

Évapocondensation Cycle de l'eau



Collection de l'Atelier d'exploration

Conception « Évapocondensation »

A. Billet

Conception « Cycle de l'eau »

P. Bastide

Conseillers scientifiques

J. L. Dufresne, J. Y. Grandpeix, A. Lahellec,

Équipe Ramses, LMD, CNRS

M. Cloupeau, Aérothermie-CNRS

Développement

J. Pasqualini, J. Deléglise

1. Contenu scientifique

L'air humide

Énergies mises en œuvre lors de l'évolution de l'air humide

Refroidissement par évaporation

Transport d'énergie par évaporation-condensation

2. Description des manipulations

Les idées forces de la communication

Comment l'atmosphère est-elle réchauffée par la terre ?

Le cycle de l'eau

3. Exploitation pédagogique

Réaliser les manipulations « Évapocondensation »
et « Cycle de l'eau » à faible coût

La formation des nuages

Utilisation du pare-vapeur dans l'isolation d'un bâtiment

Utilisation de l'énergie solaire pour distiller l'eau

Introduction

Le cycle de l'eau est schématiquement le suivant : sous l'effet de l'évaporation à la surface des océans et des continents, de l'évapo-transpiration des animaux et des végétaux, l'air s'humidifie. Chargé de vapeur d'eau, il se refroidit au cours de son ascension et se condense en nuages. Le refroidissement des nuages ramène cette eau sur les océans et les continents sous forme de pluie, de neige et de grêle. Une partie de cette eau s'évapore et reprend le même trajet. Une autre ruisselle ou s'infiltre dans le sol. L'eau qui ruisselle à la surface des continents alimente les cours d'eau et aboutit à la mer où elle subit à nouveau l'évaporation. L'eau qui s'infiltre assure l'hydratation de l'humus et des couches superficielles des sols, elle constitue les eaux souterraines et, en particulier, la nappe phréatique.

L'évaporation de l'eau du sol, des végétaux, des océans vers l'atmosphère nécessite l'apport d'une grande quantité de chaleur (chaleur latente d'évaporation) qui est restituée au cours de la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Dans le bilan thermique (voir dossier « Bilan thermique du système surface de la terre-atmosphère »), l'évaporation-condensation constitue le plus grand échange de chaleur entre la terre et l'atmosphère (85 W/m^2 à comparer aux autres échanges par rayonnement infrarouge 60 W/m^2 et par convection 15 W/m^2). Le cycle de l'eau et les phénomènes thermiques qui lui sont associés font partie des principes fondamentaux qu'il faut comprendre pour appréhender les problèmes tels que le changement climatique et les interactions climats-végétaux.

L'objectif des deux manipulations de ce dossier est de présenter le cycle de l'eau simplifié et les échanges thermiques qui lui sont associés. Elles forment un triptyque interactif : le noyau central met en scène le cycle de l'eau, et de chaque côté sont présentés les phénomènes de chaleur latente d'évaporation et de condensation.

De notre point de vue, la manipulation « Évaporation-condensation » marque une date dans l'évolution de la manipulation interactive d'exposition. On passe d'une logique où les messages à communiquer sont

définis par les codes des émetteurs à une logique de communication orientée par la mobilisation de l'intérêt du visiteur et par les codes des destinataires. Dans la première perspective, la manipulation est interprétée par le visiteur en fonction de son propre savoir (les informations complémentaires sont généralement peu lues). Si le visiteur est particulièrement peu averti par rapport à la chose exposée, son interprétation, très souvent erronée, se fera sur les aspects annexes ou en fonction de ses propres capacités d'apprendre. En fait, il s'agit de contribuer à la résolution de la question : comment apprendre de nouvelles connaissances avec les anciens savoirs ? En générant un conflit cognitif (une tension provoquée par l'écart entre ce que le visiteur croit et la réalité de l'expérience), la manipulation doit susciter une interrogation induisant une première interprétation qui, tout en étant fondée sur des connaissances communes, reste cohérente avec le contenu scientifique ; telle est notre hypothèse de travail. L'effet final souhaité en terme de communication est de déclencher chez le visiteur le désir d'en savoir plus. La mise en scène d'un phénomène centrée sur l'un de ses aspects surprenants et l'intégration du dispositif explicatif (une question est posée au visiteur qui contrôle sa réponse en expérimentant le phénomène) sont les deux clés de cette innovation muséologique. Notons que cette manipulation est le résultat de plus de dix années de recherche-action sur l'amélioration de la qualité et de l'efficacité communicationnelle de ce nouveau média.

Ces deux manipulations sont en étroite relation avec les manipulations « Comment la terre est-elle chauffée par le soleil ? » et « Interaction climat-végétaux » qui, en présentant le phénomène d'évaporation (transpiration), montrent que la seule prise en compte du rayonnement solaire ne permet pas d'expliquer les températures de la surface de la terre. La recherche actuelle sur l'environnement globalise les phénomènes qui, jusque-là, étaient étudiés séparément, d'où notre préoccupation dans le choix des thèmes et de la mise en scène de leur interdépendance.

1. Contenu scientifique

L'hydrosphère est composée de trois réservoirs d'eau : les océans (1 350 millions de km³), les continents (33,7 millions de km³) et l'atmosphère (0,013 millions de km³). Sur les continents, l'eau se répartit entre les calottes glaciaires arctique et antarctique (25 millions de km³), les eaux souterraines (8,5 millions de km³), les lacs et rivières (0,2 millions de km³) et enfin les êtres vivants (0,0006 millions de km³). Ces chiffres ne représentent que des ordres de grandeur, ils n'ont qu'une valeur indicative : l'estimation des eaux continentales varie selon les auteurs. L'eau dans l'atmosphère se trouve à l'état de vapeur, de liquide et de solide ou de glace (le nom « atmosphère » vient du grec vapeur et sphère ; elle constitue l'enveloppe gazeuse qui entoure le globe terrestre). L'air est un mélange complexe dont les caractéristiques varient dans l'espace et dans le temps, en fonction de ce qu'on y rejette ou de ce qu'on y prélève. Dans le premier paragraphe, nous rappelons les principaux concepts de l'hygrométrie, la science qui étudie l'état humide de l'air et, dans les suivants, les énergies mises en œuvre par les transformations de l'eau.

L'air humide

L'air humide peut être considéré comme un mélange de deux gaz parfaits (l'air et la vapeur d'eau) ; chacun des deux gaz possède une pression partielle égale à celle qu'il aurait s'il était seul ; la pression totale est la somme des pressions partielles (l'état du mélange est défini par sa température et les pressions partielles des deux gaz). Cet état de type gaz parfait n'existe que dans un domaine limité de concentration en vapeur d'eau : pour une température donnée, la quantité de vapeur d'eau par unité de volume ne peut dépasser une valeur maximum. Au-delà, il y a saturation et toute la vapeur d'eau excédentaire se condense. Réciproquement, de l'eau liquide placée dans un milieu non saturé (vide ou gaz suffisamment sec) s'évapore. On verra ci-dessous que ces changements d'état font que les caractéristiques thermiques de l'air sont très différentes selon qu'il y a présence d'eau liquide ou non (fig. 2, 3). La vapeur n'est pas directement perceptible : c'est un gaz parfaitement invisible qui n'est optiquement

décelable que par ses bandes d'absorption dans l'infrarouge (voir dossier « Effet de serre de l'atmosphère »). La couleur blanche des nuages (et autres couleurs qui peuvent aller jusqu'au gris-noir en cas d'extinction de la lumière visible) est donnée par les micro-gouttelettes d'eau produites par la condensation de la vapeur d'eau. Cette dernière est à l'origine des brouillards, des nuages et, à la surface du sol, de la rosée, du givre et du gel.

La quantité de vapeur d'eau mélangée à de l'air est couramment définie très diversement. Nous présentons ici les principales définitions utilisées, sachant que l'on peut toujours passer plus ou moins facilement de l'une à l'autre¹.

- La pression partielle de la vapeur d'eau est la partie de la pression atmosphérique totale exercée par la vapeur d'eau. Par conséquent, la pression atmosphérique est égale à la pression de l'air sec ajoutée à la pression de la vapeur d'eau (gaz parfaits).

- Le volume spécifique. On préfère rapporter le volume occupé par l'air humide à l'unité de masse d'air sec ; rapport exprimé en m³ par kg d'air sec.

- Le rapport de mélange ou teneur en eau est la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air humide renfermant l'unité de masse d'air sec exprimée en gramme ou kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec.

- L'humidité spécifique est la quantité d'eau en gramme par kilogramme d'air humide.

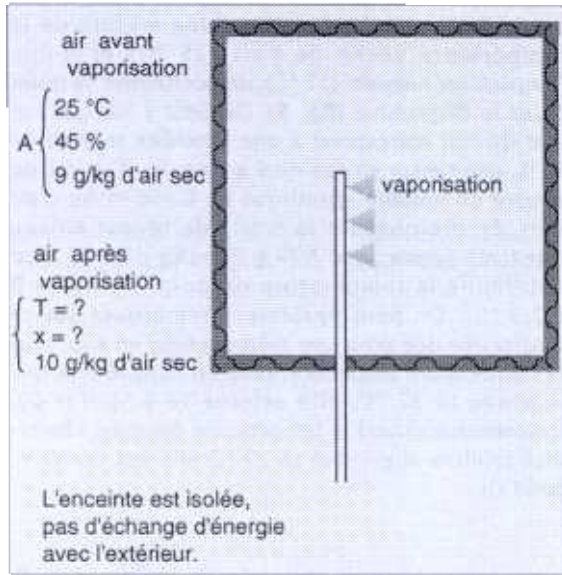
- L'humidité relative (pourcentage de saturation de l'air) est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans un volume donné et la quantité maximale de vapeur d'eau (pression de vapeur saturante) admissible dans le même volume.

- La température de saturation ou de rosée (point de rosée) est obtenue en refroidissant une surface placée dans de l'air humide dont l'hygrométrie est constante. C'est la température à laquelle de la buée (très fines gouttelettes d'eau) commence à apparaître sur cette surface.

- La température humide est la température à laquelle un thermomètre au bulbe thermique constamment humecté se stabilise dans un flux d'air. Du fait de l'évaporation, cette température est inférieure à la température sèche. Une situation limite est celle où l'air possède une humidité relative de 100 % ; il ne peut y avoir évaporation, la température humide est égale à la température sèche. Le diagramme simplifié de l'air humide (fig. 1), établi pour une pression atmosphérique normale, donne les états du mélange air-vapeur d'eau en fonction de la température sèche et de la teneur en eau (g/kg d'air sec).

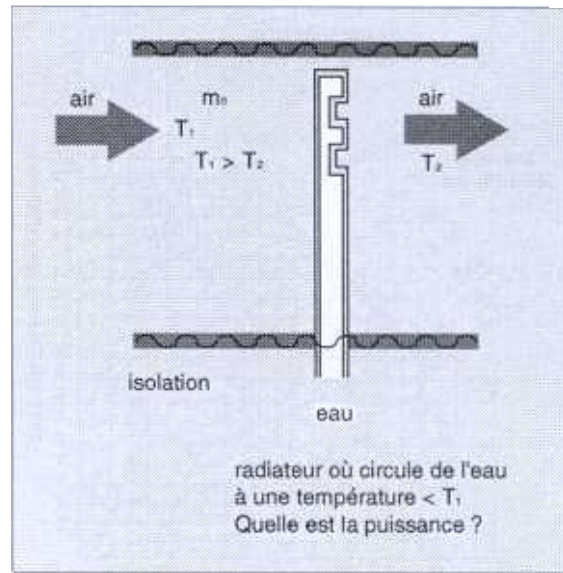
1. Météorologie nationale et Centre national d'enseignement à distance, *Formation de base à la météorologie*, 1990. *Air humide*, dossier des sciences pour l'ingénieur.

Figure 2



Refroidissement de l'air par injection de 1 g d'eau.

Figure 3



Refroidissement de l'air par une source froide. L'humidité spécifique entre l'entrée et sortie varie en fonction de la condensation d'eau sur le radiateur.

Figure 1

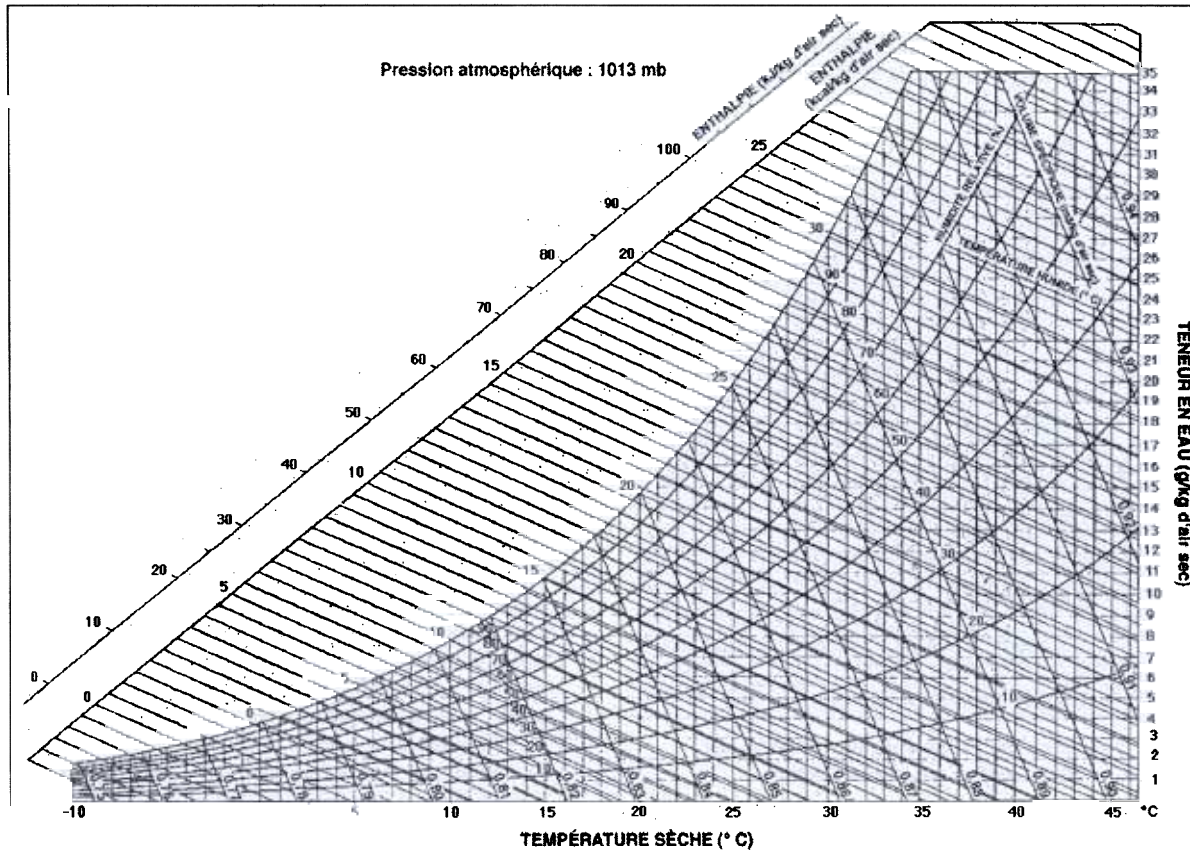
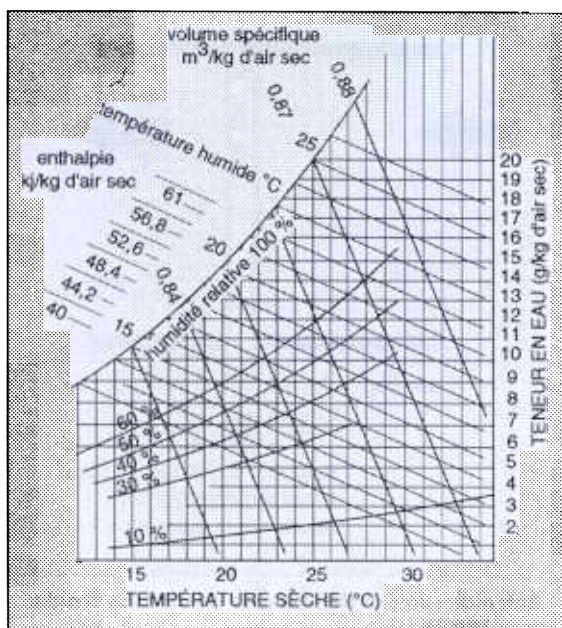


Diagramme psychrométrique.
 Source : d'après la documentation Rexair.

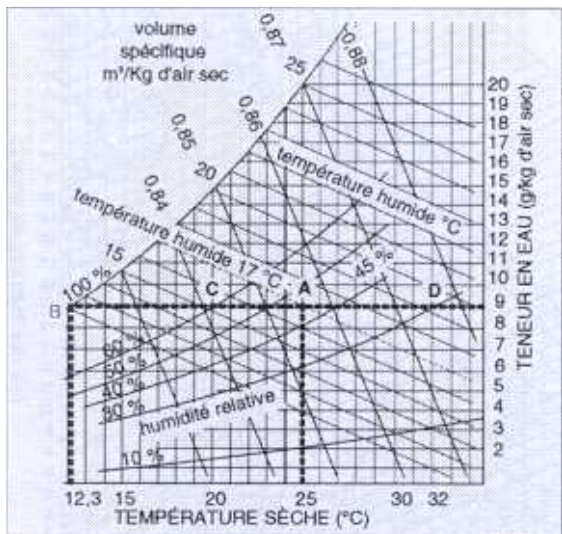
Figure 4



Extrait du diagramme psychrométrique.

La température sèche est donnée par un thermomètre à bulbe sec et la température humide par un thermomètre à bulbe humidifié avec une bande en tissu mouillé. L'enthalpie est l'énergie totale (travail, chaleur latente, chaleur sensible) nécessaire pour porter le mélange air-eau de 0 °C à la température considérée.

Figure 5

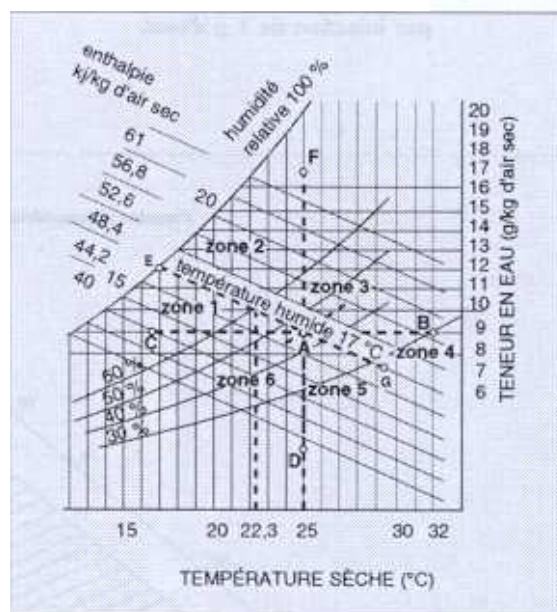


Définition de l'état d'un air humide sur diagramme psychrométrique.

Etat de l'air en (A) : température sèche 25 °C, humidité relative 45 %, teneur en eau 9 g/kg d'air sec, volume spécifique 0,856 m³/kg d'air sec. Le point de rosée (B) est obtenu par refroidissement sensible de l'air (teneur en eau constante).

On peut utiliser ces diagrammes pour passer d'une définition de la quantité de vapeur d'eau à une autre. Par exemple, à partir d'une mesure de la température sèche de l'air (25 °C) et d'une température humide (17 °C), on positionne le point A sur le diagramme (fig. 5). On peut y lire que cet état de l'air correspond à une humidité relative de 45 %, une teneur en eau de 9 g d'eau/kg d'air sec ou encore un volume spécifique de 0,856 m³/kg d'air sec). En prolongeant la droite de teneur en eau constante passant par A (9 g d'eau/kg d'air sec), on détermine la température du point de rosée B (12,3 °C). On peut également remarquer sur ce diagramme que pour une même teneur en eau, plus la température augmente, plus l'humidité relative diminue (à 32 °C, elle atteint 30 %, point D). Inversement, quand la température diminue, l'humidité relative augmente (à 20 °C elle est de 60 %, point C).

Figure 6



Évolution de l'air humide en fonction de différents traitements.

Droite AC : refroidissement sensible ; droite AB : échauffement sensible ; droite AD : déshumidification isotherme latente ; droite AE : humidification adiabatique sans apport extérieur d'énergie ; droite AF : humidification isotherme latente (humidificateur à vapeur) ; droite AG : déshumidification adiabatique ; zone 1 : déshumidification avec prélèvement de chaleur et refroidissement ; zone 2 : humidification avec apport de chaleur et refroidissement de l'air ; zone 3 : humidification avec apport de chaleur et échauffement ; zone 4 : déshumidification avec apport de chaleur et échauffement ; zone 5 : déshumidification avec prélèvement de chaleur et échauffement ; zone 6 : déshumidification et refroidissement.

Énergies mises en jeu lors de l'évolution de l'air humide

Différence d'ordre de grandeur entre la chaleur sensible et la chaleur latente

Les phénomènes d'évaporation et de condensation (changement d'état liquide en vapeur et inversement) mettent en jeu une grande quantité d'énergie (chaleur latente) largement supérieure à celle qu'il faut pour seulement abaisser ou augmenter la température de l'eau (chaleur sensible).

Chaleur latente d'évaporation et de condensation

Pour évaporer une masse M d'eau, il faut fournir une énergie :

$$E = M \cdot L \text{ (J)}$$

L : chaleur latente de vaporisation

$$= 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

M : masse d'eau en kg

Cette énergie a la même valeur pour l'évaporation et la condensation, seul le signe change : il faut fournir de l'énergie pour évaporer l'eau, la condensation libère de l'énergie thermique. Pourquoi cette énergie ? Lorsque l'eau est liquide, les molécules d'eau sont « liées » entre elles. Pour évaporer cette eau, il faut casser ces liaisons (fig. 12), et pour cela il faut fournir de l'énergie. La condensation est exactement symétrique, et libère cette énergie.

Chaleur sensible

Pour augmenter d'une différence de température DT une masse M d'un corps à pression constante, il faut fournir une énergie :

$$E = M \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (J)}$$

C_p : chaleur latente à pression constante

pour l'air sec $C_p = 10^3 \text{ J/K/kg}$

pour la vapeur d'eau $C_p = 1,8 \cdot 10^3 \text{ J/K/kg}$

pour l'eau $C_p = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J/K/kg}$

Pourquoi cette énergie ? Dans le cas d'un gaz, la température correspond à une certaine vitesse moyenne des molécules de ce gaz. L'accroissement de température correspond à une accélération de la vitesse moyenne d'agitation des molécules et pour augmenter cette vitesse, il faut fournir une certaine énergie.

Comparaison chaleur latente-chaleur sensible

Pour évaporer 1 kg d'eau, il faut la même énergie que pour élever la température de 600 kg d'eau de 1 °C, ou pour élever la température de 1 kg de vapeur d'eau de 2 500 °C (à pression constante).

Quelques exemples de la vie quotidienne qui mettent en évidence la valeur élevée de la chaleur latente de vaporisation-condensation de l'eau.

- comment refroidir sans réfrigérateur ? Une gourde en peau (ou en tissu) refroidit et maintient de l'eau à une température inférieure à l'air ambiant. En effet, l'eau qui remplit la gourde mouille la peau. Cette peau étant mouillée, il y a évaporation et celle-ci refroidit le contenu de la gourde.

- lorsqu'on est mouillé, on a beaucoup plus froid que lorsqu'on est sec (l'évaporation refroidit la peau).

- la transpiration permet à l'organisme d'évacuer de l'énergie d'après le même principe.

- un jet de vapeur (cocotte minute, bouilloire,...) est beaucoup plus dangereux, brûle davantage qu'un jet d'air sec à la même température (sèche-cheveux). C'est parce que, en plus de l'énergie thermique due à la température elle-même (chaleur sensible), la condensation de la vapeur dégage une énergie importante.

Refroidissement par évaporation

On prend un volume d'air de 1 m³ (1 kg) à 25 °C, 45 % d'humidité (9 g/kg) : cet air humide est défini par le point A sur le diagramme (fig. 5). On vaporise dans ce volume 1g d'eau à $T = 25 \text{ °C}$ (fig. 2). Quelle est la température finale de l'air humide ?

L'évaporation de 1 g d'eau chaude absorbe une énergie $E = L \cdot M = 2,510^3 \text{ J}$

avec M (eau) = 1 g = 10^{-3} kg et $L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J}$.

Cette énergie est prise à l'énergie thermique de l'air qui, de ce fait, refroidit de :

$$\Delta T = E/M \text{ (air)} \cdot C_p = 2,5 \cdot 10^3 / 10^3 = 2,5 \text{ °C}$$

avec M (air) = 1 kg et $C_p = 10^3 \text{ J/K/kg}$.

Ainsi l'évaporation de 1 g d'eau dans 1 m³ d'air sec refroidit celui-ci de 2,5 °C environ (ce calcul est approché, en particulier parce que l'on ne tient pas compte du fait que la vapeur d'eau produite lors de l'évaporation fait augmenter la pression si le volume du gaz reste constant). Ce type de résultat peut être également obtenu à partir du diagramme humide de l'air. L'énergie totale du système eau + air humide reste constant dans l'expérience précédente (on ne fournit aucune énergie au système). On prolonge la ligne « isenthalpie » (que l'on assimile ici pour simplifier à une ligne isoénergétique) passant par A. Ensuite, on cherche son intersection avec la ligne de teneur en vapeur d'eau de 1 g plus élevée (10 g/kg, on trouve une température de l'ordre de 22,3 °C (fig. 6). L'abaissement de température de 2,7 °C est compatible avec celui trouvé précédemment, vu les approximations effectuées. Si on continue à évaporer de l'eau à partir de la situation précédente, on voit sur le diagramme de la figure 6 que l'on peut abaisser les températures de l'air jusqu'à 17 °C, point E. Après cela, l'air est saturé en humidité, l'évaporation de l'eau n'est plus possible.

Remarque. Dans l'expérience ci-dessus, de l'eau est injectée dans le volume d'air à une température de 50 °C à la place de 25 °C. On peut faire le raisonnement schématisé suivant : l'eau est d'abord refroidie jusqu'à 25 °C, puis elle s'évapore dans les mêmes conditions que précédemment. Lorsque l'air se refroidit de 50 °C à 25 °C, il fournit une énergie thermique à l'air à :

$$E = M \cdot C_p (\text{eau}) \cdot \Delta T = 10^3 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 25 = 100 \text{ J.}$$

Cette énergie élève la température de l'air de :

$$\Delta T = E/C_p (\text{air}) = 100/10^3 = 0,1 \text{ °C.}$$

On voit alors que le fait d'injecter de l'eau à 50 °C plutôt qu'à 25 °C ne modifie presque pas la température finale de l'air humide. L'expérience « évaporation » de la manip est fondée sur ce principe.

Transfert d'énergie thermique par évaporation- condensation

On considère une canalisation dans laquelle circule de l'air avec un débit fixe ; il pénètre à une température T_1 . Calculons la puissance P qu'il faut extraire pour refroidir en sortie cet air à une température T_2 ($T_2 < T_1$) selon que l'air est saturé en humidité ou pas (fig. 3).

Prenons tout d'abord un air parfaitement sec, la puissance s'écrit : $P_1 = \Delta \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$ en watt.

Δ : débit masse de l'air (kg/s)

C_p : chaleur sensible à pression constante = (10^3 J/K/kg) .

Considérons ensuite un air qui entre saturé en humidité dans la canalisation. Sa température est T_1 et son contenu en vapeur d'eau est Q_1 . Quand l'air se refroidit en traversant la canalisation, de la vapeur d'eau se condense (voir « L'air humide »). On suppose que le dimensionnement et le réglage sont tels que la température de l'air en sortie est T_2 comme

précédemment, que l'air est toujours saturé en humidité et que sa teneur en vapeur d'eau est Q_2 .

La puissance à extraire est maintenant :

$$P_2 = \Delta \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) + \Delta \cdot L \cdot (Q_1 - Q_2)$$

Δ représente toujours le débit masse d'air sec (en kilogramme d'air sec par seconde) ;

$\Delta(Q_1 - Q_2)$: représente le débit d'eau condensée (en kg d'eau par seconde) ;

$\Delta \cdot L \cdot (Q_1 - Q_2)$ représente la puissance à extraire de l'air à cause de la condensation de la vapeur d'eau (L étant la chaleur latente de condensation = $2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$).

On voit que, dans ce cas, la puissance P_2 à extraire est égale à la puissance P_1 correspondant à l'air sec plus un terme dû à la condensation de la vapeur d'eau. Pour refroidir de l'air saturé en humidité, il faut extraire davantage d'énergie, il faut une source froide plus puissante que pour refroidir de l'air sec.

Exemple numérique : $T_1 = 25 \text{ °C}$; $T_2 = 15 \text{ °C}$;

$C_p = 10^3 \text{ J/°C} \cdot \text{kg}$

$$P_1 = \Delta \cdot 10^3 \cdot 10 = 10^4 \cdot \Delta \text{ en watt.}$$

Les teneurs en vapeur d'eau à la pression atmosphérique correspondant à de l'air saturé aux températures T_1 et T_2 , sont respectivement (fig. 5) :

$$Q_1 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

$$Q_2 = 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

comme $L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ on obtient :

$$P_2 = \Delta (C_p \cdot (T_1 - T_2) + L \cdot (Q_1 - Q_2))$$

$$P_2 = \Delta \cdot (10^4 + 2,5 \cdot 10^6 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3})$$

$$P_2 = 3,4 \cdot 10^4 \cdot \Delta \text{ en watt.}$$

Lorsqu'il y a condensation, quel que soit le débit d'air Δ , la puissance à extraire est - dans notre exemple - trois à quatre fois plus élevée que lorsqu'il n'y a pas condensation. En se plaçant d'un point de vue différent, on peut également dire qu'avec un même débit et une même différence de température, l'énergie thermique (la « quantité de chaleur ») transportée par de l'air est beaucoup plus élevée lorsqu'il y a condensation que lorsqu'il n'y en a pas. C'est ce principe qui est utilisé par l'expérience de la manip « condensation ».

2 Description des manipulations

97

Les idées forces de la communication

Éviter le facile et le compliqué

Nous avons rejeté des solutions trop simples comme le thermomètre humide (fig. 7) qui n'apporte rien au visiteur (on ne voit pas ce qui se passe au niveau du bulbe recouvert d'un matériau humide), ou des solutions plus sophistiquées correspondant à des dispositifs de traitement de l'air qui ne sont pas facilement compréhensibles. Notre volonté de concevoir et de réaliser des manipulations efficaces et de grande qualité s'est traduite par de nombreux débats. Il s'agissait pour nous d'explorer l'ensemble des solutions et de prévoir le comportement du public de façon à retenir la solution qui, a priori, offre la meilleure communication.

Notre projet d'innovation en communication muséale

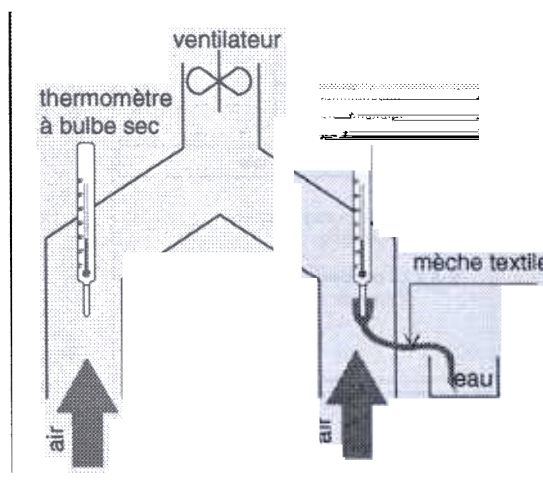
Notre projet a porté sur l'étude de dispositifs qui suppriment certains des obstacles que le public rencontre pour interpréter le contenu scientifique mis en scène dans une manipulation, à commencer par l'utilisation de connaissances trop spécialisées. Il ne suffit pas d'agir selon un mode d'emploi partiellement lu et d'observer le phénomène déclenché pour comprendre. La démarche traditionnelle privilégiant le mode d'emploi comme médiateur entre la manipulation et le public se traduit souvent par l'abandon de la consultation par un public ignorant ou peu averti du contenu exposé, dès la première tentative d'exploration.

Nous avons étudié deux types de solutions :

- situer la manipulation dans un contexte familier et facilement compréhensible ;
- impliquer le visiteur ne possédant pas de connaissances scientifiques pour l'inciter à interpréter et à approfondir ce qu'il observe.

En ce qui concerne la manière d'impliquer et de motiver ce dernier, nous avons élaboré des situations communicationnelles qui provoquent le déclenchement d'un conflit cognitif entre ce qu'il prévoit en réponse à une question et le résultat constaté par l'expérimentation du phénomène. Ce conflit doit stimuler son intérêt et l'inciter à trouver une réponse à cette différence, maintenant ainsi son attention. Le visiteur doit comprendre très rapidement que s'il joue

Figure 7



Psychromètre.

Cet appareil servant à mesurer la température humide est constitué de deux thermomètres (l'un à bulbe sec et l'autre à bulbe humecté) placés dans un courant d'air. Pour humecter le bulbe d'un thermomètre, on le recouvre d'une mèche textile plongée dans de l'eau distillée (l'eau monte par capillarité). La vitesse de l'air autour du bulbe doit être suffisamment élevée pour que les échanges de chaleur soient significatifs (de l'ordre de 2 m/s à 5 m/s pour un bulbe de 7 mm de diamètre environ). Pour faire comprendre le principe du refroidissement, il faut placer un thermomètre dans l'eau et poser la question : « Pourquoi, avec de l'eau à la même température que l'air, obtient-on une température plus faible ? »

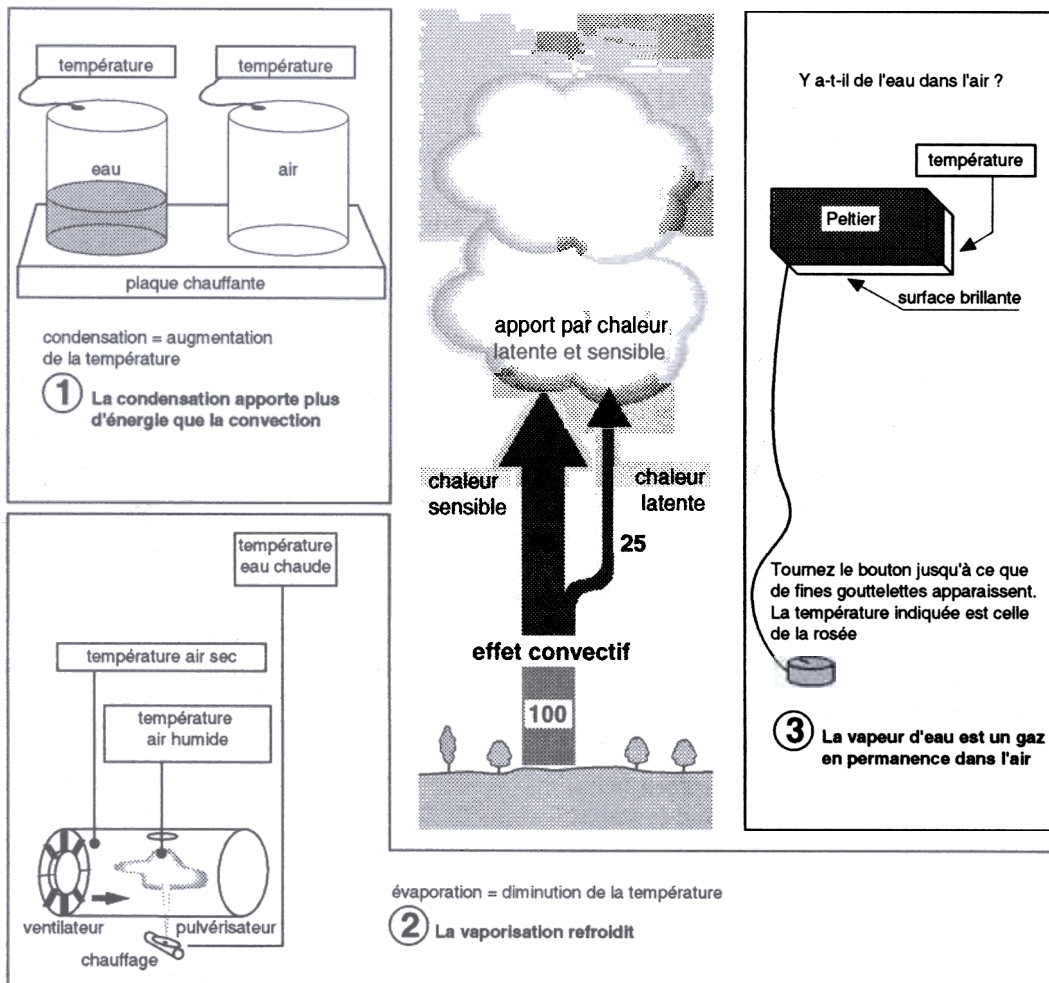
le rôle qu'on lui assigne, la récompense à son travail sera la compréhension de ce phénomène.

Réduire la place de l'écrit et privilégier le visuel

Les études en muséologie montrent que la plupart des visiteurs lisent peu les vignettes ou les panneaux, à moins que les conditions de lecture soient bonnes. Il est vrai qu'une fraction importante du grand public présente des difficultés de lecture. Nous devons donc intégrer du texte sans faire fuir le visiteur, difficulté d'autant plus grande que le texte fait débiter la consultation d'une manipulation. Pour compenser le manque d'attrait du peu de texte qu'il faut néanmoins placer, ne serait-ce que comme mode d'emploi, nous avons cherché à développer le côté visuel, attractif.

Figure 8

L'atmosphère est une pompe à chaleur, elle refroidit la terre par évaporation de l'eau en surface et elle restitue la chaleur absorbée par l'évaporation pendant la condensation de la vapeur d'eau



Élaboration des concepts de la manipulation sur l'évaporation-condensation.

Intégrer dans le processus de conception les représentations du public

Évolution de la compréhension du phénomène d'évaporation

Les études portant sur les représentations des élèves montrent que la compréhension des concepts n'est pas stable dans la durée. Le phénomène d'évaporation peut être compris à neuf ans mais présenter des difficultés de compréhension quelques années plus tard. En revanche, le taux de

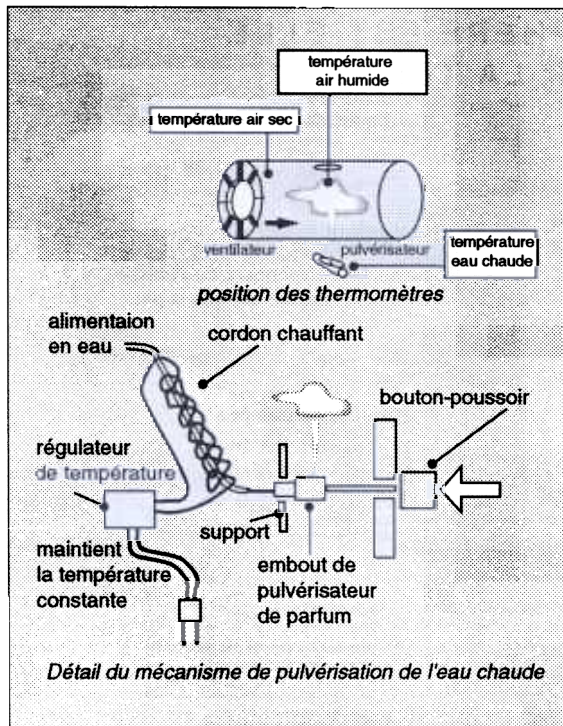
bonnes réponses est meilleur lorsque le questionnaire est passé après une action pédagogique sur ce thème.

Chaleur ou température ?

Les changements de phase par évaporation et condensation sont des phénomènes dynamiques d'échanges de chaleur et de matière. Ils sont étudiés avec les outils conceptuels de la thermodynamique qui posent de nombreux problèmes de compréhension. Des études de didactique des sciences ont montré que les collégiens et même les étudiants confondaient l'énergie (chaleur) et la température². Ce constat nous conduit à ne retenir que la température - tout le monde l'utilise dans la vie courante - pour caractériser les échanges d'énergie et à introduire le raisonnement qualitatif qui part du

2. Bar V., Travis A. S., « Children's Views Concerning Phase Changes », *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 28, n° 4, 1991, pp. 363-382.

Figure 9

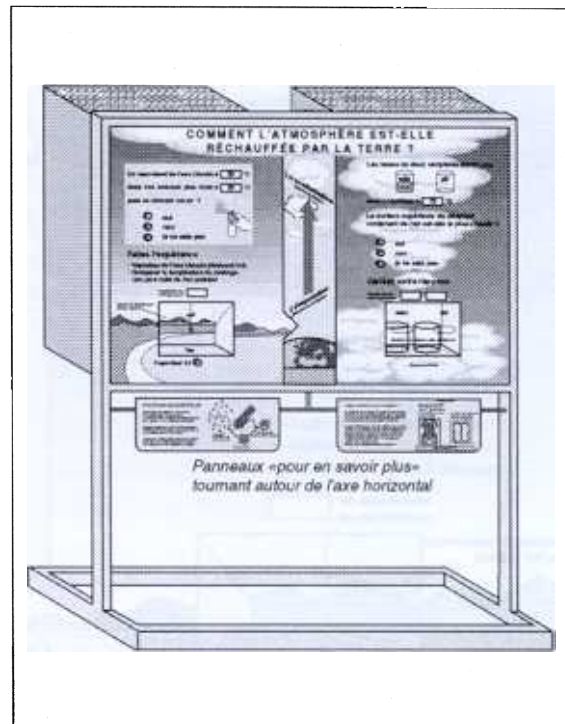


Détail du mécanisme de la

résultat ou de l'effet pour remonter à la cause :

- si la température diminue, il y a refroidissement et on perd de la chaleur ;
- si la température augmente, il y a réchauffement et il faut fournir de la chaleur ;
- si l'évaporation refroidit un système et que la condensation le réchauffe en mettant en œuvre la même quantité de chaleur, on a un transfert thermique. Appliquons ce raisonnement à l'évaporation-condensation : le flux d'énergie solaire réchauffe la surface de la terre (sa température augmente). Par évaporation de l'eau, sa température diminue (une quantité de chaleur est extraite à la surface du sol et à l'air ambiant). Finalement, une température d'équilibre s'établit. Celle-ci correspond à un certain flux d'eau évaporée. Puis, par convection, la vapeur d'eau s'élève dans l'atmosphère. En s'élevant, l'air se détend (la pression diminue avec l'altitude). Cette détente refroidit l'air et, à une certaine altitude, la vapeur d'eau se condense pour former des gouttelettes d'eau qui constituent les nuages. De plus, cette condensation est amplifiée, d'après le principe de Clausius-Clapeyron qui montre que plus la température et la pression sont basses, moins l'air peut contenir de vapeur d'eau. L'essentiel de l'humidité est concentré dans les basses couches de l'atmosphère. La condensation restitue la chaleur absorbée lors de l'évaporation, réchauffant ainsi les couches intermédiaires de l'atmosphère. Il y a donc un transfert de chaleur du sol à l'atmosphère par évaporation-condensation.

Figure 10



Vue frontale de la manipulation.

Comment l'atmosphère est-elle réchauffée par la terre ?

Objectifs

Par une mise en situation expérimentale, la manipulation propose au public de vérifier que, d'une part, l'évaporation retire de la chaleur à l'air ambiant (partie gauche de la manipulation) et que, d'autre part, la condensation restitue de la chaleur à l'air ambiant (partie droite de la manipulation). S'agissant, ici, de mettre en évidence l'effet thermique produit par ces deux phénomènes peu ou mal connus et non directement observables, la mise en scène et les températures choisies répondent avant tout à des critères muséologiques et pédagogiques (rapidité, facilité de lecture) et ne prétendent en aucun cas reproduire les températures de la réalité. La relation entre ces deux phénomènes, ainsi que la notion de transfert de la vapeur d'eau sont abordées plus loin (parti pris graphique).

Description de la manipulation « Évaporation »

Principe

Nous avons élaboré le concept de la manipulation « Évaporation » à partir de l'étude des évolutions de l'air humide et d'une analyse critique du dispositif

Figure 11

COMMENT L'ATMOSPHÈRE EST-ELLE RÉCHAUFFÉE PAR LA TERRE ?

En vaporisant de l'eau chaude à °C dans l'air ambiant plus froid à °C peut-on refroidir cet air ?

oui
 non
 je ne sais pas

Faites l'expérience

- Vaporisez de l'eau chaude plusieurs fois
- Comparez la température du mélange eau-air à celle de l'air ambiant

température du mélange eau-air

capteur de température de l'air ambiant

Vaporisez ici

La condensation restitue la chaleur

L'évaporation absorbe de la chaleur

Les bases de deux récipients contenant

eau

air

sont chauffées à °C

La surface supérieure du récipient contenant de l'air est-elle la plus chaude ?

oui
 non
 je ne sais pas

Vérifiez votre réponse

température des faces supérieures

eau

air

touchez les dessus des récipients

plaque chauffante

Décor de la manipulation définitive.

Figure 12

POUR EN SAVOIR PLUS

L'air n'étant pas saturé en vapeur d'eau, l'eau chaude pulvérisée s'évapore. La transformation de liquide en vapeur absorbe pour 1 gramme d'eau 590 unités de chaleur.

Quantité supérieure aux 30 unités de chaleur libérées par l'abaissement de la température de 1 g d'eau chaude de 50 °C à 20 °C.

Conclusion : l'évaporation prend de la chaleur dans l'air, d'où le refroidissement de l'air par l'eau chaude de l'ordre de plusieurs degrés.

1 g de vapeur d'eau

air sortant à T °C ?

énergie extraite à l'air

air entrant à 20 °C

1 g d'eau à 20 °C

refroidissement apport de 30 unités de chaleur

1 g d'eau à 50 °C

air ambiant à 20 °C

1g de vapeur d'eau libère 590 unités de chaleur (apports supplémentaires) Chauffage de la surface par refroidissement de l'air

La température de surface est plus chaude

condensation

air

air

plaque chauffante à 70 °C

Panneaux mobiles.

psychromètre en tant que manip. Si l'air à 20 °C n'est pas saturé en vapeur d'eau, on peut le refroidir en vaporisant de l'eau chaude à 50 °C. L'eau pulvérisée s'évapore et la transformation de un gramme d'eau en vapeur d'eau absorbe 2 500 J (ou 590 calories). Cette quantité est supérieure aux 126 J (ou 30 calories) libérées par l'abaissement de température de 1 g d'eau de 50 °C à 20 °C. Il en résulte que l'évaporation de l'eau chaude prend de l'énergie thermique à l'air, d'où son refroidissement. Autrement dit, on peut refroidir avec de l'eau chaude, ce qui semble paradoxal.

Figure 13



Détails de la manip «condensation».

Réalisation (fig. 8, 9, 11, 15)

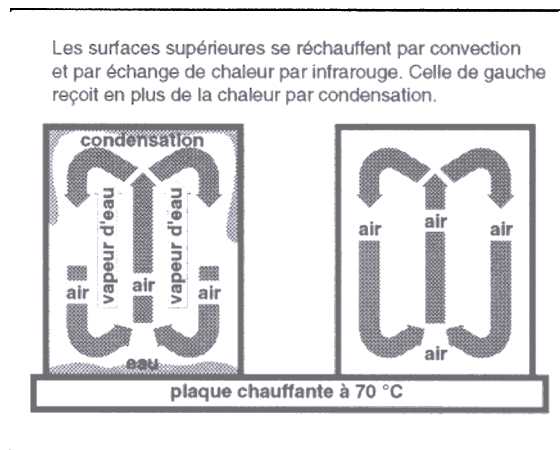
À l'aide d'un bouton-poussoir, le public agit directement sur un système de vaporisation utilisé en parfumerie. L'eau provient d'un récipient par l'intermédiaire d'un tuyau en cuivre. L'eau est chauffée durant son parcours grâce à une résistance flexible fixée le long de la conduite. Cette résistance est alimentée par un régulateur de température et instrumentée avec un capteur de température relié à un afficheur thermique visible par le public. Dans la « boîte » d'expérimentation, deux capteurs permettent de mesurer la température de l'air. Le premier, situé du côté du ventilateur et hors de portée du jet d'eau vaporisé, donne la température de l'air ambiant qui sert de référence. Le second, situé au-dessus et en aval du jet d'eau vaporisé, mesure la température de l'air humide (chargé en eau pulvérisée). Le problème posé au public est le suivant (fig. 11 et 12) : « En vaporisant de l'eau chaude à 50 °C dans l'air ambiant plus froid à 25 °C, peut-on refroidir cet air ? » En appuyant sur le bouton correspondant à l'une des trois réponses « oui », « non », « je ne sais pas », un volet se soulève et laisse apparaître, juste au-dessus de l'expérience, la température du mélange eau-air. La proposition « faites l'expérience » permet au visiteur de vérifier que le fait de vaporiser de l'eau chaude fait effectivement chuter la température de l'air. À partir de cette constatation, il convient de déduire que le phénomène d'évaporation puise de la chaleur dans l'air ambiant.

Description de la manipulation « Condensation »

Principe (fig. 11, 13, 14, 15)

De nombreux travaux de recherche ont été nécessaires pour élaborer un dispositif mettant en scène la condensation dans la même logique de communication muséologique que celle de

Figure 14

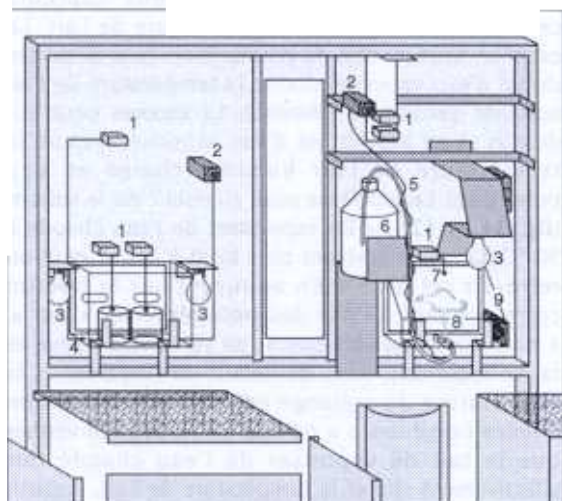


Flux convectifs dans les récipients.

l'absorption de chaleur par évaporation. C'est en quittant le champ de la réflexion théorique qui nous orientait sur des dispositifs compliqués et en expérimentant les montages de plus en plus simples que nous avons défini le concept de la manipulation sur la condensation. Celui-ci permet au visiteur de constater physiquement la différence de température aux sommets des deux récipients, l'un étant chauffé

par la condensation de l'eau contenue dans l'air humide, l'autre par de l'air chaud (c'est le premier qui est le plus chaud). On chauffe un récipient rempli d'air par le bas. La partie supérieure du récipient est principalement réchauffée par rayonnement infrarouge et par convection (mouvement d'air). L'élévation de la température de la surface haute est donc en partie due à l'énergie thermique transportée par l'air. Plus cette énergie est élevée, plus la température de la surface haute est élevée. Dans un second récipient dont la température du bas est à la même température que pour le précédent, le fond est recouvert d'un film d'eau. On constate (au bout d'un certain temps à l'équilibre) que la température du haut de ce récipient est plus élevée que précédemment. On voit clairement que l'eau se condense sur la face intérieure de la surface supérieure du récipient. Comme le rayonnement infrarouge peut être considéré comme inchangé (il faudrait de grandes distances pour que l'absorption infrarouge soit importante), on en déduit que l'énergie thermique transportée par de l'air humide avec évaporation-condensation est plus importante que celle transportée par de l'air (même humide) mais sans évaporation-condensation.

Figure 15



Au cœur de la manipulation (vue arrière).

- 1 : afficheurs de température ; 2 : régulateurs ;
- 3 : lampes ; 4 : plaque chauffante ; 5 : cordon chauffant ;
- 9 : réservoir d'eau ; 7 : capteur de température ;
- 8 : pulvérisateur d'eau ; 9 : ventilateur.

Explication physique

Le calcul exact et l'explication détaillée de cette expérience (d'une étonnante simplicité) sont difficiles et compliqués. La démarche que nous adoptons ici est de partir de l'expérience sans évaporation-condensation et de montrer comment cette expérience serait perturbée si l'on ajoutait de l'évaporation-condensation.

Figure 16

COMMENT L'ATMOSPHÈRE EST-ELLE RÉCHAUFFÉE PAR LA TERRE ?

EN PULVÉRISANT DE L'EAU CHAUDE A 50 °C DANS DE L'AIR PLUS FROID A 25 °C

REFROIDIT-ON L'AIR ?

choisissez 1 solution et appuyez

OUI

NON

JE NE SAIS PAS

FAITES L'EXPÉRIENCE !

16°

pulvérisez l'eau chaude et consultez l'indicateur de température

UNE POMPE À CHALEUR

1 LES BASES DE DEUX RÉCIPIENTS L'UN CONTENANT DE L'EAU L'AUTRE UN PEU D'AIR SONT CHAUFFÉS À LA TEMPÉRATURE DE

2 LA SURFACE SUPÉRIEURE DU RÉCIPIENT CONTENANT DE L'EAU EST-ELLE...

choisissez et appuyez

PLUS CHAUDE

MOINS CHAUDE

MÊME TEMPÉRATURE

...QUE CELLE DU RÉCIPIENT SANS EAU ? VÉRIFIEZ VOTRE REPONSE

comparez après l'expérience sans évaporation-condensation

3

Étapes de la manipulation sur l'évaporation-condensation, génération 2.

Évolution des manipulations

Une première génération de manipulations a consisté en la réalisation de maquettes de faisabilité. Dans la suivante, on a introduit des panneaux privilégiant le texte (fig. 16). Dans la troisième (fig. 11), on a réduit la place du texte auquel des schémas ont été associés et la quatrième et dernière génération est caractérisée par une mise en situation des manipulations dans un décor réaliste en deux dimensions. On peut d'ores et déjà supposer que la prochaine introduira la troisième dimension, améliorant ainsi le réalisme et témoignant d'un sens artistique et esthétique susceptible de stimuler davantage l'émotionnel du visiteur. Pour cela, on fera appel à un créateur qui réalisera un objet en rapport avec les principales caractéristiques de l'atmosphère : légèreté, couleur, lumière, espace.

Toutefois, ne négligeons pas le rôle heuristique des montages artisanaux. C'est en expérimentant des dispositifs très simples et peu coûteux que nous avons pu simplifier les solutions. L'évolution entre la première et la dernière génération s'est faite sur une année. Cette durée coïncide avec celle que requiert la réalisation des manipulations de l'Exploratorium de San Francisco. Dans le cadre habituel des expositions avec des délais très courts et des budgets limités, ces longs développements sont incompatibles avec le recours à la sous-traitance dont les coûts élevés ne permettent pas cette activité de recherche et de développement. Seule une activité de recherche et de développement interne satisfait à ces contraintes. Or, comme les centres de création de nouvelles manipulations sont peu nombreux de par le monde, il n'est pas étonnant que celles-ci soient rares.

Expérience sans changement de phase

On chauffe le bas du récipient. L'air en bas s'échauffe, se dilate et monte. Au contact de la surface supérieure et des bords, cet air se refroidit, devient plus lourd et redescend. Il y a « mouvement convectif » (voir la manip « convection »). La puissance thermique transportée par convection peut se mettre de façon approchée sous la forme :

$$P = D \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Δ : débit masse de l'air (kg / s)

C_p : chaleur spécifique de l'air (J / K / kg)

ΔT : différence de température entre le bas et le haut du récipient. Cette puissance, transmise par l'air en haut et aux bords du récipient, est à son tour évacuée vers l'extérieur (air ambiant, enceinte) par convection et par rayonnement infrarouge.

Perturbation apportée par l'évaporation condensation

On part de la même situation thermique que ci-dessus (même ΔT , même D , même échange infrarouge). En bas du récipient, on dépose un film d'eau, à la même température que la surface inférieure du récipient. Cette eau s'évapore et on considère que l'air juste au-dessus de ce film d'eau est saturé en humidité. Bien qu'il y ait évaporation, la température du bas du récipient reste inchangée grâce au thermostat (la puissance de chauffe disponible est plus grande que celle qui est utilisée). En haut du récipient la température est plus faible et la teneur en eau ne peut être supérieure à celle correspondant à la saturation en humidité à cette température. La différence de température ΔT entre le bas et le haut du récipient entraîne une différence de teneur en eau ΔQ . L'air dans son mouvement de convection entraîne la vapeur d'eau dont une partie se condense lorsque l'air se refroidit. Ainsi la puissance transportée par convection comporte une puissance thermique, d'une part, sous forme sensible (comme précédemment) et, d'autre part, une forme latente (l'eau qui s'évapore en bas et se condense en haut).

$$P_2 = D \cdot C_p \cdot \Delta T + D \cdot \Delta Q \cdot L$$

L : chaleur latente.

Pour un même débit convectif D et pour une même différence de température ΔT , la puissance transportée est plus élevée lorsqu'il y a évaporation-condensation. Les choses sont en réalité plus compliquées, car ce surcroît de puissance augmente la température de la face haute, donc diminue ΔT , ce qui entraîne une diminution du débit convectif D , de la différence de teneur en eau dans la partie supérieure ΔQ , donc une diminution de la puissance réellement transportée par rapport à celle calculée ci-dessus. On peut cependant comprendre le résultat par un raisonnement simple utilisant les conditions d'équilibre de la face supérieure refroidie par l'air ambiant à la température T_1 , constante.

Air sec : l'énergie calorifique, dont le débit est limité par les pertes visqueuses, est analogue à un courant de chaleur qui réchauffe la face à travers une résistance $R = R_{\text{sec}}$ (en fait, une résistance correspondant aux échanges infrarouges en parallèle avec une résistance représentant le transfert convectif); ces deux échanges étant à peu près proportionnels à ΔT , on peut en effet écrire (fig. 19) :

$\Delta T = R \cdot \text{flux}$ (en analogie avec $\Delta U = R \cdot I$).
On a alors, en écrivant qu'à l'équilibre le flux $1 / R \cdot (T_1 - T_2)$ qui chauffe la plaque supérieure est égal au flux $1 / r \cdot (T_2 - T_3)$ qui le refroidit :

$$1 / R \cdot (T_1 - T_2) = (1 / r) \cdot (T_2 - T_3)$$

$$1 / R \cdot (T_1 - T_2) = (1 / r) \cdot (T_2 - T_1 + T_1 - T_3)$$

$$(1 / R + 1 / r) \cdot (T_1 - T_2) = (1 / r) \cdot (T_1 - T_3)$$

$$(T_1 - T_3 \text{ est constante})$$

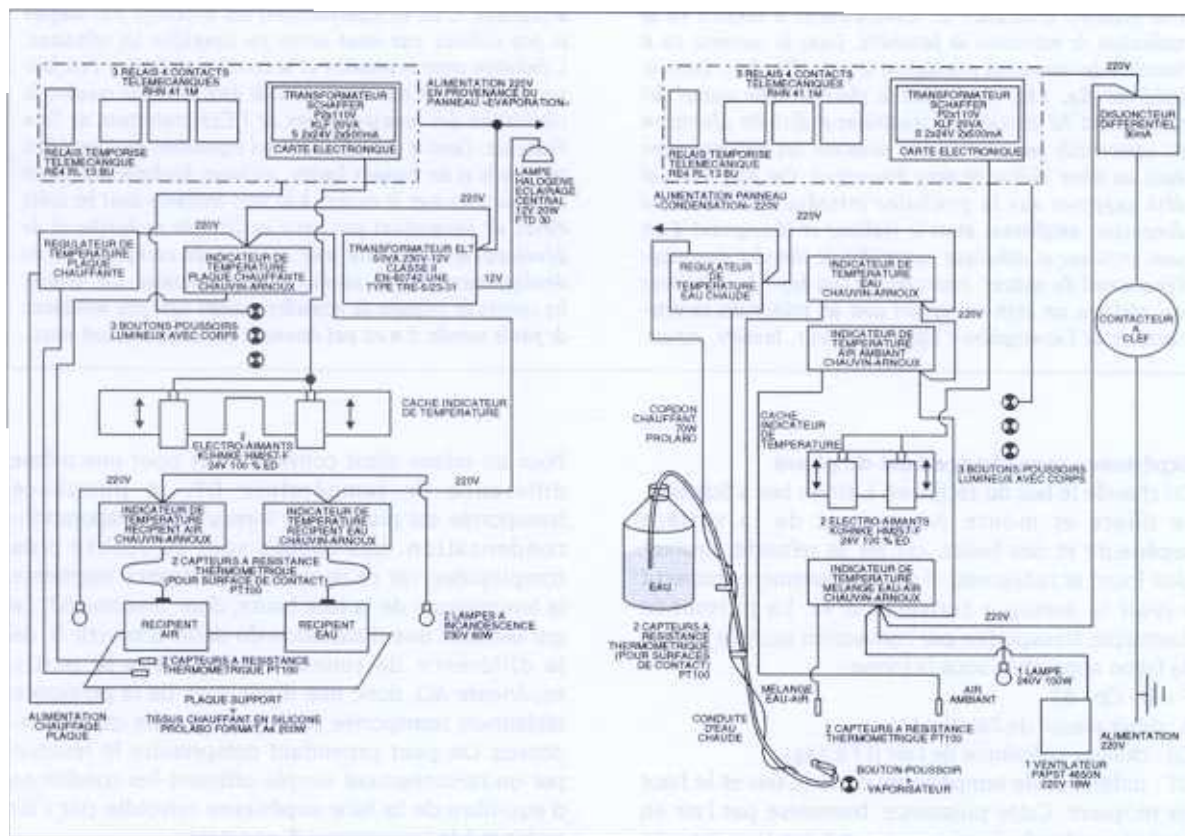
$$(T_1 - T_2) = (T_1 - T_3) \cdot (1 / (1 + r / R)).$$

Avec condensation, le transport humide court-circuite R_{sec} (la différence de température entre les deux surfaces est inférieure à celle obtenue avec de l'air sec : r / R croît, $1 / (1 + r / R)$ décroît, et $(T_1 - T_2)$ diminue, T_2 (humide) $> T_2$ (sec).

Nous avons essayé de concevoir des expériences plus « rigoureuses », qui maintiennent le débit convectif D et la différence de température à peu près constante, qu'il y ait ou non de changement d'état. Mais cela se traduisait à chaque fois par des machines thermodynamiques trop compliquées et qui perdaient ainsi la lisibilité et la compréhension immédiate du principe.

Figure 17

104



Raccordement et localisation des composants (vue arrière de la manipulation) :
panneau « Condensation » à gauche, panneau « Évaporation » à droite.

Pour le détail du circuit de commande temporisé des caches indicateurs de température des récipients eau et air, se reporter au schéma correspondant.

Figure 18

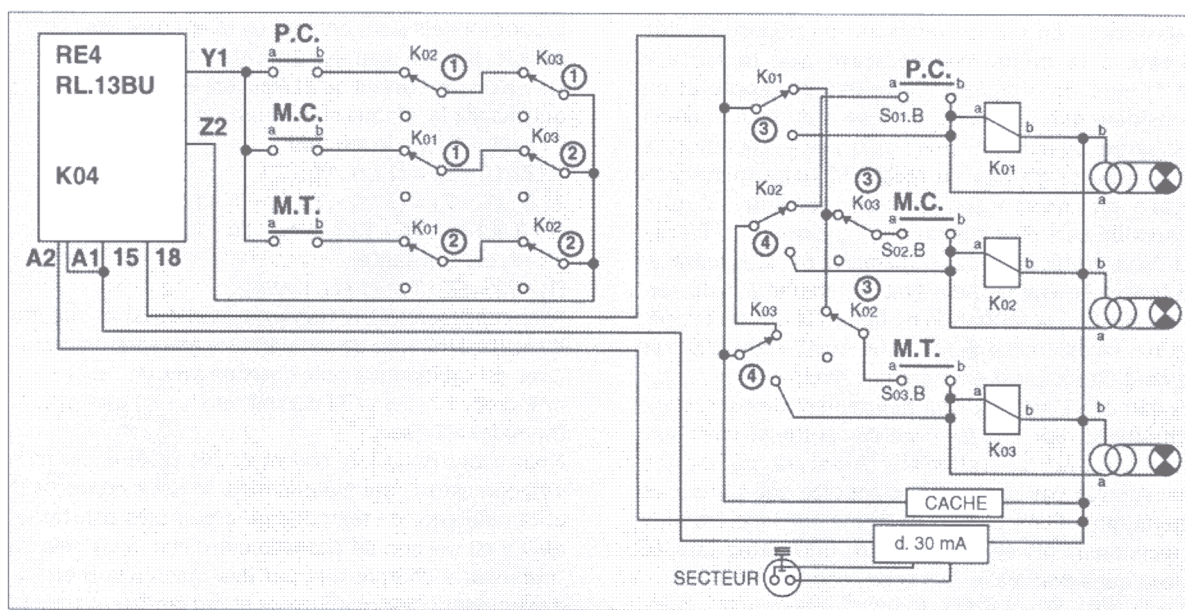


Schéma électrique du questionnaire.

Réalisation

Les deux récipients cylindriques de la figure 13 possèdent un petit trou afin d'éviter de limiter la pression. Un capteur de température relié à un afficheur est collé sur la face supérieure de chaque récipient que le public peut toucher grâce à deux ouvertures pratiquées dans le panneau avant.

Le problème posé au public est le suivant (fig.11) : « Les bases de deux récipients contenant l'un de l'eau et de l'air, l'autre uniquement de l'air, sont chauffées à la température de 70 °C. La surface supérieure du récipient contenant uniquement de l'air est-elle la plus chaude ? »

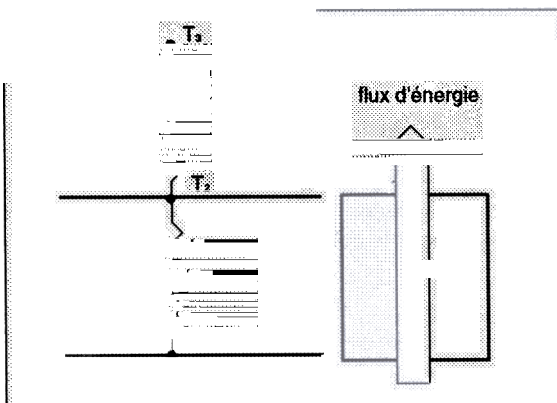
En appuyant sur le bouton correspondant à l'une des trois réponses « oui », « non », « je ne sais pas », deux volets se soulèvent, laissant apparaître au-dessus de chaque récipient la température de sa face

supérieure. Invité à vérifier sa réponse en consultant les afficheurs de température et en touchant la face supérieure des deux récipients, le public peut constater que c'est la face supérieure du récipient contenant de l'eau qui est la plus chaude.

Parti pris graphique et mise en scène

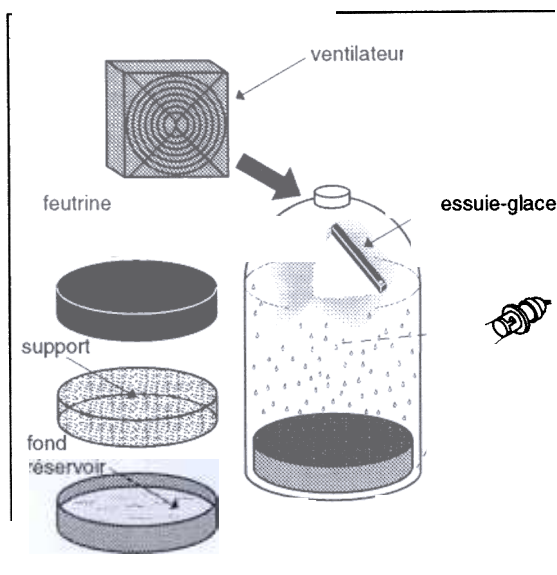
Le propos de la manipulation étant de mettre en évidence les conséquences thermiques de l'évaporation et de la condensation pour comprendre le facteur essentiel de réchauffement de l'atmosphère par la terre, il convenait de relier ces deux phénomènes à une certaine réalité, sans omettre le maillon du transport propre à tout vecteur énergétique. De plus, sur le plan de la communication, il est important d'apporter une réponse synthétique au titre. C'est à la partie centrale de la manipulation que revient cette tâche. afin de suggérer une spécialisation des phénomènes, le décor accompagnant chacune des manipulations est relié à la partie centrale dont le texte est la conclusion de chacune des deux expériences. La surface la plus efficace pour évoquer l'évaporation nous a semblé être la surface d'un océan, tandis que le cœur d'un nuage nous a paru être l'endroit adéquat pour situer la condensation.

Figure 19



Transfert de chaleur : l'analogie électrique.

20



Principe de la manip « Cycle de l'eau ».

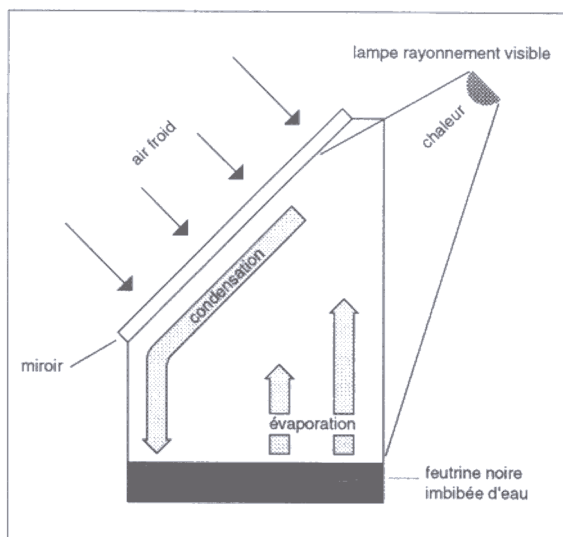
Le cycle de l'eau

Le projet initial de la manipulation sur le cycle de l'eau consiste en une cloche transparente et remplie d'air, éclairée par-dessus par une lampe (évoquant le soleil) chauffant la partie inférieure du dispositif constituée d'un tissu foncé saturé d'eau placé dans un récipient (fig. 20). Le public observe la formation de buée sur la face intérieure du dôme de la cloche (évoquant des nuages). Un essuie-glace racle cette buée. Des filets d'eau coulent le long des parois (évoquant de la pluie). En mesurant la température du fond humide, on constate qu'elle est plus froide que celle du fond d'une autre cloche abritant un matériau sec de même couleur. On obtient le contraire en comparant les températures des dômes. Cette solution est intéressante pour la visualisation des phénomènes. Une variante pourrait mettre en évidence la chaleur latente : on place successivement dans la même cloche les deux matériaux sec et humide chauffés par une résistance régulée en température. Lorsqu'il y a condensation, la température du dôme (à faible inertie thermique) augmente. Ce dispositif nécessite trop d'opérations pour un fonctionnement satisfaisant. L'évaporation de l'eau provoquée par son réchauffement à l'aide de spots de forte puissance et la condensation sur une paroi en acier inoxydable poli (refroidie par ventilation) ont lieu dans une boîte étanche. Celle-ci est constituée par un fond et un couvercle incliné en acier inoxydable et des parois verticales en altuglas. La présence de buée est montrée par un essuie-glace que le public, en appuyant sur un bouton, fait pivoter

de quatre-vingt-dix degrés. Le refroidissement par convection forcée à l'aide de ventilateurs est insuffisant pour évacuer la plus grande part d'énergie de condensation. Afin d'accroître la quantité d'eau condensée, on peut assurer un meilleur refroidissement de la face inclinée en la recouvrant d'un tissu

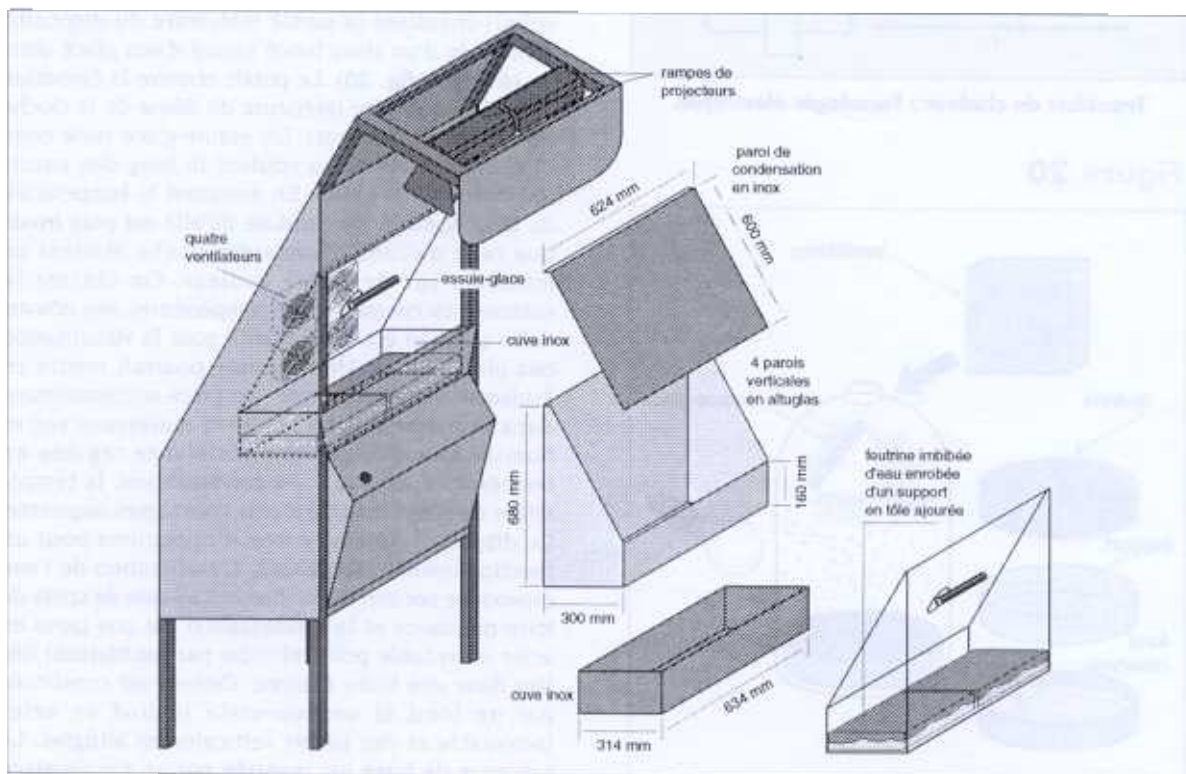
ou buvard imbibée d'eau qui va s'évaporer sous l'action de l'air pulsé. On peut aussi pulvériser de l'eau à proximité des ventilateurs, les fines gouttelettes dans le flux d'air s'évaporent alors immédiatement lorsqu'elles entrent en contact avec la surface inclinée. En refroidissant la plaque, on augmente cette masse d'eau par unité de temps. Pour faciliter les échanges de chaleur, la plaque en acier inoxydable est recouverte par une plaque en cuivre. L'essuie-glace est actionné par un motoréducteur. Pour faciliter l'évaporation, on utilise de la feutrine noire posée sur un support de tôle perforée. L'ensemble est immergé dans l'eau contenue dans le réservoir. Ce dispositif nécessite une faible quantité d'eau, il a donc une inertie thermique réduite. La chaleur est absorbée par la feutrine imbibée d'un peu d'eau, de telle sorte que la température de la surface supérieure est relativement élevée. En isolant le dessous de la feutrine et les bords latéraux de la cuve, on diminue les pertes thermiques. une parfaite étanchéité doit être assurée car la vapeur d'eau s'échappe par la moindre ouverture. La condensation est inexistante sur la face avant réalisée en altuglas car celle-ci est chauffée par le rayonnement infrarouge émis par les spots d'éclairage. Dans le but de favoriser une bonne compréhension du phénomène, nous avons adjoint un décor légendé illustrant de façon simple le cycle de l'eau dans l'atmosphère et le mécanisme de la manipulation.

Figure 21



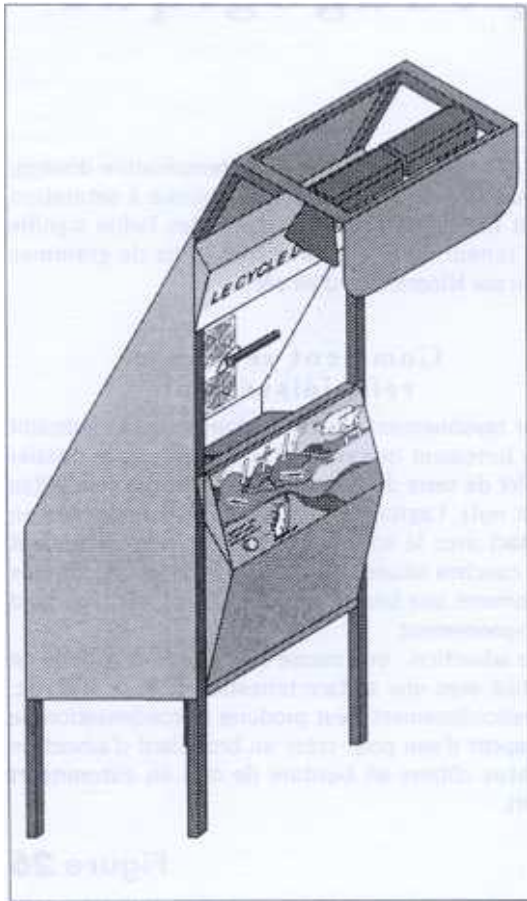
Coupe de la manip.

Figure 22



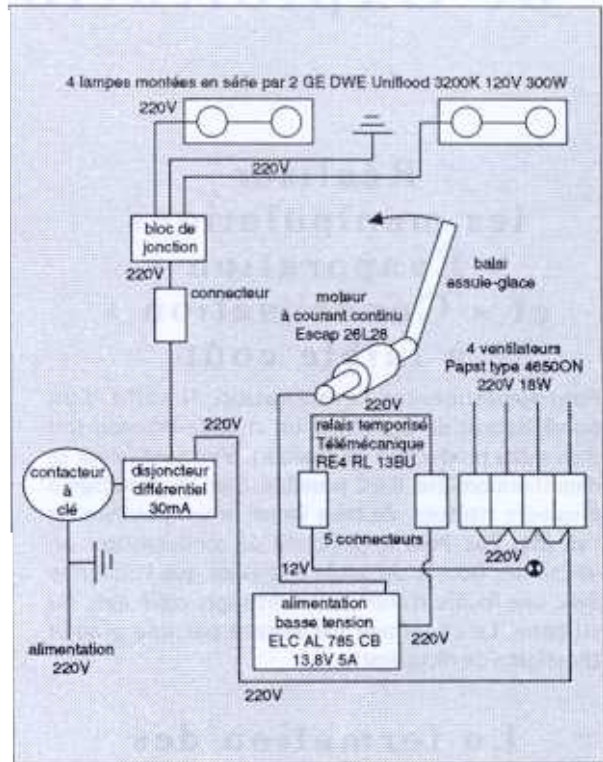
Dimensions.

Figure 23



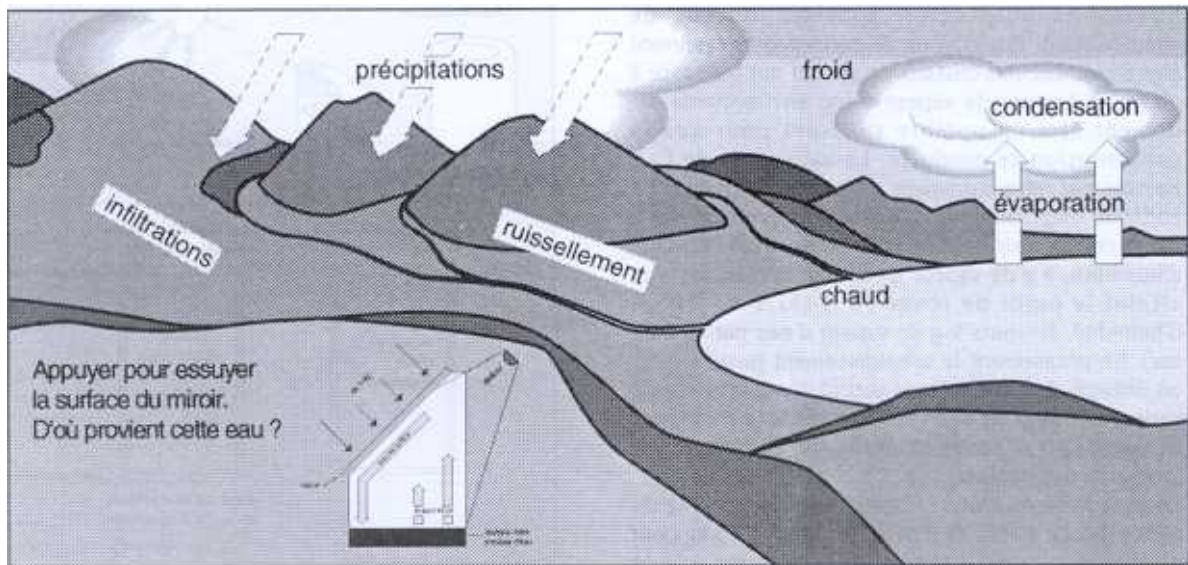
Vue générale de la manipulation.

Figure 24



« Cycle de l'eau », raccordement et localisation des composants, vue arrière de la manipulation. Le schéma de raccordement du relais temporisé et du bouton-poussoir lumineux qui commandent le balai essuie-glace est simplifié à l'extrême. Pour cette raison, l'alimentation n'y est pas représentée.

Figure 25



Décor de la manip.

3. Exploitation pédagogique

Réaliser les manipulations « Évaporation » et « Condensation » à faible coût

Pour expérimenter l'évaporation, il suffit d'un pulvérisateur de parfum, d'un chauffe-biberon (ou d'un autre producteur de chaleur), d'un ventilateur et d'un thermomètre. Il est possible, avec un chauffage à plusieurs vitesses, de faire varier la température de l'air (fig. 26). Pour le dispositif de condensation, on utilise des bocaux de faible épaisseur que l'on ferme avec une feuille d'aluminium ménager collé avec du silicone. Le chauffage est assuré par une plaque chauffante de récupération.

La formation des nuages

Un nuage est un milieu hétérogène constitué par de l'air sec, de la vapeur saturante, de l'eau liquide à température positive ou négative, des cristaux de glace, des particules solides (sable, poussières, sel marin...), des particules de liquides non aqueuses. La cause principale de la formation des nuages bas est le refroidissement qui, lorsqu'il est suffisant, produit la saturation de l'air humide condensant sous la forme de gouttelettes d'eau en présence de particules solides en suspension appelées noyaux de condensation. Ces noyaux de condensation peuvent être de minuscules cristaux de sel qui ont tendance à attirer et à capter la vapeur d'eau environnante. Ils doivent être en nombre suffisant pour que la condensation se produise. La saturation de l'air humide par refroidissement s'exprime précisément à partir du diagramme de la figure 5 : en refroidissant, par exemple, l'air défini par le point A (25 °C, 45 % d'humidité, 9 g de vapeur d'eau par kg d'air sec), on atteint le point de rosée en B (12,3 °C, 100 % d'humidité, toujours 9 g de vapeur d'eau par kg d'air sec). En poursuivant le refroidissement jusqu'à 0 °C, on obtient de l'air toujours saturé contenant 4 g de vapeur par kg d'air sec ; les 5 g restants de vapeur d'eau par kg d'air sec se condensent et participent à la formation des nuages.

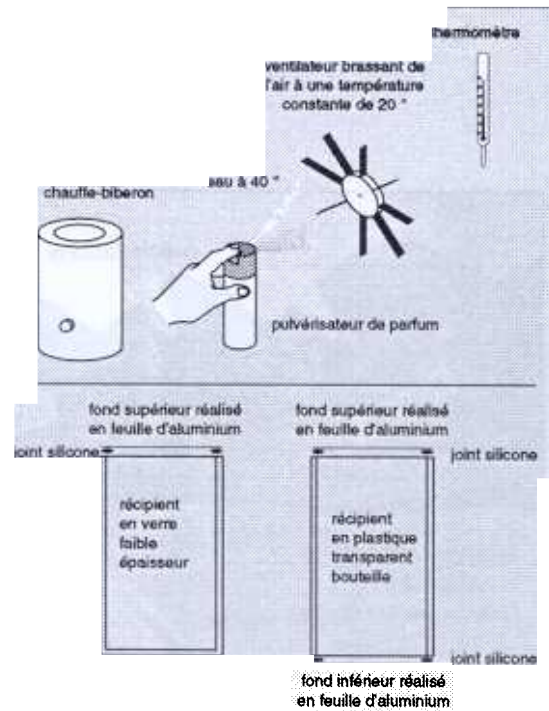
La teneur en eau des nuages varie de 0,5 g/kg de nuage (nuage stable du type Altostratus) à 5 g/kg pour un nuage convectif (Cumulus)1. Notons que le diagramme (fig. 5) n'est valable que pour la pression

de 1013 hectopascals. Pour une température donnée, la quantité d'eau par unité de volume à saturation étant fixée, une pression totale plus faible signifie une teneur en eau plus élevée (plus de grammes d'eau par kilogramme d'air sec).

Comment se fait le refroidissement

- Par rayonnement : par ciel clair, le sol se refroidit plus fortement que par ciel nuageux (voir le dossier « Effet de serre de l'atmosphère »). Et par vent faible (non nul), l'agitation de l'air dans les couches en contact avec le sol froid favorise le refroidissement des couches situées au-dessus. Dans ces conditions se forment une brume et un brouillard, dit brouillard de rayonnement.
- Par advection : une masse d'air chaud et humide en contact avec une surface terrestre froide se refroidit. Ce refroidissement peut produire la condensation de la vapeur d'eau pour créer un brouillard d'advection (stratus côtiers en bordure de mer en automne et hiver).

Figure 26



Exemples de dispositifs bon marché.

- Par détente adiabatique (fig. 29) : une masse d'air humide qui s'élève rapidement se refroidit par détente quasi adiabatique. Lorsque l'air humide atteint, à la pression régnante, son point de rosée, la vapeur d'eau se condense et empêche la température de descendre (il y a restitution de la chaleur latente de vaporisation). Ainsi, un air humide saturé se refroidit moins vite (de l'ordre de 0,6 K/100 m) qu'un air sec (1 K/100 m). Ce processus se trouve à l'origine du foehn (fig. 28).

Les apports d'eau

Ils se font par évaporation. La vapeur d'eau se répand dans l'atmosphère par diffusion turbulente au contact d'une surface d'eau, de sol saturé ou de végétation. La quantité d'eau transférée de la terre à l'atmosphère dépend de la vitesse du vent, de la surface d'évaporation, de la différence de tension de vapeur entre la surface évaporante et l'air à son contact ; de la rugosité du sol et de la végétation. Examinons le processus d'évaporation : soit de l'air humide non saturé, à la température T(air) et à la

pression atmosphérique normale, en contact avec une grande étendue d'eau à la température T(eau). Pour simplifier, nous supposons que l'eau fournit la chaleur latente d'évaporation et que sa température reste constante. Nous appellerons e la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air, $e_s(T(\text{air}))$ la tension de vapeur saturante dans l'air à la température T(air) et $e_s(T(\text{eau}))$ la tension de vapeur de l'eau à la température T eau. Nous distinguons deux cas :

- l'air est plus chaud que l'eau : $T(\text{air}) > T(\text{eau})$ donc $e_s(T(\text{air})) > e_s(T(\text{eau})) > e$

Près de la surface, l'eau s'évapore jusqu'à ce que $e = e_s(T(\text{eau}))$. L'humidité est entraînée par diffusion turbulente dans l'air plus élevé et plus chaud (pas de condensation) ;

- l'air est plus froid que l'eau et peu humide ; $T(\text{air}) < T(\text{eau})$

$e_s(T(\text{eau})) > e_s(T(\text{air})) > e$

L'eau fournit alors de l'humidité que l'air refroidit pour former « le brouillard d'évaporation ».

La formation des précipitations

Les dimensions des gouttelettes ou de glace sont très faibles, les forces d'agitation au sein des nuages suffisent à les maintenir en équilibre. Les précipitations se produisent lorsque l'accroissement de la taille de ces gouttelettes devient suffisant pour que le poids les entraîne vers le sol. Ce grossissement s'explique par deux processus : l'effet Bergeron et l'effet de coalescence.

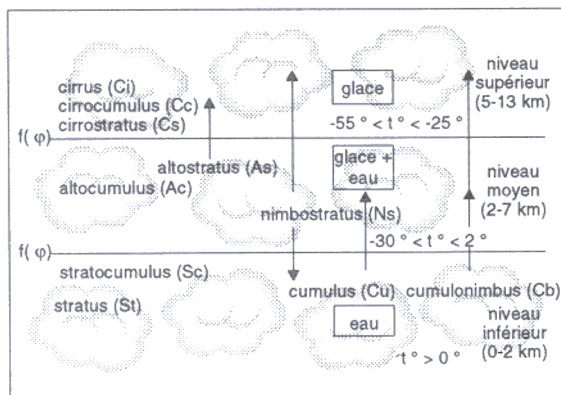
L'effet Bergeron

Dans la partie du nuage où les températures sont négatives coexistent des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondue. Or, pour une température négative, ces deux types de particules n'ont pas la même pression de vapeur saturante : celle de la glace est inférieure à celle de l'eau. Il en résulte un transfert d'eau par évaporation et condensation des gouttelettes vers les cristaux. Lorsque le cristal a une masse suffisante, il tombe. Si la zone qu'il traverse est suffisamment épaisse et possède une température positive, il pleut. L'effet Bergeron intervient seul pour des particules de diamètre inférieur à 100 microns. Dans les régions tempérées, 97 % des nuages donnant des précipitations présentent des températures négatives à leur partie supérieure.

La coalescence

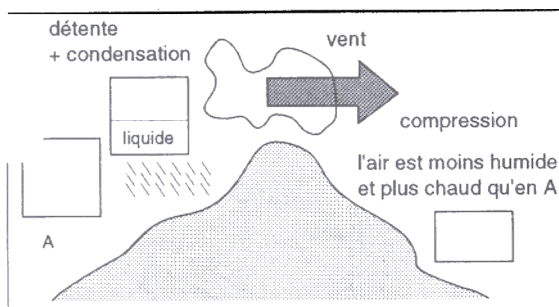
Les cristaux de glace dans les nuages sont en chute libre ou, par turbulence, entrent en collision avec les gouttelettes d'eau surfondue. L'agrégation des particules a pour effet d'augmenter le poids des cristaux. Il en est de même avec des gouttelettes de diamètre supérieur à 30 microns qui, entrant en collision, provoquent un accroissement rapide de leur masse.

Figure 27



Répartition des nuages selon l'altitude.

Figure 28



Le foehn est un phénomène qui génère des précipitations au vent de la montagne en amont du relief, l'échauffement et l'assèchement de l'air sous le vent de la montagne en aval du relief.

Les effets Bergeron et de coalescence interviennent ensemble pour des particules de diamètre supérieur à 100 microns et inférieur à 400 microns. Au-delà, seul l'effet de coalescence agit.

Les catégories de nuages

Les nuages présentent une infinie variété de formes. Toutefois, les météorologistes définissent un nombre limité de formes types (genres) qui peut se décomposer en espèces et variétés. On les regroupe en familles selon leur altitude ou leur hauteur (fig. 27).

Utilisation du pare-vapeur dans l'isolation d'un bâtiment

L'isolation ou la résistance thermique d'un mur est dû à l'air piégé dans les alvéoles d'un matériau isolant tel que le polystyrène extrudé, la laine de roche, la laine de verre. Si de l'eau provenant de la condensation de l'air vient occuper ces cavités, les propriétés thermiques de l'isolant s'en trouvent dégradées. À l'intérieur du mur, la température peut descendre en dessous du point de rosée. Par conséquent, il est nécessaire de placer un pare-vapeur (ou barrière) du côté intérieur du mur entre la couche d'isolation et le revêtement intérieur (fig. 30).

Utilisation de l'énergie solaire pour distiller l'eau

Le dispositif suivant est décrit par J. A. Clark³. La source d'énergie qui simule le rayonnement solaire est constituée de trente spots lumineux (dix-huit lampes de 150 W et douze lampes de 75 W, soit une puissance totale de 3600 W). Ces lampes (au tungstène) émettent la plus grande partie de leur énergie sous la forme du rayonnement infrarouge, lequel est arrêté par une plaque de verre refroidie par un ventilateur. Seul le rayonnement lumineux visible chauffe le distillateur. La répartition des lampes de 75 W permet de faire varier le flux lumineux tout en gardant une homogénéité de l'éclairage. L'étanchéité doit être parfaite et la cuve bien isolée (par une épaisseur de polystyrène extrudé supérieure à 10 cm). Le rendement h est égal à $(m \cdot hv) / (I \cdot A \cdot dt)$ avec m , masse d'eau condensée en (g) pendant la durée dt ;

3. J. A. Clark, « The steady state performance of a solar still », *Solar energy*, vol. 44, n° 1, 1990, pp. 43-49.

h_v , énergie latente d'évaporation (J/g) ; I , énergie incidente W/m^2 ; A , surface de la vitre. Le flux d'évaporation est défini par la formule $m = 0,35 h'c (P(\text{sat eau}) - P(\text{sat vitre}))$ avec $P(\text{sat})$ en atmosphère ; $h'c$, coefficient de convection modifié ($W/m^2 \cdot k$) par la diffusion de la matière. $h'c = 0,884 (T(\text{eau}) - T(\text{vitre}) + (2016 - P(\text{sat eau})) - 1 \cdot (P(\text{sat eau}) - P(\text{sat air}) T(\text{eau}))^{1/3}$. La chaleur transmise de l'eau au vitrage est : $q = h'c (T(\text{eau}) - T(\text{vitre}))$.

Figure 29

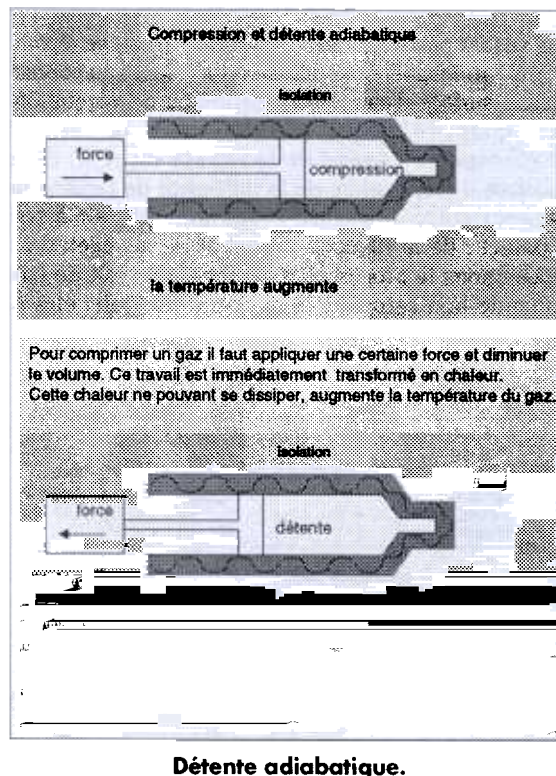
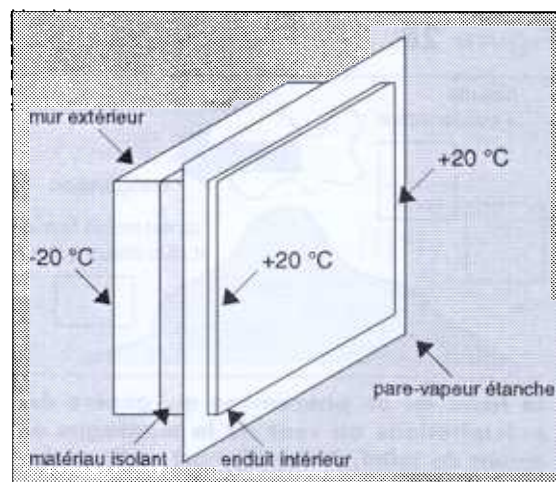
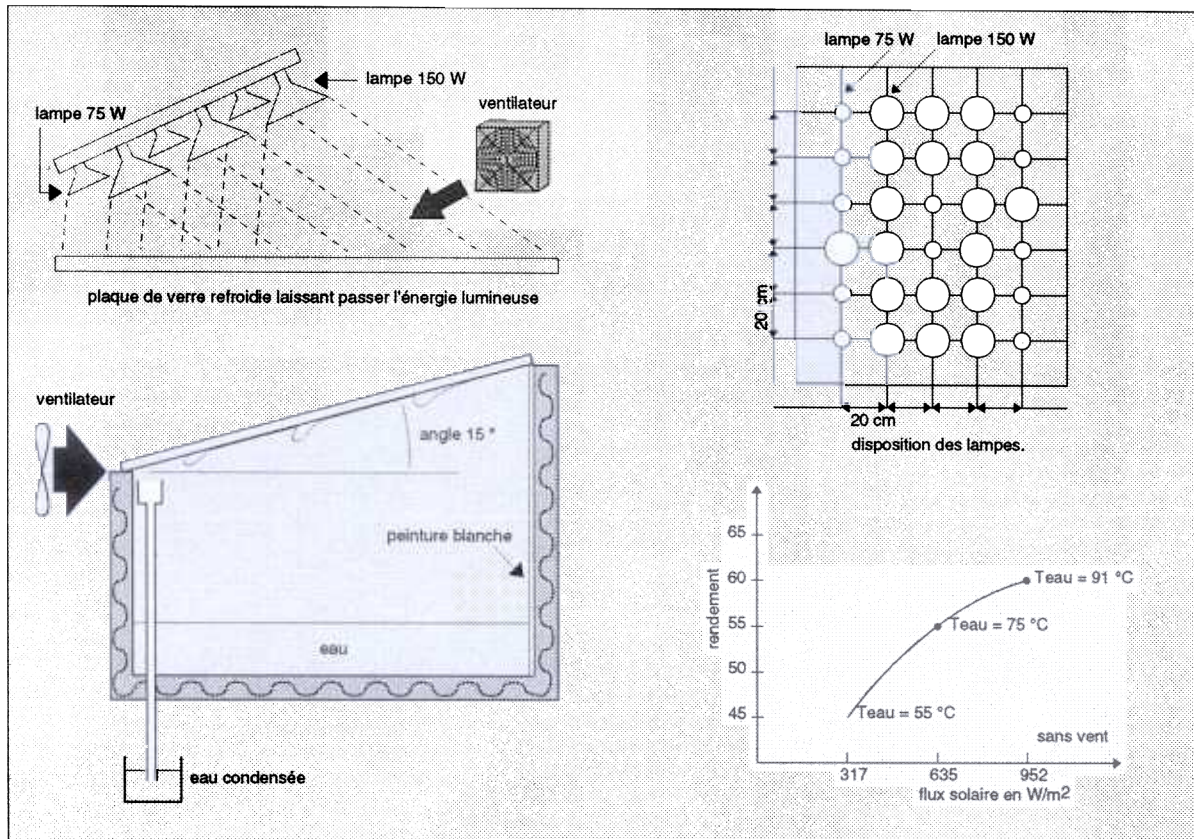


Figure 30



Emplacement du pare-vapeur.

Figure 31



Distillateur solaire et rendement de l'évaporateur.