

XXIII èmes
Olympiades de Physique
Session 2015-2016



En phase avec l'eau

Ecole Alsacienne Paris

ASSOULINE Jade
JACQUET Charlotte
WARIN Elise



Sommaire

| | |
|---|-------|
| <u>Avant-propos</u> | p.2 |
| <u>Introduction</u> | p.3 |
| <u>I - Flocons de neige et agencement de la molécule d'eau</u> | p.4 |
| I – A – La formation des flocons et leur agencement | p.4 |
| I – B – Agencement de la molécule d'eau | p.5 |
| I – C – Synthèse de flocons (Expérience 1) | p.6 |
| I – D – Variations de pression et point triple (Expérience 2) | p.8 |
| <u>II – Pression et diagramme de phases</u> | p.9 |
| II – A – La courbe de pression de vapeur saturante (Expérience 3) | p.10 |
| II – B – La courbe de Rankine | p.12 |
| <u>III – Des points grâce à la courbe de pression de vapeur saturante</u> | p.14 |
| III – A – Détermination du point de rosée (Expérience 4) | p.14 |
| III – a – Première exploitation : 43 % d'humidité | p.18 |
| III – b – Deuxième exploitation : 84 % d'humidité | p. 20 |
| III – B – Détermination du point de gelée blanche | p. 21 |
| <u>Conclusion</u> | p.23 |
| <u>Remerciements</u> | p.24 |
| <u>Bibliographie</u> | p.25 |



Avant-propos du mémoire « En phase avec l'eau ! » :

Dans ce mémoire intitulé « En phase avec l'eau ! », nous étudierons les multiples propriétés de cette molécule. De sa forme magique de cristal de glace, dont nous ferons une synthèse en laboratoire, jusqu'aux phénomènes météorologiques, en passant par le point triple, nous avons réussi à analyser plusieurs de ses états spécifiques ! Des flocons de neige ont pu être synthétisés par la réalisation d'un montage expérimental élaboré par nous-même ; nous avons d'ailleurs pu faire varier des facteurs comme la pression et l'humidité. Notre objectif était donc de retrouver des points spécifiques figurant sur le diagramme de phases de l'eau : grâce aux expériences, nous avons réussi à en observer certains. Par le calcul des incertitudes, nous avons pu vérifier la cohérence de nos conclusions et de nos résultats.



Introduction :

« Après cette nue, il en vint une autre qui ne produisait que de petites roses ou roues à six dents arrondies ... »

Ainsi sont les propos de René Descartes dans son ouvrage *Les Météores* (1637).

Présentés de manière si poétique, rares sont ceux qui pourraient ne serait-ce qu'un instant rester insensible à la grâce subtile de cet agrégat de molécules d'eau. Il est donc naturel que cet empilement ordonné d'atomes ait intrigué les savants.

Aujourd'hui, les physiciens connaissent les mécanismes commandant la croissance cristalline de la glace. Au cours de nos Travaux Personnels Encadrés, nous avons choisi de suivre, de la prime enfance jusqu'à maturité, la croissance du « peloton de glace » décrit par Descartes. Les flocons étaient donc au cœur de nos travaux. Ayant aimé étudier ce sujet, nous avons décidé d'approfondir notre travail et de continuer la démarche scientifique entamée. Toutefois, les flocons de neige ne constituent pas une finalité mais plutôt une porte d'entrée vers l'ensemble des propriétés de la molécule d'eau.

Nous avons au quotidien la possibilité d'observer les variations d'état de l'eau. Qui n'a jamais observé la rosée du matin en se demandant quelle était sa provenance et les phénomènes dictant son évaporation rapide ? Solide, liquide, gazeuse (ou les trois à la fois), l'eau, de par ses propriétés uniques a donc suscité notre intérêt. Nous avons donc décidé de nous promener sur le diagramme de phases de l'eau dans le but d'en savoir plus et de comprendre cette molécule associée à la vie.

À cette fin, nous verrons dans un premier temps les conditions de la formation des flocons de neige. Cette étape nous permettra d'appréhender un premier état de l'eau : l'état solide. Par la suite, nous ferons entrer la pression en jeu en recréant de manière expérimentale une partie du diagramme de phase³. Enfin, nous affinerons ce diagramme en étudiant les points de frontière entre les états à l'image du point de rosée, de givre ou de gelée blanche.

En phase avec l'eau !

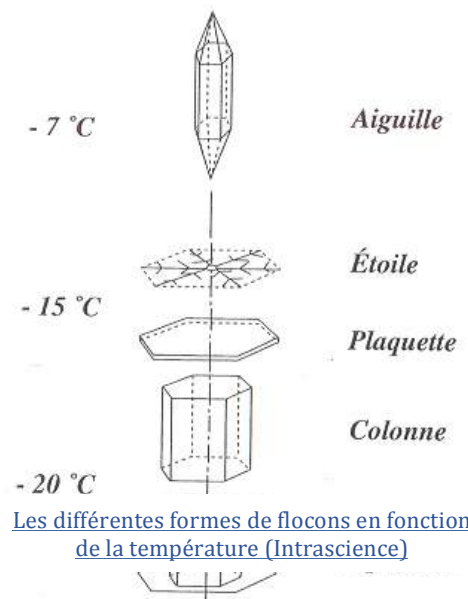
I - Flocons de neige et agencement de la molécule d'eau

A – La formation des flocons de neige

Les nuages sont composés d'eau obtenue majoritairement par évapotranspiration (ce qui correspond à l'émission de vapeur d'eau par les plantes). La température au sein d'un nuage étant comprise entre 0°C et -40°C, les microgouttelettes (10µm de diamètre) sont amenées à geler, ou à entrer en surfusion. En cas de surfusion, un contact avec les germes atmosphériques entraînera une solidification. Les chocs entre les molécules d'eau sont à l'origine de la formation de nombreuses particules susceptibles de mener à une condensation. Nous pouvons ainsi considérer que la formation des flocons est relative à la température, à l'humidité de l'air, ainsi qu'à la poussière présente dans l'atmosphère.

C'est au cours de sa chute que le flocon acquiert sa spécificité. En effet, ce dernier va être amené à subir des variations de température, saturation ainsi que de pression. Plus la saturation est importante, plus le cristal croît rapidement. Ainsi, une étoile à six branches traversant un nuage à -15° C, se parera bientôt d'étincelantes aiguilles ; confrontée à l'humidité extrême d'une couche basse de l'atmosphère à -2° C, elle arborera de fines plaquettes aux extrémités de ses aiguilles, etc...

Une question reste toutefois en suspens : nous avons évoqué les facteurs à l'origine de la condensation de l'eau et les différents modes de croissance mais comment expliquer la structure hexagonale des flocons ?



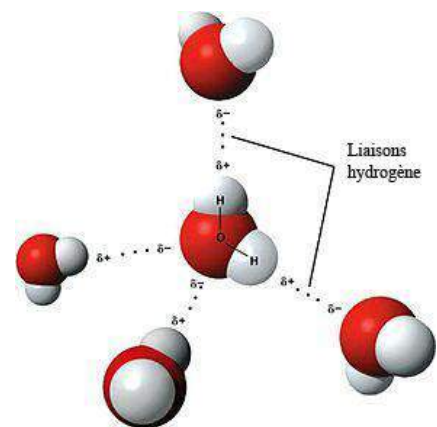
[Les différentes formes de flocons en fonction de la température \(Intrascience\)](#)

B - Agencement de la molécule d'eau

Si les facteurs environnementaux ne sont pas à l'origine de la structure hexagonale des flocons, nous pouvons en déduire que cet agencement résulte des propriétés intrinsèques de la molécule d'eau. Nous allons donc étudier les propriétés relatives à son agencement.

La molécule d'eau (H₂O) est une molécule dont la géométrie est plane coudée. En effet, La répartition la plus stable autour d'un atome central possédant 4 liaisons simples se fait selon un tétraèdre fictif dont le centre est occupé par l'atome. Dans le cas de la molécule d'eau, deux de ces liaisons simples sont remplacées par deux doublets non liants. La géométrie de la molécule d'eau résulte de cette disposition des doublets électroniques : deux sommets du tétraèdre sont occupés par les doublets non liants, deux autres par les atomes d'Hydrogène.

De plus, l'électronégativité de l'Oxygène est plus importante que celle de l'Hydrogène. Les barycentres des charges partielles positives (G⁺) et négatives (G⁻) ne sont pas confondus. La molécule d'eau est donc une molécule polaire.



[Molécule d'eau, structure plane coudée](#)

Ainsi, à une échelle moléculaire et non plus atomique, les molécules vont s'agencer sous la forme d'un tétraèdre. Cet agencement découle des 4 liaisons hydrogènes que peut former la molécule d'eau (deux

grâce aux doublets non liants de chaque atome d'Oxygène et deux autres grâce aux atomes d'Hydrogène).

Les tétraèdres nouvellement formés vont se lier afin de donner lieu à un ensemble tridimensionnel. Lors de la projection de ces nouveaux tétraèdres, on remarque la formation d'un réseau hexagonal. Le prisme nouvellement formé admet quatre axes de symétrie le long desquels le cristal amorcera sa croissance.

C – Synthèse de flocons :

Nous connaissons désormais, sous un aspect purement théorique les propriétés de la molécule d'eau. Toutefois, la synthèse de flocons nous permettrait d'en apprendre plus en étudiant les paramètres guidant, d'une part la croissance cristalline, et d'autre part les variations d'état de l'eau : celle-ci passant d'un état gazeux à un état solide. De plus, en réalisant un relevé de températures, nous serons en mesure d'étudier un premier point sur le diagramme de phases de l'eau.



Expérience 1 : Un flocon en bouteille !

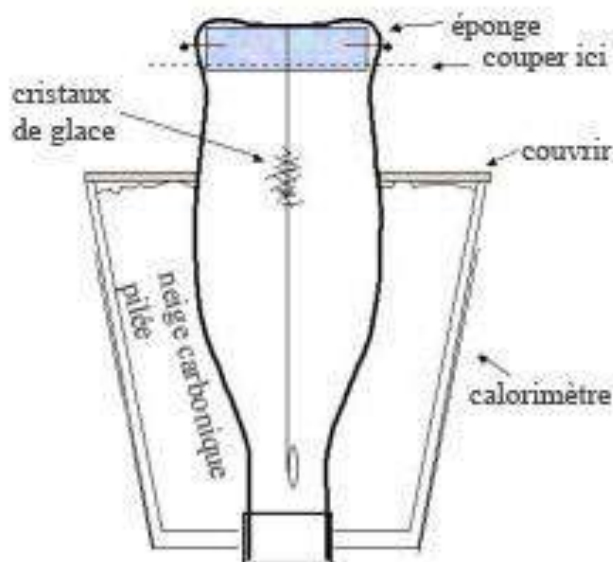
Préparation du matériel : Nous avons utilisé une bouteille comme environnement de cette expérience. Après avoir découpé la bouteille en deux (à environ 2.5cm du bas de cette dernière), nous avons percé un trou (trou A) au centre de la base de la bouteille et quatre trous le long des parois de celle-ci (trous B).

Nous avons ainsi pu faire passer un fil de nylon dans le trou A et au travers d'une éponge. Un trombone a ensuite été noué à ce fil afin d'éviter que ce dernier rencontre les parois de la bouteille.

Une éponge prédécoupée en fonction du diamètre de la bouteille a été introduite et maintenue en fixant des trombones dans les trous B.

Nous avons percé quelques trous dans la base de la bouteille (trous C) afin de pouvoir humidifier l'éponge à l'aide de pipettes.

Trou B(1) Trou A Trou C



Prototype de chambre de diffusion

Protocole : Nous avons scotché les deux parties de la bouteille afin de compléter le montage et placé ce dernier dans le calorimètre. Par la suite, nous avons pilé la neige carbonique afin de pouvoir plus facilement l'introduire autour de notre montage.

Nous avons ensuite humidifié l'éponge à l'aide d'une pipette afin de créer un air relativement saturé en eau. L'éponge agit ici comme un diffuseur.

En phase avec l'eau !

Un flocon devrait apparaître le long du fil après une quinzaine de minutes d'expérience. Ce dernier sera amené à grandir pendant une heure.

Observations et remarques :



[Vue d'ensemble du montage](#)



[Flocon observé](#)



[Flocon au sein de la bouteille](#)

Nous observons la formation d'un flocon de neige le long de notre fil de nylon. Le fil agit ici comme une particule présente dans l'atmosphère. Les molécules d'eau vont se condenser autour de celui-ci. L'apparition d'un flocon s'explique par l'important gradient de température¹ entre le haut et le bas de la bouteille. En effet, le bas de cette dernière est extrêmement froid car il est en contact avec la neige carbonique (environ -60°C) ; toutefois, le haut de la bouteille est exposé à température ambiante (20°C). Ainsi, au centre de la bouteille se crée une atmosphère propice à la condensation².

Cette expérience était concluante, nous avons pu observer des flocons pour un court instant. Nous pouvons noter que les cristaux observés sont sous forme de dendrites. Les dendrites sont la forme qui apparaît le plus facilement autour d'une température de -15°C , lorsque la pression de vapeur saturante est élevée. Comme vu précédemment, nos cristaux poussent au milieu de la bouteille, où la température n'est pas loin de -20°C . En effet, la plus basse température (au bas de la bouteille) étant de -60°C , et la plus haute étant autour de 20°C , nous supposons que la moyenne est à -20°C .

Néanmoins, dans l'optique de faire de plus amples observations, nous avons émis l'idée de faire varier les paramètres de température et d'émettre des hypothèses quant à la forme du flocon nouvellement formé.

Nous avons ainsi décidé de faire de plus amples mesures afin de prévoir la température obtenue à l'intérieur de la bouteille et d'y obtenir un gradient plus important.

Cependant, il nous aurait été difficile d'exploiter les mesures. En effet, de par la présence d'un important gradient de température, il nous est impossible de relever uniformément la température à l'intérieur de la bouteille. Les prévisions formulées auraient donc été erronées.

Nous avons ainsi pensé à mesurer l'humidité dans la bouteille. Il nous est toutefois impossible d'utiliser un hygromètre présent sur le marché pour réaliser ces mesures, ces derniers ne rentrant pas au sein de notre bouteille. L'éponge agissant comme un diffuseur, la mesure de la quantité d'eau

¹ Taux de variation de la température en fonction de la distance

² Changement d'état d'une espèce d'un état gazeux à un état condensé (solide ou liquide)

² Changement d'état d'une espèce d'un état gazeux à un état condensé (solide ou liquide)

introduite dans celle-ci n'aurait pas été plus concluante. En effet, nous ne sommes pas en mesure de déterminer la quantité d'eau évaporée et donc dispersée dans l'air par celle-ci.

Nous avons vu que la formation de flocon dépendait de paramètres variés tels que la température, la saturation en eau et la pression. Il nous est impossible de faire varier les deux premiers facteurs avec cette expérience. Toutefois, nous avons choisi d'étudier l'impact de variations de pression sur l'eau à une température connue.

D – Variations de pression et point triple

Comment réagit l'eau à de fortes variations de pression ? Quels sont les facteurs qui dictent ces changements d'états ?



Expérience 2 : Une goutte sous la cloche !

Nous avons placé une goutte d'eau sous une cloche à vide afin d'observer les possibles changements d'état. La première étape consistait donc à mesurer à l'aide d'un baromètre quel domaine de pression nous étions à même de pouvoir étudier.

En insérant un bécher rempli d'eau dans la cloche, et en descendant à 20hPa, on observe des bulles de vapeur qui se rétractent lorsque la pression remonte.

Nous voulions insérer de l'eau sous forme gazeuse dans la cloche à vide afin d'observer un phénomène de condensation à une température donnée. Toutefois, insérer de l'eau dans la cloche pendant que la pompe contribue à diminuer la pression risquerait d'endommager celle-ci (l'eau entrant en contact avec l'huile de la pompe). Nous devons donc manipuler uniquement avec de l'eau liquide ou l'eau solide.

En insérant plusieurs glaçons fondants dans la cloche, on observe des bulles dans celui-ci à une pression de 7hPa (0.007 bar) ; l'eau boue dans le bécher. De plus on remarque que l'eau qui est au centre du bécher est solide et que l'eau qui entoure cette partie solide est, au contraire, liquide.

L'eau de fonte à 0°C oscille entre le solide, la vapeur et le liquide, ces trois états sont ici à l'équilibre simultanément car nous avons réalisé cette expérience sur une durée d'une minute. Nous pouvons en conclure que nous avons atteint le point triple (où l'eau est sous forme liquide, solide et gazeuse simultanément), définissant ainsi un premier point sur notre diagramme de phases de l'eau.

| | Goutte d'eau | Glaçon |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Pression | 20 hPa (0.020 bar) | 7hPa (0.007 bar) |
| Température initiale | 20°C | 0°C |
| Observations | Bulles dans la goutte | Eau liquide solide gazeuse |

À la suite de l'observation du point triple, nous décidons de nous intéresser à ce diagramme. Comment une simple variation de pression peut amener l'eau à changer d'état, voire à adopter plusieurs états à la fois ?

En phase avec l'eau !



Observation du point triple sous la cloche à vide



Dispositif d'observation d'eau sous pression

II – Pression et diagramme de phases

Nous avons donc vu, grâce à l'expérience 2 qu'une simple variation de pression du milieu environnant de l'eau peut entraîner des changements radicaux quant à l'état de l'eau.

Nous pouvons maintenant faire entrer la pression en jeu, afin de tracer une partie du diagramme de phases de l'eau. Un diagramme de phases correspond à une représentation graphique des différentes phases d'un corps pur. Les variables sont généralement la pression et la température. Ainsi, en étudiant ce diagramme, nous pourrions en apprendre davantage sur les différents états de l'eau et appréhender au mieux ses changements d'états.

D'après l'expérience précédente, nous pouvons conjecturer que la pression a un impact décisif sur l'état de l'eau. En faisant varier la pression et la température de manière conjointe, à partir d'un état d'équilibre, il nous sera possible de déterminer la frontière entre deux états (ici liquide et gazeux). Il nous faut ainsi étudier un milieu spécifique, où les phases liquides et gazeuses sont à l'équilibre. Toutefois, comment étudier un milieu stable, à l'équilibre, tout en enregistrant des variations de pression ? Ceci nous amène à étudier la courbe de pression de vapeur saturante de l'eau. Pour ce faire, nous avons réalisé un montage expérimental.

A – La courbe de pression de vapeur saturante de l'eau :



Expérience 3 : Ballons sous pression !

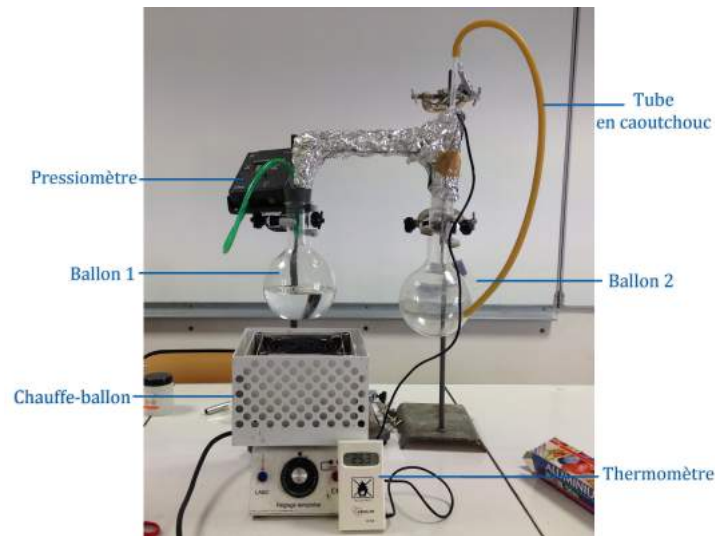
Nous cherchons ici à étudier la frontière entre les phases liquide et gazeuse de l'eau.

Préparation du matériel : On utilise ici deux ballons. On remplit le ballon (1) d'eau puis on y insère un pressiomètre, qui va donc relever les valeurs de la pression. Pour insérer le pressiomètre, le bouchon fermant le ballon (1) est troué. Dans le ballon (2), on insère un capteur, relié à un thermomètre. De même que pour le ballon (1), le bouchon doit avoir été troué, deux fois cette fois-ci. Le deuxième trou sert en effet à insérer une tige en verre, reliée à un tube en caoutchouc, qui servira ensuite à évacuer l'air retenu dans le montage. Ensuite, on relie les deux ballons par un tube de verre. Dans le but de limiter les échanges thermiques entre notre montage et l'air environnant, nous isolons le tube à l'aide d'ouate et d'aluminium. On place également un chauffe-ballon en dessous du ballon (1).

Protocole : Nous avons fait chauffer le ballon (1) et cherchons à atteindre l'ébullition ($T_{\text{ébullition}} = 100^{\circ}\text{C}$). Lorsque celle-ci est atteinte (on observe à ce moment une stagnation de la température à l'intérieur du ballon (1), le processus de saturation de l'air est enclenché, tout l'air contenu à l'intérieur du montage s'échappe alors. Lorsque des gouttes d'eau perlent du tube, nous pouvons considérer que

le montage est rempli de vapeur d'eau. Nous avons alors éteint le chauffe-ballon et bouché le tube en caoutchouc grâce à une pince de Mohr. L'expérience a pu commencer.

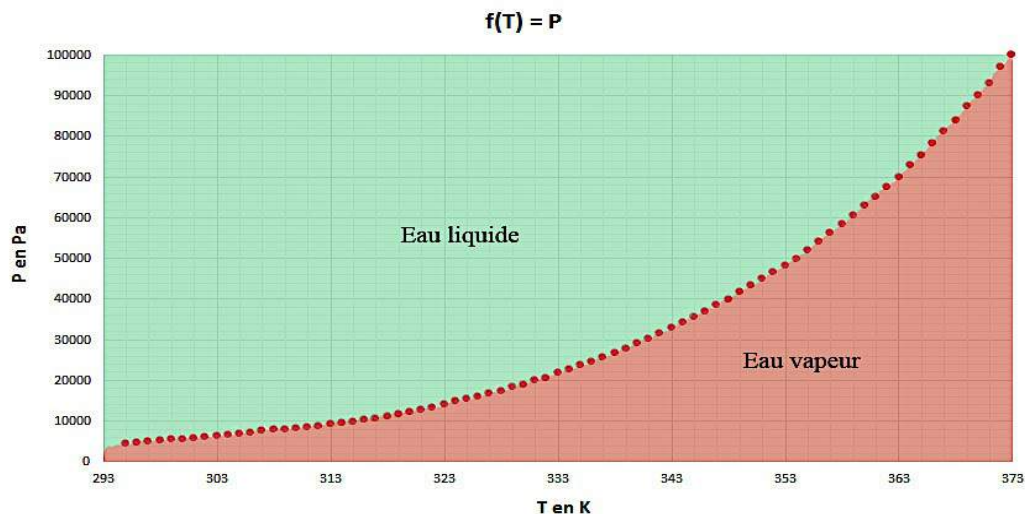
Montage « Ballons sous pression ! »



Après tous nos relevés (que la courbe ci-dessous retranscrit), nous avons vérifié que dans le ballon 2, l'eau était bien à l'équilibre liquide/vapeur. À l'aide d'un briquet, alors que la pression remontait très lentement, nous avons chauffé le fond du ballon. Dès que la température a augmenté à l'intérieur de celui-ci, l'eau qui s'était re-liquéfiée dans ce dernier depuis que le chauffe-ballon avait été retiré, s'est remise à bouillir. La température de l'eau liquide est légèrement inférieure à la température de transition liquide - vapeur à la pression considérée. Ainsi, on chauffe un peu et l'on observe une ébullition sous pression réduite. Nous sommes donc bien ici à l'équilibre entre l'état vapeur et l'état liquide.

Observations et remarques : Nous avons effectué, à chaque fois que la température variait d'un degré, un relevé de pression et de température. Ces relevés mettent en jeu un environnement rempli de vapeur d'eau, nous mesurons donc la pression de vapeur saturante. On convertit, les températures, initialement en degré Celsius (°C) en Kelvin (K).

Ainsi, les courbes obtenues correspondent à une portion du diagramme de phases de l'eau d'après le graphique ci-dessous :



Nous observons bel et bien une courbe de la température en fonction de la pression, servant de frontière entre les états gazeux et liquides de l'eau.

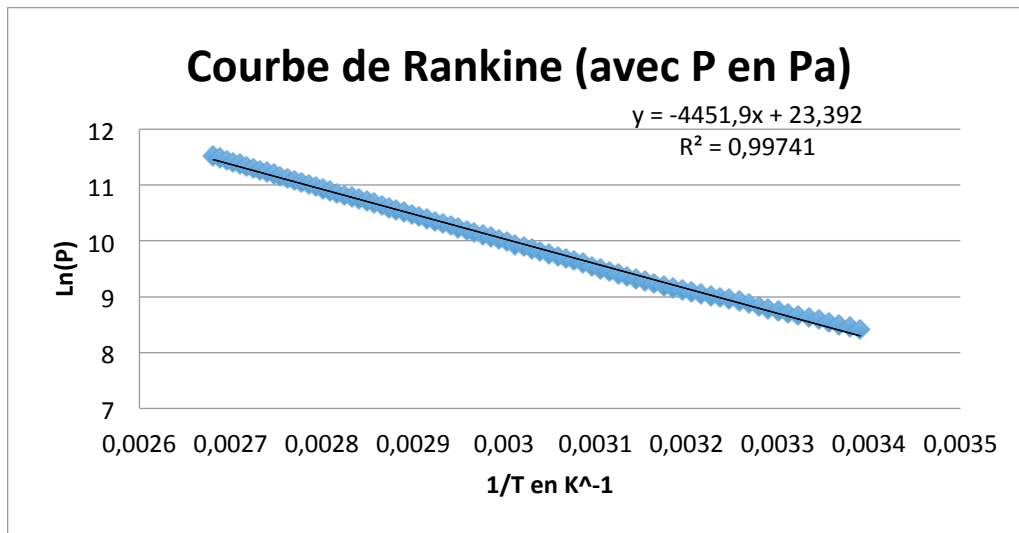
En phase avec l'eau !

Toutefois, comment s'assurer que cette courbe correspond réellement à une portion du diagramme de phases de l'eau ?

B – La courbe de Rankine :

Il nous est possible de vérifier la cohérence des données obtenues, en calculant la chaleur latente de vaporisation de l'eau³. Pour cela, on utilise le logarithme népérien, qui nous permet d'avoir une nouvelle échelle, plus "ramassée", de la pression, et on calcule $\frac{1}{T}$.

On trouve donc la courbe suivante : la courbe de Rankine. C'est une relation affine entre $\ln(P)$ et $\frac{1}{T}$.



Par régression linéaire, nous avons :

$$\ln(P) = -4,45 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{T} + 23,9 \quad \text{de la forme } \ln(P) = \frac{a}{T} + b$$

On définit L_v , la chaleur latente de vaporisation ;

$V_{m,vap}$ et $V_{m,liq}$, respectivement les volumes molaires de la vapeur et du liquide.

D'après l'équation de Clausius-Clapeyron qui décrit les changements d'états d'un corps pur on a :

$$L_v = T \cdot \frac{dP}{dT} \cdot (V_{m,vapeur} - V_{m,liquide}) \quad \text{en } J \cdot mol^{-1}$$

Or on sait que :

$$V_{m,vap} \gg V_{m,liq}$$

On peut ainsi négliger $V_{m,liq}$ devant $V_{m,vap}$.

De plus, on peut considérer la vapeur d'eau comme un gaz parfait :

$$P \cdot V_{m,vap} = R \cdot T$$

avec R, constante des gaz parfaits

$$P \cdot V_{m,vap} = R \cdot T$$

$$\Leftrightarrow V_{m,vap} = \frac{R \cdot T}{P}$$

³ L'énergie nécessaire pour que 1kg d'eau bouillante se transforme en vapeur d'eau (en $J \cdot kg^{-1}$)

$$\Leftrightarrow L_v = \frac{R * T}{P} * T * \frac{dP}{dT}$$

Or L_v varie peu, en 1ère approximation, nous négligeons sa variation :

$$\Leftrightarrow L_v = \frac{R * T^2}{P} * \frac{dP}{dT}$$

$$\Leftrightarrow L_v * dT = \frac{R * T^2 * dP}{P}$$

$$\Leftrightarrow \frac{L_v}{R * T^2} * dT = \frac{dP}{P}$$

Or, $\frac{-1}{T}$ a pour dérivée $\frac{1}{T^2}$ et $\ln(P)$ a pour dérivée $\frac{1}{P}$

On a ainsi :

$$\ln(P) = -\frac{L_v}{R} * \frac{1}{T} + \text{constante}$$

On peut ainsi en déduire :

$$L_v = R * a$$

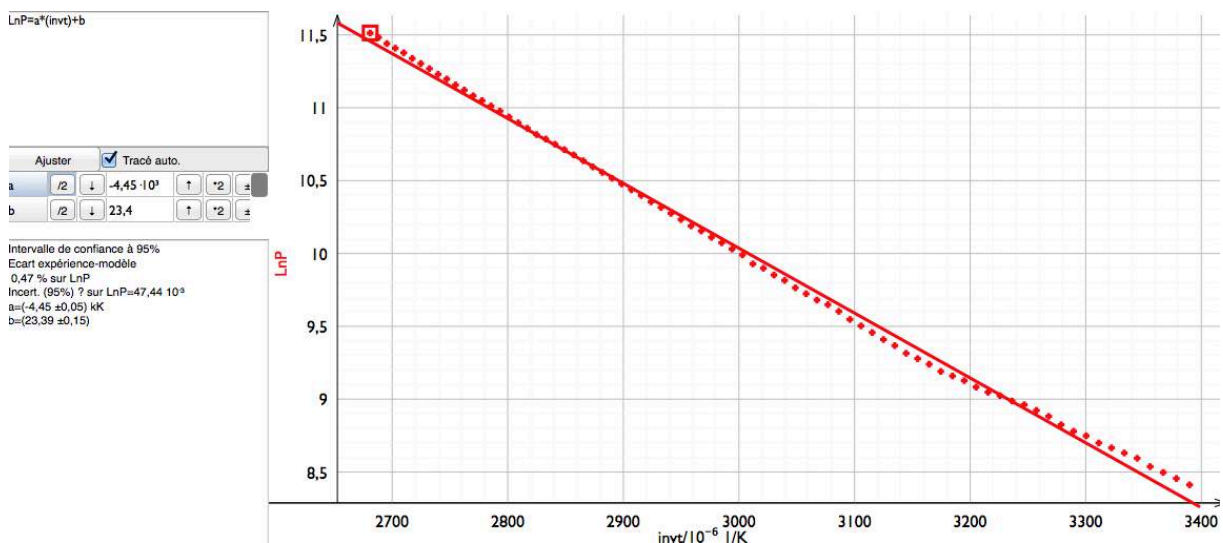
(avec « - a », coefficient directeur de la courbe de Rankine, tracée grâce à nos résultats d'expérience)

$$\begin{aligned} L_v &= a * 4,45 * 10^3 \\ &= 8,314 * 4,45 * 10^3 \\ &= 3,70 * 10^4 \text{ J. mol}^{-1} \end{aligned}$$

Pour convertir en J. kg^{-1} , on utilise la masse molaire de l'eau ($=18,0 * 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$).

$$\begin{aligned} L_v &= \frac{3,70 * 10^4}{18,0 * 10^{-3}} \\ &= 2,06 * 10^6 \text{ J. kg}^{-1} \end{aligned}$$

On détermine à l'aide de Regressi, les incertitudes de notre résultat, qui sont principalement sur notre coefficient directeur :



$a = (-4,45 \pm 0,05)$ (incertitude sur le coefficient directeur)
 $b = (23,39 \pm 0,15)$

En phase avec l'eau !

Grâce à la fonction Droite Reg sur Excel, et à l'utilisation du coefficient de Student, on a :
 $S_a = 25,84$

$$U(a) = 2 * S_a = 2 * 25,84 = 51,68 K$$

Comme : $L_v = R * a$

$$\begin{aligned} U(L_v) &= R * U(a) \\ &= 8,314 * U(a) \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned} L_v &= (3,70133 * 10^4 \pm 429,67) \text{ J. mol}^{-1} \\ &= (2,06 \pm 0,02) * 10^6 \text{ J. kg}^{-1} \end{aligned}$$

D'après les valeurs tabulées :

Entre 45°C et 100°C, la chaleur latente de vaporisation L_v varie de
 $2,39 * 10^6 \text{ J. Kg}^{-1}$ à $2,26 * 10^6 \text{ J. Kg}^{-1}$

Soit, en moyenne sur cet intervalle :

$$\begin{aligned} L_v \text{ moyenne (théo)} &\approx 2,33 * 10^6 \text{ J. Kg}^{-1} \\ L_v \text{ (calculée)} &= 2,06 * 10^6 \text{ J. Kg}^{-1} \end{aligned}$$

On calcule l'écart relatif : $\frac{L_v \text{ moyenne (théo)} - L_v \text{ (calculée)}}{L_v \text{ moyenne (théo)}} * 100 = 13\%$

L'expérience 3 a été concluante, puisque nous avons réussi à tracer une portion du diagramme de phases. Nous avons également pu vérifier nos résultats en exploitant les courbes obtenues : la chaleur latente de vaporisation calculée grâce à nos calculs est sensiblement égale à celle donnée dans les tables (avec un écart relatif de 13%).

Nous savons désormais qu'il est aisé de faire varier la pression de vapeur saturante. Sur le diagramme de phases nous pouvons voir un point précis autre que le point triple : le point de rosée qui se trouve sur la courbe de pression de vapeur saturante. Nous voulons déterminer ce point de rosée qui est une température.

III – Des points grâce à la courbe de pression de vapeur saturante :

A – Détermination du point de rosée :



Expérience 4 : La rosée mesurée !

Le but de cette expérience est de mesurer et de mettre en évidence la température du point de rosée : lorsque l'eau passe de l'état vapeur à l'état liquide.

Le point de rosée est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser (car l'air s'est refroidi à pression constante). Lorsque nous allons dans un jardin tôt le matin, on peut observer facilement cette rosée (sous forme de gouttes d'eau) sur l'herbe. Pendant la nuit, l'air se refroidit, l'eau à l'état gazeux se condense et se transforme en liquide. On dit alors que l'air est saturé. Lorsque la différence entre la température de l'environnement et la température de rosée est grande, l'air est sec et l'humidité relative, faible.

Ce point de rosée est donc une caractéristique d'un gaz qui dépend du taux d'humidité de celui-ci. Plus l'humidité du gaz est importante, plus le point de rosée est élevé.

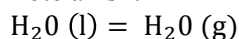
L'humidité relative U_h de l'air est reliée à la pression de vapeur saturante de l'eau e_w et à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air e par cette relation :

$$U_h = \frac{e}{e_w} * 100$$

La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est la pression de la vapeur d'eau dans le cas où elle occuperait seule tout le volume disponible.

La pression de vapeur saturante ou tension de vapeur est la pression pour laquelle la phase gazeuse d'une espèce, ici l'eau, est en équilibre avec sa phase liquide. Cette pression ne dépend que de la température de l'espace vide fermé et ne dépend donc pas de la masse d'eau liquide ni du volume de l'enceinte. En effet, lorsqu'on introduit de l'eau liquide dans un espace vide et fermé, de la vapeur d'eau se forme car des molécules quittent la surface liquide. C'est à la surface liquide que se produit l'évaporation. En effet, les interactions (ici les liaisons hydrogène) entre molécules d'eau sont plus faibles : celles-ci passent dans la phase vapeur, s'échappant du liquide.

Lorsque le nombre de molécules d'eau à l'état gazeux augmente, le nombre de molécules qui s'entrechoquent et se collent à la partie liquide augmente aussi. On en vient donc à la conclusion qu'à chaque seconde, le nombre de molécules se condensant est égal au nombre de molécules d'eau qui s'échappent de cette partie liquide. L'eau se condense ainsi aussi vite qu'elle s'évapore, on dit alors que l'eau est en équilibre dynamique⁴, on note ainsi :



Lorsque l'eau vapeur est en équilibre dynamique avec l'eau liquide, la pression exercée par la vapeur sur l'eau liquide est appelée pression de vapeur saturante. La pression relevée au cours de l'expérience 3 est donc la pression de vapeur saturante de l'eau. En traçant la frontière liquide-vapeur du diagramme de phases de l'eau, nous avons tracé la variation de la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température.

Dans l'air, l'eau se condense lorsque l'humidité relative vaut 100% donc lorsque la pression partielle de vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante.

Explication du choix de matériel et protocole :

Nous avons décidé de créer nous-mêmes un montage expérimental en nous inspirant de deux références : le site *Radiosonde* et l'ouvrage *Météorologie Belin pour la Science*. Nous avons donc mis au point un montage et un protocole, qui nous permettent de déterminer la température de rosée en fonction de l'humidité relative.

L'aquarium (voir photo p.17) nous permet de contrôler les facteurs influant sur notre système. Nous étudions ainsi un volume réduit par rapport à celui du laboratoire, isolé de l'air extérieur par la présence d'un film plastique, ce système est donc hermétique. En conséquence, nous pouvons contrôler l'humidité environnante. Néanmoins, ce montage présente des limites : nous ne pouvons pas faire varier la pression. Nous travaillons donc uniquement avec la pression atmosphérique et pour ce qui est de la température, il est difficile de la faire varier significativement car l'aquarium ne permet pas d'annuler les échanges thermiques avec l'extérieur de notre montage.

Le thermomètre et l'hygromètre sont tous les deux posés à l'intérieur de notre aquarium, nous permettant d'avoir les conditions initiales du montage.

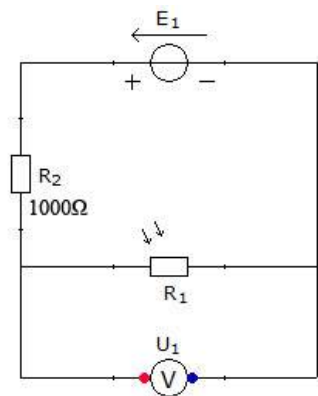
⁴ Dire que deux espèces sont en équilibre dynamique revient à dire que les produits (ici les molécules d'eau en phase gazeuse) se forment à partir des réactifs (ici les molécules d'eau en phase liquide), et ce, à la même vitesse que la réaction inverse.

En phase avec l'eau !

Pour faire varier l'humidité, nous avons positionné une éponge à l'intérieur de l'aquarium. On peut ainsi augmenter l'humidité considérablement (de 43% à 84 %).

La boîte de conserve fait office de miroir de rosée. Tout d'abord, nous y mettons de l'eau, puis nous le plaçons dans notre aquarium. C'est sur ce miroir que l'on va pouvoir observer le phénomène de condensation ; en effet, c'est une surface lisse qui réfléchit les rayons lumineux. Nous faisons varier la température du miroir de rosée, en mettant à l'intérieur de la boîte de conserve des mélanges ayant des températures différentes. Ceux-ci nous permettent d'obtenir sur la paroi de la boîte de conserve de la rosée et de la gelée blanche (c'est en tous les cas, notre objectif premier).

Le thermocouple nous permet de mesurer la température du miroir de rosée, il est fixé sur la paroi du miroir de rosée (la boîte de conserve) grâce à du scotch et de la pâte thermique. Elle nous permet de limiter les échanges thermiques avec l'air et d'avoir une température plus précise. La sonde du thermocouple doit être au plus près de la zone de réflexion sans toutefois recevoir les rayons lumineux, afin de limiter l'échauffement.



On projette un rayon sur la paroi de notre miroir de rosée et celui-ci se réfléchit sur une photorésistance. Nous avons mis en place un montage électrique que l'on peut appeler « montage photorécepteur ». C'est un montage en série composé d'un générateur réglé sur 10 Volts (V) et d'une photorésistance. Cette photorésistance est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée ici, la lumière est le rayon réfléchi). On a ajouté une résistance de 1000 Ohms au montage, elle nous permet d'optimiser la sensibilité de notre photorésistance.

Un voltmètre est branché en parallèle avec la photorésistance afin de pouvoir vérifier en temps réel la tension aux bornes de celle-ci.

Lorsque la rosée apparaît sur le miroir, l'intensité du faisceau lumineux réfléchi est plus faible car ce dernier est diffusé. Ainsi, La tension aux bornes de la résistance varie.

Mise en route de l'expérience :

Nous utilisons le logiciel Synchronie, qui nous permet d'enregistrer des tensions au cours du temps. Les grandeurs mesurées sont la tension aux bornes de notre thermocouple (courbe 1) d'une part, et la tension aux bornes de la photorésistance (courbe 2) d'autre part. Ces deux grandeurs sont relatives au temps.

Interface d'acquisition :

- ◇ Tension aux bornes de la photorésistance par la voie EA1 que l'on a appelé UR
- ◇ Tension aux bornes du thermocouple par la voie EA0 que l'on a appelé TK

Paramètres :

- ◇ EA1 auto : UR
- ◇ EA0 : TK
- ◇ Durée totale : 600 s

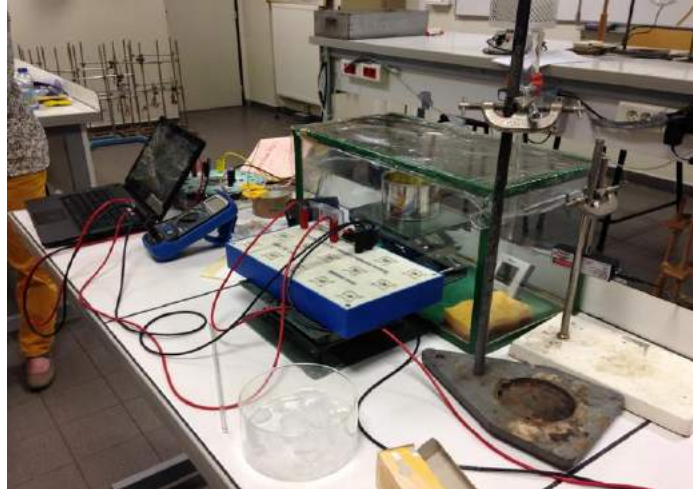
Lancement de l'expérience :

- ◇ Attendre quelques minutes que l'éponge humidifiée augmente l'humidité de l'air dans l'aquarium (durée à attendre selon la valeur d'humidité de l'air souhaitée).
- ◇ Allumer le laser.
- ◇ Verser un peu d'eau dans la boîte de conserve
- ◇ Mettre en route l'acquisition
- ◇ Attendre 30 secondes afin que la courbe se stabilise

- ◇ Introduire plusieurs glaçons dans la boîte de conserve et agiter à l'aide du thermomètre.

Note : l'expérience est optimale si elle est effectuée dans l'obscurité.

La rosée ne tarde pas à apparaître sur les parois de la boîte de conserve et la tension aux bornes de la photorésistance augmente.



Montage expérimental : le miroir de rosée

Exploitation de l'acquisition :

Regressi est un logiciel qui nous permet d'exploiter les résultats acquis grâce à Synchronie, il présente un avantage par rapport à Excel car il permet de représenter sur le même graphique deux courbes d'échelle et d'ordonnée différentes (ici la tension et la température), une à droite et une à gauche. On a ainsi la possibilité de construire deux courbes en même temps et de les mettre en parallèle.

Courbe 1 : UR (V) en fonction de t (s)

Courbe 2 : θ (°C) en fonction de t(s)

On a ici en abscisse le temps en seconde, et en ordonnée : UR en Volt (V) qui est la tension enregistrée aux bornes du thermocouple ainsi que la température θ en degré celsius (°C).

Il nous a ainsi fallu enregistrer la tension aux bornes de notre thermocouple. Une fois convertie, cette tension nous permettra d'obtenir la température des parois de la boîte. Dans le cas de notre sonde de type K voici la fonction affine qui nous permet de convertir notre tension en température :

La fonction mathématique de la température :

D'après le constructeur,

Une tension de -5 V correspond à une température de -40°C

Une tension de +5 V correspond à une température de 120°C

Peut obtenir une fonction mathématique de la température en fonction de la pression d'après la relation :

$$T = a * U + b$$

On cherche alors à déterminer a et b :

$$-40 = a * (-5) + b \quad (\text{relation 1})$$

$$120 = a * 5 + b \quad (\text{relation 2})$$

D'après la relation (1):

$$-b - 40 = a * (-5)$$

$$\frac{-b - 40}{-5} = a$$

En phase avec l'eau !

On peut ainsi exploiter la relation (2) :

$$120 = \frac{-b-40}{-5} * 5 + b$$
$$\leftrightarrow 120 = b + 40 + b$$

$$\leftrightarrow 80 = 2 * b$$

$$\leftrightarrow b = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Donc : } a = \frac{-40-40}{-5} = \frac{80}{5} = 16 \text{ V}^\circ\text{C}^{-1}$$

Ainsi, la fonction mathématique de la température en fonction de la pression est :

$$T = 16 * U + 40$$

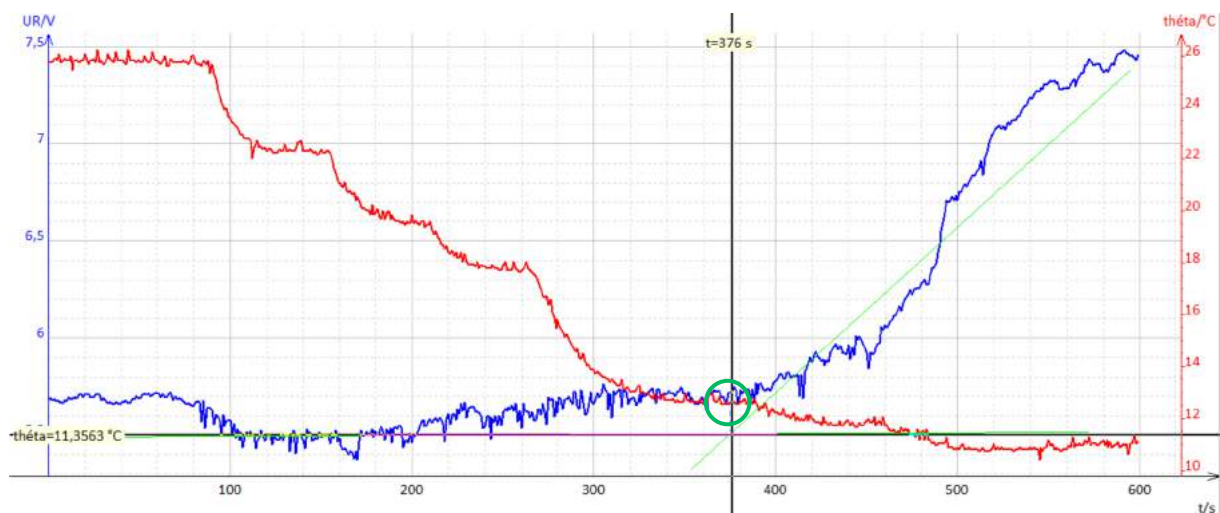
Nous sommes désormais en mesure de faire des relevés de température précis en fonction de la tension relevée aux bornes de la photorésistance. L'expérience peut alors commencer.

a – Première exploitation : 43% d'humidité

Conditions initiales : 25,8°C pour 43% humidité

À l'aide de Regressi, nous retrouvons la courbe suivante. Elle a été tracée selon les conditions initiales de 43% d'humidité et d'une température de 25,8°C au sein de l'aquarium.

Notre objectif étant de trouver à quelle température correspond le point de rosée, nous cherchons le moment pour lequel le miroir de rosée est sujet à un phénomène de condensation, faisant varier la tension aux bornes de la photorésistance. En effet, lorsque de l'eau apparaît sur les parois du miroir de rosée, l'intensité lumineuse diminue et la tension augmente. Nous cherchons sur la courbe représentative de la tension (ici, courbe bleue) le point à partir duquel celle-ci augmente. En traçant deux droites, l'une horizontale, représentant le palier de tension (avant de mettre des glaçons), l'autre, courbe de tendance représentant l'augmentation radicale suivant l'introduction des glaçons. Le but est de trouver le point d'intersection des deux droites et d'en trouver l'abscisse. A cette abscisse, on peut lire la température qui est donc la valeur de la température de rosée.



11,3 °C

Courbe obtenue (25,8°C pour 43% d'humidité)

Dans le cas présent, la température du point de rosée est de 11,3°C

Dans les tables, le point de rosée pour de telles conditions initiales est de 12,19°C.

On peut donc calculer l'écart relatif entre nos valeurs expérimentales et les valeurs tabulées, afin d'estimer une incertitude :

$$\text{Écart relatif} = \left| \frac{12,19 - 11,3}{12,19} \right| * 100 = 7 \%$$

Le point que nous avons trouvé a donc une très faible incertitude. Nous pouvons conjecturer que nos valeurs sont cohérentes.

Cette expérience nous permet également de compléter la courbe de la pression en fonction de la température, obtenue au cours de l'expérience 3 ("Ballons sous pression !").

Nous pouvons à présent calculer la pression partielle de vapeur selon les tables :

$$\begin{aligned} &\text{À } 25,8^\circ\text{C} : \\ &e_w = 24,91 \text{ mmHg} \\ &\leftrightarrow e = 0,43 * 24,91 = 10,7 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

On convertit les données qui sont exprimées en hPa en mmHg (millimètre de Mercure).

$$\begin{aligned} &\text{Sachant que :} \\ &1013 \text{ hPa} = 760 \text{ mmHg} \\ &e = 14,26 \text{ hPa} \end{aligned}$$

On sait que lorsque le point de rosée est atteint, $e = e_w$;
donc à $12,2^\circ\text{C}$,

$$e_w = 14,26 \text{ hPa} = 10,7 \text{ mmHg}$$

D'après le Handbook, lorsque le point de rosée est à $12,2^\circ\text{C}$, $e_w = 10,66 \text{ mmHg}$, on convertit :

$$e_w = \left| \frac{10,66 * 1013}{760} \right| = 14,21 \text{ hPa}$$

$$\text{Écart relatif} = \frac{14,26 - 14,21}{14,26} * 100 = 0,4\%$$

L'incertitude est extrêmement faible. Nous pouvons ainsi confirmer la position de nouveaux points sur le diagramme de phases d'après nos valeurs expérimentales :

$$(12,2^\circ\text{C} ; 14,21 \text{ hPa}) \text{ ou } (12,2^\circ\text{C} ; 10,66 \text{ mmHg})$$

L'humidité de l'air est, en moyenne, proche de 40%. Cependant, dans quelle mesure l'humidité influence-t-elle notre température de rosée ?

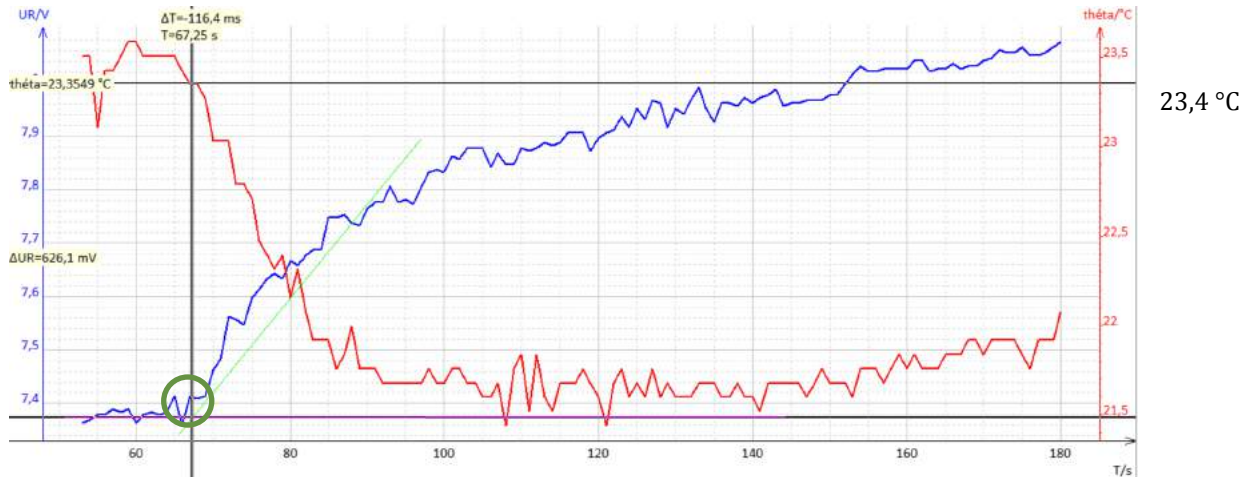
Comment varie la température du point de rosée dans un environnement extrêmement humide ?

En phase avec l'eau !

b – Deuxième exploitation : 84% d'humidité

Conditions initiales : 26,6°C pour 84% humidité

Nous avons réalisé la même expérience dans des conditions initiales différentes : à 26,6°C, pour 84% d'humidité dans l'air. Cela nous permet de comprendre à quelle température la rosée apparaît lorsque l'air environnant est presque sursaturé en eau. La courbe obtenue sur Regressi est la suivante :



Dans le cas présent, la température du point de rosée est 23,4°C.

Dans les tables, le point de rosée pour de telles conditions initiales est de : 23,7°C.

Pour évaluer notre incertitude, nous calculons l'écart relatif :

$$\text{Écart relatif} = \left| \frac{23,7 - 23,4}{23,7} * 100 \right| = 1 \%$$

On peut maintenant étudier la pression de vapeur saturante e_w et la pression partielle de vapeur e .

Selon, les tables, à 26 °C, $e_w = 35$ hPa, d'où :

$$e = 0,84 * 35 = 29,4 \text{ hPa}$$

Selon les tables, à 23,5°C,

$$e_w = 29 \text{ hPa} = 21,8 \text{ mmHg.}$$

Au point de rosée, la pression de vapeur saturante de l'eau est égale à la pression partielle de l'eau dans l'air ; donc à 23,5°C,

$$e = 29 \text{ hPa.}$$

De même que pour l'exploitation précédente, nous calculons l'écart relatif :

$$\text{Écart relatif} = \frac{(29,4-29)}{29,4} * 100 = 1,4\%$$

Nous avons donc un dernier point : (23,5°C ; 29,4 hPa) ou (23,5°C ; 21,8 mmHg)

Pour ces deux expériences, nous avons plusieurs sources d'incertitudes, notamment sur l'efficacité de la photo-résistance, l'hygromètre, et le thermocouple. Cette dernière est néanmoins la seule estimable à notre échelle. Grâce aux indications du constructeur, nous savons que l'incertitude est de $\pm 0,15^\circ\text{C}$.

$$\text{D'où : } u(T) = \frac{0,15}{\sqrt{3}} \leftrightarrow U(T) = 2 * u(T) = \frac{0,30}{\sqrt{3}} \text{ } ^\circ\text{C}$$

B – Point de gelée blanche :

Nous allons donc chercher à obtenir un dépôt de glace sur notre miroir de rosée mais pas n'importe lequel.

Il ne faut pas confondre le givre et la gelée blanche, ils ont tous les deux un aspect similaire, un dépôt de glace, et pourtant ce sont des résultats de différents changements d'état.

La gelée blanche est un dépôt de glace qui résulte de la condensation à l'état solide de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Elle se forme sur des surfaces extérieures lorsque l'air environnant est saturé et que la surface est déjà à une température inférieure à 0°C . Au contact de la surface froide, l'eau contenue dans l'air se condense à l'état solide, le passage de l'état gazeux à l'état solide est direct. L'air contenant de la vapeur d'eau est donc considérablement refroidi durant la nuit près d'une surface solide comme une feuille, donc l'eau contenue dans l'air atteint son point de gelée sans passer par une température plus basse, en dessous de 0°C . Contrairement au givre, elle ne fait pas intervenir le phénomène de surfusion. Ce que l'on voit en un matin d'hiver apparaître sur les pare-brises d'une voiture laissée toute la nuit en extérieur correspond donc à de la gelée blanche et non à du givre contrairement à ce que l'on pense.

En effet, le givre correspond à la congélation de microgouttelettes d'eau contenues dans l'air, l'eau est donc déjà à l'état liquide. Fréquemment ces gouttelettes sont en surfusion, c'est à dire qu'elles sont toujours à l'état liquide alors que l'air est en dessous de 0°C . On sait qu'avec ses propriétés de surfusion, l'eau peut rester liquide jusqu'à -39°C si celle-ci ne rencontre pas de noyau de congélation⁵.

Dans le cas de l'obtention de notre point de gelée, nous allons donc chercher à obtenir de la gelée blanche et non du givre. Pour cela nous avons apporté des modifications nécessaires à notre montage : nous avons remplacé le mélange refroidissant le miroir de rosée constitué d'eau et de glaçon par de l'antigel. L'antigel nous permet ainsi de refroidir les parois de la boîte en dessous de 0°C , une des conditions nécessaires pour atteindre la gelée blanche sans passer par le point de rosée. Avec ce montage, nous nous éloignons des conditions naturelles d'obtention de la gelée blanche.

Nous avons réalisé l'expérience et nous avons obtenu une allure de courbe similaire à celles qui nous ont permis de calculer le point de rosée, même si ici la température descend jusqu'à -5°C . Cependant nous n'avons pas pu tirer des conclusions de cette expérience.

En effet, les conditions initiales de notre expérimentation ne correspondent pas exactement aux conditions de formation de gelée blanche. De plus, l'aspect du dépôt de glace ne nous permet pas de dire que nous avons obtenu de la gelée blanche, il se pourrait que cela soit du givre. Nous sommes donc peut-être passés par l'état liquide entre l'état gazeux et l'état solide. Cela voudrait dire que nous n'avons pas réussi à atteindre notre température de point de gelée.

Pour être sûres que nous avons bien obtenu le point de gelée et non un autre point au moment où la courbe de tension augmente, il faudrait tout d'abord que toutes les conditions initiales nécessaires à la formation de gelée blanche soient réunies dans notre montage. On pourrait aussi augmenter la sensibilité de notre montage photorécepteur à la différence d'éclairement. Tel qu'il est réalisé pour le moment, nous ne pouvons observer de différence entre rosée et gelée blanche ou givre. La tension aux bornes de la photorésistance ne varie pas de façon notable lorsque la rosée se transforme en givre. Nous aimerions compléter notre montage par des capteurs de lumière diffusée.

⁵ Toute micro matière qui favorise la formation de cristaux de glace, d'où le rôle de la poussière dans la formation d'un flocon de neige.

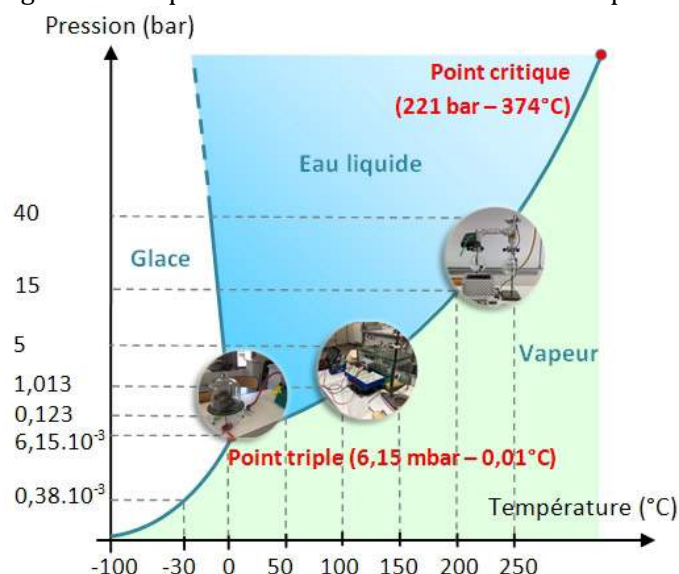
En phase avec l'eau !



Conclusion :

L'état de l'eau varie en fonction de la température et de la pression, ce qui est décrit dans le diagramme de phases de l'eau. Il est possible, à notre échelle, d'observer de l'eau liquide, solide, gazeuse. Nous portons cependant peu d'attention aux changements d'états. Ainsi, en travaillant dans une chambre de diffusion, il nous a été permis de contempler la formation de flocons. Bien que certaines propriétés de l'eau nous restent toujours inconnues, nous avons été capables d'observer ses multiples manifestations et de lever le voile sur certains des mystères de cette molécule si particulière.

L'eau étant difficilement observable sous tous ses états à notre échelle, les Olympiades de Physique nous ont permis de mener une véritable démarche scientifique de groupe et de faire face à nos difficultés en usant de créativité. Nous avons découvert la joie liée à l'aboutissement d'une expérience ainsi que les nombreuses idées et calculs accompagnant les prochaines expérimentations le cas échéant. Il était enrichissant de rendre concrète une idée et de trouver les rouages d'une manifestation éphémère telle que la rosée. Nous avons donc pu nous familiariser avec le diagramme de phase de l'eau en recréant certaine partie de celui-ci.



Certains points restent toujours en suspens. Peut-être serons-nous, un jour, en mesure de siroter notre boisson préférée, agrémentée de quelques glaçons de glace VI (décrits par M. Itié), qui, plus denses que l'eau, s'agiteront dans le fond de notre verre.

En phase avec l'eau !



ANNEXES



Remerciements :

Pendant cette aventure que sont les Olympiades de Physique, nous avons été aidées par de nombreuses personnes, sans qui rien de tout cela n'aurait pu être effectué et trouvé. En premier lieu, un grand merci à Madame Brigitte PIVETEAU, qui nous a supervisées, aidées, rectifiées, encouragées, mais qui, surtout, nous a permis de nous lancer dans cette expérience enrichissante et intéressante. Nous devons tout ce travail à Madame Piveteau, et pour cela, nous la remercions profondément.

Un grand merci également à Monsieur Vincent JACQUES, chercheur au CNRS dans le laboratoire de Physique des Solides de l'université d'Orsay, que nous avons rencontré et avec qui nous avons échangé suite à sa conférence sur les cristaux. Il nous a soutenues et aidées pour les protocoles de plusieurs expériences ; sans lui, nous n'aurions pas réussi à réaliser des expériences aussi probantes.

Nous souhaitons également remercier Jean-Paul ITIÉ, qui a tenu une conférence très intéressante (« *Cristallographie sous conditions extrêmes de pression* »), et qui nous a ainsi permis de comprendre et d'exploiter plusieurs notions.

Merci à toutes les personnes de l'École ayant travaillé avec nous au laboratoire, pour nous aider, et nous conseiller.

Enfin, nous tenons à remercier le Comité des Olympiades, qui organise ce concours chaque année, qui nous permet d'apprendre, d'expérimenter, de nous surpasser et de nous amuser ; c'est grâce au Comité des Olympiades que nous avons pu mener à bien notre projet et financer nos expériences.

En phase avec l'eau !



Bibliographie :

Livres :

- *Snow crystals, natural and artificial*, Cambridge : Harvard University Press, 1954
- *Introduction à la météorologie*, G. Gremaud, Presses EPFL, 2006
- *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, publié à l'origine en 1964
- *Météorologie*, Yves Corboz, Belin pour la Science, 2008

Sites Internet :

- www.snowcrystals.com
- www.intra-sciences.anaisequey.com
- www.radiosonde.eu/RS03/RS03L02.html