

Eau dans l'atmosphère

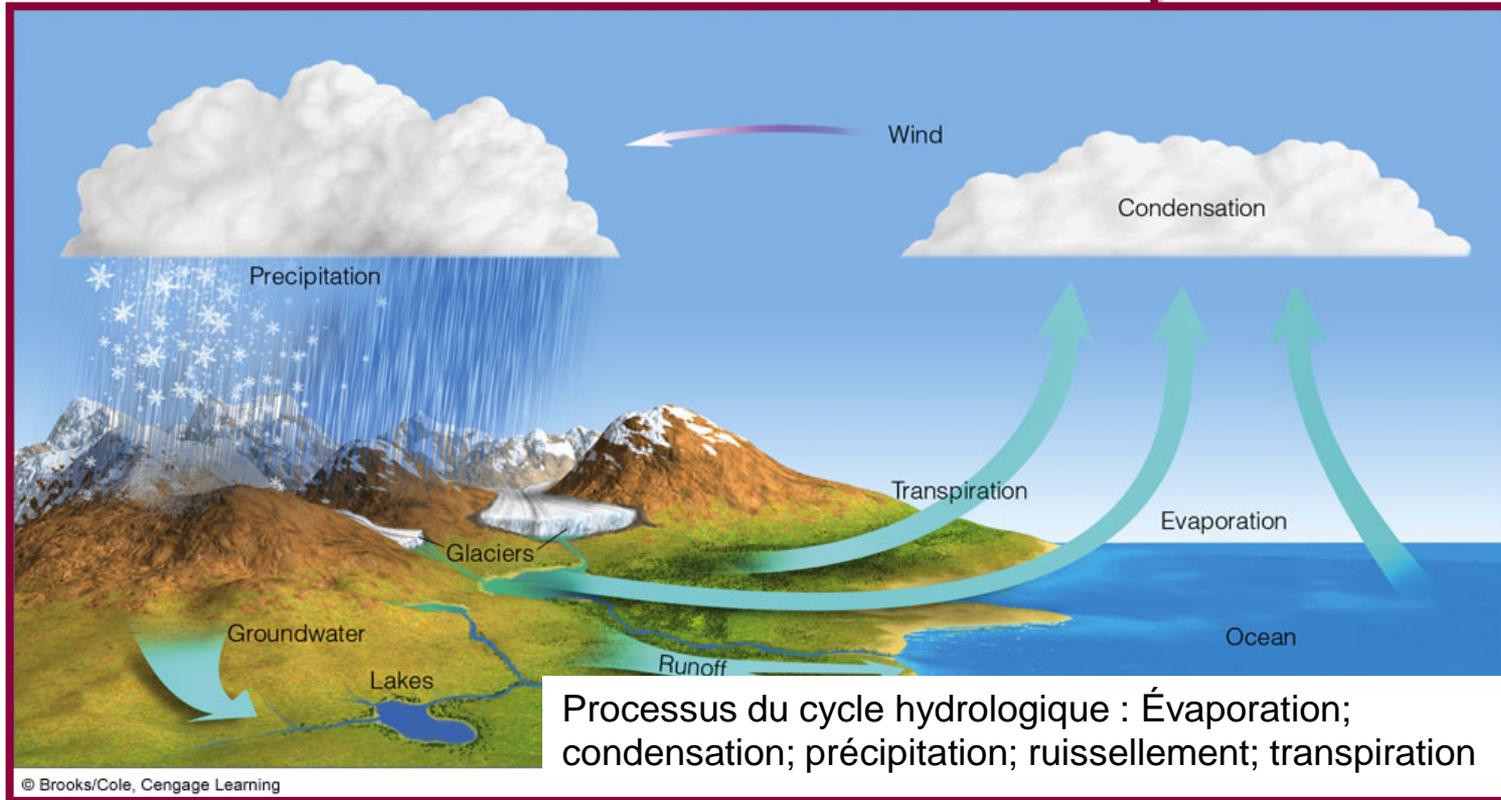
L'eau dans tous ses états!

Beaucoup du matériel de ce cours est développé dans le cours «PHY2001 – Thermodynamique de Systèmes Terrestres». Puisque le cours SCA2626 n'a aucun préalable, je vais introduire les concepts et les définitions sans trop m'attarder sur les démonstrations. Le document «12-Applications Atmosphériques.pdf» est disponible sur le site pour ceux qui veulent approfondir (ou réviser) la matière.

Table de matières

- Le cycle d'eau
- Les changements de phase
 - Équations de Clausius-Clapeyron
- Les mesures d'humidité
 - Air sec versus air humide
 - Mélange de gaz parfaits
 - Pression partielle de la vapeur d'eau
 - Humidité absolue
 - Humidité spécifique
 - Rapport de mélange
 - Humidité relative
 - Température du point de rosée
 - Température du thermomètre mouillé
- Température et confort humain
 - Facteur éolien
 - Facteur humidex
- L'équation d'état de l'air humide
 - Température virtuelle

Circulation de l'eau dans l'atmosphère



- La substance de l'eau est essentielle pour notre survie sur cette planète
- Très important pour la création de la météo
- Très important pour le transport de chaleur
- Est observée dans les trois phases dans l'atmosphère - la seule composante de l'air atmosphérique capable de ça!

Évaporation, condensation et saturation

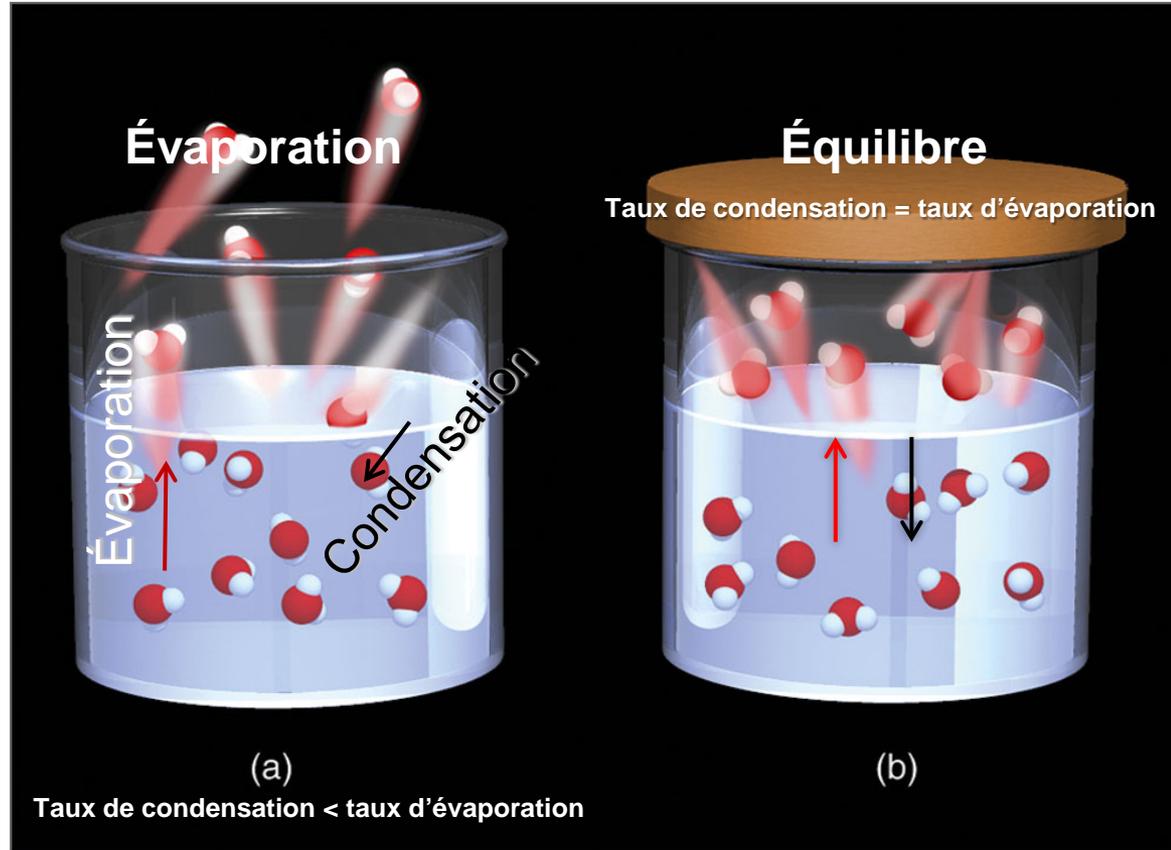
- L'évaporation est la transformation de liquide en gaz. Il faut fournir d'énergie au liquide.
- La condensation est la transformation d'un gaz en liquide. Il y a une perte de chaleur du système.
- Dans le cas où l'interface «gaz-phase condensée» est plane, la **saturation** correspond à un équilibre dans lequel pour chaque molécule condensée il y a une molécule qui évapore.
- Si le taux d'évaporation est supérieur au taux de condensation, l'air au-dessus de l'océan est:



Sous-saturé

Sursaturé

Saturé



© Brooks/Cole, Cengage Learning

La pression de vapeur qui correspond à l'équilibre thermodynamique entre la vapeur d'eau et la phase condensée est **appelée vapeur saturante**.

Diagramme de phase de l'eau

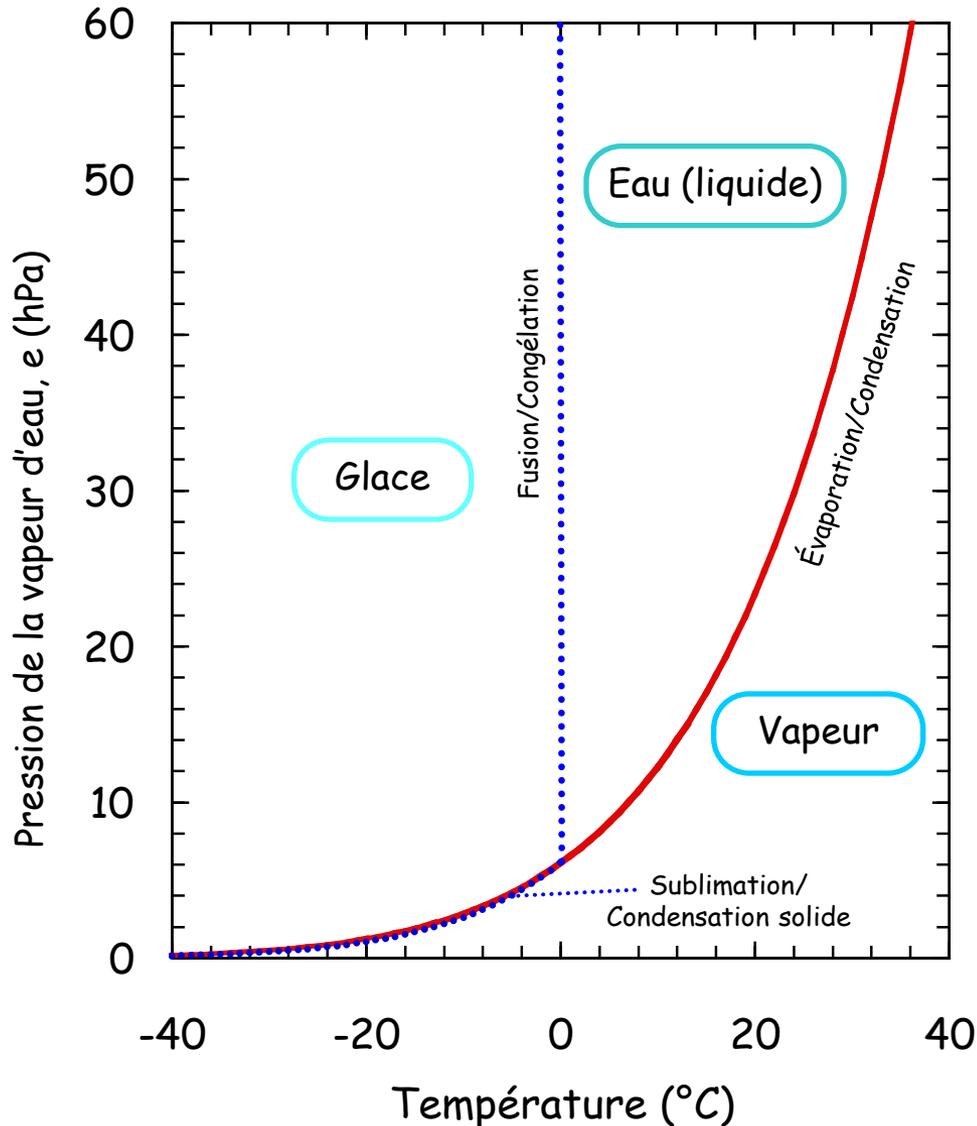
Pression de vapeur saturante

Surface d'eau chimiquement pure

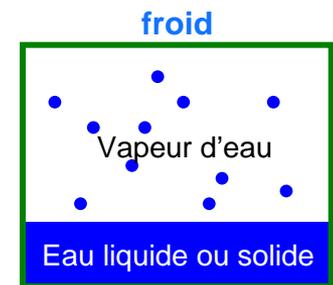
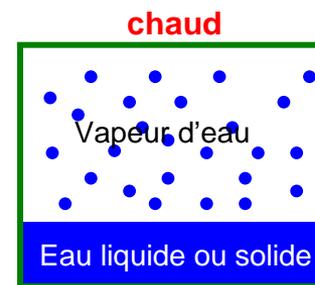


Cours phy2001

- À l'équilibre avec une des phases condensées (**eau ou glace**), la quantité de vapeur d'eau présente dans un volume d'air est limitée et dépend de la **température**.

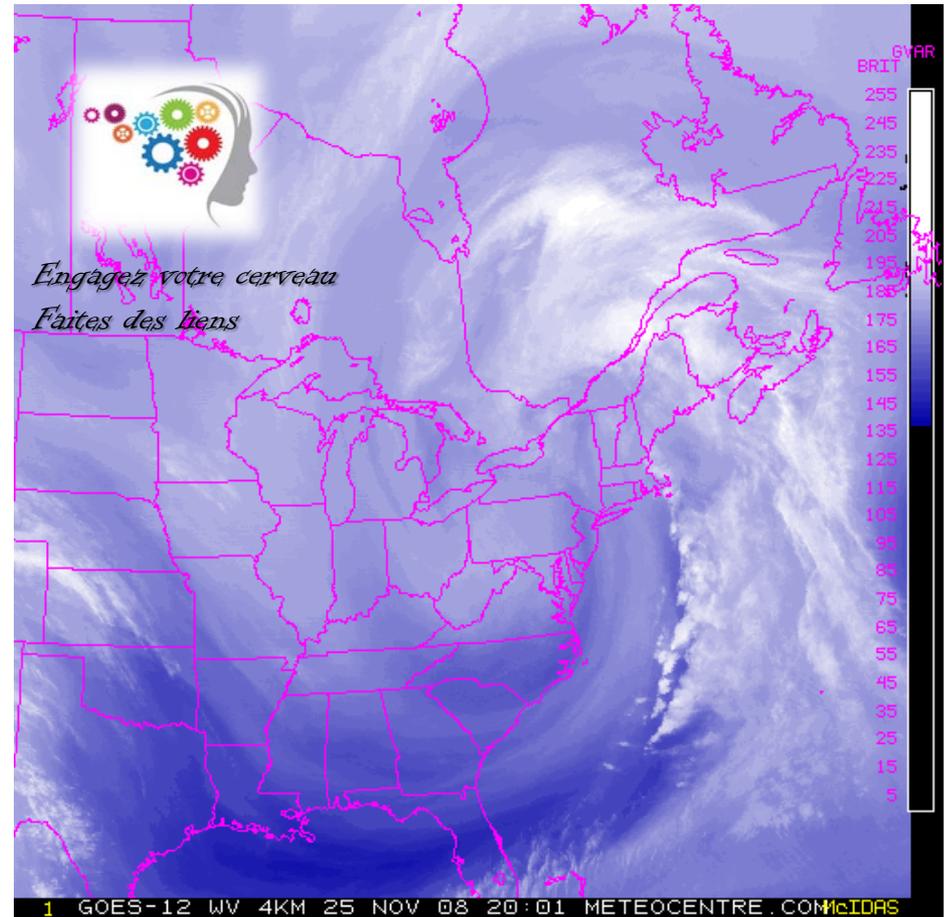
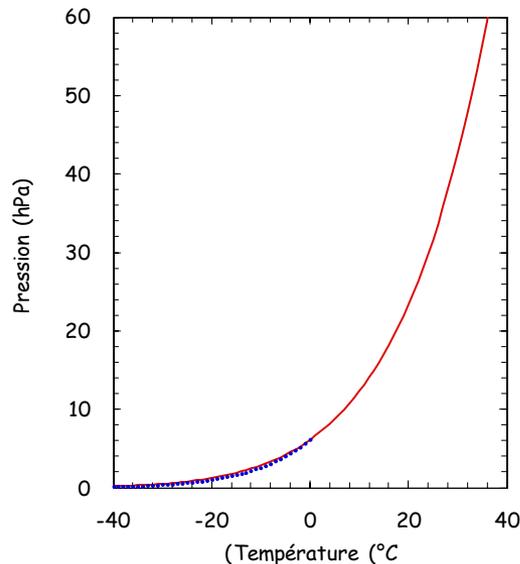


Par exemple, s'il fait 25°C, on peut trouver jusqu'à 23 g de vapeur d'eau dans un mètre cube d'air avant que la condensation nette puisse s'observer. Cependant si la température baisse à 20°C, on peut trouver seulement jusqu'à 17 g de vapeur d'eau dans un mètre cube d'air à l'équilibre avec une surface plane d'eau liquide.



La pression partielle et d'équilibre (saturation)

- La **pression** de la vapeur d'eau, e , varie dans le temps et dans l'espace en relation aux **conditions météorologiques**. \Rightarrow
- Les **pressions de saturation** de la vapeur d'eau, e_w et e_i , dépendent uniquement de la **température**. \Downarrow



L'imagerie de la vapeur d'eau est utilisée pour analyser la présence et le mouvement de l'humidité (nuages et vapeur d'eau) dans les niveaux supérieur et moyen de l'atmosphère. Le spectre de longueur d'onde utilisé pour détecter la vapeur d'eau est dans la plage de longueurs d'onde de 6,7 à 7,3 micromètres.

Équations de Clausius - Clapeyron

L'expérience montre que la pression de vapeur d'équilibre (e_w ou e_i) ne dépend que de la température dont elle est fonction croissante.

Eau

$$e_w \cong e_w(T_0) \exp \left\{ \frac{\ell_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

e_w : pression de vapeur saturante par rapport à l'eau.

ℓ_v : chaleur latente d'évaporation

Glace

$$e_i \cong e_i(T_0) \exp \left\{ \frac{\ell_s}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

e_i : pression de vapeur saturante par rapport à l'eau.

ℓ_s : chaleur latente de sublimation



Cours phy2001

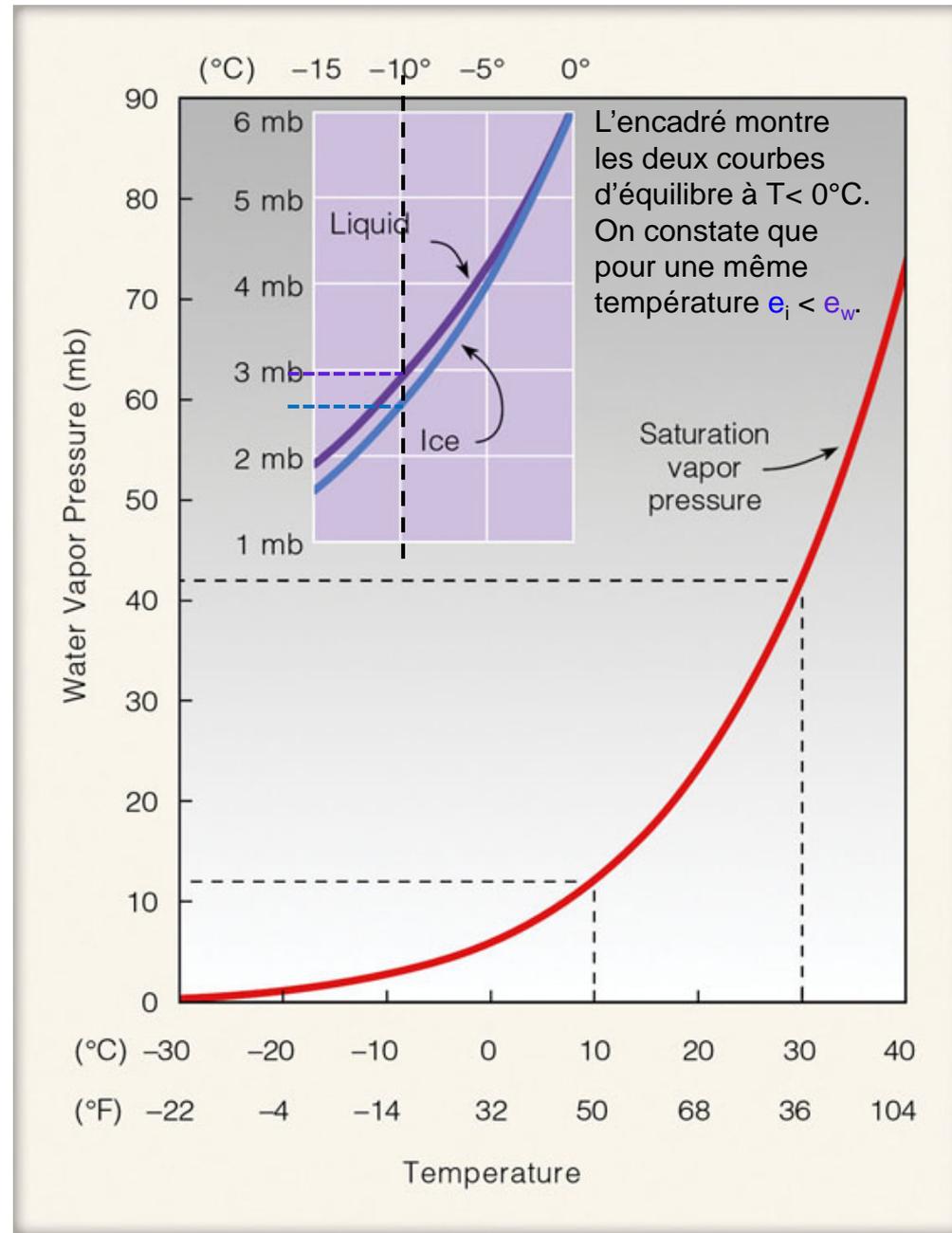


Les équations ci-dessus donnent des valeurs **approximées** des pressions d'équilibre entre l'eau liquide et la vapeur (à gauche) et entre la glace et la vapeur (à droite). Il est **préférable** d'utiliser les **tables thermodynamiques** si elles sont disponibles.

Diagramme des phases de l'eau chimiquement pure

**dans le cas où la
courbure de la
surface de la
phase condensée
est négligeable**

Important

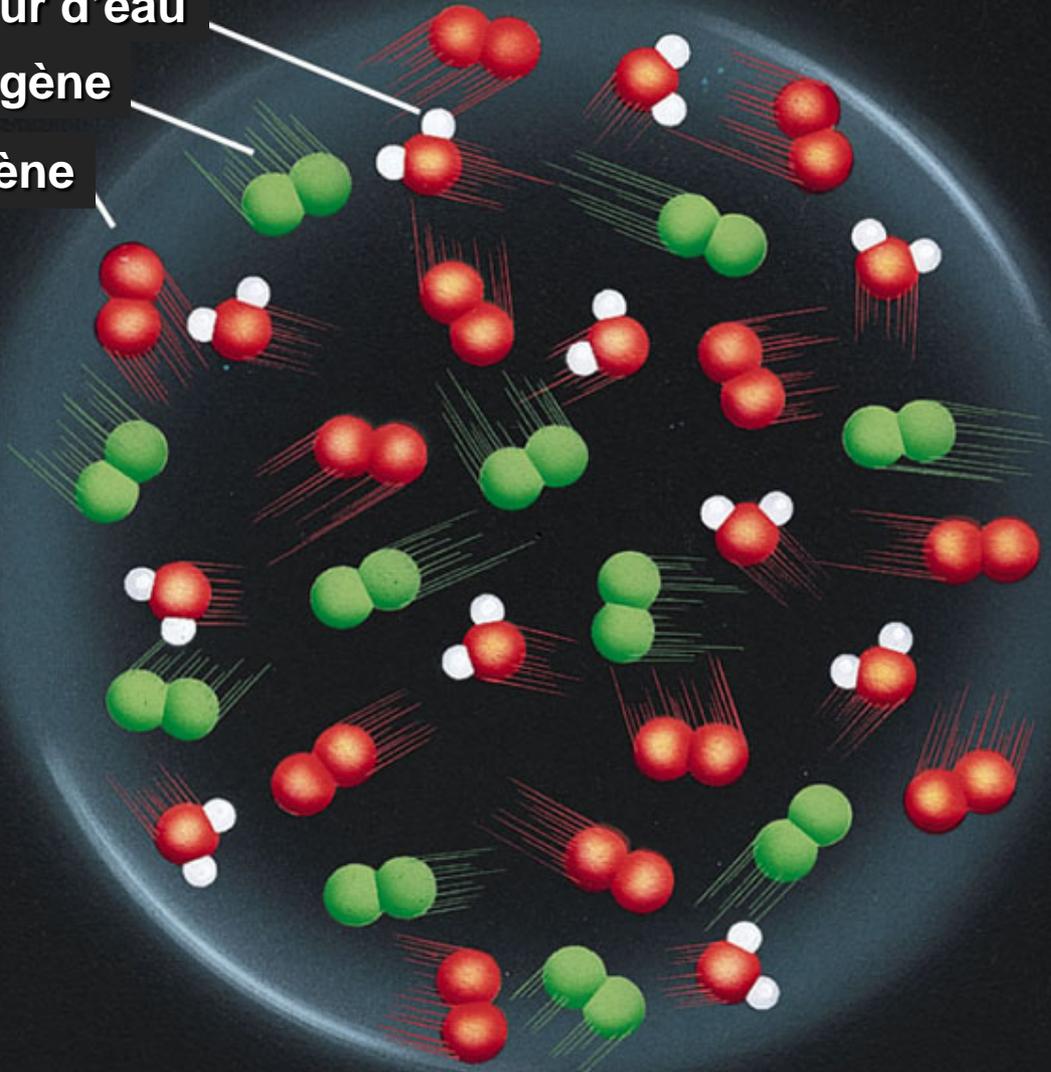


Humidité absolue ou densité partielle
Pression partielle de la vapeur d'eau
Rapport de mélange
Humidité spécifique
Humidité relative

Température virtuelle
Température du point de rosée
Température du thermomètre mouillé

HUMIDITÉ DANS L'AIR

Vapeur d'eau
Nitrogène
Oxygène



Parcelle d'air humide

- 1) L'air atmosphérique est un mélange de gaz parfaits.
- 2) L'air humide : mélange d'air sec et de vapeur d'eau

Formes de l'équation d'état pour un gaz parfait

p : pression, [Pa]

V : volume, [m^3]

T : temperature [K]

m : masse [kg]

M : masse molaire [$kg\ mol^{-1}$]

$n = m/M$: nombre de moles [mol]

R^* : constante universelle, [$J\ mol^{-1}\ K^{-1}$]

$R = R^*/M$: constante spécifique, [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$]

$\alpha = 1/\rho$: volume spécifique [$m^3\ kg$]

$\rho = m/V$: densité de l'air [$kg\ m^{-3}$]

$$p \cdot V = n \cdot R^* \cdot T = m \cdot R \cdot T$$

$$\frac{pV = m \cdot R \cdot T}{m} \Rightarrow p \cdot \alpha = R \cdot T$$

$$\frac{p \cdot V = m \cdot R \cdot T}{V} \Rightarrow p = \rho \cdot R \cdot T$$



L'air sec : celui que ne contient pas de vapeur d'eau

Gaz	M_i (g mol ⁻¹)	χ_i	$\chi_i M_i$ (g mol ⁻¹)
Azote (N ₂)	28.013	0.7808	21.873
Oxygène (O ₂)	31.999	0.2095	6.704
Argon (Ar)	39.948	0.0093	0.372
Dioxyde de carbone (CO ₂)	44.010	0.0003	0.013
etc...

Masse molaire moyenne :

$$M_d = 28,964 \text{ g mol}^{-1}$$

Constante spécifique moyenne :

$$R_d = \frac{R^*}{M_d} = 287,05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Équation d'état :

$$p_d \cdot \alpha_d = R_d \cdot T$$

$$\alpha_d = \frac{V}{m_d}$$

La vapeur d'eau et l'air humide

- Aux conditions de pression et température que l'on retrouve dans l'atmosphère, on peut décrire le comportement de la vapeur d'eau en l'assimilant à celui d'un gaz idéal :

$$e V = m_v R_v T$$

où **e** est la **pression partielle** de la vapeur d'eau et

$$R_v = 461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

est sa constante spécifique des gaz. La masse molaire de l'eau est

$$M_w = 18.016 \text{ g mol}^{-1}$$

- **L'air humide se comporte comme un mélange de deux gaz parfaits : air sec et vapeur d'eau.**

Pression de l'air humide = pression de l'air sec + pression de la vapeur d'eau

$$p = p_d + e$$



Engagez votre cerveau

Réfléchissons

L'évaporation dépend de la température de l'eau. Plus celle-ci est élevée et plus le taux d'évaporation est élevé; Le taux de condensation dépend de la pression de vapeur d'eau, plus celle-ci est importante et plus le taux de condensation est élevé;

L'évaporation arrête quand le taux de condensation est égale au taux d'évaporation;

Conclusion : Il peut y avoir de l'évaporation même quand l'air est saturé si la température de l'air est inférieure à la température de l'eau.



1. Imaginez une masse d'air froid saturé, à la température de -15°C , qui passe au-dessus des grands lacs au début de l'hiver. La température de l'eau des lacs est de 4°C . L'eau des grands lacs va-t-elle évaporer?
2. Qu'arrivera-t-il à la pression de vapeur de l'air, au-dessus du lac? L'air sera sous-saturé, saturé ou sursaturé?



Engagez votre cerveau

Réfléchissons

Quand l'eau et la vapeur d'eau dans l'air sont à la même température, le taux d'évaporation dépend encore de la température de l'eau et le taux de condensation de la pression de vapeur dans l'air.

L'évaporation arrête quand le taux de condensation est égale au taux d'évaporation, ce qui arrivera quand l'air sera saturée à la température commune de la vapeur (de l'air) et de l'eau.

Conclusion : Quand l'air et l'eau sont en équilibre thermique, le taux d'évaporation dépend de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air.



1. Prévoyez-vous que l'eau d'un verre s'évapore plus rapidement par une journée d'été calme, chaude et sèche ou par une journée d'été calme, chaude et humide? Expliquez.
2. Comment les vêtements glacés peuvent-ils "sécher" à l'extérieur par des température inférieures à zéro Celsius?

Comment connaître l'humidité de l'air?

Variables d'humidité

- **Humidité absolue, ρ_v** : masse de vapeur d'eau par unité de volume d'air :
 $m_v/V = \rho_v = \text{densité partielle de la vapeur d'eau}$



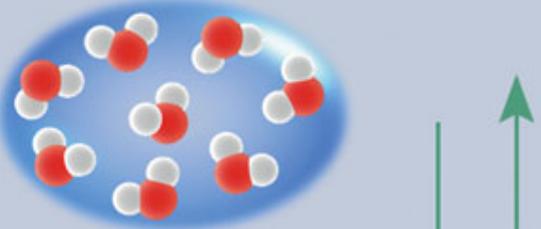
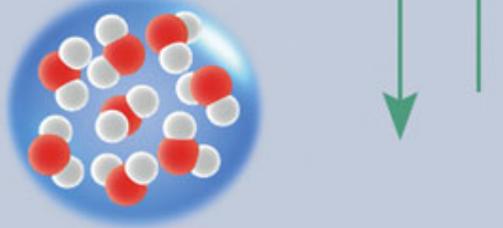
Très peu utilisée parce que le volume des particules d'air change fréquemment.
 Pourquoi leur volume change fréquemment?

	Taille de la Particule	Masse de vapeur d'eau	Humidité absolue
	2 m ³	10 g	5 g/m ³
	1 m ³	10 g	10 g/m ³

Variables d'humidité (suite)

- **Humidité spécifique, q** : masse de vapeur d'eau / masse d'air
 $q = m_v/m$, où $m = m_d + m_v$ = masse d'air sec + masse de vapeur
- **Rapport de mélange, r** : masse de vapeur d'eau / masse d'air sec
 $r = m_v/m_d$

- Aucune de ces deux grandeurs change avec les changements de volume.
- Pour qu'il y ait un changement il faut additionner ou soustraire de la vapeur d'eau à la parcelle d'air.

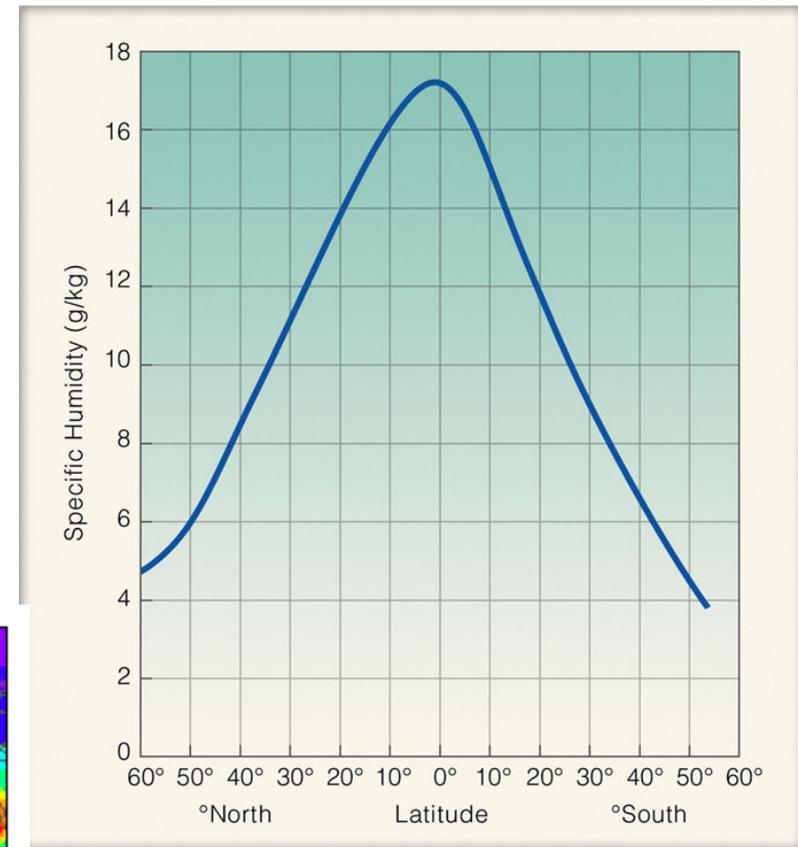
	Masse de la parcelle	Masse de vapeur d'eau	Humidité spécifique
	1 kg	1 g	1 g/kg
	1 kg	1 g	1 g/kg

Variation de l'humidité spécifique moyenne avec la latitude

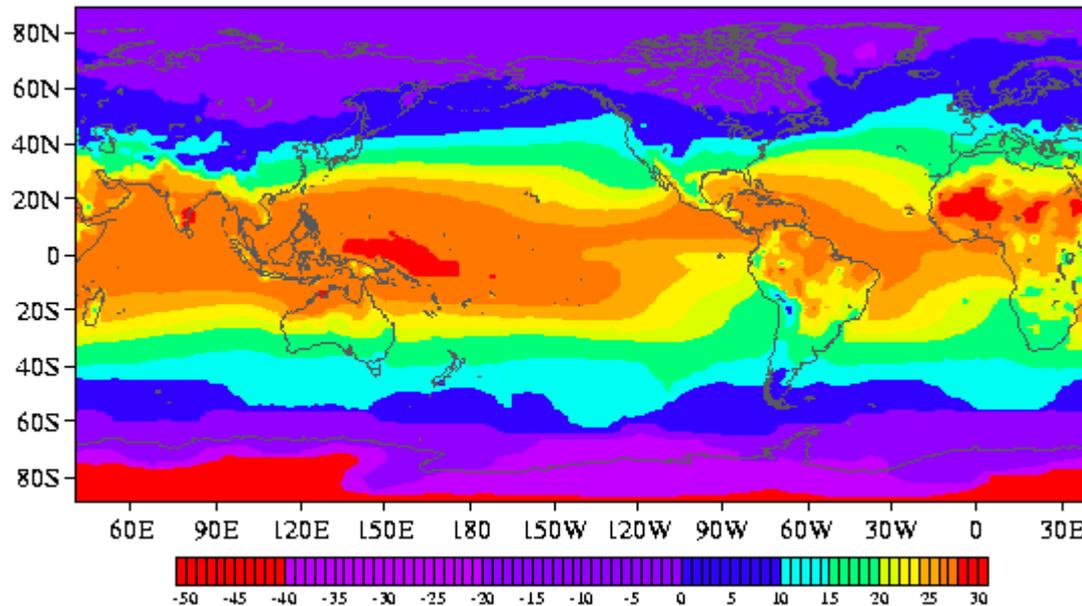
Discernez-vous une corrélation entre l'humidité spécifique latitudinale moyenne et la température?



Est-ce que c'est logique?



Brooks/Cole, Cengage Learning



Source :

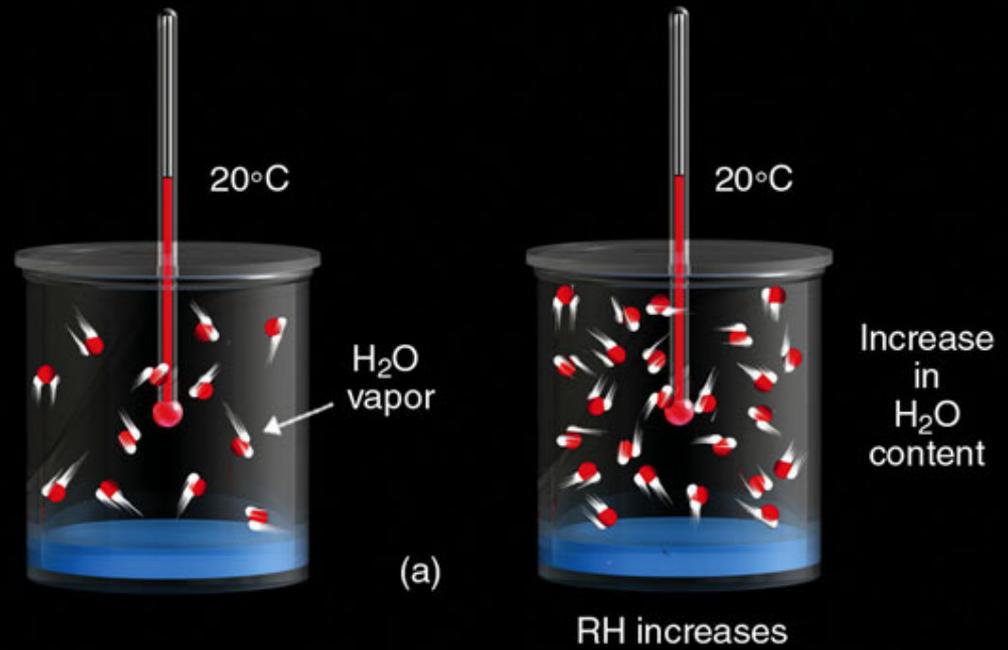
http://research.jisao.washington.edu/data_sets/legates/

Variables d'humidité (suite)

- **Pression (partielle) de vapeur d'eau, e** : la pression exercée par les molécules de vapeur d'eau dans la particule d'air. (Loi des pressions partielles de Dalton)
 - Fraction de la pression associée à la vapeur d'eau ~ 1 %.
 - La pression partielle de la vapeur d'eau est proportionnelle au nombre de molécules de vapeur d'eau :
plus de molécules \Rightarrow pression plus élevée (Loi des gaz parfaits).
- **Pression de vapeur d'équilibre ou saturante, e_w** : c'est la pression de la vapeur d'eau en équilibre thermodynamique avec une surface plane d'eau liquide chimiquement pure.
 - La pression saturante dépend de la température.

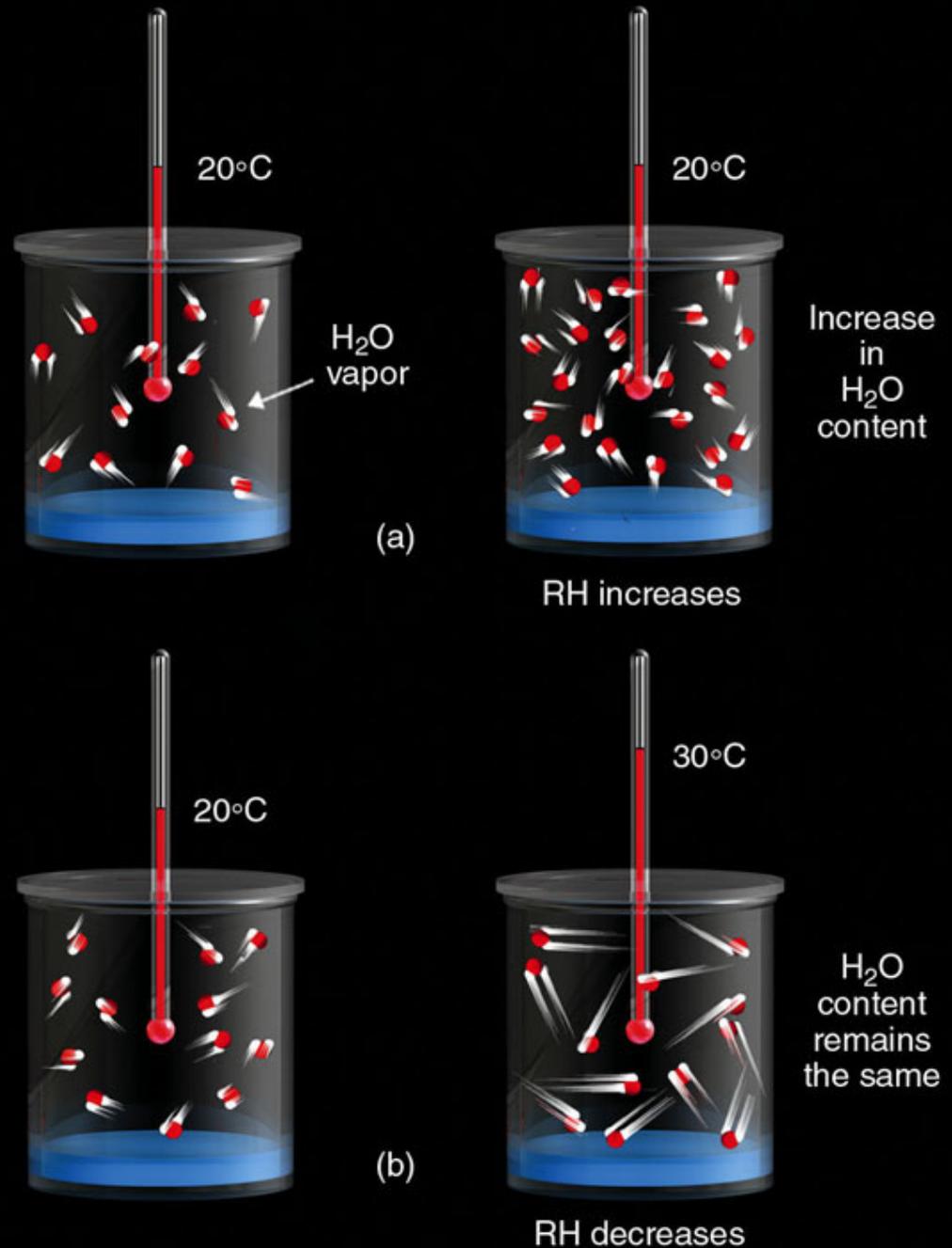
Variables d'humidité (suite)

- Humidité relative (HR) : $(e/e_w(T)) * 100$. La HR peut changer de deux façons :
 - Changement de la pression partielle. L'augmentation de la vapeur d'eau (addition de molécules d'eau à l'air) à température constante augmente HR.



Variables d'humidité (suite)

- **Humidité relative (HR) :**
 $(e/e_w(T)) * 100$. La HR peut changer des deux façons :
 - Changement de la pression partielle. L'augmentation de la vapeur d'eau (addition de molécules d'eau à l'air) à température constante augmente HR.
 - Changement de la température et donc de la pression de vapeur saturante ou d'équilibre. L'augmentation de la température diminue l'humidité relative.



Variables d'humidité (suite)

■ Température du point de rosée

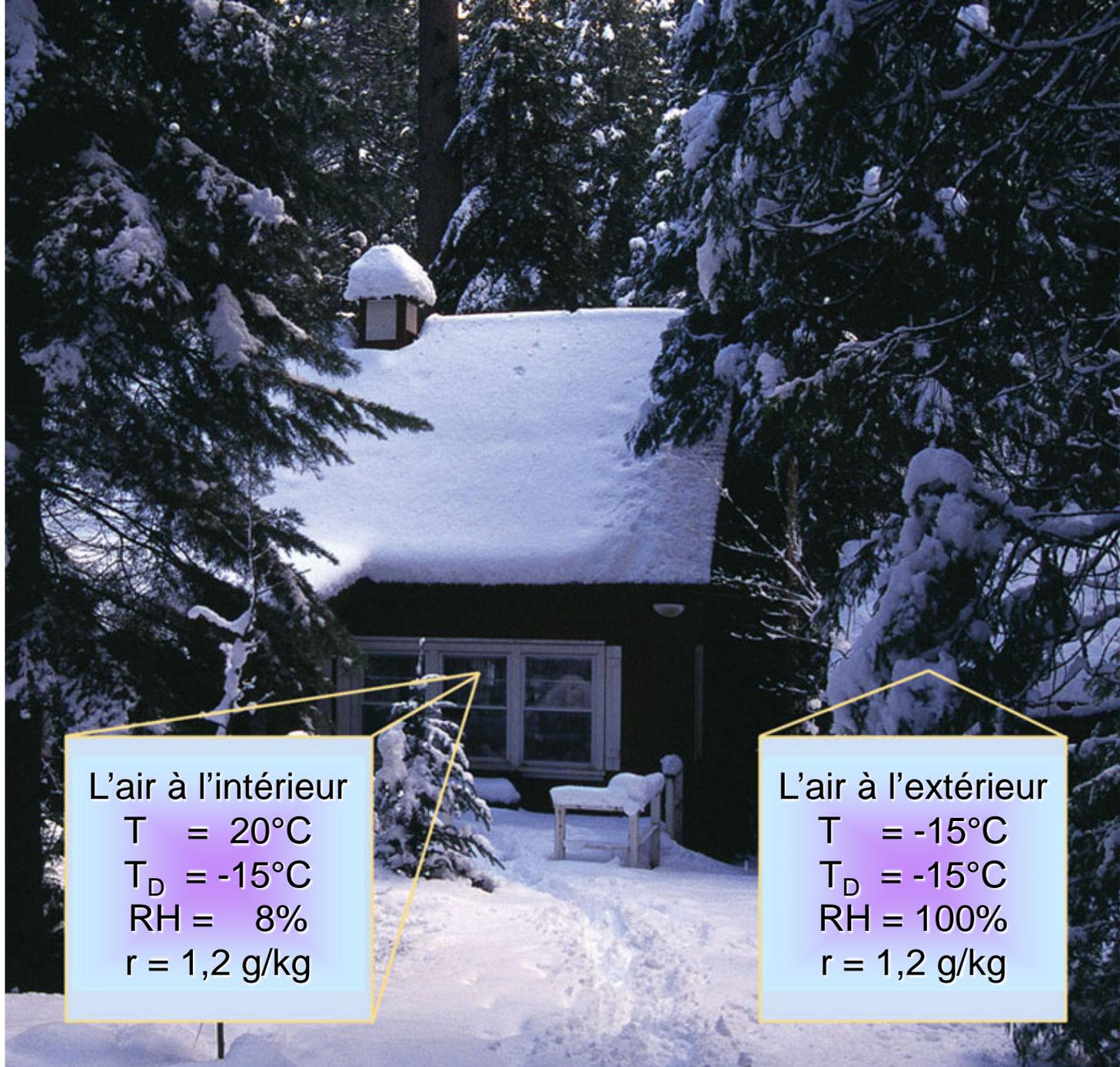
- La température du point de rosée est la température à laquelle l'air devient saturé en maintenant la pression constante.
- Si l'air refroidit au delà de sa température du point de rosée initiale, une partie de la vapeur d'eau condense (en eau liquide).

La température du point de rosée est une bonne mesure de la quantité de vapeur d'eau que l'air atmosphérique contient.

Important



L'humidité relative est un bon indicateur de la proximité de la saturation.



Variation diurne de l'humidité relative

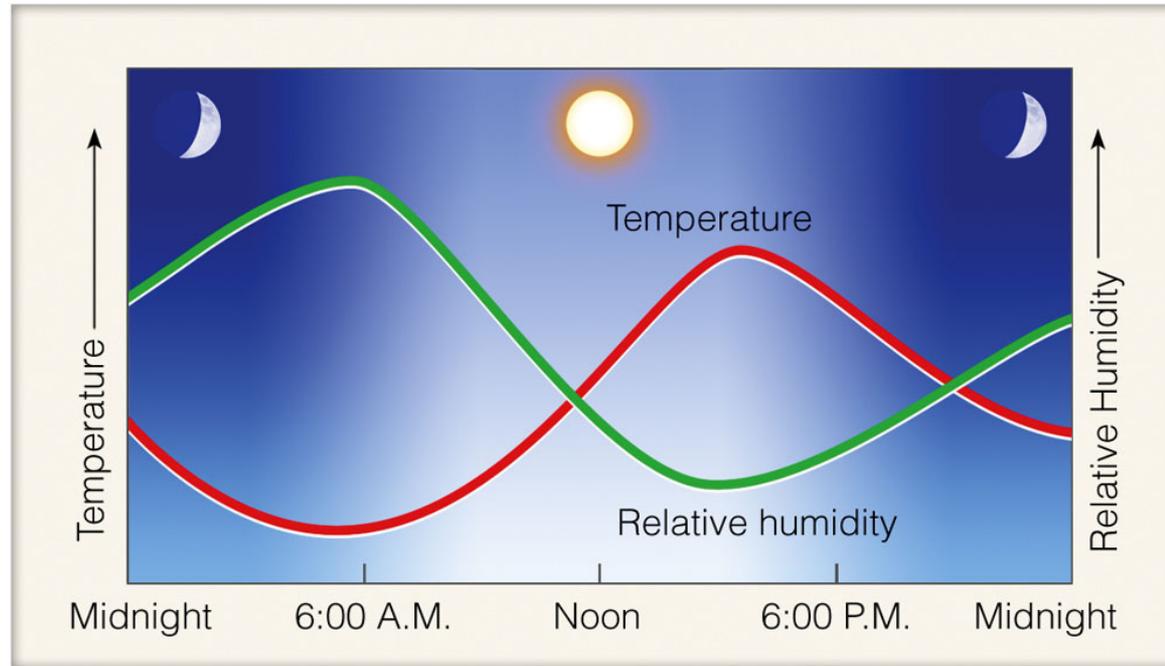


$$(e/e_w(T)) * 100$$

Q: Étant donné que la quantité d'humidité à un endroit particulier est pratiquement constant pendant une journée de 24 heures, (c'est-à-dire le rapport de mélange est constant), à quoi ressemblera la variation diurne de RH?

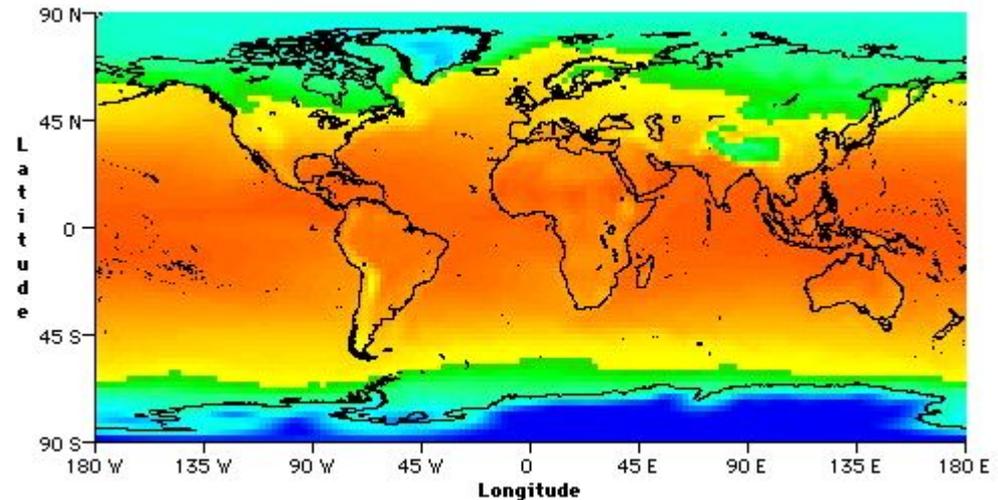
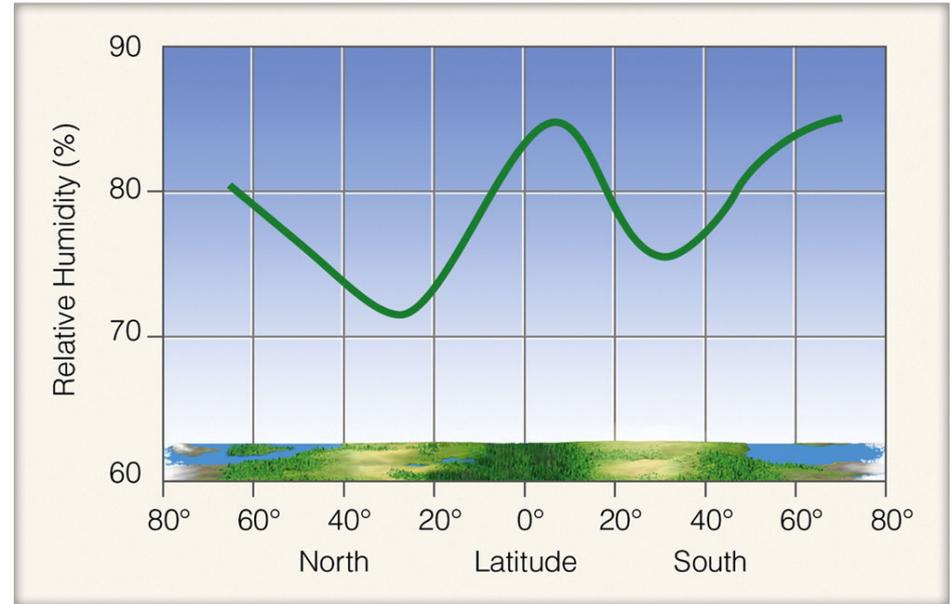
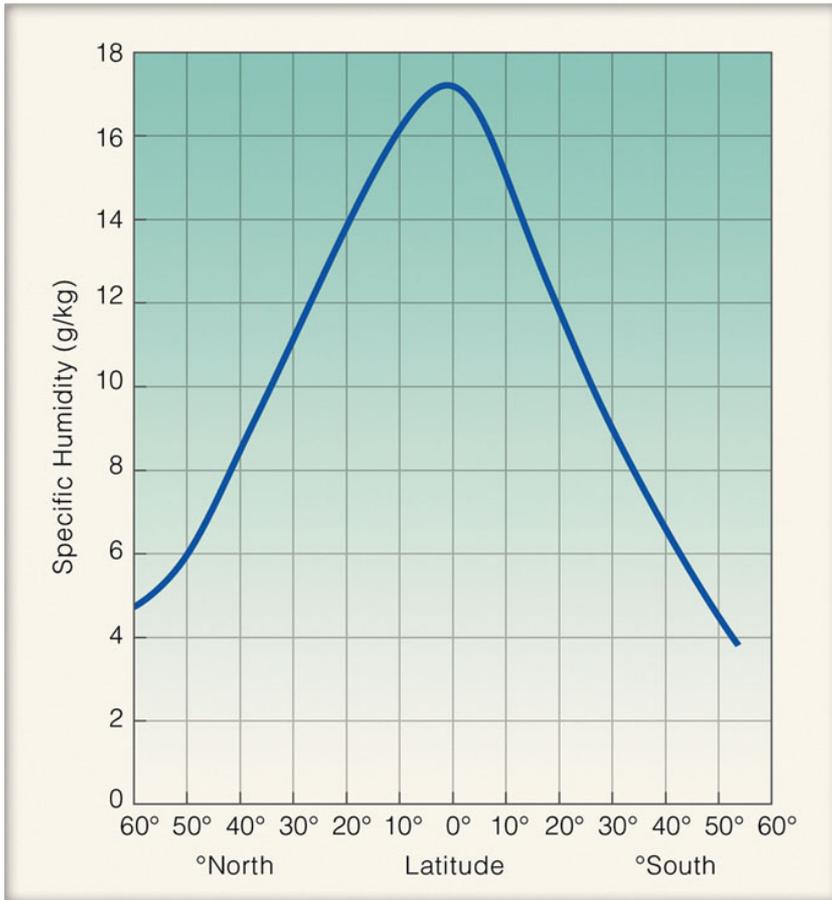
Q: Expliquez pourquoi.

Q: Si vous voulez minimiser l'évaporation de l'eau, à quel moment devriez-vous arroser votre pelouse ?



© Brooks/Cole, Cengage Learning

Humidité relative moyenne globale en fonction de la latitude



Source: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7m.html>

Humidité et confort humain

- Humidité relative et confort humain
 - “Un jour d’été, pour une température donnée, plus l’air est humide plus on sent la «chaleur».” Ce n’est pas la chaleur qu’on sent mais l’humidité!
 - Une grande humidité a comme conséquence une diminution du refroidissement de notre corps par évaporation. (Transfert de chaleur par changement de phase).
 - La sueur ne peut pas évaporer pour refroidir le corps.

- La température du thermomètre mouillé

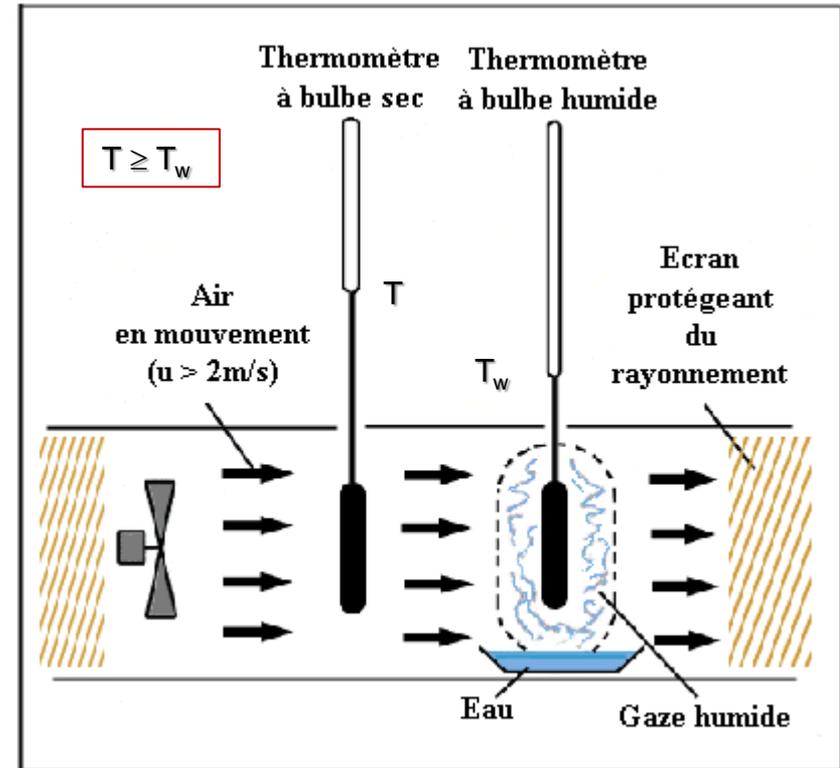
- L’indice humidex

- L’indice de refroidissement éolien

Température du thermomètre mouillé

La **température du thermomètre mouillé**, T_w est la température la plus basse qui peut être atteinte en évaporant l'eau dans l'air.

Remarque: la température du thermomètre mouillé sera toujours inférieure ou égale à la température.



Le **psychromètre** permet de mesurer la température du thermomètre mouillé et la température de l'air.

La connaissance de ces deux températures permet de déterminer l'humidité relative.

Mesures d'humidité : Table psychrométrique

		Différence de température entre le thermomètre sec et le thermomètre humide (°C)																			
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
Température du thermomètre sec (°C)	10	94	88	82	77	71	66	60	55	50	44	39	34	29	24	20	15	10	6	-	-
	11	94	89	83	78	72	67	61	56	51	46	41	36	32	27	22	18	13	9	5	-
	12	95	89	84	78	73	68	63	58	53	48	43	39	34	29	25	21	16	12	8	-
	13	95	89	84	79	74	69	64	59	54	50	45	41	36	32	28	23	19	15	11	7
	14	95	90	85	79	75	70	65	60	56	51	47	42	38	34	30	26	22	18	14	10
	15	95	90	85	80	75	71	66	61	57	53	48	44	40	36	32	27	24	20	16	13
	16	95	90	85	81	76	71	67	63	58	54	50	46	42	38	34	30	26	23	19	15
	17	95	90	86	81	76	72	68	64	60	55	51	47	43	40	36	32	28	25	21	18
	18	95	91	86	82	77	73	69	65	61	57	53	49	45	41	38	34	30	27	23	20
	19	95	91	87	82	78	74	70	65	62	58	54	50	46	43	39	36	32	29	26	22
	20	96	91	87	83	78	74	70	66	63	59	55	51	48	44	41	37	34	31	28	24
	21	96	91	87	83	79	75	71	67	64	60	56	53	49	46	42	39	36	32	29	26
	22	96	92	87	83	80	76	72	68	64	61	57	54	50	47	44	40	37	34	31	28
	23	96	92	88	84	80	76	72	69	65	62	58	55	52	48	45	42	39	36	33	30
	24	96	92	88	84	80	77	73	69	66	62	59	56	53	49	46	43	40	37	34	31
	25	96	92	88	84	81	77	74	70	67	63	60	57	54	50	47	44	41	39	36	33
	26	96	92	88	85	81	78	74	71	67	64	61	58	54	51	49	46	43	40	37	34
	27	96	92	89	85	82	78	75	71	68	65	62	58	56	52	50	47	44	41	38	36
	28	96	93	89	85	82	78	75	72	69	65	62	59	56	53	51	48	45	42	40	37
	29	96	93	89	86	82	79	76	72	69	66	63	60	57	54	52	49	46	43	41	38
30	96	93	89	86	83	79	76	73	70	67	64	61	58	55	52	50	47	44	42	39	
		Humidité relative de l'air (%)																			

Température de l'air et confort humain

- Le corps humain se réchauffe par métabolisme. Le refroidissement du corps humain se fait :
 - Par conduction
 - Par convection
 - Par radiation
 - Par changement de phase
- La sensation de froid dépend de la quantité d'énergie perdue.
 - L'indice de refroidissement éolien. **Le facteur éolien.**
- Par temps chaud, le refroidissement se fait essentiellement par évaporation de la sueur
 - **L'indice humidex.**

La température du corps humain augmentera si :

Taux de production de
chaleur métabolique

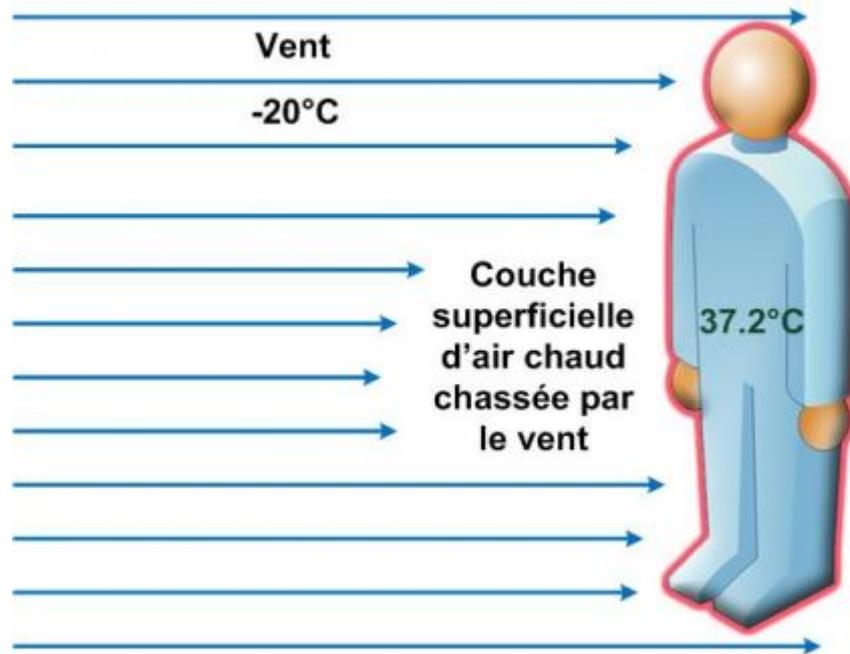
>

taux de dissipation par
conduction et convection

+

taux de dissipation d'énergie
par évaporation

L'indice de refroidissement éolien



Source : Refroidissement éolien (météomédia)

Refroidissement éolien

Le froid intense et le vent peuvent devenir meurtriers

VITESSE DU VENT	TEMPÉRATURE (°C)									
	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
	Refroidissement éolien (°C)									
10 km/h	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51	-57
20 km/h	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43	-49	-56	-62
30 km/h	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-45	-52	-59	-65
40 km/h	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61	-68
50 km/h	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63	-69
60 km/h	-9	-16	-23	-30	-36	-43	-50	-57	-64	-71

0 à -9 °C

Risque faible d'engelure

-10 à -27 °C

Risque d'engelures et d'hypothermie pas très élevé si on se trouve à l'extérieur pendant une longue période sans être vêtu adéquatement.

-28 à -39 °C

La peau met entre 10 et 30 minutes à geler; il y a risque d'engelures et d'hypothermie.

-40 à -47 °C

La peau met entre 5 à 10 minutes à geler; le risque d'engelures et d'hypothermie est élevé.

-48 à -54 °C

La peau met entre 2 et 5 minutes à geler; les risques d'engelures et d'hypothermie très sévère sont très élevés.

-55 °C & moins

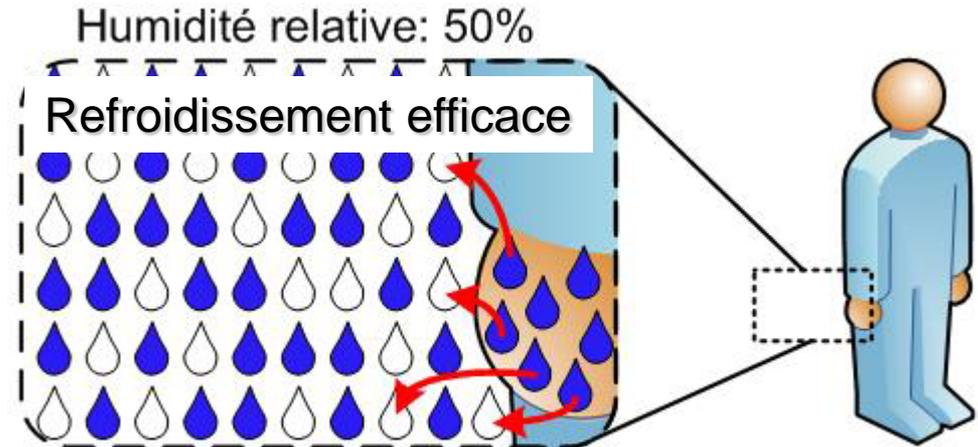
Demeurez à l'intérieur

Source : <http://veloptimum.net/>

Refroidissement éolien = $13,12 + 0,6215T - (11,37 - 0,3965T) \times V^{0,16}$
où T [°C] est la température de l'air et V [km/h] est la vitesse du vent.

L'indice humidex

L'**indice humidex** est une mesure utilisée par les météorologues canadiens pour intégrer les effets combinés de la température et de l'humidité.

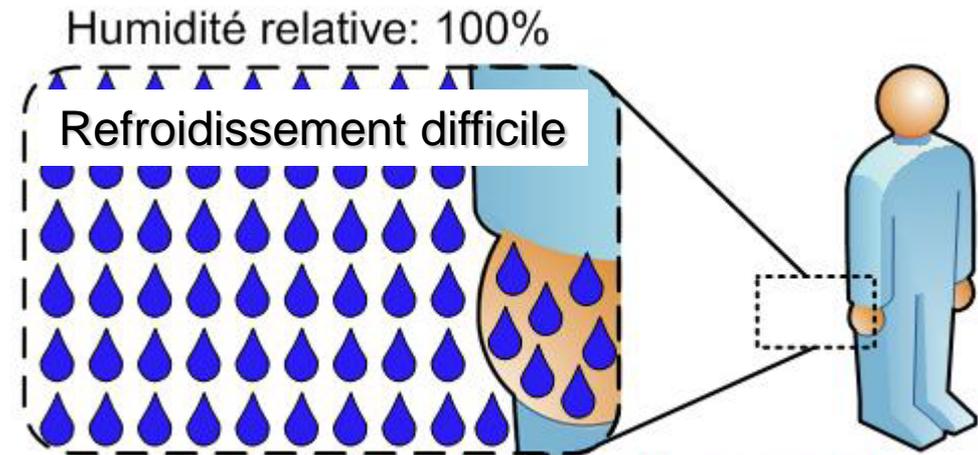


Évaporation de la transpiration : refroidissement par évaporation

$\text{Humidex} = T + h$; T = la température de l'air en °C

$h = 0,5555 \cdot (e - 10)$;

e = pression partielle de la vapeur



La vapeur d'eau dans l'air est en équilibre avec la sueur : pas de refroidissement par évaporation

Humidex

Humidex = $T + h$; T = la température de l'air en °C

$$h = 0,5555 \cdot (e - 10); e = e_w(T_D)$$

e = pression partielle de la vapeur

T_D = point de rosée

T[°C]	T _D [°C]									
	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
26	27	27	27	28	28	28				
28	28	29	30	31	32	34	36			
30	30	31	32	33	35	37	40	44		
32	32	33	34	36	38	41	44	49	54	
34	34	35	37	38	41	44	47	52	58	66
36	36	37	39	41	43	46	50	55	61	68
38	39	40	41	43	46	49	53	58	64	71
40	41	42	44	46	48	51	56	60	66	74
42	43	45	46	48	48	54	58	63	69	75
44	46	47	48	51	51	56	61	65	71	78

HI (Heat Index)

Indice de chaleur

http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=heat_index_calculator

En-dessous de 29	Peu de gens sont incommodés.
De 30 à 34	Sensation de malaise plus ou moins grande.
De 35 à 39	Sensation de malaise assez grande. Prudence. Ralentir certaines activités en plein air.
De 40 à 45	Sensation de malaise généralisée. Danger. Éviter les efforts.
De 46 à 53	Danger extrême. Arrêt de travail dans de nombreux domaines.
Au-dessus de 54	Coup de chaleur imminent (danger de mort).

Température (°C)	Humidité relative (%)																		
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100		
21	21	21	21	21	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29		
22	22	22	22	22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	31		
23	23	23	23	23	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33		
24	24	24	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	33	34	35		
25	25	25	25	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37		
26	26	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38	39		
27	27	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
28	28	28	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	42	43	44		
29	29	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46		
30	30	30	31	32	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48		
31	31	31	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	46	47	48	49	50		
32	32	33	34	35	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	51	53		
33	33	34	36	37	38	40	41	43	44	46	47	48	50	51	52	54	55		
34	34	35	37	39	40	42	43	45	46	47	49	50	52	53	55	56	58		
35	35	37	39	40	42	43	45	46	48	49	51	53	54	56	57	58	60		
36	37	38	40	42	43	45	47	48	50	51	53	55	56	58	59	62	63		
37	38	40	42	43	45	47	49	50	52	54	55	57	58	61	63	64	66		
38	40	42	43	45	47	49	50	52	54	56	57	59	62	63	65	67	69		
39	41	43	45	47	49	51	52	54	56	58	59	62	64	66	68	70	72		
40	43	45	47	49	51	52	54	56	58	61	63	65	67	69	71	73	75		
41	45	47	48	50	52	54	56	58	61	63	65	68	70	72	74	76	78		
42	46	48	50	52	54	56	58	61	64	66	68	70	73	75	77	79	82		
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100		

Source : <http://veloptimum.net/>

Constante spécifique de l'air humide

- L'air humide se comporte comme un mélange de deux gaz parfaits : air sec et vapeur d'eau.

$$R_d = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$R_v = 461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$R_m = \frac{m_d \cdot R_d + m_v \cdot R_v}{m} = (1 - q) \cdot R_d + q \cdot R_v =$$

$$= \left[1 + q \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \right] \cdot R_d = (1 + 0,608 q) \cdot R_d$$

- L'équation d'état de l'air humide est :

$$p \cdot V = m \cdot R_m \cdot T = m \cdot R_d \cdot (1 + 0,608 q) \cdot T$$

La température virtuelle, T_v

Équation d'état de l'air humide dont l'humidité spécifique est q

$$p \cdot V = m \cdot R_m \cdot T = m \cdot R_d \cdot (1 + 0,608q) \cdot T$$

$$p = \rho \cdot R_d \cdot (1 + 0,608q) \cdot T$$

On définit une température virtuelle qui tient compte de la présence de vapeur d'eau dans l'air humide

$$T_v = (1 + 0,61 \cdot q) \cdot T \cong (1 + 0,61 \cdot r) \cdot T$$

L'équation d'état de l'air humide prend la forme :

$$p = \rho \cdot R_d \cdot T_v$$

Important

La température virtuelle, T_v , est la température à laquelle il faut porter de l'air sec pour qu'il ait, à la même pression, la même densité que l'air humide considéré.

Lien entre les diverses variables d'humidité



http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter4/45_Water_Vapor/45.html

Résumé : caractérisation de l'air humide

Equation d'état de l'air humide : mélange d'air sec et de vapeur d'eau

$$R_m = (1 + 0,608 q) \cdot R_d \quad q = \frac{m_v}{m}$$

$$p \cdot V = m \cdot R_m \cdot T = m \cdot R_d \cdot (1 + 0,608q) \cdot T$$

$$p = \rho \cdot R_d \cdot T_v$$

$$p = \rho \cdot R_d (1 + 0,608q) \cdot T$$

$$T_v = (1 + 0,61q) \cdot T \cong (1 + 0,61r) \cdot T$$

Humidité relative versus rapport de mélange et humidité spécifique

$$HR(\%) = 100 \times \frac{e}{e_w(T)}$$

$$e = e_w(T_d)$$

$$HR(\%) = 100 \cdot \frac{e_w(T_d)}{e_w(T)}$$

$$\frac{e}{e_w} \cong \frac{r}{r_w} \Rightarrow$$

$$HR(\%) = 100 \cdot \frac{e}{e_w} \cong 100 \cdot \frac{r}{r_w} \cong 100 \cdot \frac{q}{q_w}$$

Rapport de mélange versus pression partielle de la vapeur et versus humidité spécifique

$$r = \frac{m_v}{m_d} = \frac{R_d}{R_v} \cdot \frac{e}{p_d}; \quad r = \varepsilon \cdot \frac{e}{p - e} \quad q = \frac{m_v}{m_d + m_v} = \frac{r}{1 + r}; \quad q = \varepsilon \cdot \frac{e}{p - (1 - \varepsilon)e}; \quad r = \frac{q}{1 - q}$$

À venir ... Les nuages...



<http://fr.canoe.ca/archives/infos/quebeccanada/media/2014/01/20140111-065922-g.jpg>



Source :
<http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-oper-nuages.htm>

... les brouillards, la rosée et le frimas



L'humidité relative

$$HR(\%) = 100 \cdot \frac{e}{e_w}$$

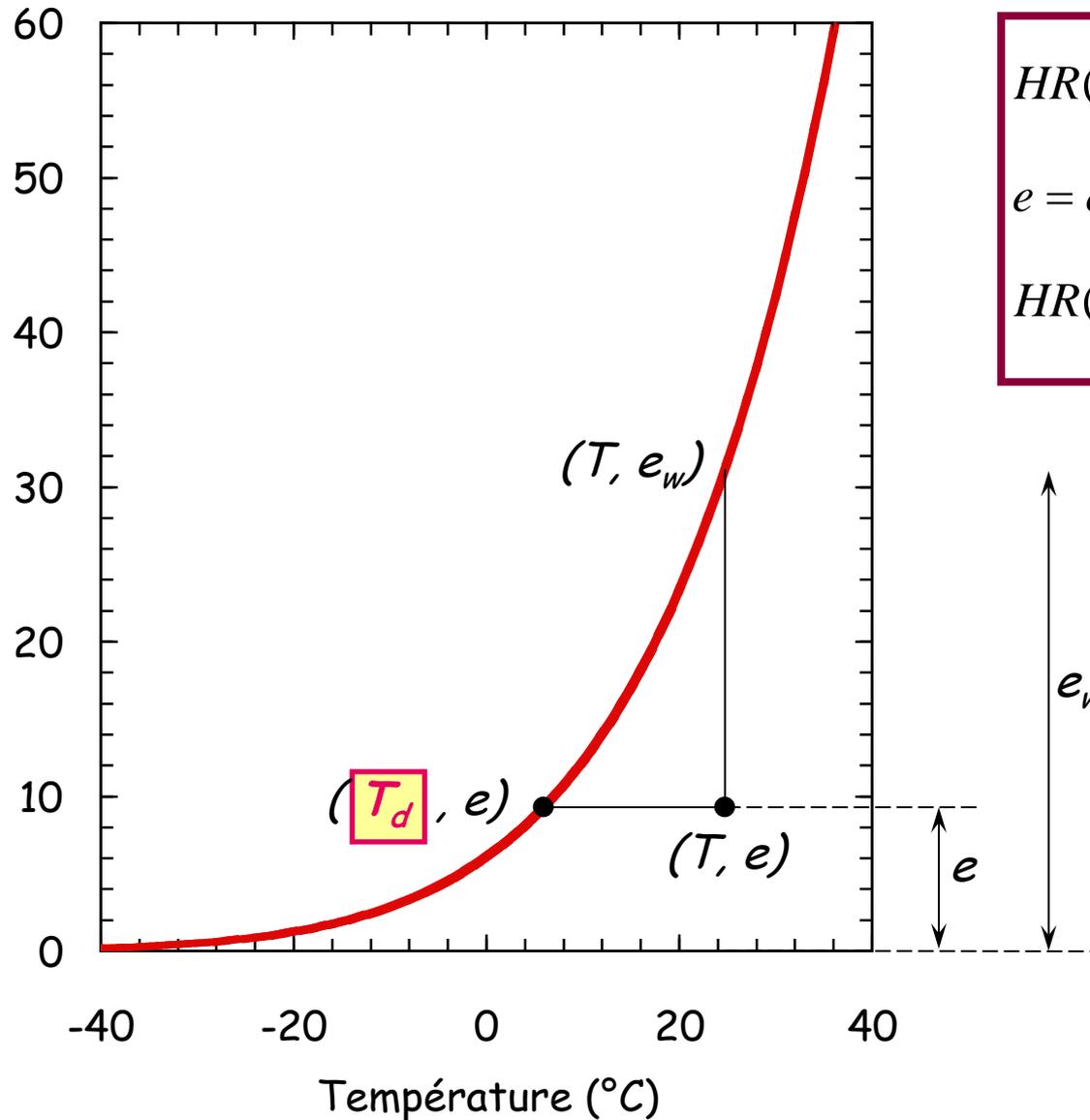
- Pour une même quantité de vapeur d'eau, l'**humidité relative** varie en fonction de la température.
- Quand **HR** atteint 100%, la rosée commence à se déposer.

Température du point de rosée, T_d

- C'est la température à laquelle l'air doit être refroidi, à pression constante, afin que le volume devienne saturé.



HR versus T_d et T_d versus e



$$HR(\%) = 100 \cdot \frac{e}{e_w(T)}$$

$$e = e_w(T_d)$$

$$HR(\%) = 100 \cdot \frac{e_w(T_d)}{e_w(T)}$$

Rapport de mélange

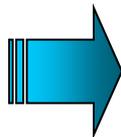
Rapport de mélange :

$$r = \frac{m_v}{m_d}$$

r est un nombre sans dimensions $< \sim 0.02$. Il est cependant noté en g kg^{-1} . Dans ces unités, $r < \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$.

$$e V = m_v \cdot R_v \cdot T \quad \text{et} \quad p_d \cdot V = m_d \cdot R_d \cdot T$$

$$r = \frac{m_v}{m_d} = \frac{R_d}{R_v} \cdot \frac{e}{p_d}$$



$$r = \varepsilon \cdot \frac{e}{p - e}$$

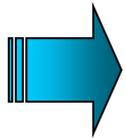
où $\varepsilon = R_d/R_v = 0.622$

Humidité spécifique, rapport de mélange et pression de vapeur – leurs liens...

Humidité spécifique :

$$q = \frac{m_v}{m}$$

$$\begin{cases} r = \frac{m_v}{m_d} \\ q = \frac{m_v}{m_v + m_d} \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{q} = \frac{m_v + m_d}{m_v} = 1 + \frac{1}{r}$$



$$q = \frac{r}{1+r}; \quad q = \varepsilon \cdot \frac{e}{p - (1-\varepsilon)e}; \quad r = \frac{q}{1-q}$$

Puisque r et q sont $< \sim 0.02$

\Rightarrow

$$q \cong r$$

HR versus r

Puisque e est toujours beaucoup plus petite que p , on fait l'approximation

$$r = 0.622 \frac{e}{p - e} \cong 0.622 \frac{e}{p}$$

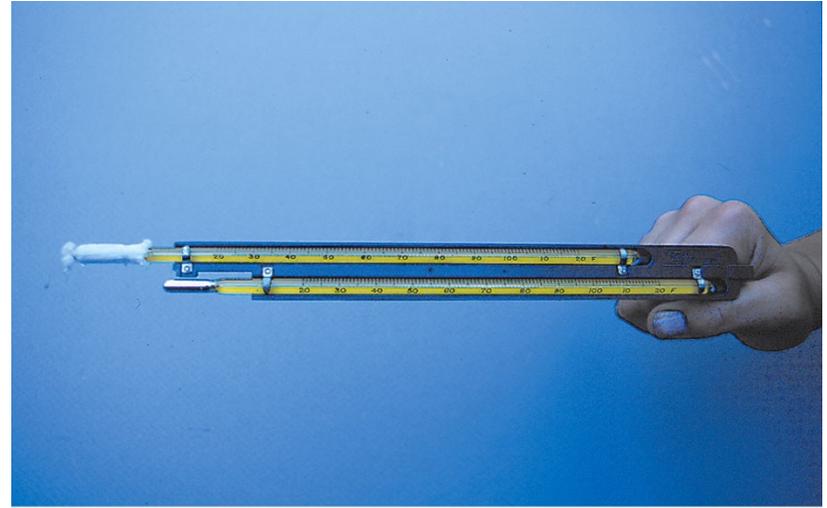
$$r_w = 0.622 \frac{e_w}{p - e_w} \cong 0.622 \frac{e_w}{p}$$

Et dans le cadre de cette approximation

$$\frac{e}{e_w} \cong \frac{r}{r_w} \Rightarrow \boxed{HR(\%) = 100 \cdot \frac{e}{e_w} \cong 100 \cdot \frac{r}{r_w}}$$

Mesures d'humidité

- Appareils de mesure
 - Le psychromètre
 - Les hygromètres



© Brooks/Cole, Cengage Learning

Capteurs HUMICAP pour la mesure de
l'humidité relative



Capteurs DRYCAP pour la mesure de la
température du point de rosée



Capteurs DEWCAP pour la mesure à
haute précision de la température du
point de rosée

Bandes d'absorption des gaz atmosphériques

La vapeur d'eau absorbe le rayonnement dans la longueur d'onde de 6,7 à 7,3 microns. Ces longueurs d'onde sont principalement absorbées par la vapeur d'eau en particulier, les autres gaz «à effet de serre» en absorbant très peu. Par conséquent, la vapeur d'eau émet également fortement à ces longueurs d'onde (selon la loi de Kirchhoff). Ainsi, même si la vapeur d'eau est un gaz invisible à des longueurs d'onde visibles (nos yeux ne peuvent pas le voir) et à des longueurs d'onde infrarouges plus longues, le fait qu'elle émette si facilement entre 5 et 7,5 microns la rend «visible».

RETOUR

