il est donc aisé d'obtenir une eau à 80°C pour préparer notre thé. Il faut cependant être patient et essayer de refroidir de l'eau bouillante plutôt que de vouloir arrêter en cours de route notre bouilloire. Bien sûr il existe bon nombre de méthodes que nous n'avons pas explorés, comme laisser refroidir l'eau au contact de l'air où encore acheter une bouilloire dernier cri qui indique la température en temps réel. Cette dernière méthode n'est certes pas très scientifique, mais il semble que ce soit celle qui a le plus porté ses fruits.