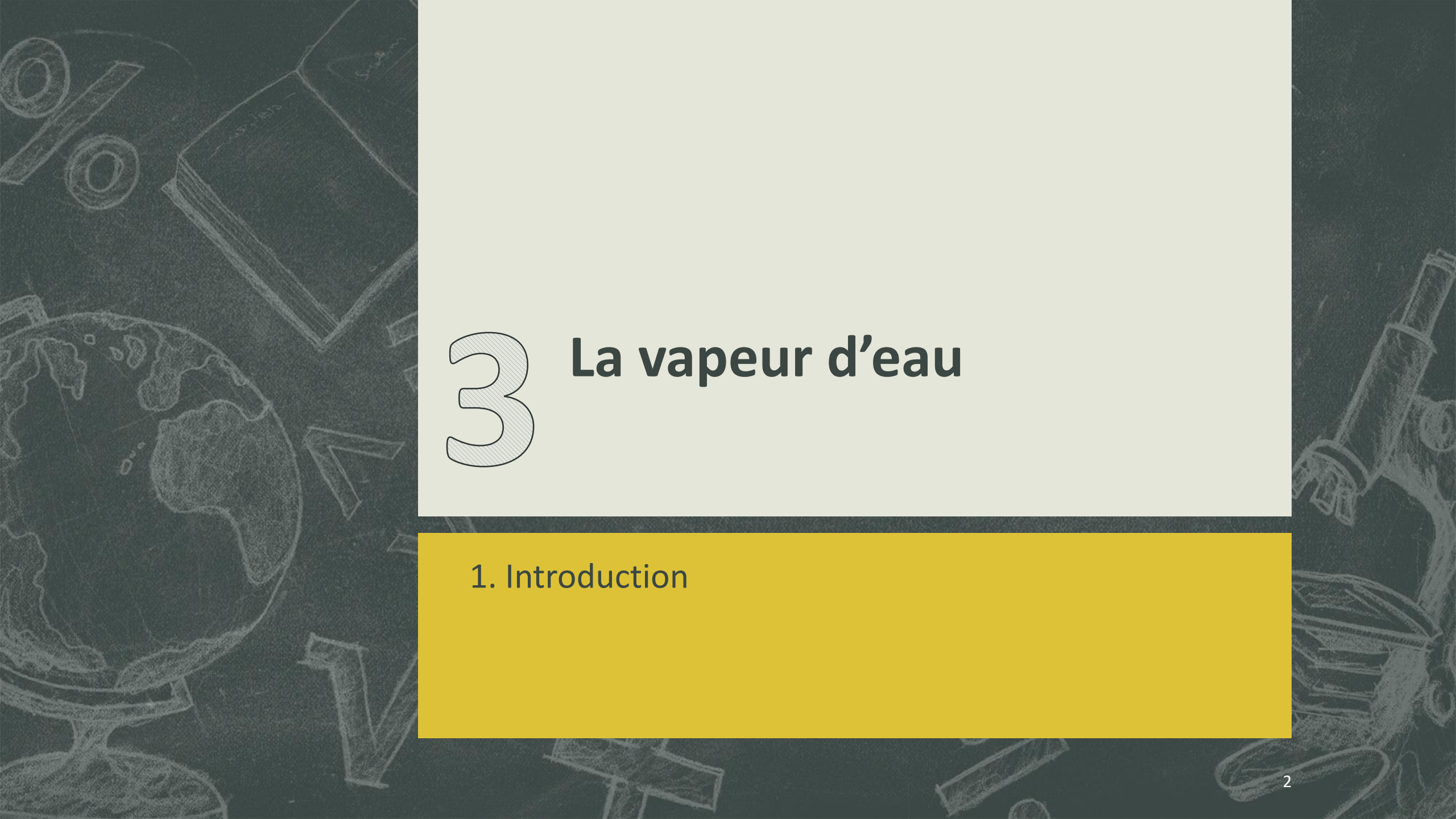


PHYSIQUE INDUSTRIELLE

C. Voyant

2023/2024

A dark grey background with faint, light grey chalk-like drawings of various school and science items. On the left, there's a globe showing continents. Above it, a stack of books, one labeled 'Easy Class'. To the right, a microscope is visible. Other items include a ruler, a compass, and various geometric shapes and symbols like a percentage sign and arrows.

3 La vapeur d'eau

1. Introduction

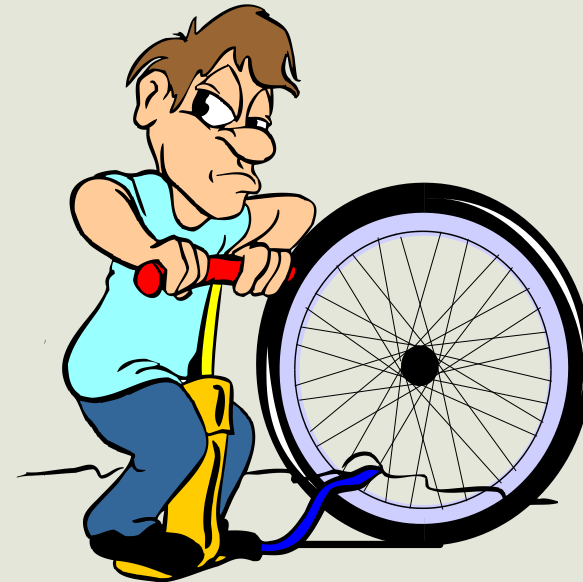
1. Compression et détente : une notion simple

Un gaz qui se détend rapidement
se refroidit.



- Pneu qui se dégonfle
- Bombe de crème chantilly
- Extincteur à CO₂

Inversement un gaz que l'on
comprime s'échauffe



- Pompe à vélo
- Compresseur
- Moteur

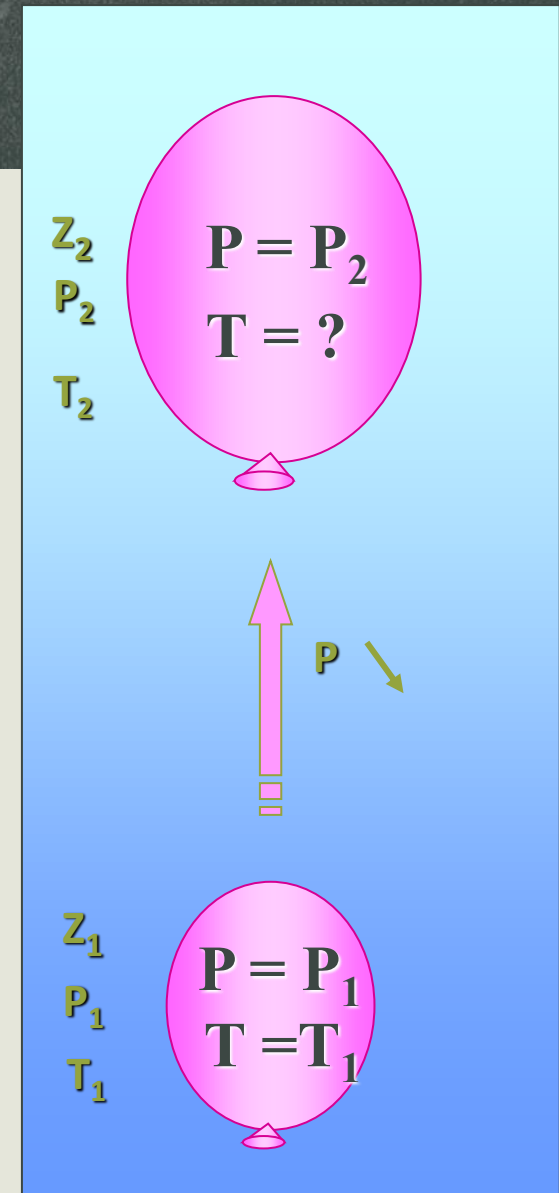
1. La détente

Supposons que l'on isole une bulle d'air, et qu'on lui fasse subir une ascension...

au cours de la montée, elle va rencontrer des pressions de plus en plus faibles.

Si l'on suppose qu'à tout instant, la pression P à l'intérieur de la bulle est égale à la pression de l'air environnant, l'air intérieur va se détendre.

Cette détente va provoquer un refroidissement.

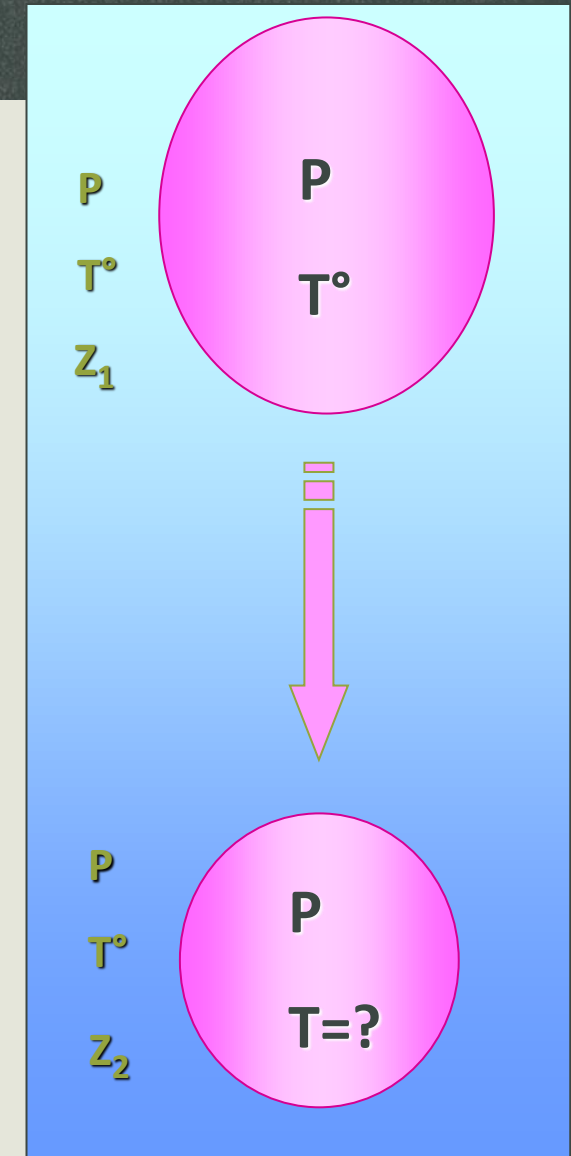


1. La compression

Inversement, si l'on oblige la bulle à descendre...

elle rencontre des pressions plus fortes et donc se comprime...

Cette compression provoque son réchauffement.



1. Relation température et altitude

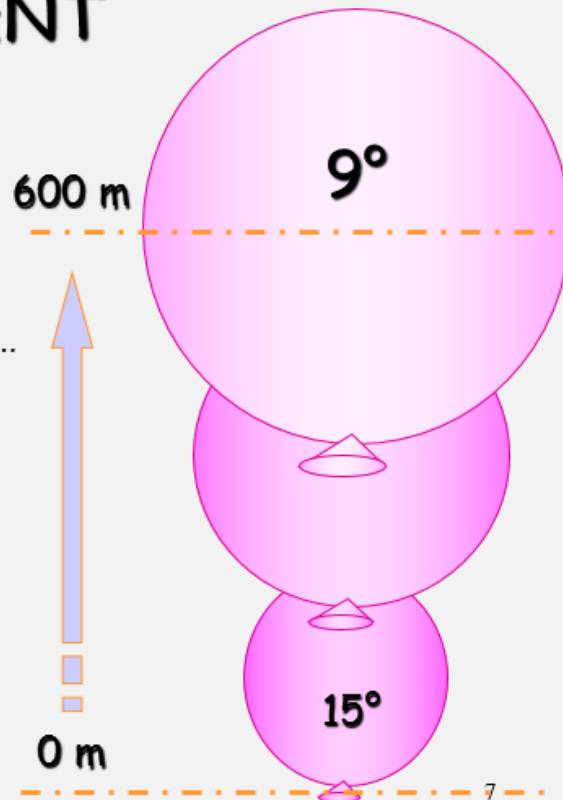
REFROIDISSEMENT PAR DETENTE

En montant, la bulle se détend...

...elle se refroidit d'environ :

$\cong 1^\circ$ par 100 m .

Très exactement de : $0,98^\circ$
par 100 m.

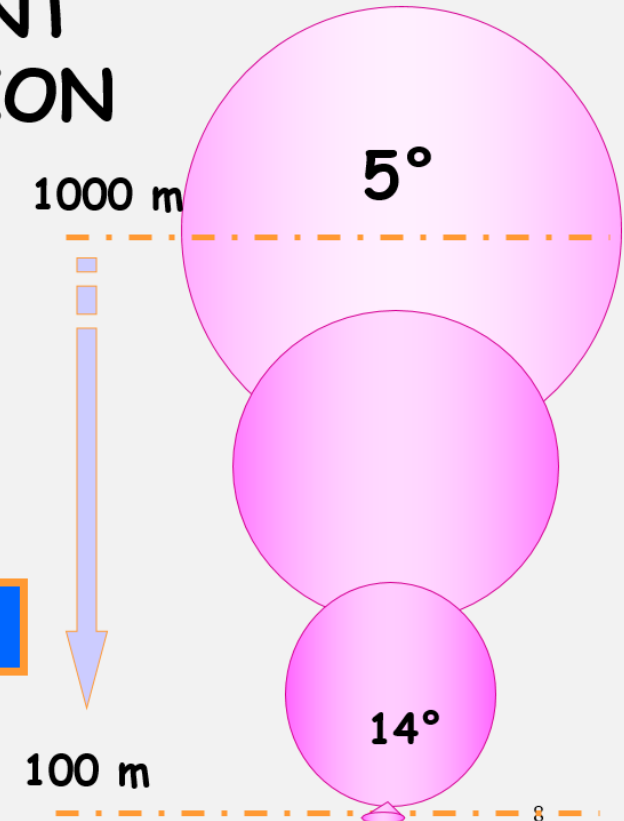


RÉCHAUFFEMENT PAR COMPRESSION

En descendant la bulle se comprime...

...elle se réchauffe d'environ :

$\cong 1^\circ$ par 100 m.



1. Applications numériques

Aujourd'hui, il fait 20°C et P=1 atm au niveau de la mer

En négligeant les phénomènes climatologiques locaux, quelle est la pression, la température et la température de vaporisation

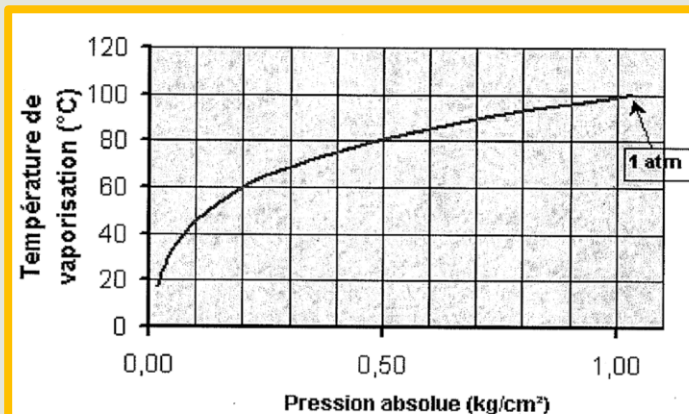
En haut du **Monte Cinto** ?
(alt. 2706m)

En haut du **Mont Blanc** ?
(alt. 4807m)

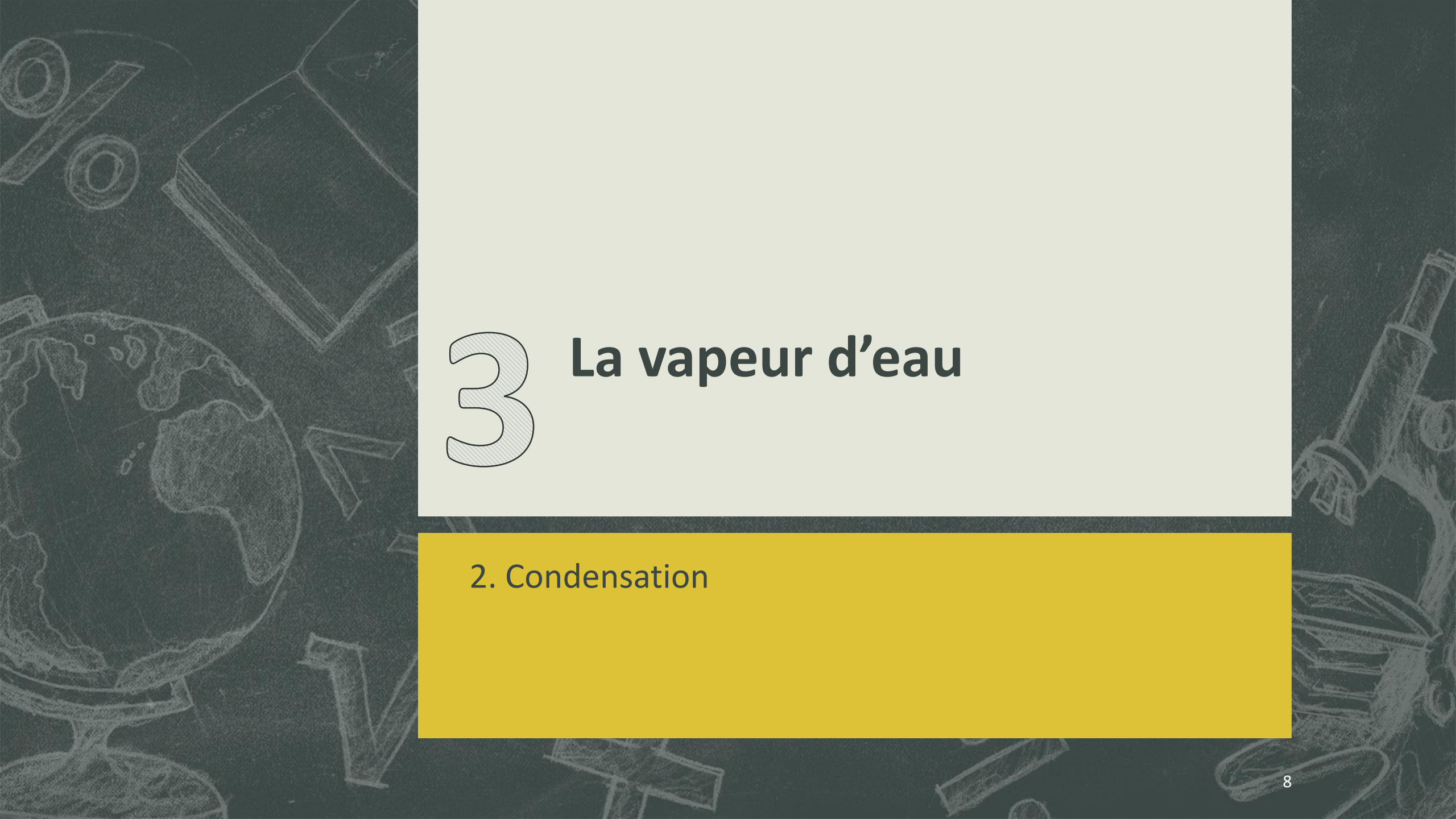
En haut de l'**Everest** ?
(alt. 8848m)

(en hPa) (en m)

$$P_{\text{alti}} = P_{\text{niv. de la mer}} \left(1 - \frac{0,0065 \text{ alti}}{288,15} \right)^{5,255}$$



$$\Delta T \cong 1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$$

A dark grey background featuring a collage of white line drawings of school supplies, including a globe, a book, a ruler, a compass, and a microscope.

3 La vapeur d'eau

2. Condensation

2. Condensation

La vapeur d'eau est l'eau (H_2O) sous forme gazeuse. Elle est parfaitement invisible.

L'air le plus limpide et le plus sec contient toujours une certaine quantité de vapeur d'eau.



Les nuages, le brouillard etc., sont formés de fines particules d'eau liquide (ou de glace).

La buée qui s'échappe de la marmite aussi.



2. Humidité

L'humidité est l'expression de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

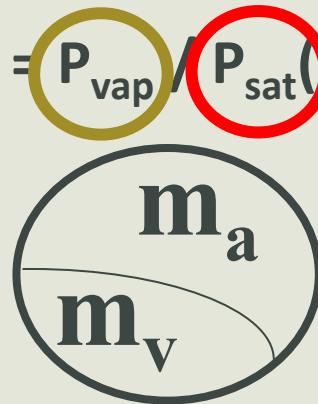
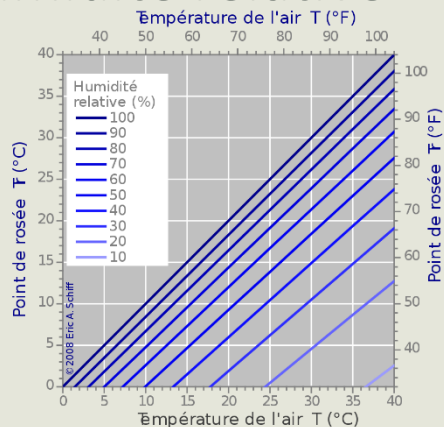
Les principales grandeurs utilisées en météorologie pour la caractériser sont :

- « rapport de mélange » : $r = m_v / m_a$ (gramme de vapeur d'eau par kg d'air sec)
- « l'humidité spécifique » : $q = m_v / m$ ($q \sim r$)
- « l'humidité relative » : $U = P_{vap} / P_{sat}(T)$

Pression partielle : $p_i = x_i \cdot p_{tot}$

$$\ln p_{sat} = 13,7 - \frac{5120}{T}$$

*la vapeur d'eau
contenue dans l'air se
condense sur les
surfaces*



$$m = m_a + m_v$$

2. Pression partielle

Dans l'air atmosphérique assimilé à un mélange d'air sec et de vapeur d'eau la pression atmosphérique P correspond à la somme :

- de la pression partielle de l'air sec: p_a
- et de la pression partielle de la vapeur d'eau: e

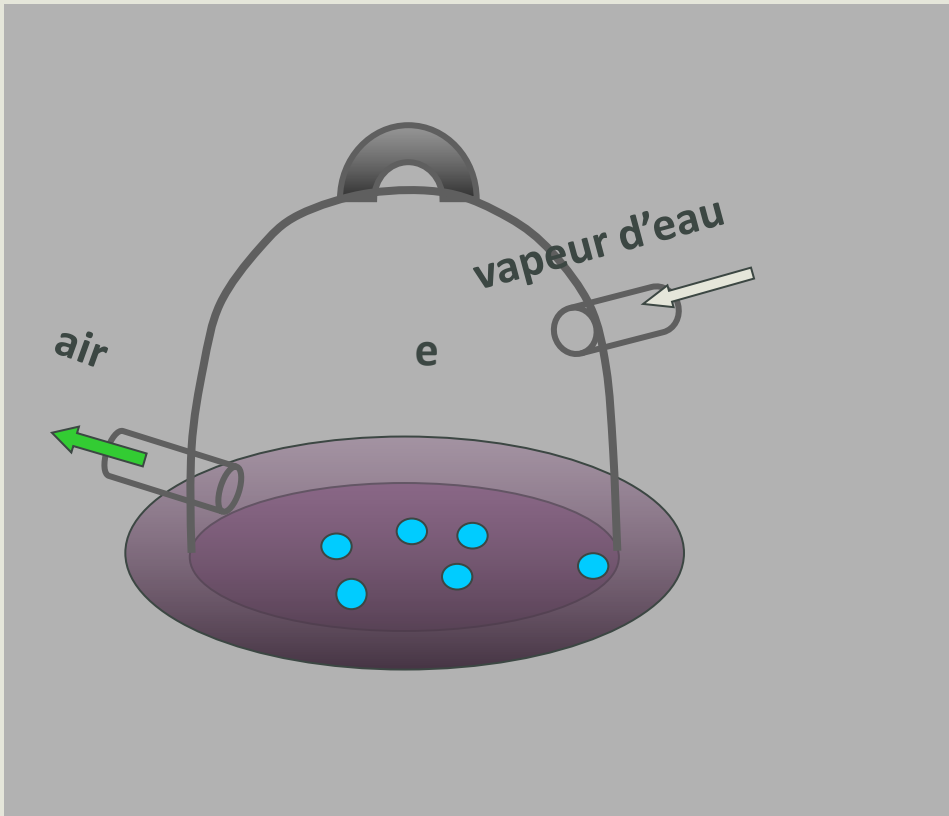
$$P = p_a + e$$

On peut montrer que le rapport de mélange $r = \rho_v / \rho_a$ précédemment défini peut aussi s'exprimer en fonction du rapport des pressions partielles :

$$r = 0,622 \, e / p_a = 0,622 \, e / (P - e)$$

2. Pression de vapeur saturante

Soit un volume déterminé, vide d'air, si + en + de vapeur d'eau (à $T = \text{cte}$),
Augmentation progressive la pression « e » de cette vapeur d'eau.



On constate alors qu'il existe une valeur bien déterminée e_s de la pression pour laquelle commence à apparaître de l'eau liquide.

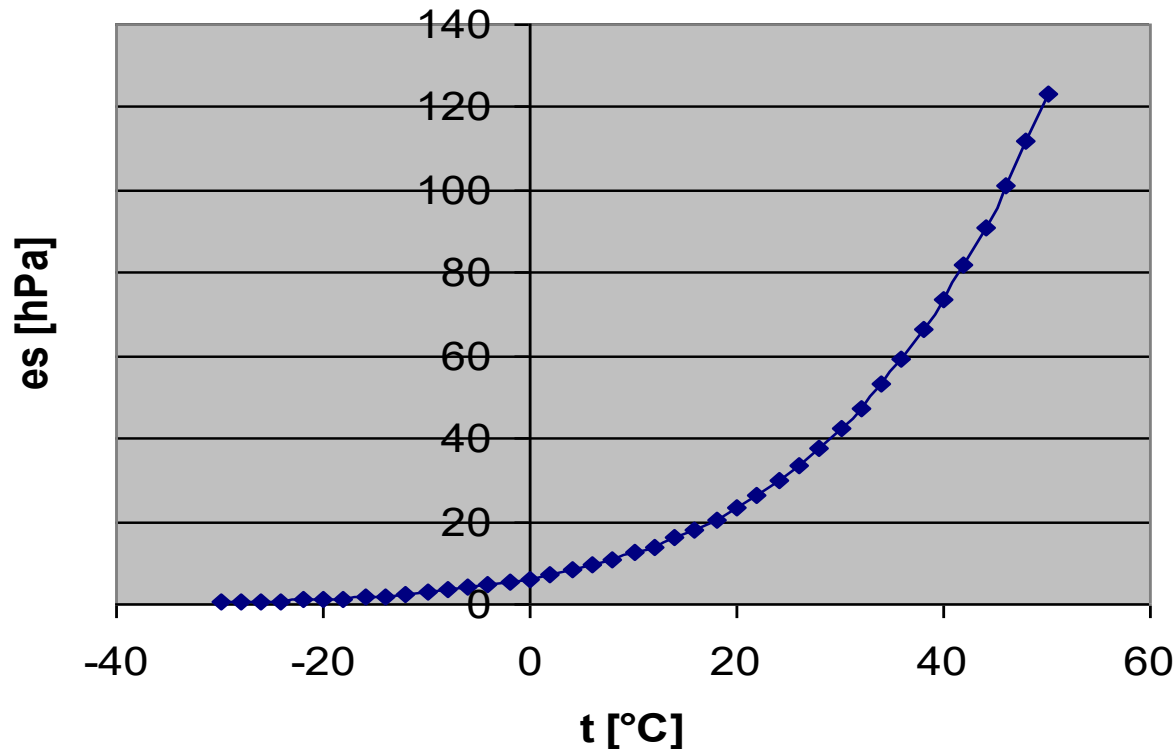
Cette pression e_s est uniquement fonction de la température de la vapeur d'eau.

Pression de vapeur saturante

$$e_s = e_s(T)$$

2. Pression de vapeur saturante

Pression de vapeur saturante (e_s) de la vapeur d'eau en fonction de la température

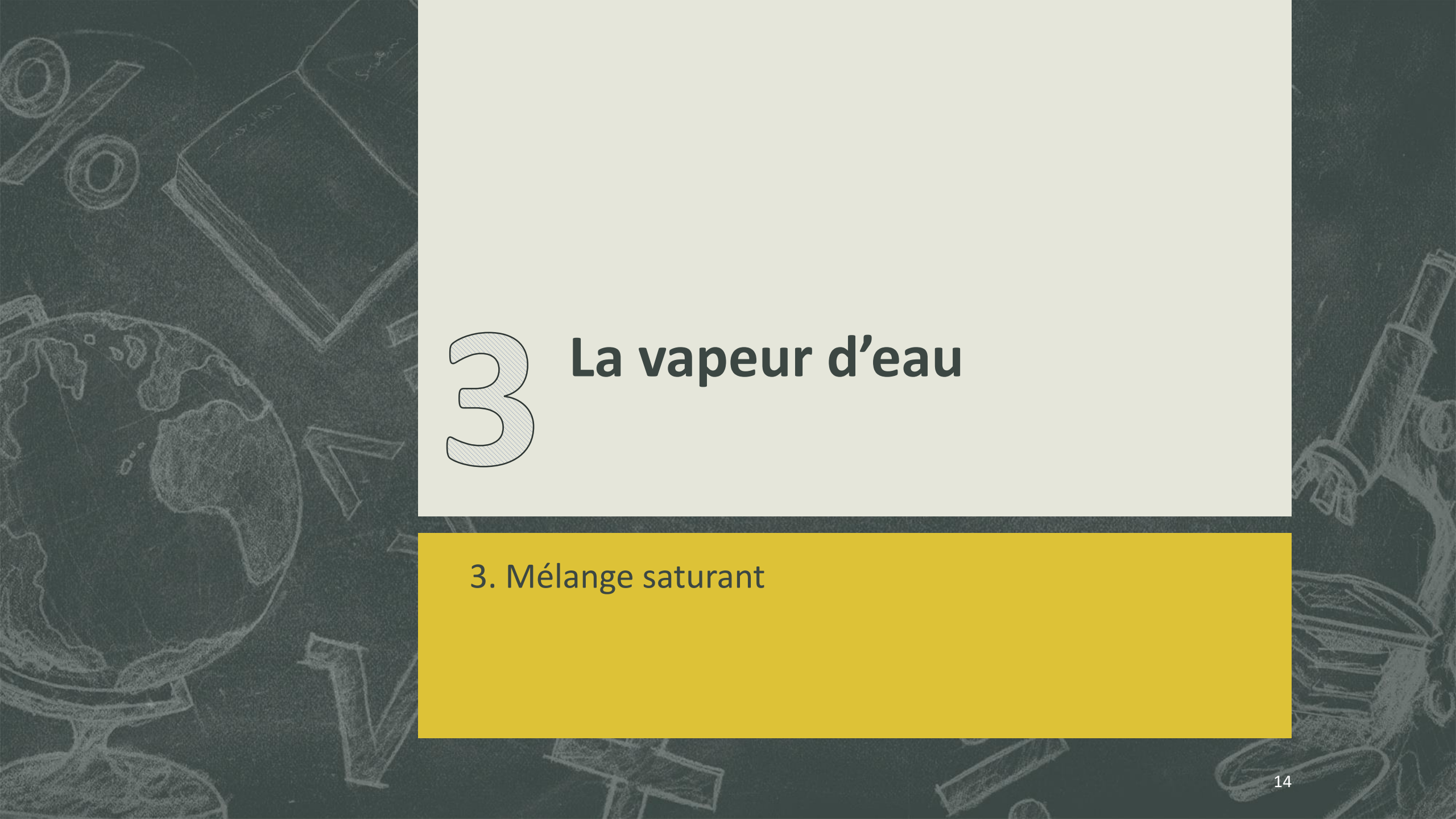


Plus **chaude** est la vapeur d'eau,
plus **forte** est la valeur de la pression de saturation.

au delà de sa valeur de pression saturante, la vapeur d'eau se condense. Selon la température, elle se condensera

- sous forme liquide (gouttelettes)
- ou sous forme de cristaux de glace

- la rosée,
- le brouillard,
- les nuages,
- la pluie,
- ou le givre,
- la grêle, etc.,



3 La vapeur d'eau

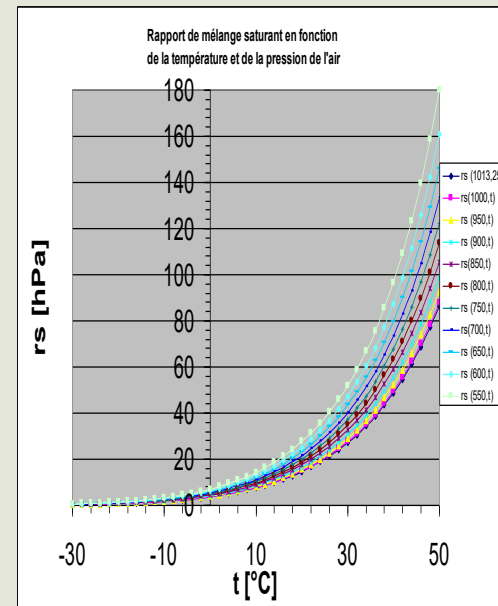
3. Mélange saturant

3. Rapport du mélange saturant

Rapport de mélange saturant r_s

A partir de l'expression du rapport de mélange

$$r = 0,622 \, e/p_a = 0,622 \, e/(P-e)$$



r_s est fonction de :

- la température du mélange
- la pression atmosphérique ($\sim 1/P$)

$$r_s = r_s(T, P)$$

on pourra définir le rapport de mélange saturant r_s par la relation :

$$r_s = 0,622 \, e_s/p_a = 0,622 \, e_s/(P-e_s)$$

$$\text{soit : } r_s \approx 0,622 \, e_s/P$$

car, dans l'atmosphère, e_s est toujours très petit devant P .

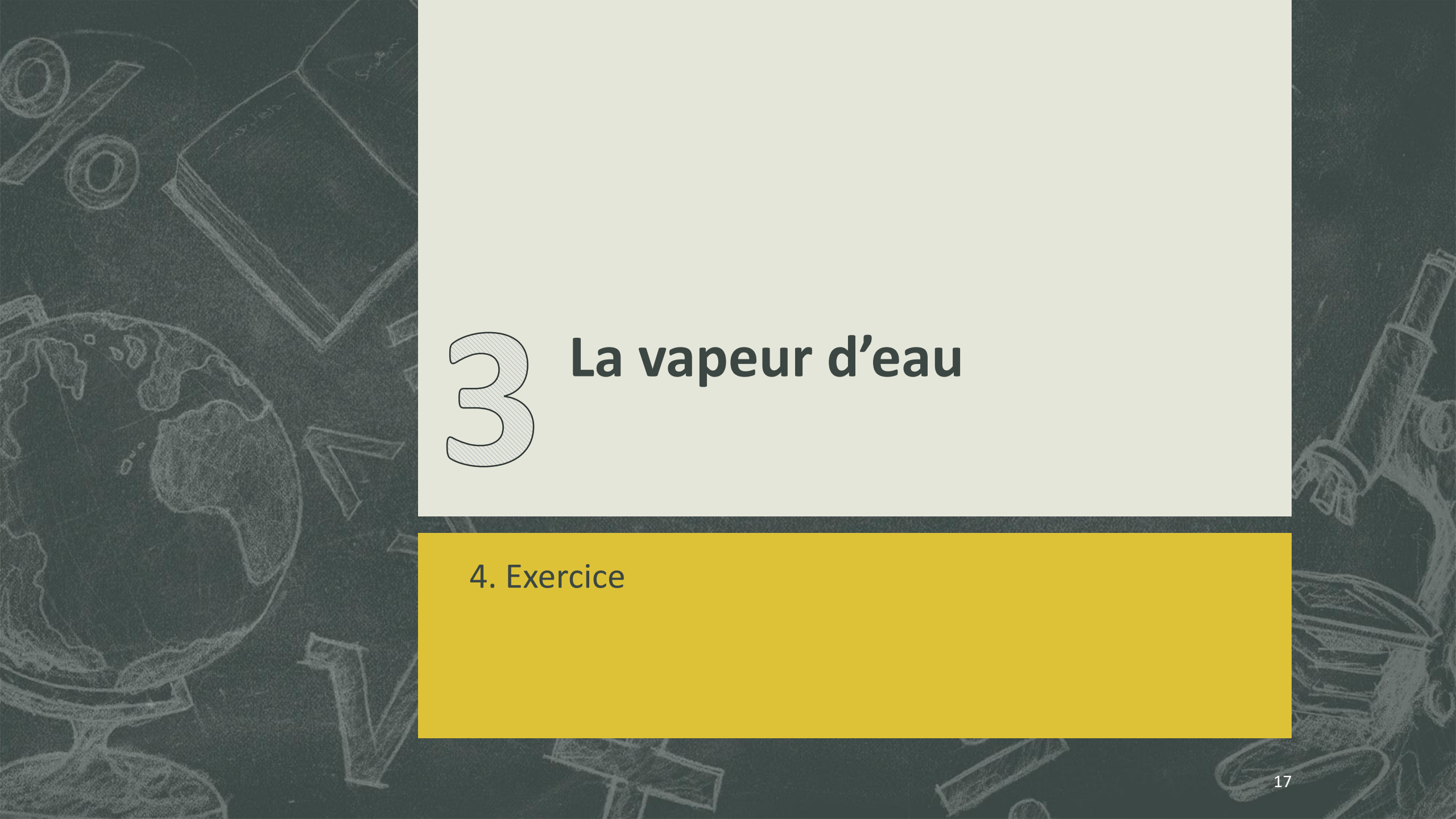
3. Humidité relative et état de saturation

La sensation physiologique d'humidité ou de sécheresse n'est pas seulement liée à la vapeur d'eau contenue dans l'air

Elle est en fait commandée
par l'écart à l'état de saturation...

... d'où la notion d'humidité relative.

$$\text{Humidité relative} = \frac{e}{e_s} \times 100 \approx \frac{r}{r_s} \times 100$$

A dark grey background with faint, light grey chalk-style drawings of various school and science items. On the left, there's a globe showing continents. Above it, a stack of books and a ruler with percentage markings. On the right, a microscope and other geometric shapes like triangles and rectangles are scattered.

3 La vapeur d'eau

4. Exercice

4. Humidité relative : exercices

Quelle est l'humidité relative relevée à Ajaccio en hiver ?

$T = 8^{\circ}$ et $r = 6.4\text{g/kg}$

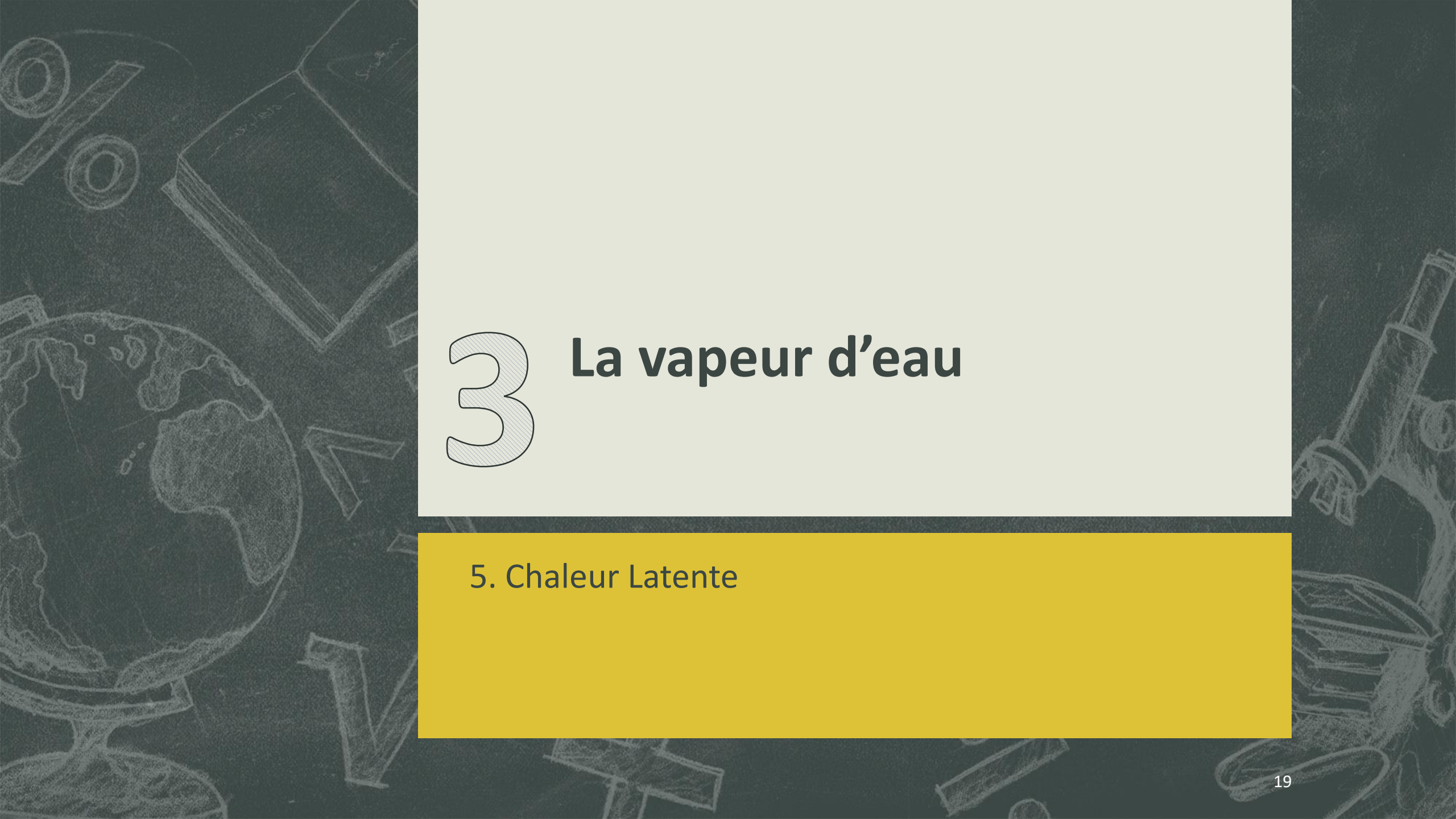
$$H = (6.4/6.65) \times 100 = 96.2 \%$$

Quelle est l'humidité relative relevée à Ajaccio en été ?

$T = 36^{\circ}$ et $r = 20\text{g/kg}$

$$H = \dots$$

t°C	rs (1013,25, t)	t°C	rs (1013,25, t)
50	86,26	10	7,62
48	77,06	8	6,65
46	68,79	6	5,79
44	61,37	4	5,03
42	54,77	2	4,36
40	48,86	0	3,77
38	43,55	-2	3,25
36	38,73	-4	2,80
34	34,47	-6	2,41
32	30,59	-8	2,06
30	27,18	-10	1,76
28	24,10	-12	1,50
26	21,34	-14	1,28
24	18,87	-16	1,08
22	16,66	-18	0,91
20	14,68	-20	0,77
18	12,93	-22	0,65
16	11,36	-24	0,54
14	9,96	-26	0,45
12	8,73	-28	0,38
		-30	0,31



3 La vapeur d'eau

5. Chaleur Latente

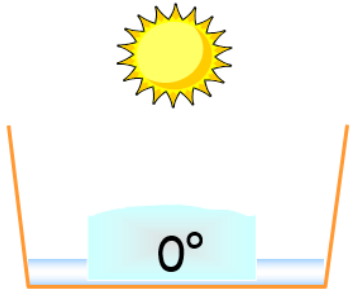
5. Chaleur latente : une expérience pour comprendre



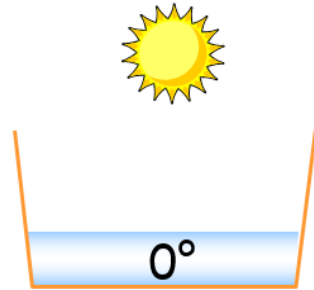
1. La glace est exposée à un rayonnement constant.



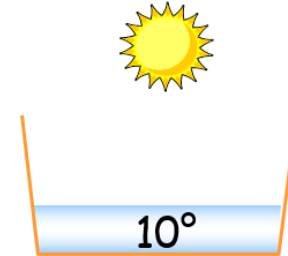
2. La température s'élève progressivement de -18° à 0° .



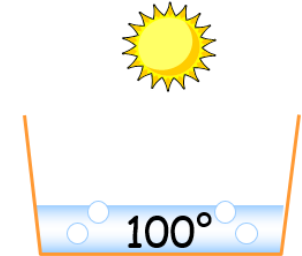
3. La glace commence à fondre, la température se stabilise à 0° .



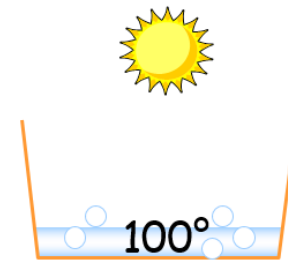
4. elle reste constante, et égale à 0° , jusqu'à ce que la dernière particule de glace soit fondue.



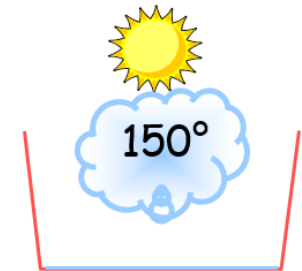
5. Dès que la glace est fondue, la température augmente à nouveau.



6. À 100° , l'ébullition commence.



7. Pendant l'ébullition la température reste égale à 100° .

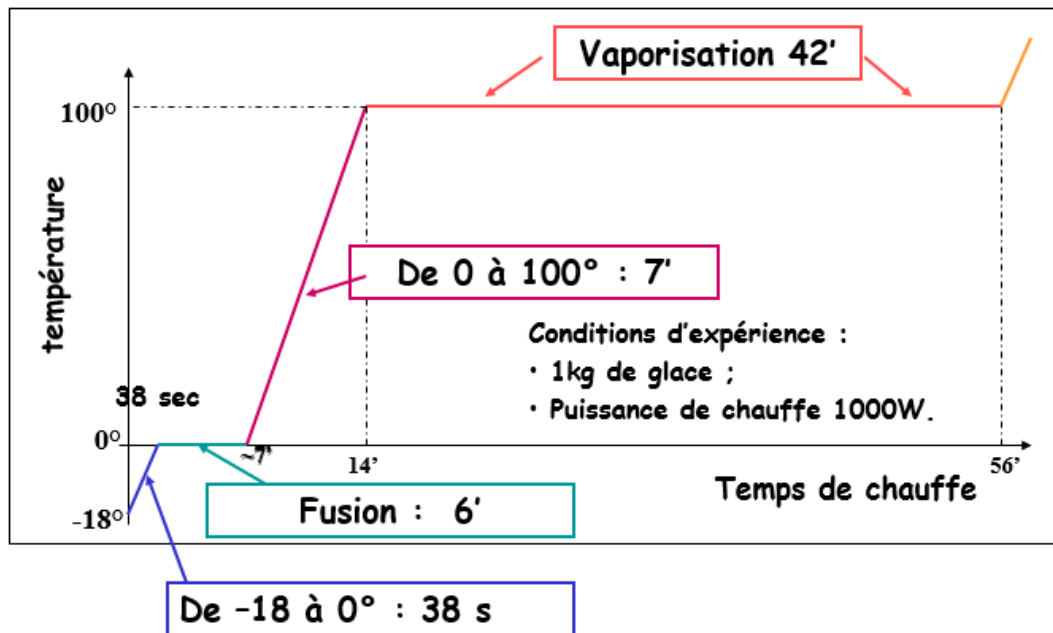


8. Et ce, jusqu'à évaporation complète...

... au delà, c'est la température de la vapeur qui augmente, et... la casserole qui fond !

5. Chaleur latente : analyse

Une quantité très importante de chaleur est utilisée, non pas pour augmenter la température mais pour contribuer à ses changements d'état.



Cette chaleur est appelée « **chaleur latente** » de changement d'état.

Glace (-18°) => vapeur (100°) (**100%** de l'énergie)

-18° => 0 (1% de l'énergie)

Glace => liquide (**10%** fusion)

0° => 100° (**13%**)

Liquide => vapeur (**76%** vaporisation)

Les chaleurs latentes consomment 86% de l'énergie fournie

5. Chaleur latente : conclusion

Inversement lors du passage :

- de l'état gazeux à l'état liquide,
- de l'état liquide à l'état solide,

la chaleur latente est restituée.

Chaleur de condensation
=
Chaleur de vaporisation

Chaleur de solidification
=
Chaleur de fusion