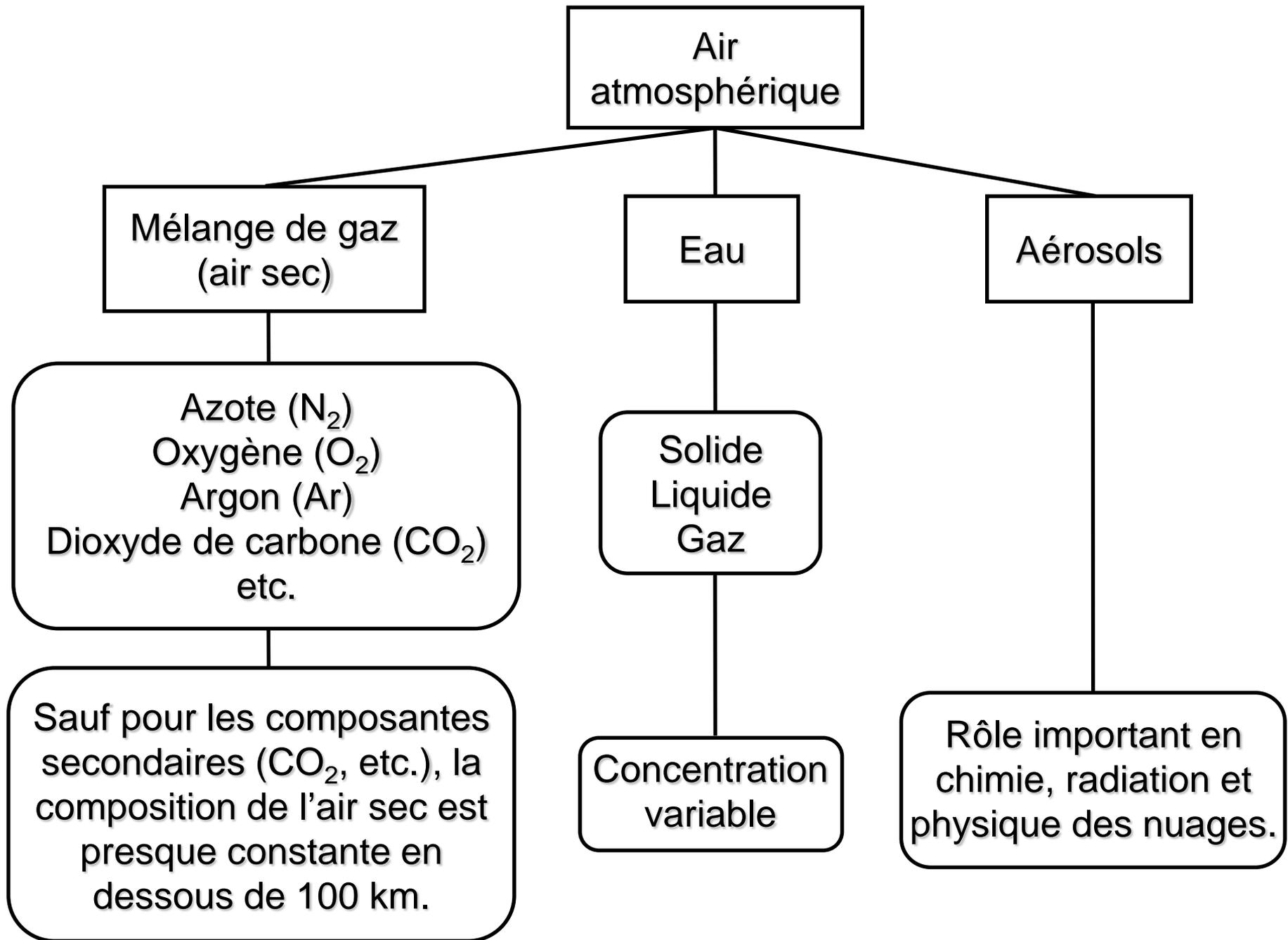




Photo : George Huard
Janvier 2018

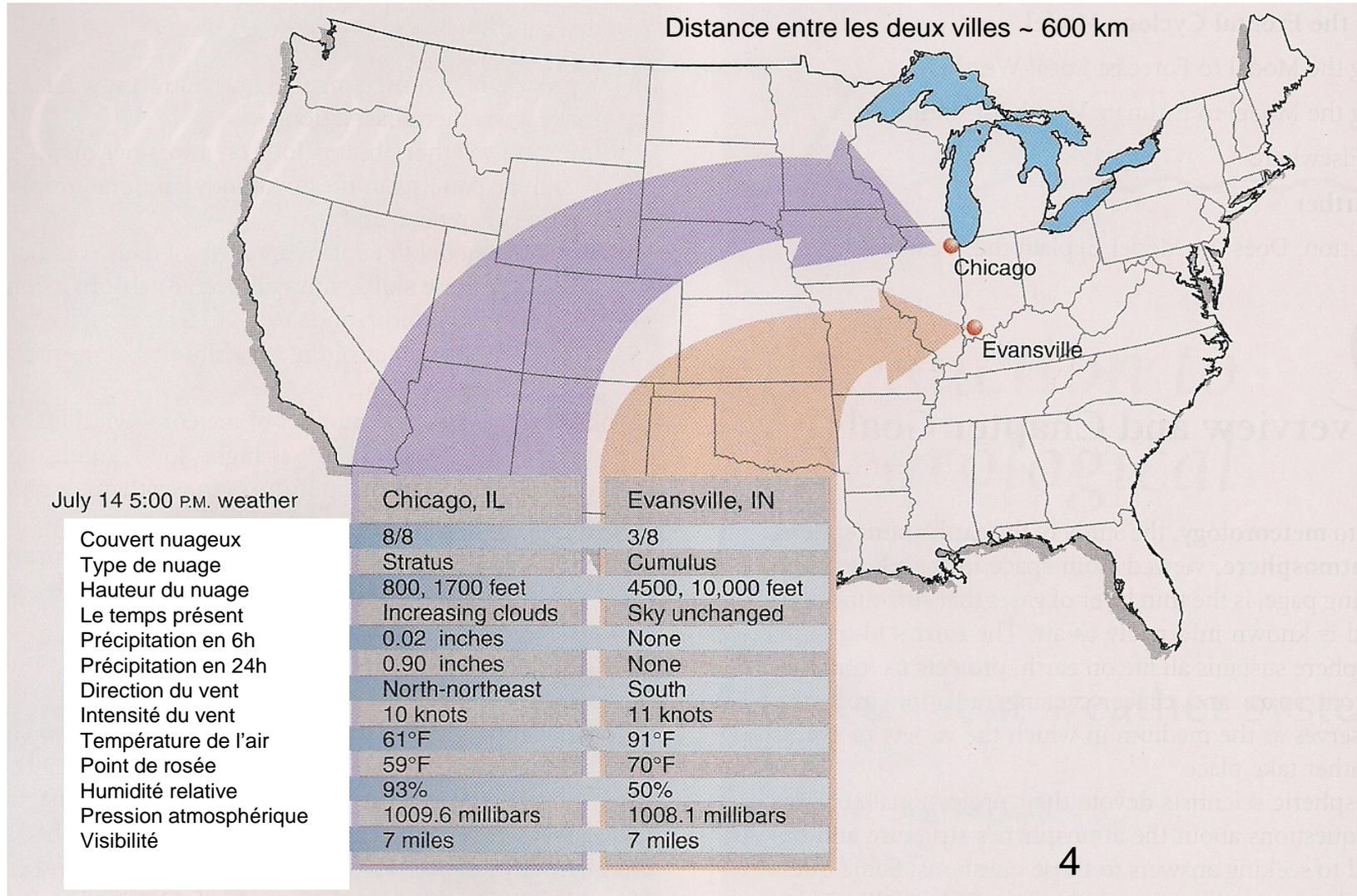
L'atmosphère réelle

LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE ATMOSPHÈRE CHANGEANTE

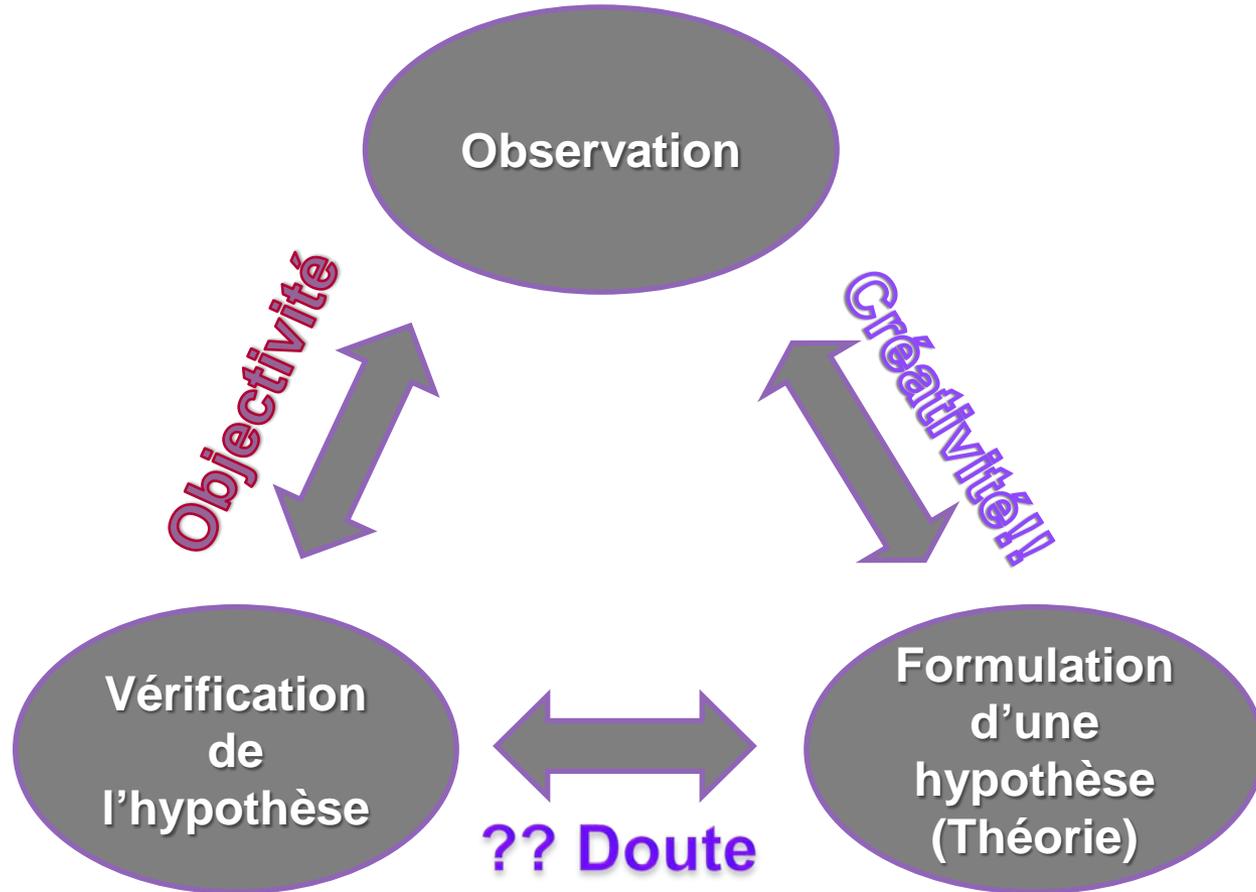


Le casse-tête météorologique

http://meteo.gc.ca/canada_f.html



À la recherche de réponses. La méthode scientifique



Les sciences de l'atmosphère

Le but de la science c'est de comprendre la nature pour pouvoir prédire son comportement.

Les sciences de l'atmosphère visent la prévision du comportement de l'atmosphère. Avant de prédire il faut connaître l'état présent.

Les principales grandeurs d'état de l'atmosphère ou variables météorologiques sont :

- La pression : force par unité de surface
- La température : énergie cinétique moyenne des molécules
- L'humidité : proportion de vapeur d'eau dans l'air
- Le vent : l'air en mouvement

La météorologie

Le système mondial d'observation

<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>

- Tous les jours, 187 Services nationaux de météorologie et d'hydrologie (SNMH) contribuent au système mondial d'observation.
- Le système comporte 3 centres mondiaux de météorologie (Melbourne, Washington et Moscou) et 40 Centres régionaux spécialisés (Montréal, ...).
- Les SNMH livrent les données et donnent les premiers services d'avertissements météo.

*RTH : Regional Telecommunication Hubs

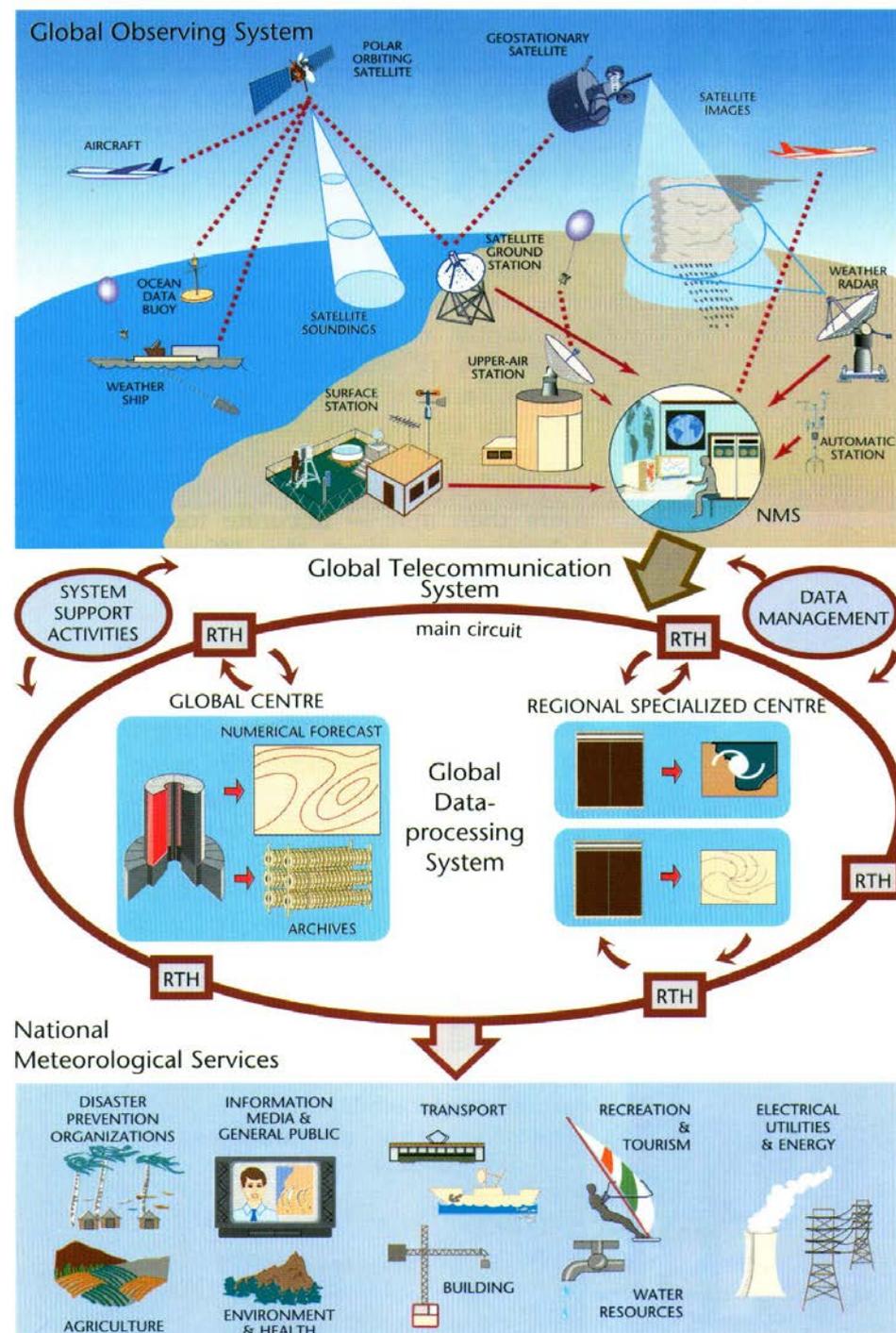
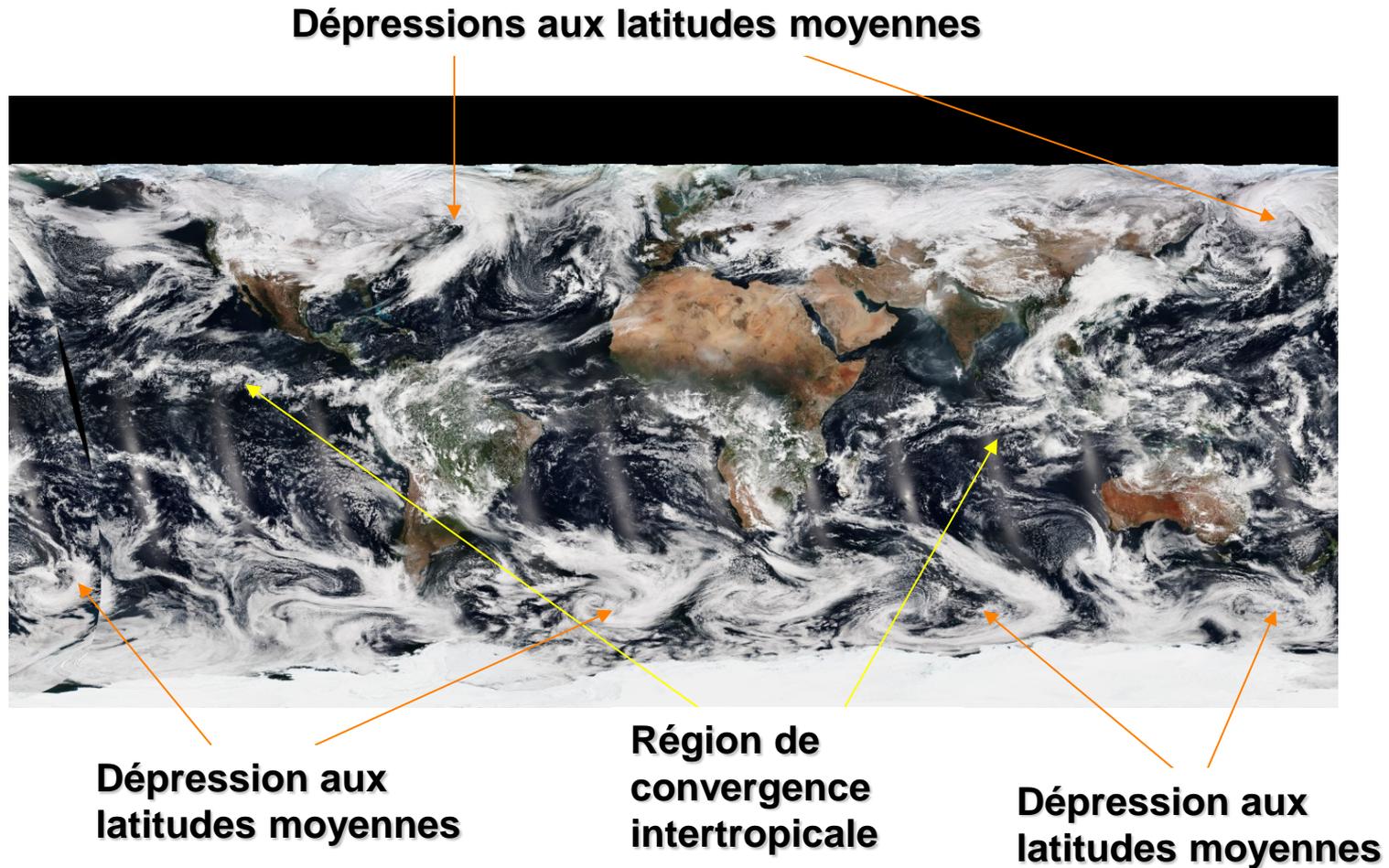
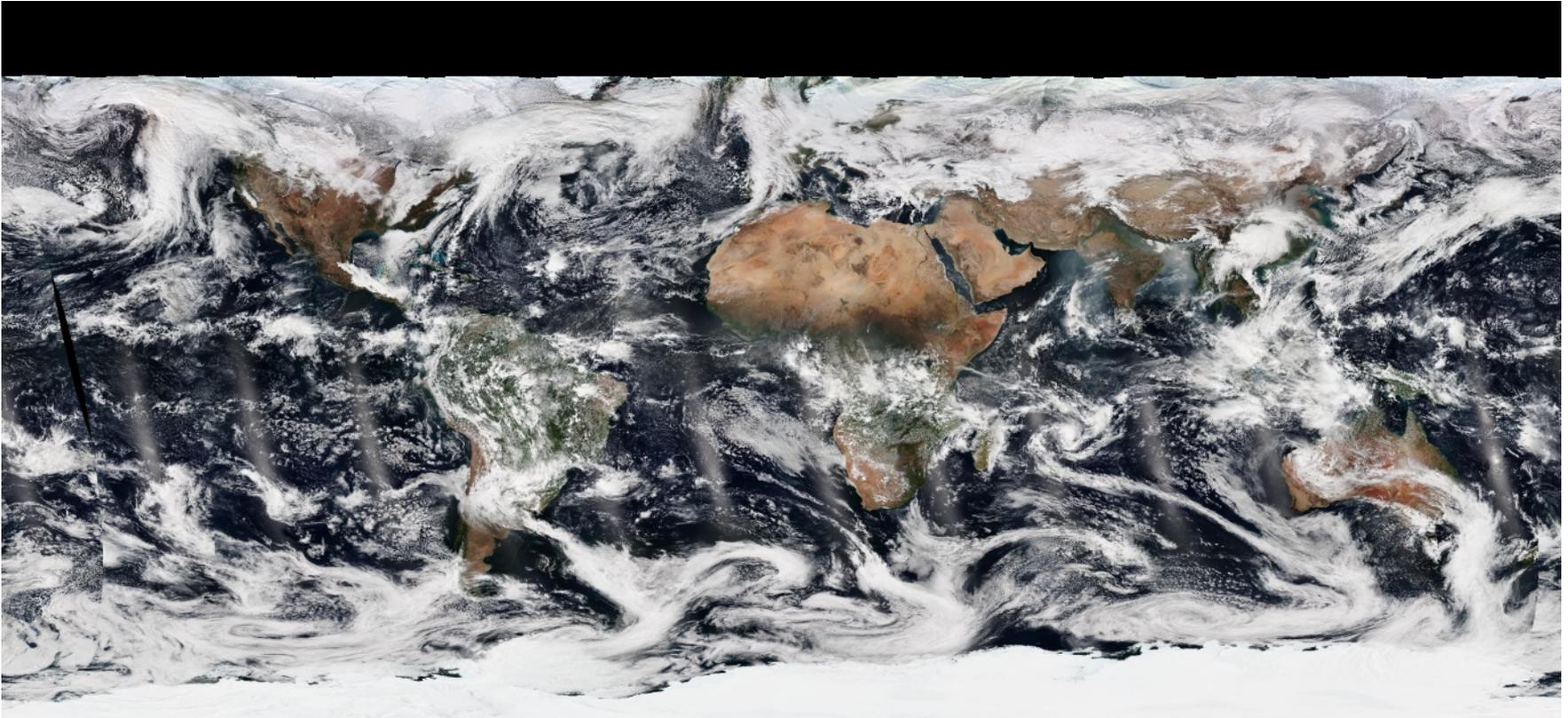


Image satellitaire : vendredi le 6 janvier 2017 à 11h



Source : <https://www.nesdis.noaa.gov/content/imagery-and-data>

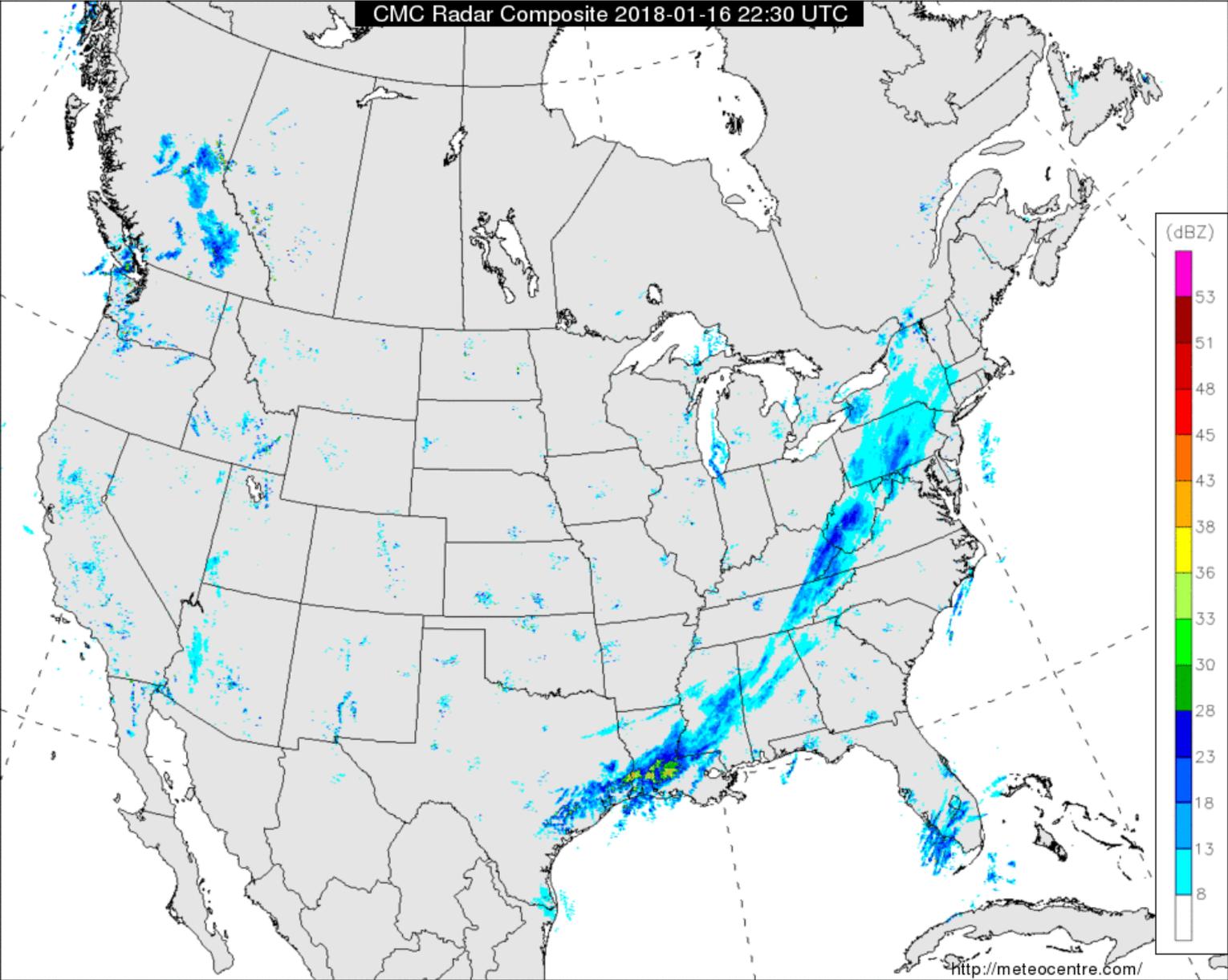
Image satellitaire : mardi le 16 janvier 2018 à 17 h



Source : <https://www.nesdis.noaa.gov/content/imagery-and-data>

Aujourd'hui : <http://www.keraunos.org/temps-reel/les-orages-aux-usa/observations-satellite-suivi-orages-tornades-usa.html>

Radar



Affichage des données

LES CARTES MÉTÉOROLOGIQUES

La cartographie

La météo affecte les opérations maritimes et aériennes ainsi que les activités menées dans d'autres domaines.

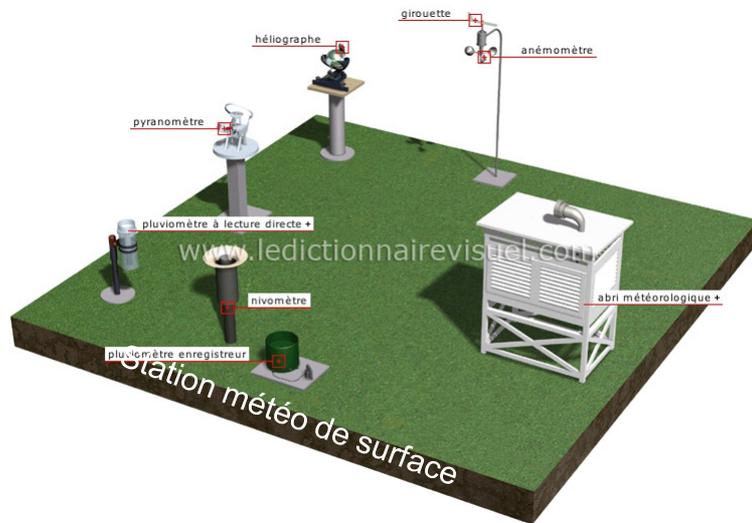
Les prévisionnistes et les consommateurs d'informations météorologiques doivent pouvoir anticiper comment les conditions changent et quelles situations pourraient être attendues à court terme ou à plus long terme.

Pour aider à trouver ces réponses, les cartes météorologiques ou les diagrammes fournissent une vue des conditions et des modèles à travers de plus grandes échelles spatiales.

La cartographie des changements de pression, de température, de vent et d'autres paramètres météorologiques à travers les zones fournit des informations sur les systèmes météorologiques et comment ils se déplacent ou évoluent.

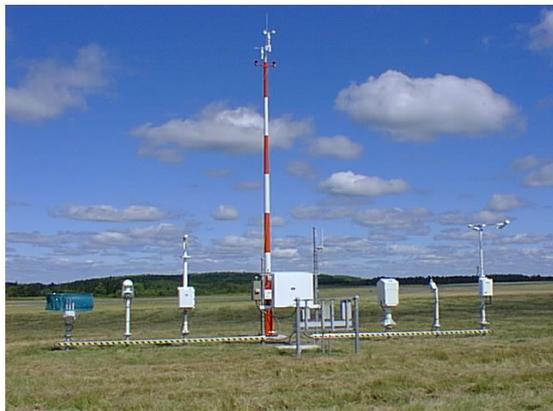
La capacité de lire et d'interpréter avec précision ces tableaux fait partie intégrante du processus de prévision météorologique.

Types d'observations



Les informations météorologiques actuelles pour un lieu incluent les observations enregistrées par les humains par observation visuelle, par des systèmes automatisés tels que des capteurs dans les aéroports, ou par une combinaison de données humaines et automatisées.

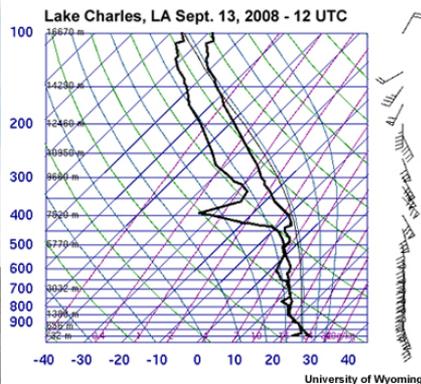
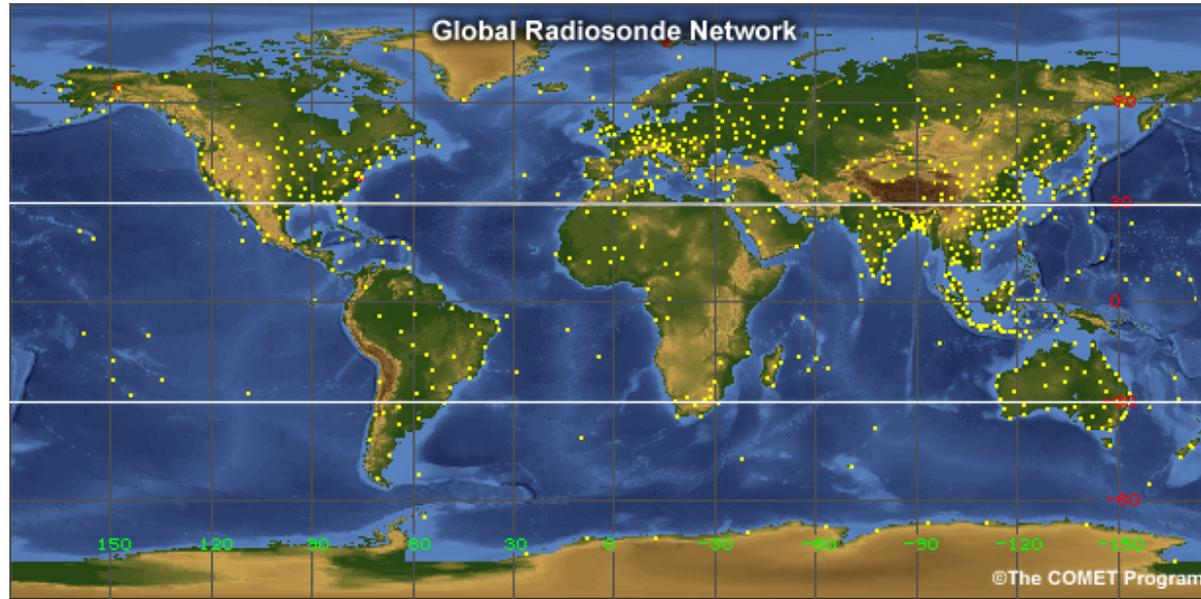
Global Synoptic Surface Observation Network



Station météo automatique



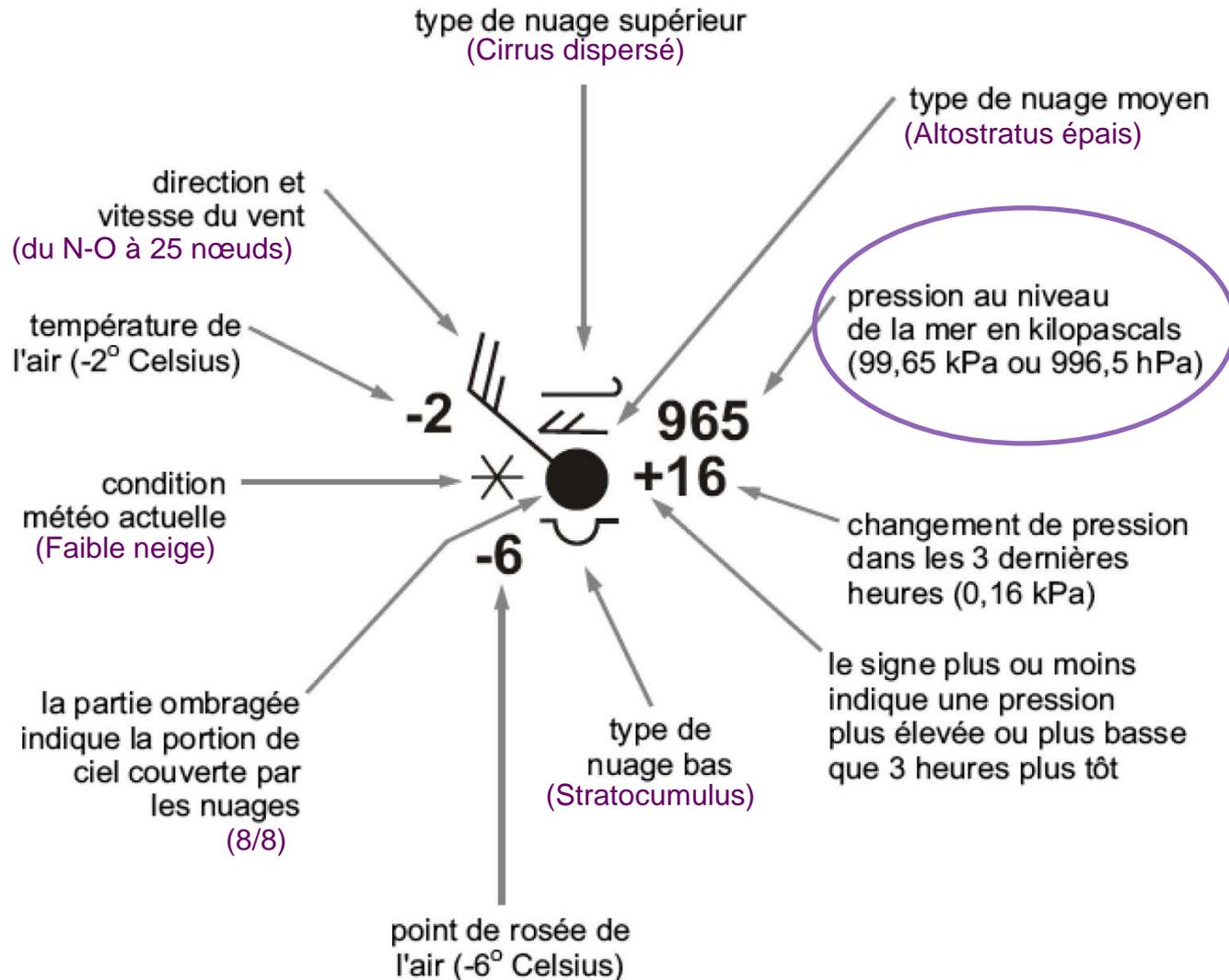
Types d'observations



Une fois collectées, les observations des sources de données humaines et automatisées sont signalées à l'aide de symboles, de codes et de textes écrits. Ils peuvent ensuite être tracés sur des cartes pour une vue des conditions et des motifs à travers différentes échelles spatiales.

Modèle de pointage (surface)

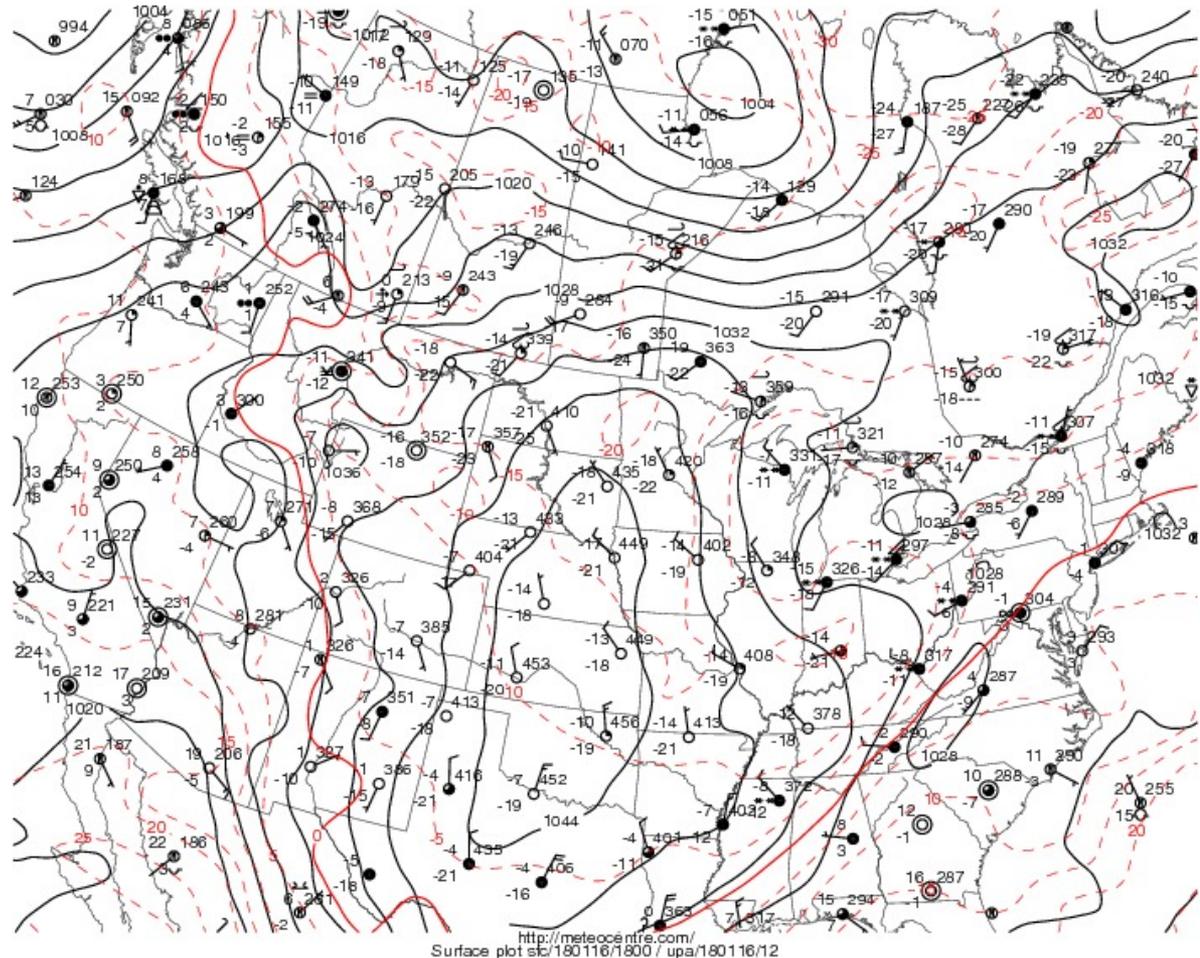
Le cercle, ●, est placé où est située la station de mesure.



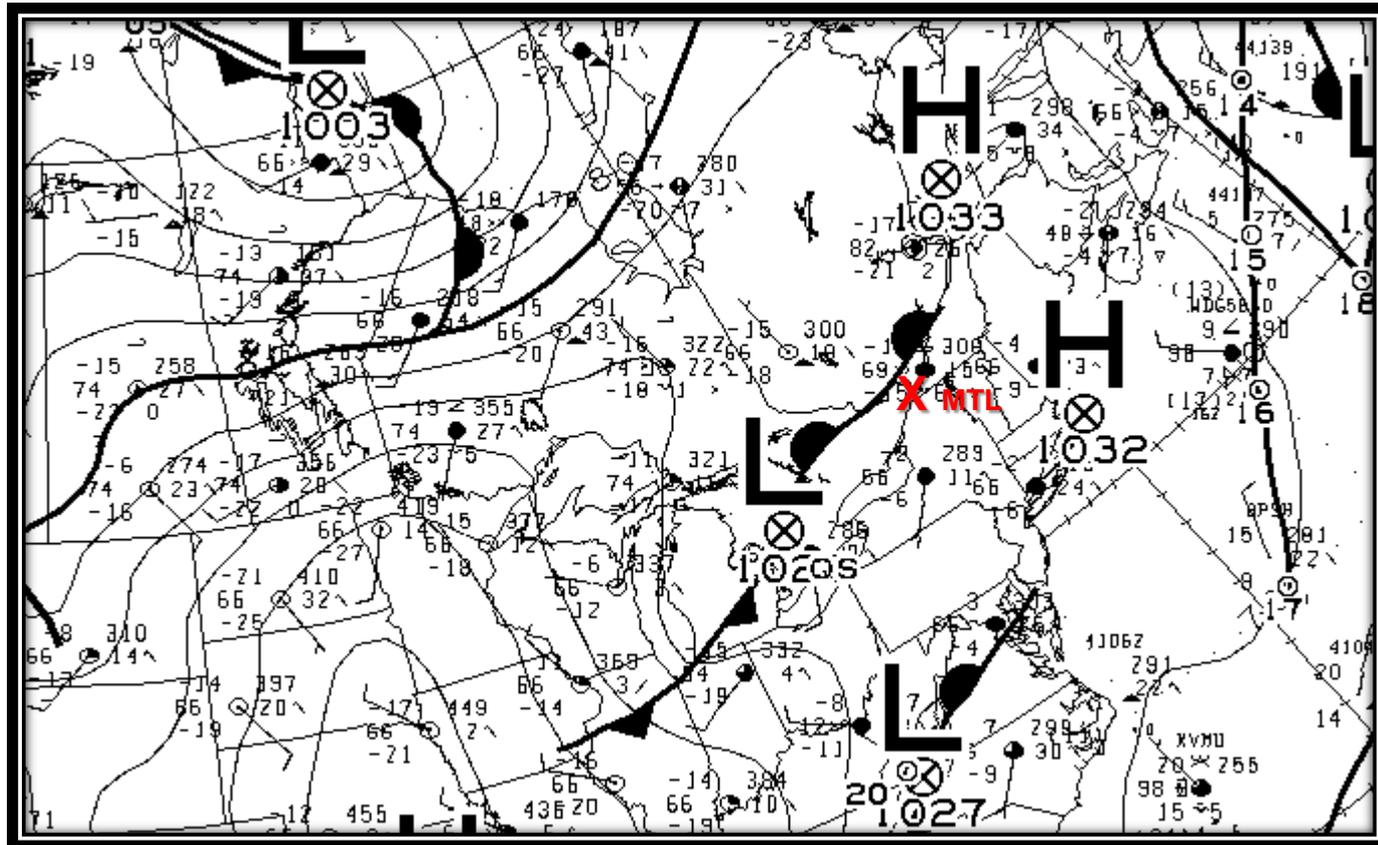
Analyse des données

Un seul modèle de station montre ce qui se passe à un endroit, mais pour savoir ce qui se passe dans une région ou dans le monde entier, il est utile d'observer plusieurs observations simultanément.

Les lignes de contour sur une carte offrent une manière de voir collectivement les observations individuelles en décrivant des zones de valeurs égales. Contourner les informations fournies par les modèles de stations multiples simplifie l'information et aide l'utilisateur à se concentrer sur des aspects particuliers de la carte. Des cartes analysées facilitent la lecture et le diagnostic des caractéristiques météorologiques.



Carte d'analyse



Carte de données d'observations à la surface, le 16 janvier 2018 à 18 UTC.
 (Environnement Canada)
Carte analysée à 00 UTC (Environnement Canada)

Les isolignes

De nombreux paramètres météorologiques différents peuvent être représentés en utilisant des contours sur une carte. Les contours connectent des valeurs égales, et les lignes elles-mêmes sont désignées sous le nom d'isobares, d'isothermes ou par d'autres noms en fonction du paramètre analysé. Gardant à l'esprit que "iso" signifie égal, ci-dessous sont quelques paramètres météorologiques généralement représentés sur les cartes météo.

Isobare : Une ligne de pression égale

Isohauteur / isohypses: Une ligne de hauteur égale

Isotherme : Une ligne de température égale

Isodrosotherme : Une ligne de point de rosée égal

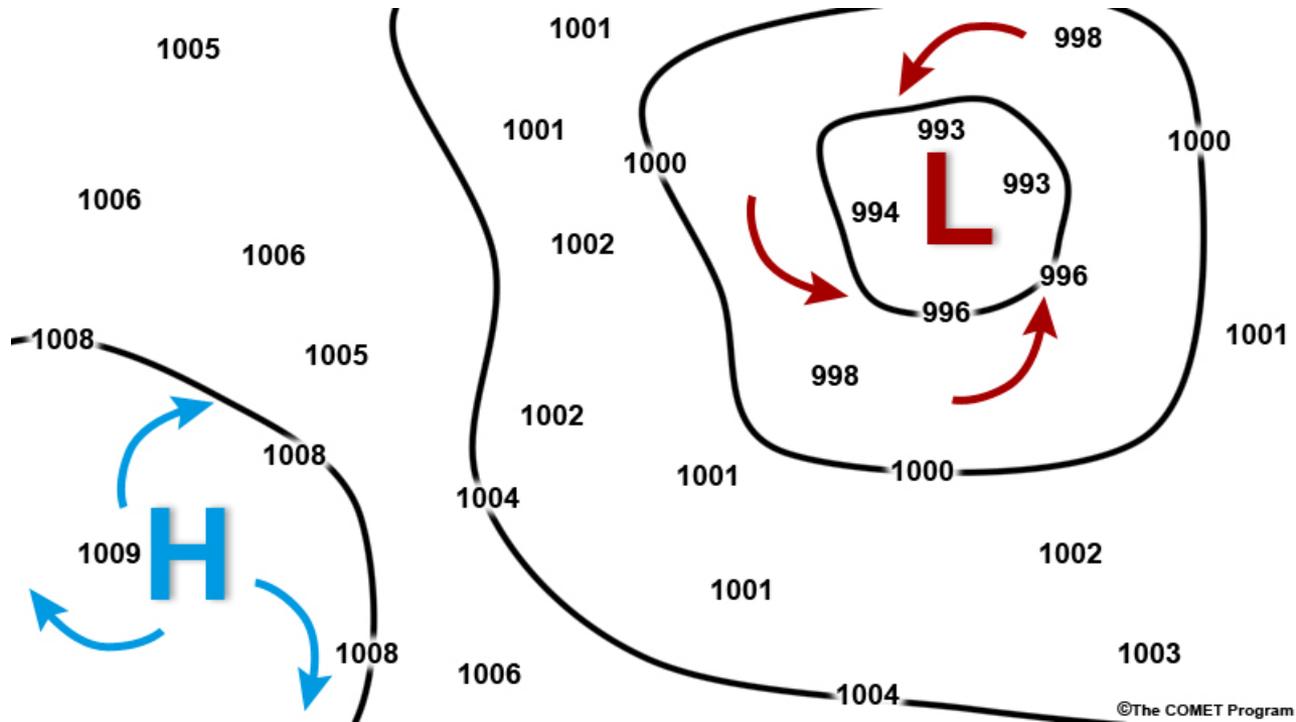
Isotache : Une ligne de vitesse de vent égale

Isohyète : Une ligne d'accumulation de précipitation égale (liquide et congelée)

Isonèphe : Une ligne de nébulosité égale

Isohaline : Une ligne de salinité égale (salinité dans l'océan)

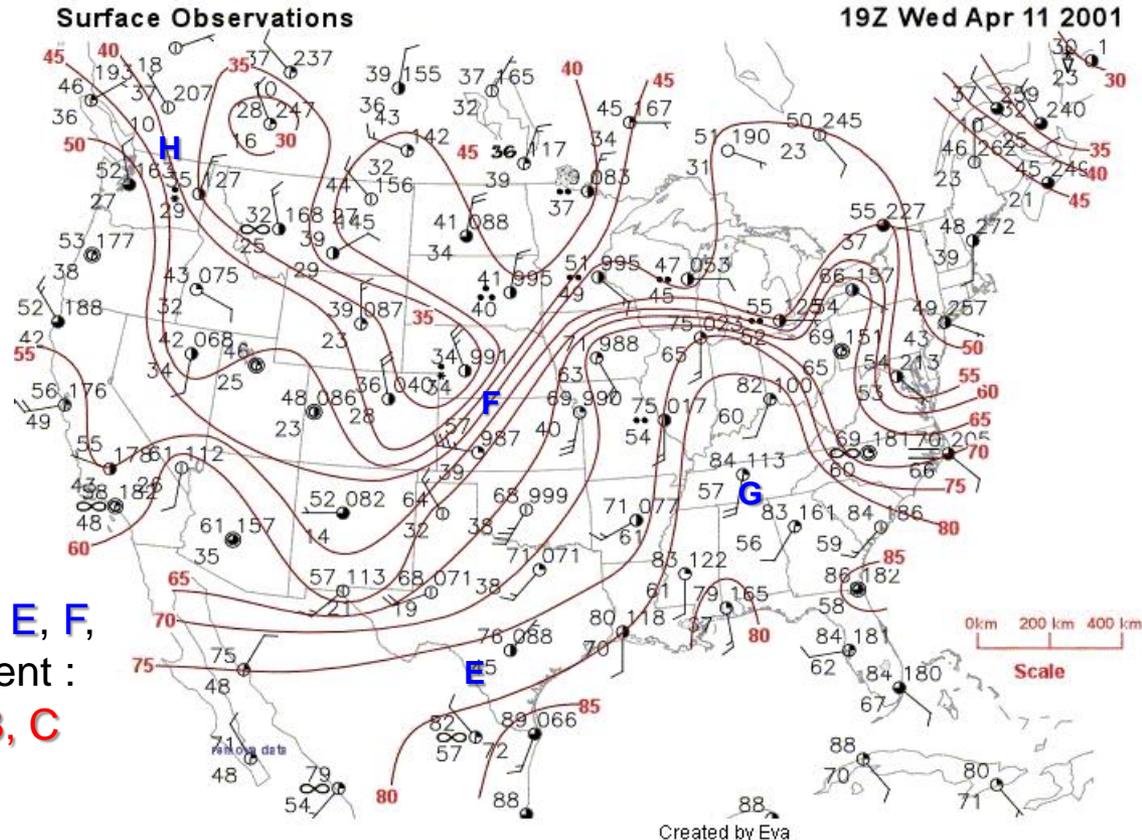
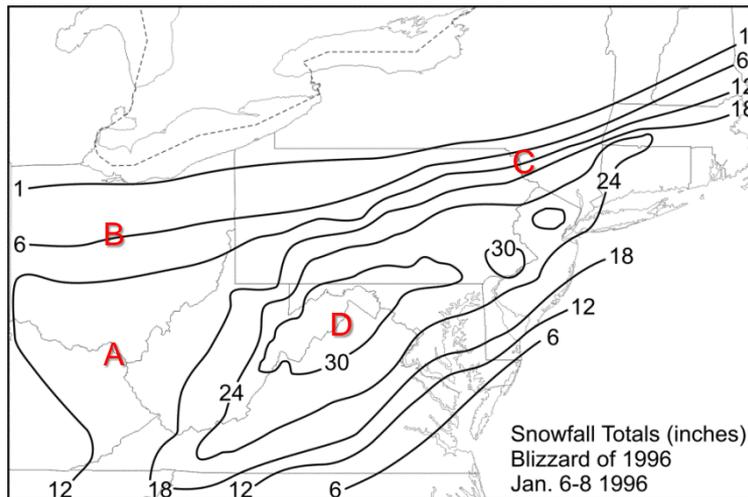
Exemple - isobares



Les gradients $\text{grandeur du gradient de } X = |\nabla X| = \frac{\Delta X}{d}$

Prudence! Des forts gradients en vue. Les conditions météorologiques peuvent changer rapidement.

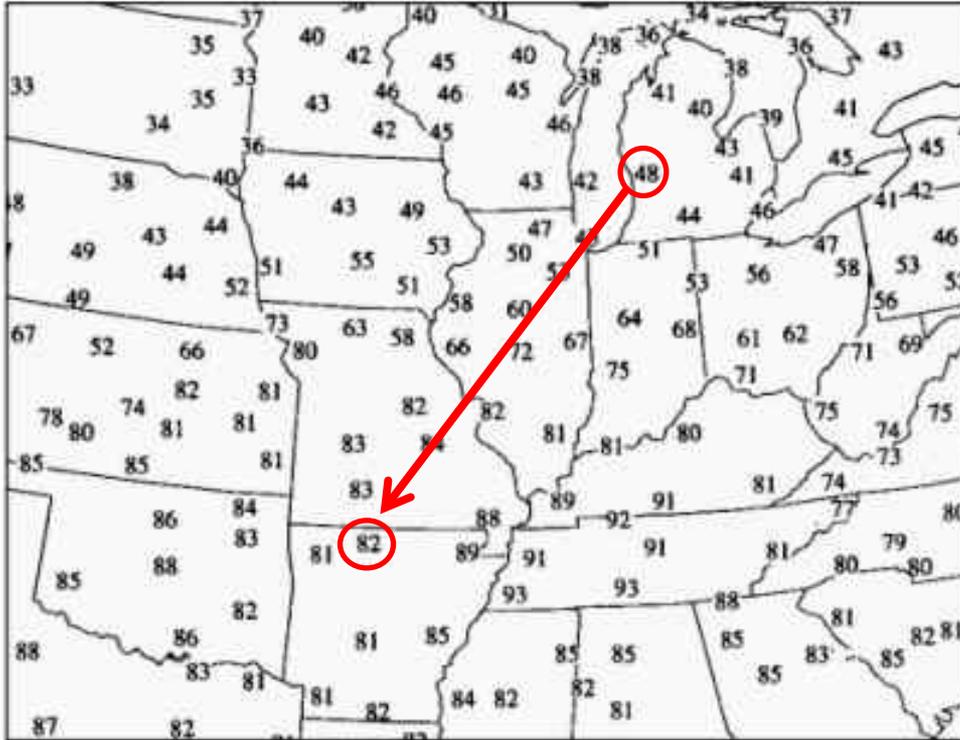
Le terme de « *gradient* » est employé pour qualifier la variation d'une grandeur dans l'espace. Les grands changements sur des distances relativement petites peuvent être diagnostiqués par la proximité des isolignes dans certaines régions :



Ordonnez les localisations **A, B, C, D, E, F, G, H** selon l'ordre croissante du gradient :

1. d'accumulation de neige : **D, A, B, C**
2. de température : **G, E, H, F**

Surface Temperature



La distance entre les deux villes encadrées est de 425 km, Déterminez le gradient de température avec une précision de deux décimales.

Donnez les résultats en °F/km et en °C/km

Afficher tous vos calculs.



Solution : Gradient = changement de la température / distance

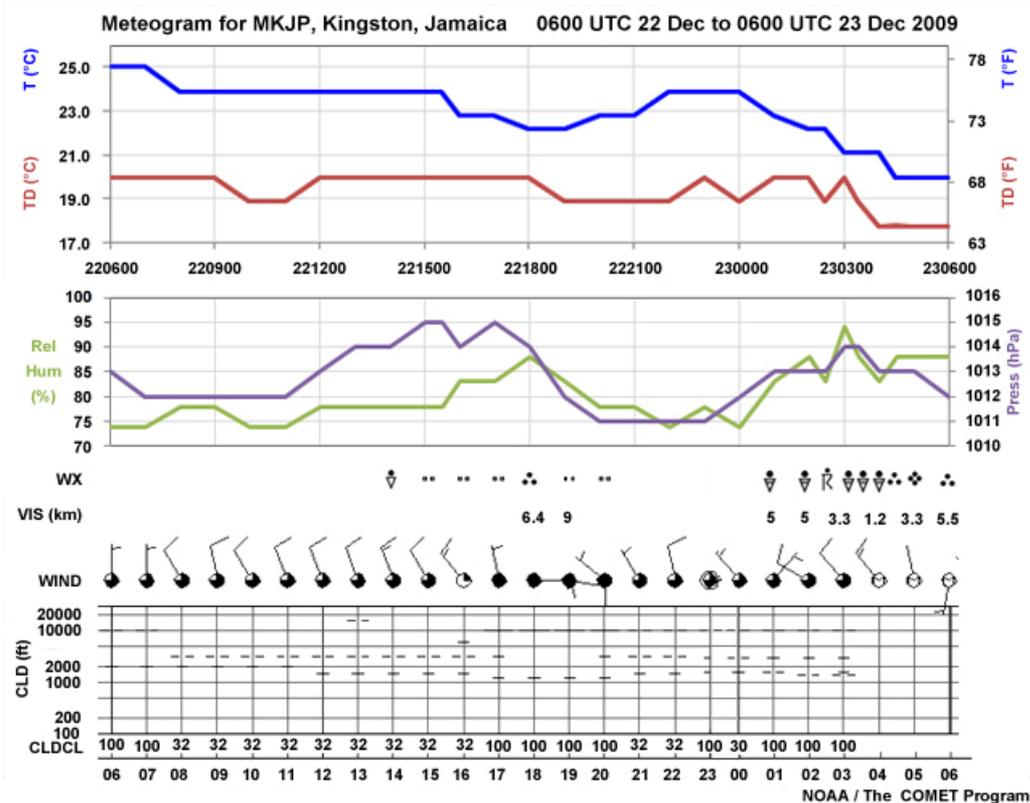
$$\text{Gradient (}^{\circ}\text{F/km)} = \Delta T/d = (82 - 48) / 425 = 34/425 = 0.08 \text{ }^{\circ}\text{F/km}$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 32 \Rightarrow \Delta T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 \cdot \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(^{\circ}\text{F}) / 1,8$$

$$\text{Gradient (}^{\circ}\text{C/km)} = \Delta T/d = (34/1,8)/425 = 0,04 \text{ }^{\circ}\text{C/km}$$

Les météogrammes : la météo heure par heure

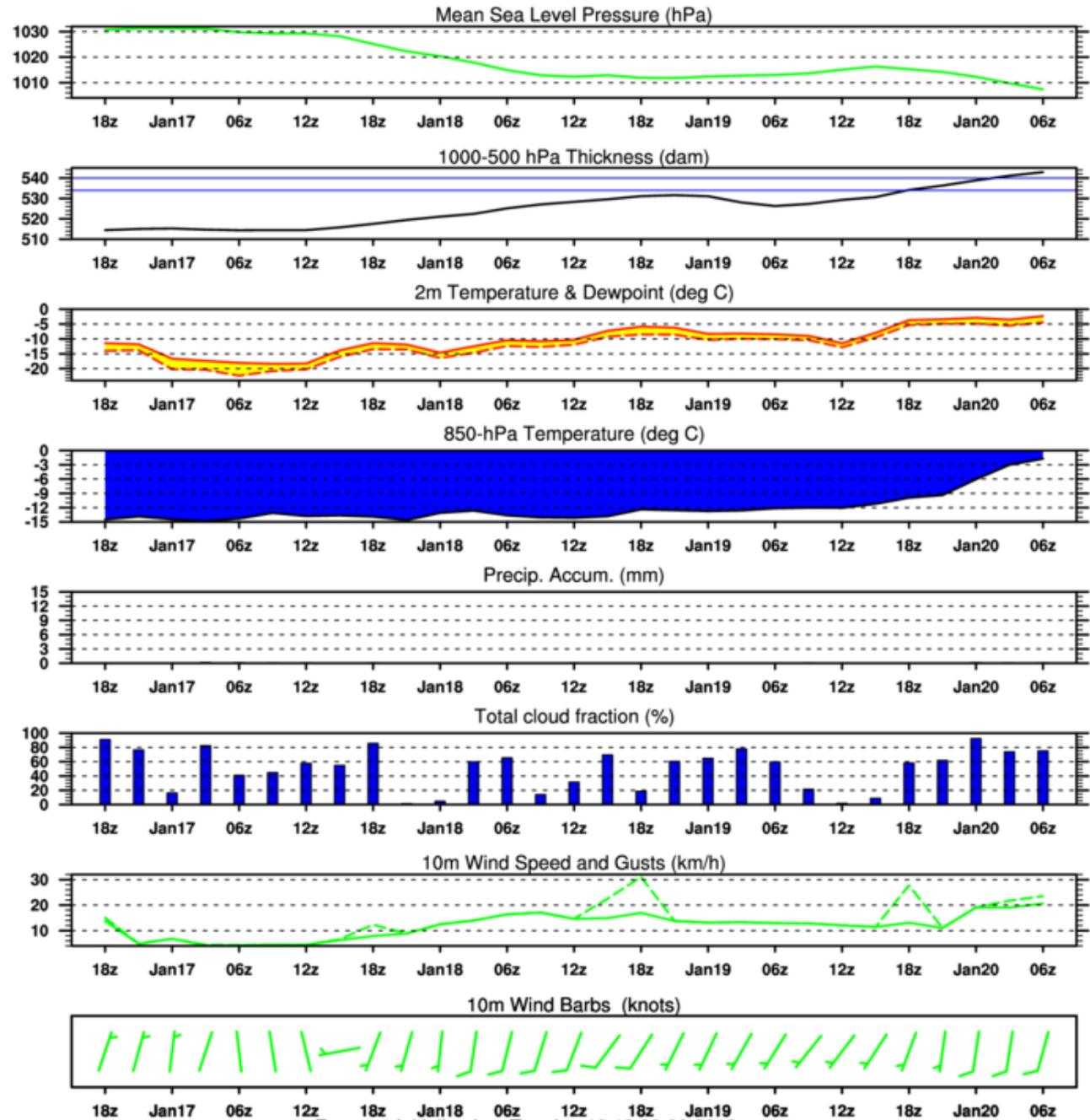


Les observations de surface montrent que l'aéroport a connu plusieurs heures de pluie légère et une période de pluie modérée pendant la journée, entre 1400 et 2000 UTC, le 22 décembre. La pluie modérée a abaissé la visibilité à 6,4 km et abaissé la température et la température du point de rosée de 1 ° C. Les vents sont devenus de l'est brièvement et il est resté nuageux pendant les quatre prochaines heures mais sans pluie.

Après 0100 UTC (2000 LT) 23 décembre, des averses modérées à fortes ont commencé. La visibilité a été réduite à moins de 5 km. Des averses orageuses et une visibilité aussi basse que 1,2 km ont été observées. La température a baissé de 4 ° C entre 0000 et 0430 UTC et l'humidité relative (proportionnelle à $T - TD$) a augmenté.

À 0300 UTC (2200 LT), on observe de fortes averses de pluie, une visibilité de 3,3 km et un plafond (hauteur de la base des nuages les plus bas) de 1400 pieds avec quelques nuages à plusieurs niveaux. L'échelle du plafond est logarithmique.

Attention! Le format et style trouvés sur internet peuvent être très différentes, mais vous avez les outils pour les interpréter...

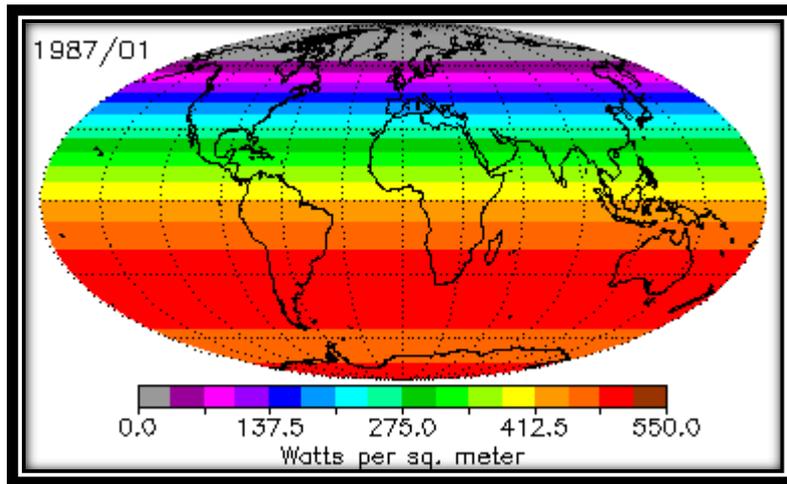


<http://meteocentre.com/>

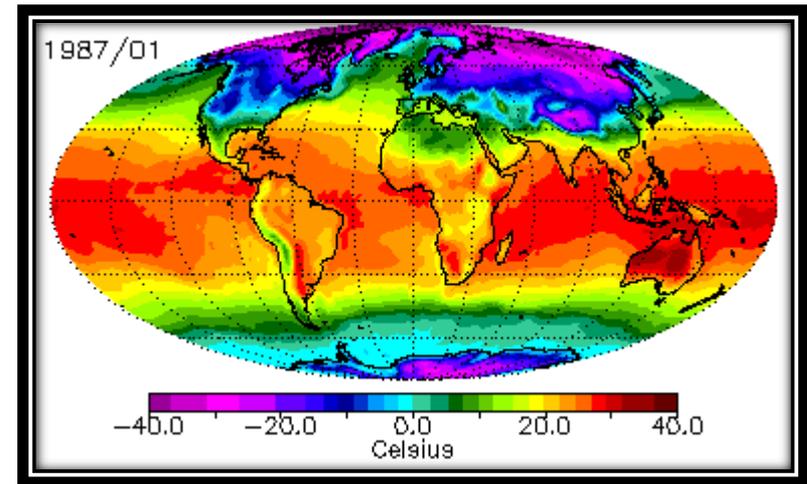
Quand on parle de météo on pense à température...

Qu'est-ce la température?

Pourquoi varie-t-elle?



Énergie reçue au sommet de l'atmosphère



Température de la surface terrestre

Source : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/energie-temperature2.xml>

Énergie

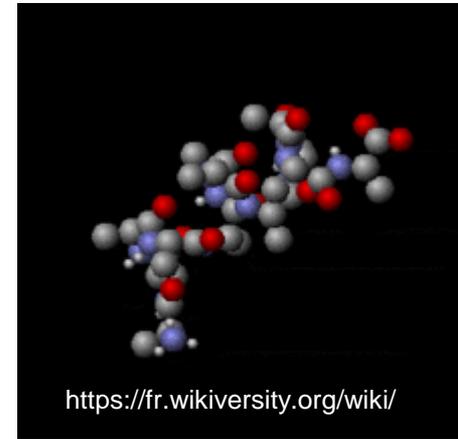
Réchauffement de la Terre et de son atmosphère

Table de matières

- Énergie, température et chaleur
 - Conservation de l'énergie
 - Capacité calorifique spécifique
 - Chaleur sensible
 - Chaleur latente
- Types de transfert thermique
 - Les changements de phase
 - La conduction
 - La convection
 - La radiation

Objectifs

Nous avons appris que la température est une mesure de l'énergie cinétique des molécules. Qu'est-ce qui peut provoquer le changement de cette énergie?



Dans ce cours nous allons voir comment le principe de conservation de l'énergie permet de prédire la variation de la température d'un objet ou système thermodynamique due au gains ou pertes d'énergie.

Pour la même quantité d'énergie absorbée par le système, la variation de la température dépend de la capacité thermique du système et des conditions dans lesquels l'énergie a été absorbée.

Mais comment l'énergie est transmise entre les systèmes? Pour répondre à cette questions nous introduisons les notions d'énergie thermique et de travail.

Les mécanismes de transport de chaleur peuvent se faire

- avec un support matériel : conduction, convection et changement de phase;
- sans un support matériel : radiation

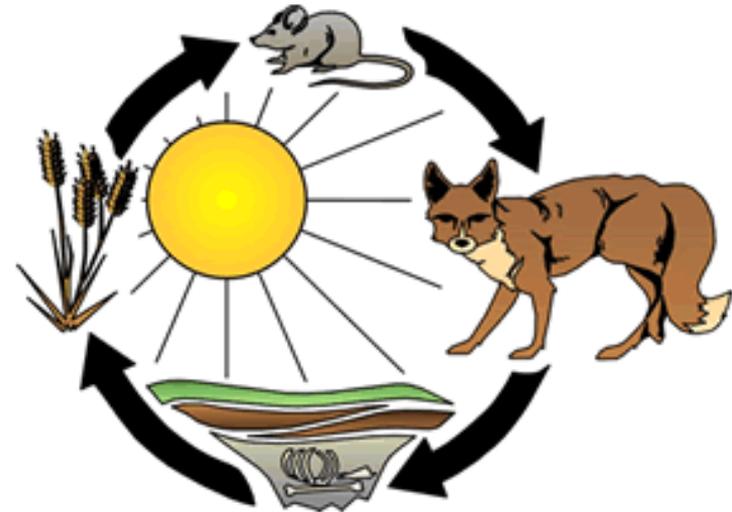
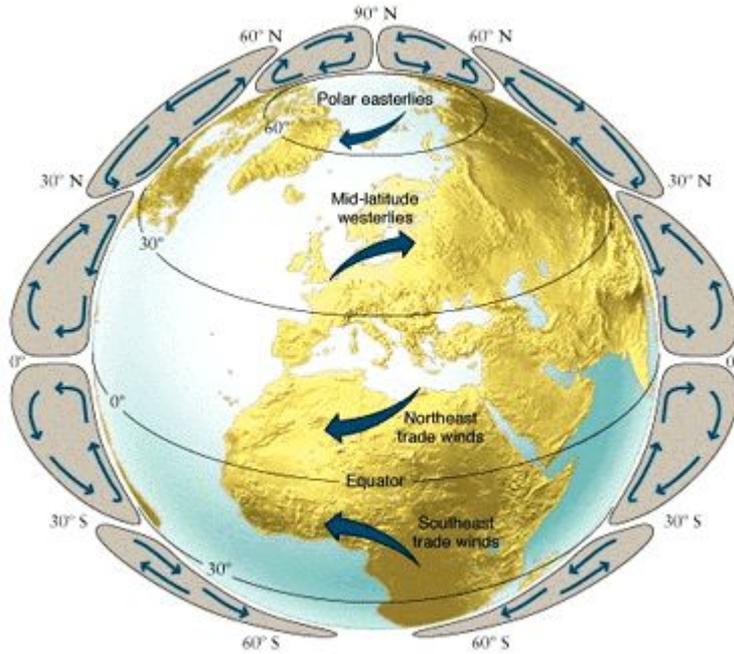
Énergie, température et chaleur

Énergie : habilité de la matière à exécuter un travail...

Énergie potentielle = Énergie potentielle gravitationnelle ($m \cdot g \cdot h$)
+ énergie potentielle interne (forces de liaison entre les particules)

Énergie cinétique = $(1/2) \cdot m \cdot v^2$
= énergie cinétique macroscopique
+ énergie cinétique interne (des particules)

Premier principe de la thermodynamique



Principe de la conservation d'énergie :

Au cours d'un processus quelconque, l'énergie de l'univers peut changer de forme, mais ne peut être ni créée ni détruite.

Énergie totale d'une particule d'air

En météorologie les principales formes d'énergie associées à notre système thermodynamique (une particule d'air) sont:

- **Énergie interne** : L'énergie interne U s'interprète comme la somme de l'énergie cinétique microscopique des particules du système et de leur énergie potentielle interne;
- **Énergie cinétique moyenne** : E_c est l'énergie cinétique macroscopique due au mouvement d'ensemble du système dans le repère d'étude.
- **Énergie potentielle** : E_p est l'énergie potentielle provenant des forces extérieures : forces électromagnétiques, forces de pesanteur, celles-ci étant les plus importantes dans l'atmosphère. L'énergie potentielle d'une particule d'air atmosphérique dépend essentiellement de sa position dans le champ gravitationnel terrestre.

Énergie versus température

La température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des molécules qui forment la substance. Elle est associée à l'énergie cinétique microscopique (une partie de l'énergie interne de la substance)

La capacité calorifique d'une substance est donnée par le rapport entre la quantité de chaleur que lui est fournie et l'élévation de température correspondante.

La capacité calorifique spécifique ou massique (aussi appelée chaleur spécifique) est la capacité calorifique par unité de masse.

La capacité ou chaleur spécifique d'une substance est fonction des variables d'état et du processus qui a amené à la variation de température.

Chaque substance a une infinité de chaleurs spécifiques, mais il y a deux qui sont d'importance fondamentale :

La chaleur spécifique à volume constante, $\delta Q = (dU)_v$: $Q = \Delta U$, donc $c_v = \Delta U / \Delta T$

La chaleur spécifique à pression constante, $\delta Q = d(U + pV)_p$: $Q = \Delta(U + pV)$, donc $c_p = \Delta(U + pV) / \Delta T$

Chaleur spécifiques de diverses substances

Substance	Chaleur spécifique (cal g ⁻¹ K ⁻¹)	Chaleur spécifique (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Eau liq (pure)	1.00	4186
Glace (0 C)	0.50	2093
Sable argileux	0.33	1381
Air sec (niveau de la mer)	0.24	1005
Sable (quartz)	0.19	795
Granite	0.19	794

Note: 1 calorie = 4,186 joules

En supposant que initialement la température est la même, quelle des deux substances suivantes aura la température finale la plus élevée par absorption de 10 calories?

- 1) 1 g d'eau liquide
- 2) 1 g de sable (quartz)

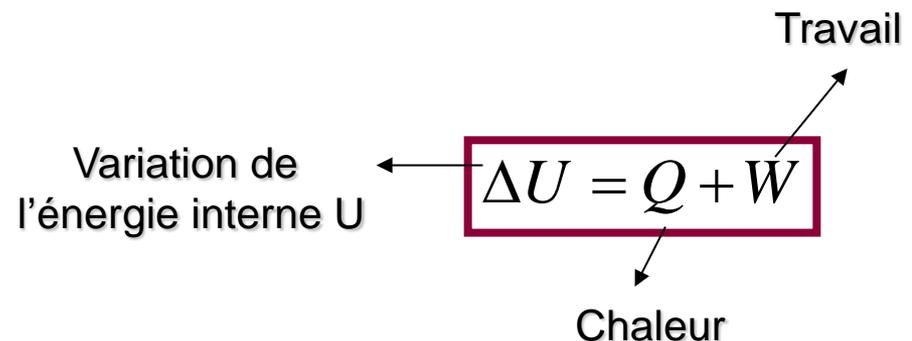


La différence des chaleurs spécifiques entre la terre et l'eau liquide est un des facteurs à l'origine des brises de terre et de mer.

Variation de l'énergie interne d'une particule d'air

La façon la plus simple de mettre en évidence l'énergie est par sa variation (représentée par Δ). L'énergie peut être transférée à un système principalement sous deux formes:

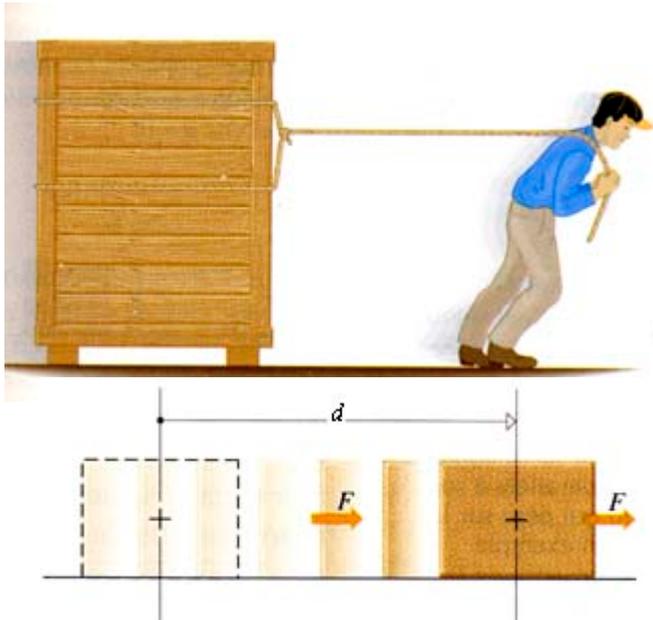
- Le travail W : transfert d'énergie par interaction macroscopique (ordonnée)
 - Travail du à la pression
 - Travail du au frottement
 - Travail du à la gravité
 - ...
- La chaleur Q : transfert par interaction microscopique (désordonnée)
 - La chaleur sensible Q_H
 - La chaleur latente Q_L
 - La radiation



Notion de travail, W

Le travail W (Work) est la variation de l'énergie d'un système, due à l'application d'une force F , agissant sur une distance d : $W = F \cdot d$, dans le cas où la force et le déplacement ont même sens et même direction.

L'unité de travail est le **Joule (J)**, celle de force, le **Newton (N)** et celle de distance, le **mètre (m)**.

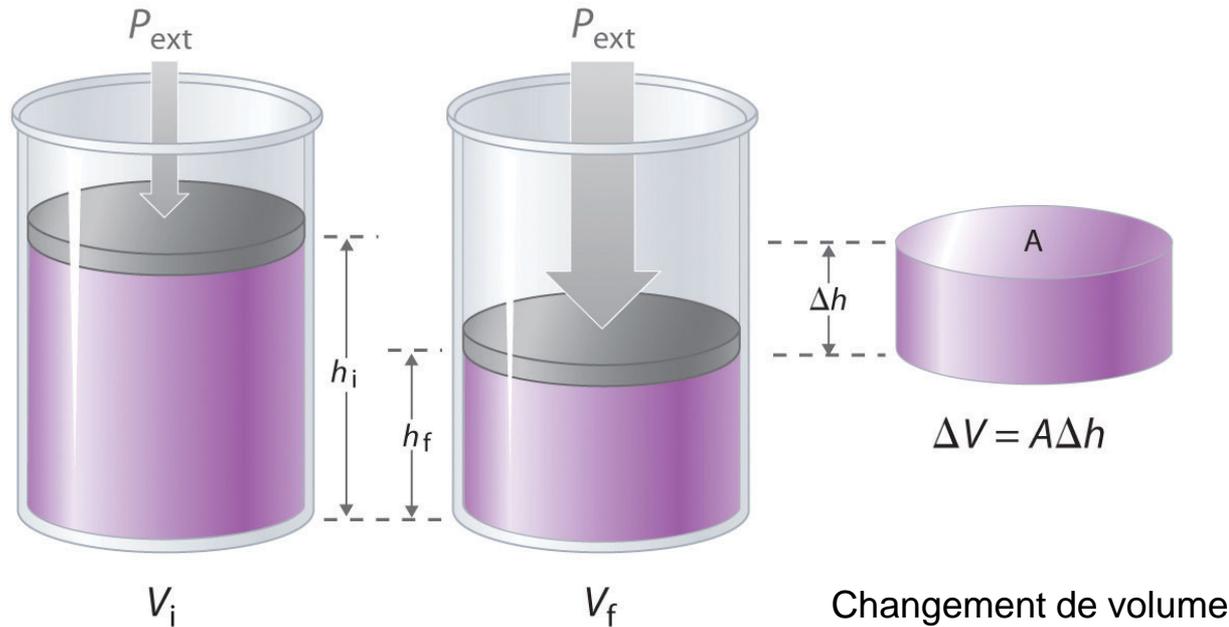


Remarque : toutes les forces ne travaillent pas. Si la force est orthogonale au déplacement, son travail est nul.

Par exemple, le travail de la force gravitationnelle de la Terre sur la Lune est nul car celle-ci a sa direction toujours perpendiculaire au déplacement, ainsi le rotation de la Lune autour de la Terre s'effectue sans perte d'énergie.

Travail dans l'atmosphère

Dans l'atmosphère, les échanges d'énergie sous forme de travail sont essentiellement dus aux variations de volume des parcelles d'air.



Cours phy2001

$$F = -p_{ext} \cdot A$$

$$W = -p_{ext} \cdot \underbrace{A \cdot \Delta h}_{\Delta V} = -p_{ext} \cdot \Delta V$$

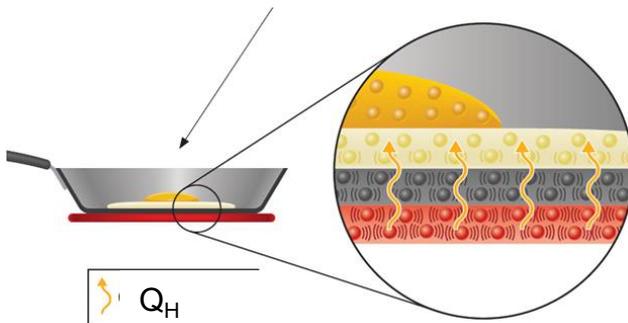
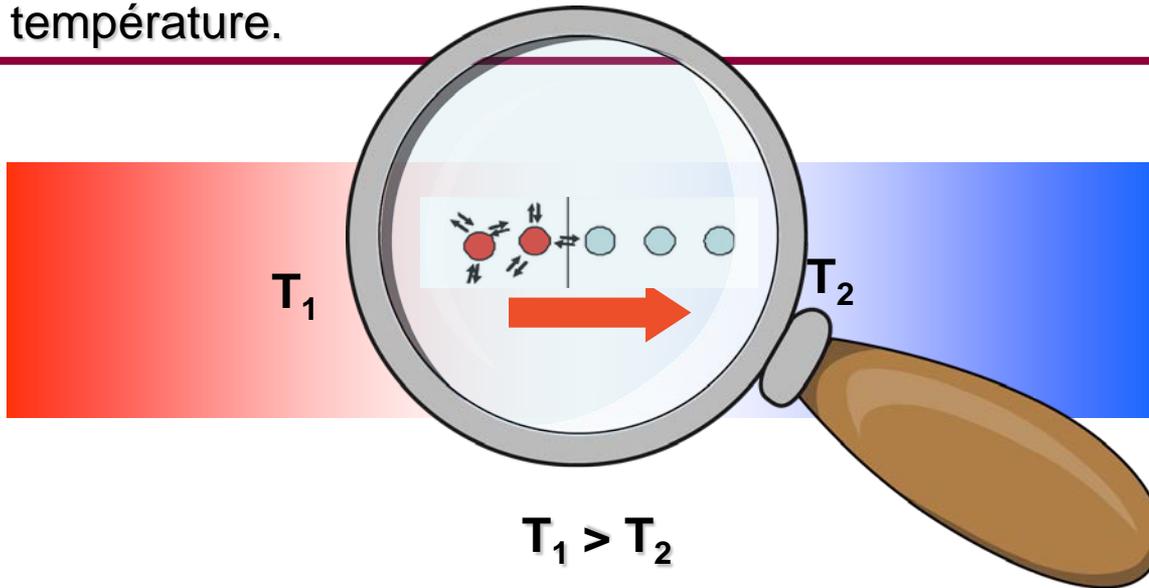
L'équation différentielle correspondante est $\delta W = -p \cdot dV$

Important

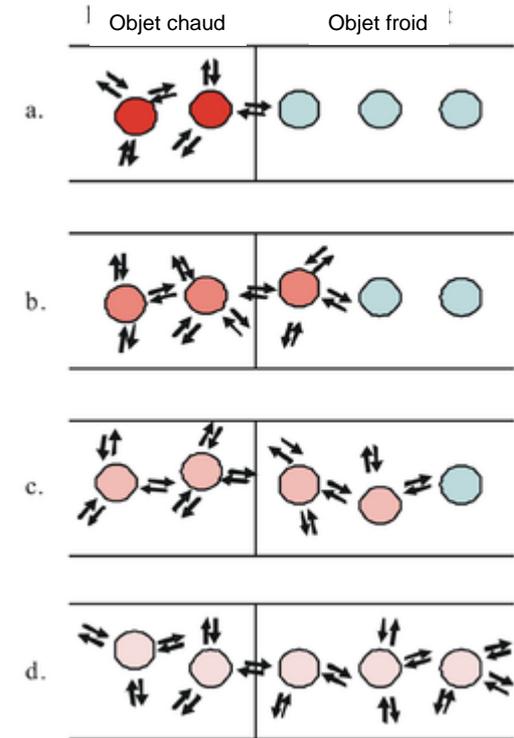
Quand le volume de la parcelle d'air augmente elle perd de l'énergie; quand il diminue elle gagne de l'énergie

Notion de chaleur sensible, Q_H

La chaleur sensible (celle qu'on sent) est un transfert d'énergie cinétique microscopique entre molécules. Le transfert de chaleur sensible se fait spontanément d'un milieu à température plus élevée à celui de plus basse température.

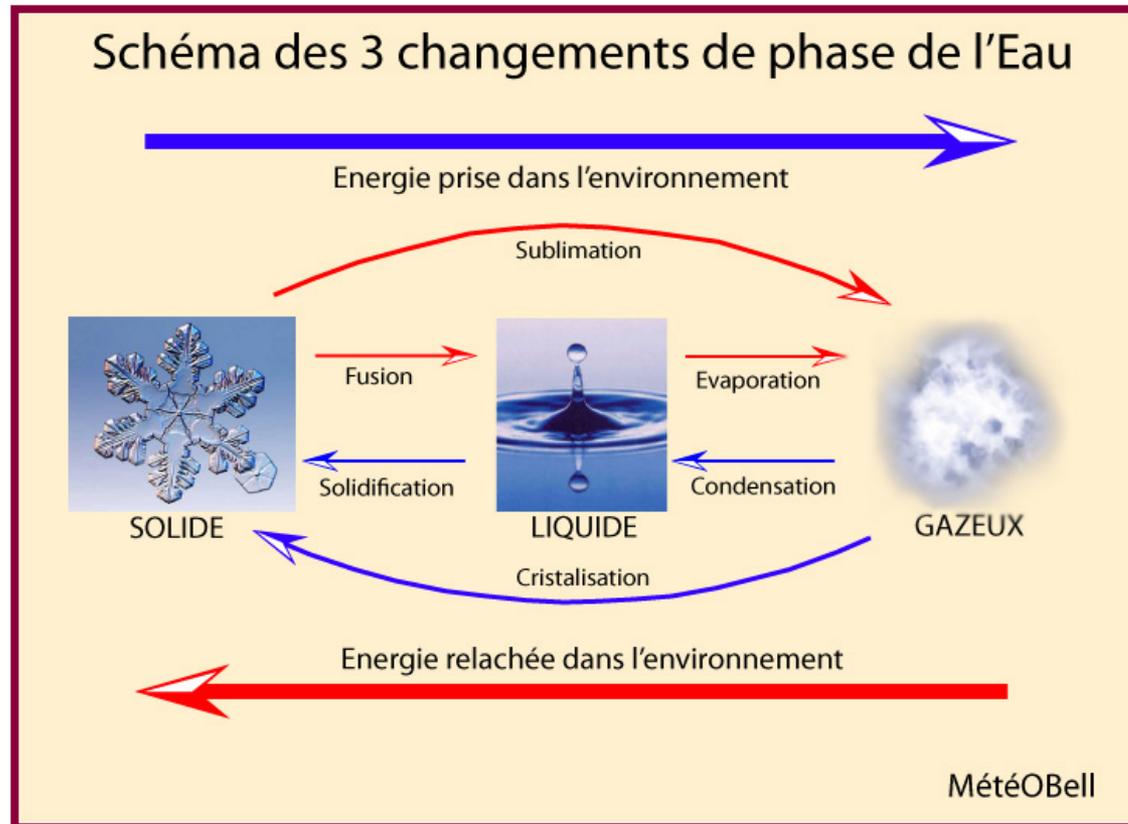


Source : <http://csapstaff.ednet.ns.ca/>



Notion de chaleur latente, Q_L

La chaleur latente, Q_L , est l'énergie échangée pendant les changements de phase. Elle correspond à une variation de l'énergie potentielle microscopique.



Chaleur latente, Q_L

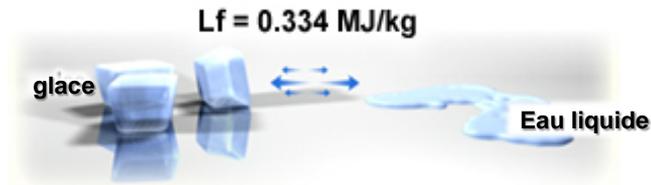
Quand les particules d'air contiennent de la vapeur d'eau ou de l'eau condensée, il est possible que les changements d'état de l'eau changent la température de la particule même sans aucun échange de chaleur avec l'environnement.

La quantité de chaleur par unité de masse échangée pendant un changement d'état est la **chaleur latente spécifique** associée à ce changement d'état :

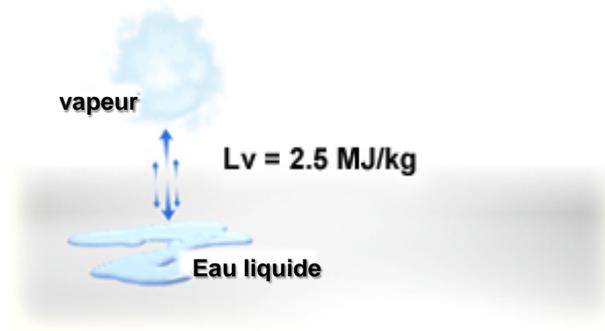
$$\frac{dQ_L}{dm} \equiv l$$

Les chaleurs latentes de l'eau

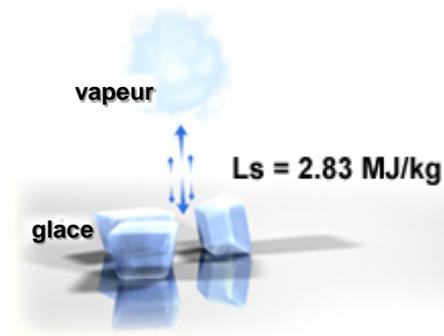
Échanges de chaleur latente associés aux phases de l'eau



$$l_f = \pm 3,34 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1} \equiv L_f \text{ (fonte ou solidification)}$$



$$l_v = \pm 2,50 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1} \equiv L_v \text{ (vaporisation ou condensation)}$$



$$l_s = \pm 2,83 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1} \equiv L_s \text{ (sublimation ou déposition)}$$

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$$

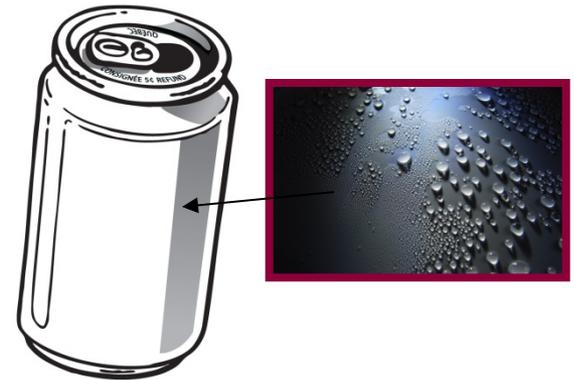
Chaleur latente, Q_L : exemple 1

Quelle masse de vapeur d'eau doit se condenser à la surface de votre cannette de liqueur pour que la température du liqueur passe de 1°C à 16°C ? Négligez la capacité calorifique du contenant métallique. La densité du liqueur est égale à celle de l'eau liquide $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ et sa chaleur spécifique est $c_{pl} = 4200 \text{ J K}^{-1}\text{kg}^{-1}$. Le volume de la cannette est égal à 354 ml. $1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$.
 $l_v = 2,5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$

Données : $\rho_l = \rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$; $\Delta T = 15^\circ\text{C}$; $c_{pl} = 4200 \text{ J K}^{-1}\text{kg}^{-1}$; $V_l = 354 \text{ ml}$
 $l_v = 2,5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$.

À trouver : $V_{\text{eau condensée}} = ? \text{ l}$

Raisonnement : la chaleur latente dégagée par la condensation de la vapeur sur les surfaces de la cannette est reçue par les système (la canette + la liqueur) et provoque le changement de température.



Chaleur latente, Q_L : exemple 1 (suite)

Raisonnement : la chaleur latente dégagée par la condensation de la vapeur sur les surfaces de la cannette est reçue par le système (la liqueur) et provoque le changement de température. La masse d'eau condensée est égale à la diminution de la masse de la vapeur d'eau dans l'air.

La quantité de chaleur nécessaire au changement de la température est :

$$Q_H = m_l c_{pl} \Delta T = -Q_{Lv};$$

$$m_l = \rho_l \cdot V_l$$

Cette chaleur provient de la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air: la masse de vapeur dans l'air diminue de $\Delta m_v = m_{vf} - m_{vi} = -m_{\text{eau-condensée}}$.

Par définition de chaleur latente de vaporisation :

$$\frac{dQ_{Lv}}{dm_v} \equiv l_v \Rightarrow \int_{Q_{Lv}=0}^{Q_{Lv}} dQ_{Lv} = \int_{m_{vi}}^{m_{vf}} l_v \cdot dm_v$$

$$Q_{Lv} = l_v \cdot (m_{vf} - m_{vi}) = -l_v \cdot m_{\text{eau-condensée}}$$

$$Q_H = m c_{pl} \Delta T = -Q_{Lv} = m_{\text{eau-condensée}} l_v = \rho_{\text{eau}} V_{\text{eau-condensée}} l_v$$

$$m c_{pl} \Delta T = \rho_{\text{eau}} V_{\text{eau-condensée}} l_v$$

Chaleur latente, Q_L : exemple 1 (suite)

Solution symbolique

$$V_{\text{eau-condensé}} = \frac{m \cdot c_{pl} \cdot \Delta T}{\rho_{\text{eau}} \cdot l_v} = \frac{\rho_l \cdot V \cdot c_{pl} \cdot \Delta T}{\rho_{\text{eau}} \cdot l_v}$$

Cohérence dimensionnelle

$$V_{\text{eau-condensé}} = \frac{\rho_l \cdot V \cdot c_{pl} \cdot \Delta T}{\rho_{\text{eau}} \cdot l_v}$$

$$(m^3) = \frac{(\cancel{kg} m^{-3})(m^3)(\cancel{J} \cancel{kg}^{-1} K^{-1})(K)}{(\cancel{kg} m^{-3})(\cancel{J} \cancel{kg}^{-1})}$$

OK

Conversion des unités à un ensemble d'unités cohérent (SI) :

$$\rho_l = \rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}; \Delta T = 15 \text{ K}; c_{pl} = 4200 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1};$$

$$V_l = 354 \text{ ml} = 354(\text{ml})10^{-6}(\text{m}^3 \text{ ml}^{-1}) = 0,000354 \text{ m}^3;$$

$$l_v = + 2,5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$$

Chaleur latente, Q_L : exemple 1 (suite)

Solution numérique (AN)

$$V_{\text{eau-condensé}} = \frac{\rho_l \cdot V \cdot c_{pl} \cdot \Delta T}{\rho_{\text{eau}} \cdot l_v} = \frac{(10^3)(0,354)(4200)(15)}{(10^3)(2,5 \times 10^6)} = 0,000009 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{eau-condensé}} = 9 \text{ ml}$$

Validation : Unités? Physique ?

Discussion : L'énergie dégagée pendant la condensation est si importante qu'il suffit de condenser un volume d'eau liquide de 9 ml pour provoquer un réchauffement (maximale) de 15 °C. Pour maintenir votre liqueur froide il est important d'isoler votre contenant...

La déposition de rosée sur les surfaces terrestres est un transfert important de chaleur de l'air vers la surface. On appelle ce transfert le flux de chaleur latente...

Pourquoi on utilise des glaçons pour rafraîchir l'eau (ou autre boisson...)?



http://abc.free.fr/experiences_fichiers/ice.htm



$C_{\text{granite}} = 800 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Masse d'un cube : 24 g



Aurait-on le même refroidissement si on utilisait des roches de granite à -20°C ?



La publicité nous invite à utiliser des roches au lieu des glaçons pour éviter la dilution des boisson qu'on veut refroidir. Avez-vous une meilleur solution?

Chaleur latente, Q_L : exemple 2

Quelle quantité de chaleur est dégagée pendant la condensation de 2 kg de vapeur d'eau?

Données : $m_{\text{vapeur-eau}} = 2 \text{ kg}$; $l_v = + 2,5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

À trouver : $Q_{L(\text{dégagée})} = ? \text{ J}$

Raisonnement et solution symbolique : Pendant un changement d'état, les échanges de chaleur entre le système et l'environnement dépendent de la masse qui change d'état et de la chaleur latente de la transformation de phase. La quantité de chaleur dégagée est égale et de signe contraire à la chaleur de vaporisation :

$$Q_{L(\text{dégagée})} = -Q_L = -(m_{vf} - m_{vi}) \cdot l_v = m_{\text{eau-condensée}} \cdot l_v$$

Cohérence dimensionnelle

$$Q_{L(\text{dégagée})} = m_{\text{eau-condensée}} \cdot l_v$$

$$(J) = (kg)(J \cdot kg^{-1})$$

OK

Chaleur latente, Q_L : exemple 2

Quelle quantité de chaleur est dégagée pendant la condensation de 2 kg de vapeur d'eau?

Conversion des unités à un ensemble d'unités cohérent (SI) : OK

Solution numérique (AN)

$$Q_{L(\text{dégagée})} = m_{\text{eau-condensée}} \cdot l_v$$

$$Q_{L(\text{dégagée})} = (2) (2,5 \times 10^6)$$

$$Q_{L(\text{dégagée})} = 5 \times 10^6 \text{ J} = 5 \text{ MJ}$$

Discussion : Un orage moyen (20 km² x 5 km) a un volume de 5.10¹¹ m³. Dans chaque m³ d'air on trouve approximativement 10 g de vapeur d'eau dont 0,4 g se transforment en eau liquide en 1 h. Au total il y a condensation de 2.10⁸ kg d'eau dans ce nuage en une heure. La puissance d'énergie dégagée sera de 5.10⁸ MJ /60 s = 8,3.10⁶ MW.

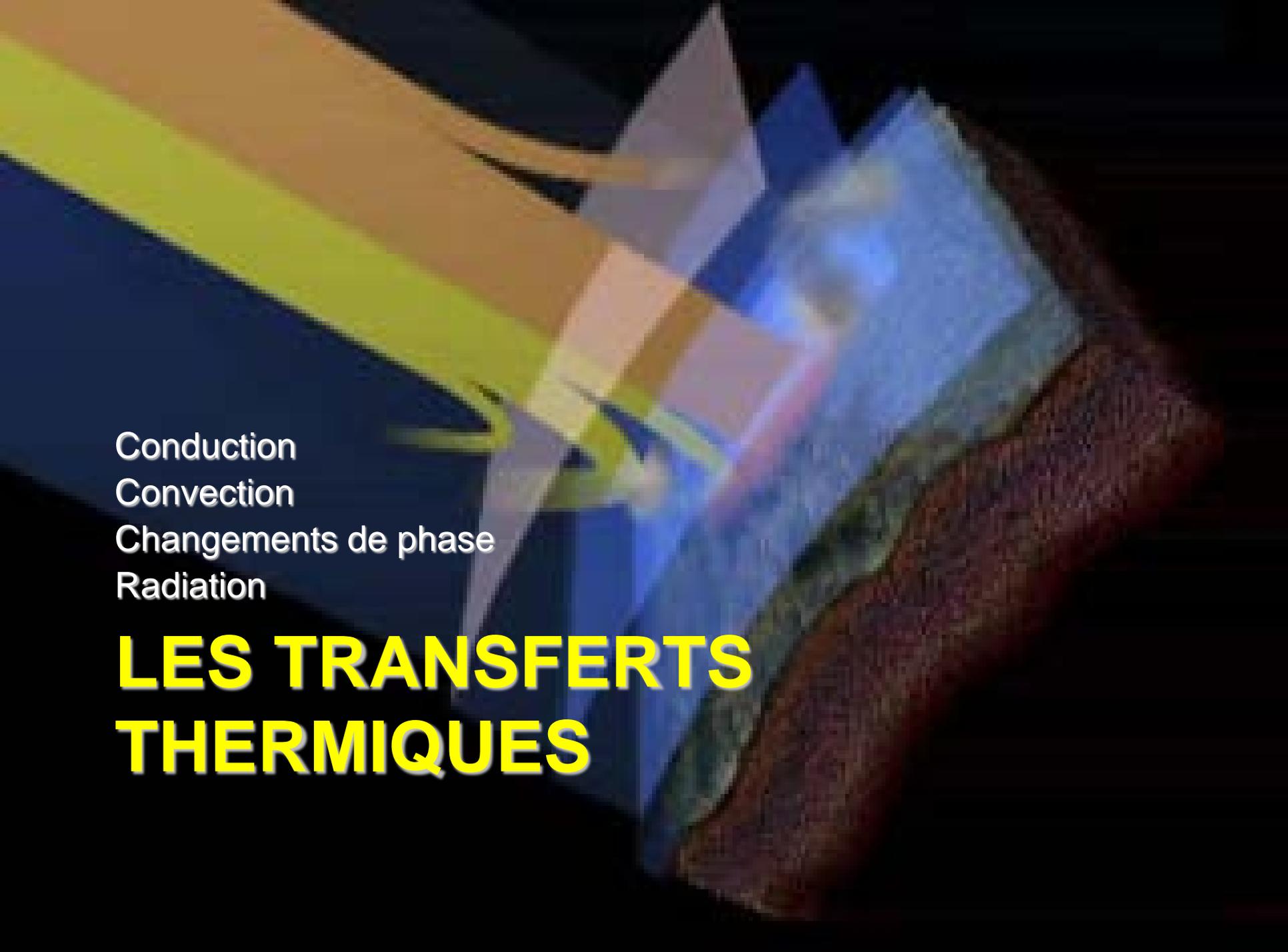
Comparons cette valeur à la production électrique moyenne d'Hydro-Québec qui est d'approximativement de 5.10⁴ MW. Le taux de dégagement d'énergie pendant un orage est 166 fois supérieur à la puissance produite par HQ. Imaginez maintenant quelle énergie serait dégagée pendant un ouragan...

Exercice d'application

Dans un ouragan l'eau change de phase continuellement. Dans un orage aussi. Quand l'eau liquide (pluie) ou solide (neige) traverse des couches d'air sous-saturées on observe de l'évaporation ou de la sublimation...

Dans l'atmosphère de l'énergie est alors dégagée ou absorbée à chaque instant à cause des changements de phase.

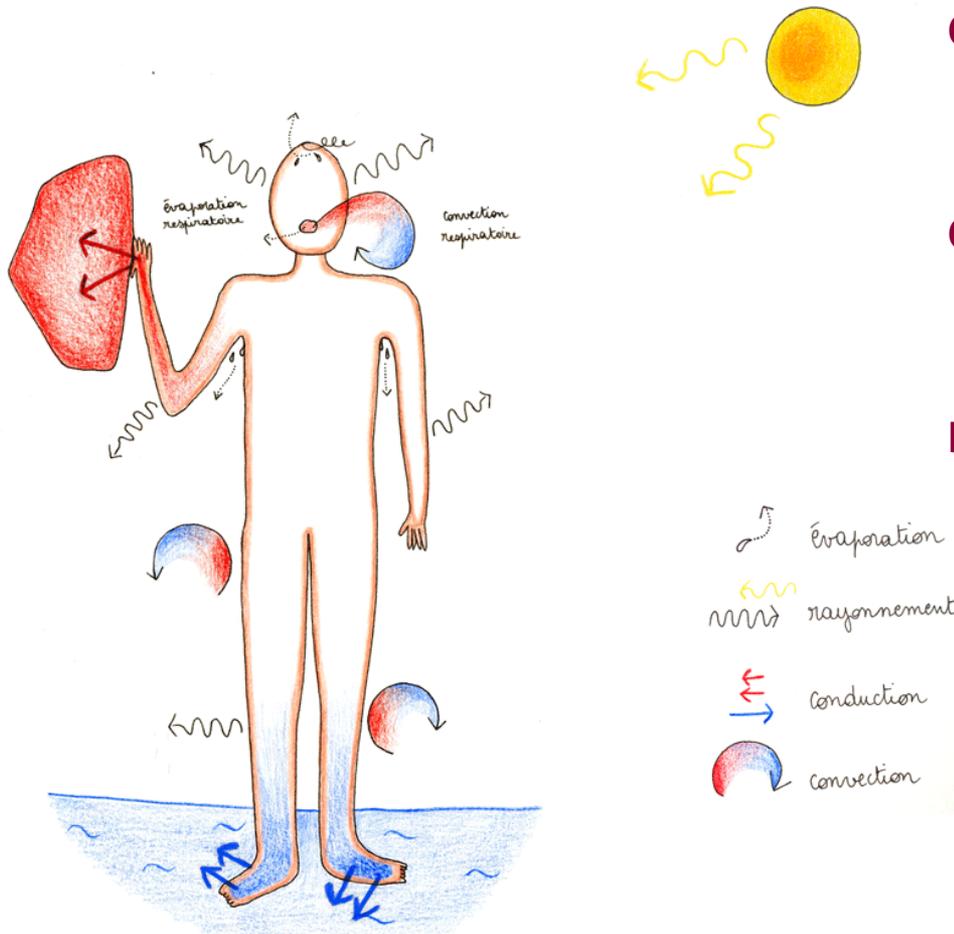
- a. Si, dans un ouragan, la vapeur d'eau se condense à un taux de 100 grammes par seconde, quelle quantité d'énergie est libérée dans l'atmosphère au cours de 24 heures?**
- b. Si l'eau liquide ainsi formée se solidifie de combien augmente la quantité d'énergie libérée dans l'atmosphère?**
- c. Si les particules de glace précipitent dans l'air sous-saturé par rapport à la glace, quelle sera le refroidissement, par unité de masse d'air, à cause de la sublimation en sachant que le rapport de mélange des particules de glace est 0.8 g/kg.**

The background features a dark, almost black, field with several overlapping, semi-transparent geometric shapes. On the left, there are diagonal bands of light green and tan. In the center and right, there are various shades of blue and purple. A large, textured brown shape, resembling a piece of fabric or a rock, is positioned in the lower right quadrant.

Conduction
Convection
Changements de phase
Radiation

LES TRANSFERTS THERMIQUES

Transferts thermiques



Conduction : transfert d'énergie dans la matière par agitation moléculaire.

Convection : transfert d'énergie par le mouvement de la matière et agitation moléculaire.

Changements de phase : libération / absorption d'énergie pendant les changements d'état

Radiation : transfert direct d'énergie par propagation d'ondes électromagnétiques.

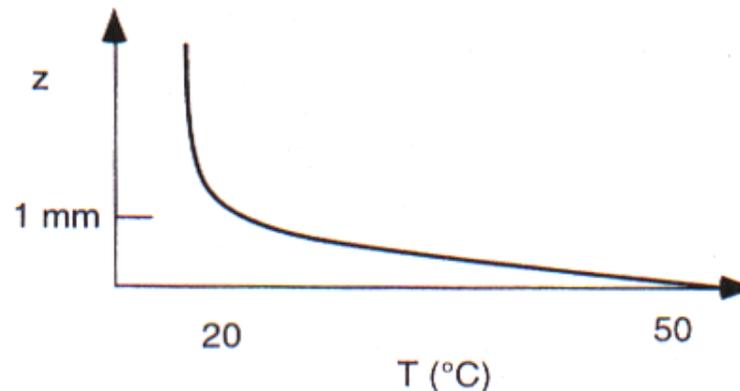
Conduction thermique

Le transfert de chaleur entre l'atmosphère et la surface, dans les premiers millimètres de l'atmosphère est fait par conduction moléculaire et est proportionnelle à la différence de température et l'air proche de la surface :

$$F_{conduction} = -k_{air} \frac{dT}{dz}$$

où k_{air} est la conductivité moléculaire de l'air ($k_{air} = 0,0253 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

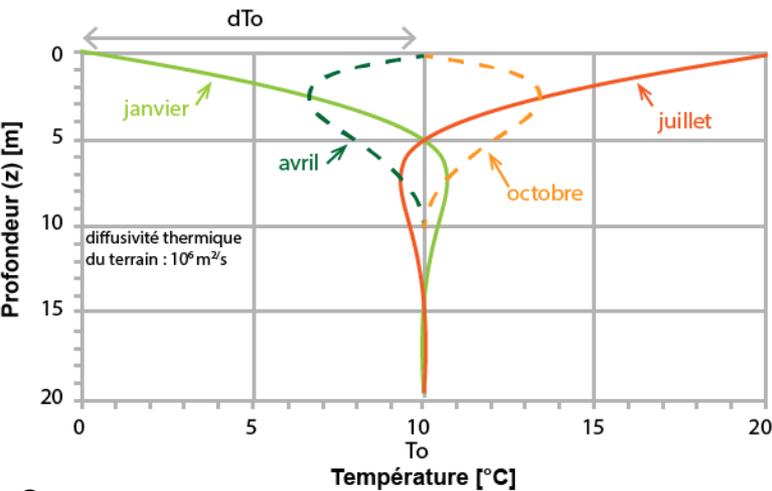
À titre de comparaison : la conductivité de l'eau est de $0,6 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ et celle de la glace $2,2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.



Proche de la surface : les grands gradients de température proche de la surface supportent un transfert de chaleur par conduction. Au-delà de 1 mm les gradients de température sont trop faibles pour permettre ce type de transfert.

Conduction de chaleur vers le sol

La conduction moléculaire est aussi responsable du transfert de chaleur de la surface vers le sol.



Source :

<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18283>

$$F_{\text{conduction}} = -k_{\text{sol}} \frac{dT}{dz}$$

Heat Conductivity* of Various Substances

SUBSTANCE	HEAT CONDUCTIVITY (Watts† per meter per °C)
Still air	0.023 (at 20°C)
Wood	0.08
Dry soil	0.25
Water	0.60 (at 20°C)
Snow	0.63
Wet soil	2.1
Ice	2.1
Sandstone	2.6
Granite	2.7
Iron	80
Silver	427

*Heat (thermal) conductivity describes a substance's ability to conduct heat as a consequence of molecular motion.
 †A watt (W) is a unit of power where one watt equals one joule (J) per second (J/s). One joule equals 0.24 calories.

Convection

La **convection** est un mode de transfert d'énergie qui implique un déplacement de matière dans le milieu, par opposition à la conduction thermique.

Ce mode de transfert est possible dans les fluides : liquides et gaz.

Le transfert thermique par convection est plus efficace que le transfert par conduction thermique ou par **transfert radiatif**.

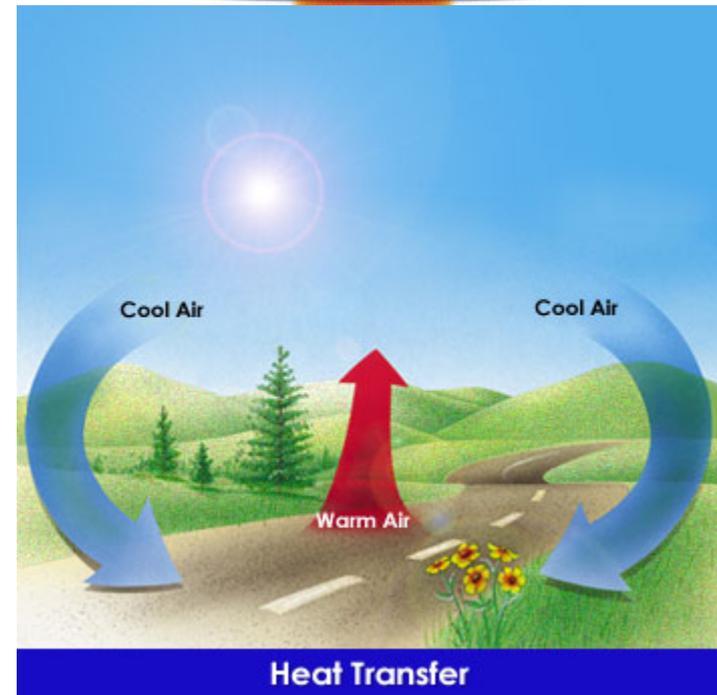
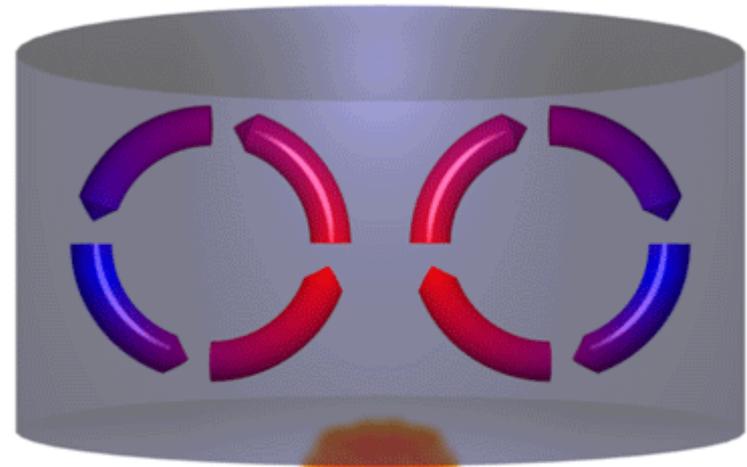
Selon l'origine du mouvement la convection peut être :

- Convection naturelle ou d'instabilité
- Convection forcée

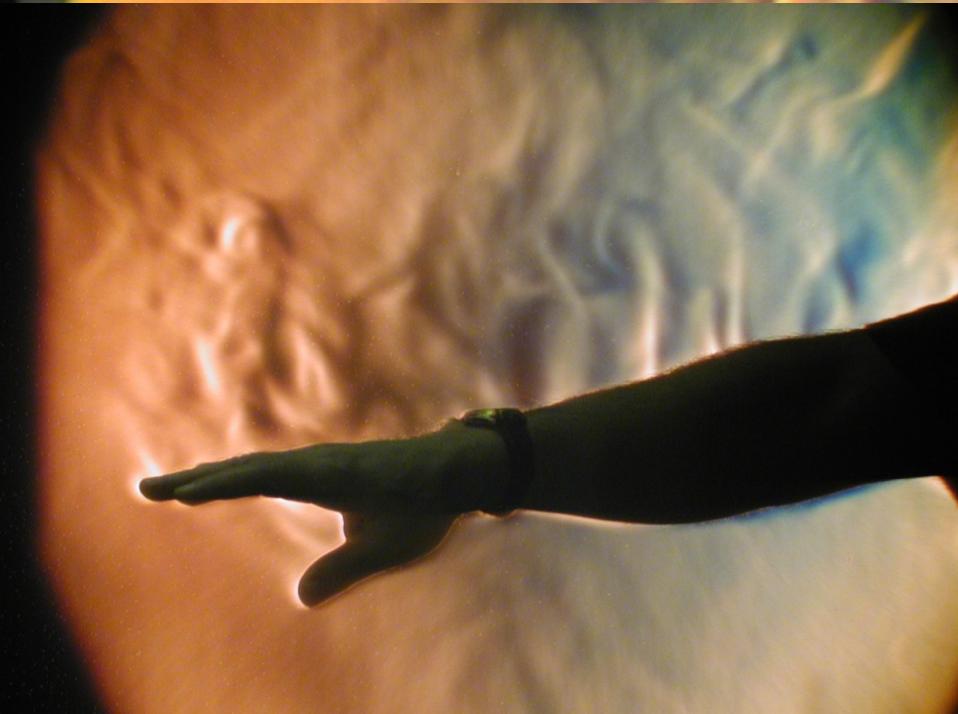
Convection due à l'instabilité (convection libre)

Ce phénomène physique très commun se produit dans de nombreux systèmes (casserole, atmosphère, manteau terrestre, étoile, ...) sous des formes diverses.

La convection est un phénomène fréquent dans l'atmosphère terrestre. Elle peut être déclenchée par un réchauffement du sol par le soleil, par le mouvement d'une masse d'air froid au-dessus d'un plan d'eau relativement chaude, ou par d'autres phénomènes qui provoquent le réchauffement relatif du bas d'une couche atmosphérique par rapport à son sommet.



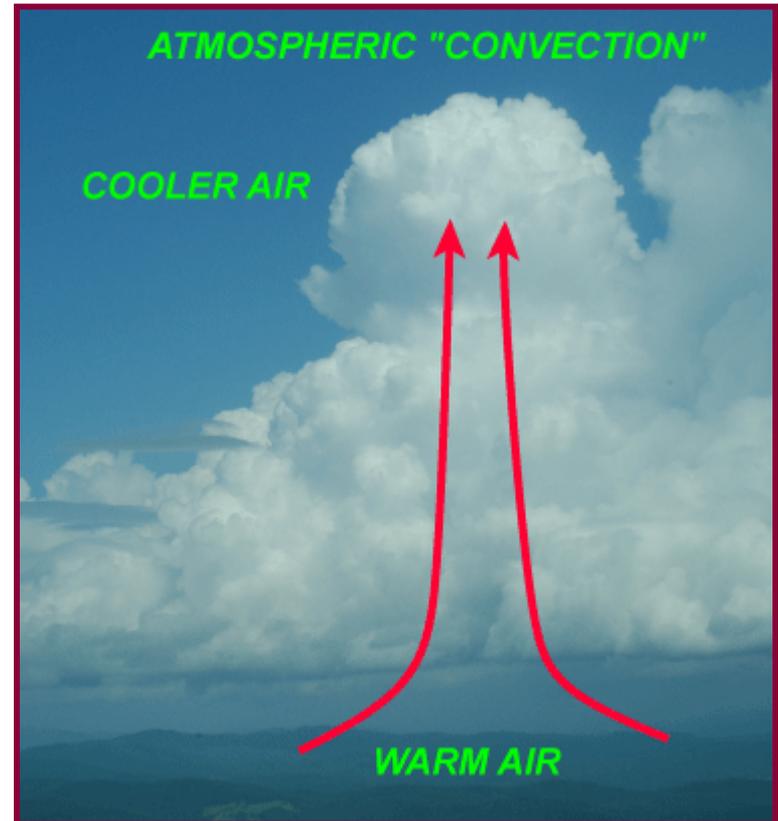
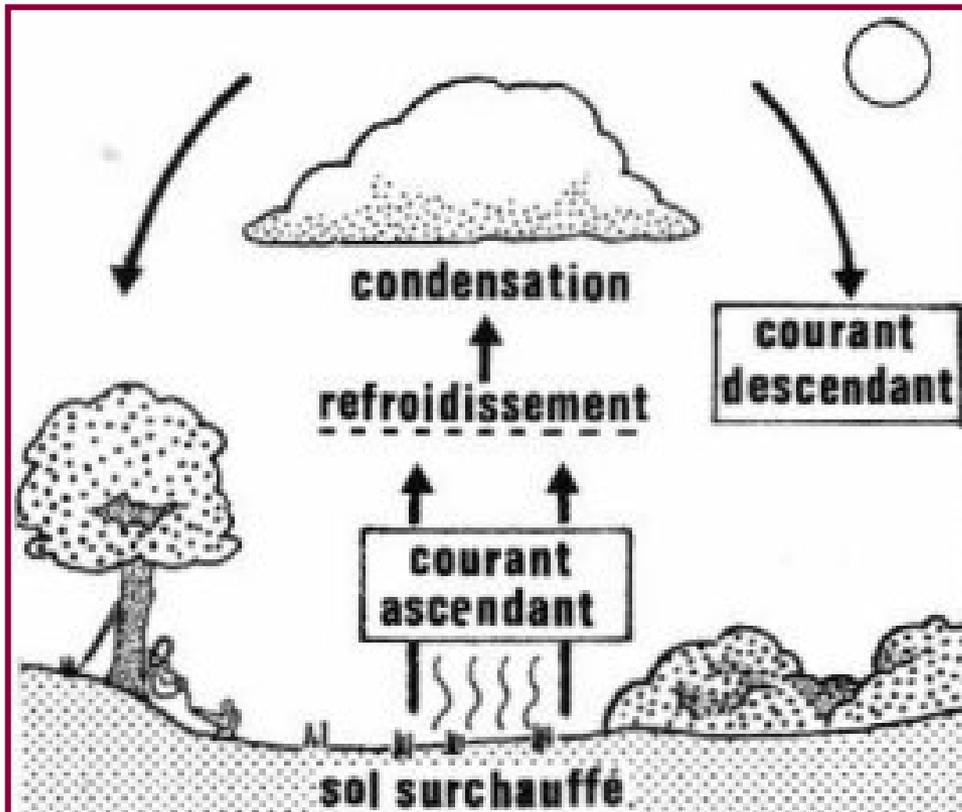
Convection libre



Photographie schlieren. Photographie des mouvements de l'air
Source : A World of Weather

Convection avec nuages

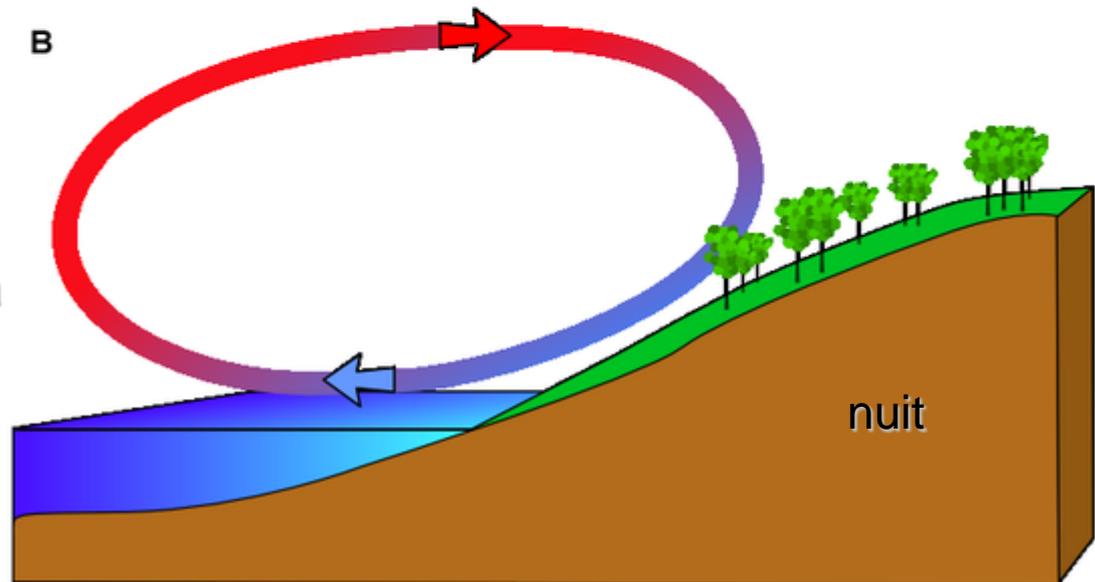
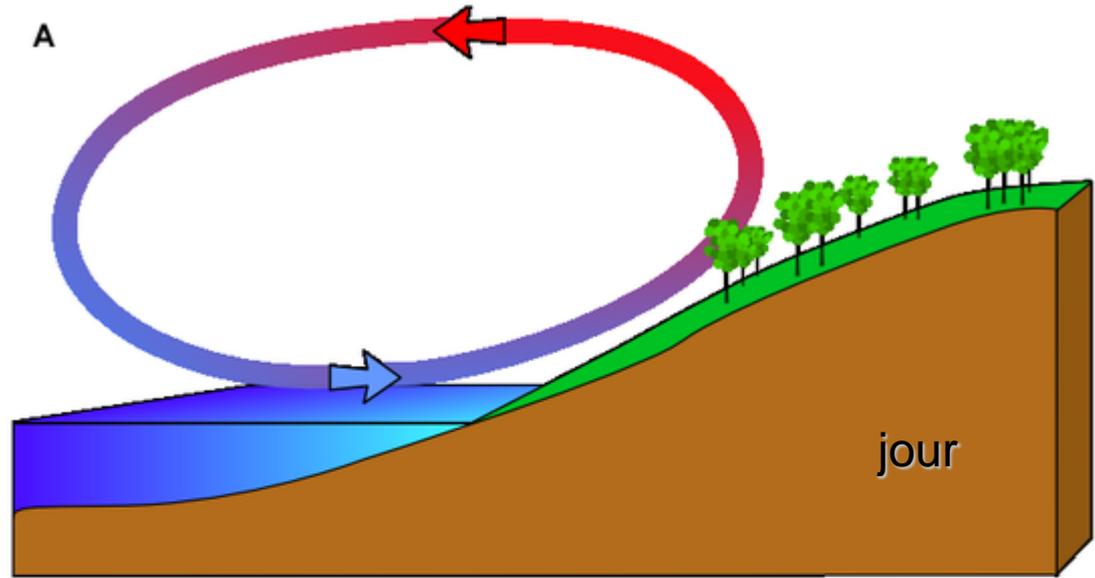
On donne à la classe des nuages d'origine convective le nom générique de **cumulus**. Chacun de ces nuages est appelé aussi **cellule convective** ou **cellule thermique**.



Convection sans condensation

La **brise de mer** est un exemple typique de cellule convective en air clair. L'air se réchauffe plus rapidement sur terre que sur l'eau et une circulation thermique se développe durant la journée.

La **brise de terre** est encore une circulation thermique, mais en sens contraire...



*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

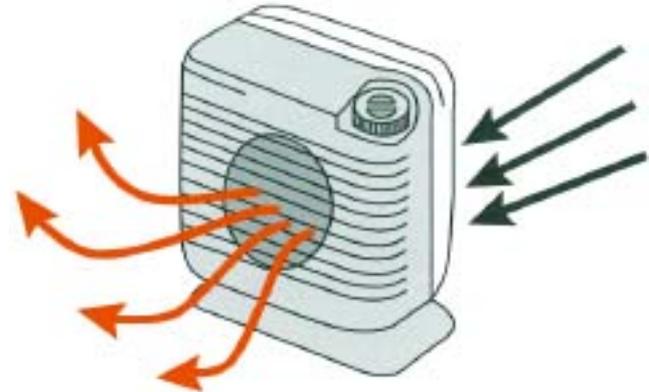
La différence des chaleurs spécifiques entre la terre et l'eau liquide est un des facteurs à l'origine des brises de terre et de mer.

La convection forcée

La convection forcée est provoquée par une circulation forcée d'un fluide. Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle.

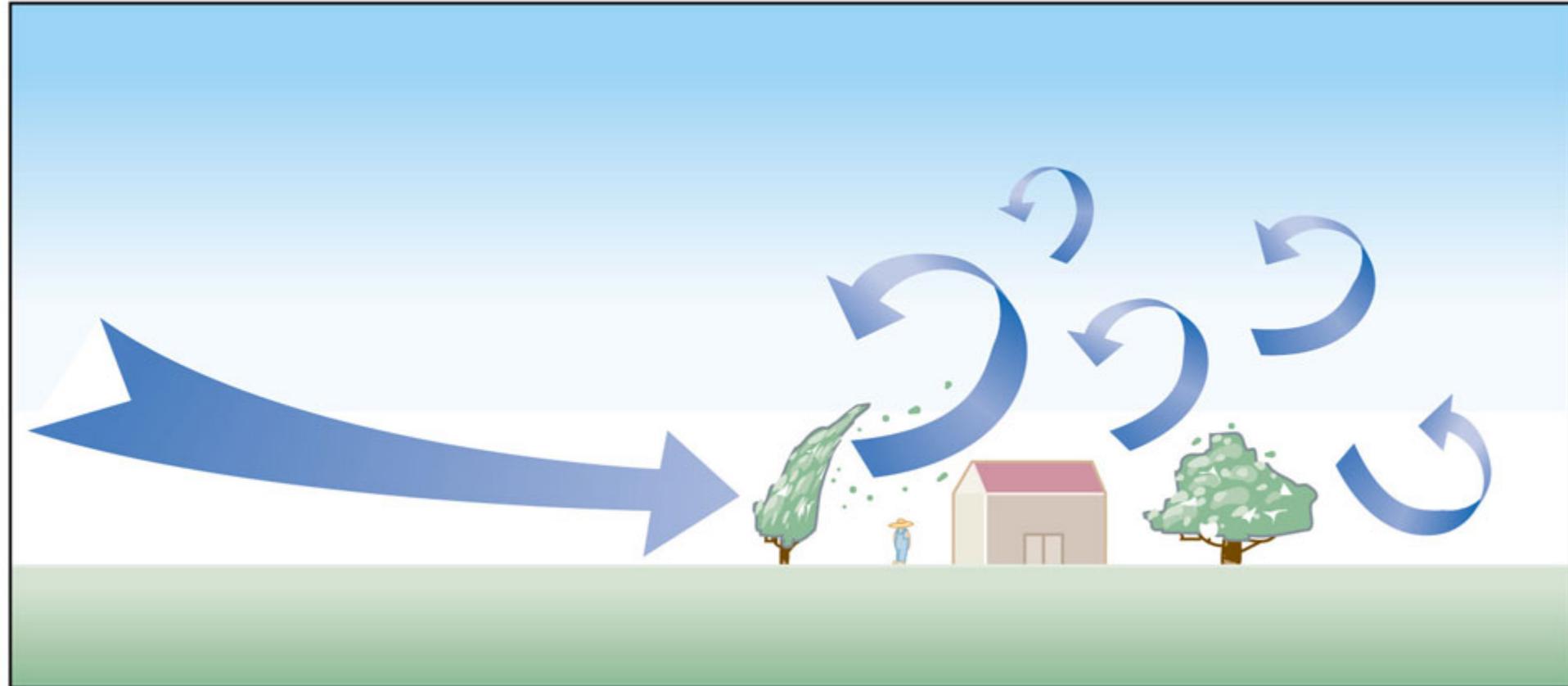
Quelques exemples de convection forcée dans des appareillages :

- chauffage central avec accélérateur,
- chauffages électriques avec soufflerie,
- chauffe-eau solaire
- four à convection de cuisinière.



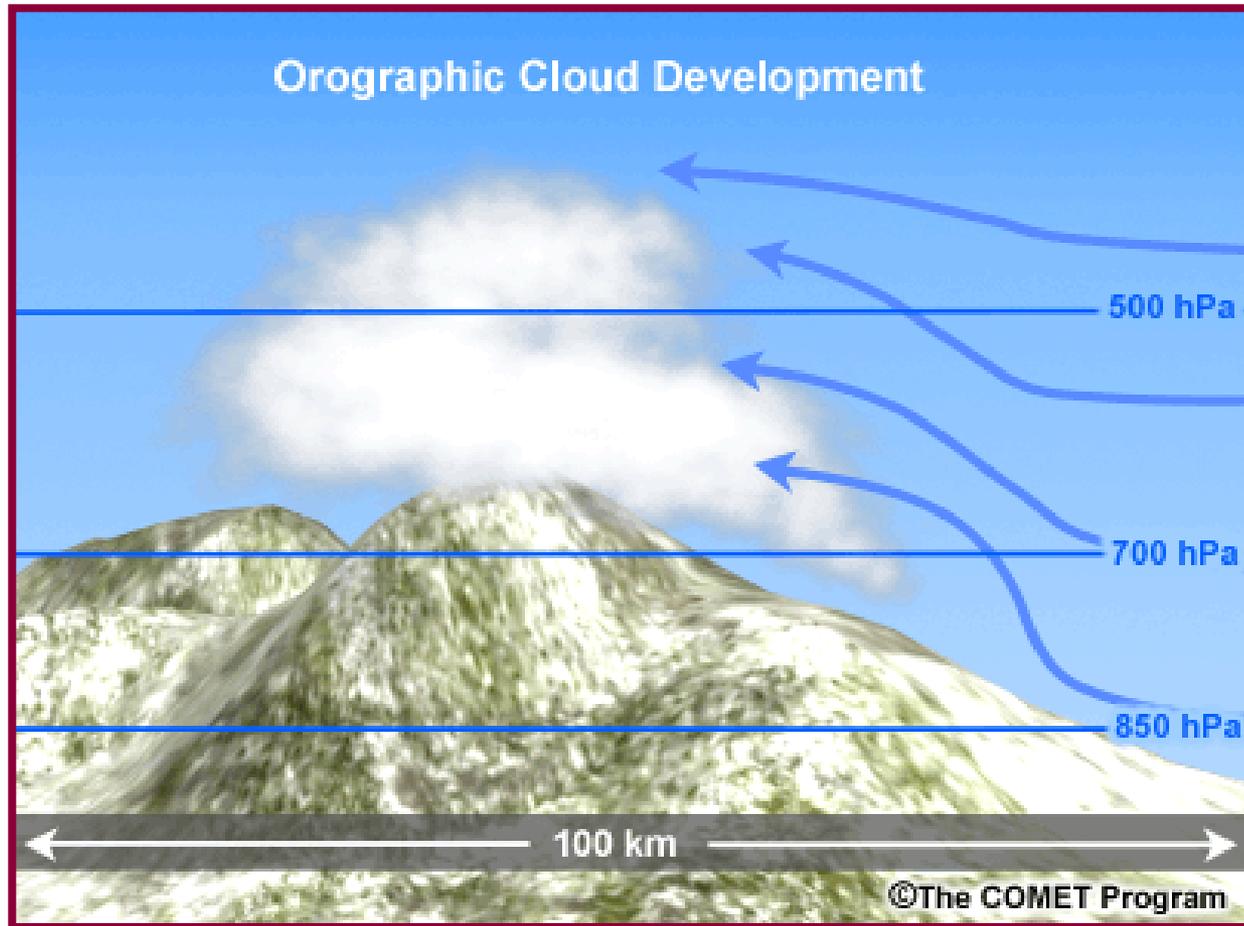
Le corps humain a son propre système de convection forcée : la circulation sanguine.

La convection forcée dans l'atmosphère



La turbulence provoquée par les obstacles est de la convection forcée

La convection forcée dans l'atmosphère

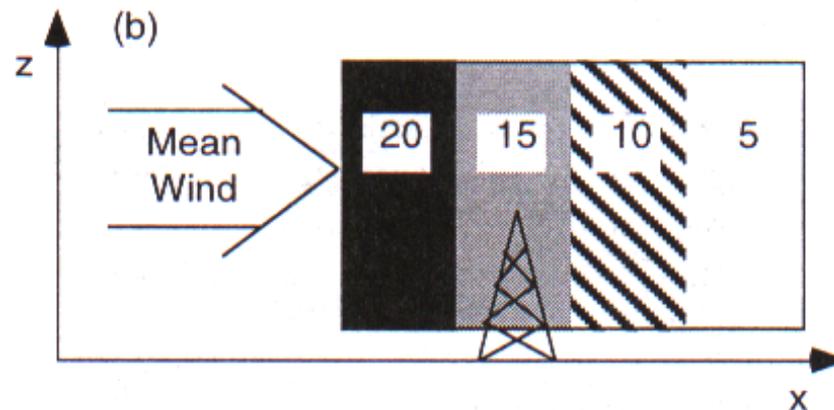
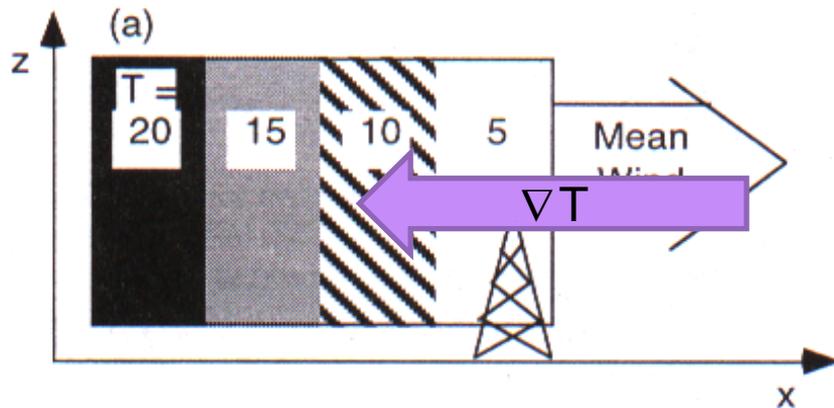


Le soulèvement provoquée par l'orographie

Convection forcée : l'advection

Le transport d'énergie (thermique) par le déplacement moyen d'un fluide (air ou eau).

En météorologie l'advection est le fait du vent moyen (presque horizontale) et constitue souvent le mécanisme dominant, face à d'autres comme la conduction ou le rayonnement.

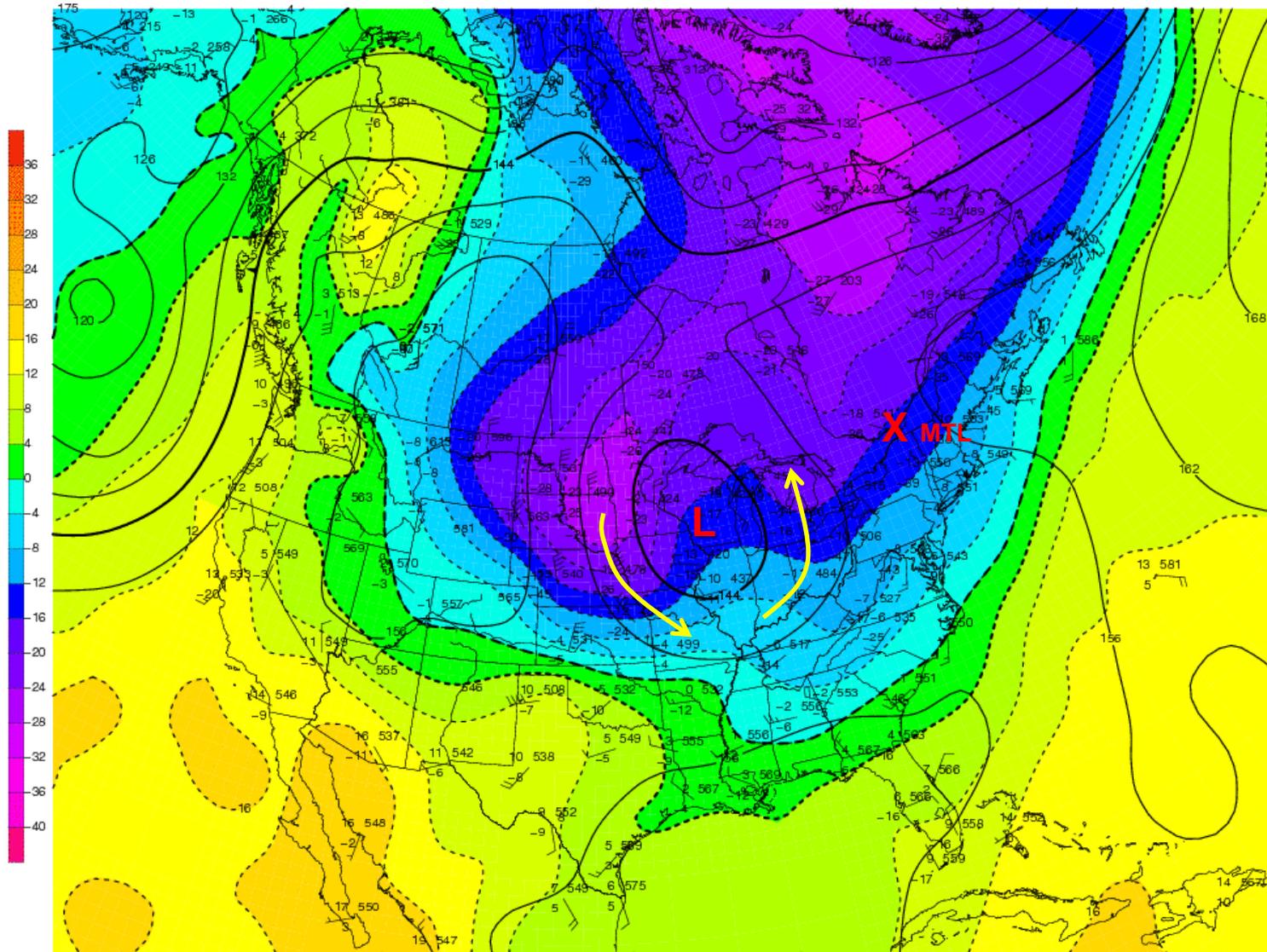


Convention météo :

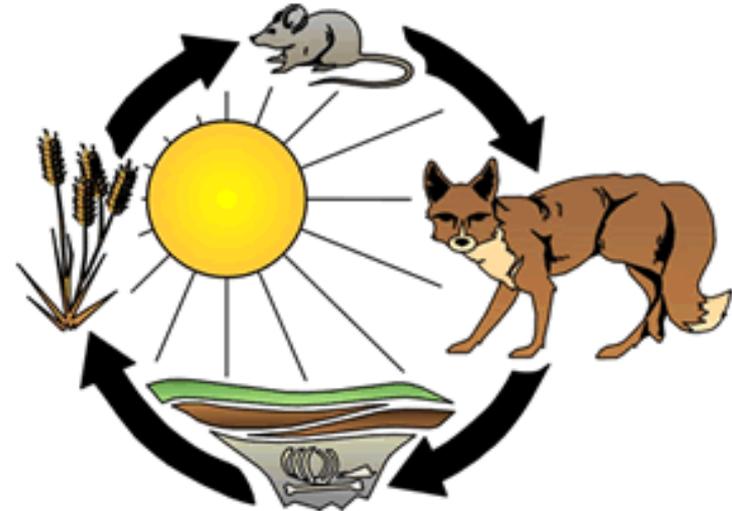
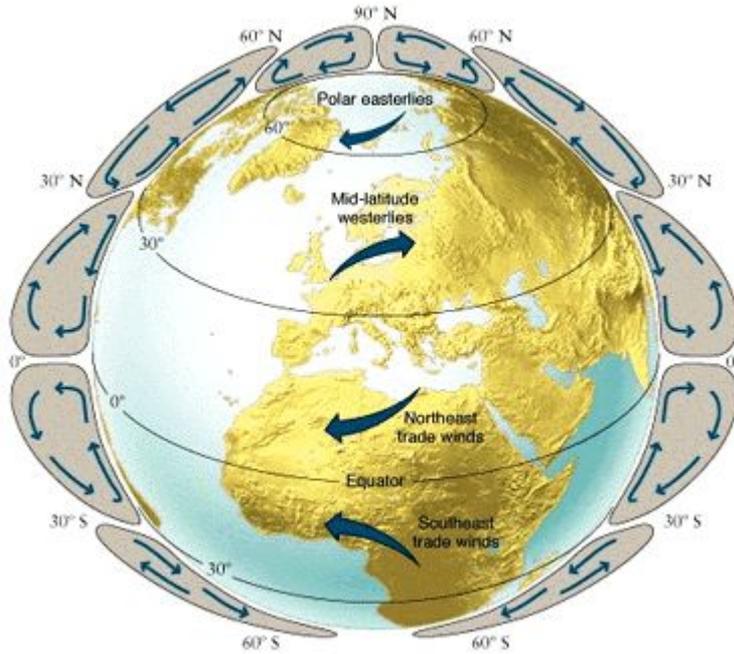
Convection : transport d'une quantité (chaleur, humidité, pollution, etc.) par le mouvement vertical de l'air

Advection : transport d'une quantité (chaleur, humidité, pollution, etc.) par le mouvement horizontal de l'air (par le vent)

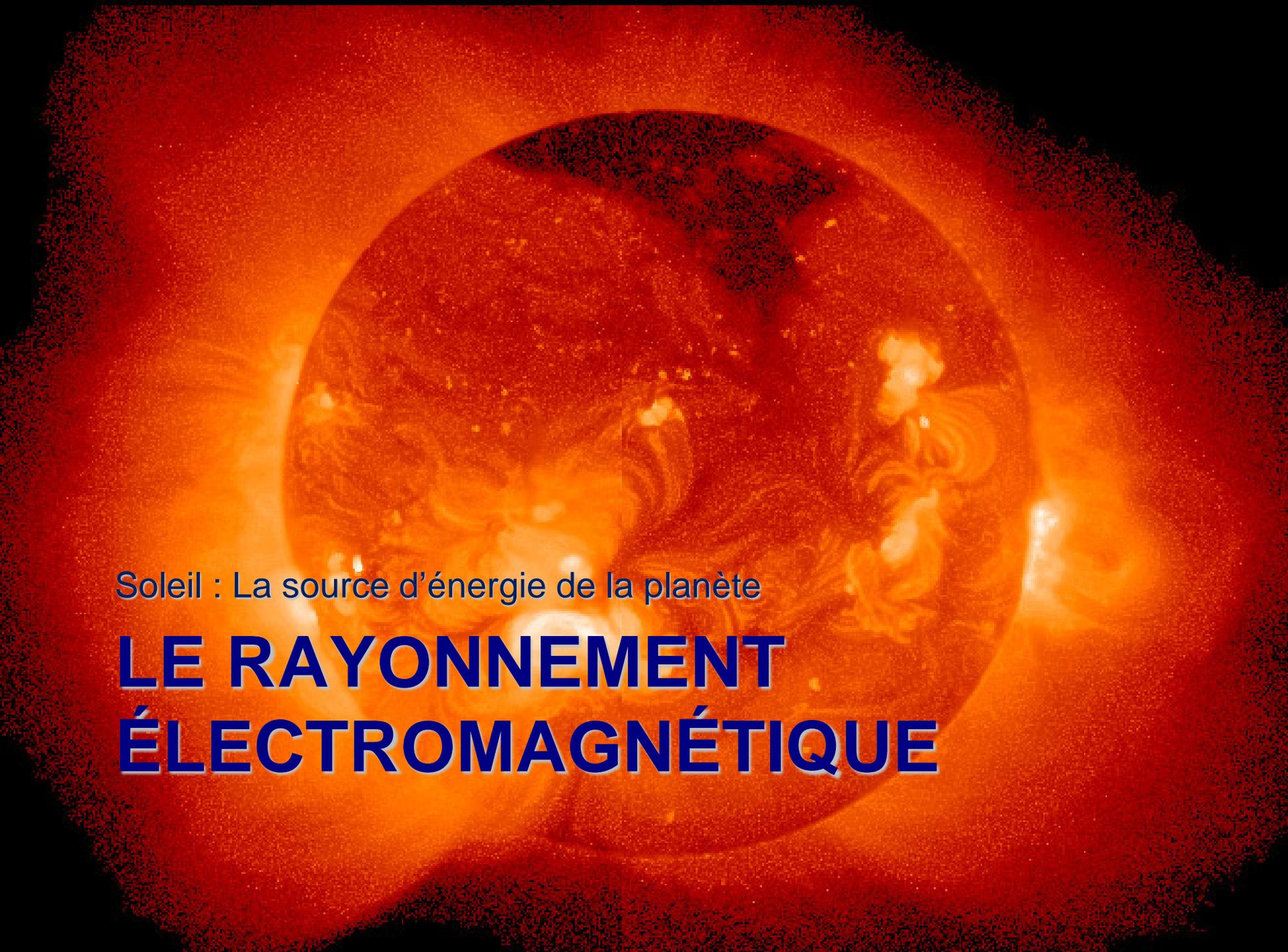
Advection d'air froid, advection d'air chaud



Quelle est la source d'énergie du système Terre?



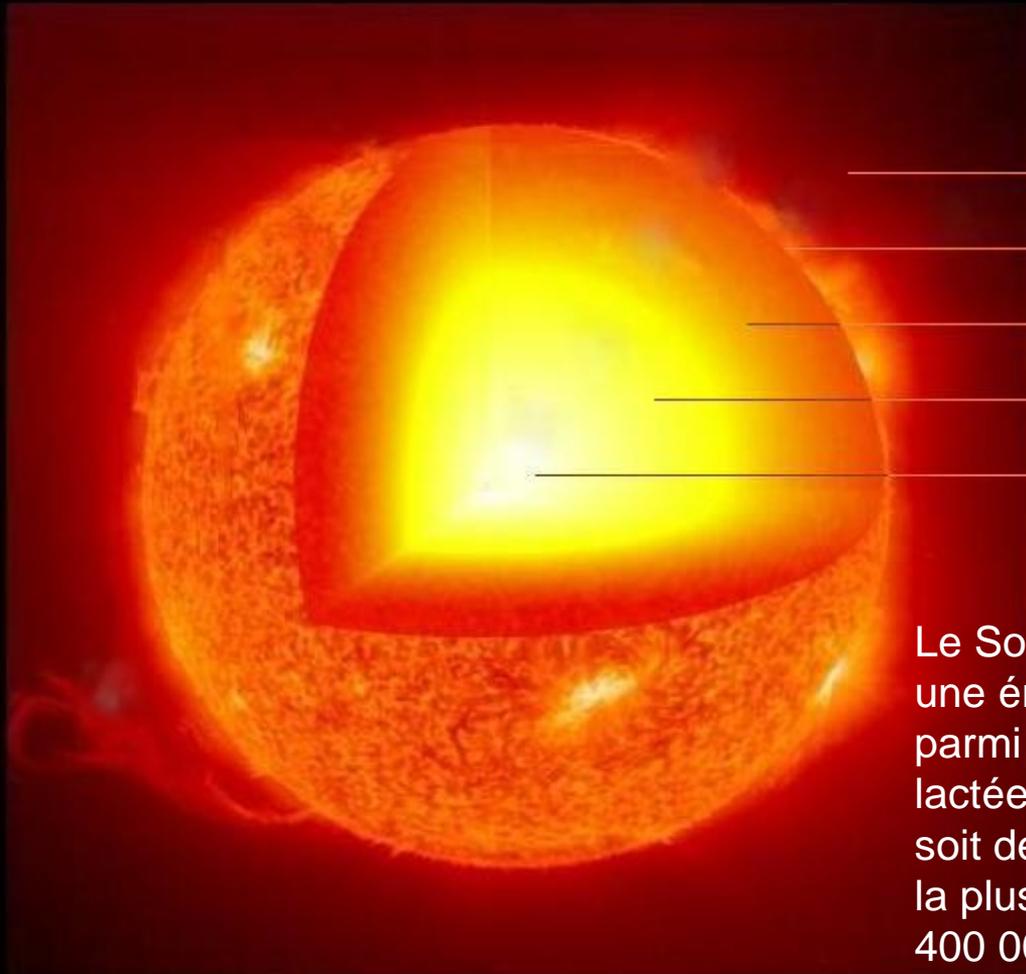
Le Soleil est la source d'énergie qui permet les mouvements atmosphériques et la vie sur notre planète.



Soleil : La source d'énergie de la planète

LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le Soleil : sa structure



Structure du Soleil en coupe

- Couronne solaire
- Photosphère
- Zone de convection
- Zone de radiation
- Cœur (ou noyau)

Le Soleil est une étoile de dimension moyenne, une énorme boule de gaz chaude. C'est une étoile parmi des milliards dans notre galaxie (la voie lactée). Bien que sa distance moyenne à la Terre soit de 149,6 millions de kilomètres, il reste l'étoile la plus proche de la Terre. Le Soleil mesure ~ 1 400 000 kilomètres de diamètre, 108 fois le diamètre de la Terre.

Le Soleil : source d'énergie terrestre

- La fusion de l'hydrogène dans les noyaux libère de l'énergie. Une partie de cette énergie, après avoir interagi avec les couches qui composent le Soleil, va être émise vers l'espace.
- La partie interceptée par la Terre interagit avec l'atmosphère terrestre et est la cause de nos différentes conditions climatiques. Notre planète tire donc toute son énergie d'une seule source: le Soleil.
- Le sol, les océans et l'atmosphère reçoivent de l'énergie du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique.
- La lumière que nous voyons est formée de ce rayonnement électromagnétique. Le rayonnement auquel nos yeux sont sensibles (rayonnement visible) ne représente qu'une petite portion du rayonnement que l'on reçoit du Soleil.

À combien se chiffre l'énergie solaire?

- **Énergie solaire interceptée par la Terre** : ~176 000 000 000 MW
- Représente 1/2 000 000 000 de l'énergie totale émise par le Soleil !!!

À titre de comparaison

- Hydro-Québec : 50 000 MW
- Énergie électrique sur Terre en 2005 : 961 000 MW
- Pleine Lune : ~1/60 000 de l'énergie solaire reçue par la Terre
- Étoiles : ~1/11 000 000 de l'énergie solaire reçue par la Terre

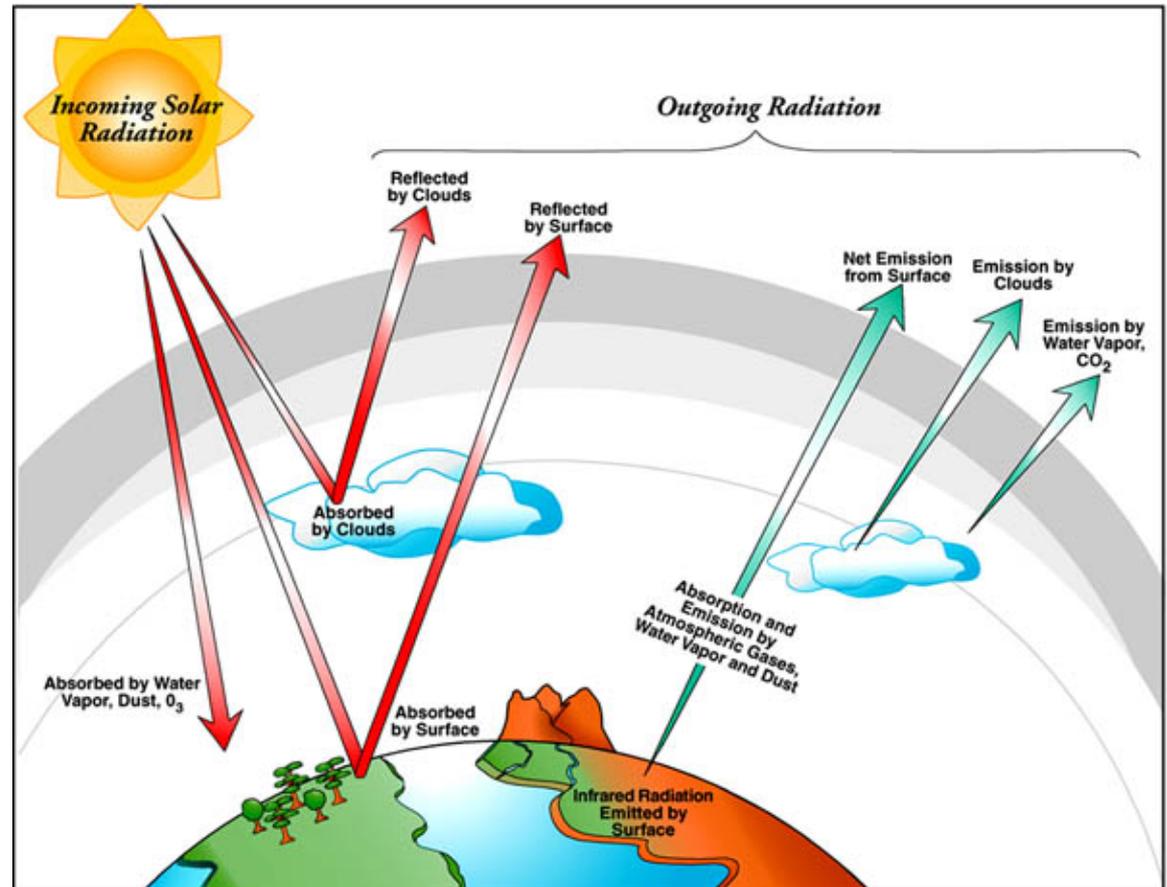
Mais comment l'énergie solaire est transportée à travers le vide sidéral?

Radiation

Définition : Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique (par exemple : infrarouge). Le transfert peut se réaliser dans le vide sans la présence de matière.

L'exemple caractéristique de ce type de transfert est le rayonnement du soleil dans l'espace.

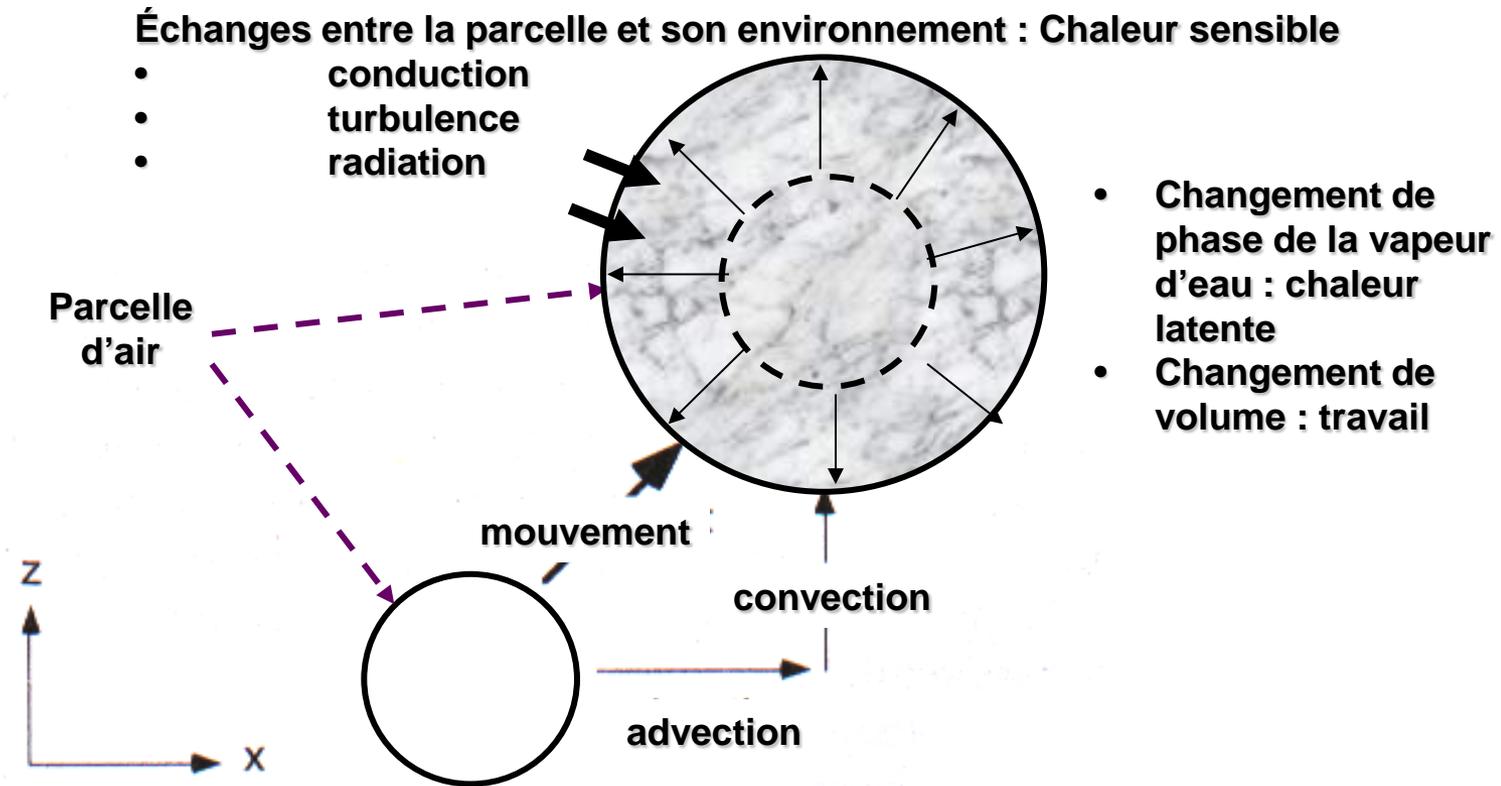
Exemples de transfert par rayonnement : le soleil et la Terre.



Les transferts radiatifs

- Pratiquement tous les échanges d'énergie entre la Terre et le reste de l'univers se produisent par transfert radiatif.
- L'énergie radiative du Soleil est quasiment la seule source d'énergie qui influence les mouvements atmosphériques et les divers processus qui ont lieu dans les couches atmosphériques et à la surface de la Terre.
- La Terre et son atmosphère absorbent continuellement du rayonnement solaire et émettent leur propre rayonnement vers l'espace.
- Sur **une longue période de temps**, les taux d'absorption et d'émission sont à peu près égaux; **le système Terre est donc "approximativement" en équilibre radiatif avec le Soleil.**

Résumé : Processus qui affectent la température d'une parcelle ou particule d'air



Resumé

- L'énergie solaire est absorbée par la planète terre et son atmosphère.
- Cette énergie est transformée en
 - Énergie interne
 - Énergie cinétique
 - Énergie potentielle
- Elle est alors redistribuée par
 - Advection
 - Conduction
 - Convection naturelle
 - Convection forcée
 - Radiation (une partie est perdue en forme de radiation émise vers l'espace)
- Une partie de la chaleur sensible est convertie en chaleur latente dans les changements de phase de l'eau.

Importance de la chaleur latente

- La conversion entre chaleur sensible et chaleur latente fournit l'énergie qui maintient les orages et les ouragans;
- Les orages stabilisent l'atmosphère. Le transport d'humidité par le vent est équivalent au transport d'énergie et affecte le bilan énergétique global;
- Le flux de chaleur latente (l'évaporation provoquée par l'énergie solaire) fourni l'humidité qui formera par condensation les nuages et la précipitation;
- Les flux de chaleur sensible et latente à la surface modifient la couche limite atmosphérique : ~ le premier kilomètre de l'atmosphère.