

Notice

La molécule d'eau

Des propriétés physiques et
chimiques étonnantes

Réf. 21220



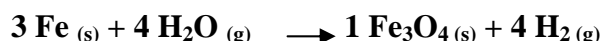
DVD scientifique et pédagogique de 25 minutes environ.

Ce film illustre le programme des collèges et des lycées, en le complétant pour une utilisation plus générale. C'est un outil de culture et de vulgarisation.

1. Introduction historique : expérience de Lavoisier

Séquence 1 : décomposition de la molécule d'eau par le fer

On chauffe de l'eau dans un ballon ; la vapeur d'eau réagit avec la paille de fer portée au rouge dans le tube en verre. La sortie du tube est reliée à un tube à gaz, rempli d'eau, dans une cuve à eau. Après chauffage énergique de la paille de fer, on recueille un gaz que l'on enflamme : le dihydrogène ; la paille de fer s'oxyde et noircit localement.

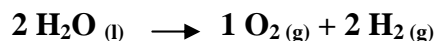


Durée : 1 min 40 sec

2. Composition de la molécule d'eau

Séquence 2 : électrolyse en courant continu

On a rempli le voltamètre de Hoffmann avec de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique. Un courant continu d'intensité $I=0,97$ A décompose l'eau en 2 dégagements gazeux. Le volume gazeux dégagé, en 83 s, à la borne négative du générateur est le double de celui dégagé à la borne positive (10 mL pour 5 mL). Le gaz formé à la borne négative s'enflamme avec une petite explosion : c'est du dihydrogène H_2 . Le gaz formé à la borne positive rallume un point incandescent : c'est du dioxygène O_2 . On continue jusqu'à 6 min 39 s et on peut vérifier que chaque volume est proportionnel à la durée, mais qu'il y a toujours 2 fois plus de dihydrogène que de dioxygène.



Application

Durée	t (s)	0	83	162	244	325	399
Volume H_2	V H_2 (mL)	0	10	20	30	40	50
Volume O_2	V O_2 (mL)	0	5	10	15	20	25

Calcul du Faraday : $2 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- = 1 \text{H}_2(\text{g})$

Utilisons la dernière mesure : 50 mL de dihydrogène représente $0,050 \text{ L} / 24 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1} = 0,00208 \text{ mol}$; la quantité de matière d'électrons est le double : 0,00416 mol.

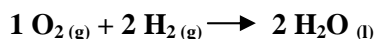
Le nombre de coulomb passé est de $I\cdot t = 0,98\cdot 399 = 391 \text{ C}$.

La charge molaire Faraday égale $391 \text{ C} / 0,00416 \text{ mol} = 94000 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ pour $6,02\cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 1,6\cdot 10^{-19} \text{ C} = 96300 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$

Durée : 2 min 10 sec

Séquence 3 : synthèse de l'eau

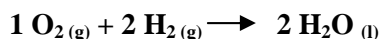
On obtient du dihydrogène par action d'acide chlorhydrique sur du zinc, on le sèche par passage à travers de l'acide sulfurique concentré et on l'enflamme dans le dioxygène de l'air ; la vapeur d'eau obtenue se condense sur la paroi froide d'un miroir. Cette expérience est dangereuse si on n'a pas bien purgé l'air dans le montage !



Durée : 50 sec

Séquence 4 : synthèse stœchiométrique

On enflamme des bulles contenant le mélange stœchiométrique (2 volumes de dihydrogène pour un volume de dioxygène) obtenu par électrolyse en courant alternatif 50 Hz d'une solution aqueuse d'acide sulfurique. Les petites bulles explosent avec un bruit sec. Ce mélange gazeux est très dangereux !



Durée : 40 sec

Séquence 5 : structure de la molécule

On montre un modèle compact et un modèle éclaté de la molécule d'eau avec 2 atomes H et un atome O.

La liaison covalente, par mise en commun d'un électron de l'atome d'oxygène O et d'un électron venant de l'atome d'hydrogène H, est très solide ; ceci explique la stabilité remarquable de la molécule d'eau H₂O.

Le modèle de la molécule d'eau, avec l'atome d'oxygène où figurent les 2 doublets d'électrons liants et 2 doublets d'électrons non liants (4 directions tétraédriques), explique sa forme triangulaire. La molécule d'eau n'est pas en ligne droite comme la molécule de dioxyde de carbone CO₂ à cause de la présence des deux doublets d'électrons non liants.

Durée : 40 sec

3. Propriétés étonnantes

Séquence 6 : la molécule d'eau est polaire

Un filet d'eau est attiré aussi bien par un bâton d'ébonite chargé négativement (frotté par de la peau de chat) que par du verre chargé positivement (frotté par de la laine). Il n'y a aucune action sur un filet de cyclohexane. On explique cette différence par la présence d'un dipôle électrostatique dans la molécule d'eau.

Dans la molécule d'eau, l'atome d'oxygène O a tendance à attirer plus fortement les électrons qu'un atome d'hydrogène H. La charge négative des électrons engagés dans les liaisons n'est donc pas répartie de manière équitable entre les atomes d'hydrogène H et d'oxygène O. Le barycentre des charges négatives est plus proche de l'atome O que le barycentre des charges positives : c'est le dipôle électrostatique de la molécule d'eau.

Conséquence : la liaison « par pont hydrogène » entre les molécules

Ce dipôle électrique va permettre aux molécules d'eau de s'attirer et de se lier les unes aux autres : chaque molécule d'eau se lie à quatre autres molécules d'eau.

Ces liaisons, dues à la polarité, s'établissent entre les atomes d'hydrogène de certaines molécules d'eau et les atomes d'oxygène de molécules d'eau voisines. On les appelle « des liaisons par pont hydrogène » : elle est environ dix fois moins solide que la liaison covalente. La présence des liaisons par pont hydrogène explique les propriétés « bizarres » de H₂O comparée aux corps voisins (H₂S et H₂Se).

Durée : 1 min 10 sec

Séquence 7 : l'eau est un bon solvant, souvent ionisant

On compare la richesse en ions de l'eau distillée, l'eau sucrée et l'eau salée avec le montage GBF et Ht Parleur qui va donner une intensité sonore croissante avec l'abondance des ions. La présence de liaisons polarisées dans l'eau et dans le saccharose permet de comprendre la bonne solubilité du sucre dans l'eau et l'absence d'ions (intensité du courant peu importante). La présence de liaisons polarisées dans l'eau et d'ions liés dans le cristal ionique permet de comprendre la bonne solubilité du sel dans l'eau et la présence de beaucoup d'ions sodium et chlorure libres de se déplacer (intensité forte du courant).

Durée : 1 min

Séquence 8 : la potabilité et les eaux minérales

On montre, en ligne, de l'eau distillée, de l'eau de Volvic, de l'eau d'Evian, de l'eau du robinet, de l'eau Hépar et de l'eau de mer : eaux classées par richesse croissante en ions.

Une eau potable est une eau limpide et sans odeur, bactériologiquement pure, avec peu de sels minéraux.

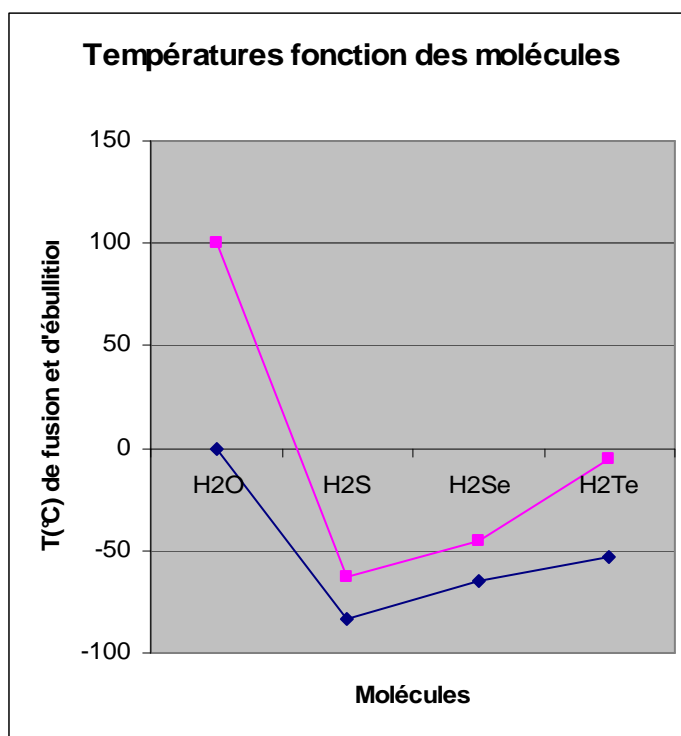
Par exemple les teneurs maximales autorisées sont de :

- 250 mg/L pour l'ion sulfate
- 250 mg/L pour l'ion chlorure
- 150 mg/L pour l'ion sodium
- 50 mg/L pour l'ion nitrate
- 0,1 mg/L pour l'ion nitrite
- 12 mg/L pour l'ion potassium
- 1,5 mg/L pour l'ion fluorure

Durée : 30 sec

Séquence 9 : température de fusion et température d'ébullition à pression atmosphérique

L'action de l'acide chlorhydrique sur le sulfure de fer produit du sulfure d'hydrogène gaz à odeur d'œufs pourris. On montre le gaz H₂S qui brûle et on refroidit, dans l'azote liquide, pour voir le liquide. L'eau est liquide entre 0 °C et 100 °C, alors que pour H₂S cela va de -83 °C à -63 °C, H₂Se de -65 °C à -45 °C et H₂Te de -53 °C à -5 °C.



L'eau devrait être liquide entre -120°C et -90°C d'après le graphique. On explique les valeurs anormales de la température de fusion et celle d'ébullition par la présence de nombreuses « liaisons par pont hydrogène » qui maintiennent entre elles les molécules d'eau. Il faut que l'agitation thermique (qui augmente avec la température des corps) soit plus importante pour casser ces liaisons.

Durée : 1 min 20 sec

Séquence 10 : masse volumique de la glace

On place un glaçon d'eau dans un bécher d'eau liquide, un glaçon de cyclohexane dans un bécher de cyclohexane et un glaçon d'alcool méthyl-2-butan-2-ol dans un bécher d'alcool méthyl-2-butan-2-ol : seul celui d'eau flotte !

On mesure la masse volumique de l'eau liquide avec un pycnomètre de 50mL : on fait la tare sur la balance et on repèse après remplissage: $\rho_1 = 1,0 \text{ g/cm}^3$.

Une seringue bouchée de $V_1=15 \text{ mL}$ d'eau a son piston décalé à $V_2=16,5 \text{ mL}$ par la glace :

Masse = $\rho_1 * V_1 = \rho_2 * V_2$; d'où $\rho_2 = 0,91 \text{ g/cm}^3$ pour la glace. Le modèle de la glace montre un ensemble rigide où chaque atome d'oxygène est au centre d'un tétraèdre dont les sommets sont occupés par les atomes d'oxygène O des quatre molécules d'eau voisines.

Dans l'eau liquide, l'agitation thermique est importante et permet aux liaisons « par pont hydrogène » de se tordre, donnant aux molécules d'eau une certaine liberté de mouvement. Dans la glace, l'agitation thermique des molécules d'eau est moins importante : les molécules ne peuvent plus changer de position, elles ne peuvent que vibrer autour de cette position. Ce modèle montre beaucoup de cavités.

Conséquences :

On place une grenade en fonte remplie d'eau liquide dans l'azote liquide à -191°C ; on protège par la plaque de plastique. Une explosion a lieu au bout de 2 à 3 minutes ; l'augmentation de volume de l'eau a fait exploser la fonte.

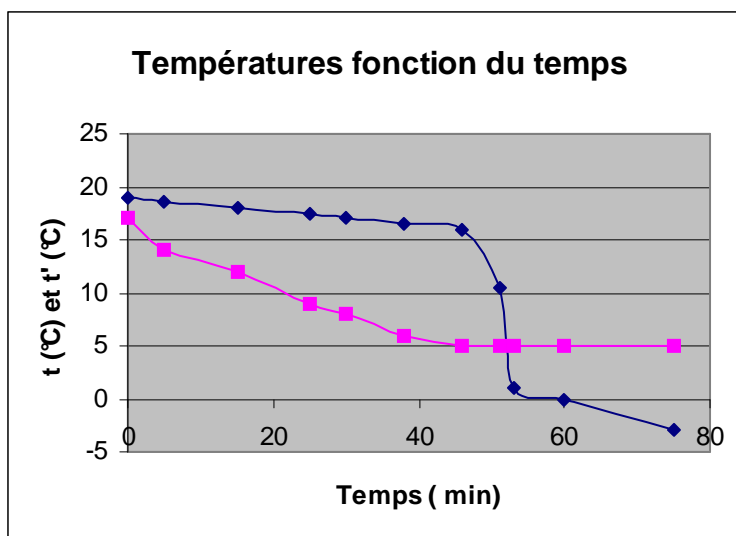
De la même façon, les cellules végétales sont détruites par le gel. On place une rose dans l'azote liquide, puis on la broie dans la main

Durée : 4 min

Séquence 11 : maximum de la masse volumique de l'eau liquide

Expérience de Hope

Dans un tube avec un thermomètre en bas et un thermomètre en haut, on met de l'eau à température ambiante. Dans la rigole, à mi-hauteur, on place de la glace pilée et du sel pour refroidir l'eau. On note les 2 températures en fonction du temps : celle t' du bas va décroître vers $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et ne plus changer alors que celle du haut t baisse de $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et même en dessous de zéro (sursufusion) si on a beaucoup de mélange réfrigérant. Un germe de glace permet la cristallisation à la fin.



La densité de l'eau liquide passe par un maximum à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

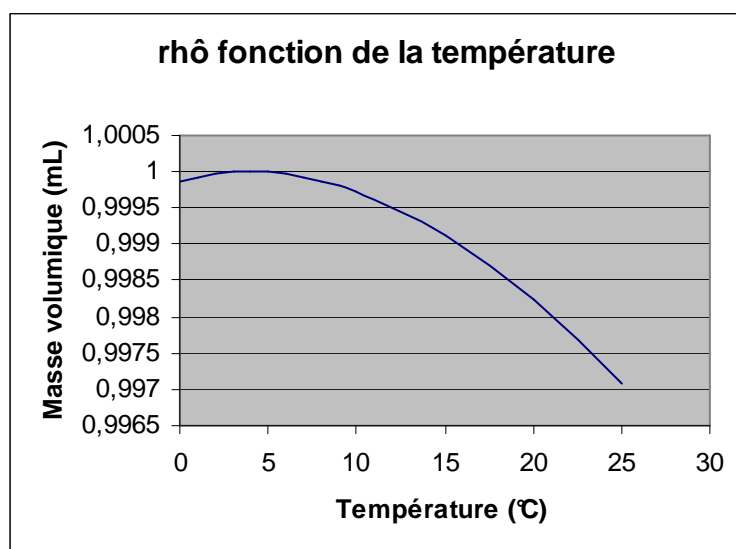
Applications :

Sur l'étiquette de l'acide nitrique, on lit **Densité 20/4 : 1,32** ; cela veut dire que la masse volumique de l'acide à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vaut $1,32\text{ g/mL}$ alors que la masse volumique de l'eau à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vaut $1,00\text{ g/mL}$.

En hiver, les poissons vivent dans de l'eau liquide à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ surmontée par une couche de glace.

A partir de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et jusqu'à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, la densité de l'eau diminue ; l'eau chaude monte en surface : l'encre colorée chaude forme un volcan avec son panache dans de l'eau plus froide.

La circulation de l'eau dans les océans (Gulf Stream, ..) illustre ce fait.



Durée : 3 min

Séquence 12 : tension superficielle A

On dépose une aiguille aimantée en acier à la surface de l'eau à l'aide d'un papier filtre ; elle flotte, bien que la densité de l'acier soit très supérieure à celle de l'eau ! Elle suit un aimant ou s'oriente dans le champ terrestre comme une boussole. La surface de l'eau est une membrane solide qui pousse l'aiguille vers le haut ; on note tension superficielle A (en N/m) la force (en N) exercée par l'eau sur l'aiguille divisée par la longueur L (en m) du contact. On diminue A avec un peu de liquide vaisselle qui apporte des molécules tensioactives et l'aiguille s'enfonce.

On mesure A par la méthode d'arrachement d'un anneau accroché sous une balance. La masse de l'anneau est 3,14 g ; La force à l'arrachement correspond à 5,21 g. Il y a une longueur de contact correspondant à deux périmètres de l'anneau. Juste à l'équilibre avant rupture : $F = P + A \cdot L$; $A = (F - P) / L$; comme $L = 4 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot D$: $A = (5,21 - 3,14) \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 / (2 \cdot \pi \cdot 51,5 \cdot 10^{-3}) = 63 \cdot 10^{-3}$ N/m proche de la valeur donnée par les tables à 20°C.

Une conséquence : la capillarité qui fait monter les liquides dans les tubes fins comme les capillaires de chromatographie.

Durée : 1 min 40 sec

Séquence 13 : capacité thermique massique

On chauffe, en parallèle, 800 g (800 mL ; $d=1$) d'eau et 800 g (645 mL ; $d=1,24$) de glycérine avec 2 thermoplongeurs de 1000 W en agitant ; on note la température de l'eau et celle de la glycérine en fonction du temps.

Cas de l'eau

Date t (min)	0	1	2	3	4	5	6
Température θ (°C)	22	30	37	45	51	58	65,5

Cas de la glycérine

Date t (min)	0	1	2	3	4	5
Température θ (°C)	24	30	51	60,5	70,3	80

On constate que la température de l'eau varie moins vite que celle de la glycérine. La capacité thermique massique de l'eau = $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ est anormalement élevée comparée à la capacité thermique massique de la glycérine ($2,43 \text{ kJ} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Applications : radiateur, Gulf Stream, rôle régulateur des océans.

Durée : 1 min

4. L'eau dans notre environnement

Séquence 14 : coexistence exceptionnelle de l'eau solide, liquide et gaz

Sur Terre, on peut trouver au même endroit de la neige ou de la glace, de l'eau liquide (robinet, lac, rivière), de l'eau vapeur (nuages, eau qui bout).

Durée : 30 sec

Séquence 15 : pression de vapeur saturante

Grâce à un tube de Torricelli, on mesure la pression atmosphérique qui est de 760 mm de mercure Hg (=1 atmosphère= 1013 hPa). On injecte avec une seringue un peu d'eau liquide dans le vide au dessus du mercure. A 20 °C, le niveau du mercure diminue de 17 mm environ quand il y a cohabitation de la vapeur d'eau et d'un peu d'eau liquide. La pression de la vapeur d'eau vaut donc 17 mm de mercure Hg à 20°C. Cette pression augmente avec la température : elle vaut 92 mm de mercure Hg à 50°C et 760 mm de Hg à 100 °C.

Température t (°C)	0	5	8	10	12	15	18	20	50	100	120
Pression de vapeur saturante (mm Hg)	4,6	6,5	8,0	9,2	10,5	12,7	15,4	17,4	92	760	1520

L'éther qui est plus volatil que l'eau, a une pression de vapeur saturante nettement plus grande à 20°C. Si on augmente la température par un sèche cheveux, on voit le niveau du mercure descendre, puis remonter à froid.

On montre, avec une goutte d'eau coincée par du mercure dans un tube en U, que l'ébullition commence quand la pression saturante de la vapeur d'eau égale la pression atmosphérique locale appliquée au mercure ; ceci montre la température d'ébullition à 100°C pour 760 mm Hg.

Durée : 1 min 30 sec

Séquence 16 : mesure de l'humidité de l'air

Une paroi froide se recouvre de buée due à l'humidité de l'air ambiant. Si on connaît la température ambiante t (22 °C) et la température t' (10 °C) la plus élevée qui fait apparaître la rosée sur la paroi, on peut connaître F (19.7 mm Hg) la pression de vapeur saturante à (t) et F' (9,2 mm Hg) à (t') grâce à une table. Le degré d'humidité ou degré hygrométrique = $F'/F = 9,2 / 19,7 = 47\%$.

C'est le principe de la rosée du matin : les petites gouttes d'eau qui apparaissent sont le résultat de l'humidité ambiante et de la baisse de la température au cours de la nuit.

La station météo montre les paramètres utiles mesurés pour faire une prévision du temps à venir.

Durée : 1 min 20 sec

Séquence 17 : nuage

On place 1 à 2 cm³ d'eau au fond du vase cylindrique pour que l'air se sature en humidité à la température ambiante. On apporte des germes ou noyaux de condensation : une allumette enflammée apporte les particules de fumée. Il reste à refroidir l'air intérieur en faisant baisser la pression grâce à un gant retourné à l'intérieur de la carafe ; on sort ce gant brusquement pour augmenter le volume et détendre l'air. La température diminue, la pression de vapeur saturante ou quantité maximale de vapeur que l'air peut contenir diminue et le degré hygrométrique se rapproche de 100%. Une partie de la vapeur d'eau se condense sous forme de fines gouttelettes d'eau ; c'est un nuage ou du brouillard si on est près du sol. On répète plusieurs fois la manipulation.

Durée : 40 sec

Générique

Que d'eaux ! Que d'eaux ! Que d'eaux ! Eau de chaux : troublée par le dioxyde de carbone ; eau de Javel pour détacher, eau régale (mélange d'acide nitrique et sulfurique capable de dissoudre l'or), eau de Cologne pour parfumer, eau de vie, eau de Seltz riche en CO₂, eau oxygénée, eau céleste (ion cuivre II avec solution ammoniacale concentrée : bleu intense), eau dure avec dépôt de calcaire...

Durée : 20 sec

Exemple de questionnement

1. La molécule d'eau est très stable. Comment l'a-t-on montré ?
2. A partir des mesures de l'électrolyse en courant continu, calculer la charge molaire ou Faraday.
3. Le volume de dihydrogène est le double de celui de dioxygène. Quel est le lien avec la formule de l'eau ?
4. Comment justifie-t-on le fait que la molécule d'eau soit triangulaire ?
5. La molécule d'eau est polaire. Comment le montre-t-on ?
6. Pourquoi l'eau est-elle un très bon solvant des composés ioniques comme NaCl ?
7. Comment justifie-t-on les températures étonnantes de fusion et d'ébullition de l'eau ?
8. Citer deux conséquences pratiques de l'augmentation de volume à la solidification de l'eau.
9. Les poissons vivent sans problème dans les lacs même pendant les hivers très rigoureux. Pourquoi ?

10. Faire le bilan des forces qui agissent sur l'anneau à l'équilibre lors de la mesure de la tension superficielle et en déduire la valeur de A à 20°C.
11. Les radiateurs d'un chauffage central contiennent de l'eau et pas de glycérine Justifier ce fait.
12. Que se passe-t-il si on refroidit fortement de l'air très humide et chaud ?
13. Dans le langage courant, on utilise souvent le mot « eau » pour décrire une solution aqueuse. Donner deux exemples de cette confusion.

Éléments de réponse

1. La molécule d'eau est très difficile à casser : il faut chauffer fortement ou utiliser l'électrolyse.
2. Voir le calcul dans la séquence 2.
3. La formule de l'eau est H₂O où il y a 2 atomes H pour 1 atome O ; ceci entraîne que, lors de l'électrolyse, les quantités de matière sont comme les volumes dans un rapport de deux pour un.
4. La présence de deux doublets d'électrons non liants.
5. On peut attirer un filet d'eau aussi bien par un bâton chargé plus que chargé moins.
6. Les molécules d'eau entourent l'ion positif en pointant vers lui leur barycentre négatif et l'ion négatif en pointant vers lui leur barycentre positif : cela permet d'éloigner l'ion positif de l'ion négatif.
7. Il faut casser les « liaisons par pont hydrogène » qui lient entre elles les molécules d'eau aussi bien à l'état solide qu'à l'état liquide.
8. Des roches imbibées d'eau éclatent en hiver, les gelées font éclater les cellules végétales.
9. La température de l'eau, la plus dense, au fond du lac reste à 4°C, donc l'eau reste à l'état liquide.
10. La force-poids et la force exercée par l'eau sont verticales, vers le bas ; la force exercée par la balance est verticale vers le haut. Leur somme vectorielle est nulle à l'équilibre. Voir le calcul à la séquence 12.
11. A masse égale, les variations de température seront plus faibles avec l'eau étant donnée sa capacité thermique massique élevée.
12. On finit par atteindre la température t' où la quantité d'eau stockée dans l'air chaud correspond à celle de la pression de vapeur saturante à t' : il y a apparition d'eau liquide.
13. Eau de vie : alcool éthanol dans de l'eau ; eau de chaux : solution d'hydroxyde de calcium dans l'eau.