

Physique et Alpinisme

I. Les lois de la mécanique en escalade et alpinisme

- a) Mouvement, équilibre, friction et adhérence
- b) Coinceurs, « friends » et autres dispositifs
- c) Les cordes, les nœuds, assurage, rappel, la corde et les chutes
- d) Systèmes de secours, techniques de mouflage

II. La neige

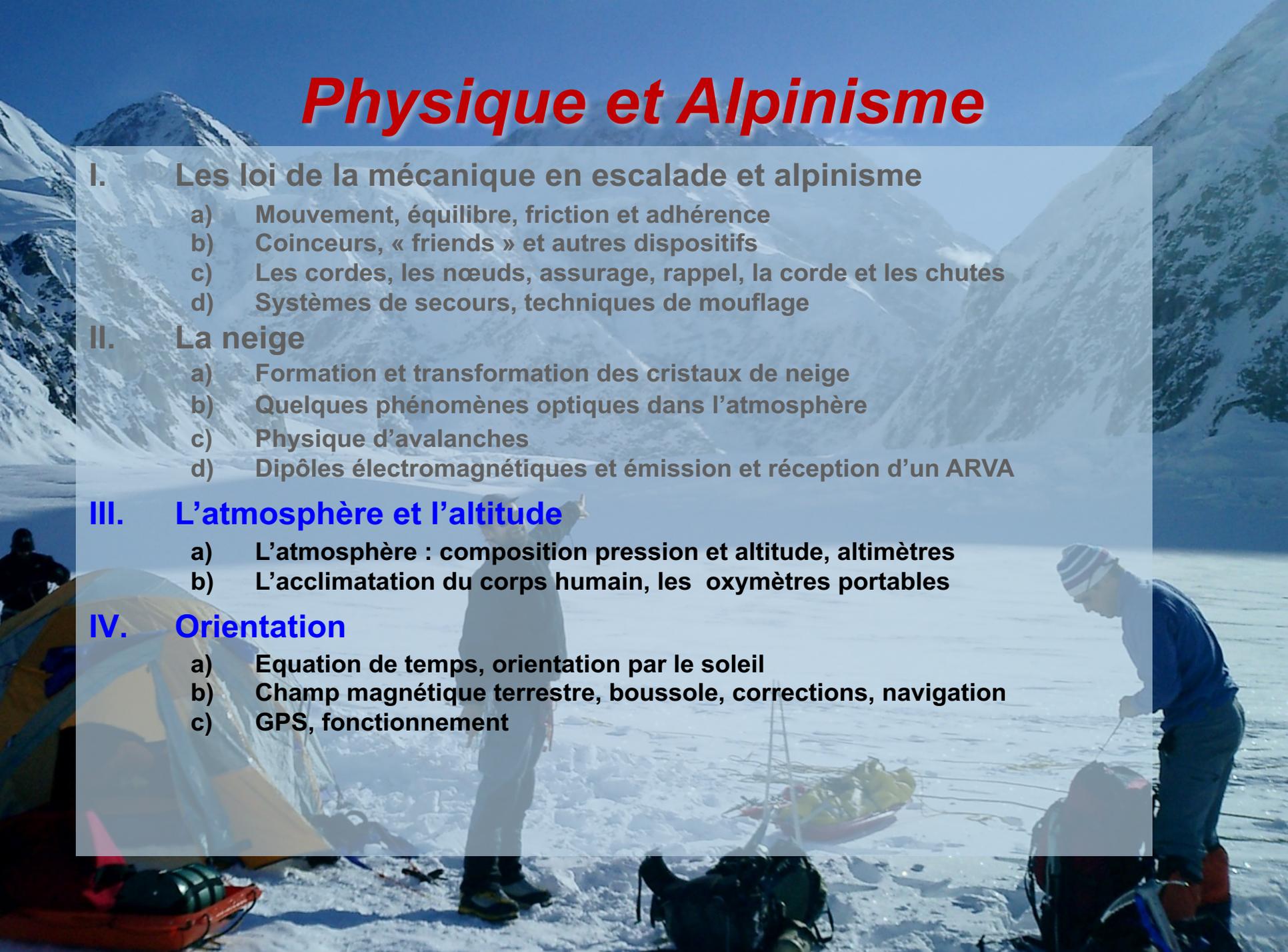
- a) Formation et transformation des cristaux de neige
- b) Quelques phénomènes optiques dans l'atmosphère
- c) Physique d'avalanches
- d) Dipôles électromagnétiques et émission et réception d'un ARVA

III. L'atmosphère et l'altitude

- a) L'atmosphère : composition pression et altitude, altimètres
- b) L'acclimatation du corps humain, les oxymètres portables

IV. Orientation

- a) Equation de temps, orientation par le soleil
- b) Champ magnétique terrestre, boussole, corrections, navigation
- c) GPS, fonctionnement



CHO OYU - 8 201 m

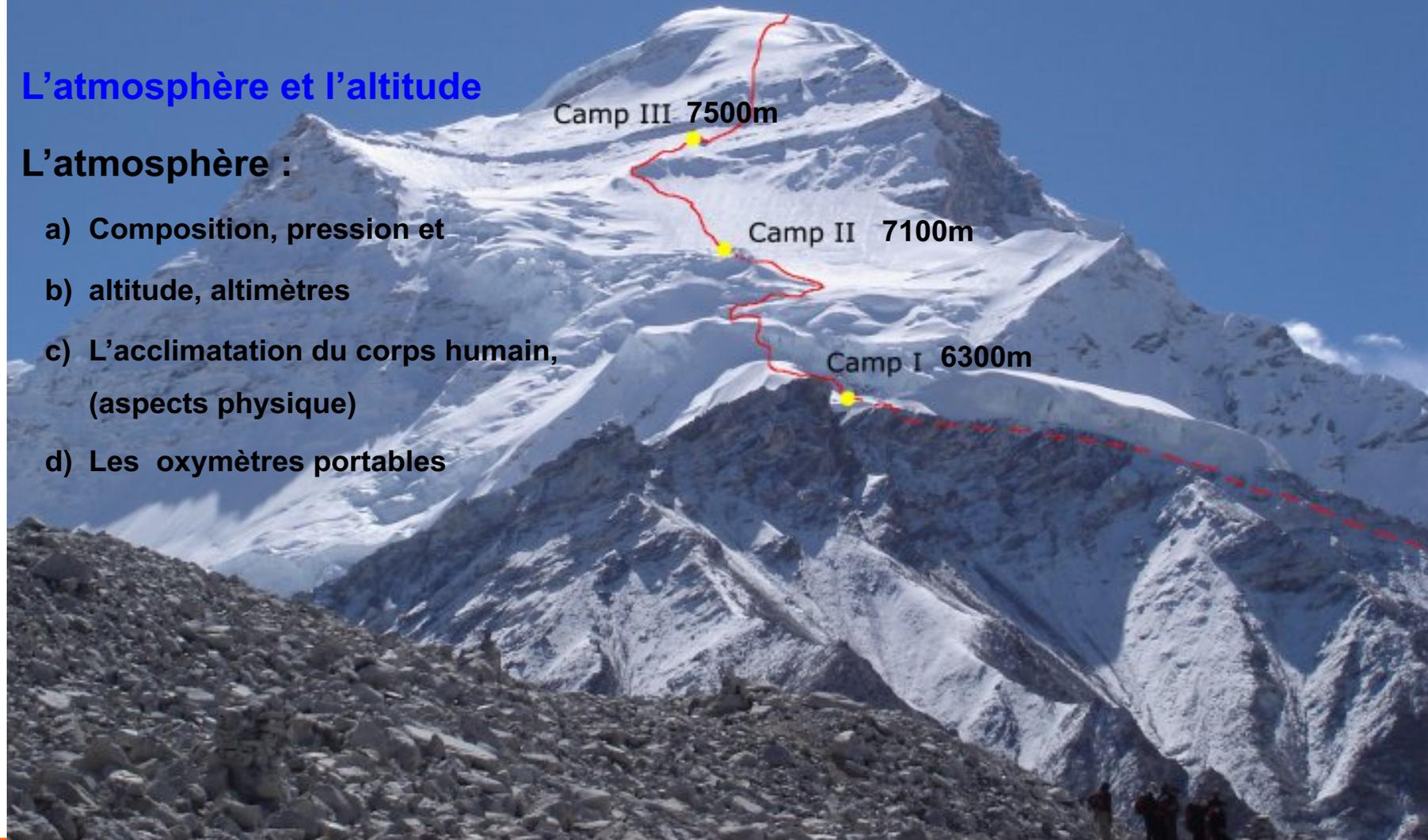
Camps d'altitude

Cho Oyu (8201)

L'atmosphère et l'altitude

L'atmosphère :

- a) Composition, pression et
- b) altitude, altimètres
- c) L'acclimatation du corps humain,
(aspects physique)
- d) Les oxymètres portables





L'atmosphère de la terre

L'atmosphère de la Terre

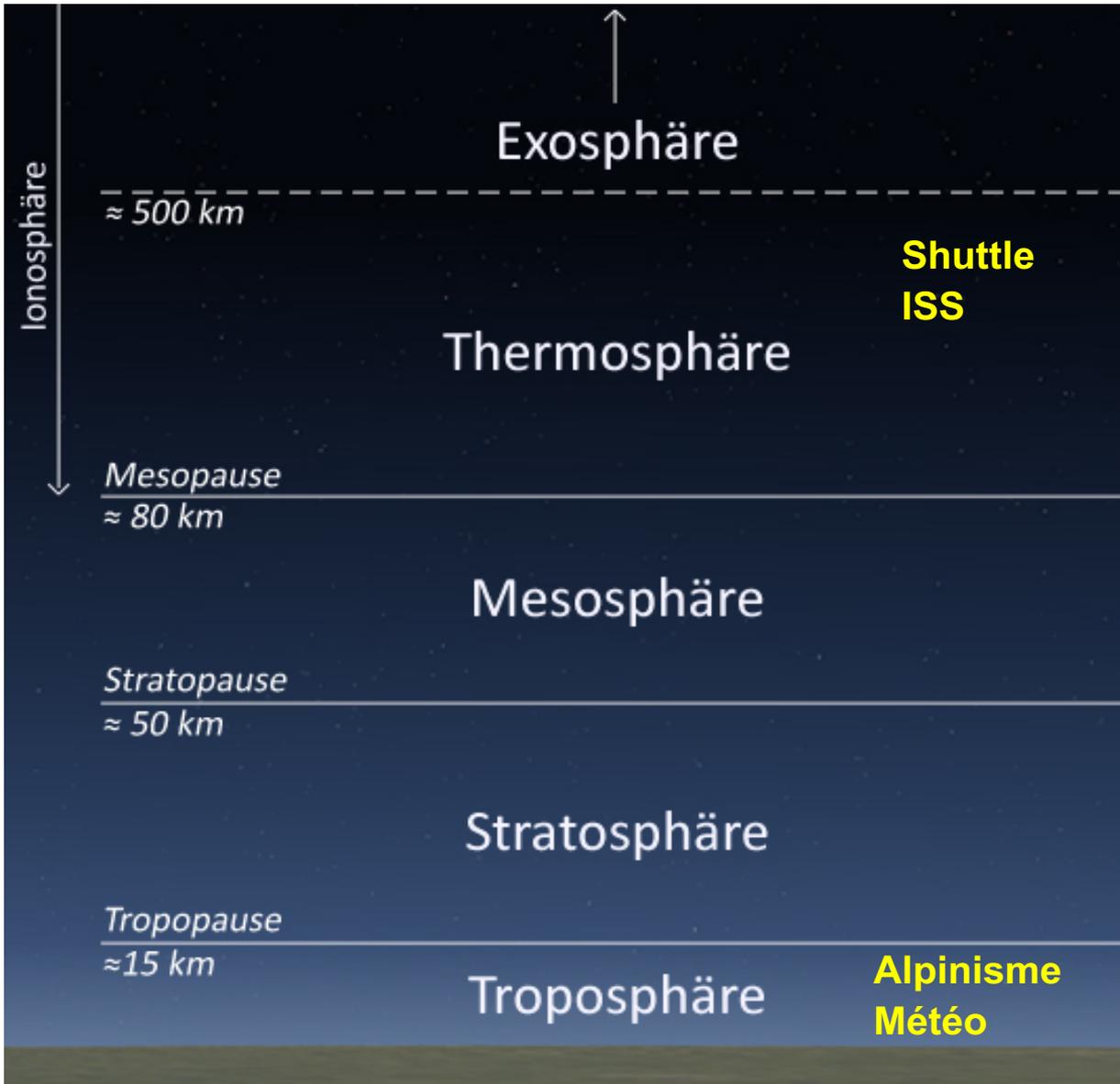


I. Epaisseur environ
100 à 200 km \ll
rayon de la terre
(6 378 km) ($\cong 1-3\%$)

II. Composition

III. Profile de densité et
température

L'atmosphère, structure



Ionosphère

(ionisation par UV et les rayons cosmiques)
Durée de vie longue pour les atomes excités

$$\lambda_{coll\ molecule} \approx km$$

Séparation des molécules par masse

Mesopause :

minimum de la température
 $\cong -80^{\circ}C$

Mésosphère, pas de Ozon

\Rightarrow pas d'absorption

\Rightarrow Temperature baisse

Couche d'ozone O₃ (20-50km)
(\cong inversion)

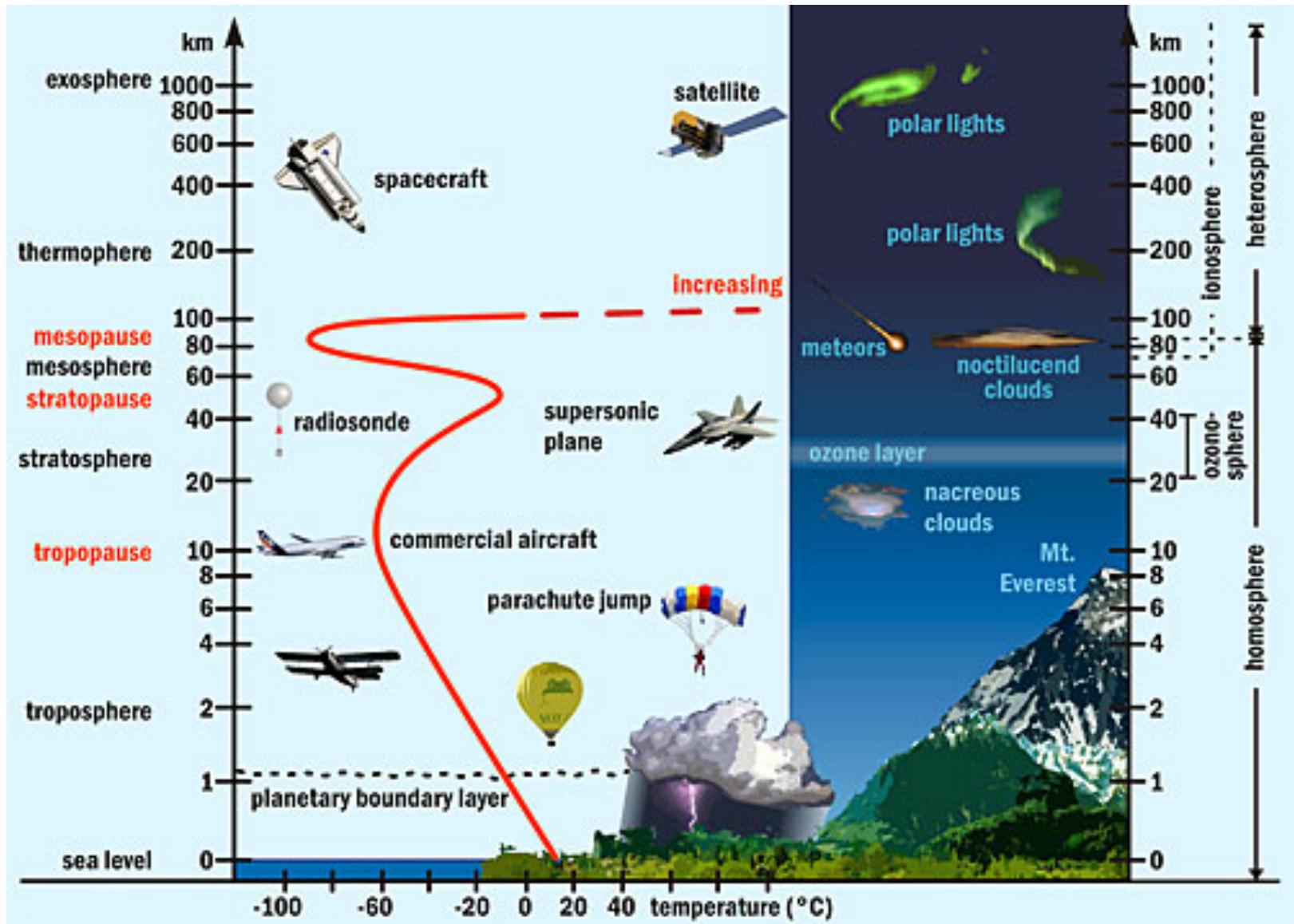
Absorption de la radiation solaire

$\Delta T / 100 m = -1^{\circ}C$ air seche

$\Delta T / 100 m = -0.6^{\circ}C$ air humide

Chauffage par la terre

L'atmosphère, pression et altitude



Composition de l'atmosphère sèche

masse molaire

$$78\% (m_{N_2} = 28) + 21\% (m_{O_2} = 32) + 1\% (m_{Ar} = 40)$$

$$= 28.96 \text{ g/mol}$$

Constante → 100 km

ppmv: parties par millions en volume

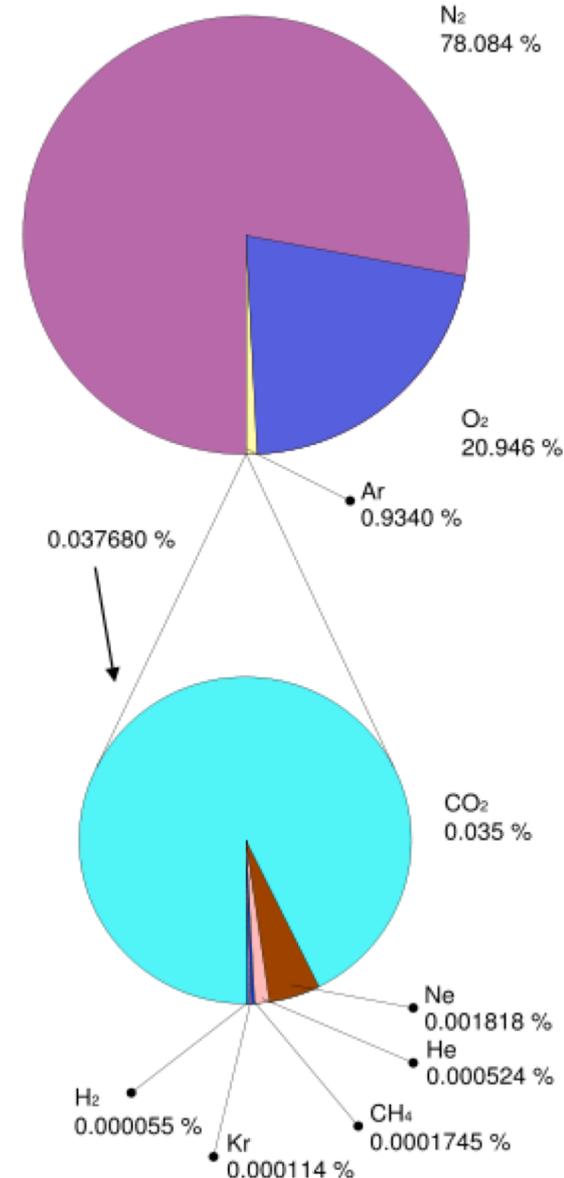
Gaz

Volume

<u>Azote</u> (N ₂)	780 840 ppmv (78,084 %)
<u>Dioxygène</u> (O ₂)	209 460 ppmv (20,946 %)
<u>Argon</u> (Ar)	9 340 ppmv (0,9340 %)
<u>Dioxyde de carbone</u> (CO ₂)	382 ppmv (0,0382 %)
<u>Néon</u> (Ne)	18,18 ppmv
<u>Hélium</u> (He)	5,24 ppmv
<u>Méthane</u> (CH ₄)	1,745 ppmv
<u>Krypton</u> (Kr)	1,14 ppmv
<u>Hydrogène</u> (H ₂)	0,55 ppmv

A rajouter à l'atmosphère sèche :

Vapeur d'eau (H₂O) de 1 % à 4 % (très variable)



La pression, unités

$$1 \text{ pascal (Pa)} \equiv 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} \equiv 1 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3} \equiv 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$$

Pressure Units

	Pascal (Pa)	<u>Bar</u> (bar)	<u>Technical atmosph_e</u> (at)	<u>Atmosph_e</u> (atm)	<u>Torr</u> (mmHg)	<u>Pound- force per square inch</u> (psi)
1 Pa	$\equiv 1 \text{ N/m}^2$	10^{-5}	10.197×10^{-6}	9.8692×10^{-6}	7.5006×10^{-3}	145.04×10^{-6}
1 bar	100 000	$\equiv 10^6 \text{ dyn/cm}^2$	1.0197	0.98692	750.06	14.504
1 at	98 066.5	0.980665	$\equiv 1 \text{ kgf/cm}^2$	0.96784	735.56	14.223
1 atm	101 325	1.01325	1.0332	$\equiv 1 \text{ atm}$	760	14.696
1 torr	133.322	1.3332×10^{-3}	1.3595×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	$\equiv 1 \text{ mmHg}$	19.337×10^{-3}
1 psi	6 894.76	68.948×10^{-3}	70.307×10^{-3}	68.046×10^{-3}	51.715	$\equiv 1 \text{ lbf/in}^2$

Example reading: 1 Pa = 1 N/m² = 10⁻⁵ bar = 10.197×10⁻⁶ at = 9.8692×10⁻⁶ atmetc.

Note: mmHg is an abbreviation for millimetres of mercury.

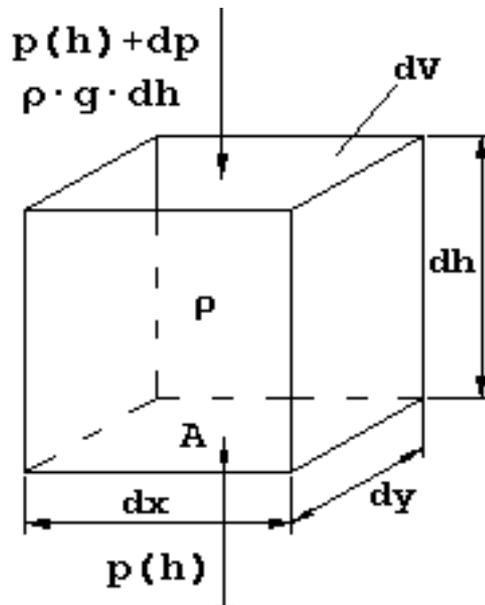
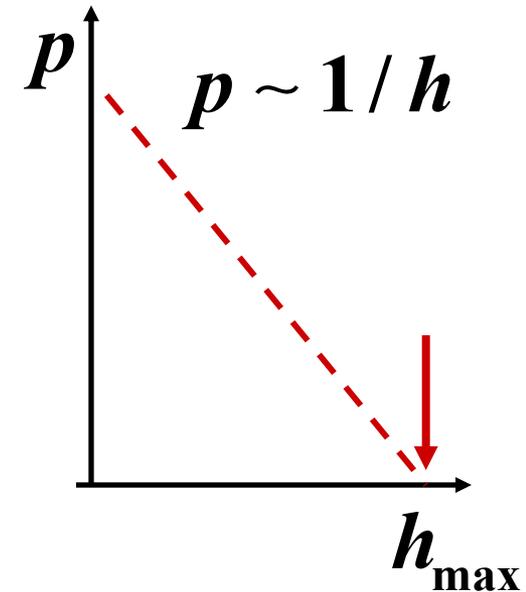
Pression et Hauteur

Cas d'une liquide :

si $\rho = \text{const} \Rightarrow$

$p \sim 1/h$; $h = \text{hauteur}$

"Surface comme dans une liquide"



$1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pascal}$
 $1013 \text{ Hecto Pascal}$
 760 Torr
 $1,013 \text{ bar}$

Formule du nivellement barométrique

Cas simple (gaz idéale, $T = \text{const}$) :

$$pV = \nu RT;$$

$$R = \text{constante universelle des gaz parfaits} = 8.32 \frac{\text{Ws}}{\text{Mol} \cdot ^\circ\text{K}},$$

$$\nu = V / V_{\text{mol}}; \quad ^\circ\text{C} = 273.15\text{K}; \quad M_{\text{mol}} = 28.96\text{g} / \text{Mol}$$

si $T = \text{const} \Rightarrow V \sim 1/p$

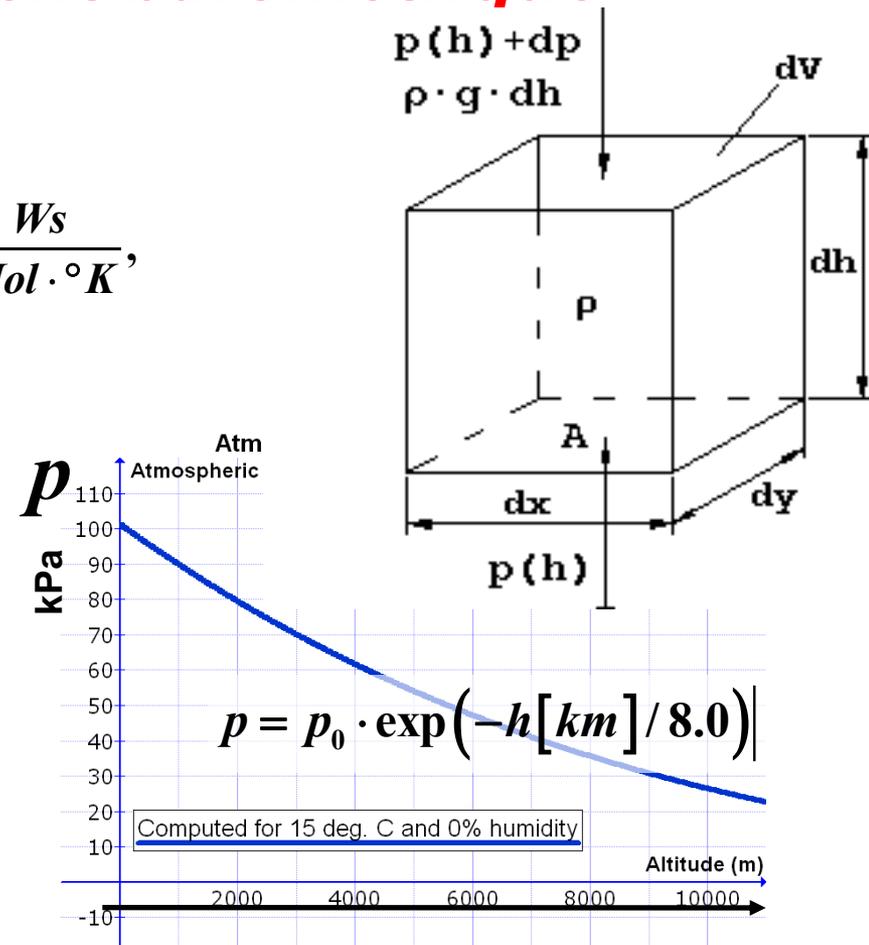
$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh; \quad \rho = \rho_0 \frac{p}{p_0}$$

$$dp = -\frac{\rho_0}{p_0} p \cdot g \cdot dh; \quad \int \frac{dp}{p} = \ln p = -\frac{\rho_0}{p_0} g \cdot h + \text{const}$$

$$p(h=0) = p_0 \Rightarrow \ln \frac{p}{p_0} = -\frac{\rho_0}{p_0} g \cdot h$$

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} g \cdot h\right) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\overbrace{M \cdot g \cdot h}^{E_{\text{pot}}(h)}}{p_0 V_0}\right) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{M_{\text{mol}} \cdot g \cdot h}{R \cdot T}\right) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h[\text{km}]}{8.0}\right) \Big|_{T \approx 273\text{K}}$$

$$p = p_0 / 2 \text{ pour } h = 5.54\text{km}$$



$$pV = \nu RT; \nu = V / V_{mol}$$

II. Cas plus réaliste (gaz idéale, $T=T(h)$:

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} g \cdot h\right) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{M \cdot g \cdot h}{p_0 V_0}\right) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{M_{mol} \cdot g \cdot h}{R \cdot T}\right)$$

M est la masse molaire moyenne des gaz de l'atmosphère (28,96 g mol⁻¹)

$$T(h') = T_0 - a \cdot h' \text{ (approx.linéaire)}; \quad dp / p = -\frac{M_{mol} \cdot g}{R \cdot T(h')} \cdot dh'$$

$$-\int_0^h \frac{M_{mol} g}{RT(h)} dh' = -\int_0^h \frac{M_{mol} g}{R(T_0 - a \cdot h')} dh' = -\frac{M_{mol} g}{R} \int_0^h \frac{1}{(T_0 - a \cdot h')} dh'$$

$$\left\{ \int \frac{dx}{b - ax} = -\frac{1}{a} \ln(b - ax) \right\}$$

$$-\frac{1}{a} \ln [T_0 - ah']_0^h = -\frac{1}{a} \ln \left[\frac{T_0 - ah}{T_0} \right]$$

$$\ln \left[\frac{p}{p_0} \right] = +\frac{M_{mol} g}{R} \frac{1}{a} \ln \left[\frac{T_0 - ah}{T_0} \right]$$

$$p = p_0 \exp \left[+\frac{M_{mol} g}{R} \frac{1}{a} \ln \left[1 - \frac{ah}{T_0} \right] \right]; \left\{ e^{y \ln(x)} = x^y \right\}$$

$$p = p_0 \left[1 - \frac{a \cdot h}{T_0} \right]^{\frac{M_{mol} g}{R \cdot a}}; \quad \rho = \rho_0 \left[1 - \frac{a \cdot h}{T_0} \right]^{\frac{M_{mol} g}{R \cdot a} - 1}$$

Pour un gradient de température

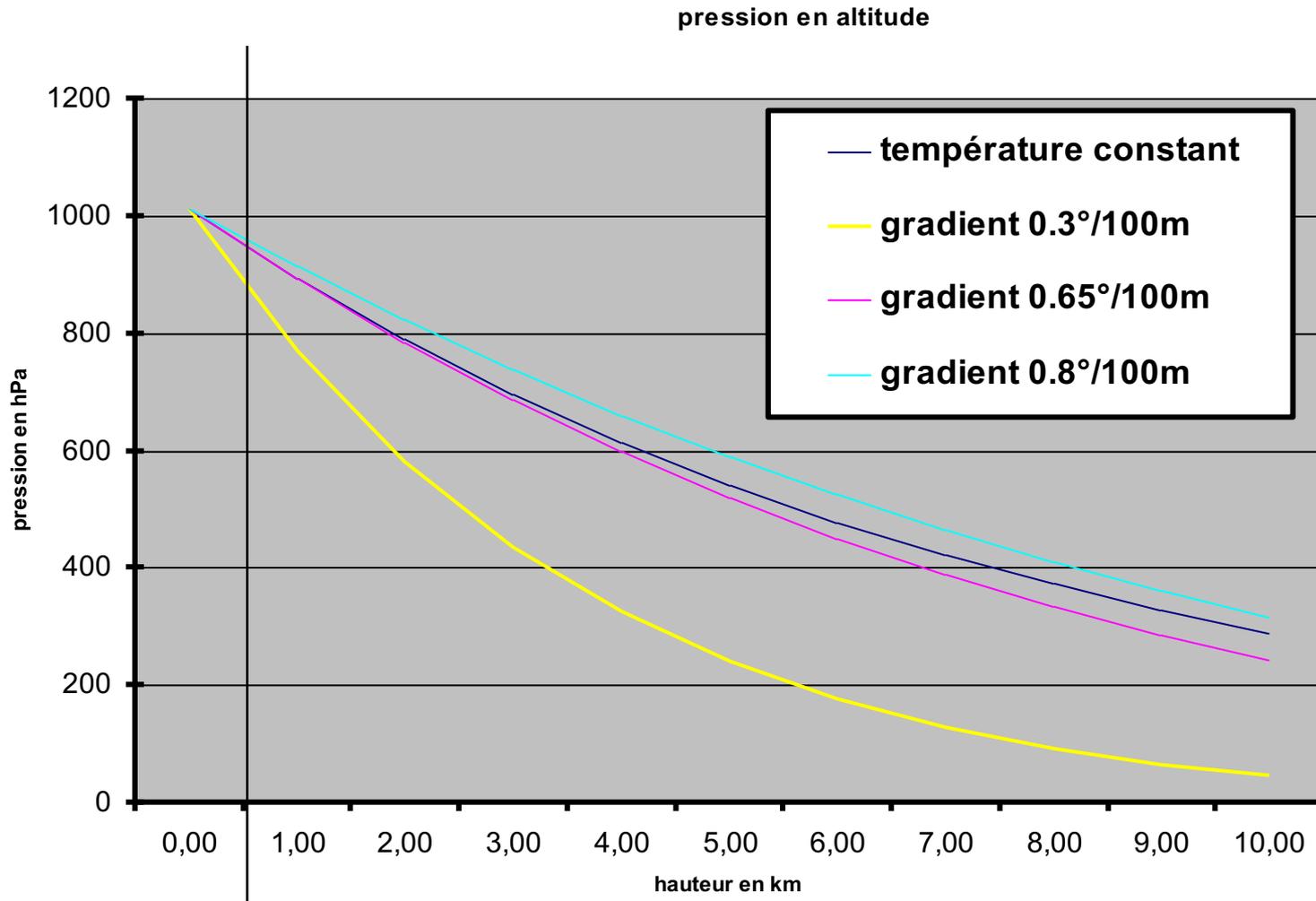
de 0,65 $\begin{pmatrix} 0,3 \text{ air chaude} \\ 0,8 \text{ air froide} \end{pmatrix}$ K pour 100 m, l'expos

$M_{mol} g / R \cdot a$ prend la valeur 5,255

$$p = p_0 \left(1 - \frac{0.0065 \cdot h}{T_0} \right)^{5.255}$$

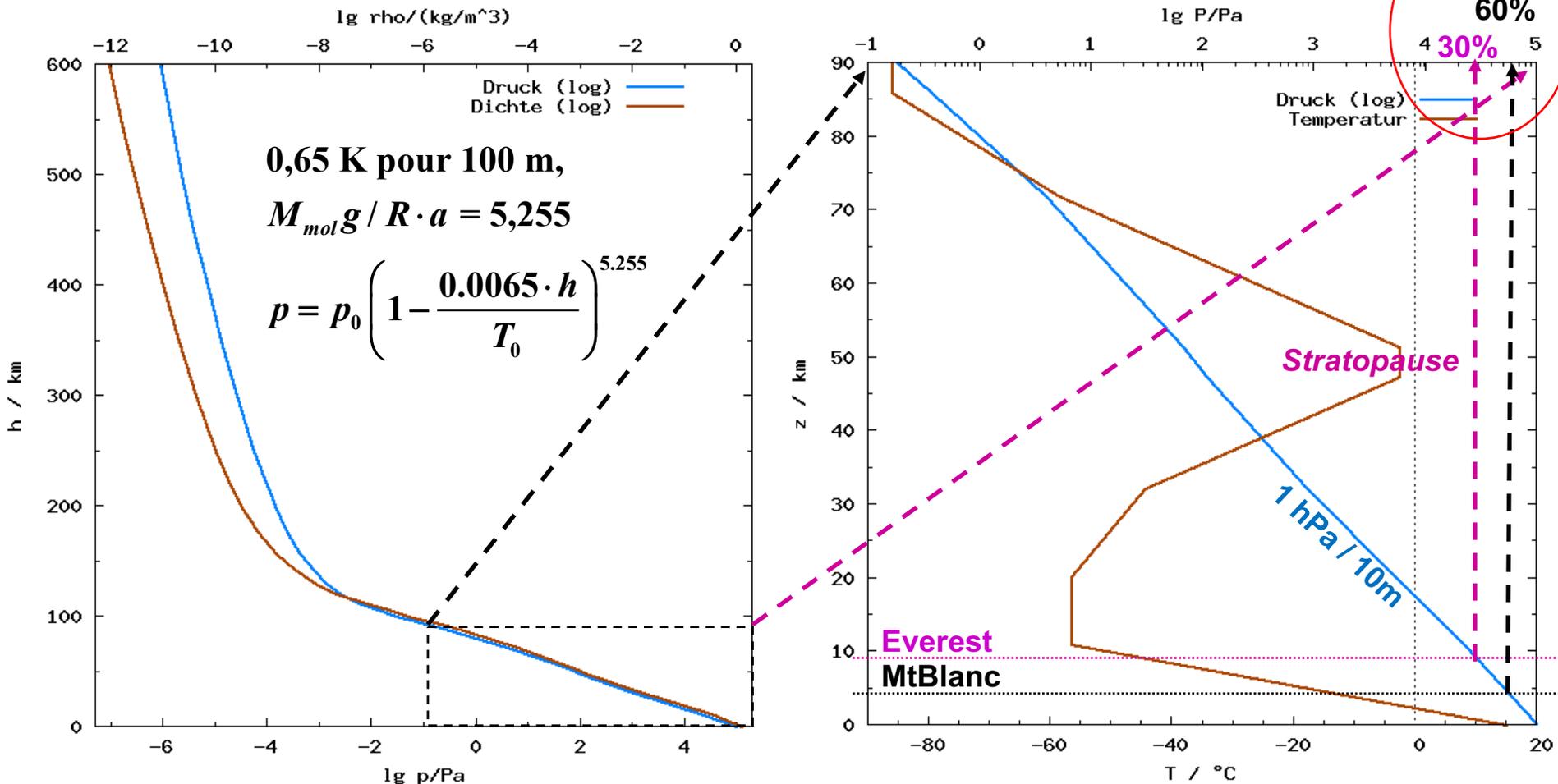
L'exposant est diminué de 1 car le rapport entre pression et masse volumique dépend de la température.

Pression, densité et température



Pression, densité et température

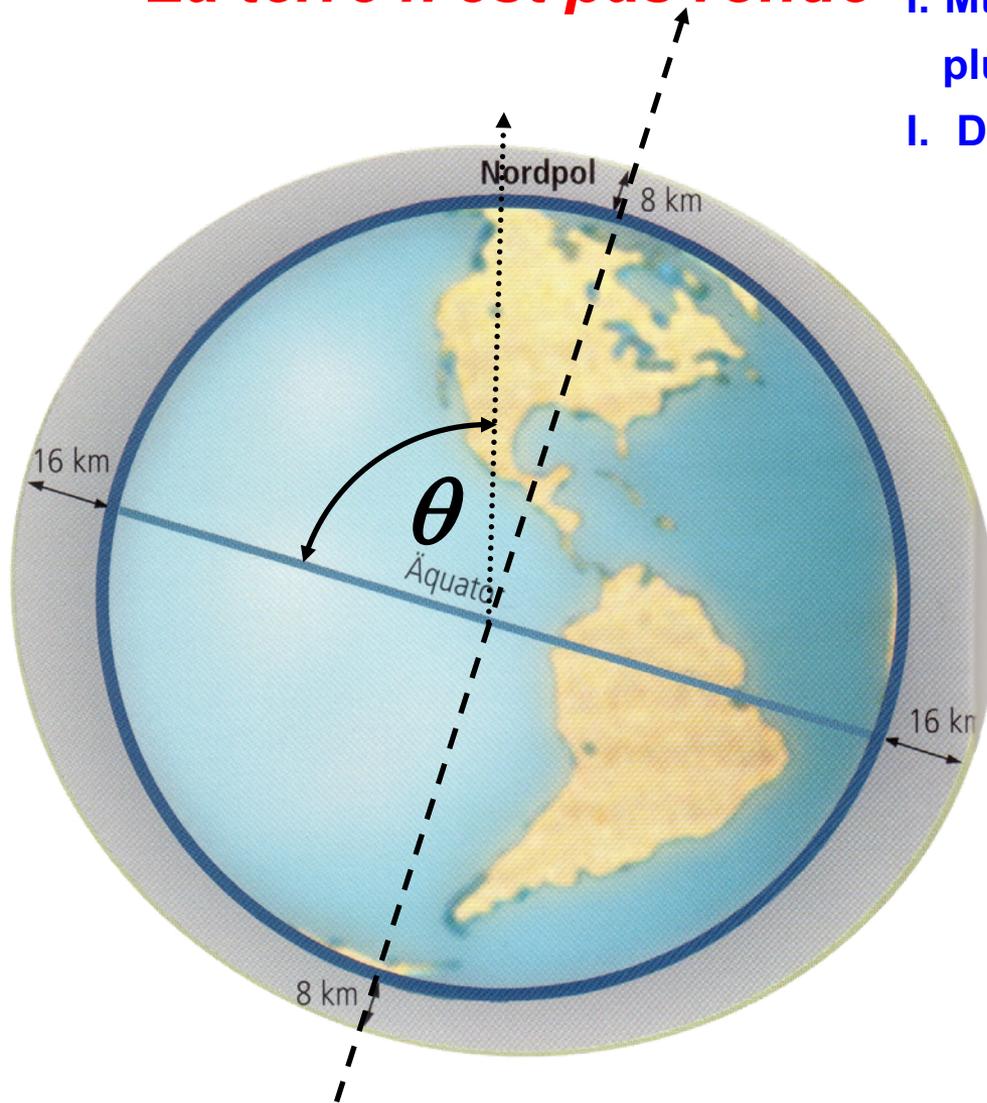
$$p = p_0 \left[1 - \frac{a \cdot h}{T_0} \right]^{\frac{M_{mol} g}{R \cdot a}} ; \rho = \rho_0 \left[1 - \frac{a \cdot h}{T_0} \right]^{\frac{M_{mol} g}{R \cdot a} - 1}$$



Précision environ 10 m



La terre n'est pas ronde



- I. Mt.Vinson (4892 m, Antarctique)
plus haut que Huayna Potosi (6088 m, Bolivie)
- I. Denali (6200 m Alaska) \cong 7000 m ??

$$g = 9.81 \text{ m} / \text{s}^2$$

Rotation de la terre

$$a = v^2 / r = \omega^2 r ; \omega = 2\pi / T$$

$$r = R \cos \theta ; \text{ Alaska } \theta \approx 63^\circ ; R = 6378 \text{ km}$$

$$r(\theta = 63^\circ) = 2895 \text{ km}$$

$$a(\theta = 63^\circ) = \left(\frac{2\pi}{24 \times 3600 \text{ s}} \right)^2 \cdot 2895 \text{ km} = 0.0155 \text{ m} / \text{s}^2$$

$$a(\theta = 0^\circ) = \left(\frac{2\pi}{24 \times 3600 \text{ s}} \right)^2 \cdot 6378 \text{ km} = 0.034 \text{ m} / \text{s}^2$$

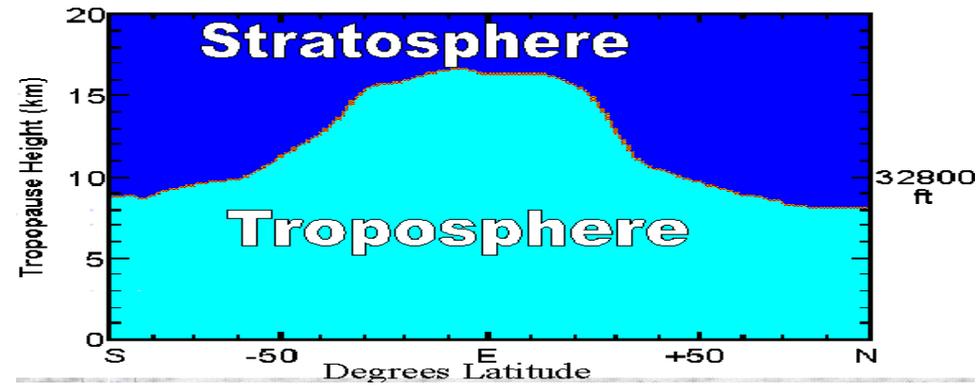
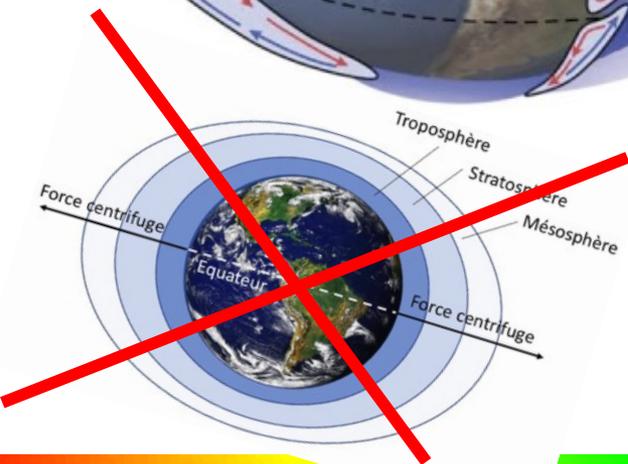
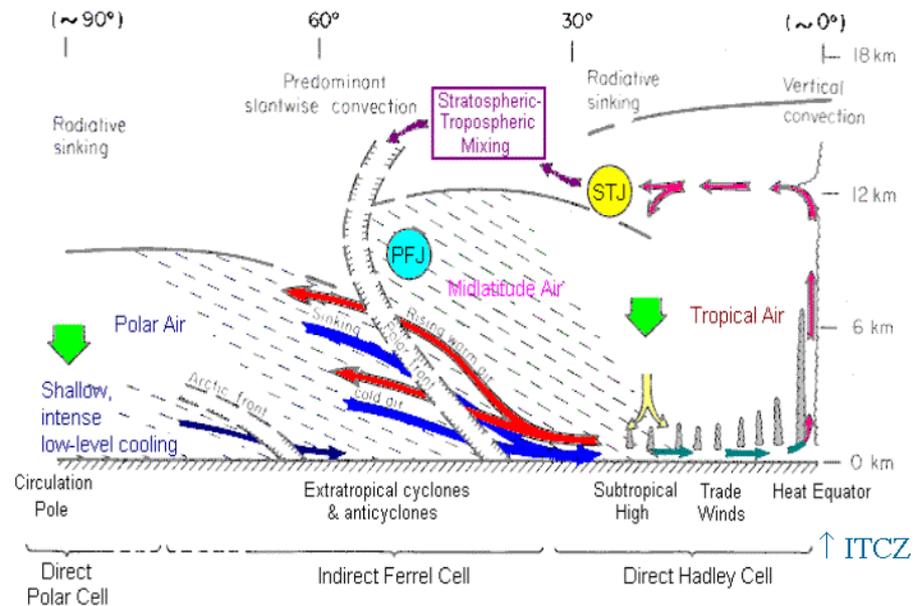
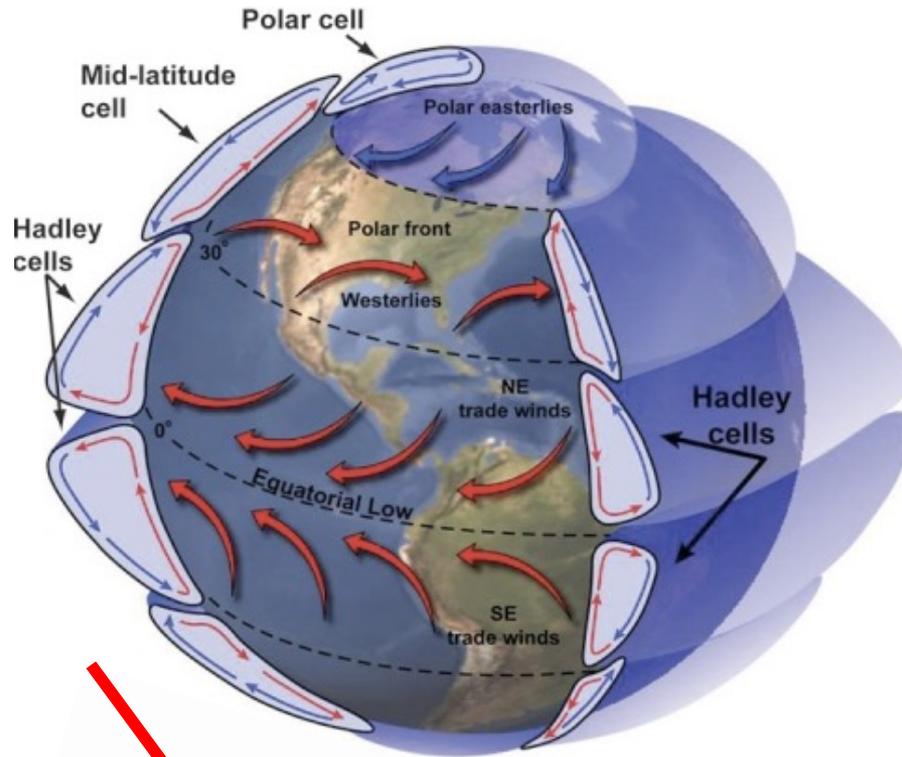
$$\delta g \approx 0.02 \text{ m} / \text{s}^2 \approx 2 \text{ ‰} ; \text{ ne suffit pas}$$

δp_0 ??? difficile d'obtenir

$$p = p_0(\theta) \cdot \exp\left(-\frac{M_{\text{mol}} \cdot g(\theta) \cdot h}{R \cdot T}\right)$$

L'atmosphère est très complexe

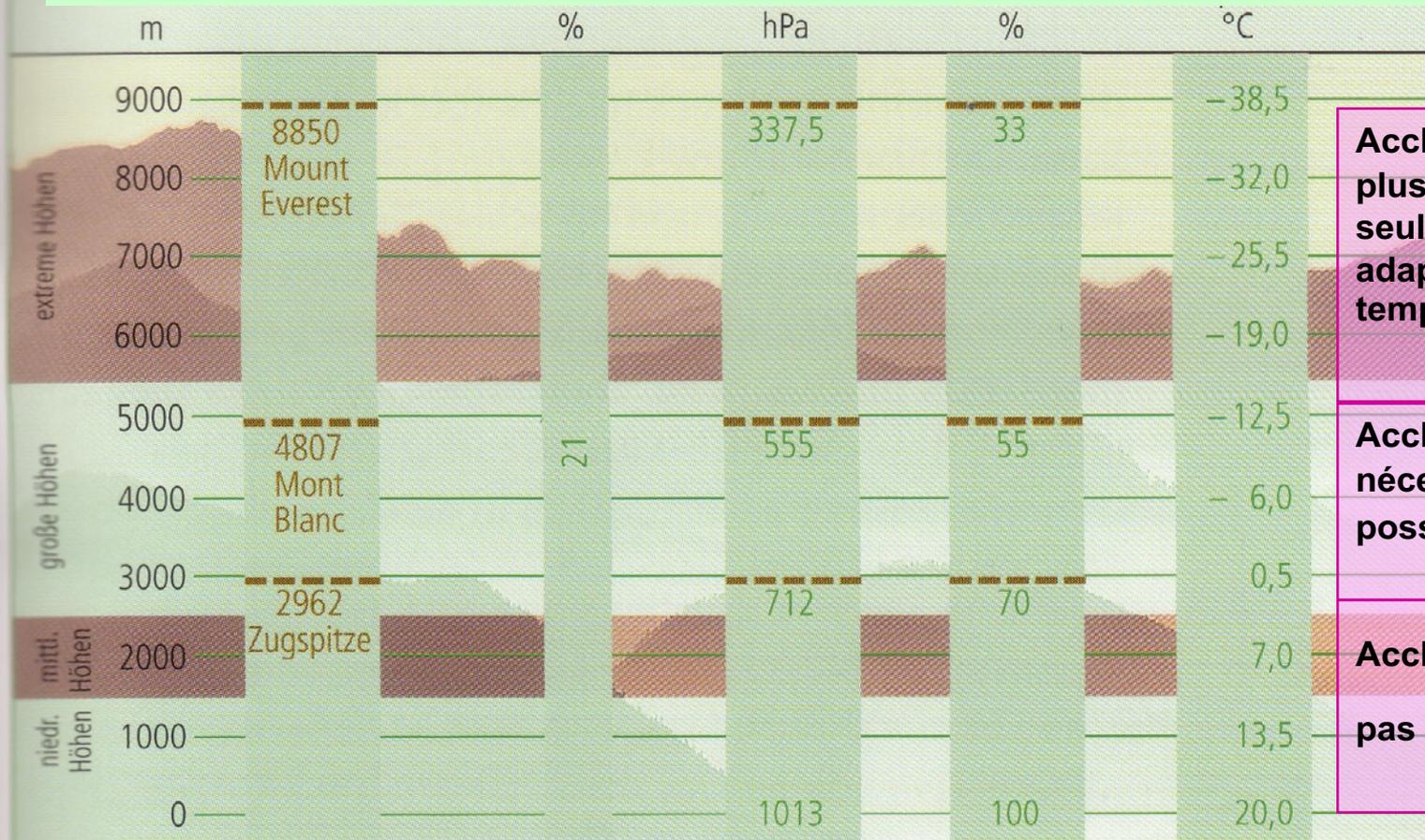
effet principal : la température



L'acclimatation du corps humain

Régions en hauteur, pression atmosphérique et température

hauteur O₂ pression partielle-O₂ température(été)

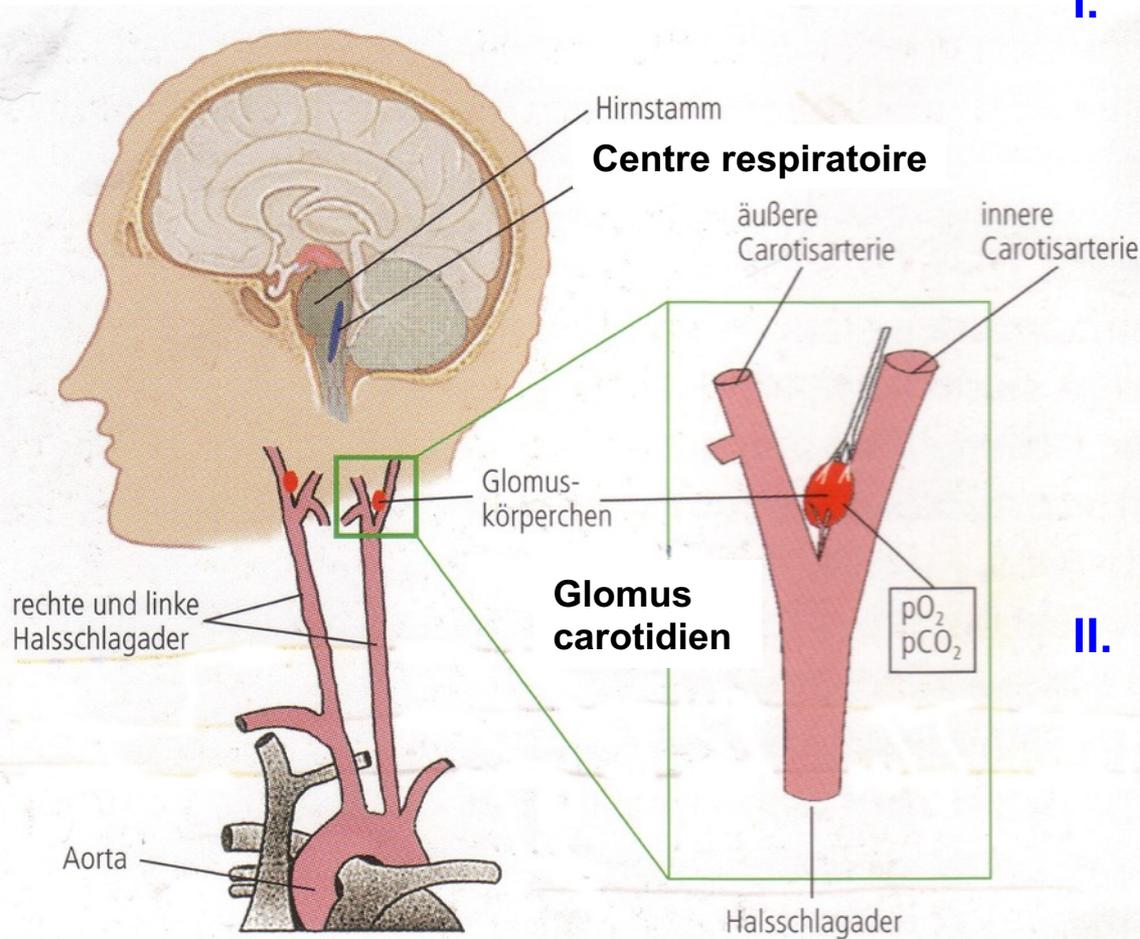


Acclimatation plus possible, seulement adaptation temporaire

Acclimatation nécessaire et possible

Acclimatation pas nécessaire

2 réglages du Système respiratoire



I. Pression partielle CO_2

Valeur critique (danger pour le cerveau) de la pression partielle est $p_{\text{O}_2} < 35 \text{ mmHg}$ dans les vésicules pulmonaires

1. Régulation normale par le centre de respiration:
2. Récepteurs pour p_{CO_2} .
3. En altitude plus de respiration
4. Moins de CO_2
5. Moins de stimulus pour respirer

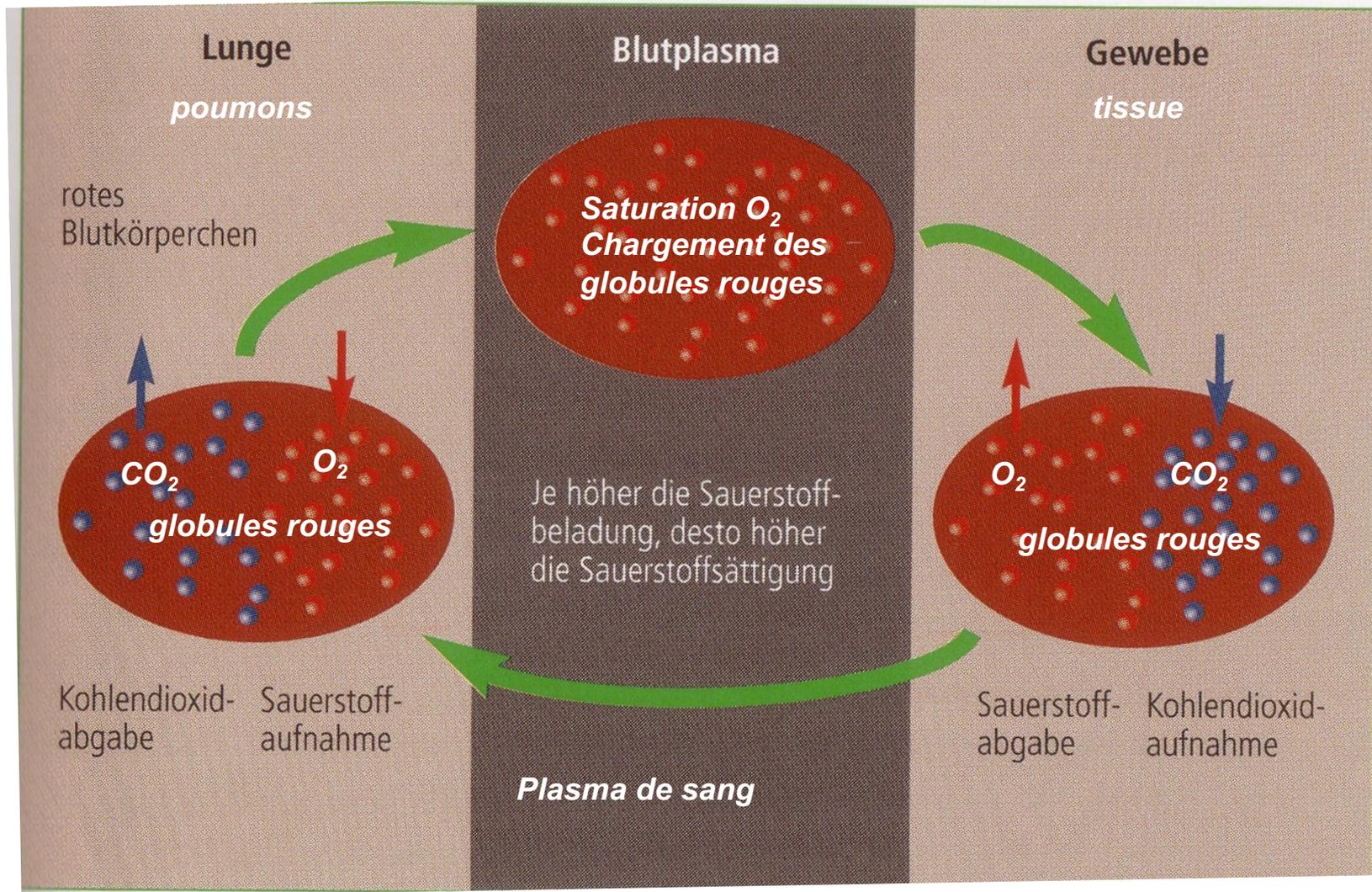
II. Pression partielle O_2

1. Glomus carotidien:
2. Récepteurs pour p_{O_2} .
3. Démarrage lentement
4. Plusieurs jours et nuits

Réduction du volume du plasma du sang par absorption

- ⇒ transport plus efficace !
- ⇒ risque cardiaque plus élevé

L'acclimatation du corps humain, chargement du sang avec O_2



Mesure de la saturation en oxygène à l'aide d'un oxymètre portable

Deux LED, rouge et infra rouge

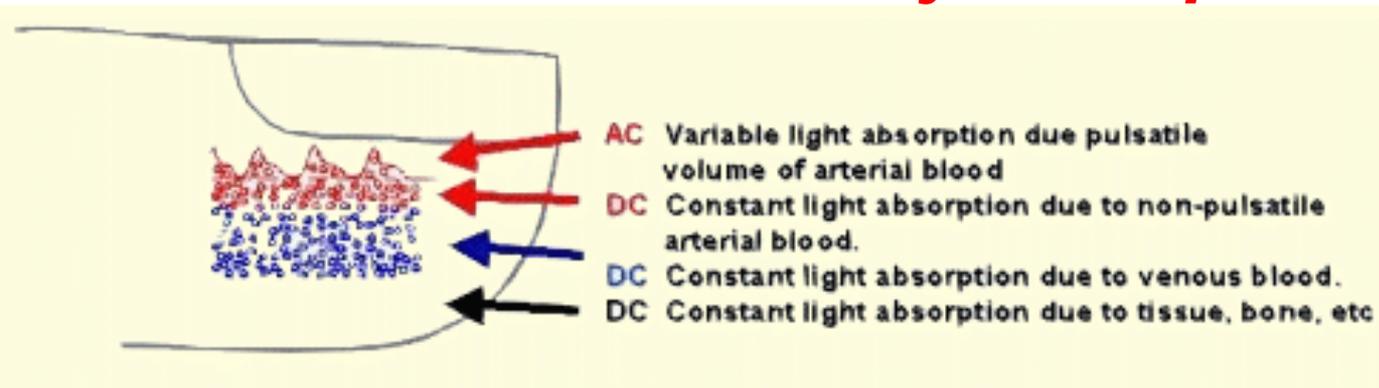
1. L'absorption dépend de la densité et de la longueur du chemin (loi exponentielle, le deuxième LED (infrarouge) sert à déterminer/normaliser l'épaisseur du tissu
2. L'absorption du rouge dépend de la saturation du sang avec O_2 , du hémoglobine, oxy-hb et deoxy-hb. Le paramètre à mesurer !
3. Flux du sang artériel est pulsé. Distinction entre le sang dans les veines et les artères
4. Il faut contrôler la respiration !

< 3000m SpO₂ > 90%
< 5500m SpO₂ > 75%
7500 m SpO₂ → 65-55%

Aclimaté si SpO₂ > 90-95%

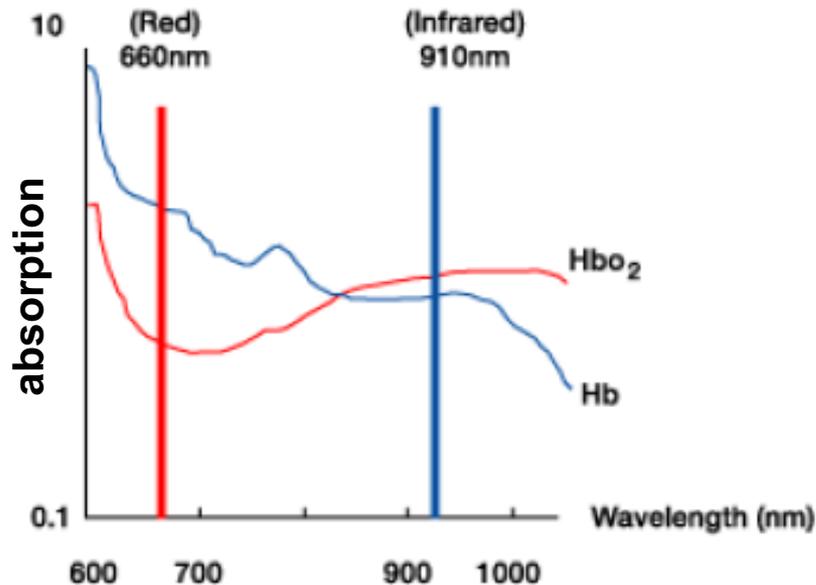


Mesure de la saturation en oxygène à l'aide d'un oxymètre portable



Deux LED, rouge et infra rouge

- Saturation du sang avec O_2 , oxy-hemoglobin et deoxy-hemoglobin.
- Flux du sang artériel est pulsé. Distinction entre le sang dans les veines et les artères



$$SpO_2 = f \left[\frac{\ln\left(\frac{\min}{\max}\right)_{Red}}{\ln\left(\frac{\min}{\max}\right)_{IR}} \right]$$

Autres facteurs importants en altitude (hors de la pression réduite)

I. Chute de la température

1. Environ $6.5^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$, jusqu'à -40 au Mt. Everest ou (ant)arctique
2. \Rightarrow Gelures (doigts, orteils, nez, visage, ...)
3. \Rightarrow Réduction de la pression du vapeur
 \rightarrow réduction davantage de la pression partielle d'oxygène

II. Radiation du soleil :

1. Ultra-violet A (400-320nm) et
2. Ultra-violet B (320-280nm)
3. Ultra-violet C (<280 nm) est absorbé par la couche d'ozone
 \Rightarrow Coup de soleil, brûlures, aveuglement

III. (Rayons cosmiques)

Les rayons cosmiques



Abb. 2.1: Experimente in frühen Tagen: Robert Millikan und seine Mitarbeiter Glenn Millikan, Otto Oldenberg, Ted Cook, C. H. Prescott, Jr. befördern 1925 Detektoren zum Nachweis kosmischer Höhenstrahlung auf den Mt. Whitney (Dieses Bild © Copyright California Institute of Technology).

Les Rayons Cosmiques

1912 Victor Hess, découverte des rayons cosmiques

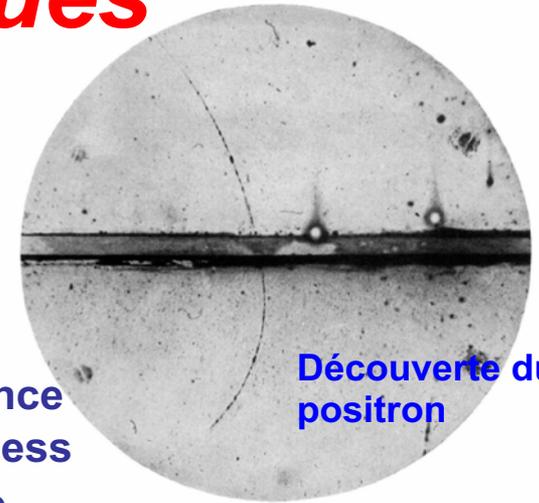
1932 Anderson, découverte du positron

1937 Street/Stevenson découv. du muons

1947 Latters, Perkins et al. découv. du pion

.....

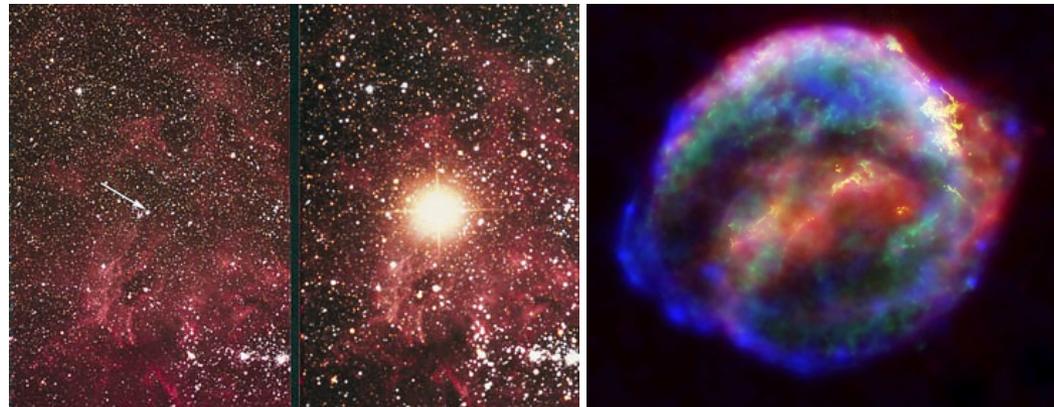
La Terre est en permanence bombardée par des « rayons cosmiques », des particules de très haute énergie en provenance de l'espace. C'est en 1912 que le physicien autrichien Viktor Hess découvrit pour la première fois que l'atmosphère est traversée continuellement par le rayonnement provenant de l'univers.



Découverte du positron



Ces particules chargées sont constituées pour 86 % de protons (les noyaux des atomes hydrogène), et pour le reste de presque tous les éléments chimiques connus.



Le reste de la supernova observée par Keppler en 1604

L'Interaction des rayons cosmiques dans l'atmosphère

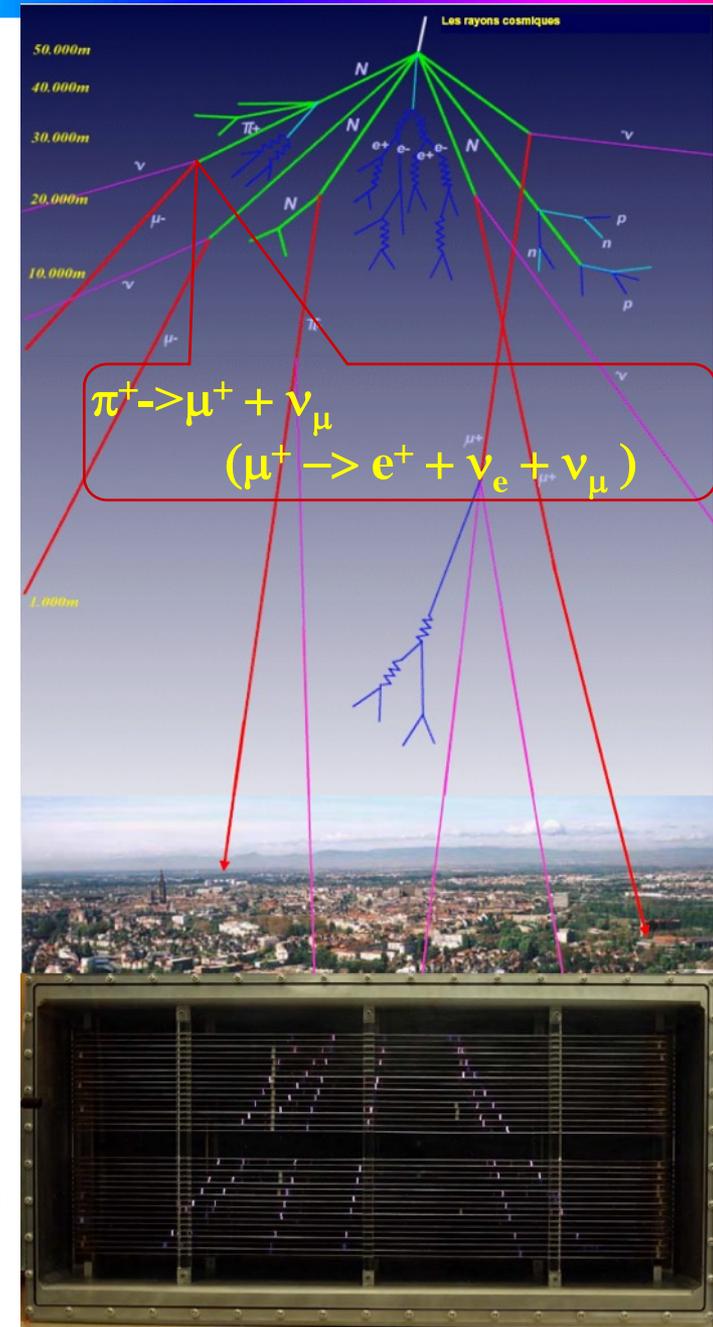


En 1938 l'astronome français Pierre AUGER a découvert les gerbes atmosphériques : ce sont des cascades de particules provoquées par l'impact d'une particule cosmique de haute énergie.

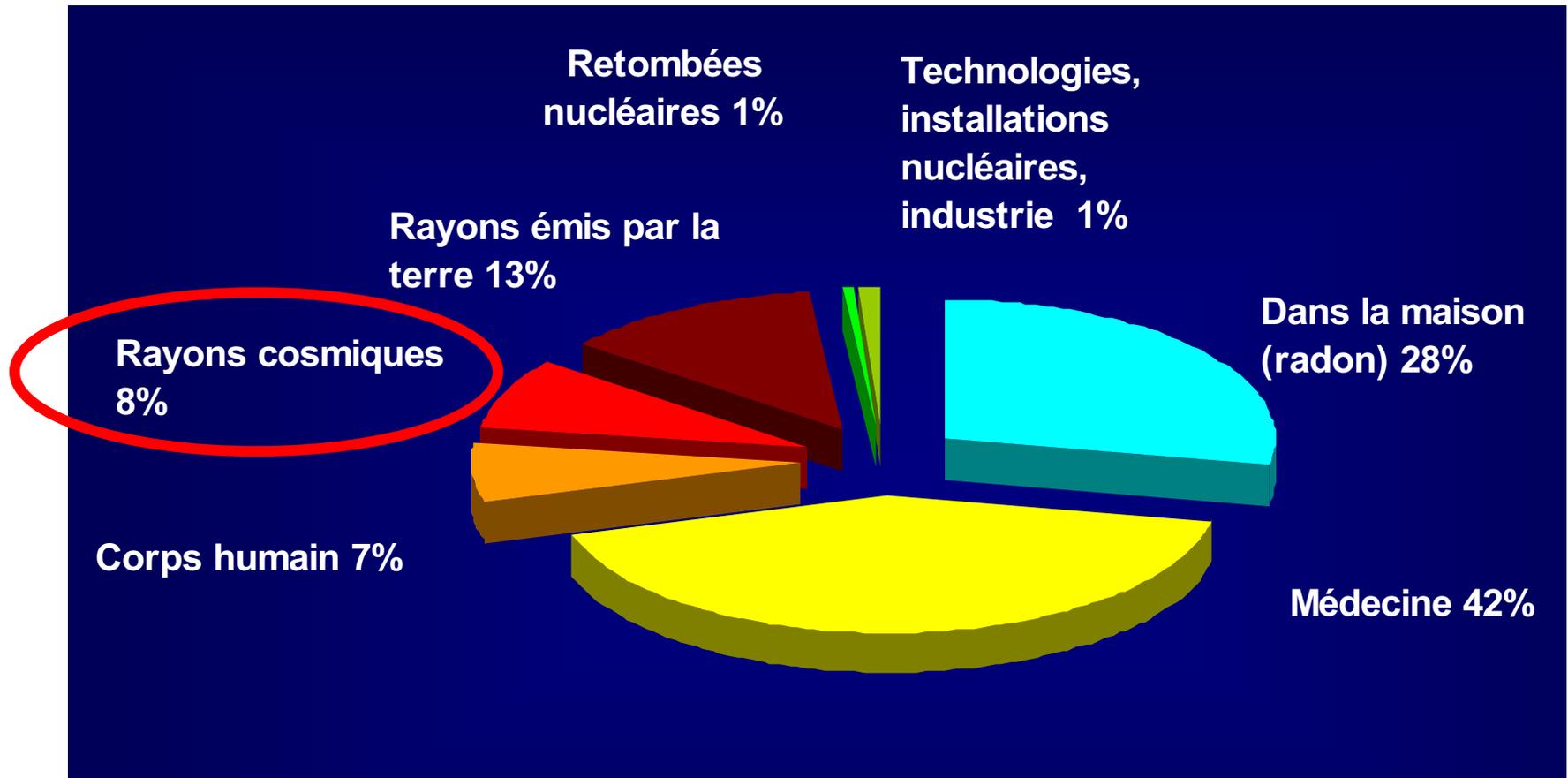
Pierre Auger 1938

Cette particule primaire entre en collision avec des noyaux d'azote et d'oxygène de l'air dont les fragments heurtent à leur tour d'autres noyaux. De cette manière, elle génère une pluie de particules secondaires.

Le flux est de l'ordre de 100 particules par seconde et par m². Nous sommes traversés depuis toujours par ce bombardement quotidien, représenté ici au dessus de Strasbourg.



Exposition a la radioactivité « naturelle »

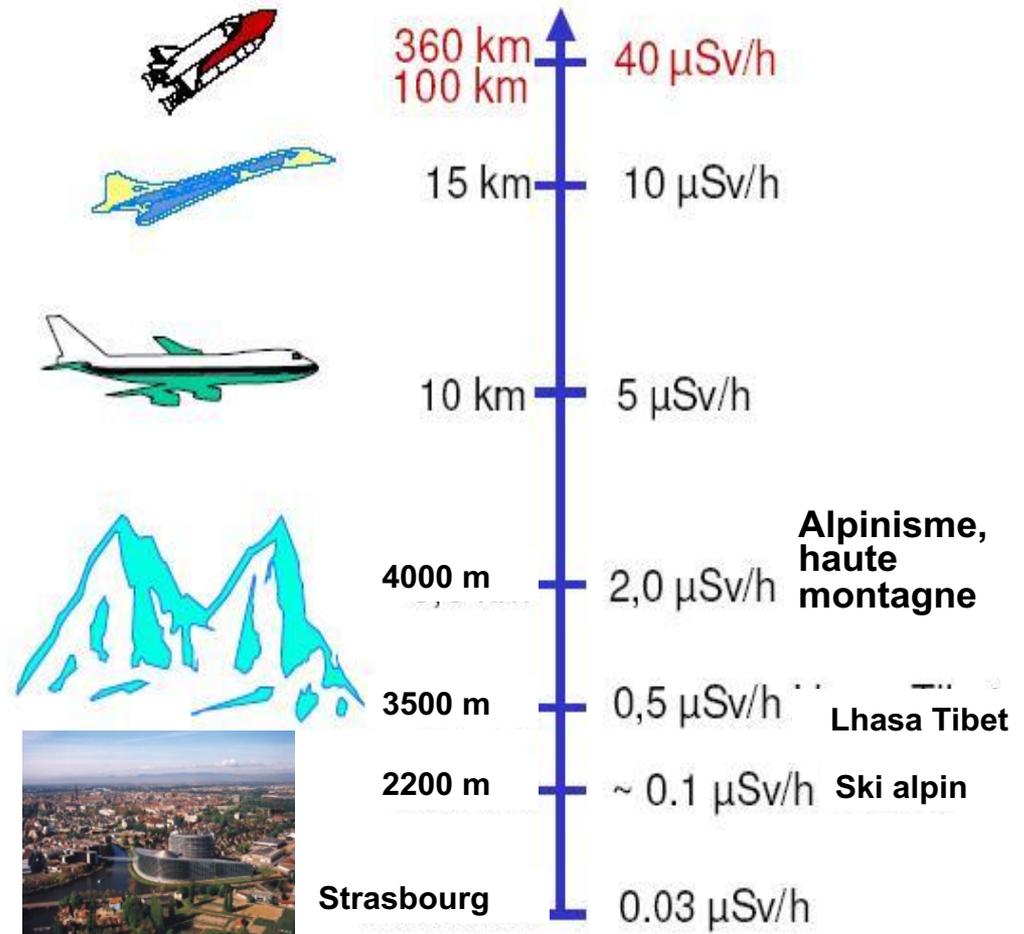


Exposition moyenne au niveau de la mer (France)

Exposition aux rayons cosmiques

L'atmosphère offre un bouclier permanent contre les rayons cosmiques, cependant, notre corps est traversé pas des centaines de particules chargées par seconde.

- I. Ces particules produites dans les gerbes atmosphériques constituent une source de rayonnement, auquel nous sommes exposés.
- II. Le taux de radiation augmente fortement avec l'altitude.



Orientation

I. L'orientation par moyens simples

Soleil, Lune

II. Les cartes terrestres

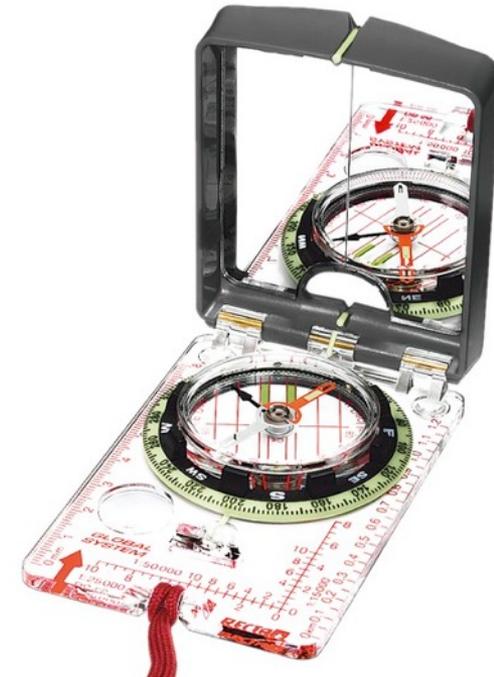
1. Projections
2. Systèmes de coordonnées

III. Champ magnétique terrestre,

1. Boussole,
2. Corrections
3. Navigation

IV. GPS,

1. Fonctionnement
2. Corrections



René Cuenin, comment s'orienter ?
Wikipédia

Orientation avec le soleil

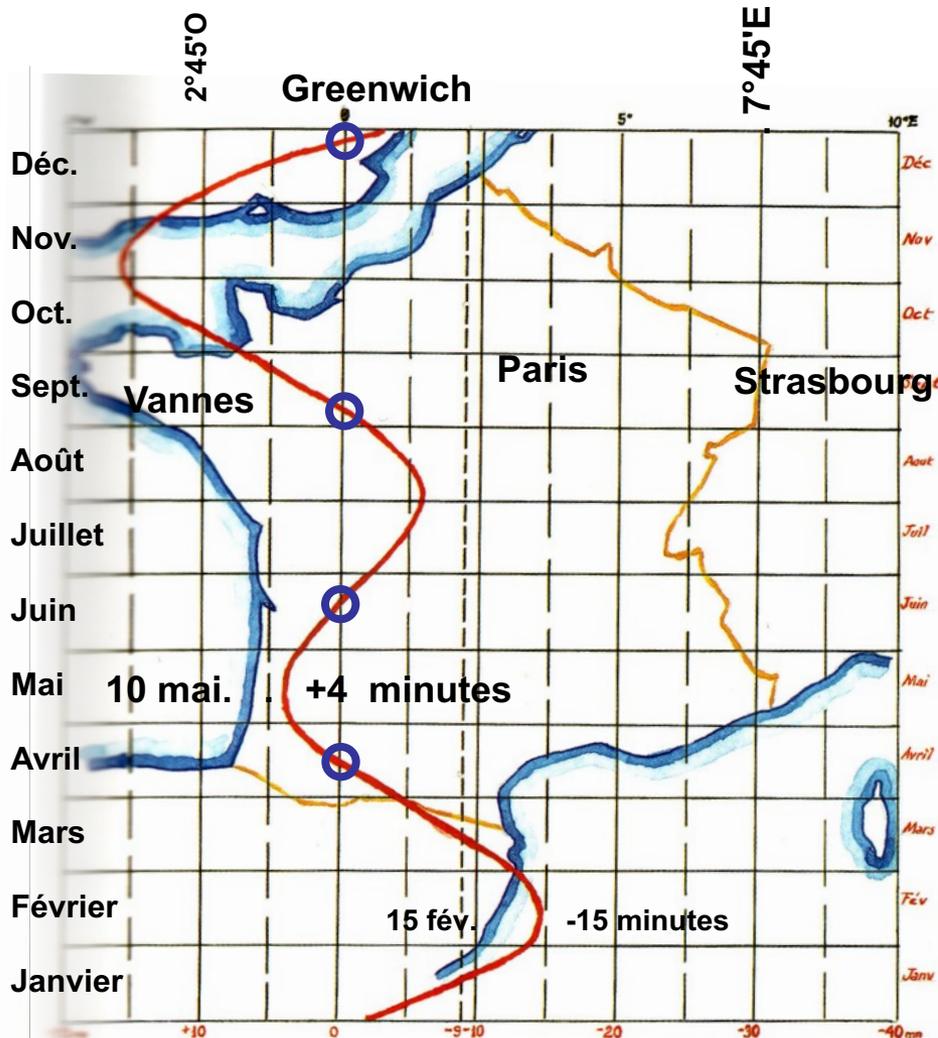
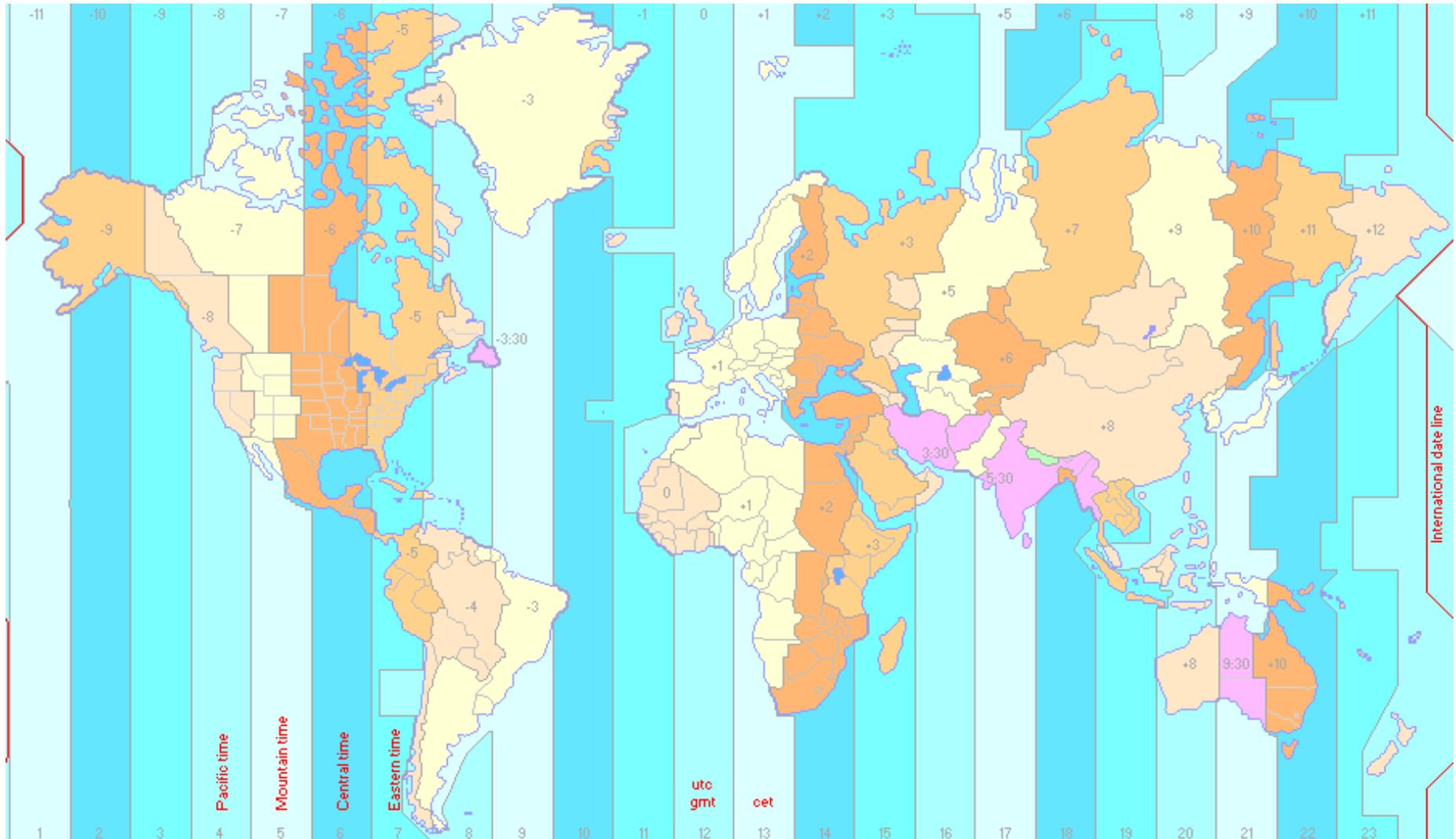


Fig. I-4. Décalages horaires dus à l'écart en longitude par rapport à Greenwich et à l'équation du temps.

- I. La terre tourne, une rotation de 360° en $24\text{h} = 15^\circ$ en 1 h et 1° en 4 min
- II. L'heure légale décalage par rapport de l'heure solaire réelle
- III. HEURE DU MÉRIDIEN DE GREENWICH (GMT), France GMT+1
- IV. Greenwich situé à $2^\circ 20'$ à l'Ouest du Meridian Paris
- V. Le soleil passe rigoureusement au sud de Greenwich que le 15 avril, 15 juin, 1 sept, 25 déc. (la terre décrit une orbite elliptique) variations de l'heure solaire par rapport à l'heure des montres (courbe rouge, "l'équation du temps")
- VI. Strasbourg:
 1. Long. $7^\circ 45'E$
 2. 1re correction: -31 minutes
 3. Le 15 fév. 2e corr. -15 minutes
 4. Heure d'hiver 13h GMT+1
 5. Passage du Soleil au Sud à 12h14
- VII. Vannes:
 1. Long. $2^\circ 45'O$
 2. 1re correction: +11 minutes
 3. Le 10 mai. 2e corr. +4 minutes
 4. Heure d'été 14 h
 5. Passage du Soleil au Sud à 14h15
 6. Le 3 janvier, 2e corr. -4 minutes
 7. Heure d'hiver 13h
 8. Passage du Soleil au Sud à 13h07

HEURE DU MÉRIDIEN DE GREENWICH (GMT) décalages



Orientation avec le soleil (et montre)

- I. Montre, aiguille des heures : 4h = 120°
- II. Soleil, 60° en 4h
- III. Corrections géographiques et annuelles

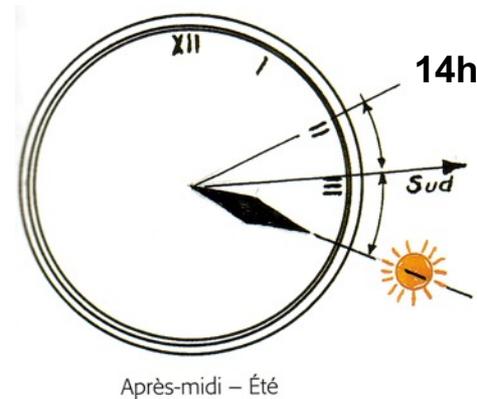
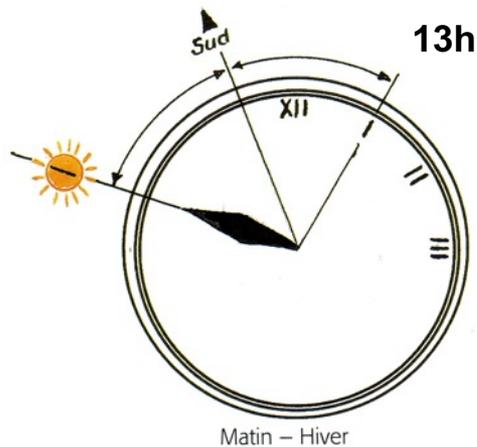
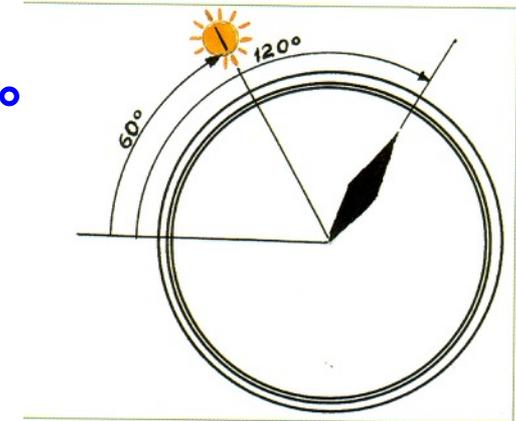


Fig. 1-7. Été comme hiver, si le soleil brille, il suffit d'une montre à aiguilles pour trouver le Sud.

Perdue le montre

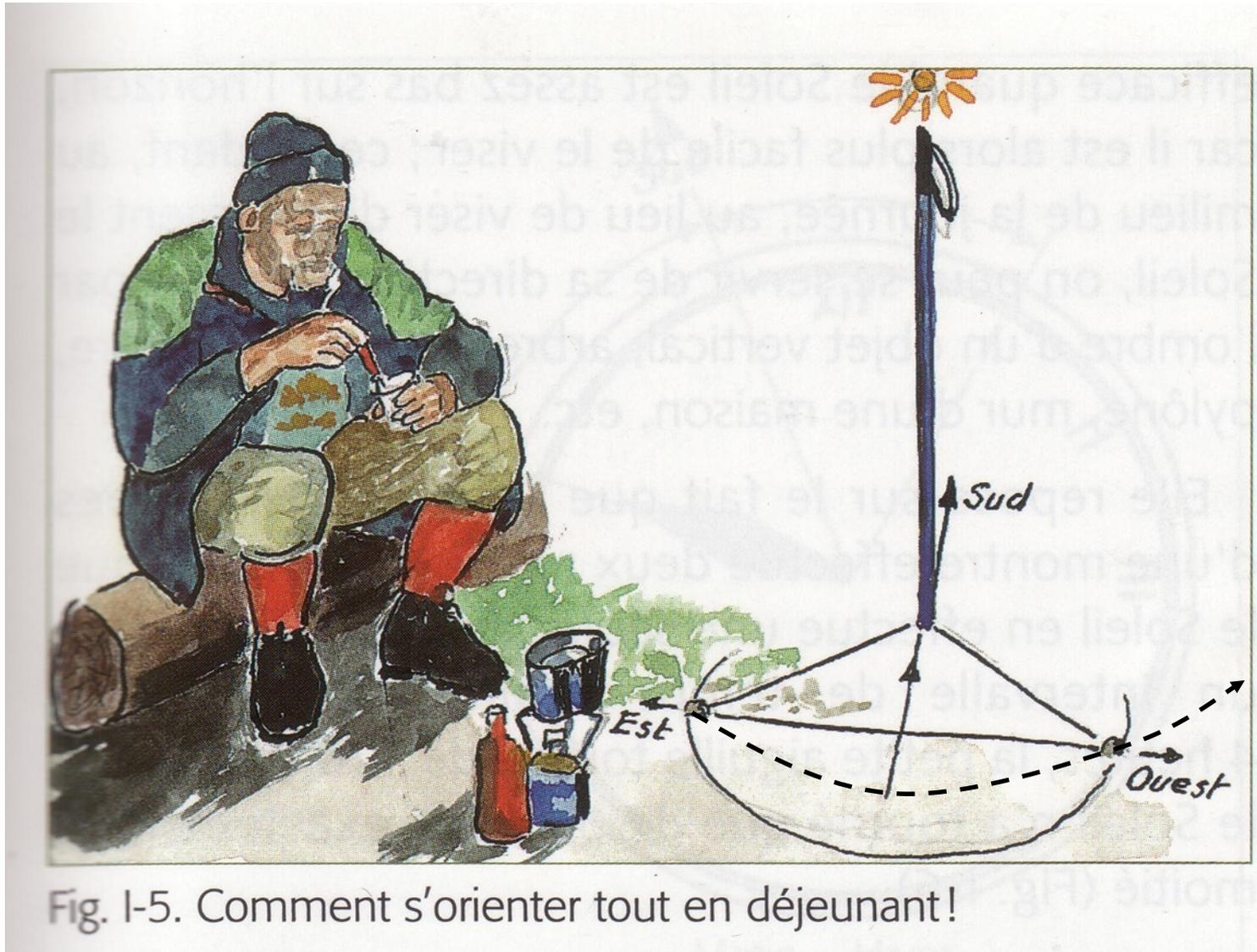
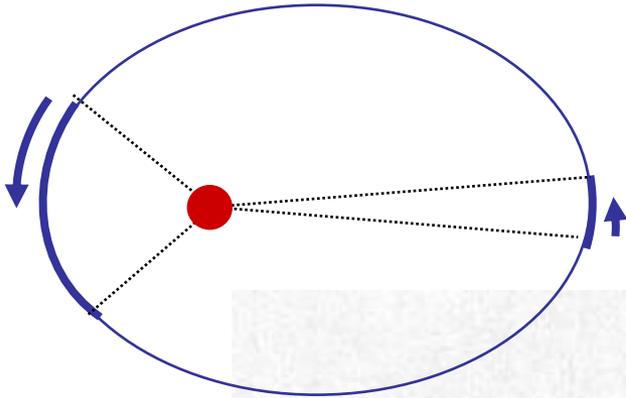


Fig. I-5. Comment s'orienter tout en déjeunant!

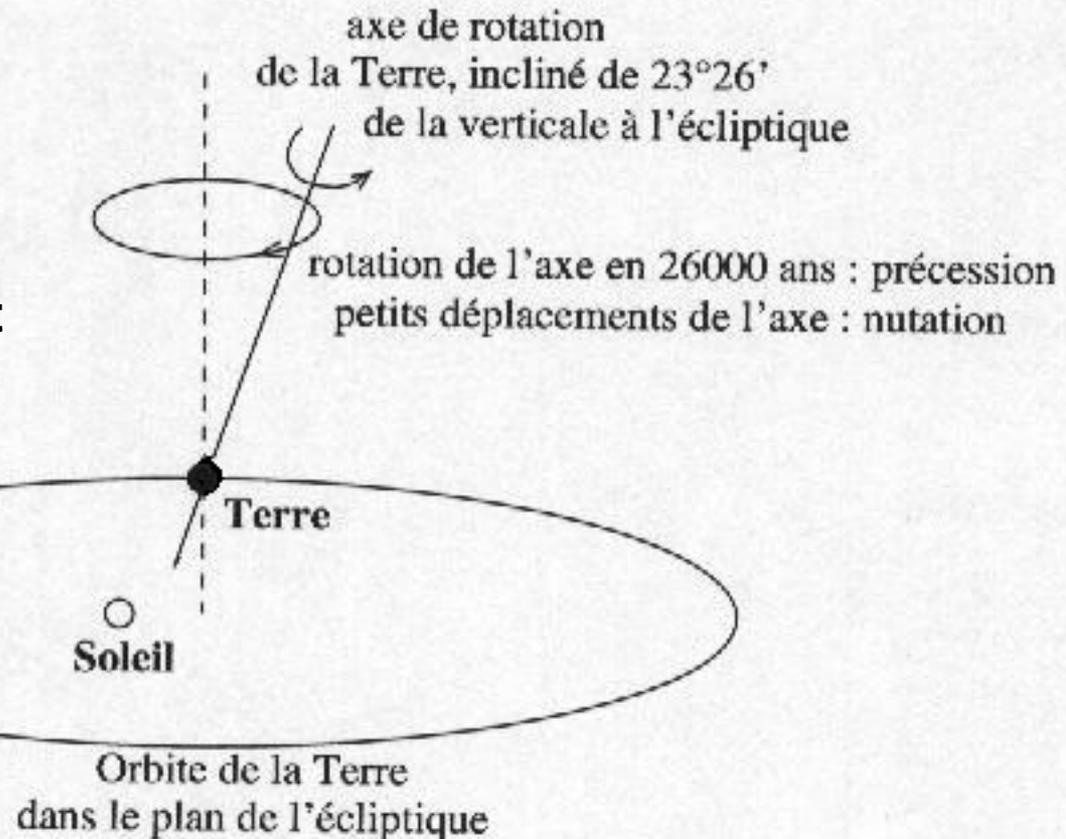
L'équation du temps



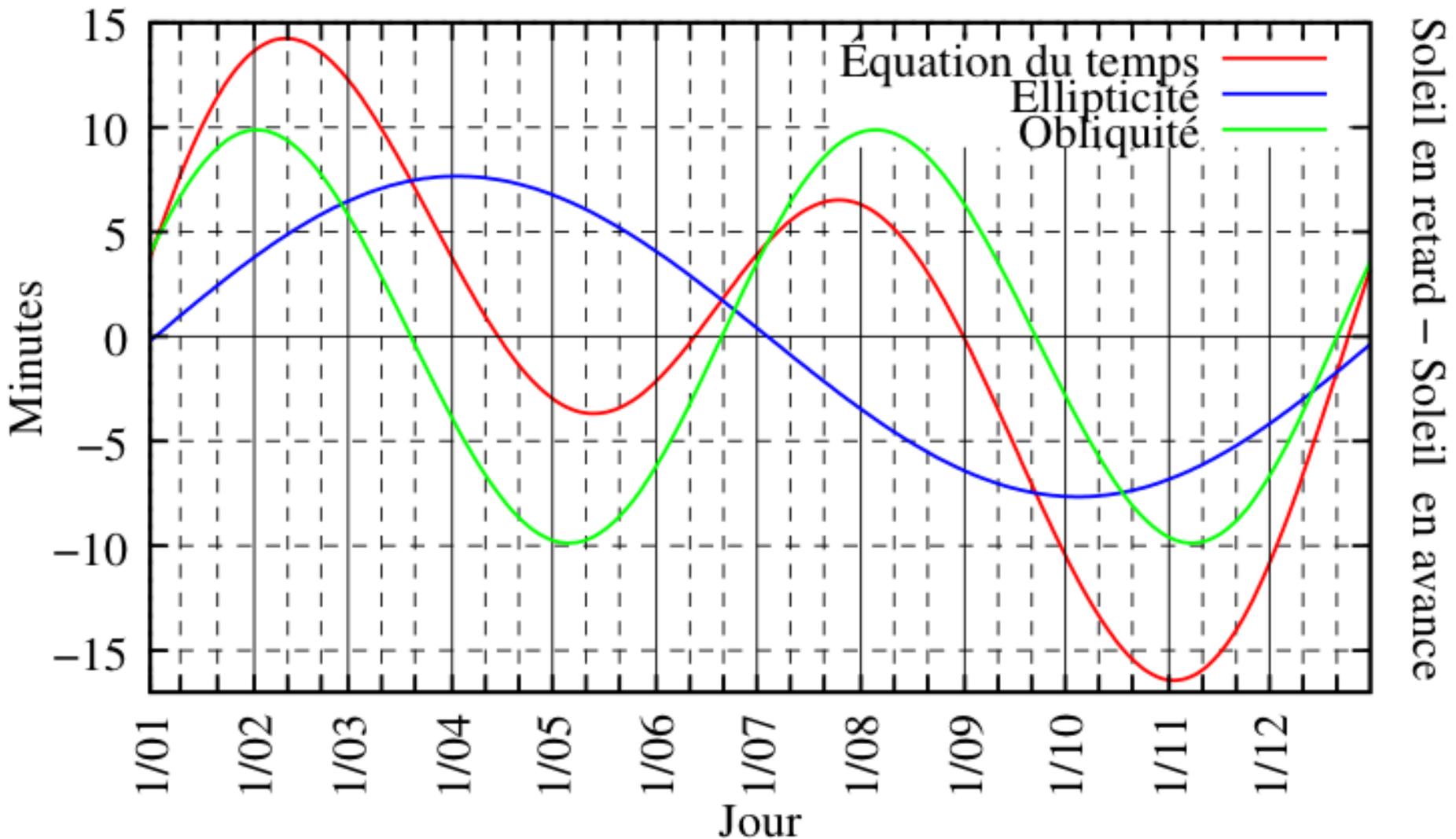
Elle traduit l'écart, variable au cours de l'année, existant entre le temps solaire moyen (horloge parfaitement réglée) et le temps solaire vrai (cadran solaire).

Mouvement de la Terre autour du Soleil :

- **Orbite elliptique (plutôt que circulaire) ;**
- **L'inclinaison de son axe de rotation sur le plan de l'orbite, qui est la cause dominante.**



L'équation du temps



Soleil en retard – Soleil en avance

TEMPS MOYEN = TEMPS VRAI + EQUATION DU TEMPS



L'image ci-contre montre l'effet de l'équation du temps. On a superposé des images du Soleil prises de 10 jours en 10 jours le matin à la même heure.

Concrétisation de l'équation du temps dans le ciel de Crimée
Crédit: V. Rumyantsev/observatoire de Naucsny

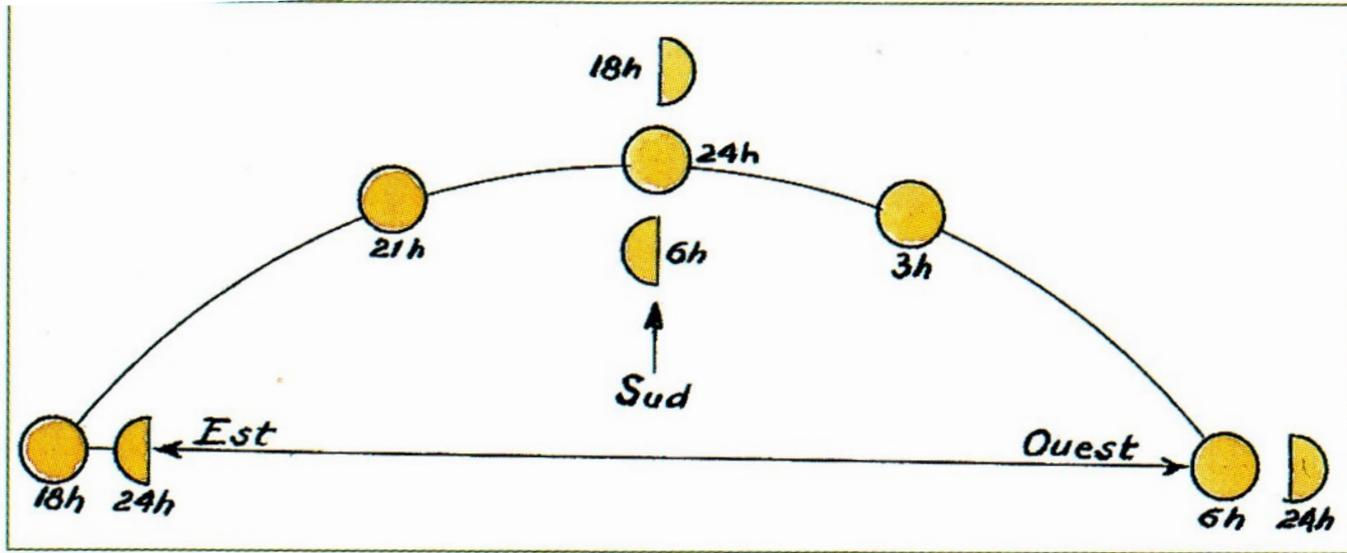
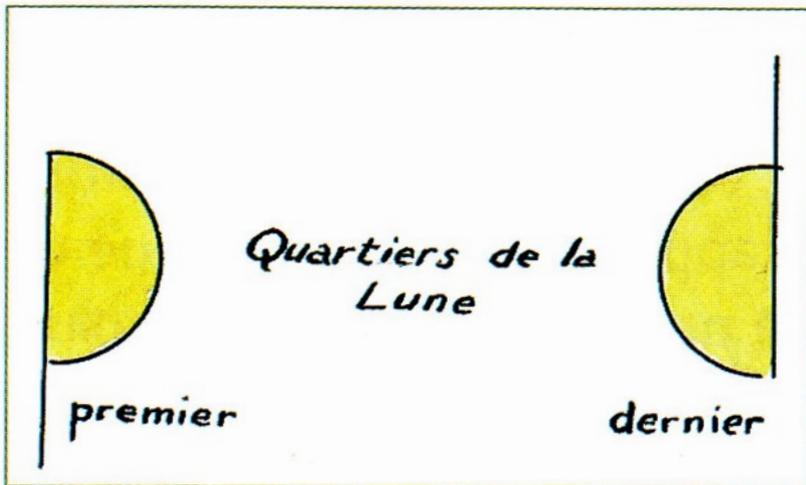


Fig. I-10

p



La Lune

d

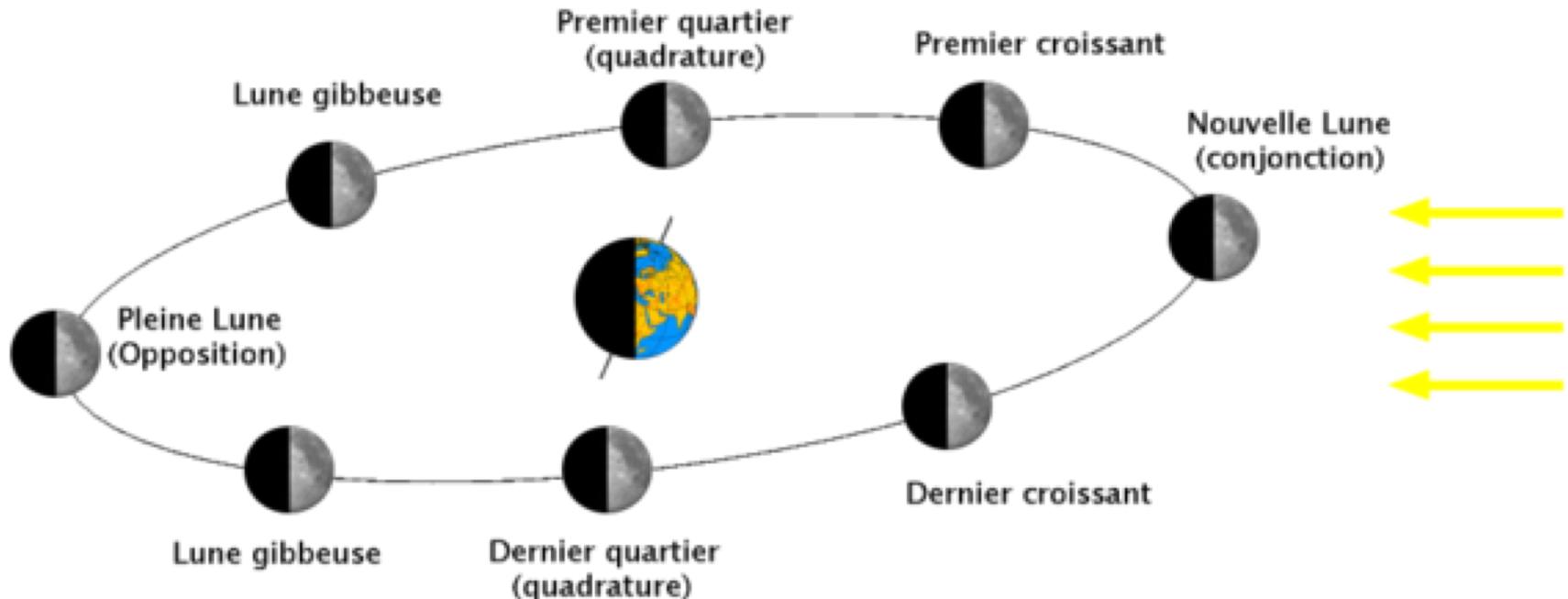
Fig. I-11

Les Phases de la Lune

La durée moyenne d'une lunaison, c'est-à-dire entre deux nouvelles Lunes consécutives (mois synodique), est de 29j 12h 44m 2,9s (29,53 jours).

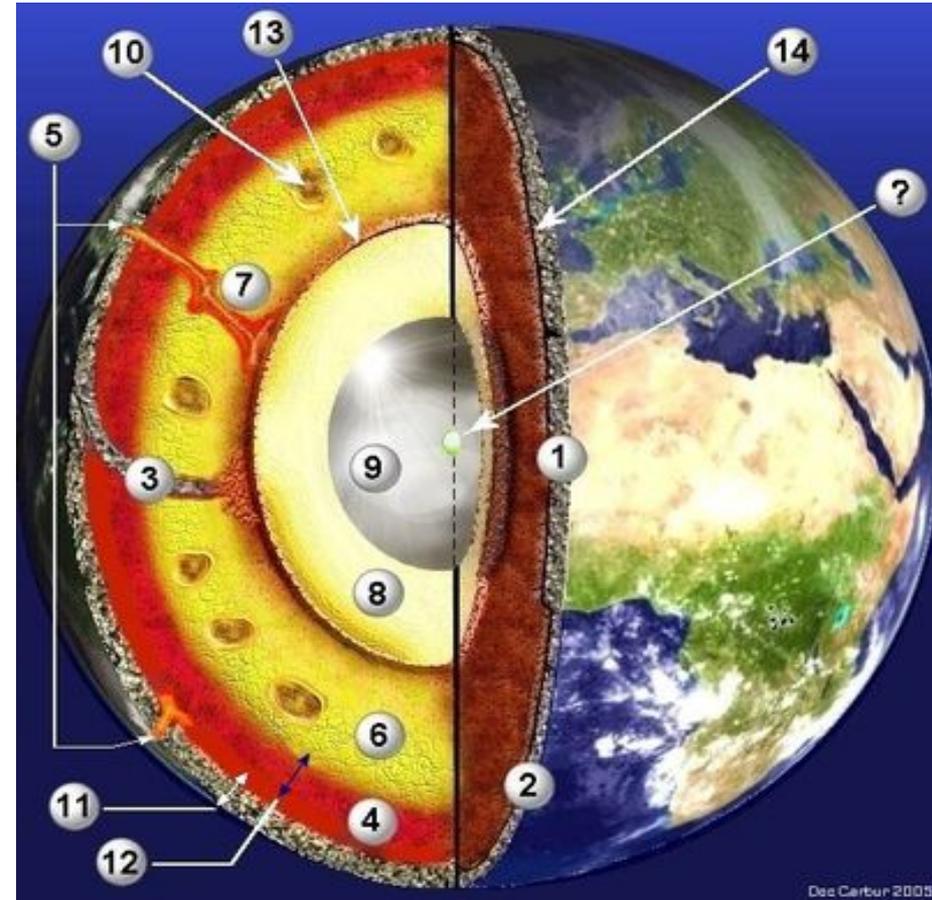
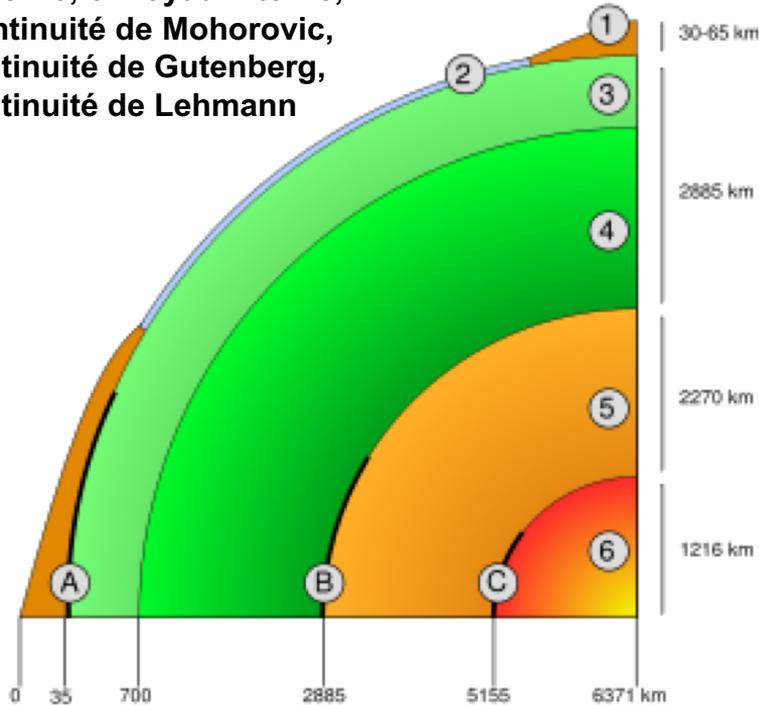
Dans l'hémisphère nord, lors de la phase ascendante de la Lune, c'est la partie **droite** qui est illuminée, lors de la phase descendante, c'est la partie **gauche** qui est illuminée. Dans l'hémisphère sud, c'est l'inverse.

Il vaut mieux donc retenir et c'est valable dans les deux hémisphères: lors de la phase ascendante de la Lune, c'est la partie **ouest** qui est illuminée, lors de la phase descendante, c'est la partie est qui **est** illuminée.



Champ magnétique de la terre

Structure de la Terre. 1. croûte continentale, 2. croûte océanique, 3. manteau supérieur, 4. manteau inférieur, 5. noyau externe, 6. noyau interne, A : Discontinuité de Mohorovic, B: Discontinuité de Gutenberg, C: Discontinuité de Lehmann



- (1) Croûte continentale
- (2) Croûte océanique
- (3) Zone de subduction
- (4) Manteau supérieur
- (5) Éruptions sur des zones de volcanisme actif
- (6) Manteau inférieur
- (7) Panache de matière plus chaude

- (8) Noyau externe
- (9) Noyau interne
- (10) Cellules de convection du manteau
- (11) Lithosphère :
- (12) Asthénosphère
- (13) Discontinuité de Gutenberg
- (14) Discontinuité de Mohorovicic

Champ magnétique de la terre

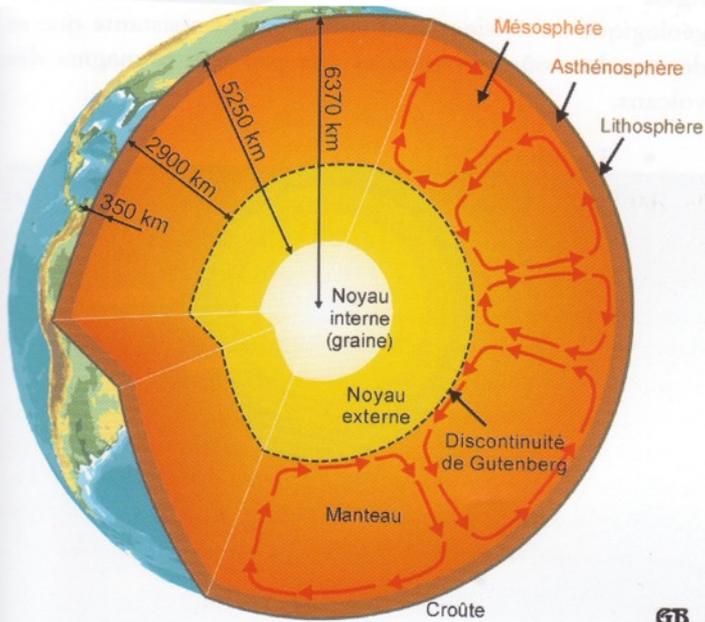
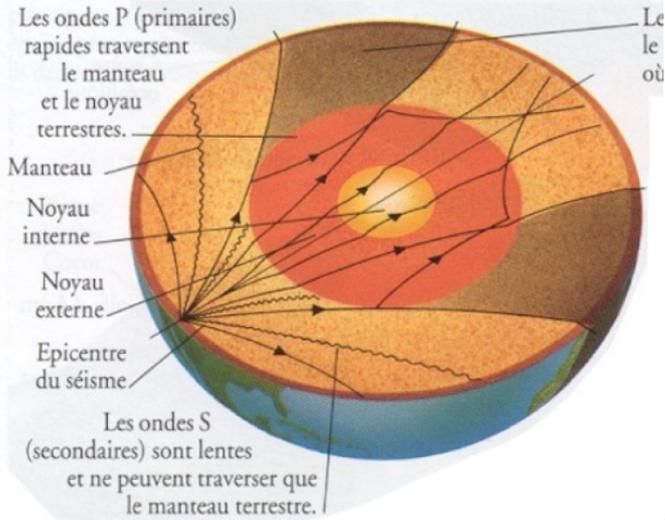
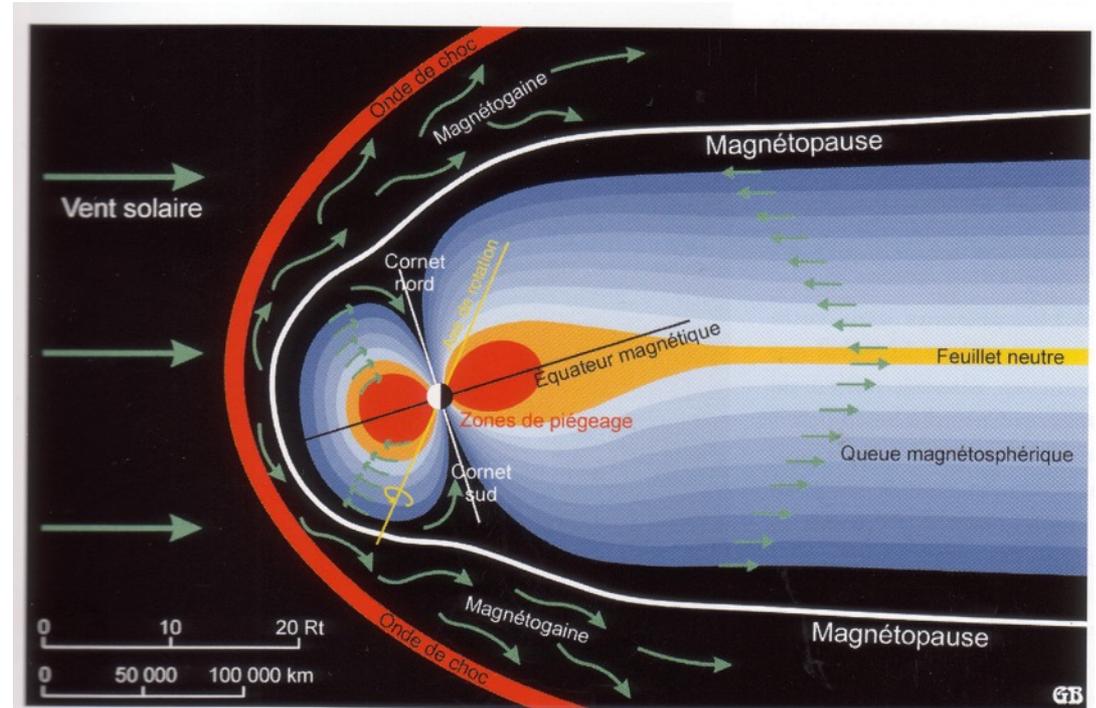


Schéma de la structure interne de la Terre.
© Gérard BODINEAU.

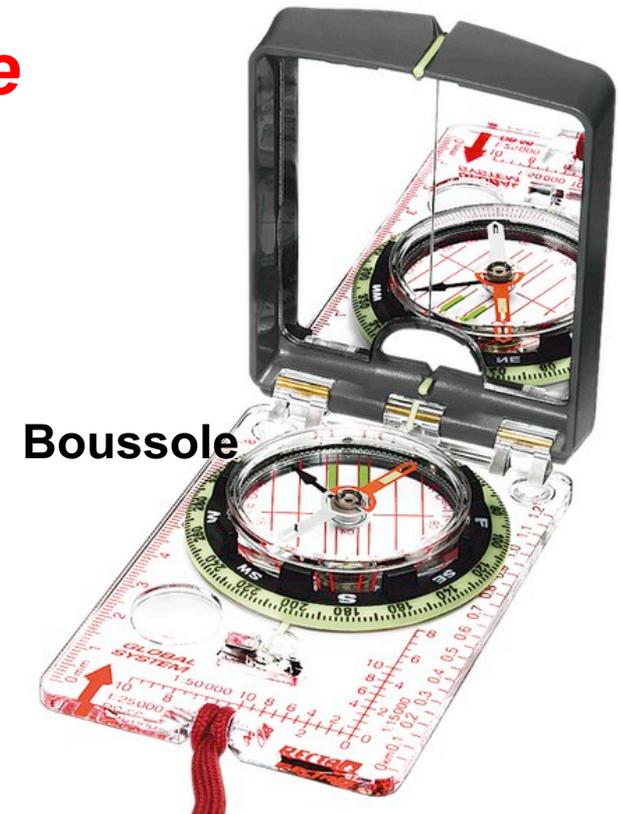
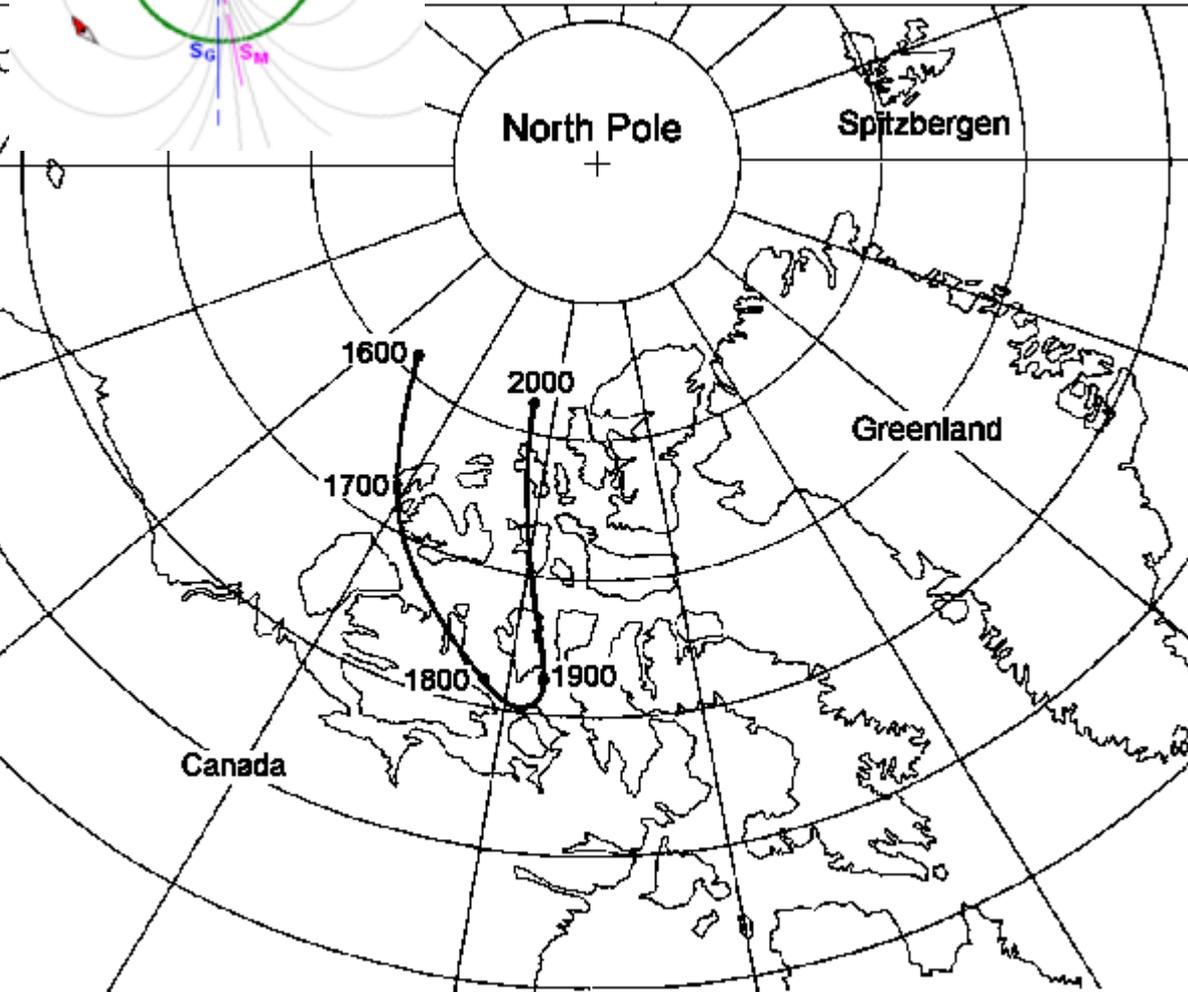
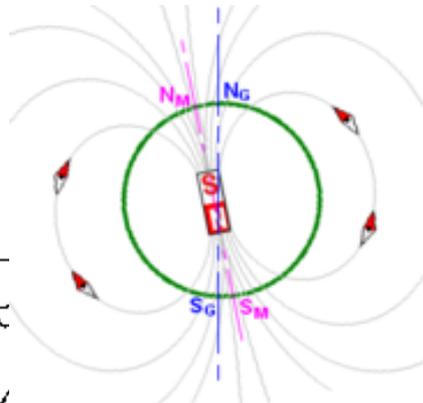
Effet dynamo



La dynamo terrestre est un phénomène physique expliquant la formation du champ magnétique terrestre, par l'induction produite par les mouvements des alliages de fer et de nickel en fusion dans la partie liquide du noyau de la Terre.

Champ magnétique de la terre

Mouvement du pôle Nord magnétique



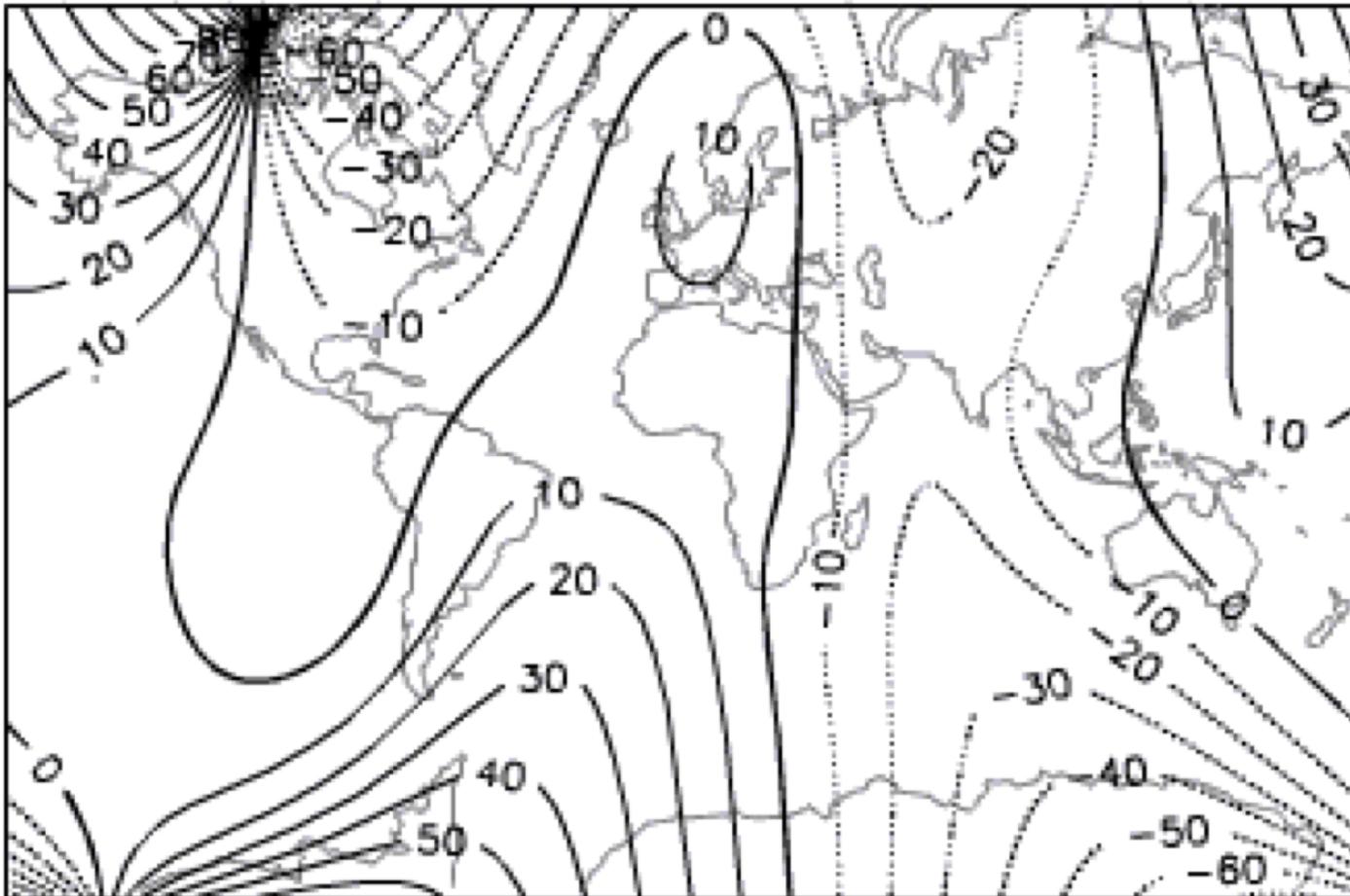
Boussole

Déclinaison magnétique
Déviation de la direction
du pôle nord et du pôle
magnétique
En France très faible : $< 20'$
Sauf au cap Corse 2°

Variation de la déclinaison magnétique

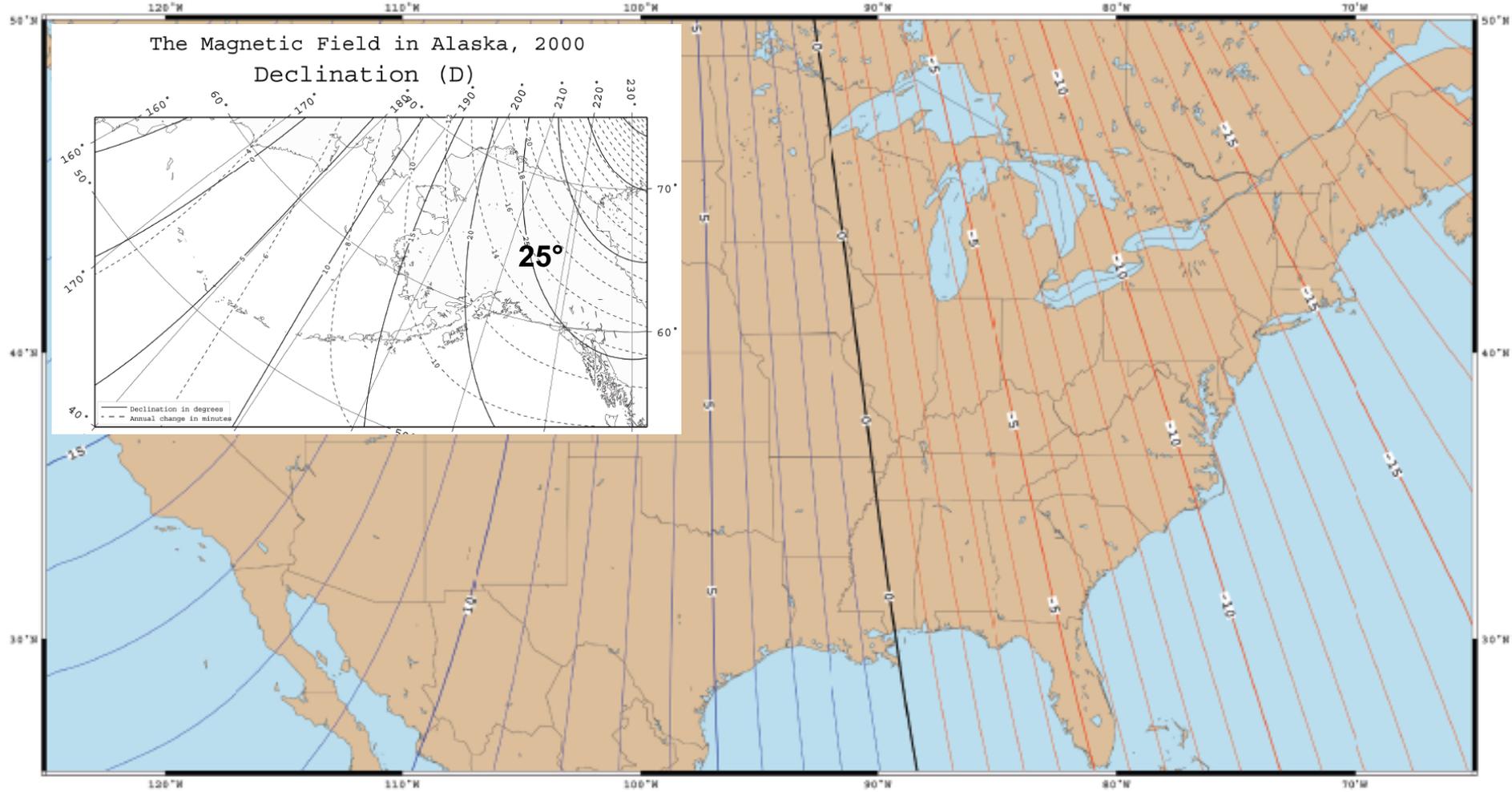
1590

Declination (degrees east)

<http://geomag.usgs.gov>

Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957–990.

Magnetic Declination for the U.S. 2004



Mercator Projection
Contours of Declination of the Earth's magnetic field. Contours are expressed in degrees. Contour Interval: 1 Degree (Positive declinations in blue, negative in red)
Produced by NOAA's National Geospatial Data Center

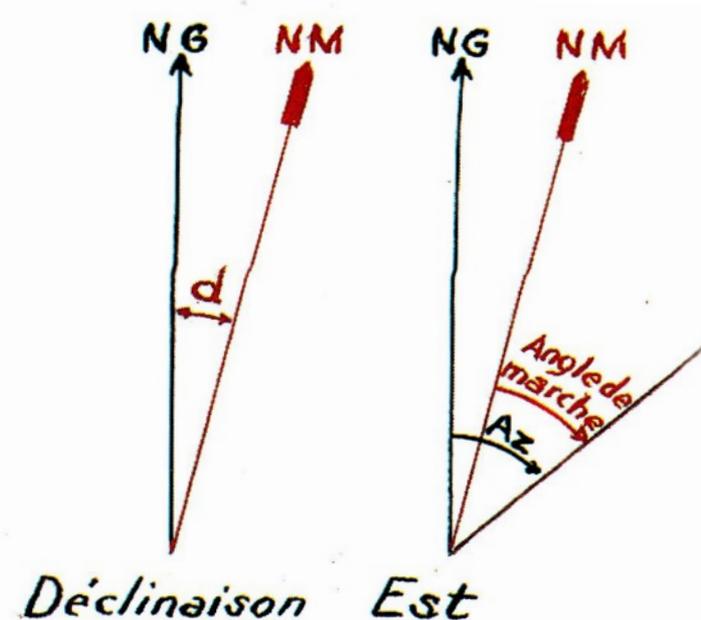
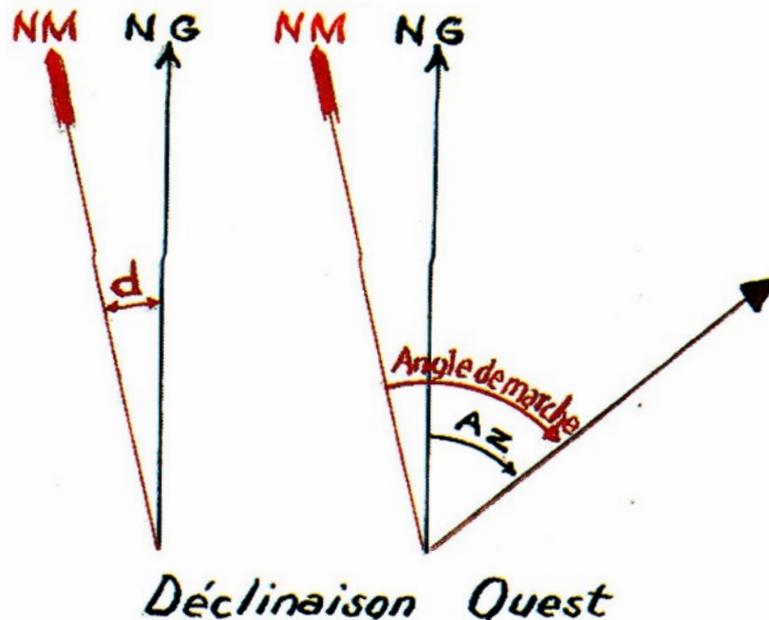
<http://www.ngdc.noaa.gov>

Based on the International Geomagnetic Reference Field (IGRF), Epoch 2000 updated to December 31, 2004

The IGRF is developed by the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V

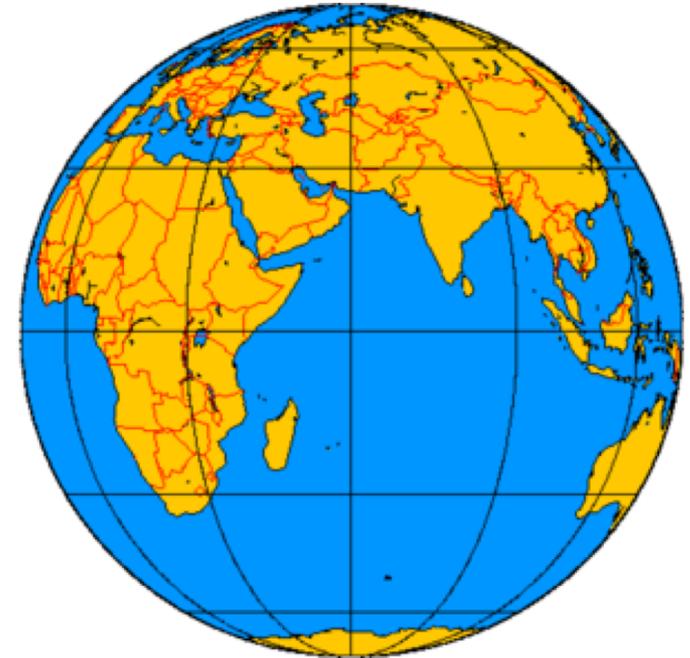
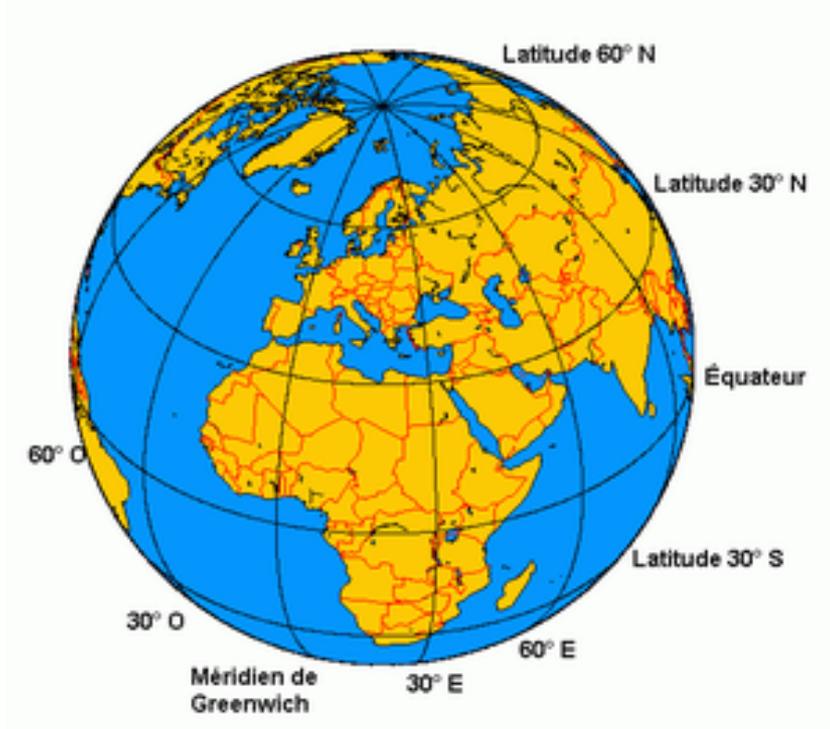
Déclinaison, correction

- I. Ouest : Angle de marche = Azimut + Déclinaison Ouest
 II. Est: Angle de marche = Azimut - Déclinaison Est

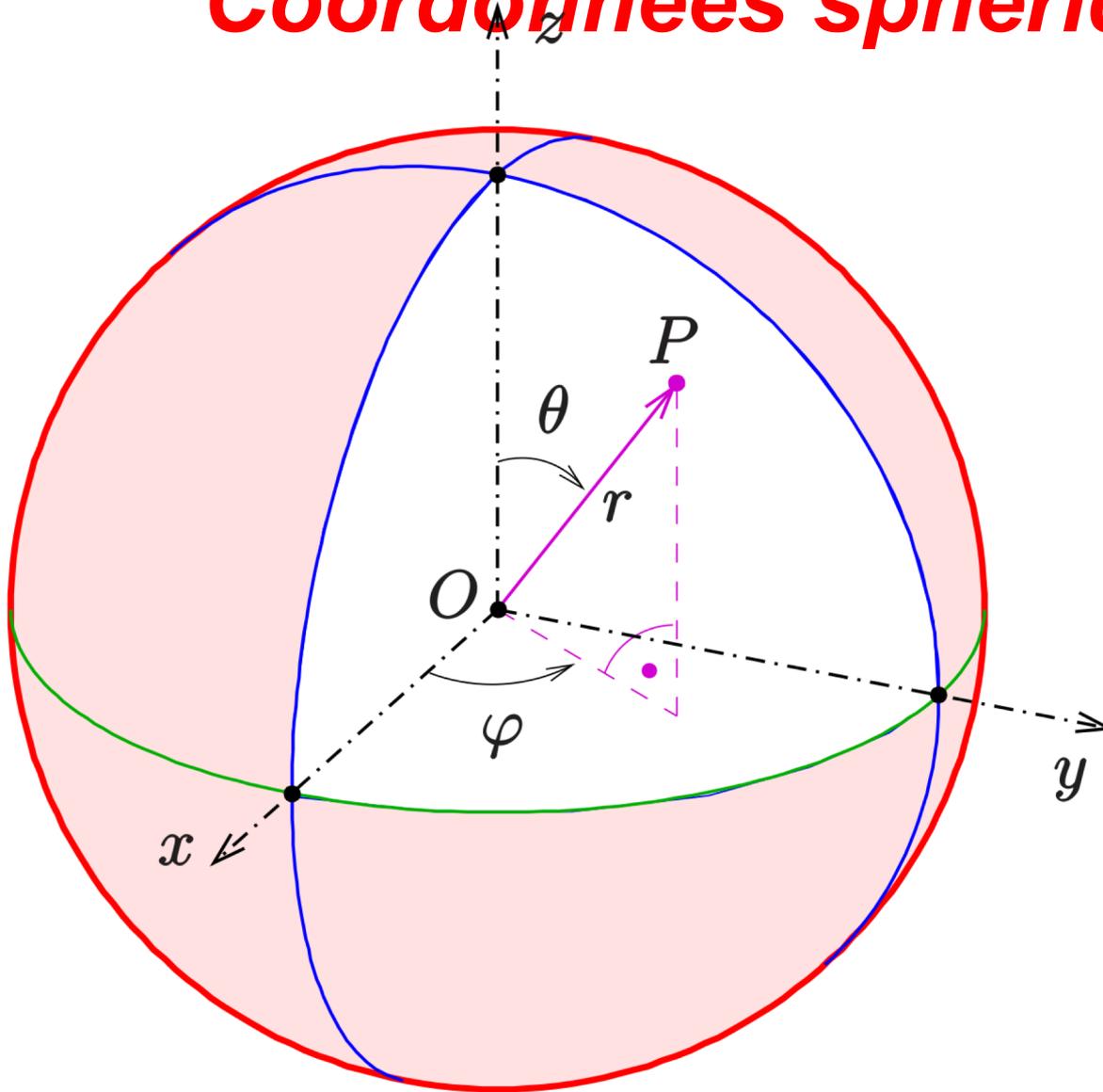


Année	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2015	2020
Déclinaison	9,25°	2,22°	-6,72°	-16,39°	-21,80°	-20,63°	-15,21°	-8,15°	-2,24°	-0,27°	0,41°
Dérive annuelle	-0,14°	-0,15°	-0,21°	-0,15°	-0,04°	+0,09°	+0,07°	+0,12°	+0,13°	+0,14°	+0,13°

Systemes de coordonnées et projections



Coordonnées sphériques

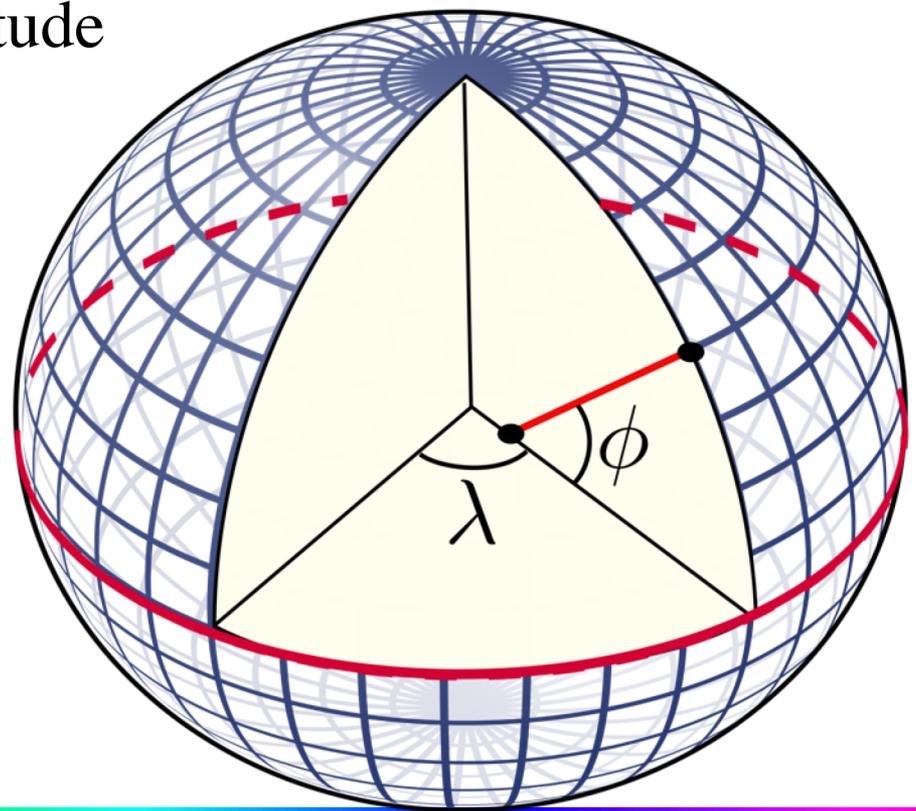
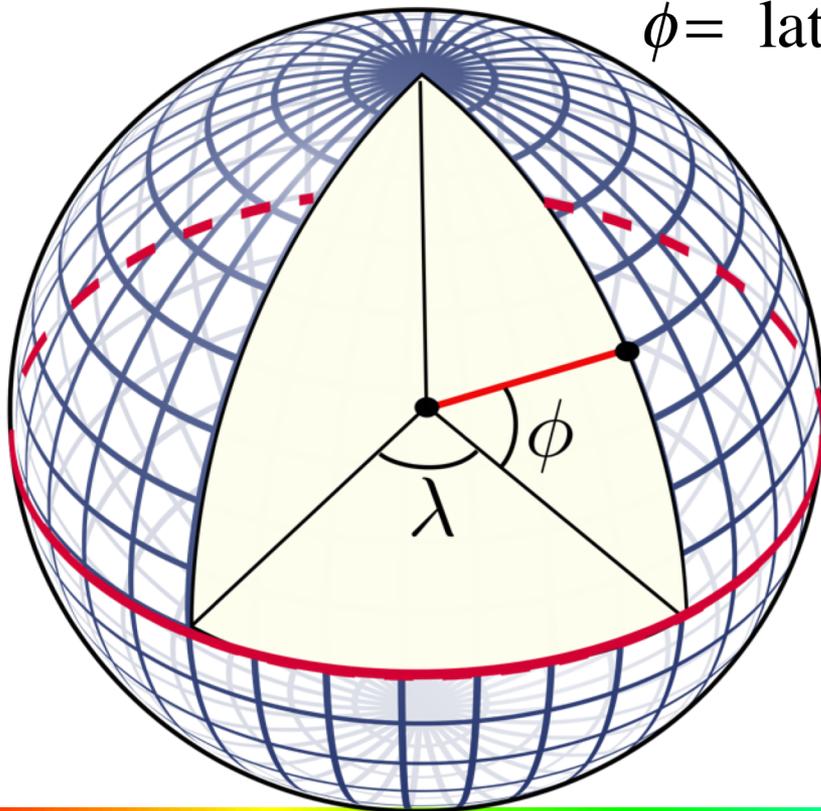


Latitudes

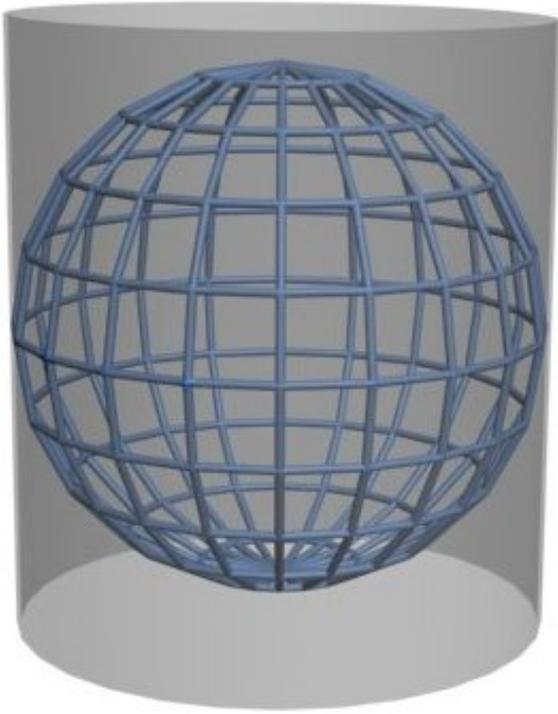
- I. Latitude sphérique ou géocentrique
- II. Géodésique latitude (\approx géographique)

$\lambda =$ longitude

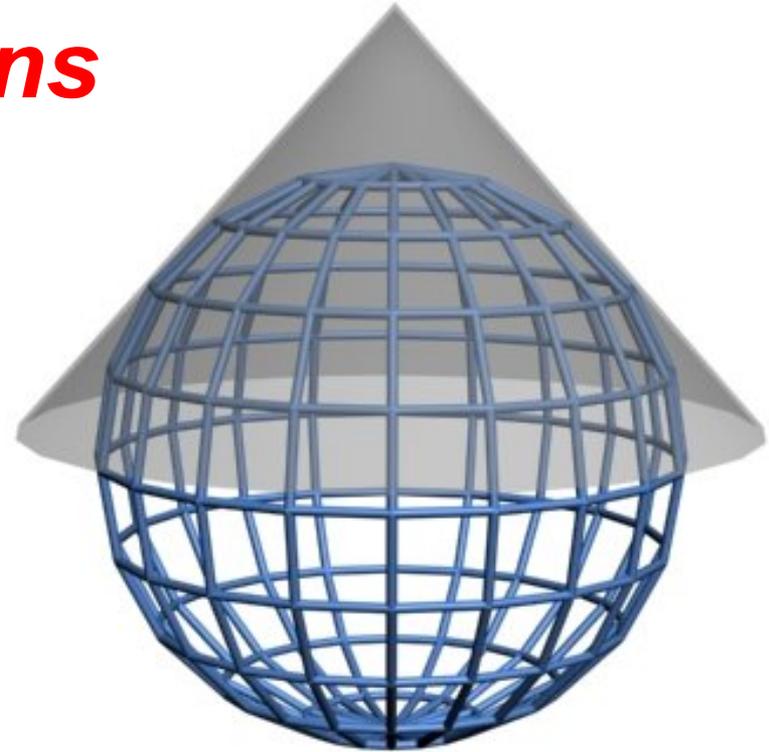
$\phi =$ latitude



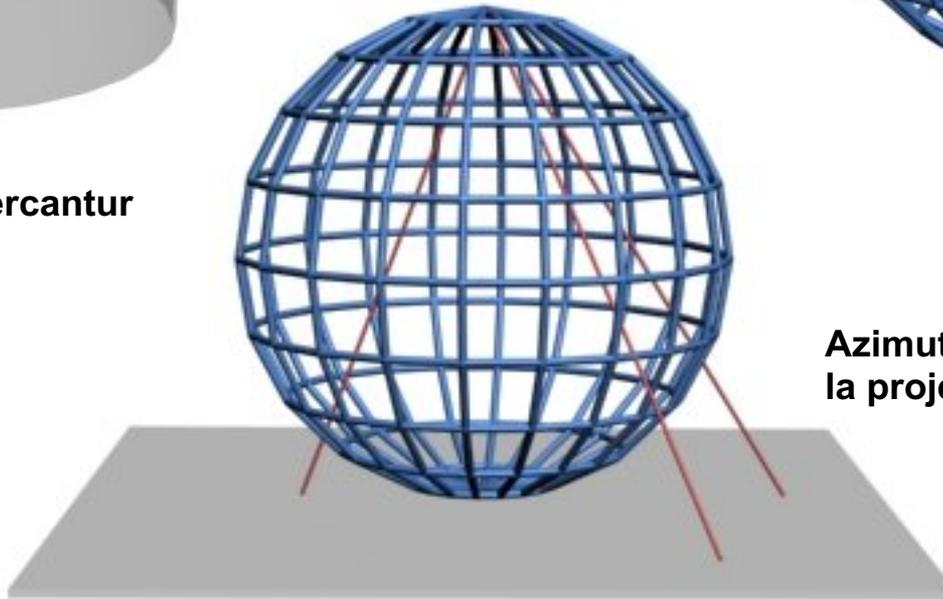
Projections



Cylindrique, Mercantur



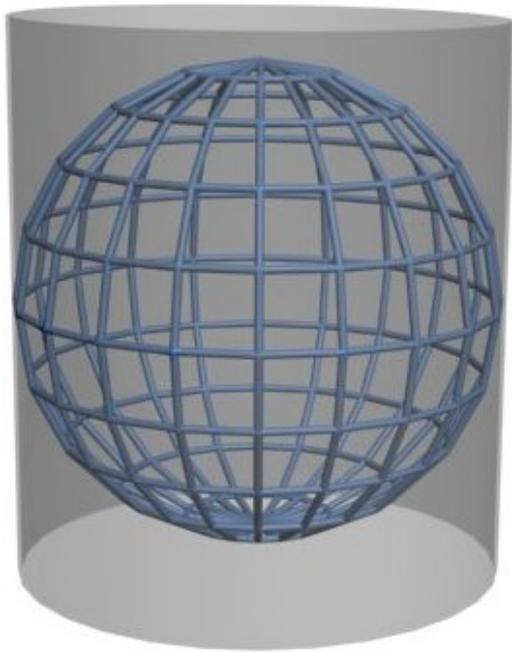
Conique, Lambert



Azimutal,
la projection stéréographique

Mercatur

Projection cylindrique



Géodésie

I. Géoïde

1. Surface équipotentielle du champ de la pesanteur
2. Totalement irrégulière.
3. Utilisation est réservée à des applications scientifiques.

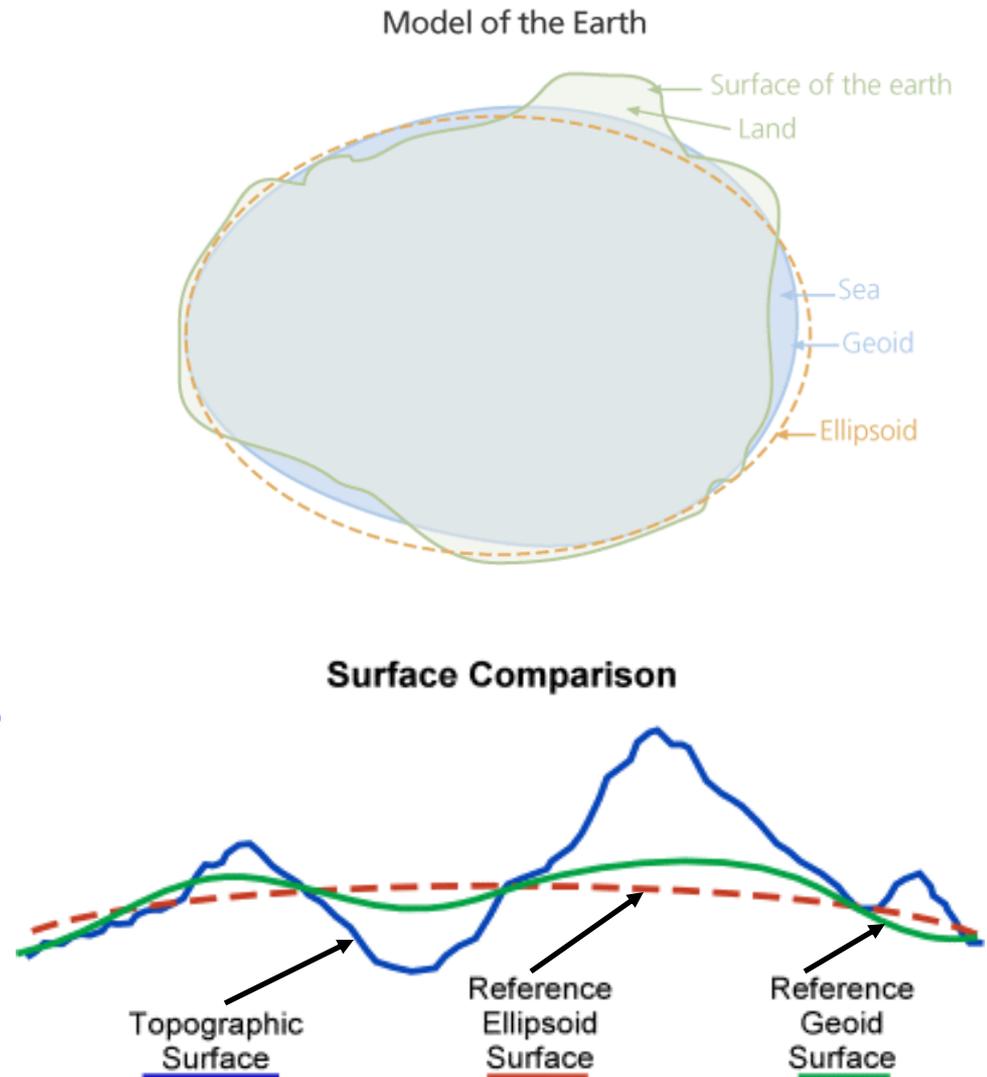
II. Ellipsoïde de révolution

1. Il faut le positionner correctement en fonction du champ de la pesanteur.
2. L'ensemble de ces paramètres forme ce qu'on appelle en géodésie le **datum géodésique**.
3. Les ellipsoïdes sont choisis afin de minimaliser l'écart avec le géoïde.
4. Leur particularité est de ne minimaliser cet écart que localement. On comprend donc que **les datum géodésiques** soient différents pour chaque pays. Par conséquent, les centres de tous ces ellipsoïdes sont à chaque fois différents, et ne coïncident pas avec le centre de masse de la terre

III. **WGS84 (World Geodetic System)**, soit géocentrique.

Earth Surface: Ellipsoid, Geoid, Topo

- The *reference ellipsoid* surface (a map of average sea level).
- The *reference geoid* surface (a mean sea level surface).
- The *real surface of the Earth* (the ground) also called the *topographic surface*.



WGS reference system

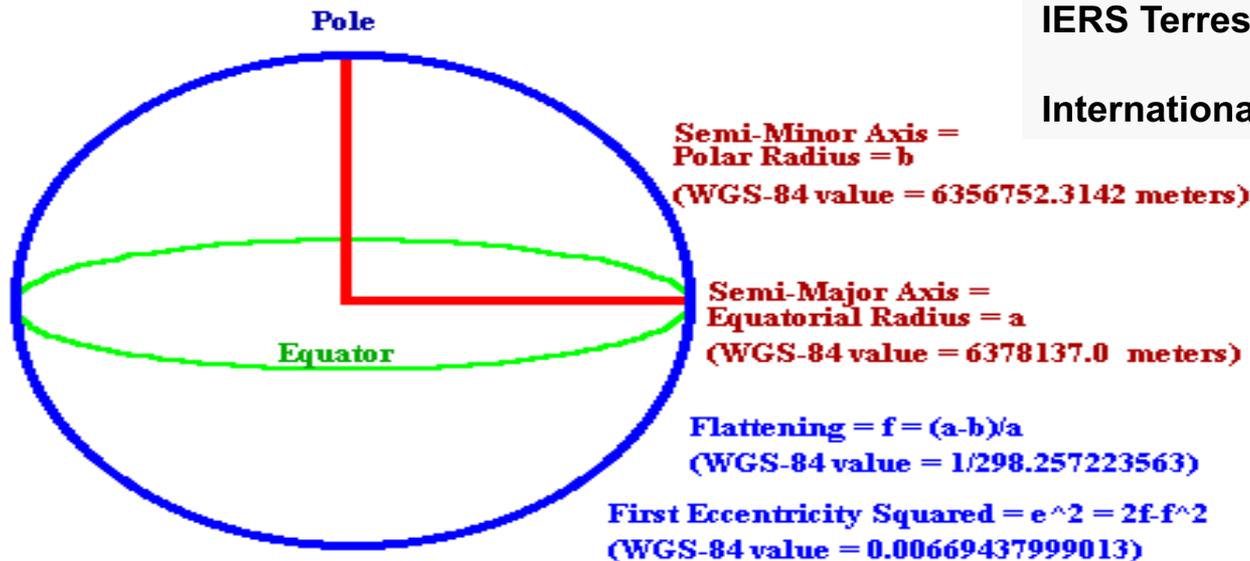
WGS 84 Coordinate System is a Conventional Terrestrial Reference System (CTRS)

- I. It is geocentric, the center of mass being defined for the whole Earth including oceans and atmosphere
- II. Its orientation was initially given by the Bureau International de l'Heure (BIH) orientation of 1984.0
- III. Its time evolution in orientation will create no residual global rotation with regards to the crust

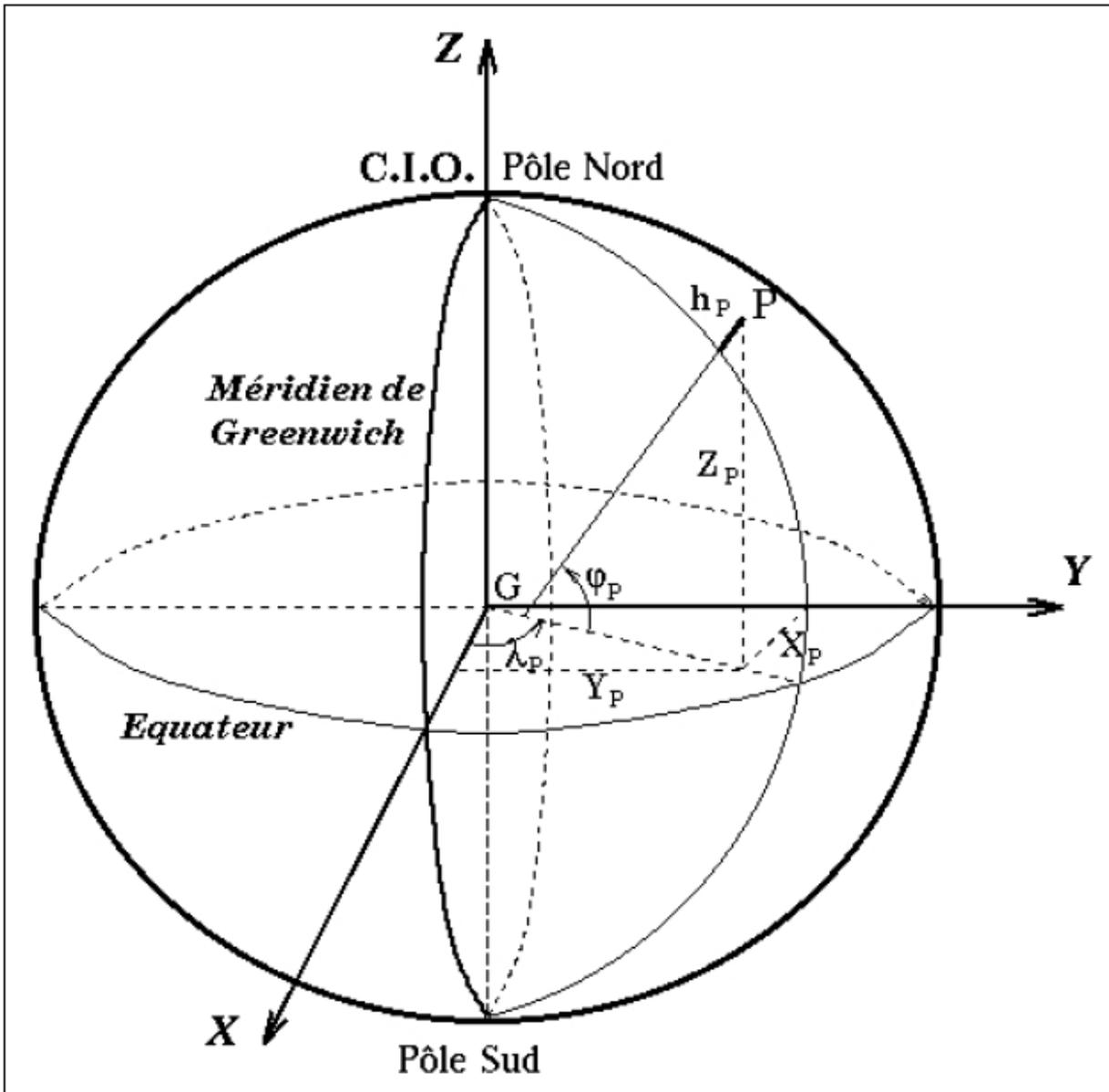
WGS 84 = ITRF±cm

IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF)

International Earth Rotation Service (IERS)



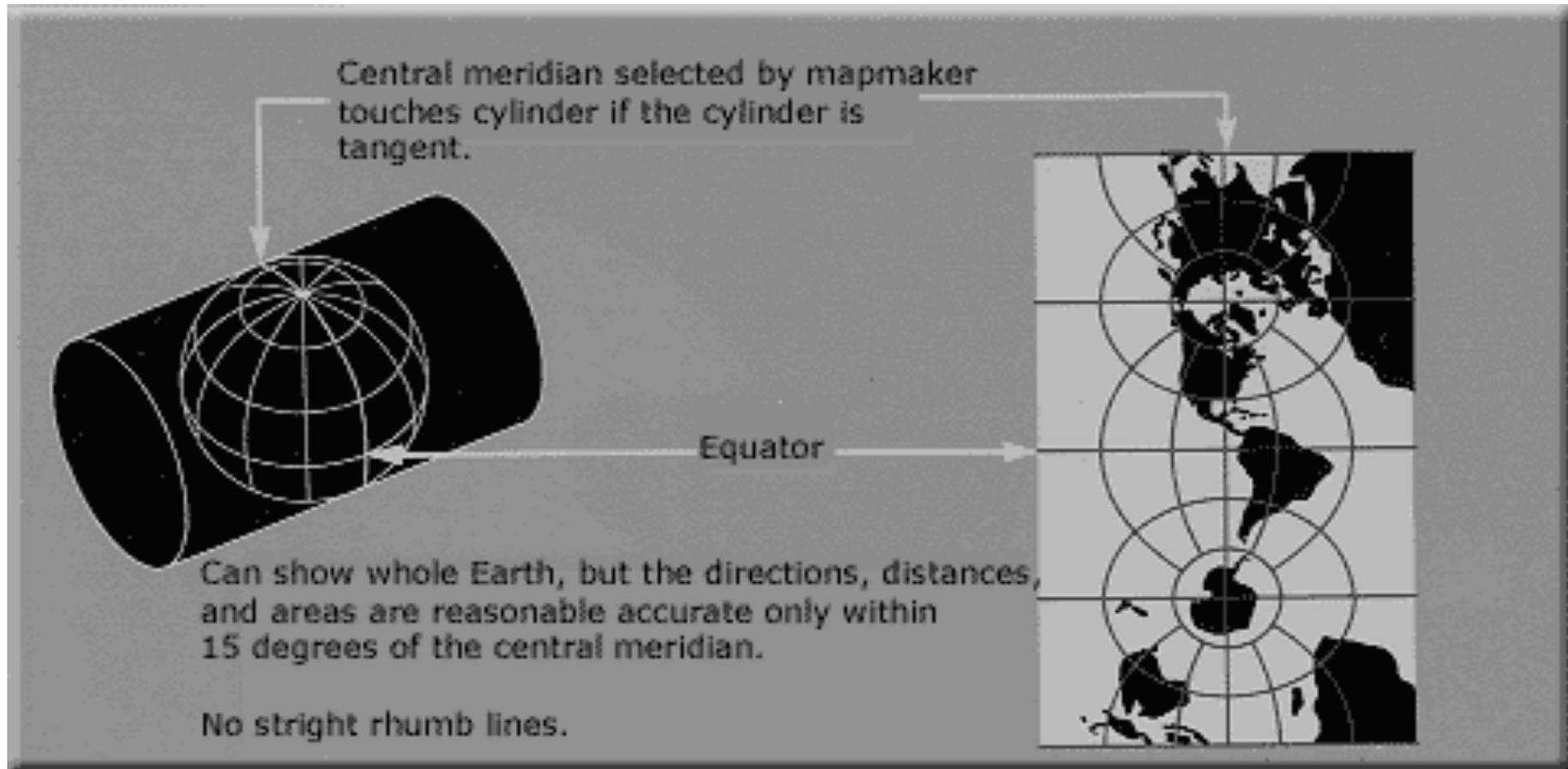
Ellipsoidal Parameters



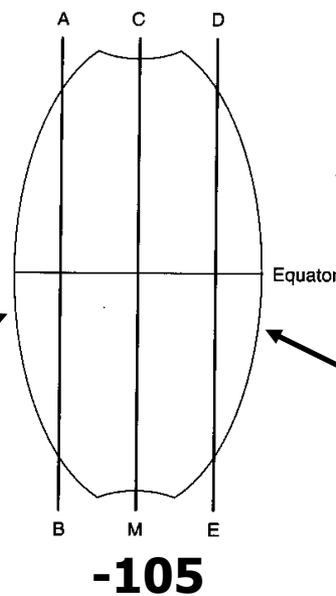
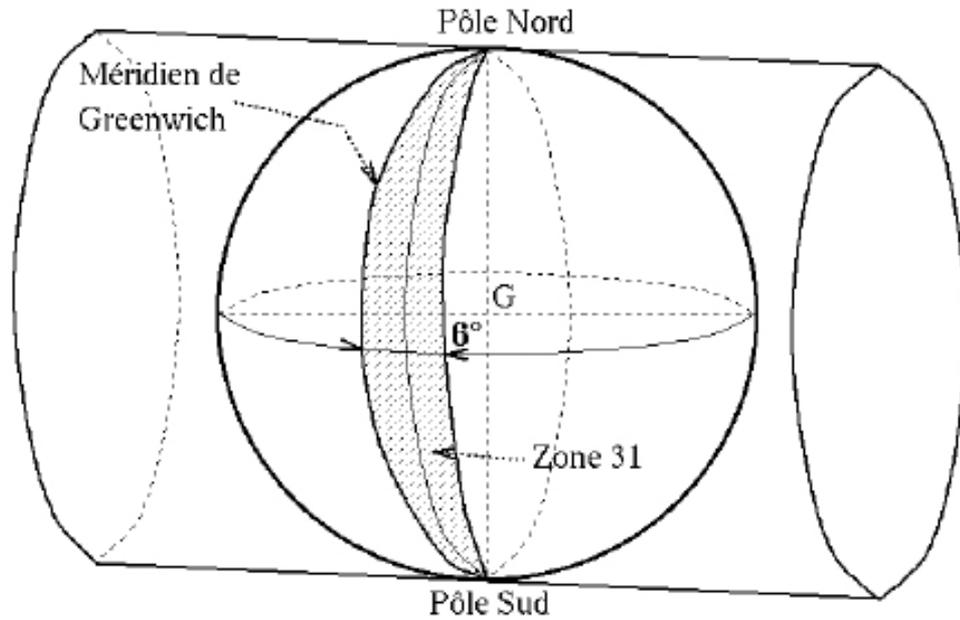
WGS84

Figure 1 : le système de référence WGS84

Universal Transverse Mercantur System UTM



UTM

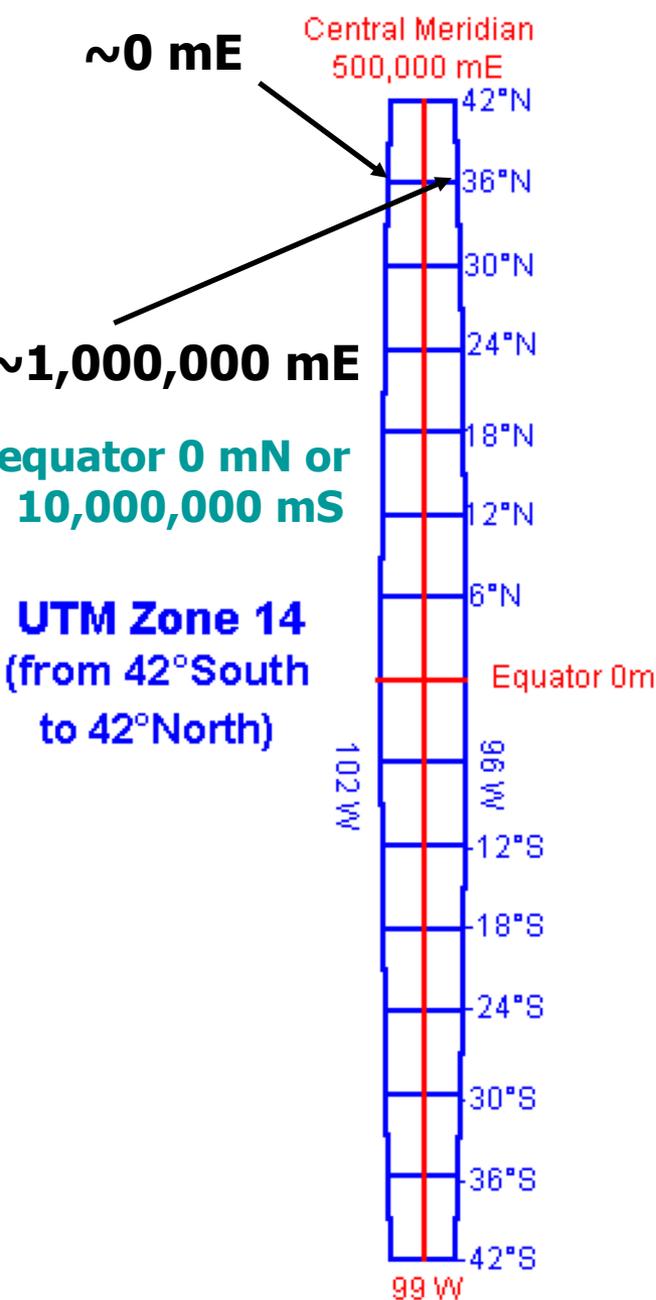


CM: central meridian
AB: standard meridian
DE: standard meridian

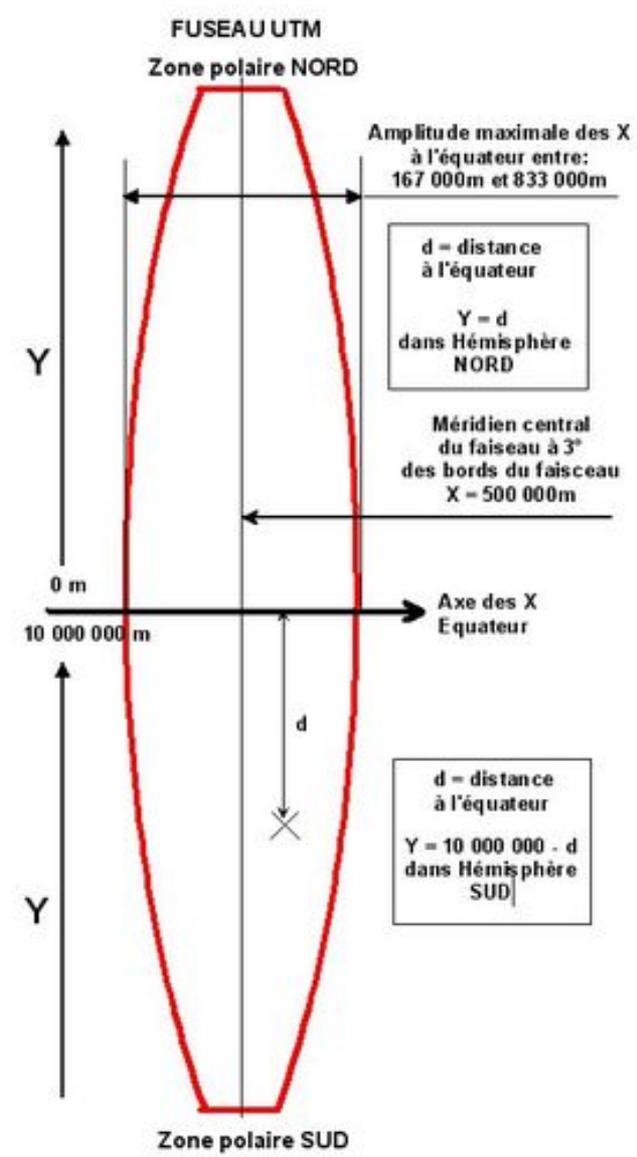
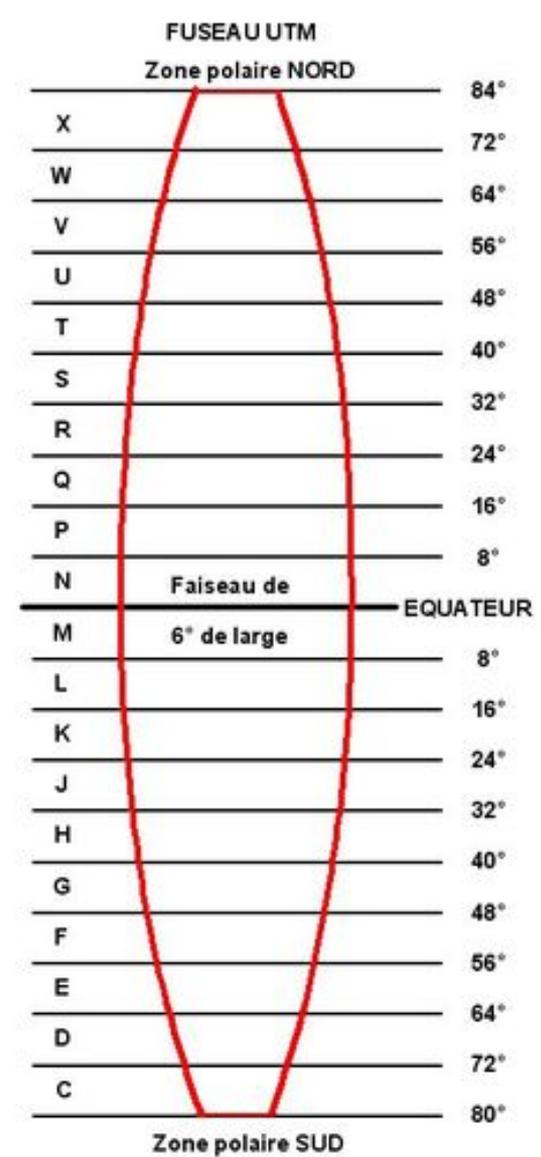
-108

-105

-102

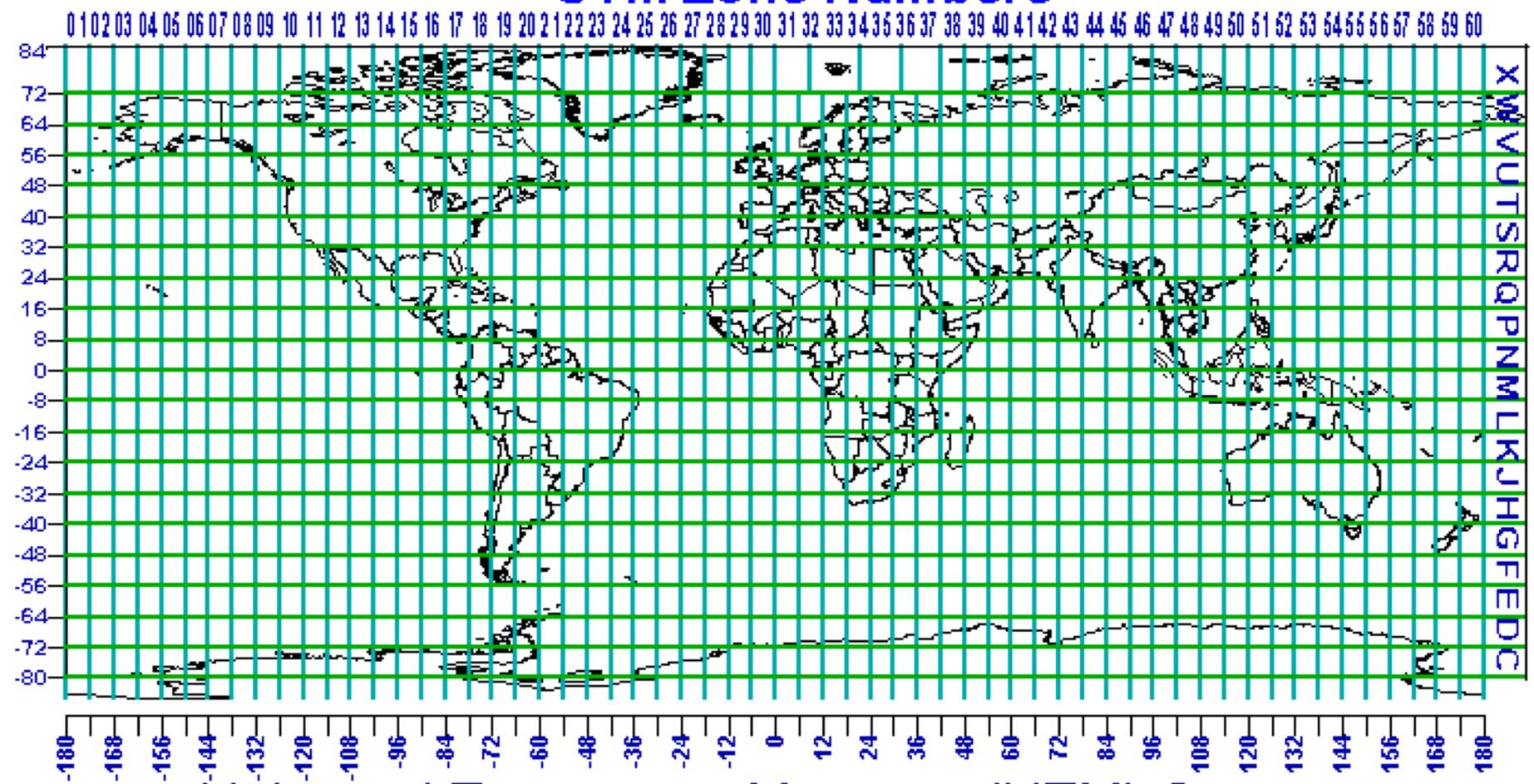


Projection UTM: Le globe est divisé en 60 faisceaux de 6° de large. Chaque faisceau est à son tour divisé en 20 bandes



UTM Zone Numbers

UTM Zone Numbers



UTM Zone Designators

Universal Transverse Mercator (UTM) System

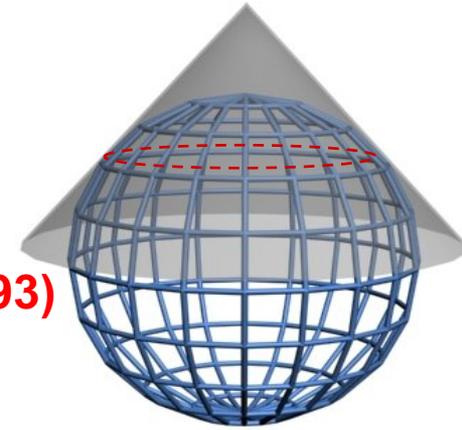
Grille UTM et Lambert

- I. **Système de coordonnées utilisé pour localiser chaque point à l'intérieur d'une zone UTM. Les coordonnées sont définies comme un nombre de mètres vers l'est et vers le nord par rapport à l'angle inférieur gauche. Ces nombres X (easting) et Y (northing), le numéro de fuseau et l'hémisphère sont suffisants pour décrire un point sur la terre.**
- II. **X est l'abscisse des coordonnées rectangulaires d'une carte dont la valeur est exprimée en mètre ou en kilomètre par rapport à une référence prise comme origine.**
- III. **La valeur de X est prise, par convention, suffisamment élevée pour ne pas générer des valeurs négatives si l'on se déplace vers l'ouest. De sorte qu'en Lambert I, II, III et II étendu, la référence se situe sur le méridien de Paris et la valeur de X est fixée, par convention, à 600 000 mètres. De la même manière, par convention, le méridien central d'un fuseau UTM a toujours pour valeur $X = 500\,000$.**
- IV. **Un déplacement de 1 mètre vers l'est augmente la valeur de X d'une unité et un déplacement de 1 mètre vers l'ouest diminue la valeur de X d'une unité.**
- V. **Y est l'ordonnée des coordonnées rectangulaires d'une carte dont la valeur est exprimée en mètre ou en kilomètre par rapport à une référence prise comme origine.**
- VI. **La valeur de Y est prise, par convention, suffisamment élevée pour ne pas générer des valeurs négatives si l'on se déplace vers le sud. De sorte qu'en Lambert I, la valeur Y du point de référence de latitude 55 gr Nord ($49^{\circ}30'$ N) et de longitude 0 gr (Paris) est de 200 000 mètres et qu'en UTM, l'équateur a pour valeur $Y = 0$.**
- VII. **Un déplacement de 1 mètre vers le nord augmente la valeur de Y d'une unité et un déplacement de 1 mètre vers le sud diminue la valeur de Y d'une unité.**

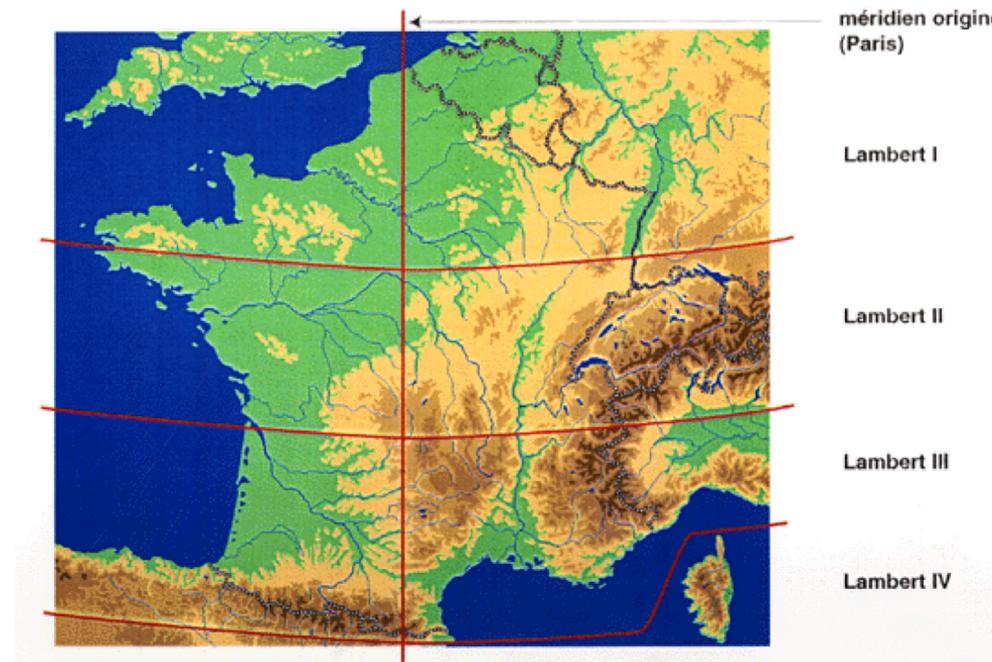
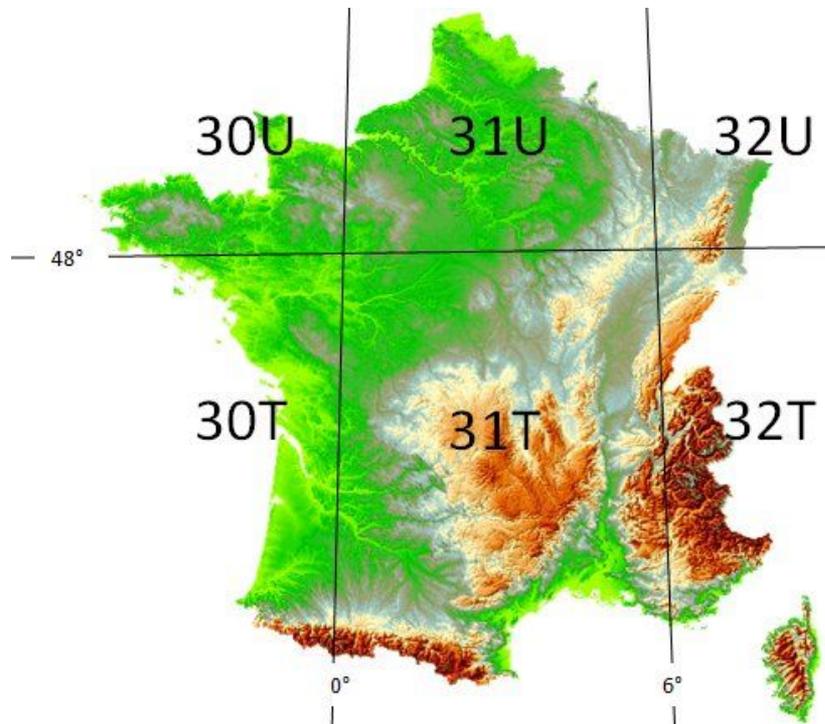
UTM coordonnées

Coordonnées UTM	Est (m)	Nord (m)	Précision (m)
32T 5643514828734	564.351	4828.743	1
32T 56435482873	564.350	4828.740	10
32T 564348287	564.300	4828.700	100
32T 5644828	564.000	4828.000	1000
32T 56482	560.000	4820.000	10000
32T 548	500.000	4800.000	100000

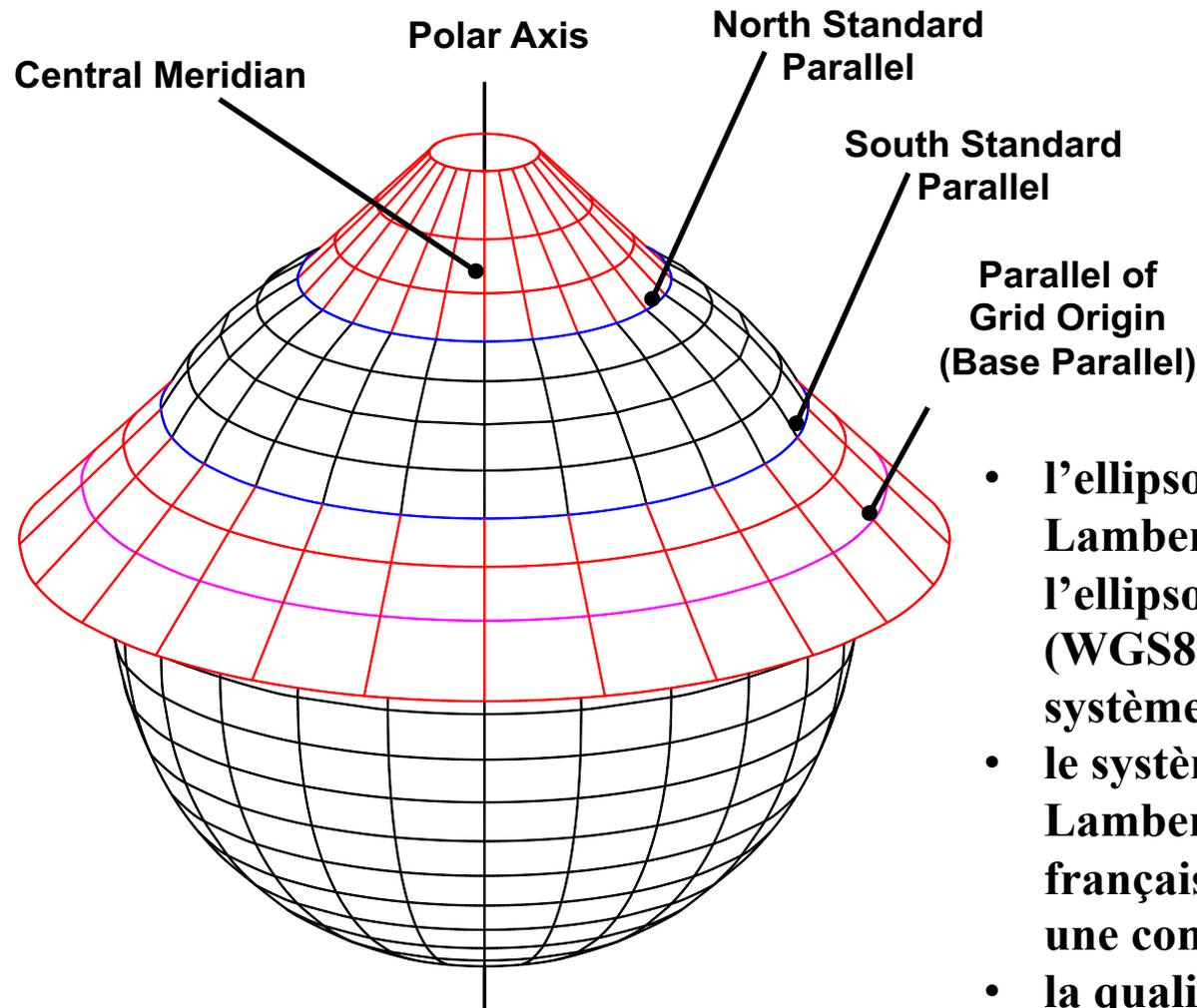
Les zones UTM et Lambert pour la France



- I. Conique conforme de Lambert 1920 => Lambert 93 (RGF93)
- II. Intersection du méridien de Paris et du parallèle origine n'est pas $x=0$ $y=0$ mais $x=600\text{km}$ $y=200\text{km}$

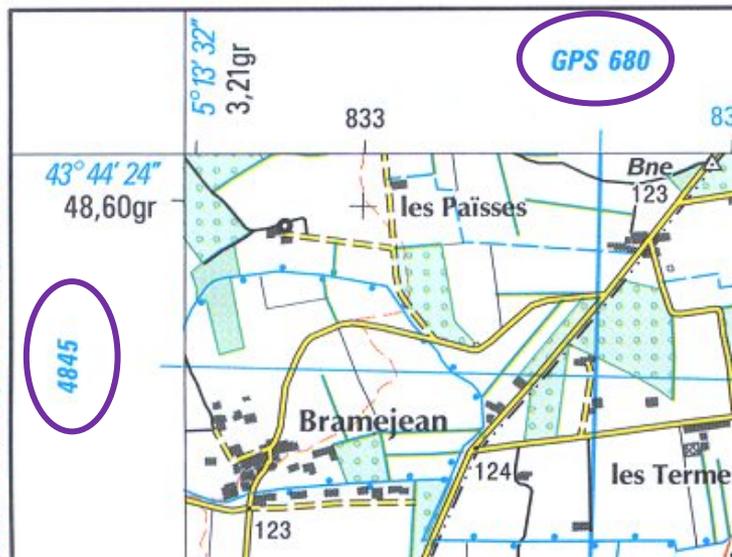


Lambert 93 (RGF93)



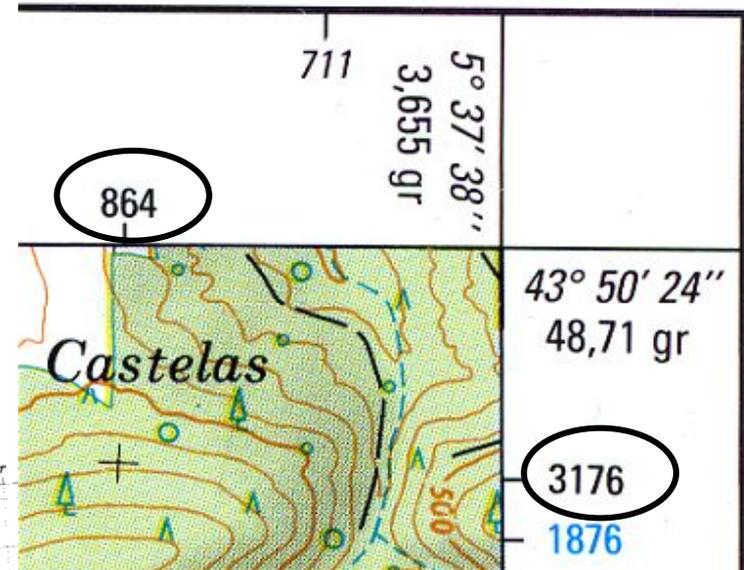
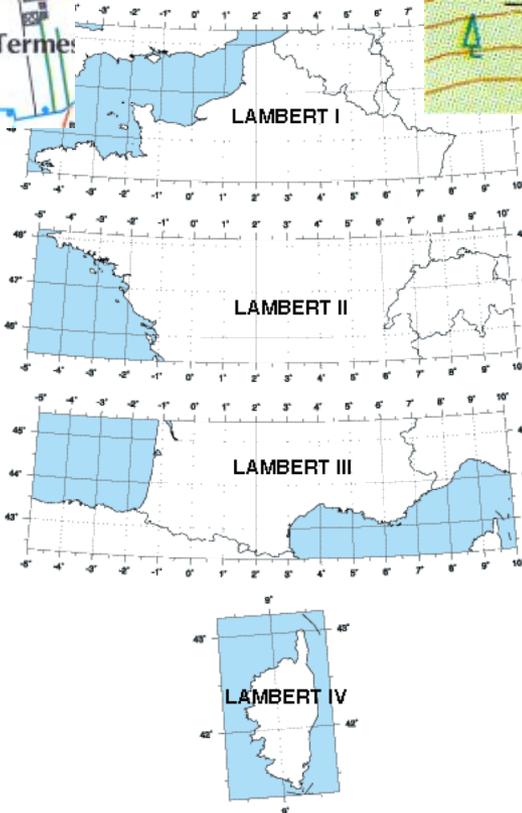
- l'ellipsoïde de référence associé au Lambert 93 (RGF93) est compatible avec l'ellipsoïde international de référence (WGS84), utilisée en particulier par le système GPS ;
- le système géodésique RGF93 du Lambert 93, en tant que déclinaison française de l'ETRS89 européen, permet une compatibilité avec ce dernier.
- la qualité de ce système de projection assure des déformations minimales sur l'ensemble du territoire métropolitain

Position donnée par un récepteur GPS.



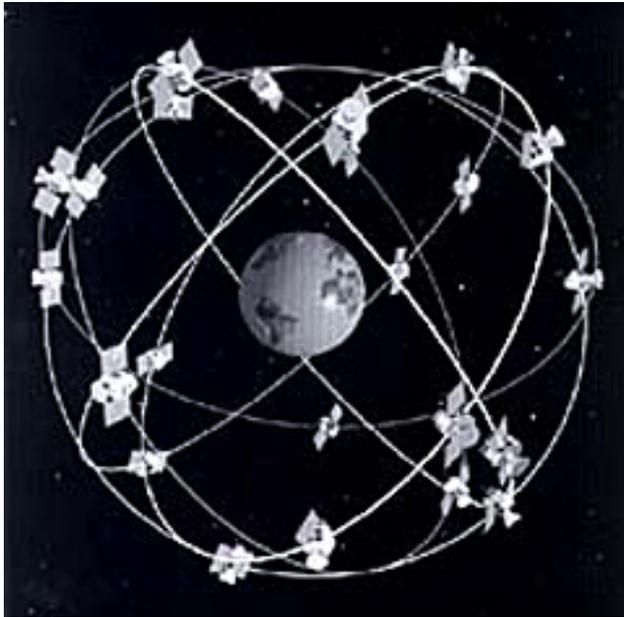
Coordonnées GPS

Les coordonnées UTM se trouvent sur le bord d'une carte IGN. Par exemple ci-dessous, les coordonnées UTM de l'intersection sont $x = 680000$ & $y = 4845000$

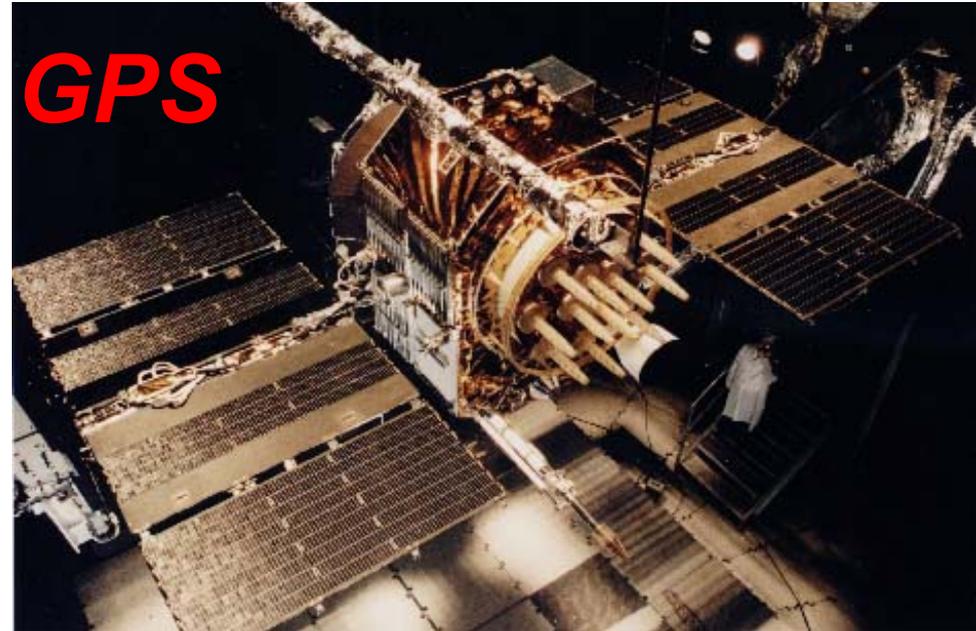


Coordonnées Lambert

Les coordonnées du système Lambert se trouvent sur le bord d'une carte IGN. Par exemple ci-dessous, les coordonnées de l'intersection sont $x = 864000$ & $y = 3176000$
:

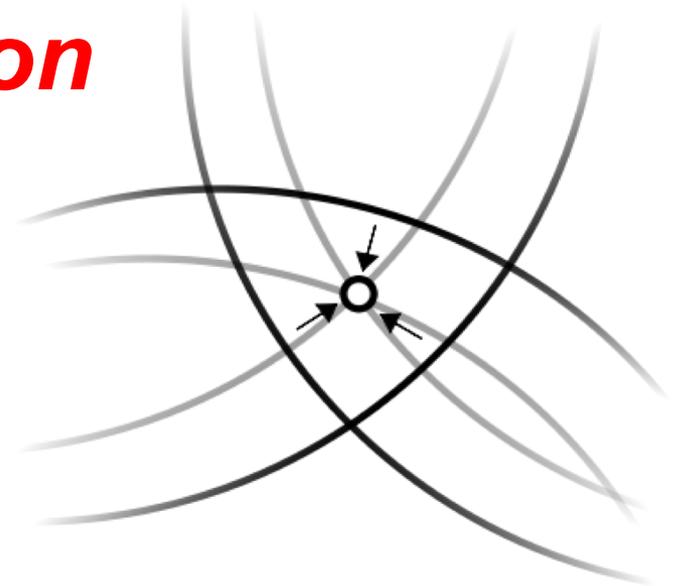
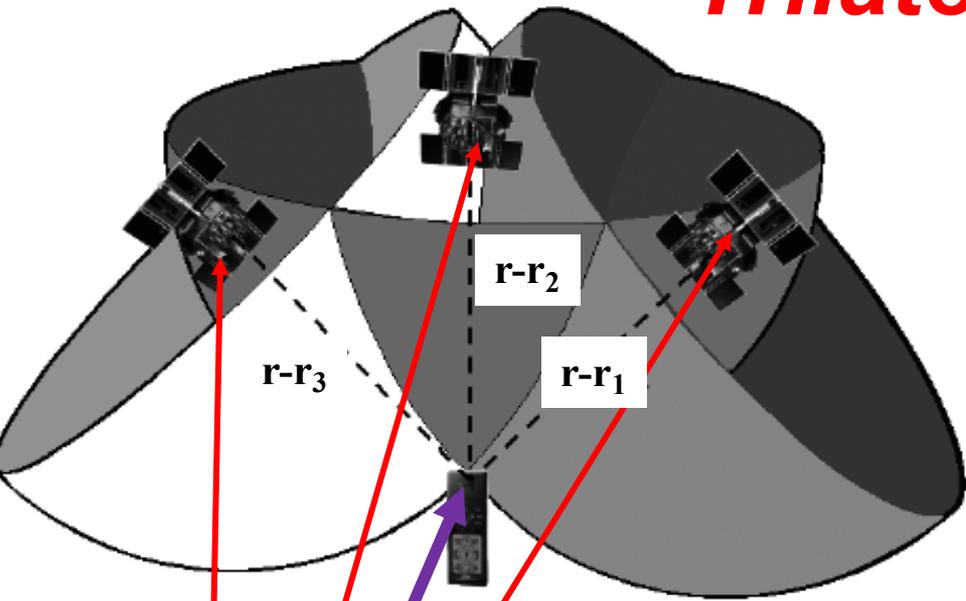


Le GPS



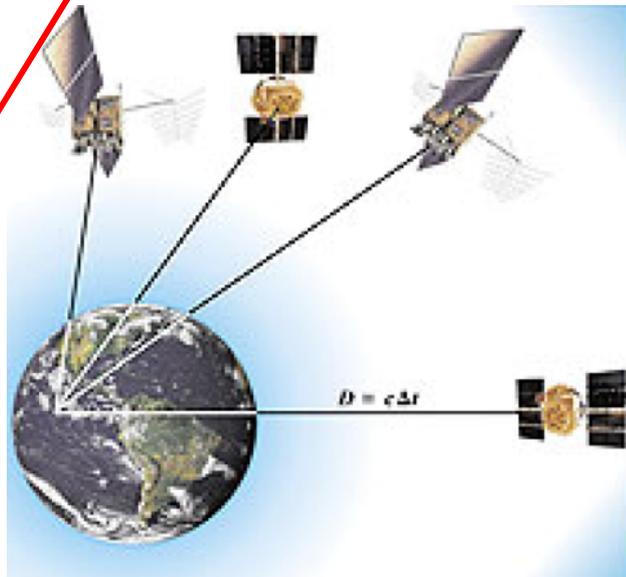
- I. Le système GPS comprend **au moins 24 satellites** orbitant à 20200 km d'altitude, période $T=12h$. Ces satellites émettent en permanence un signal complexe daté précisément grâce à leur horloge atomique, ainsi que des éphémérides permettant le calcul de leurs coordonnées prédites.
- II. Ainsi un récepteur GPS qui capte les signaux d'au moins quatre satellites peut, en mesurant les écarts relatifs des horloges, connaître sa distance par rapport aux satellites et, par **trilatération**, situer précisément en trois dimensions n'importe quel point placé en dessous des satellites GPS.

Trilatération



4 satellites \Rightarrow temps

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| = c(t - t_i); i = 1, 2, 3, 4.$$



Principe de fonctionnement

- I. Pour mesurer le temps mis par l'onde pour lui parvenir, le récepteur GPS compare l'heure d'émission (incluse dans le signal) et de réception de l'onde émise par le satellite. Cette mesure est appelée pseudo-distance (*pseudo range*), car il ne s'agit pas directement d'une distance, mais d'une mesure entachée d'une erreur de synchronisation des horloges du satellite et du récepteur. $\Delta t = 1\mu s \cong 300m$
- II. La difficulté est de synchroniser les horloges des satellites et celle du récepteur. Ce dernier ne peut bien entendu pas bénéficier d'une horloge atomique comme les satellites et doit pourtant fonctionner avec une heure particulièrement précise pour parvenir à calculer la distance entre l'émetteur et le récepteur.
- III. C'est pour cette raison que 4 satellites sont nécessaires afin de résoudre un système d'équations mathématiques à 4 inconnues qui sont la position dans les 3 dimensions plus le décalage de l'horloge du récepteur avec l'heure GPS.



Relativité

$$\int_{path} dt = \frac{1}{c} \int_{path} \left[1 - \frac{\Phi - U}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right] ds$$

I. Vitesse des Satellites : 14 000 km/h

1. Δt retard: -7 000 ns/jour $\Delta t = \gamma \Delta \tau$; $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$; $\beta = \frac{v}{c}$

II. Repère en rotation : effet de Sagnac

III. Altitude 20200km

 Δf

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \phi}{c^2}$$

1. Champ de gravitation quatre fois moins intense
2. Avance de 45 000 ns/jour
3. Orbites des satellites excentriques \Rightarrow variation de $\Delta \Phi$

IV. Pas de correction : 12 km/jour!

1. Avant de lancement les horloges sont ralenties
2. Corrections permanentes par les centres de contrôle

L'expérience cruciale de Hafele et Keating

Science, New Series, Vol. 177, No 4044 (Jul. 14, 1972), 166-168;

$$\Delta t = \Delta t_0 \left\{ \underbrace{1 - \frac{v^2}{2c^2} - \frac{v\Omega R \cos \lambda}{c^2}}_{\text{dilatation relativiste}} + \underbrace{\frac{gh}{c^2}}_{\text{dilatation gravitationnelle}} \right\}$$

Ω = Rotation de la terre

λ = latitude

$$gh = \Delta\Phi = \Delta \left(\frac{GM}{R} \right)$$

= diff. du Potentiel gravitationnelle



The Hafele-Keating flight routes



prédiction

Gravitation

Ouest

144 ± 14 ns

Est

179 ± 18 ns

Rel. restreinte

-184 ± 18 ns

96 ± 10 ns

total

-40 ± 23 ns

275 ± 21 ns

mesuré

-59 ± 10 ns

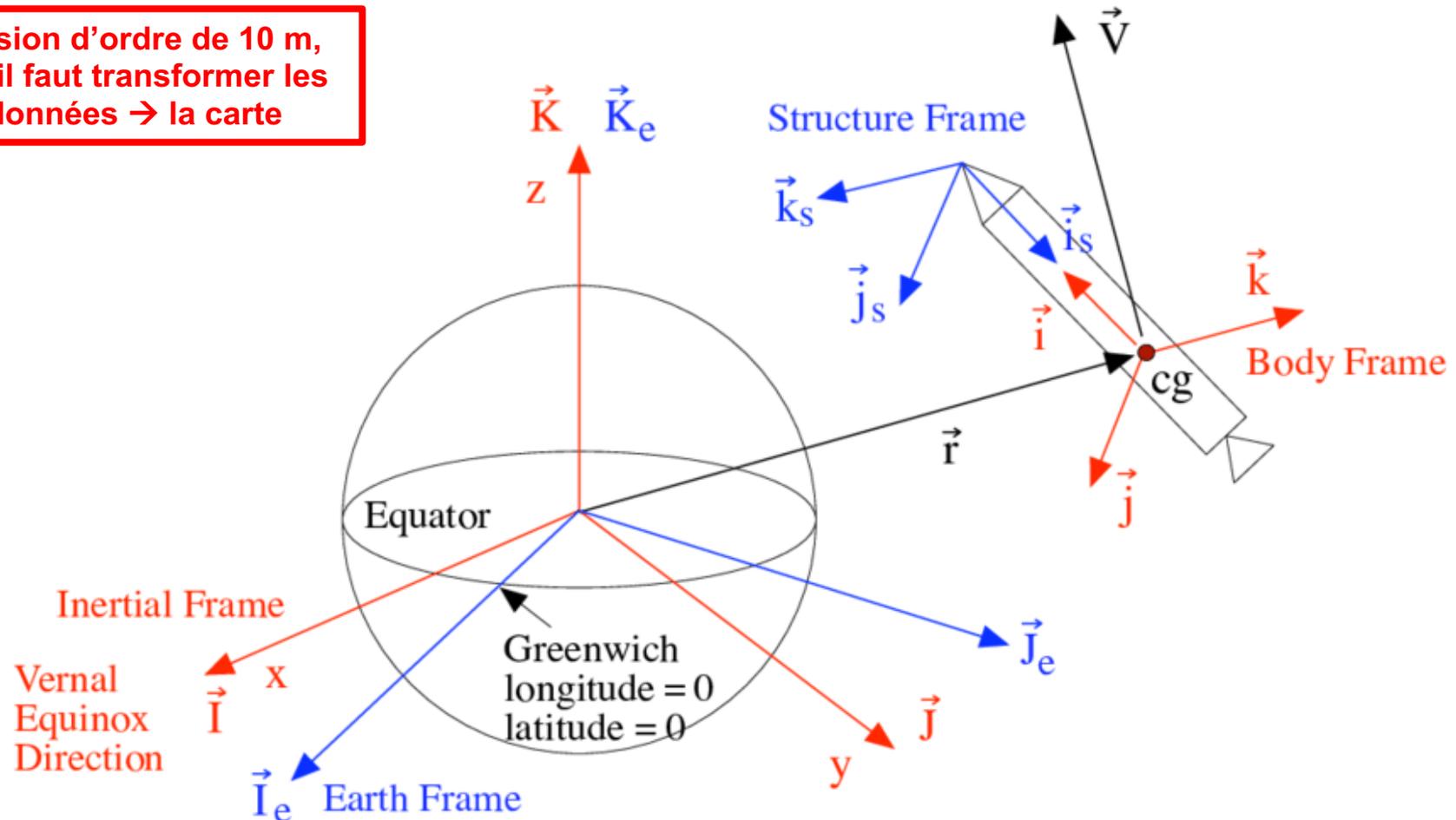
273 ± 7 ns

ECEF ou ECR et ECI

ECEF (acronym for *earth-centered, earth-fixed*), also known as ECR (initialism for *earth-centered rotational*), distance.

ECI (acronym for Earth centered inertial)

Précision d'ordre de 10 m,
Mais il faut transformer les
coordonnées → la carte

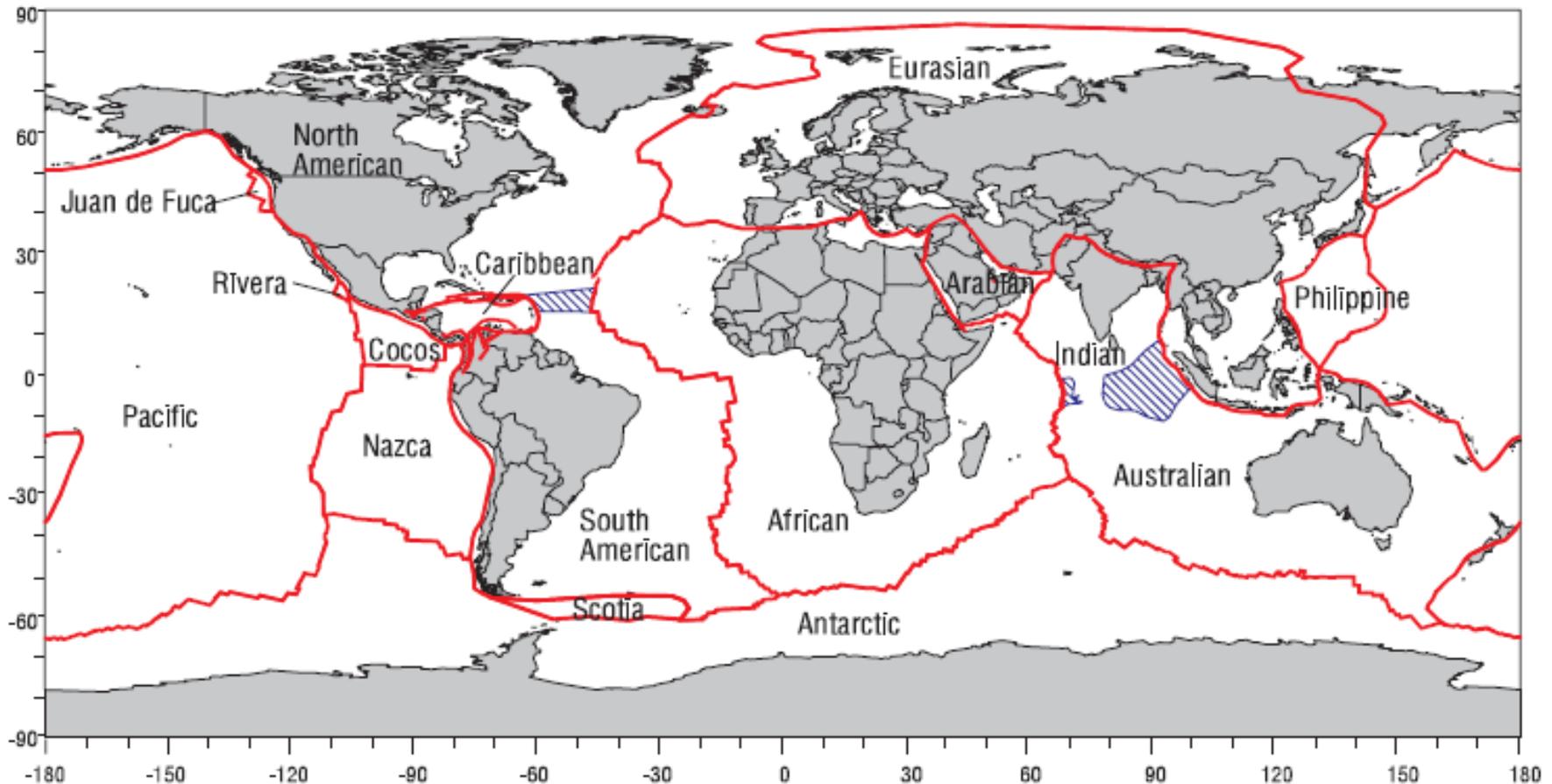


Le GPS

- I. **Le segment spatial** est constitué actuellement d'une constellation de 30 satellites (NAVSTAR pour Navigation Satellite Timing And Ranging). Ces satellites évoluent sur 6 plans orbitaux ayant tous une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur. Ils suivent une orbite quasi circulaire à une altitude de 20000 à 20500 km qu'ils parcourent en 11 heures 58 minutes à une vitesse de 13 000 km/h.
- II. **Le segment de contrôle** : permet de piloter et de surveiller le système. Il est composé de 5 stations américaines au sol du 50th Space Wing de l'Air Force Space Command, basé à la Schriever Air Force Base dans le Colorado (la station maîtresse est basée à Colorado Springs) dans la base de Cheyenne Mountain. Leur rôle est d'enregistrer toutes les informations émises par les satellites, pour calculer les positionnements.
- III. **Récepteurs** : GPS Le segment utilisateur regroupe l'ensemble des utilisateurs civils et militaires qui ne font que recevoir les informations des satellites. Les récepteurs sont passifs, et le système ne peut donc être saturé : **le nombre maximum d'utilisateurs GPS est illimité.**

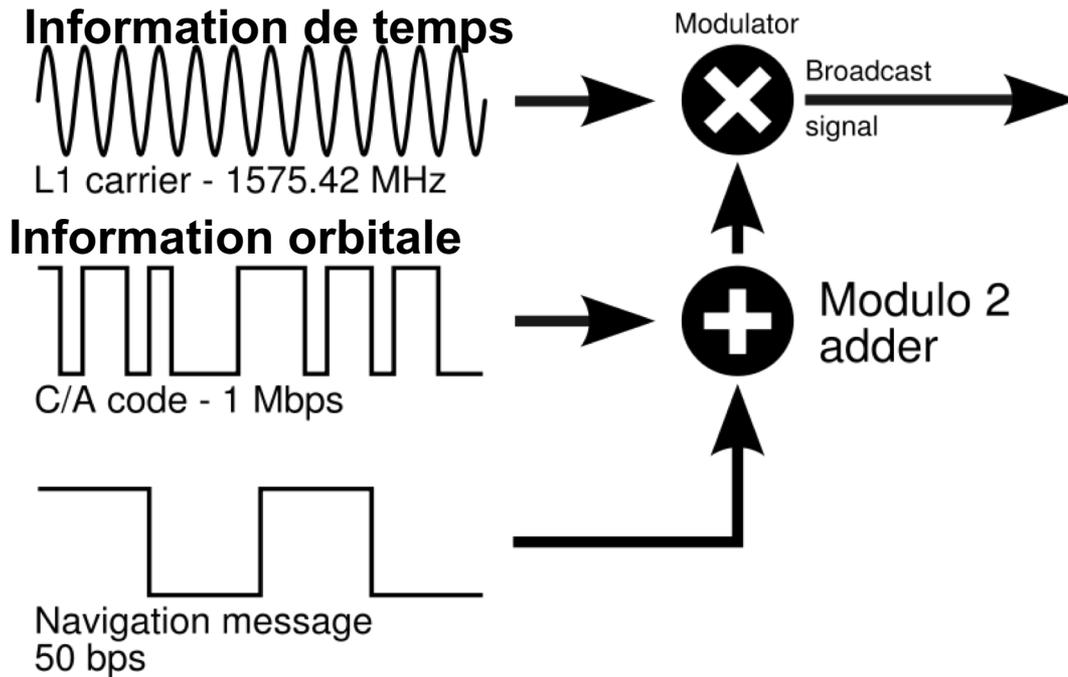
Systeme de coordonnees → Référentiel
⇒ points de référence, les stations de control, corrections

Figure 2.2 Tectonic Plate Map



Present-day Major Tectonic Plates and Plate Boundaries

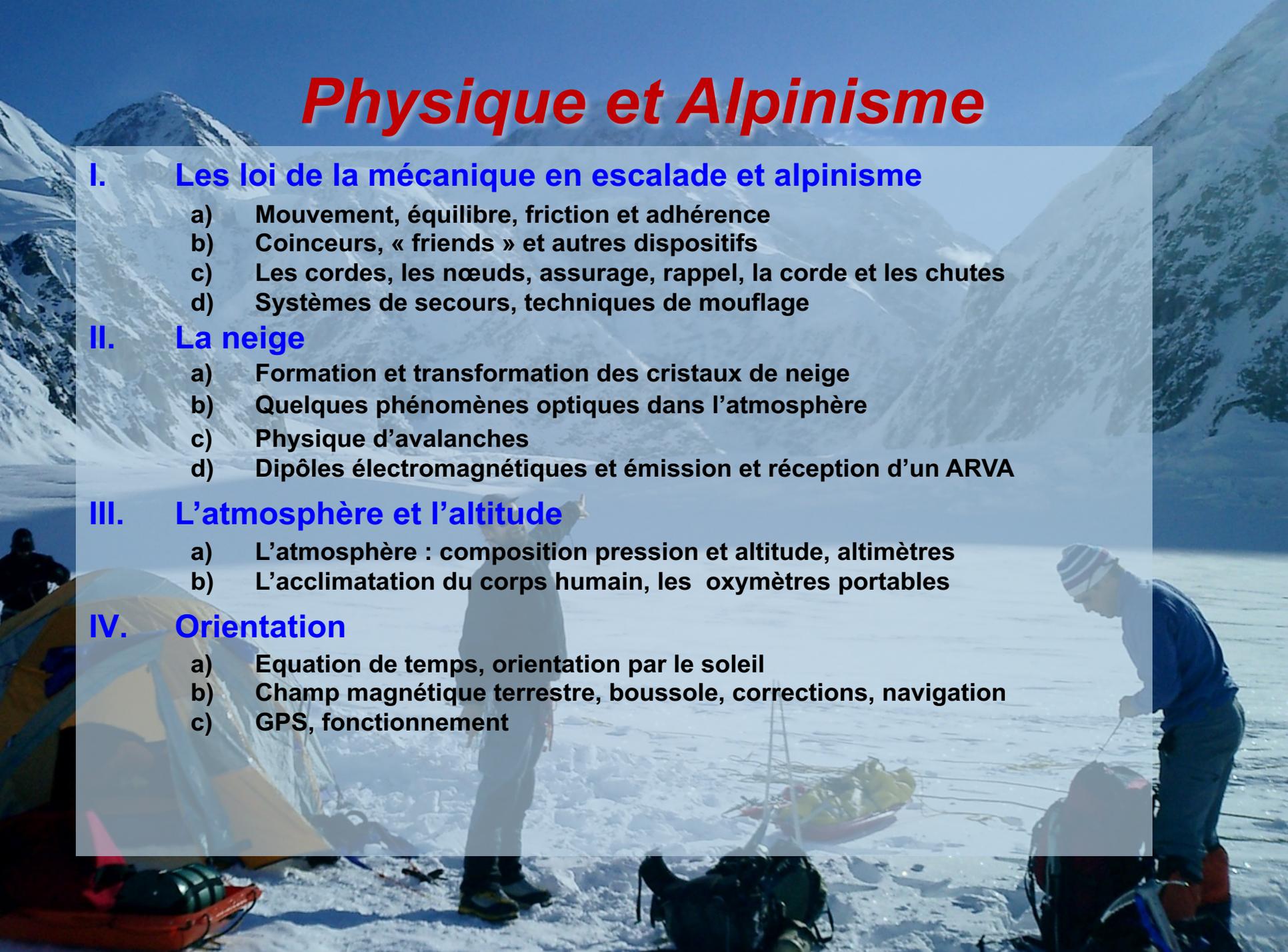
*Several minor plates not shown



Signaux GPS

- I. **L1 (1575.42 MHz):** Mix of Navigation Message, coarse-acquisition (C/A) code and encrypted precision P(Y) code.
- II. **L2 (1227.60 MHz):** P(Y) code, plus the new L2C code on the Block IIR-M and newer satellites.
- III. **L3 (1381.05 MHz):** Used by the Defense Support Program to signal detection of missile launches, nuclear detonations, and other high-energy infrared events.
- IV. **L4 (1379.913 MHz):** Being studied for additional ionospheric correction.
- V. **L5 (1176.45 MHz):** Proposed for use as a civilian safety-of-life (SoL) signal (see GPS modernization). This frequency falls into an internationally protected range for aeronautical navigation, promising little or no interference under all circumstances.

Physique et Alpinisme

The background of the slide is a photograph of a snowy mountain landscape. In the foreground, there is a yellow and blue tent on the left. A person in dark clothing stands in the middle ground, pointing towards the mountains. On the right, another person in a blue jacket and a striped beanie is working with a red sled or piece of equipment. The sky is clear and blue.

I. Les lois de la mécanique en escalade et alpinisme

- a) Mouvement, équilibre, friction et adhérence
- b) Coinceurs, « friends » et autres dispositifs
- c) Les cordes, les nœuds, assurage, rappel, la corde et les chutes
- d) Systèmes de secours, techniques de mouflage

II. La neige

- a) Formation et transformation des cristaux de neige
- b) Quelques phénomènes optiques dans l'atmosphère
- c) Physique d'avalanches
- d) Dipôles électromagnétiques et émission et réception d'un ARVA

III. L'atmosphère et l'altitude

- a) L'atmosphère : composition pression et altitude, altimètres
- b) L'acclimatation du corps humain, les oxymètres portables

IV. Orientation

- a) Equation de temps, orientation par le soleil
- b) Champ magnétique terrestre, boussole, corrections, navigation
- c) GPS, fonctionnement