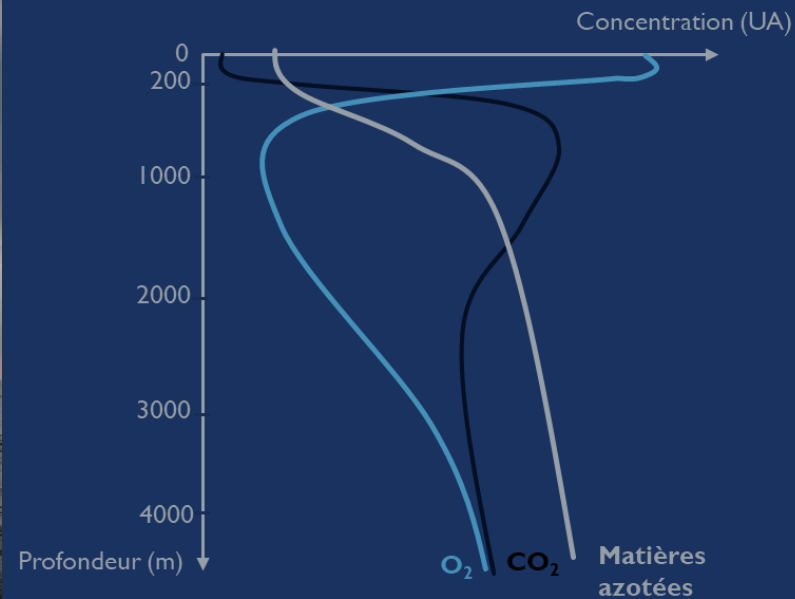


BG-CI&2 L'ATMOSPHERE ET L'OCÉAN

BG- LE CLIMAT DE LA TERRE

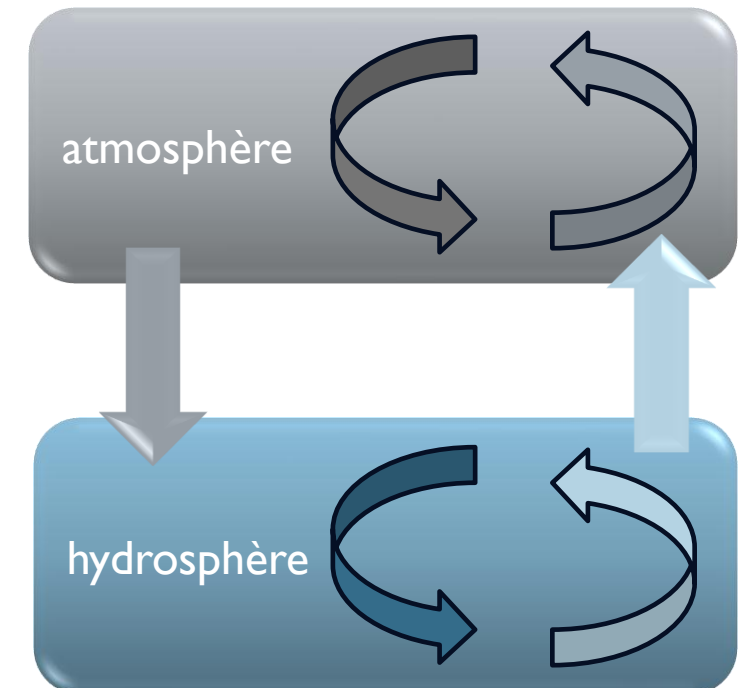


EXTRAIT DU B.O.

Savoirs visés	Capacités exigibles
L'atmosphère et l'hydrosphère forment les enveloppes fluides de la Terre. L'hydrosphère et l'atmosphère, enveloppes externes fluides, sont stratifiées. Leur structuration verticale dépend de la densité, comme pour les enveloppes solides. Les disparités temporelles et locales du bilan radiatif conduisent à une inégale répartition de l'énergie à la surface de la Terre. Les circulations troposphériques et océaniques assurent principalement une redistribution latitudinale de l'énergie. Les échanges d'énergie ont lieu par transferts radiatifs, conductifs et convectifs incluant les variations d'enthalpie liés aux changements d'état de l'eau. La circulation de l'atmosphère repose sur l'existence des cellules de convection. On distingue la circulation aux latitudes tropicales et la circulation aux latitudes tempérées. Le couplage entre l'atmosphère et l'océan se fait par des échanges de quantité de mouvement, de transferts thermiques et de quantité d'eau. La circulation de surface est étroitement couplée au régime des vents et aux gradients thermiques. La circulation générale de l'océan se caractérise par une circulation méridienne de retournement. Elle résulte principalement des variations de densité de l'eau de mer liées à sa température et à sa salinité.	- Exploiter des données révélant la stratification des enveloppes fluides. - Expliquer l'origine biologique du dioxygène et du méthane. - Relier le maximum thermique de la stratosphère aux propriétés d'absorption de l'ozone (O₃). - Discuter de la stabilité des couches océaniques et atmosphériques à partir d'un exemple parmi : la structuration verticale océanique, l'inversion thermique, la formation d'un nuage. - Exploiter les données montrant le bilan entre énergie reçue et énergie émise aux différentes latitudes. - Identifier les parts respectives de l'océan et de l'atmosphère dans la redistribution de l'énergie à la surface de la Terre. - Relier, à grande échelle, la distribution des températures de surface et des précipitations aux grands biomes. - Présenter et exploiter un schéma général de la circulation atmosphérique. - Relier les courants de surface aux vents troposphériques (grandes gyres, circulation équatoriale). - Exploiter des données montrant la dynamique de l'océan (bathymétrie, température et salinité, delta 14C des masses d'eau, teneur en chlorophylle, distribution du dioxygène...). - Exploiter des données reliant la circulation océanique et la biogéochimie de l'océan.

INTRODUCTION

- Analyse des **échanges d'énergie** au sein des enveloppes externes de la Terre.
 - Atmosphère (stratifiée cf densité)
 - Hydrosphère (stratifiée cf densité)
- Importance des circulations atmosphérique et océanique dans la redistribution de l'énergie à la surface du globe.
- Climat et ses variations naturelles aux différentes échelles de temps.
- Changements climatiques actuels, notamment l'augmentation des températures de surface, liés à l'activité humaine, en lien avec les émissions de gaz à effet de serre



INTRODUCTION

Fluide (n.m.): milieu matériel totalement déformable.

- **enveloppes fluides : atmosphère et hydrosphère.**

- Hydrosphère: 97% océan + 3% eau douce

- Terre = ronde

- ⇒ rayonnement solaire inégalement réparti

- ⇒ diversité des milieux de vie

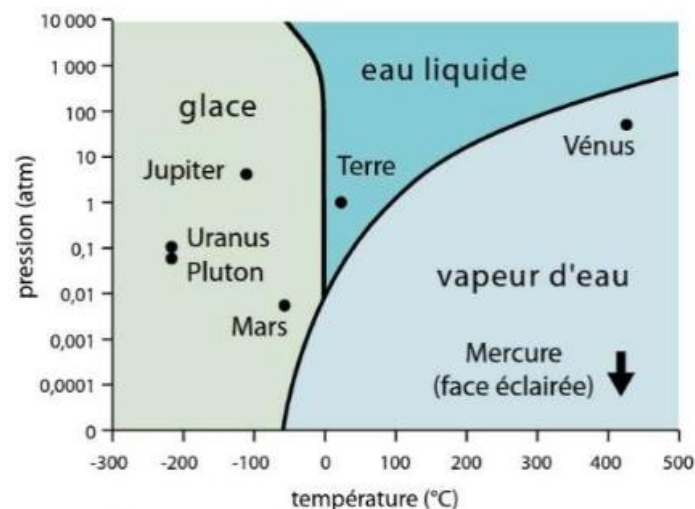
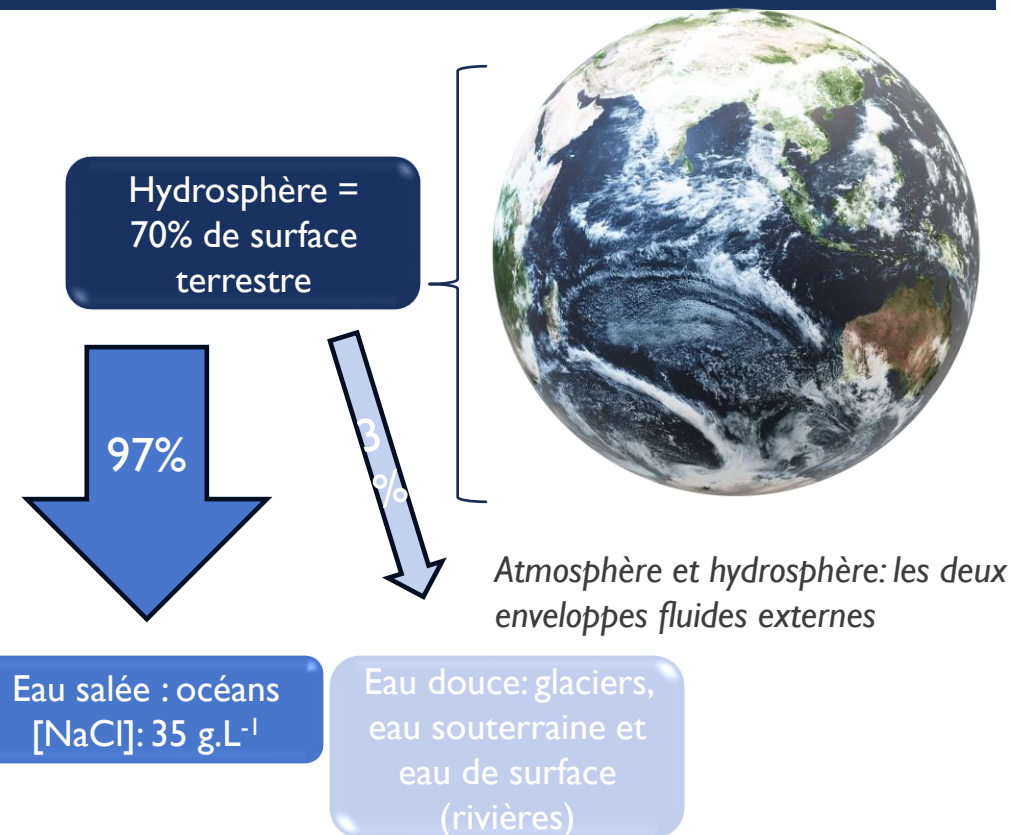


Diagramme de phase de l'eau et position des principales planètes du système solaire

ENCPB- BCPST1 - STÉPHANIE DALAINE

Terre est la seule planète à posséder de l'eau sous ses trois états



Quelle est la structure de ces enveloppes?

Quelle est la composition de ces enveloppes en lien avec la biosphère?

Comment les circulations au sein des enveloppes participent-elles aux transferts thermiques?

Quels sont les couplages entre atmosphère et océan?

PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de l'énergie thermique
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques
 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de l'énergie thermique
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques

 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE



- Enveloppes fluides
- Stratification en **couches superposées** en lien avec **différences de densité**



L'Italie la nuit devant l'objectif de Thomas Pesquet (THOMAS PESQUET/ESA/SIPA / SIPA)

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE



I. La composition de l'atmosphère

- **Pression: 1013 hectopascals (hPa)** au niveau de la mer
- **Vapeur d'eau:**
 - presque exclusivement dans la troposphère
 - ↘ avec l'altitude
 - renouvellement de l'eau atmosphérique : **en moyenne tous les 9 jours**
 - **cycle de l'eau** responsable d'une partie importante des échanges thermiques entre océan et atmosphère
- **méthane et protoxyde d'azote N_2O (0,3 ppmv):**
 - émission naturelle
 - Émission d'origine anthropique (industrie, agriculture)
 - ↘ au-delà de 20 km d'altitude
- **Ozone:**
 - principalement dans stratosphère
 - au niveau de la « couche d'ozone » située vers 30 km d'altitude
 - Formation d' O_3 stratosphérique à partir d' O_2 sous l'effet du rayonnement UV solaire.

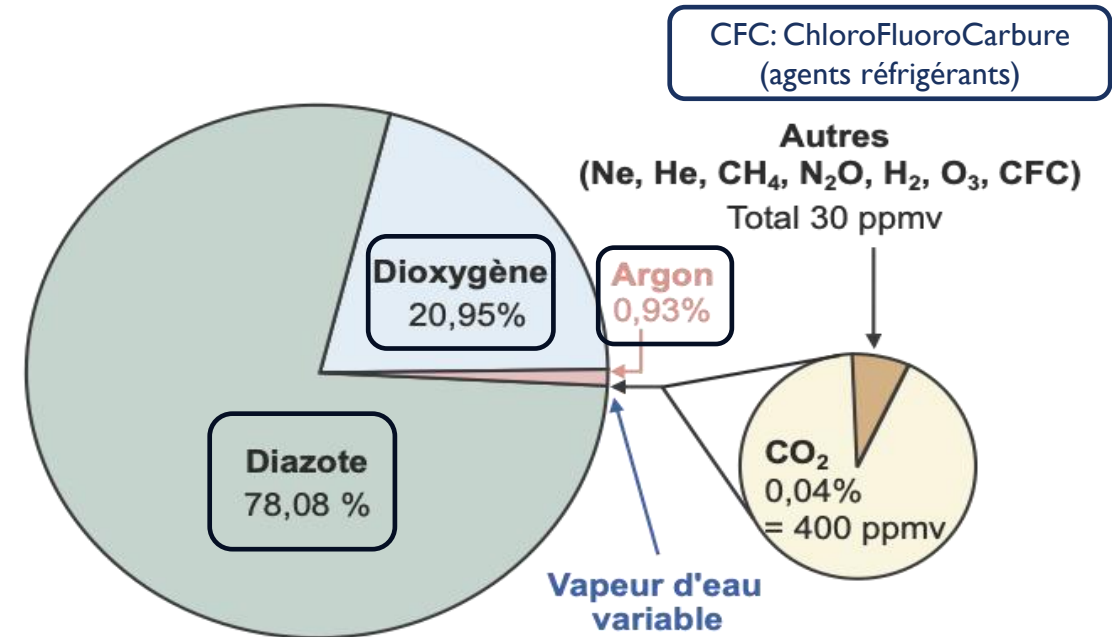
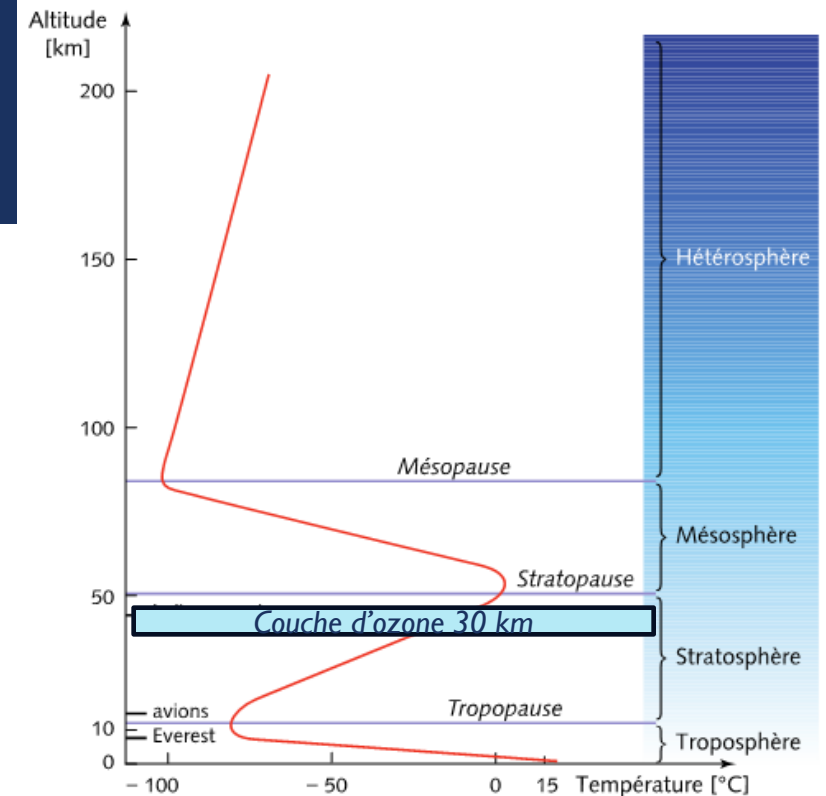
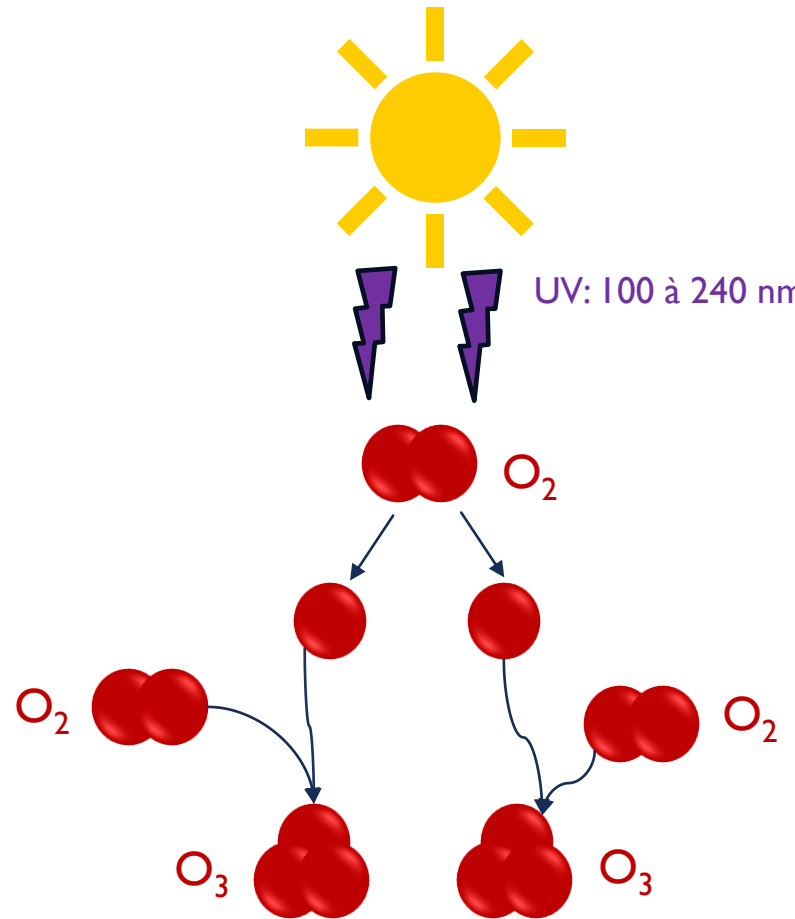


Figure 1 : Composition moyenne de l'atmosphère Les pourcentages sont donnés en volume (ppmv : parties par million volumique) (in Dunod, 2021)

LE POINT SUR LA COUCHE D'OZONE (O₃)

- Partie supérieure de stratosphère reçoit plus d'UV
 - ⇒ Plus d'O₃ produit
- **Ozone absorbe UV et réémet IR**
 - ⇒ Sommet de stratosphère réchauffé
 - ⇒ Répartition non homogène d'O₃ dans stratosphère



Stratification verticale de l'atmosphère

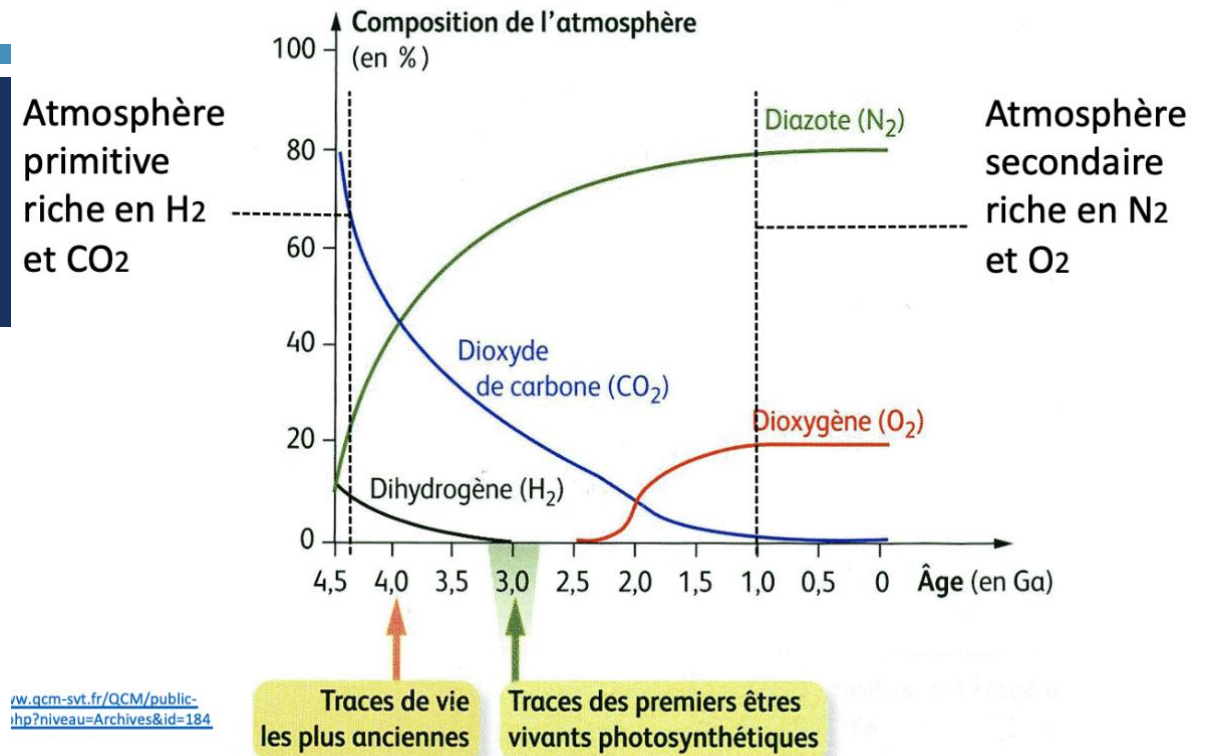
I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE

I.2. Origine de la composition de l'atmosphère



- Formation Terre: **4,567 Ga**
- **Atmosphère primitive (-4,567 Ga à -3 Ga)**
 - **Surtout CO₂ et H₂**: origine volcanique (ppe actualisme)
 - ✓ H₂ trop léger ⇒ pas retenu par gravité
Ex: Jupiter: très grosse planète gazeuse composée d'He (13%) et d'H₂ (86%)
 - ✓ CO₂ solubilisé dans océan primitif ⇒ **précipitation CaCO₃**
⇒ fixé dans **sédiments**
$$CO_{2(aq)} + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+$$
$$2HCO_3^- + Ca^{2+} \rightleftharpoons CaCO_3 + CO_2 + H_2O$$
 - ✓ **CO₂ progressivement remplacé par N₂** (azote provenant des volcans) mais non piégé dans sédiments
- **O₂**: apparition avec **photosynthèse** entre -2 Ga et -600 Ma (cyanobactéries photosynthétiques)
 - O₂: origine biologique
- **CH₄ (méthane)**: apparition tardive
 - origine biologique : **archées méthanogènes** dans environnements anoxiques
 - ✓ Ex: marécages, rizières, rumen des ruminants, fuite de gaz au niveau des puits d'extraction d'hydrocarbures



évolution de la composition de l'atmosphère terrestre.



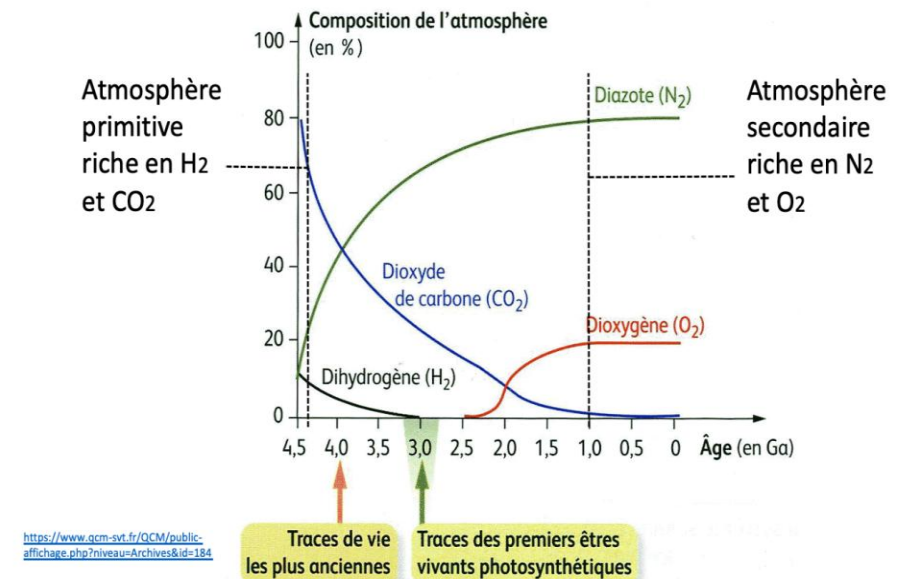
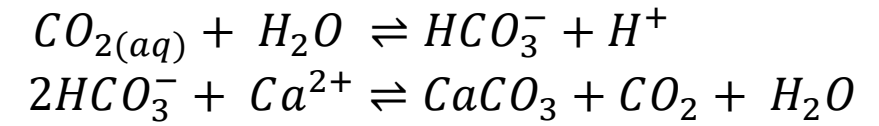
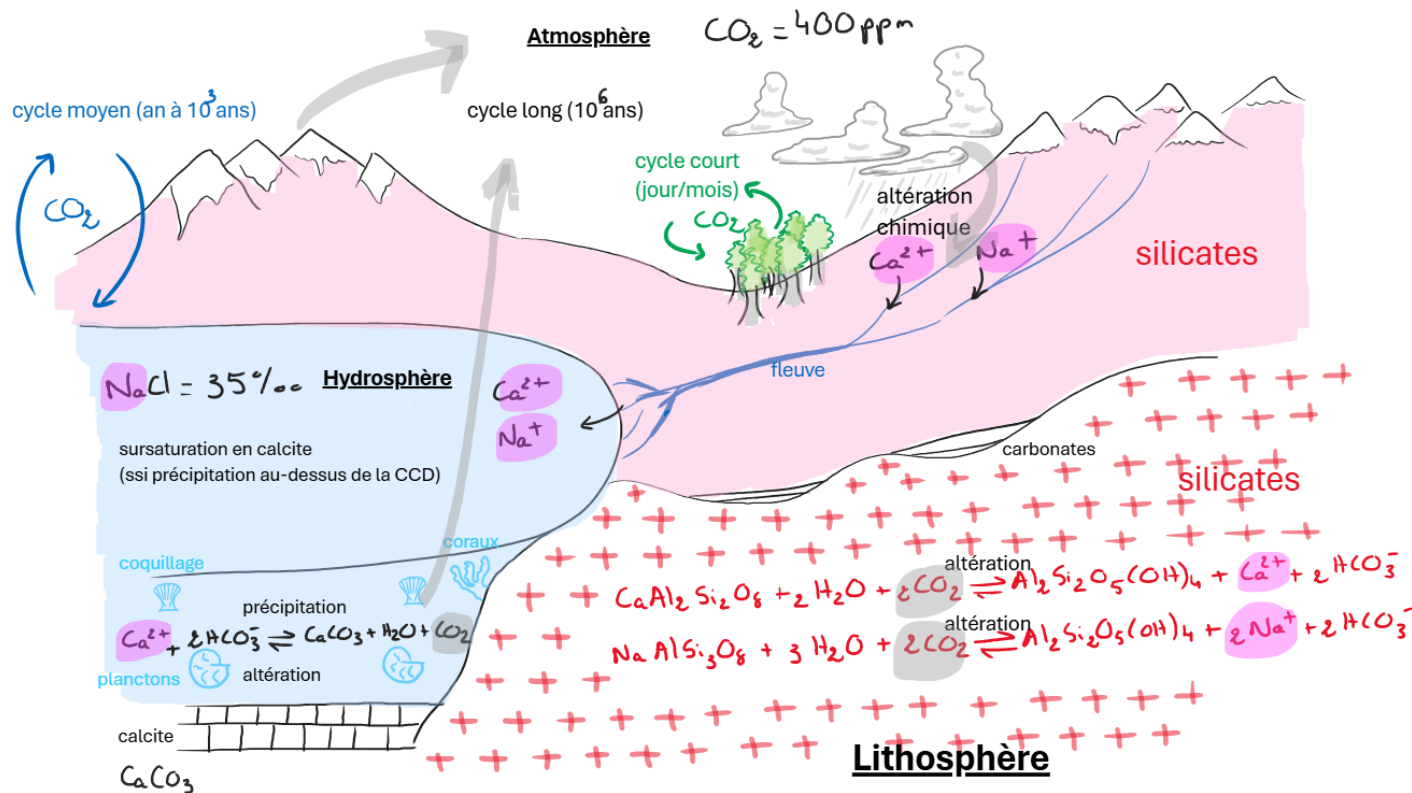
Oxygénation de l'atmosphère terrestre entre -2 Ga et -600 Ma grâce à la photosynthèse des cyanobactéries (ici Nostoc actuel).

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE

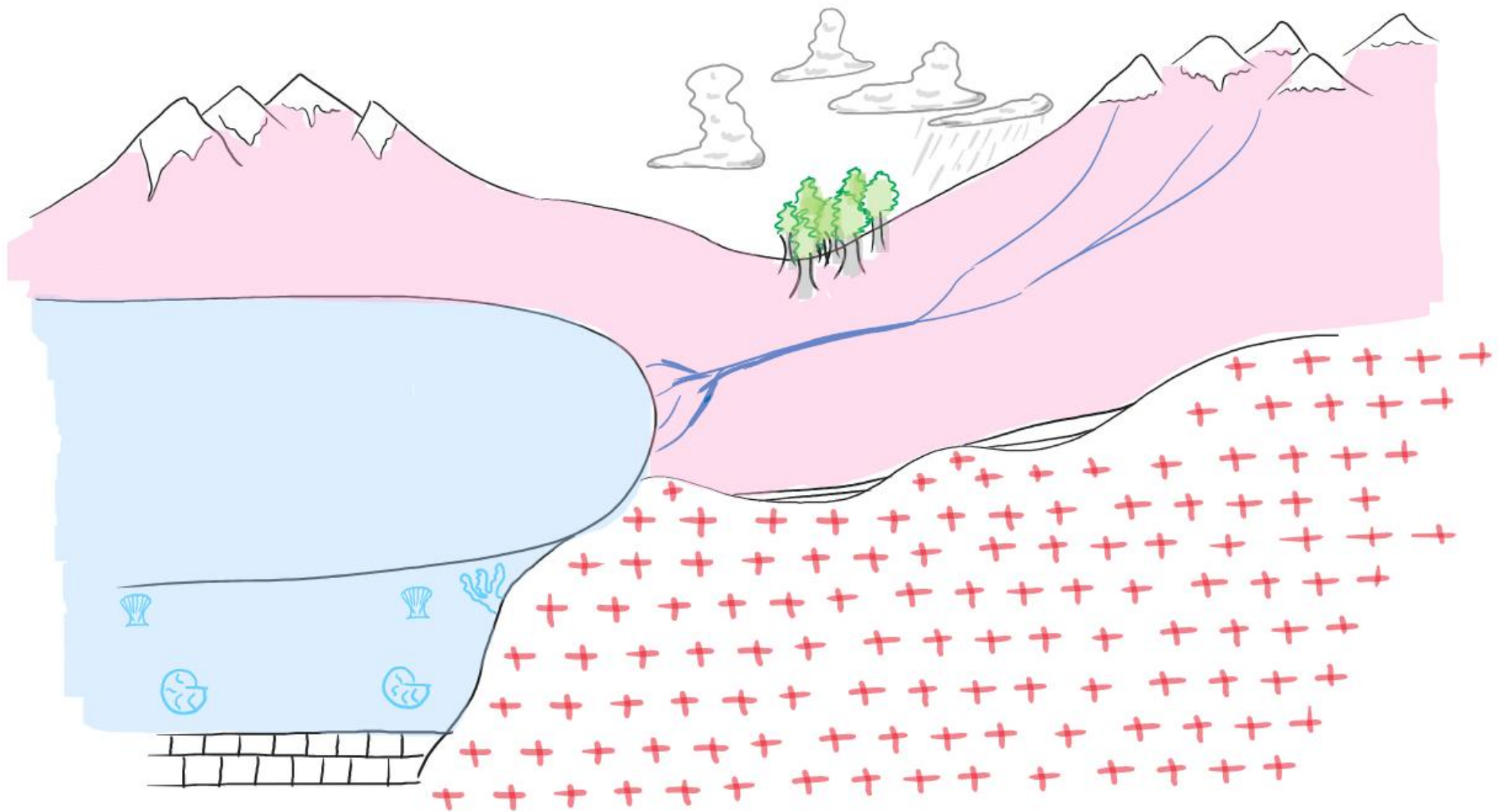


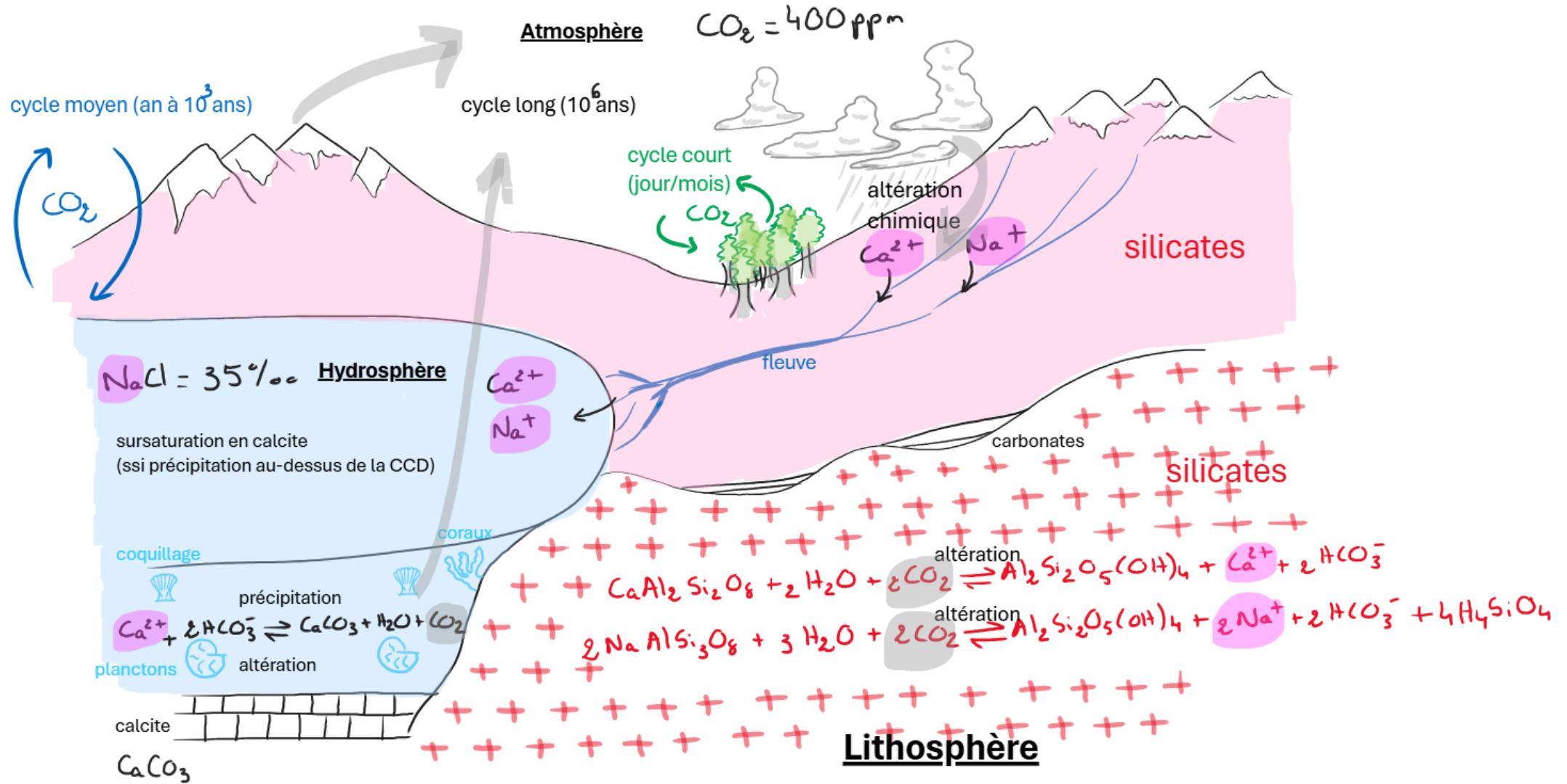
I.2. Origine de la composition de l'atmosphère



évolution de la composition de l'atmosphère terrestre.

Le **piégeage du CO_2** par l'**altération des roches silicatées** et la **précipitation des carbonates** : cycle long du carbone (S. Dalaine d'après J. Gaillardet)





Le piégeage du CO₂ par l'altération des roches silicatées et la précipitation des carbonates: cycle long du carbone
 (S. Dalaine d'après J. Gaillardet).

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE

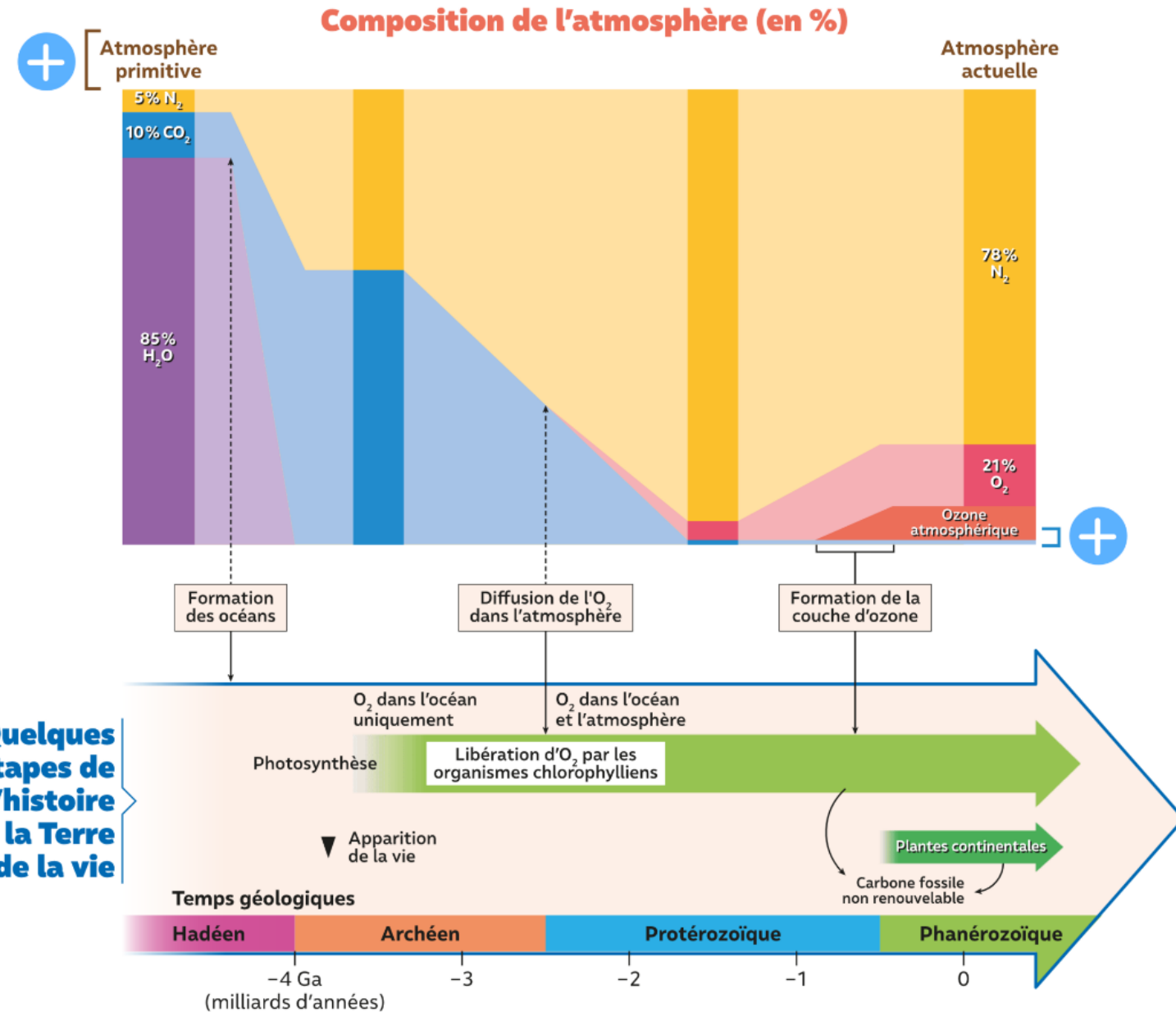
I.2. Origine de la composition de l'atmosphère

- O₂ atmosphérique d'origine biologique:
 - **oxygénation de l'atmosphère terrestre** entre -2 Ga et -600 Ma → **organismes photosynthétiques** de type **cyanobactéries**
 - **Pas ou peu d'O₂** sur autres planètes
- CH₄ (méthane) également d'origine biologique
 - **archées méthanogènes** dans des **environnements anoxiques**
 - ✓ marécages, rizières, rumen des ruminants, termites
 - ✓ **fuites de gaz** au niveau des puits d'extraction d'hydrocarbures.



Les termites produisent du méthane

<https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/how-a-termite-s-mound-filters-methane-and-what-it-means-for-greenhouse-gases>



Evolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps géologiques et événements associés

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE

2. La stratification de l'atmosphère

■ 1648: Florin Périer au Puy de Dôme: pression atmosphérique $\searrow$ avec altitude

■ **Stratification verticale** de atmosphère = $f(T^{\circ}\text{C})$

➤ **Troposphère : 7 (pôles) à 18 km (équateur)**

- ✓ 80% de masse atmosphérique
- ✓ $\searrow T^{\circ}\text{C}$ avec altitude
- ✓ $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$
- ✓ Nbreux mouvements verticaux et horizontaux
- ✓ Limite sup: tropopause

➤ **Stratosphère: 12km à 50 km**

- ✓ Peu de mouvements
- ✓ Couche d'ozone à 30 km
- ✓ $\nearrow T^{\circ}\text{C}$ avec altitude car absorption des UV par O_3 et réémission d'IR

➤ **Mésosphère: 50 à 80 km**

- ✓ $\searrow T^{\circ}\text{C}$ jusqu'à -90°C

➤ **Thermosphère: 80 à 500 km**

- ✓ $\nearrow T^{\circ}\text{C}$ (attention avec cette notion cf vidéo) avec photodissociation du dioxygène
- ✓ Oxygène atomique: principal composant de thermosphère



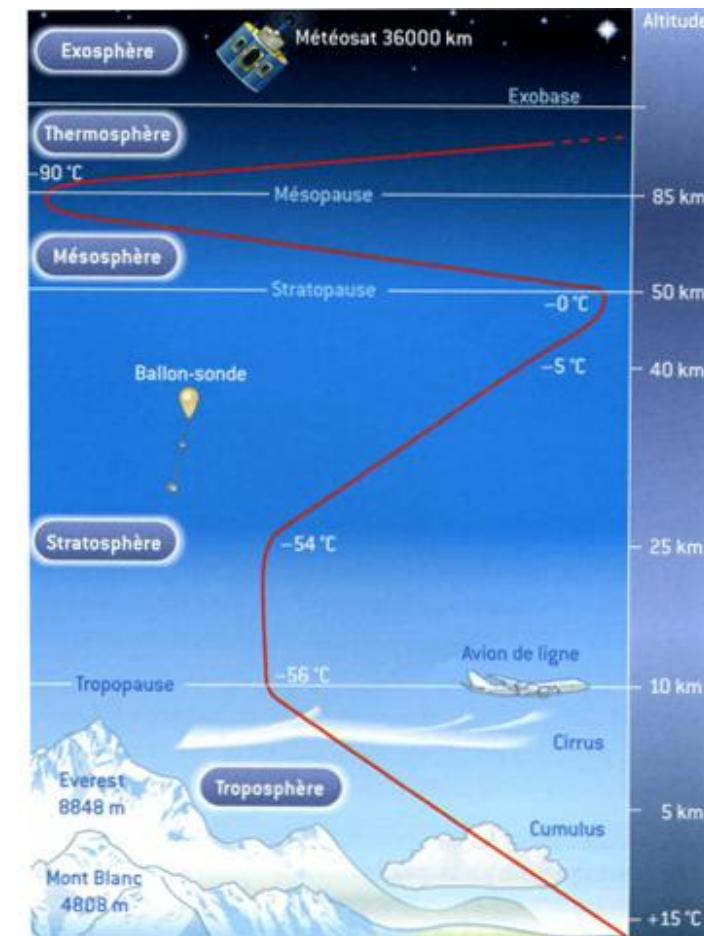
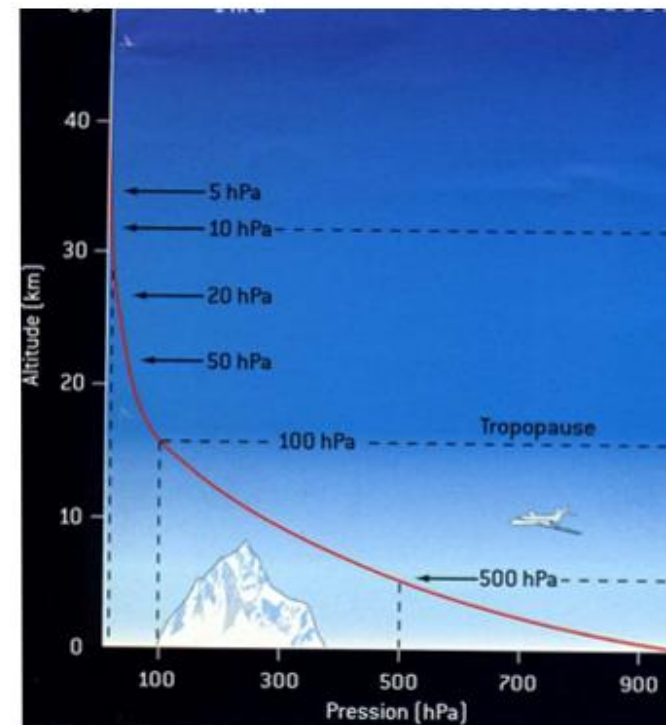
Mesure directe,
station météo



Ballon-sonde



Satellite



I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

A. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'ATMOSPHERE

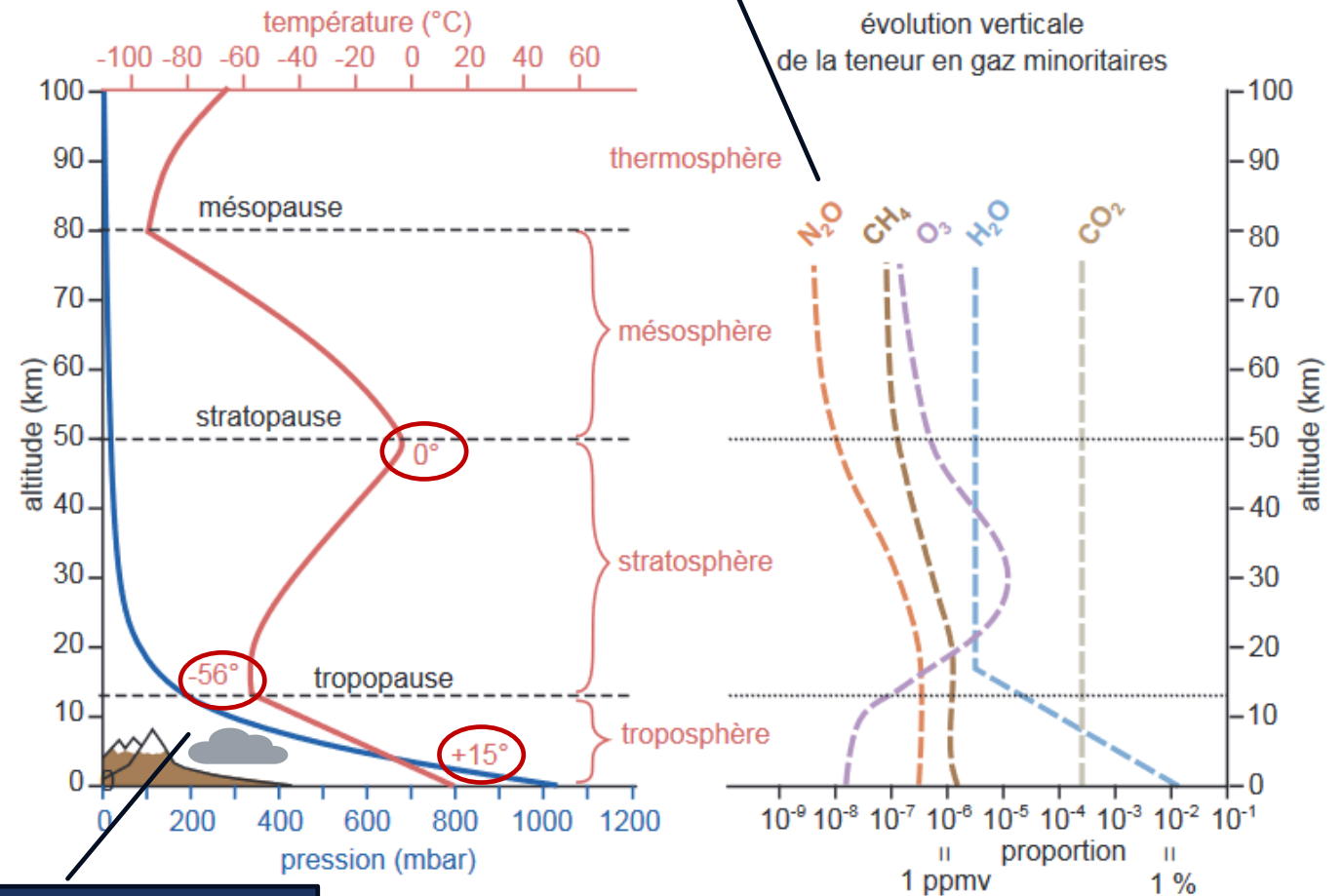
2. La stratification de l'atmosphère

- **Troposphère** : très peu de gaz absorbant directement le rayonnement solaire

- ⇒ **chauffée par le bas** (IR de surface terrestre)
- ⇒ $\searrow T^{\circ}C$ avec l'altitude
- ⇒ $\searrow$ vapeur d'eau
 - ✓ Si $T^{\circ}C \searrow$
 - ⇒ $\searrow$ pression de vapeur saturante
 - ⇒ condensation de vapeur d'eau L sur nuclei
 - ⇒ formation de nuages

- **Stratosphère** :

- production exothermique d' O_3
 - ⇒ $\nearrow T^{\circ}C$
- « couche d'ozone » = filtration du rayonnement UV



PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques

 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

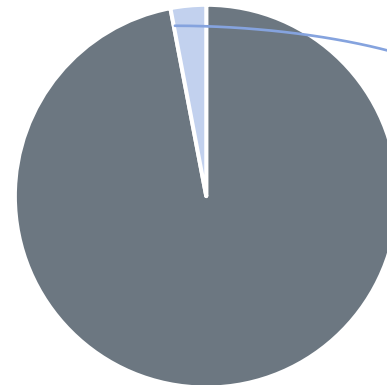


B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN

- **L'hydrosphère (70% de surface terrestre): océans (97%) + eau douce (3%)** (glaciers >>> eau souterraine >> eau de surface = **rivières**)

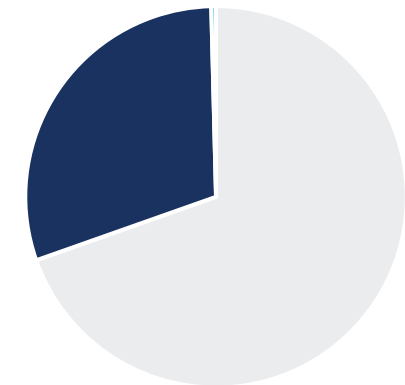
- ⇒ **Hydrosphère ~ eaux océaniques**
- ⇒ riches en sels dissous, en particulier le chlorure de sodium NaCl : **35g/L** en moyenne = 35 ‰

répartition des eaux de surface (Terre)



■ eau salée ■ eau douce

répartition des eaux douces



■ eau gelée (glaciers) ■ eau souterraine ■ eau de surface

Répartition des eaux de surface du globe

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN



- Analyse de prélèvements par bouteilles à différentes profondeurs

⇒ 3 masses océaniques superposées

Eaux de surface = couche de mélange (entre 0 et 200 m) :

- fort **couplage** avec l'atmosphère
 - ⇒ **températures variables**
 - ⇒ mouvements rapides (**quelques km /h**) influencés par les vents
 - ✓ **zone photique: jusqu'à 200 m**
- À l'équateur: eaux de surface chaudes ($>25^{\circ}\text{C}$) stables toute l'année
- En zones tempérées: eaux de surface plus fraîches et soumises aux variations saisonnières (thermocline saisonnière)

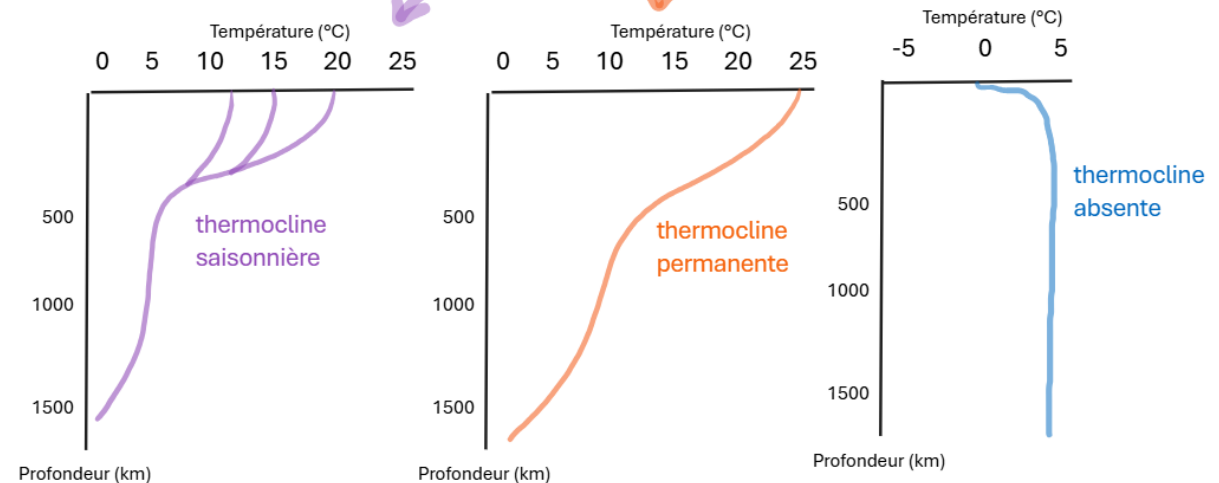
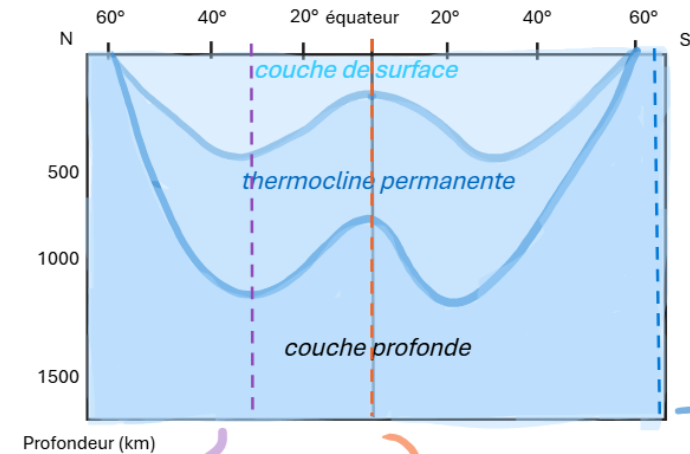
2. Thermocline permanente : 200 m à 1000 m

- chute importante de température

3. Eaux profondes : $> 1\ 000\ \text{m}$

- température stable autour de $4-5^{\circ}\text{C}$
- déplacements lents (**3-4 m/h**)

- Bilan: à latitude élevée, **stratification** quasiment inexistante



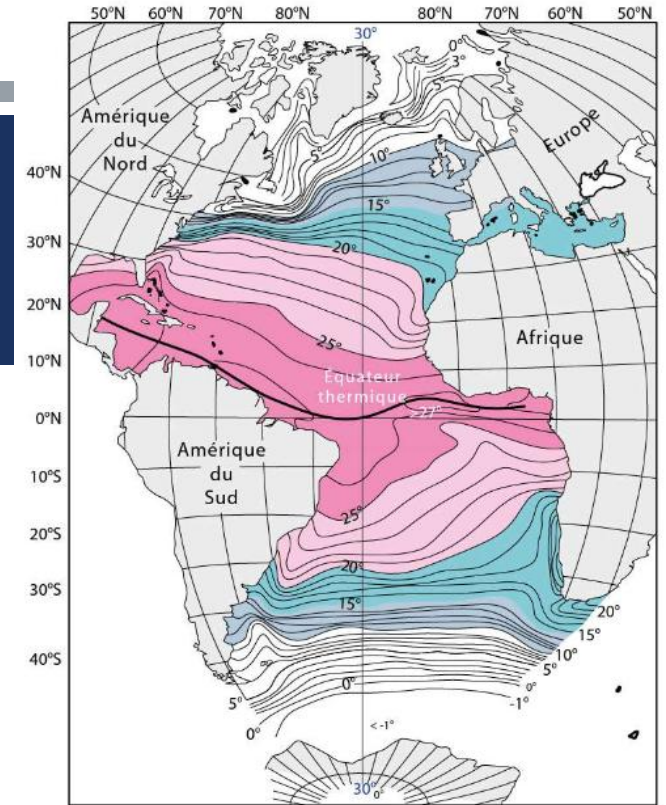
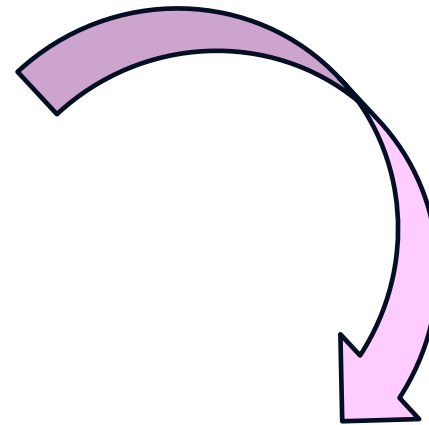
Profil de température et stratification de l'océan 19

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN

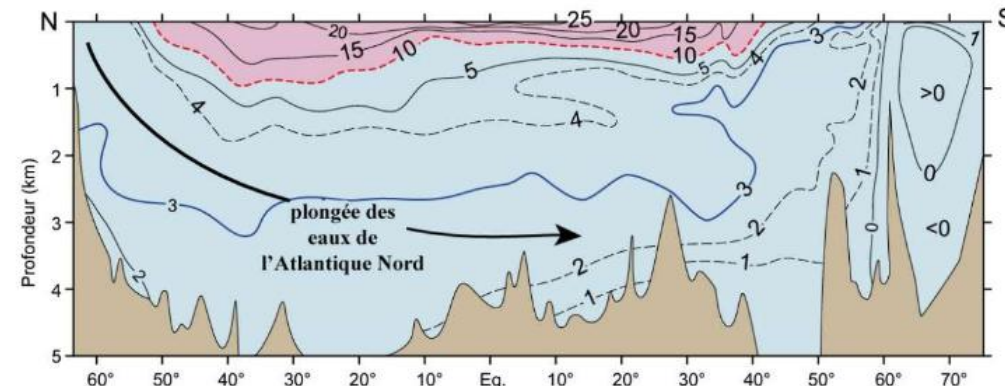


- **Capacité calorifique de l'eau élevée** ($4,18 \text{ kJ} = 1 \text{ kcal}$ pour augmenter d' 1°C / 1 kg d'eau à 25°C)
 - ⇒ 1^{ers} mètres de l'océan peuvent absorber énormément de chaleur
 - ⇒ océan = immense **réservoir thermique**
 - ✓ climats océaniques plus doux que climats continentaux qui présentent de fortes variations thermiques
 - ✓ forêt tamponnée thermiquement cf évapotranspiration.
- Eaux équatoriales : grande quantité de chaleur
 - ⇒ $T^\circ\text{C}$ de surface élevée ($>25^\circ\text{C}$ stable sur l'année)
- **Eaux tempérées**, plus fraîches, soumises à des variations de températures saisonnières (**thermocline saisonnière**)
- **Eaux polaires** froides en surface (banquise) = **thermocline absente**
 - ⇒ plongent en profondeur dans l'Atlantique Nord car plus froides et plus salées que les eaux de surface



Les isothermes de surface dans l'Atlantique

On notera l'inclinaison de l'équateur thermique et la dissymétrie E-O des isothermes du fait des courants marins.



Répartition des températures ($^\circ\text{C}$) dans une coupe N-S de l'Atlantique

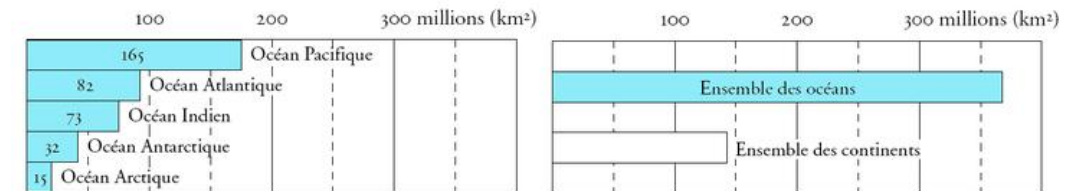
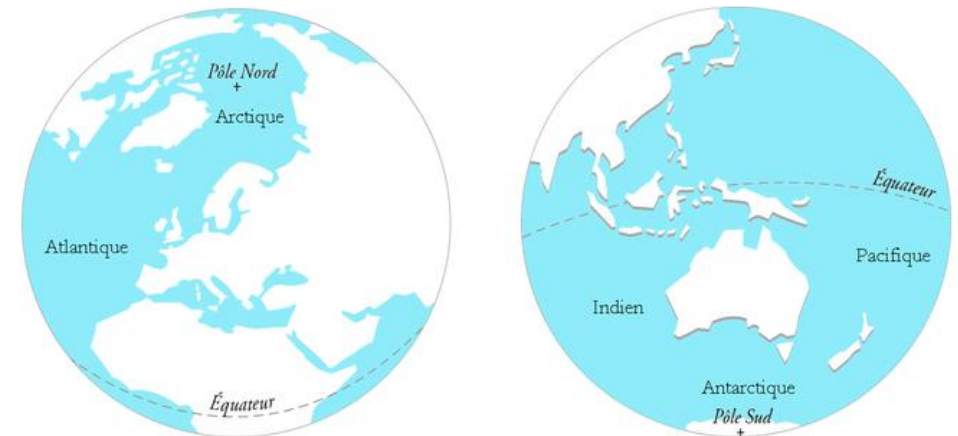
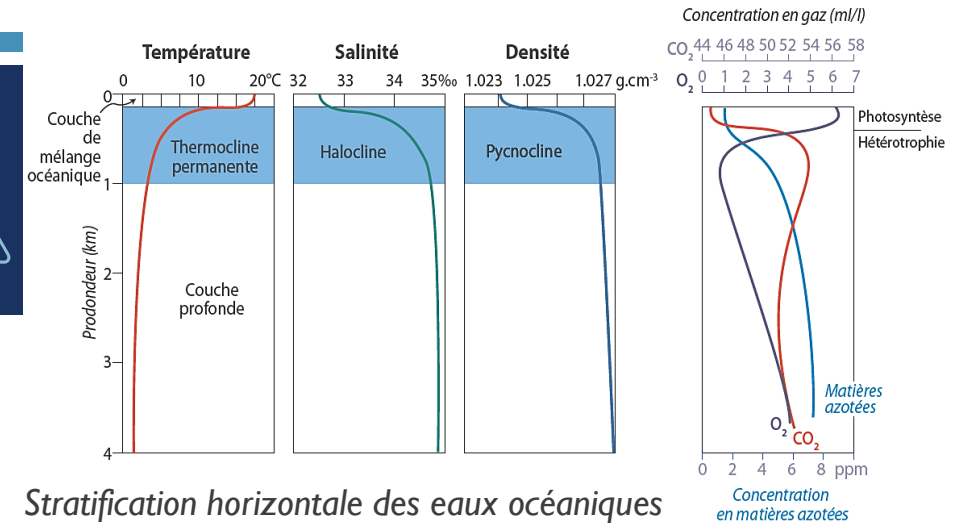
On remarque la plongée des eaux polaires nordiques

soulignée par les isothermes 3 et 4°C . La remontée des isothermes 10 et 15°C dans la zone équatoriale est liée à l'absence de vent et à la divergence équatoriale.

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN

- Dans océans : Na^+ , Cl^- (HCl du volcanisme), Mg^{2+} , Ca^{2+}
 - altération des roches sur les continents (apports par rivières, fleuves)
 - Abaissement du point de congélation (-2°C)
 - Tous les océans communiquent entre eux et recouvrent 71% de surface
 - ✓ 2/3 des surfaces continentales dans l'hémisphère Nord
- Eau de mer = solution aqueuse $\Rightarrow$ **électriquement neutre**
 - ✓ règle de l'électroneutralité des solutions aqueuses autant de cations que d'anions
 - **pH constant** ($\sim 8,2$) :
 - ✓ carbonates dissous $\Rightarrow$ **solution tampon absorbant une partie du CO_2 atmosphérique**
 - ✓ $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$
 - ✓ **Acidification progressive de l'océan** du fait des activités anthropiques (CO_2 atmosphérique via combustion des hydrocarbures par activités humaines)



Répartition des océans et des continents selon les deux hémisphères
<https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-geographie/la-repartition-des-continents-et-des-océans-fde09gg01i01>

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN

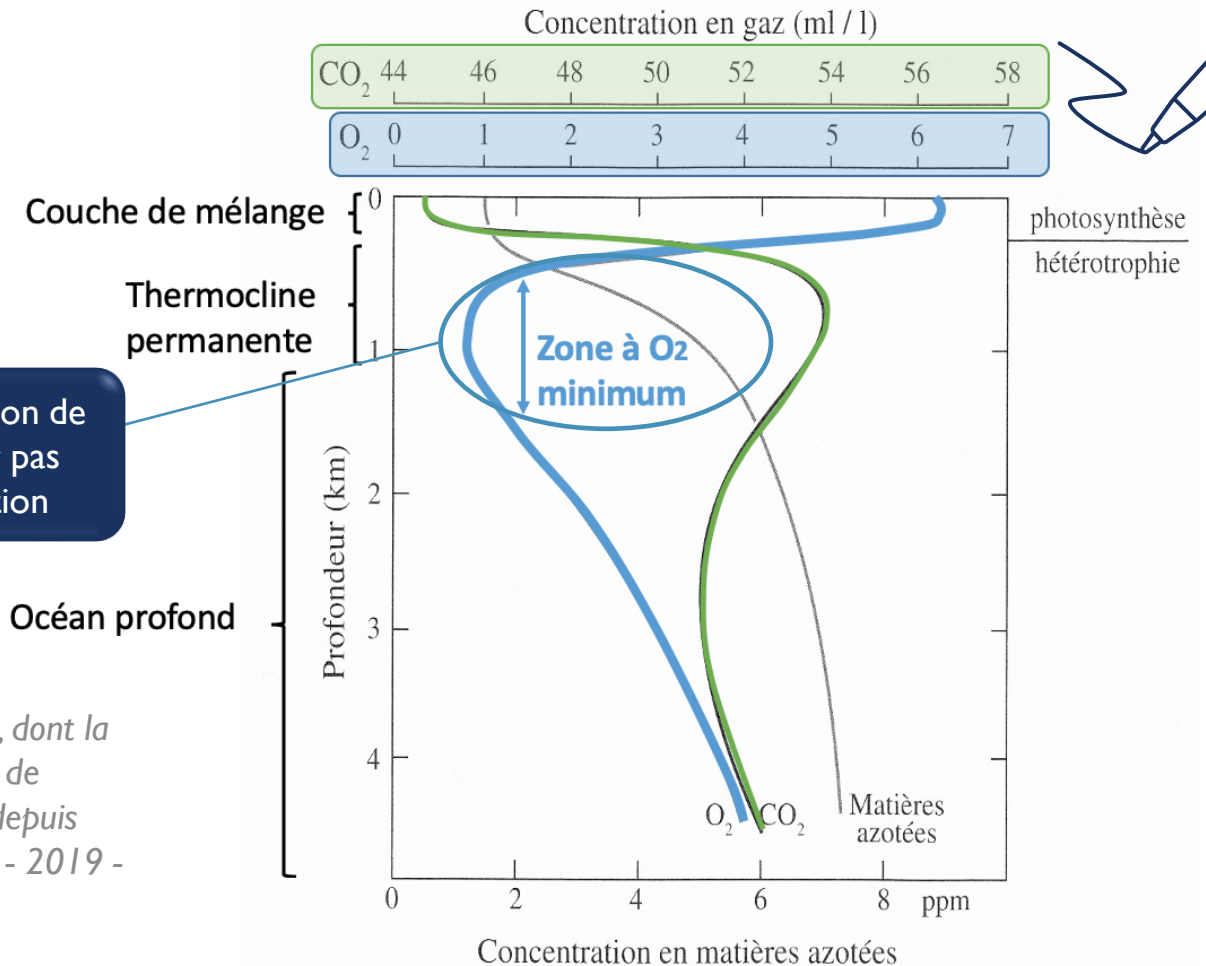


- eaux de surface (0-200 m): lumière (zone photique) $\Rightarrow$ photosynthèse $\Rightarrow$ forte teneur en O_2
- Au niveau de **thermocline: absence de mélange**
 - $\Rightarrow$ lieu de décomposition (= minéralisation) de la matière organique = respiration + zone aphotique (pas de photosynthèse)
 - $\Rightarrow \searrow O_2 // \nearrow CO_2$
 - $\Rightarrow$ Au fur et à mesure $\searrow O_2 //$ moins de minéralisation de mo
 - $\Rightarrow$ Préservation de mo dans sédiments marins
- **Forte teneur en nutriments des eaux profondes**
 - $\Rightarrow$ Bloom de phytoplancton dans zones de upwelling
 - ✓ *efflorescences océaniques (bloom de phytoplancton)*

Conservation de la mo car pas d'oxydation



Une efflorescence de phytoplancton, dont la chlorophylle tinte l'océan, permet ici de détecter les tourbillons océaniques depuis l'espace - Copernicus Sentinel data - 2019 - traité par l'ESA, CC BY-SA 4.0 / The Conversation



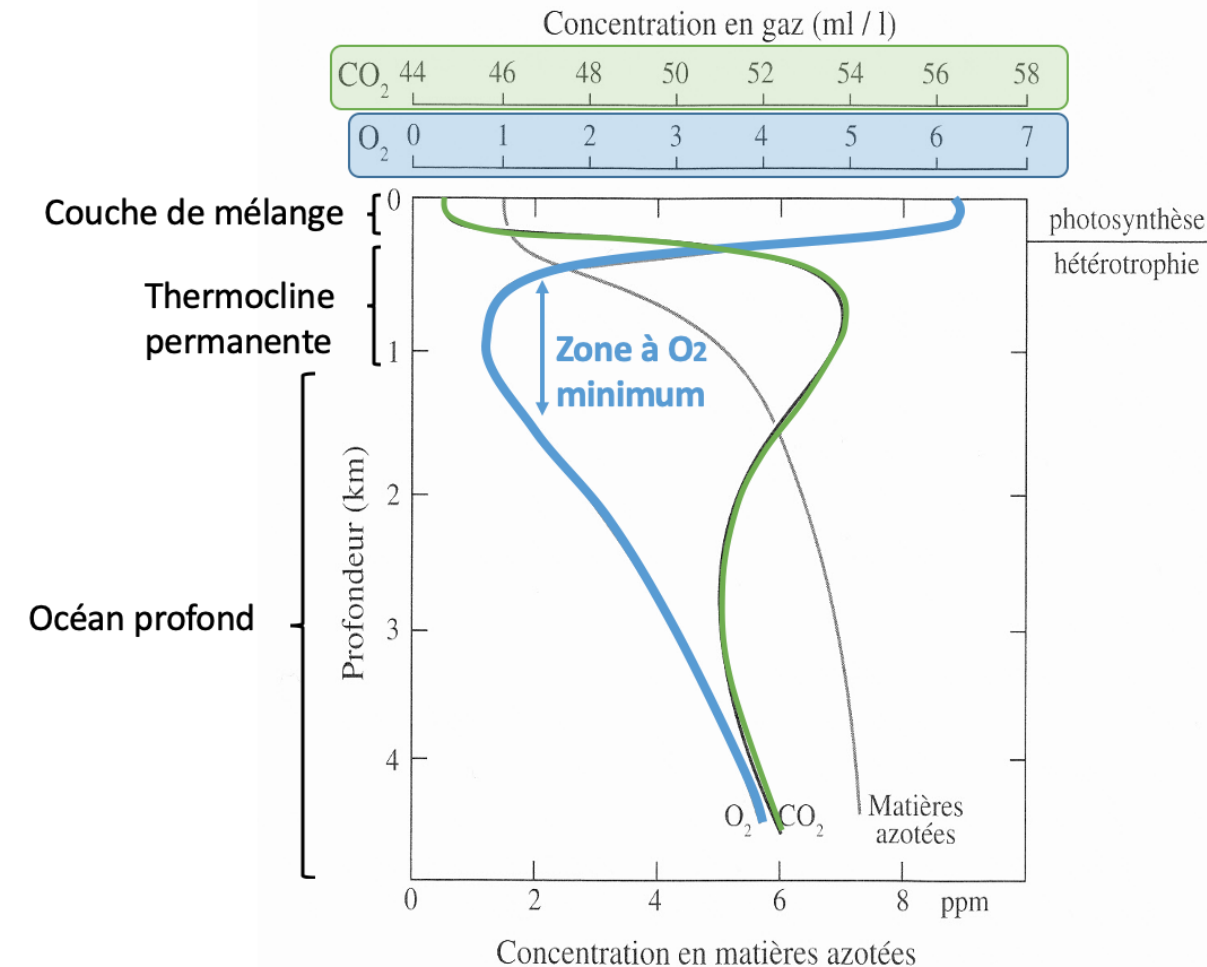
Les trois couches de l'océan. Dioxygène, CO₂ et matières organiques azotées.22

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN



- La teneur en **gaz dissous** fonction de:
 - surface d'eau libre en contact avec l'atmosphère
 - température de l'eau
 - ✓ ↗ solubilité d'O₂ si T °C ↘
 - ✓ ↗ solubilité de CO₂ si T °C ↘ cf rincer sa douche à l'eau froide!
 - activité biologique (plancton):
 - ✓ eaux de surfaces (200 premiers mètres) mixées (sous l'action du vent), oxygénées et éclairées (zone euphotique), riches en plancton.
 - ✓ Descente des eaux polaires froides dans l'Atlantique Nord fondamentale pour la vie en profondeur

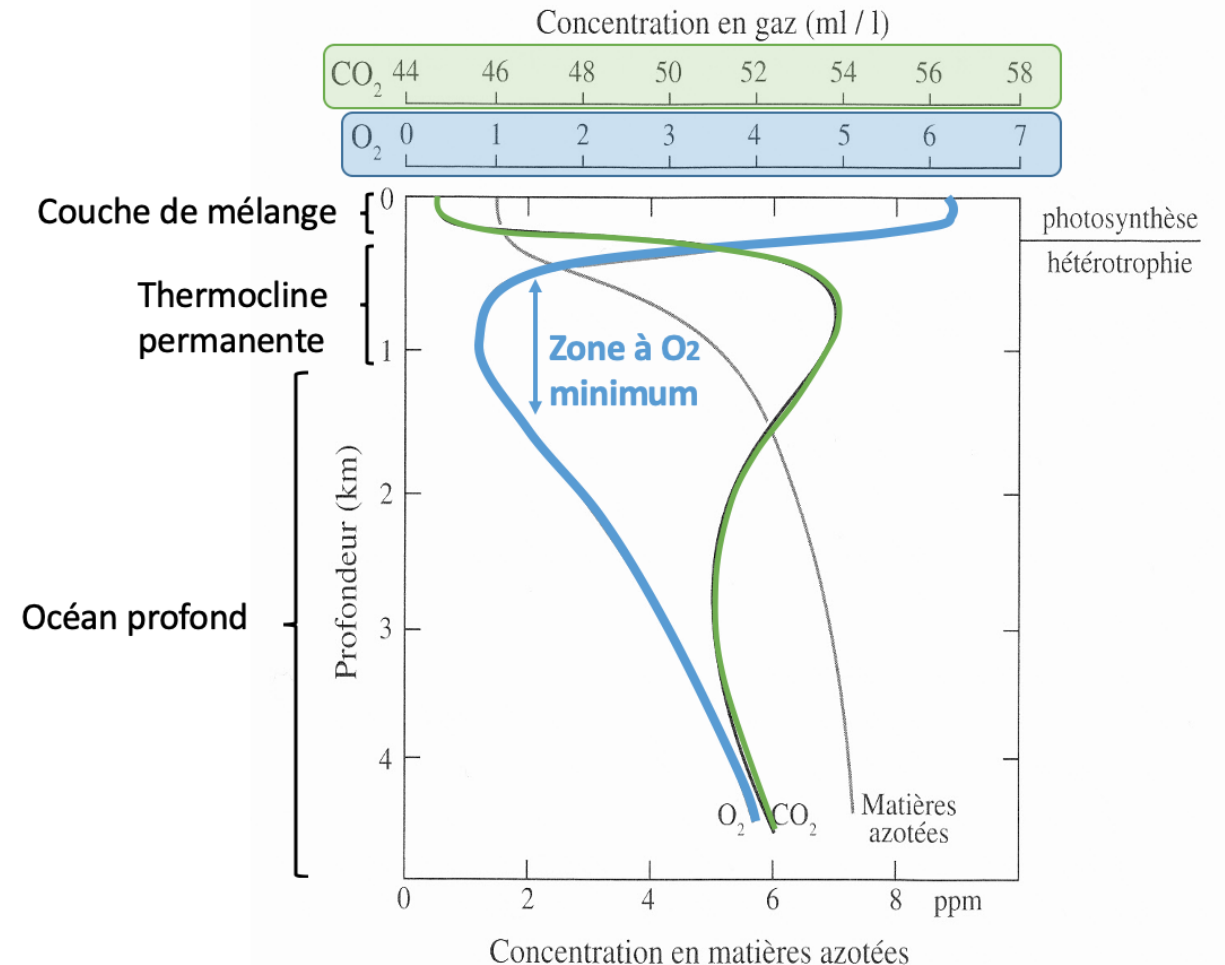


I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN



- **Eaux de surface = couche de mélange**
(entre 0 et 200 à 300m)
 - fort **couplage** avec l'**atmosphère**
 - ⇒ T°C variables
 - ⇒ **mouvements rapides** (qq km /h)
influencés par les vents
- **Thermocline permanente** : zone de transition située entre **200 et 1000m** = ↘ importante de T°C
- **Eaux profondes** :
 - T°C stable ~4-5°C
 - Déplacements lents (3-4 m/h).



Les trois couches de l'océan. Dioxygène, CO₂ et matières organiques azotées.²⁴

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

B. COMPOSITION ET STRATIFICATION DE L'OCEAN

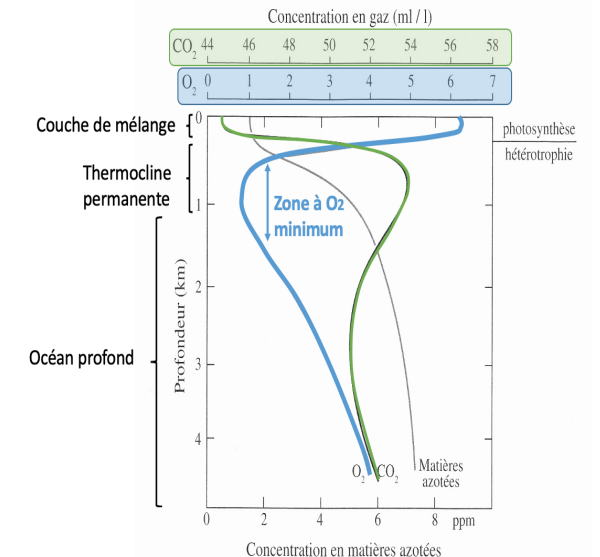
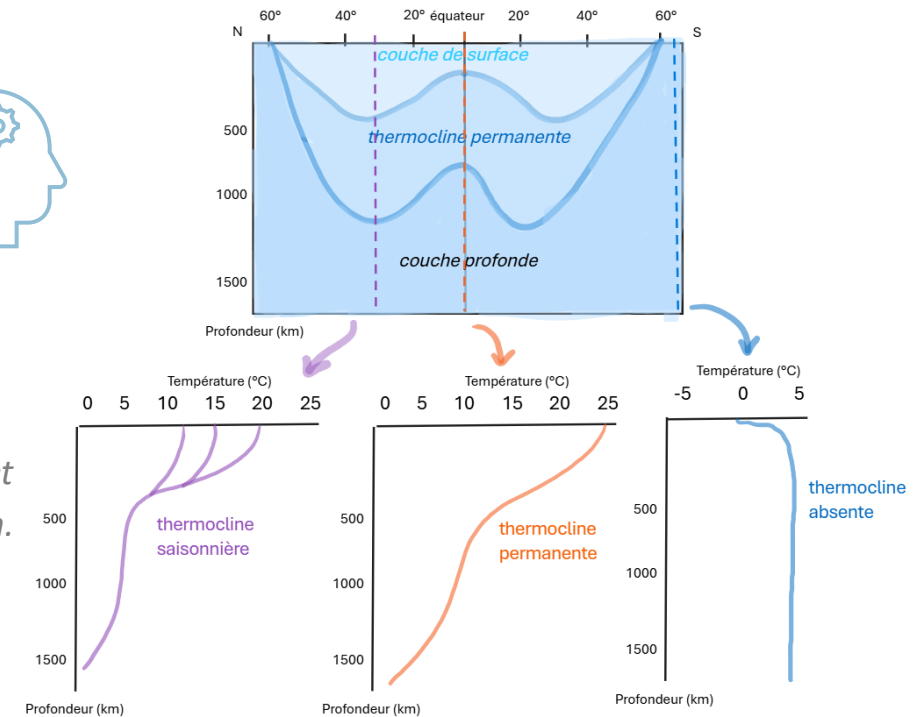
BILAN



■ 3 masses océaniques superposées :

- eaux de surface = couche de mélange (0 à 200 m)
 - ✓ Fort couplage avec atmosphère (qq km/h)
 - ✓ Réservoir thermique (équateur, latitude tempérée)
 - ✓ Photique: oxygénation importante + forte activité biologique (phytoplancton → zooplancton → téléostéen ...)
- Thermocline (200 m à 1000 m): aucun mélange
 - ✓ zone de chute de température constituant une frontière s'opposant au mélange
 - ✓ Zone aphotique: $\searrow$ O₂ // $\nearrow$ CO₂
- eaux profondes
 - ✓ Denses (halocline et pycnocline élevées) car froides (4-5°C) et salées (35 ‰)
 - ✓ Riches en matières azotées conservées (possibles remontées au niveau des upwelling côtiers)

Profil de température et stratification de l'océan.



PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques

 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE



I. Les différentes couches de l'atmosphère présentent une stabilité relative: formation d'un nuage

- **Troposphère: 0 à 12 km**
 - T°C moyenne: 15°C à proximité du sol et -56°C à la tropopause
 - ✓ réchauffement par IR
 - ✓ pression plus forte en plaine qu'en altitude, d'où T°C plus élevée en plaine qu'en altitude
 - ✓ **nuages**
 - 80% de masse atmosphérique
- Air assimilable à un gaz parfait
 - ⇒ $\rho = P \times Ma / RT$
 - ✓ ρ : masse volumique (kg.m^{-3})
 - ✓ P: pression (en Pa)
 - ✓ Ma: masse molaire de l'air (29 g.mol^{-1}): **Ma $\searrow$ avec l'altitude**
 - ✓ R: constante des gaz parfaits (8,314 $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)
 - ✓ T: température (en K)
 - ⇒ Basses couches de l'atmosphère : les plus denses
 - Si petit volume d'air chauffé (T $\nearrow$) alors $\rho \searrow$ et donc petit volume d'air monte
 - ⇒ Troposphère (*tropo* = tour) : instable, zone turbulente de l'atmosphère



Figure 21.5 Les deux grands types de formations nuageuses.

- A.** Formation nuageuse cumuliforme, témoin d'une instabilité de la couche saturée de l'atmosphère (région du massif des Trois Couronnes, Pays basque espagnol).
- B.** Formation nuageuse stratiforme, témoin d'une stabilité de la couche saturée de l'atmosphère.

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

I. Les différentes couches de l'atmosphère présentent une stabilité relative: formation d'un nuage

■ $PV = nRT$

- Air chaud plus grand $V \Rightarrow$ moins dense $\Rightarrow$ air chaud monte



■ Troposphère :

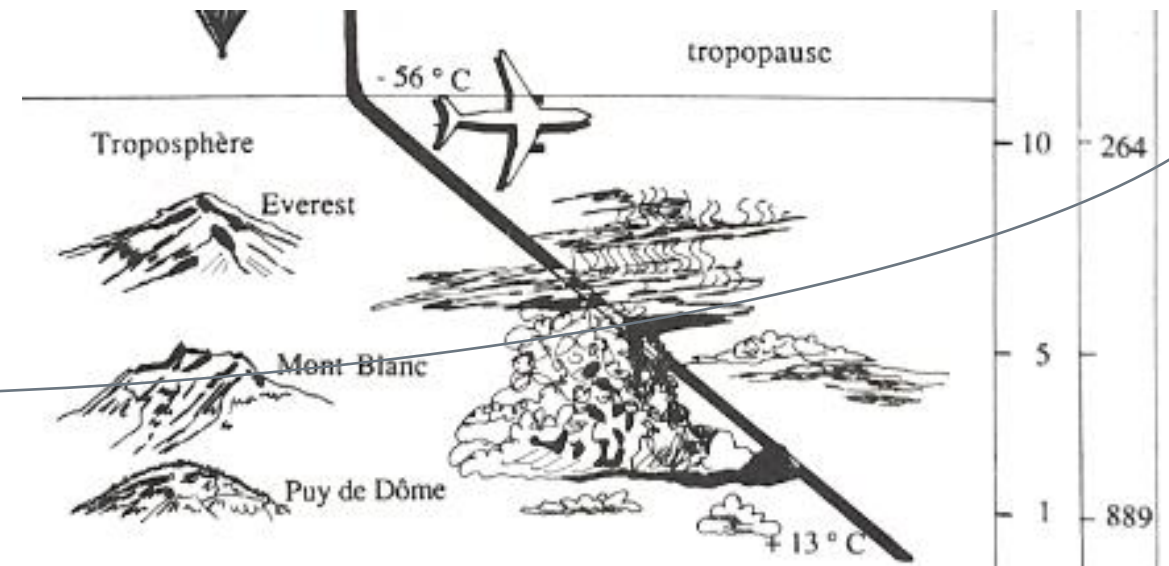
- **chauffée par le bas** (IR de surface terrestre)
- $\Rightarrow \searrow T^{\circ}\text{C}$ avec l'altitude
- $\Rightarrow \searrow$ pression de vapeur saturante
- $\Rightarrow$ condensation de vapeur d'eau L sur nuclei
- $\Rightarrow$ formation de nuages

- ✓ **Nuage cumuliforme** : instabilité de la troposphère
- ✓ **Nuage stratiforme** : stabilité de troposphère (souvent plus hauts)



Figure 21.5 Les deux grands types de formations nuageuses.

- A. Formation nuageuse cumuliforme, témoin d'une instabilité de la couche saturée de l'atmosphère (région du massif des Trois Couronnes, Pays basque espagnol).
- B. Formation nuageuse stratiforme, témoin d'une stabilité de la couche saturée de l'atmosphère.

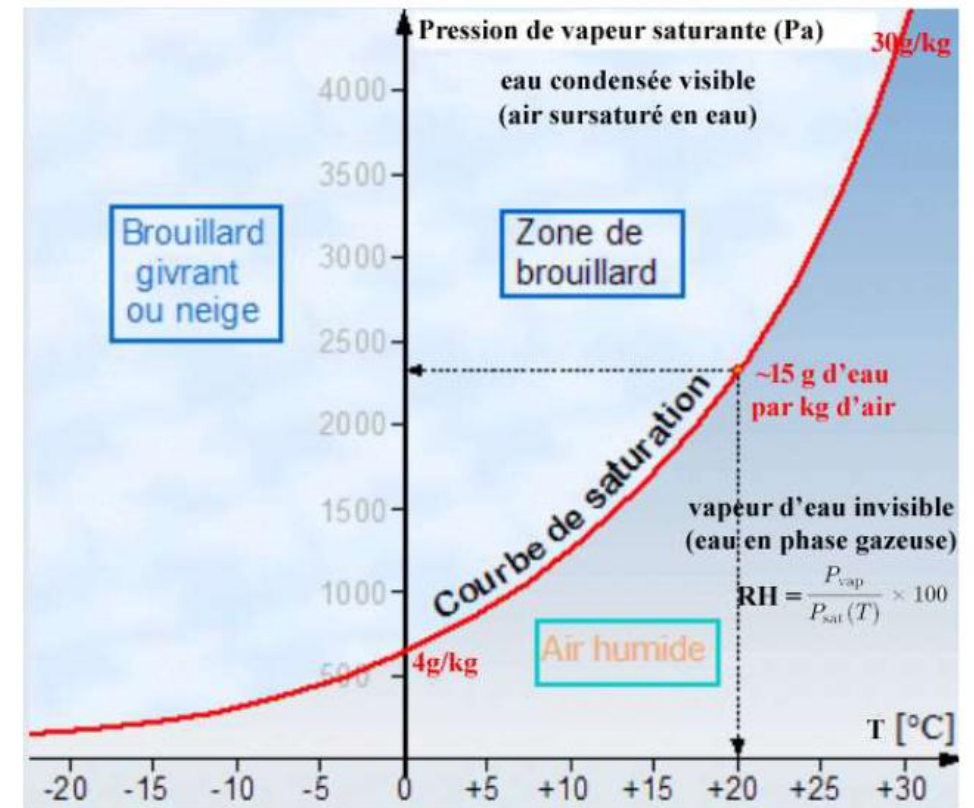


I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

I. Les différentes couches de l'atmosphère présentent une stabilité relative: formation d'un nuage

- **Air chaud** peut contenir une plus grande quantité de **vapeur d'eau** que l'air froid:
 - pression de **vapeur saturante** varie en fonction de la **T°C** :
 - ✓ à 20°C: 1kg d'air (~1m³ au niveau de la mer car 1L d'air pèse 1,2g) contient 15g de vapeur d'eau (invisible)
 - ✓ à 0°C : 1kg d'air contient seulement 4g
- Air chaud monte, se refroidit et passe la courbe de saturation:
 - ⇒ Vapeur d'eau se condense en eau liquide (ssi nucléation possible sur des particules...)
 - ⇒ Air sursaturé en eau
 - ⇒ gouttelettes visibles (nuage, brouillard) de 1 à 100 µm
 - ⇒ ou en cristaux de glace selon la température.
- **Cln**: La détente de l'air chaud qui monte provoque son refroidissement et si la courbe de saturation est franchie, la vapeur d'eau se condense en eau liquide.



Courbe de saturation de l'air en vapeur d'eau

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

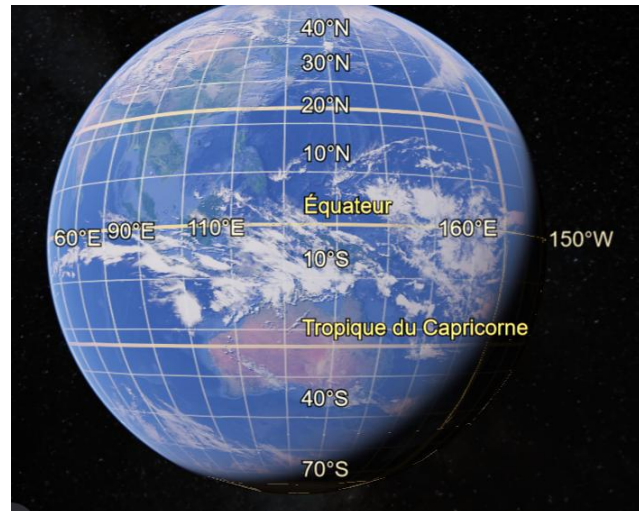
I. Les différentes couches de l'atmosphère présentent une stabilité relative: formation d'un nuage

- **Cln:** Détente de l'air chaud qui monte provoque son refroidissement

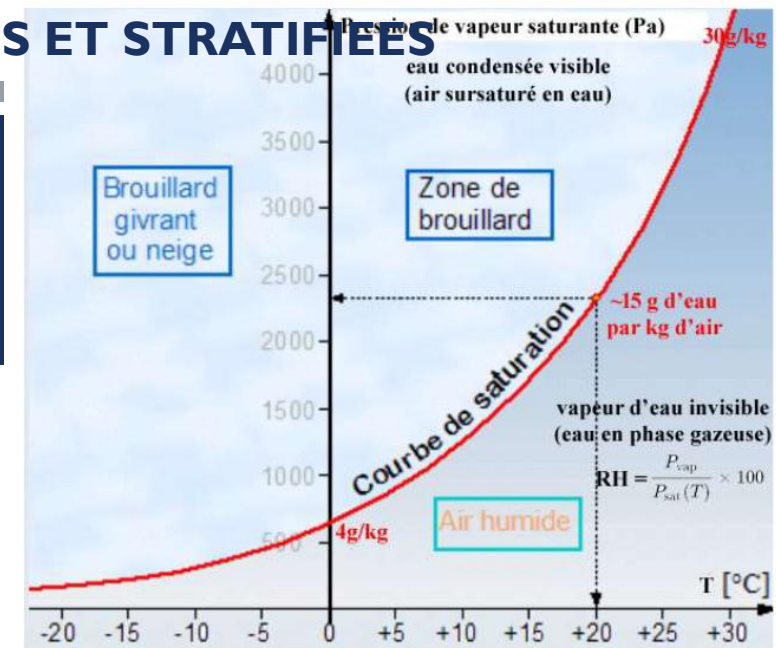
Si courbe de saturation franchie $\Rightarrow$ condensation de l'air chaud $\Rightarrow$ pluie

- **A l'équateur:** forte puissance solaire reçue et grande surface océanique

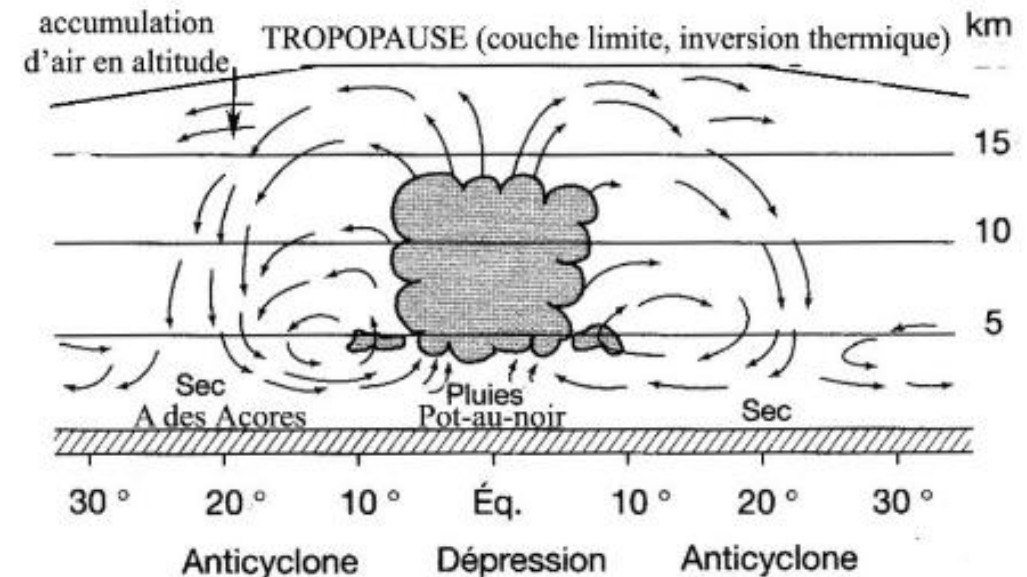
- $\Rightarrow$ Énergie utilisée pour vaporiser eau liquide en vapeur d'eau (enthalpie massique de changement de phase)
- $\Rightarrow$ Air très humide et chaud donc monte
- $\Rightarrow$ Détente importante
- $\Rightarrow$ Courbe de saturation dépassée
- $\Rightarrow$ Nuages nombreux



Google Earth: le
14/03/2024 à 11h36



Courbe de saturation de l'air en vapeur d'eau



La troposphère à l'équateur est agitée, ascension de masses d'air chaudes et humides

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

I. Les différentes couches de l'atmosphère présentent une stabilité relative: formation d'un nuage

BILAN



- Selon les types de **nuages**: témoins d'une **stratification** de troposphère ou d'une **perturbation** de strates:

- Si troposphère **stratifiée** en couches stables

- ✓ Nappes de nuages sur des milliers de km² = **stratus**
- ✓ Soit « mers de nuage » piégées au sommet
- ✓ Soit stratus au ras du sol: **brouillard**

- Si troposphère **perturbée**: cellule convective = **cumulus**

- ✓ Cœur du cumulus: ascension d'air chaud donc avec vapeur d'eau ⇒ franchissement de courbe de saturation ⇒ précipitation
- ✓ Plus nuage avec extension verticale (3500m du sol), plus cumul d'eau ⇒ orage (cumulonimbus)

Inversion thermique

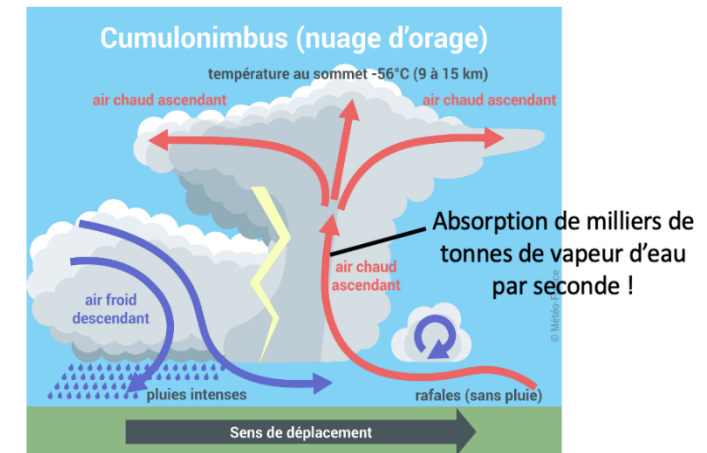


<https://www.meteocontact.fr/pour-aller-plus-loin/les-inversions-thermiques>



Des stratus ⇒ l'atmosphère est stratifiée
Des cumulus ⇒ l'atmosphère est instable

Formation d'un nuage convectif



<https://mefrance.com/comprendre-la-meteo/orages/les-cumulonimbus>

I. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE : DES ENVELOPPES FLUIDES ET STRATIFIEES

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

I. Les différentes couches de l'atmosphère présentent une stabilité relative: formation d'un nuage BILAN



<https://www.jerome-narcy.com/photos-vercors/mer-de-nuages-alpes/>

Altostratus nebulosus (mer de nuage)



<https://météofrance.com/comprendre-la-météo/nuages/les-différents-types-de-nuages>

Stratus nebulosus: brouillard



<https://météofrance.com>

Cumulus



Wikipédia

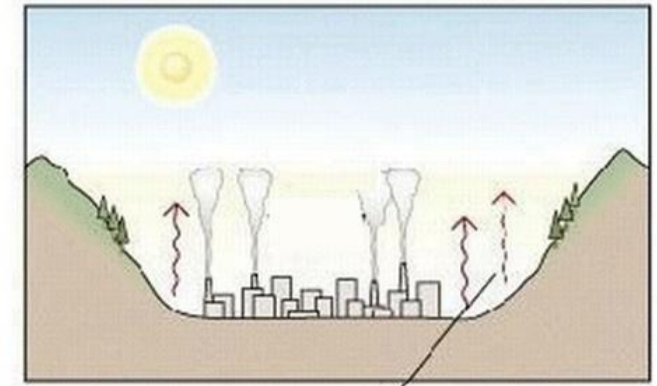
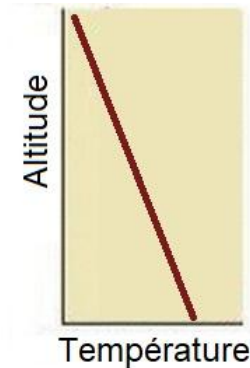
Cumulonimbus

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

2. Inversion thermique



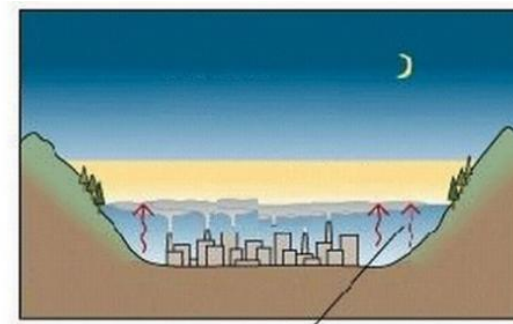
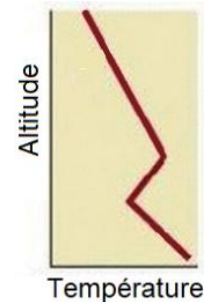
- air le plus chaud : près du sol, mais ...
 1. ... si : sol se refroidit rapidement pendant une nuit claire et calme
 2. ... si : couche d'air chaud provenant du sud transportée au-dessus d'une couche d'air plus froid des latitudes moyennes
 3. Alors: **inversion thermique** : volume d'air du sol qui s'élève bloqué (car plus dense que couche d'air chaude)
- ⇒ Pollution atmosphérique due à accumulation de particules fines
- ✓ 5 au 9 décembre 1952: grand smog à Londres; 4000 morts



Inversion thermique



Great Smog of London, lethal smog that covered the city of London for five days, from December 5 to December 9, in 1952



Phénomène d'inversion thermique (à gauche : période normale, à droite : inversion thermique)



C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

3. Les limites à la stratification verticale de l'océan

■ Topographie océanique: révèle mouvements verticaux de l'eau

➤ altimétrie satellitaire

- ✓ Un satellite envoie des trains d'ondes qui se réfléchissent sur l'eau et lui reviennent. En parallèle, le satellite détermine très précisément sa position en communiquant avec des balises posées au sol. En combinant les données sur l'orbite du satellite et celles des trains d'onde, on peut reconstituer la topographie océanique. De nombreuses mesures sont nécessaires pour éliminer la topographie dynamique (vagues).

■ Formation des courants marins :

- ✓ Par exemple, dans l'océan Pacifique, les alizés poussent l'eau qui s'accumule donc à l'ouest de l'océan. Le fait que l'eau de surface soit chassée de la côte ouest de l'Amérique du Sud provoque une **remontée d'eau froide** venue des profondeurs : c'est un **upwelling côtier**. Les eaux profondes étant riches en nutriments et bien oxygénées, elles favorisent la prolifération de plancton.

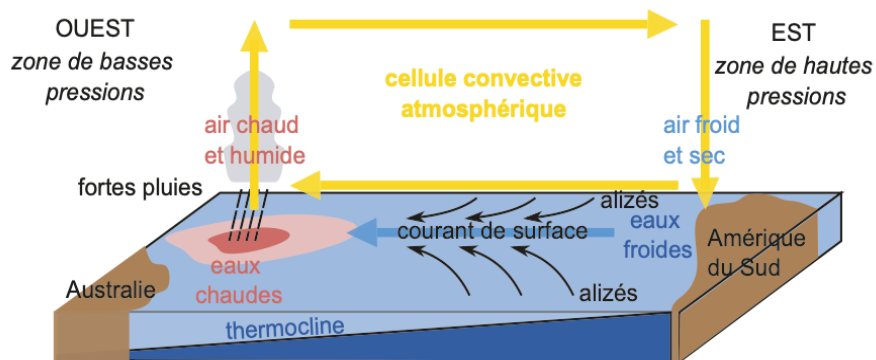
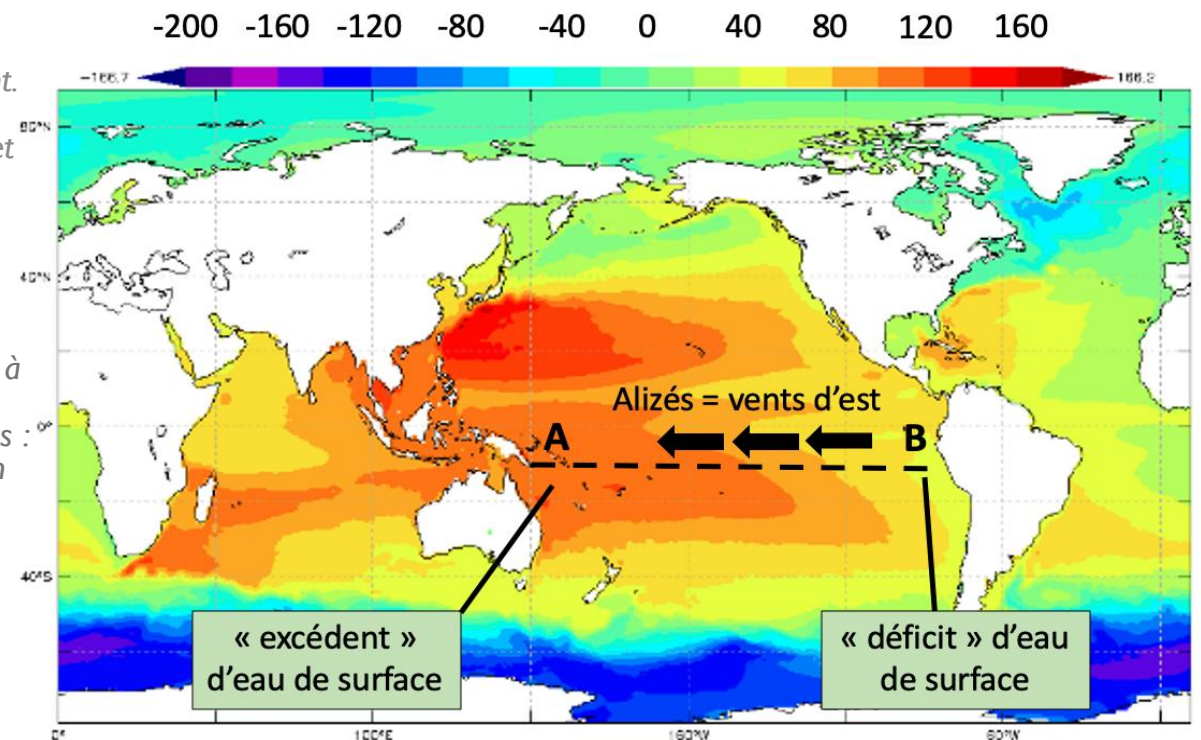


Figure 30.3 Cellule de Walker du Pacifique vue en coupe.

Variations de topographie océanique (en mm) obtenues par altimétrie satellitaire



L'upwelling côtier d'Amérique du Sud : une zone de perturbation de la stratification océanique.
(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/DOT/> ; https://www.researchgate.net/figure/a-West-Pacific-SST-Walker-cell-and-upwelling-during-ENSO-neutral-conditions-b-West_fig6_322886947)

C. INSTABILITE DES ENVELOPPES FLUIDES / DESEQUILIBRE

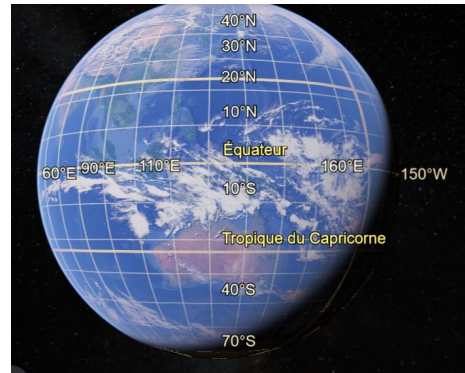
Bilan



- Troposphère et l'océan : stratification verticale, mais...
- ... Courants horizontaux et courants verticaux
 - ⇒ limites à leur stratification verticale.



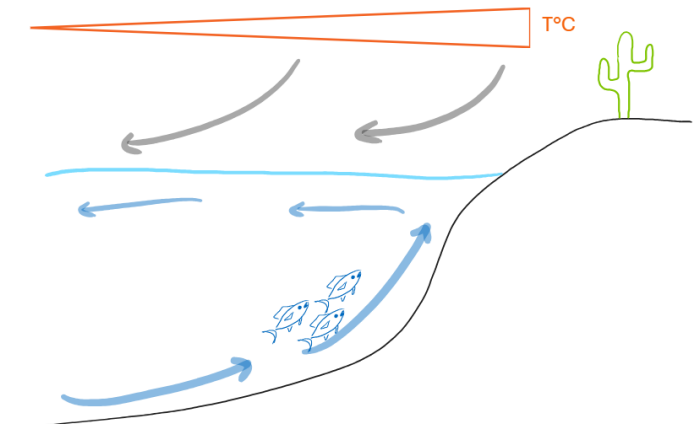
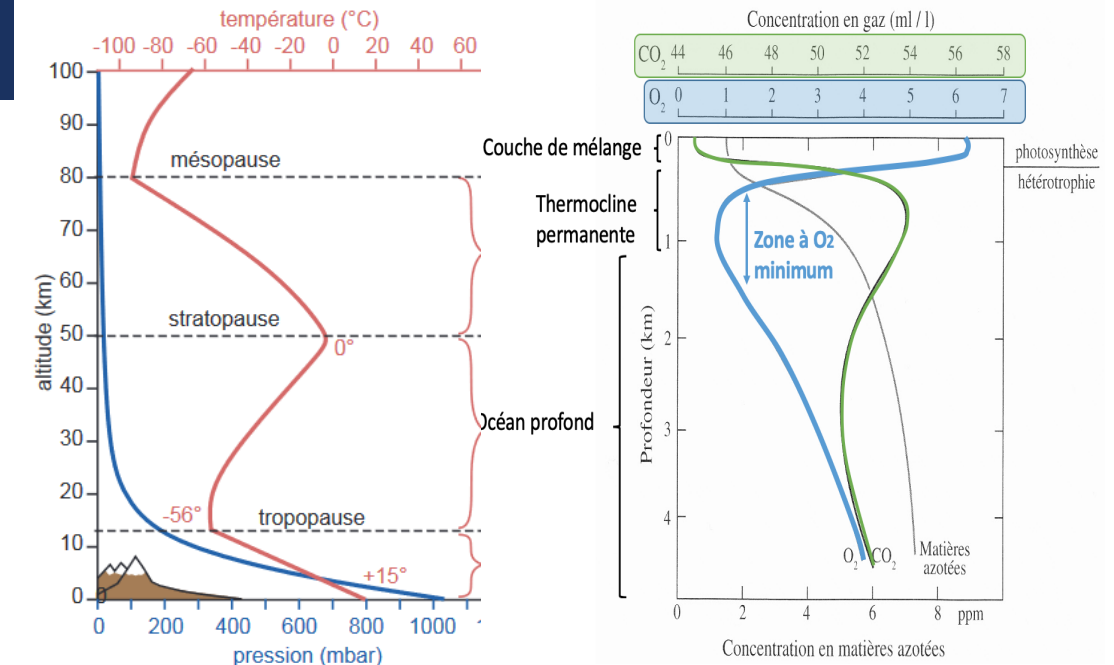
Courants atmosphériques verticaux et horizontaux



Courants atmosphériques horizontaux



Courants océaniques horizontaux
ENCPB- BCPST I - STÉPHANIE DALAINE



Courants marins verticaux: upwelling

PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques

 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

A. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE CHAUFFE LES ENVELOPPES FLUIDES

- **Flux solaire** moyen sur Terre: 342 W.m^{-2}
 - **Transfert** d'énergie du Soleil vers la Terre : **radiatif**
 - ✓ Propagation d'énergie solaire sous forme de **rayonnements électromagnétiques** (visibles et IR)
- Rappel: constat: $\searrow T^{\circ}\text{C}$ avec altitude
 - ⇒ **atmosphère chauffée par sol**
 - $T^{\circ}\text{C}_{\text{moy}}$ Terre sans effet de serre: -18°C
 - **Rayonnements par sol sous forme d'IR**
 - $T^{\circ}\text{C}_{\text{moy}}$ Terre = 15°C en moyenne
 - Absorption de l'IR par gaz atmosphériques

	Une vache 	Un radiateur 	Le Soleil 	Un siège en cuir dans une voiture exposée au soleil 	Un feu de cheminée 
rayonne dans le visible					
rayonne dans l'IR					

Tester l'effet de serre avec ou sans un toit?



II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

A. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE CHAUFFE LES ENVELOPPES FLUIDES

■ Rayonnement solaire incident (342 W.m^{-2})

- 30 % réfléchi (albédo de 0,3) par atmosphère et surface de Terre (107 W.m^{-2})

- ✓ Fonction de surface réfléchissante (continent, océan, glace...)
- ✓ Fonction de couverture nuageuse
- ✓ Fonction de angle d'incidence

- ⇒ **235 W.m^{-2} du rayonnement solaire entrent dans l'atmosphère**

- ✓ **20% absorbés par atmosphère (67 W.m^{-2})**
- ✓ **50% absorbés par surface de Terre (surtout océans) (168 W.m^{-2})**

- Réémission vers espace par atmosphère/hydrosphère/lithosphère = Terre : 235 W.m^{-2}

- ⇒ La Terre est en **équilibre thermique**

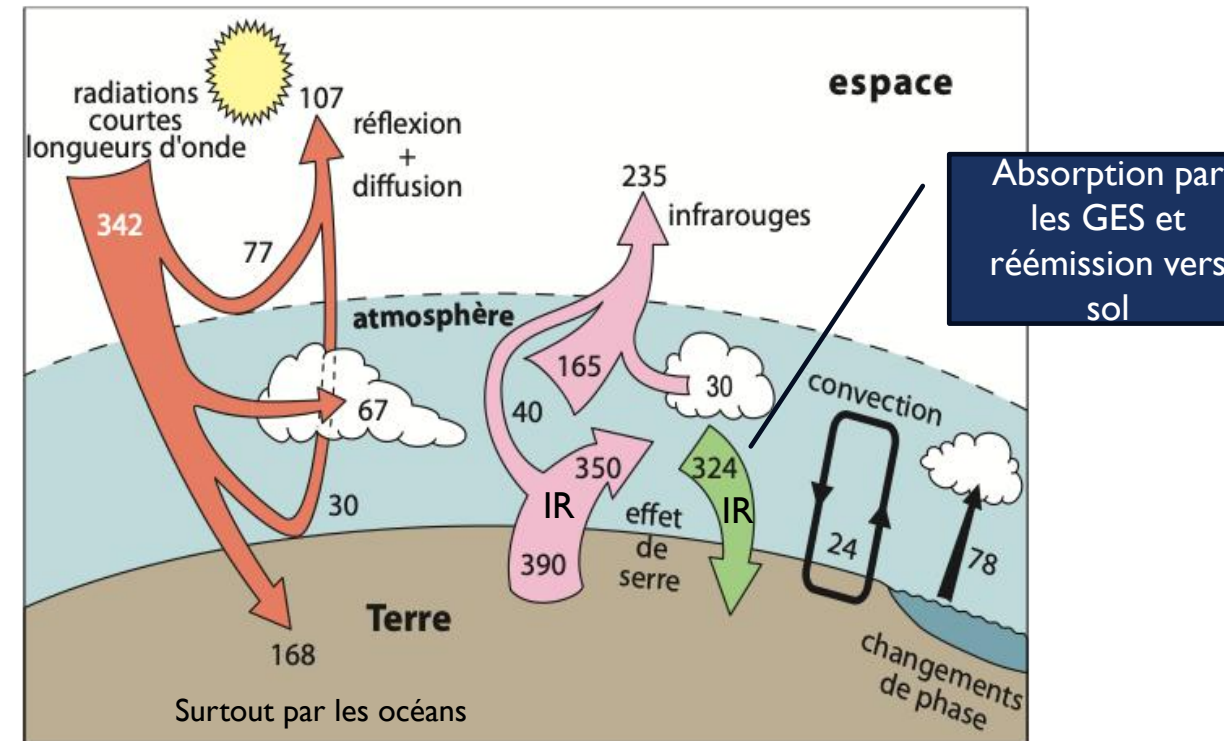


Figure 20.2 Le bilan thermique du système Terre-atmosphère (explication dans le texte).

Toutes les valeurs sont en W.m^{-2} .

II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

A. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE CHAUFFE LES ENVELOPPES FLUIDES

■ Équilibre Terre-atmosphère:

- Total de l'énergie absorbée par Terre : $168 + 324 \text{ W.m}^{-2} = 492 \text{ W.m}^{-2}$ absorbés par Terre
- **Total de l'énergie émise sous forme d'IR par terre vers atmosphère: 390 W.m^{-2}**
 - ⇒ Il manque 102 W.m^{-2} de la terre vers l'atmosphère???
- **78 W.m^{-2} sont évacués de la Terre vers l'atmosphère par changement de phase (70% d'océan!)**
- **24 W.m^{-2} sont évacués de la terre vers atmosphère par convection**
- **Bilan thermique à l'équilibre entre terre et atmosphère!**

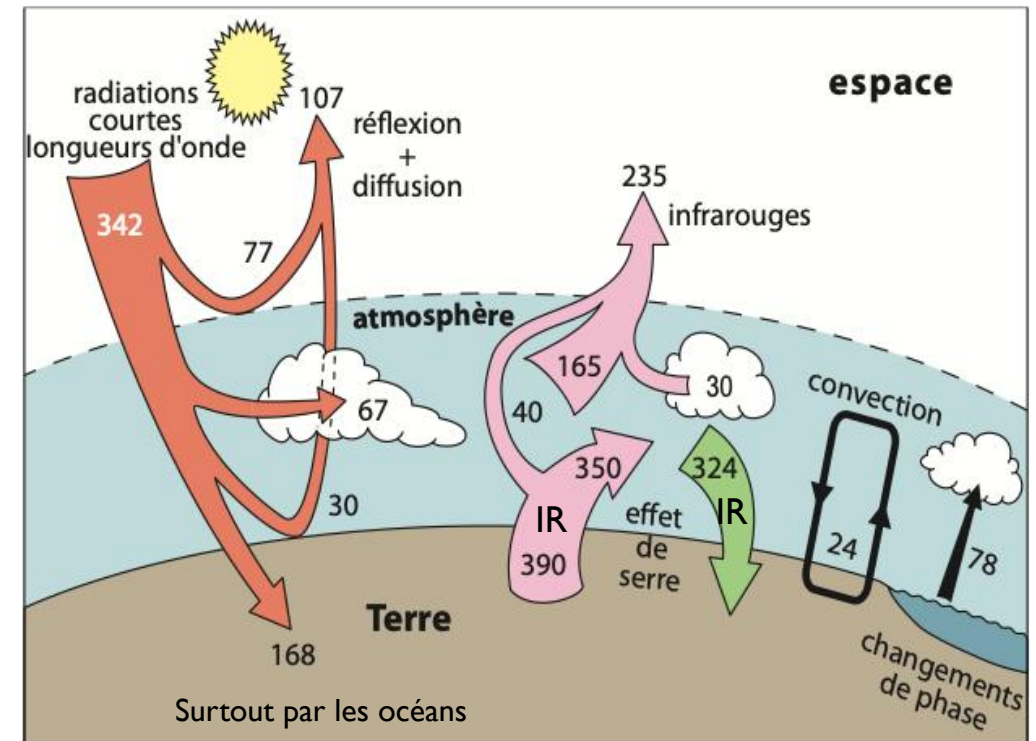
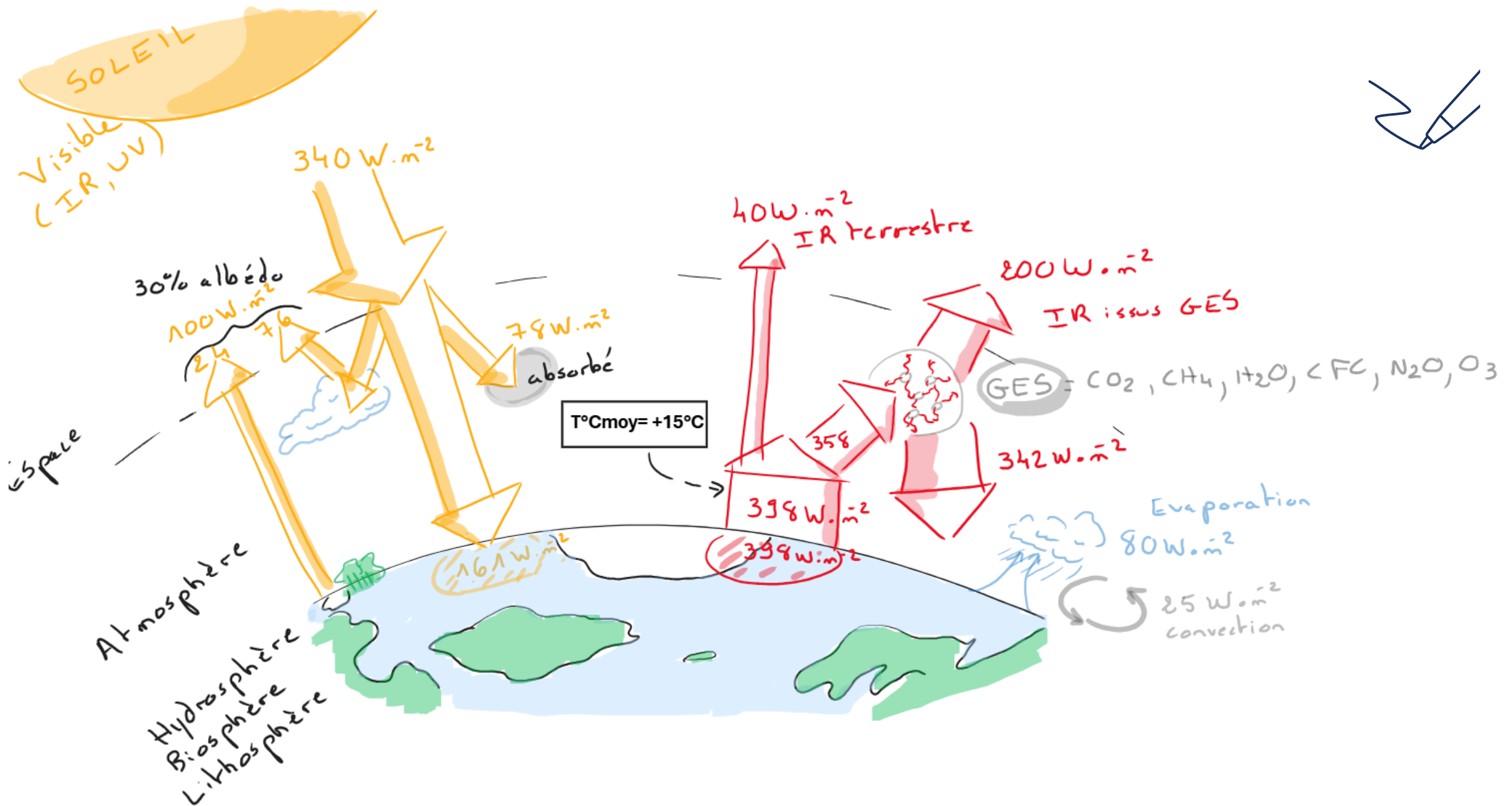


Figure 20.2 Le bilan thermique du système Terre-atmosphère (explication dans le texte). Toutes les valeurs sont en W.m^{-2} .

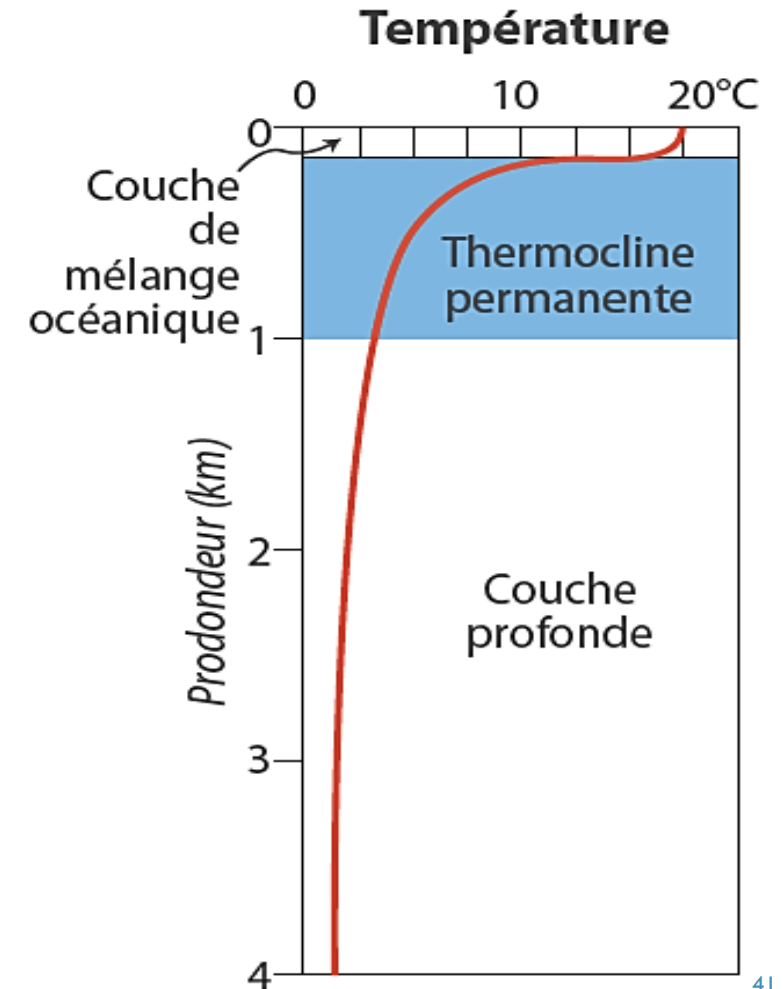


Bilan thermique (radiatif, convectif et chaleur latente de vaporisation) du système Terre-atmosphère-espace

II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

A. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE CHAUFFE LES ENVELOPPES FLUIDES

- Rappels, océan 3 couches:
 - **0-200 m:** couche de mélange, superficielle, la plus chaude:
 - ✓ Fortes variations thermiques saisonnières dans couche de mélange (200m) en zone tempérée
 - ✓ À rapprocher de la capacité thermique élevée: océan = réservoir thermique
 - 200m – 1000m : Thermocline
 - 1000m – 5000m: Couche profonde
- Contrairement à la troposphère, l'océan est donc chauffé par sa surface



PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques

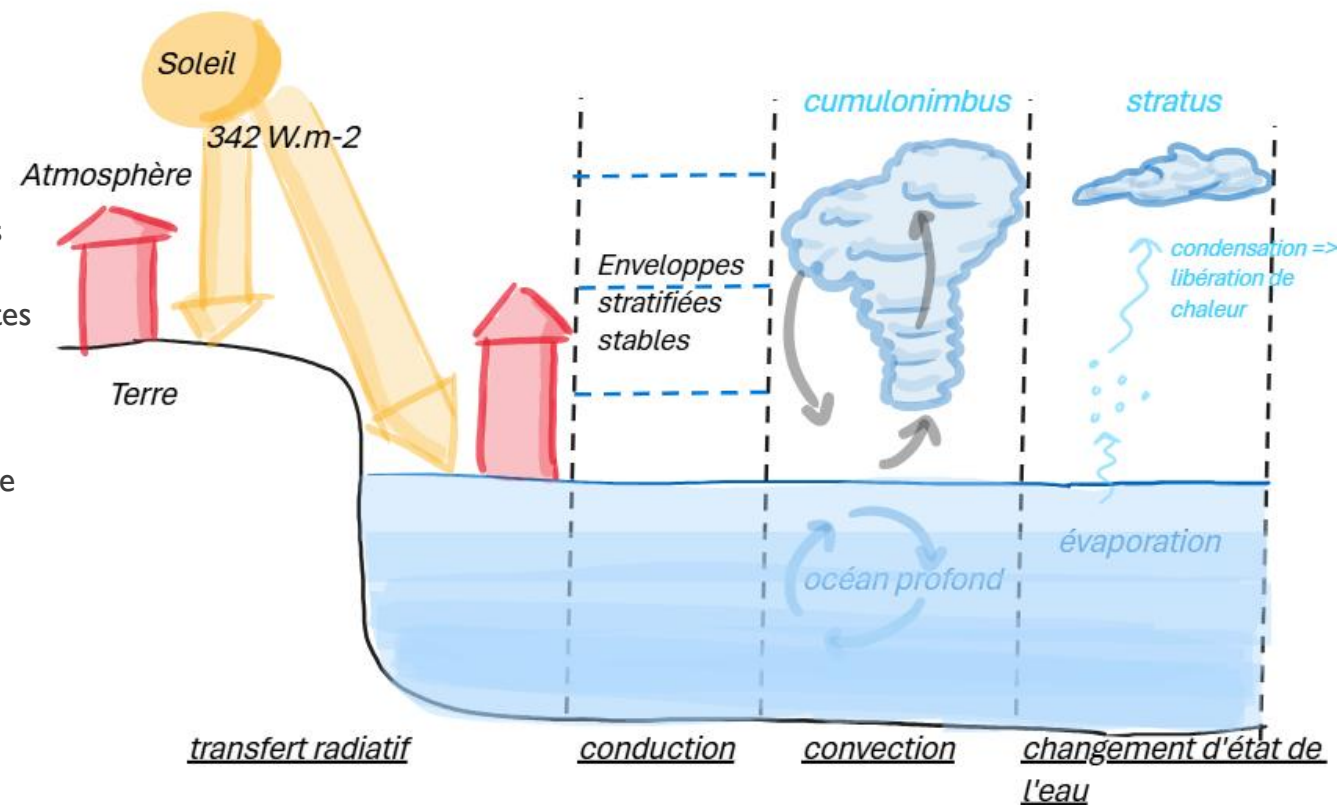
 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

B. IL EXISTE DIFFERENTS MODES DE TRANSFERTS DE L'ENERGIE AU SEIN DES ENVELOPPES FLUIDES



- Énergie solaire vers ensemble terre-atmosphère; transfert par rayonnement
- Énergie de l'ensemble terre-hydrosphère vers univers: transfert par rayonnement
- Mais ... transferts d'énergie entre terre et atmosphère:
 - **Transfert radiatif**: émission d'ondes électromagnétiques dans les IR
 - **Echanges conductifs** entre les deux enveloppes:
 - ✓ Si stratification non perturbée $\Rightarrow$ propagation par conduction dans troposphère et dans océan
 - ✓ Océan peut ainsi réchauffer ou refroidir les masses d'air sus-jacentes
 - **Mouvements convectifs**
 - ✓ Stratification perturbée (ex: *sphéricité Terre*)
 - ✓ plus efficaces que transferts conductifs
 - **Enthalpie massique de changement d'état de eau** (chaleur latente de vaporisation) = $2,25 \cdot 10^6 \text{ K.kg}^{-1}$
 - ✓ Formation d'un nuage: formation de gouttelettes d'eau **libération de beaucoup d'énergie**
 - **Capacité thermique massique** ($4,18 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ pour élever $T^\circ\text{C}$ de 1°C) (chaleur spécifique)
 - ✓ Océan emmagasine grande quantité d'énergie
 - ✓ Forte inertie thermique
 - ✓ Rôle régulateur du climat



Les échanges d'énergie par transferts radiatifs, conductifs, convectifs et par variations d'enthalpie liés aux changements d'état de l'eau

PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques

 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

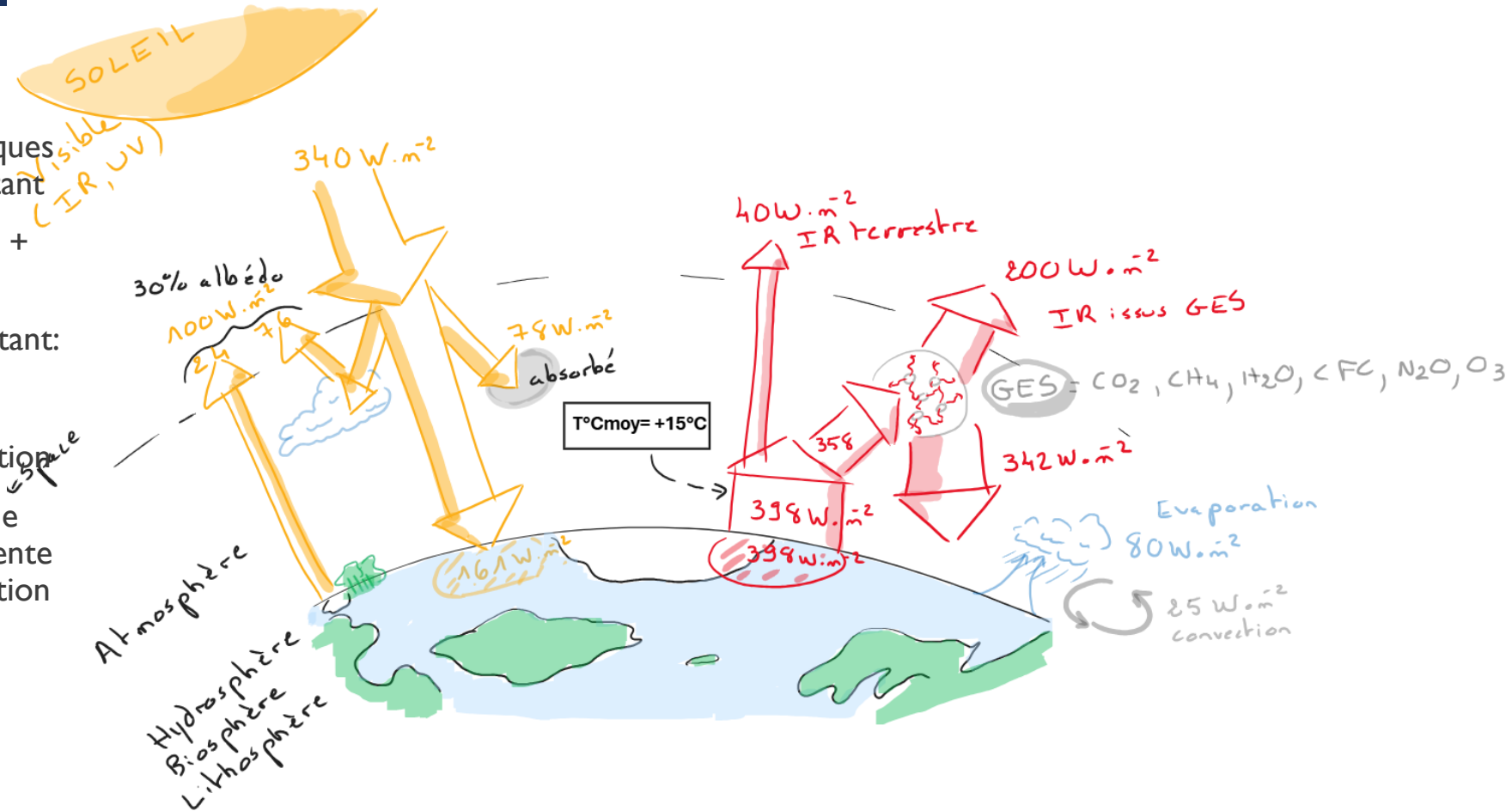
II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

C. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE EST INEGALEMENT REPARTIE

I. Le bilan radiatif moyen de la Terre

- Bilan thermique = transferts thermiques entrant – transferts thermiques sortant
- Bilan thermique radiatif du sol = **161** + **342** – **(398)** = **105 W.m⁻²**
- Transfert thermique non radiatif sortant:
-25 - 80 = -105 W.m⁻²

- **25 W.m⁻²** : transfert par convection
- **80 W.m⁻²** : enthalpie massique de changement d'état (chaleur latente de vaporisation) liée à évaporation (consomme énergie) puis condensation (libère énergie)



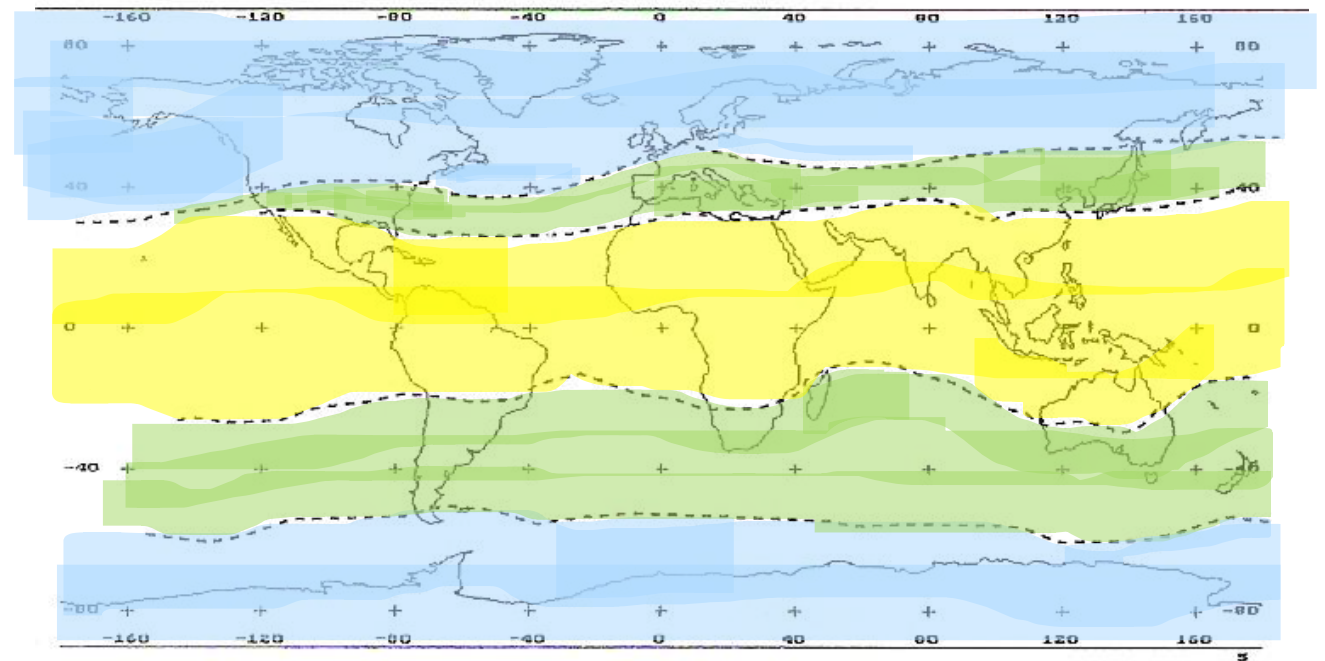
Bilan thermique (radiatif, convectif et chaleur latente de vaporisation) du système Terre-atmosphère-espace

II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

C. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE EST INEGALEMENT REPARTIE

2. Les variations spatiales et temporelles du bilan radiatif

- A la surface de la Terre, les climats présentent une **répartition latitudinale**.
- La **sphéricité de la Terre** explique cette zonation climatique.



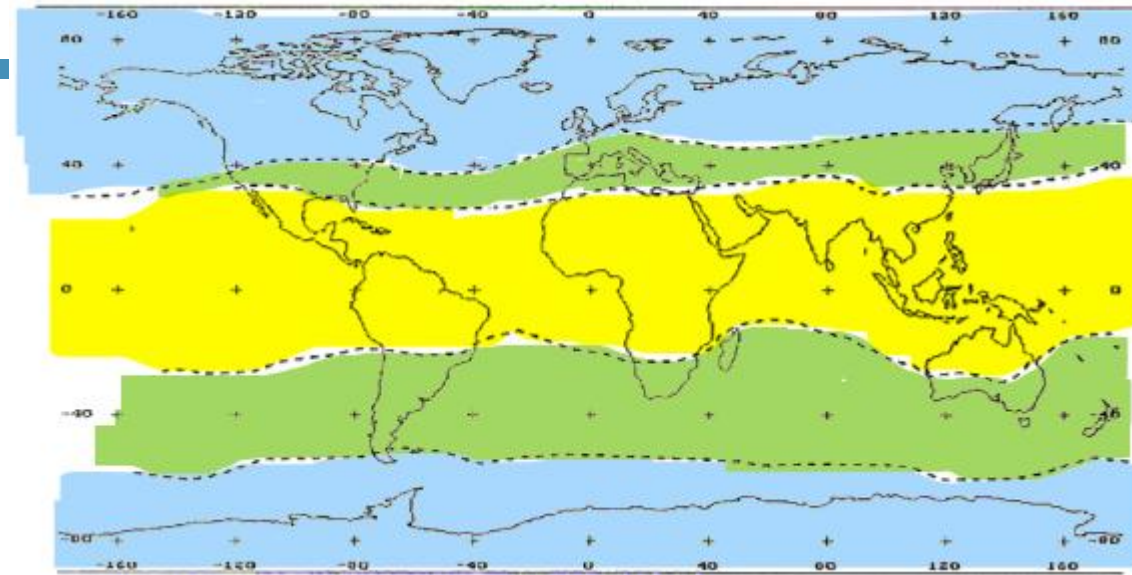
Carte simplifiée des climats

-  Zones continentales à climat plutôt froid (bleu)
-  Zones continentales à climat tempéré (vert)
-  Zones continentales à climat plutôt chaud (jaune)

- La sphéricité de la Terre explique cette zonation climatique.



Régions du globe	Latitude	Angle d'incidence *1	Surface éclairée par le rayon (mm ²)	Puissance reçue*2 en Watts/mm ²
Europe du Nord	50° à 70°	45°	400	0,25
Europe du Sud	30 à 45°	55°	250	0,4
Afrique subsaharienne	10° à 20°	75°	200	0,5
Equateur	0°	90°	100	1

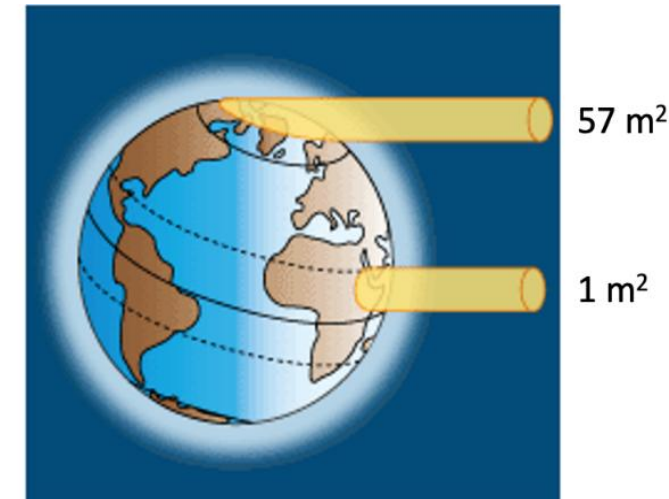


- Zones continentales à climat plutôt froid (bleu)
- Zones continentales à climat tempéré (vert)
- Zones continentales à climat plutôt chaud (jaune)

ANNEXE 1 : Mesure de l'angle d'incidence



Modélisation de l'influence de la sphéricité de la Terre sur la répartition latitudinale des climats



Un même faisceau de radiation solaire couvre une surface terrestre différente selon la latitude

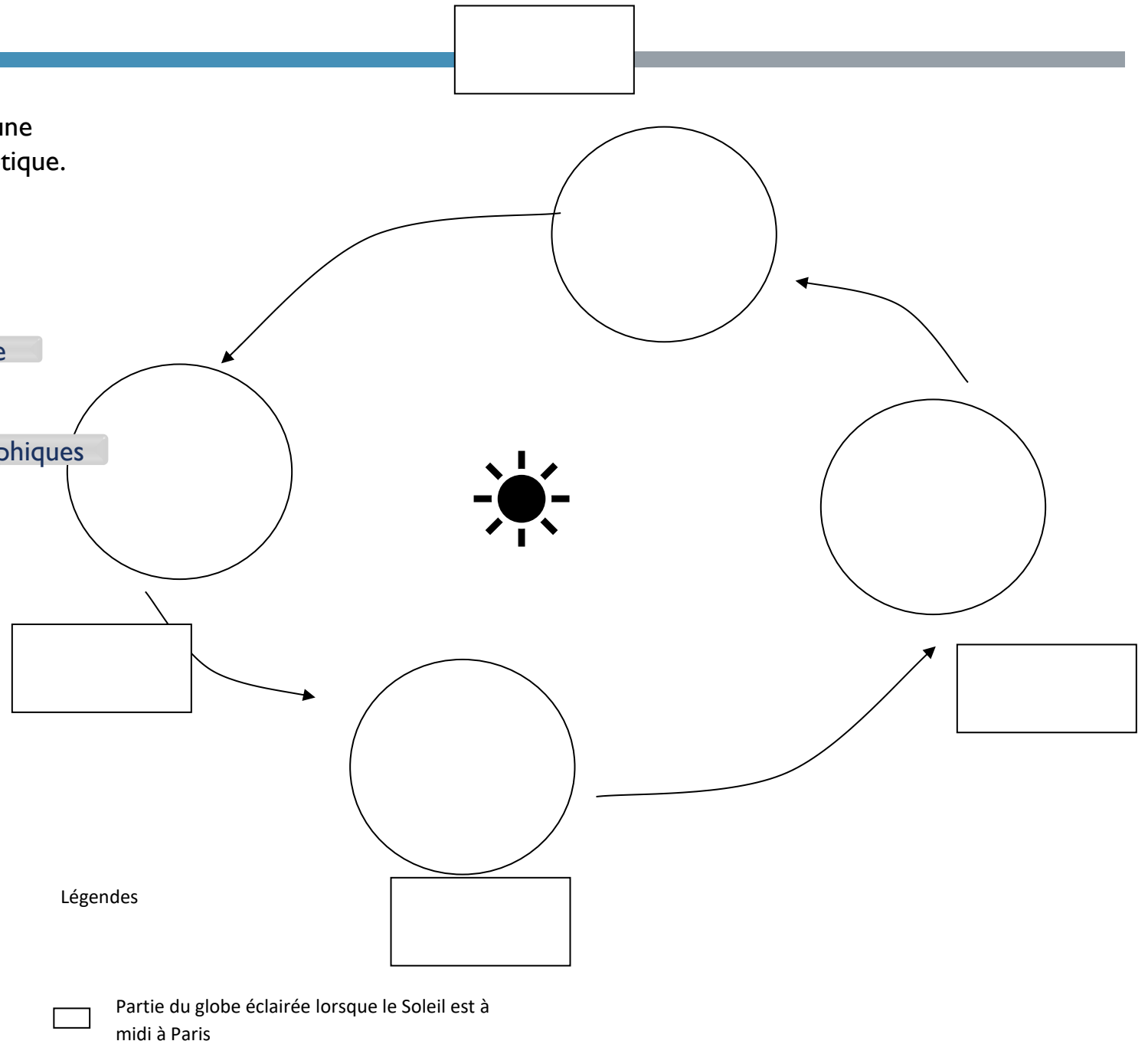
<http://systeme-solaire-svt.e-monsite.com/pages/la-terre-dans-le-systeme-solaire/l-energie-solaire-est-inegalement-repartie-a-la-surface-du-globe.html>

- L'étude d'images satellitales a permis de mettre en évidence une inclinaison de $23^{\circ}27'$ de la Terre par rapport au plan de l'écliptique.

- La Terre tourne autour du Soleil, dans le sens **anti-horaire**, sur une orbite **elliptique** ...
L'obliquité de la Terre par rapport au plan de l'**équiptique** est de : **$23^{\circ}27'$** . La Terre tourne sur elle-même, en **24 h** . Son axe de rotation passe par **les pôles géographiques Nord et Sud** . . .

- L'existence des saisons est due à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre : durant l'**été** boréal, l'hémisphère nord est incliné vers le Soleil, alors que durant l'hiver boréal, il est incliné dans l'autre sens.

Schéma représentant l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil et modélisant les saisons dans l'hémisphère Nord



- La Terre tourne autour du Soleil, dans le sens antihoraire, sur une orbite elliptique. L'obliquité de la Terre par rapport au plan de l'écliptique est de $23^{\circ}27'$. La Terre tourne sur elle-même, en 24 h.. Son axe de rotation passe par les pôles géographiques Nord et Sud.
- Il existe également de fortes variations saisonnières de la quantité d'énergie solaire reçue aux latitudes moyennes à élevées. L'existence de ces saisons est due à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre : durant l'été boréal, l'hémisphère nord est incliné vers le Soleil, alors que durant l'hiver boréal, il est incliné dans l'autre sens.

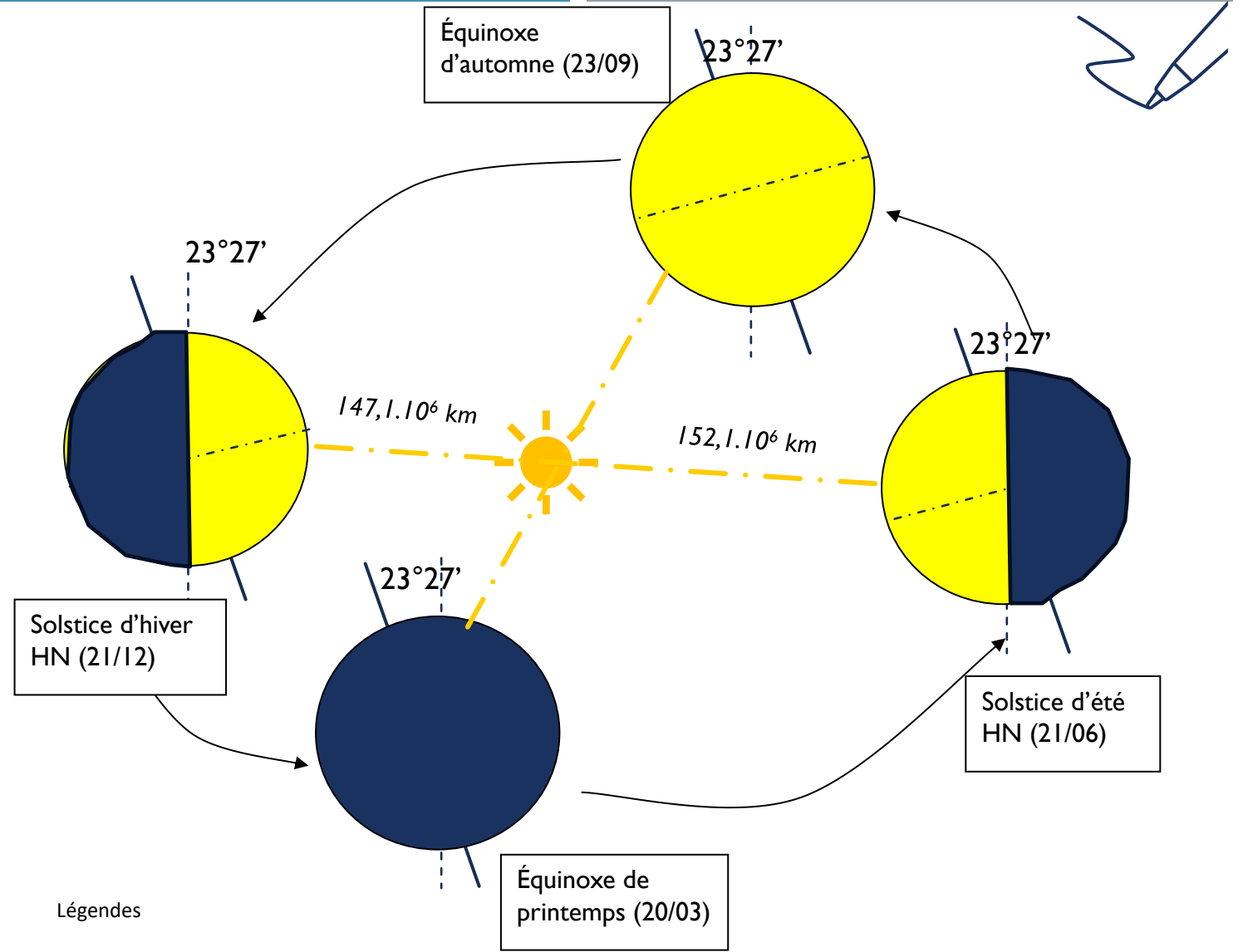


Schéma représentant l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil et modélisant les saisons dans l'hémisphère Nord

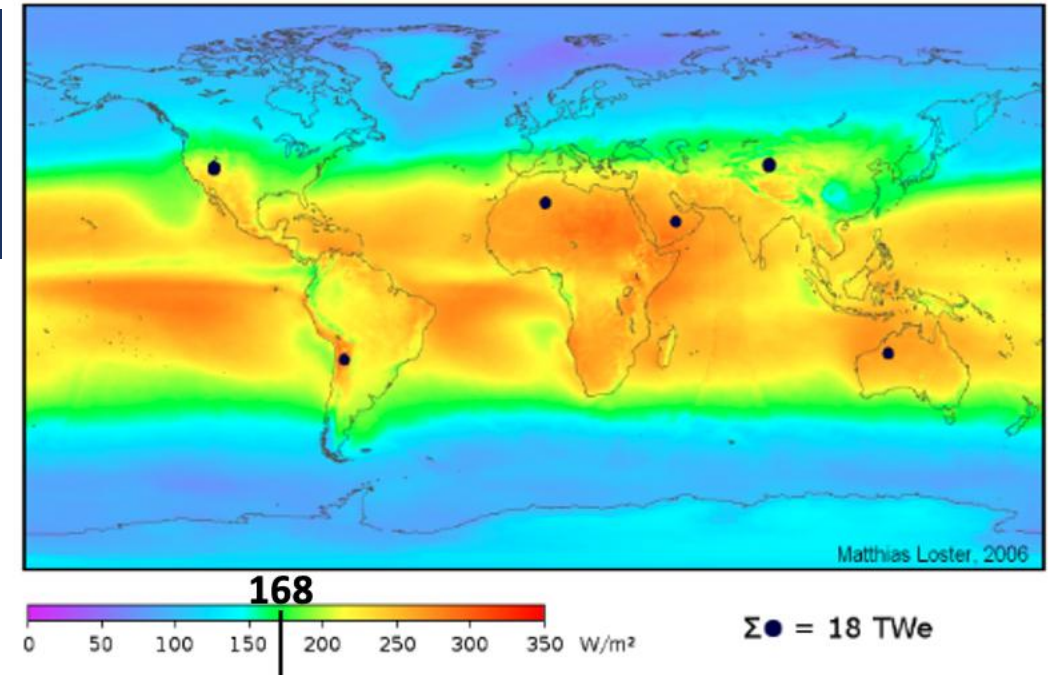
II. LA CIRCULATION DES ENVELOPPES RESULTE D'UNE INEGALE REPARTITION DE LA CHALEUR

C. L'ENERGIE SOLAIRE REÇUE PAR LA TERRE EST INEGALEMENT REPARTIE

2. Les variations spatiales et temporelles du bilan radiatif

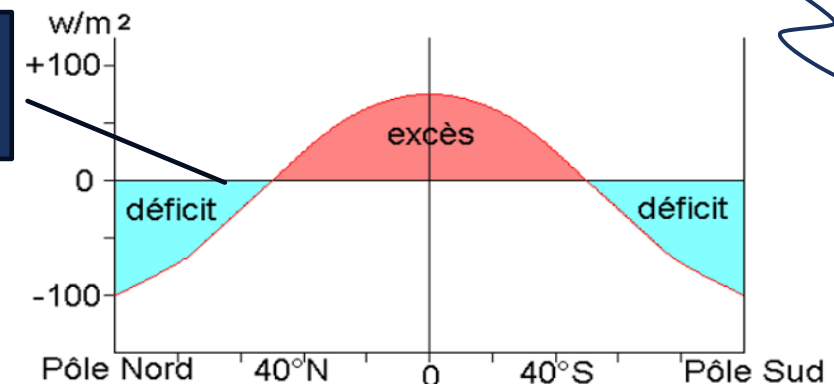
- Bilan radiatif de la Terre selon la latitude:
 - Terre globalement **sphérique**
 - ⇒ une même quantité d'énergie reçue se répartit sur une surface plus ou moins grande en fonction de l'angle d'incidence et donc de la latitude
 - Pôles : **bilan radiatif déficitaire en énergie, car:**
 - ✓ recouverts de **glace**
 - ⇒ **fort albédo** : une grande partie de l'énergie solaire réfléchiée et non absorbée
 - ✓ Angle d'incidence des rayons solaires faible
 - ⇒ Puissance solaire reçue faible aux pôles
 - Equateur : **bilan radiatif excédentaire en énergie, car:**
 - ✓ Angle d'incidence des rayons solaires fort
 - ⇒ Puissance solaire reçue élevée
 - ✓ **Surface d'échange océanique élevée**
 - ⇒ **faible albédo** : une grande partie de l'énergie solaire est absorbée par océans
 - ✓ Capacité calorifique de l'eau élevée
 - ⇒ océans = réservoirs thermiques surtout à l'équateur

Flux solaire moyen
= 342 W.m^{-2}



Moyenne du flux solaire absorbé par le sol
L'inégale répartition de la puissance solaire à la surface de la Terre.

Bilan radiatif selon la latitude



PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

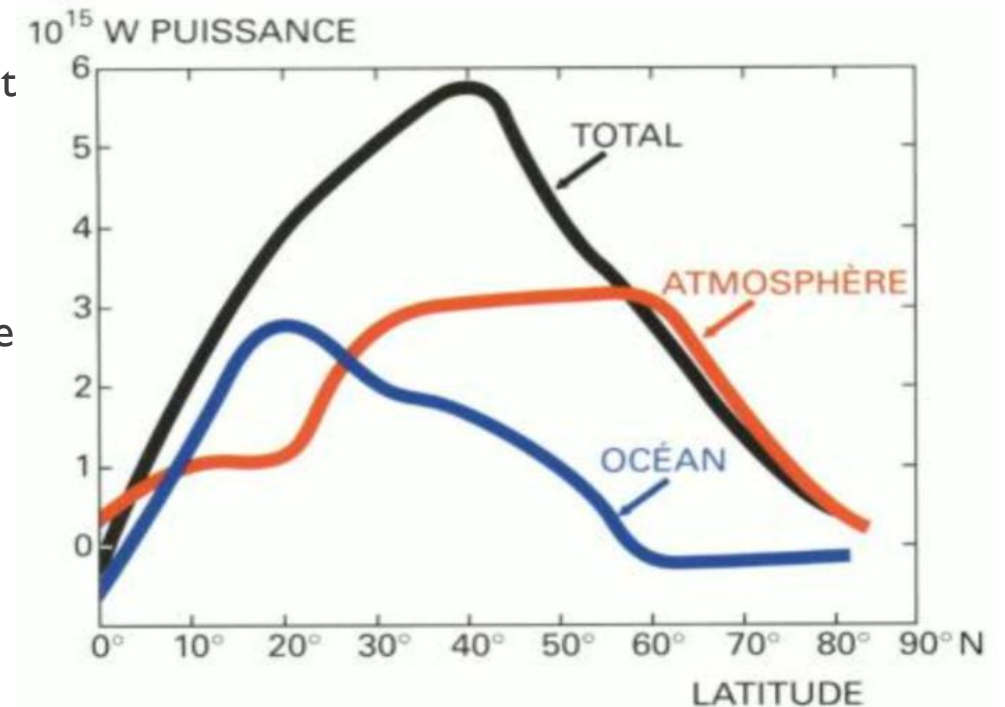
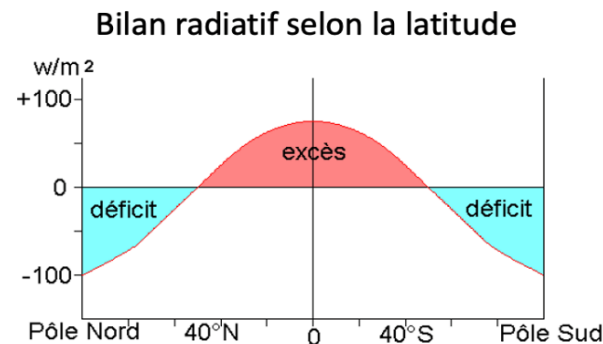
- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques
 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES



- **Transport thermique océanique** voisin de zéro à l'équateur, puis atteint près de $3 \cdot 10^{15}$ watts (ou 3 petawatts) à 20° de latitude
- **Transport thermique atmosphérique** maximal entre 30° et 70° de latitude.
- À noter que la puissance de 1 petawatt (ou 10^{15} watts) est équivalente à celle d'un million de centrales nucléaires de 1 000 mégawatts chacune !

Comment expliquer ces variations de transports thermiques?

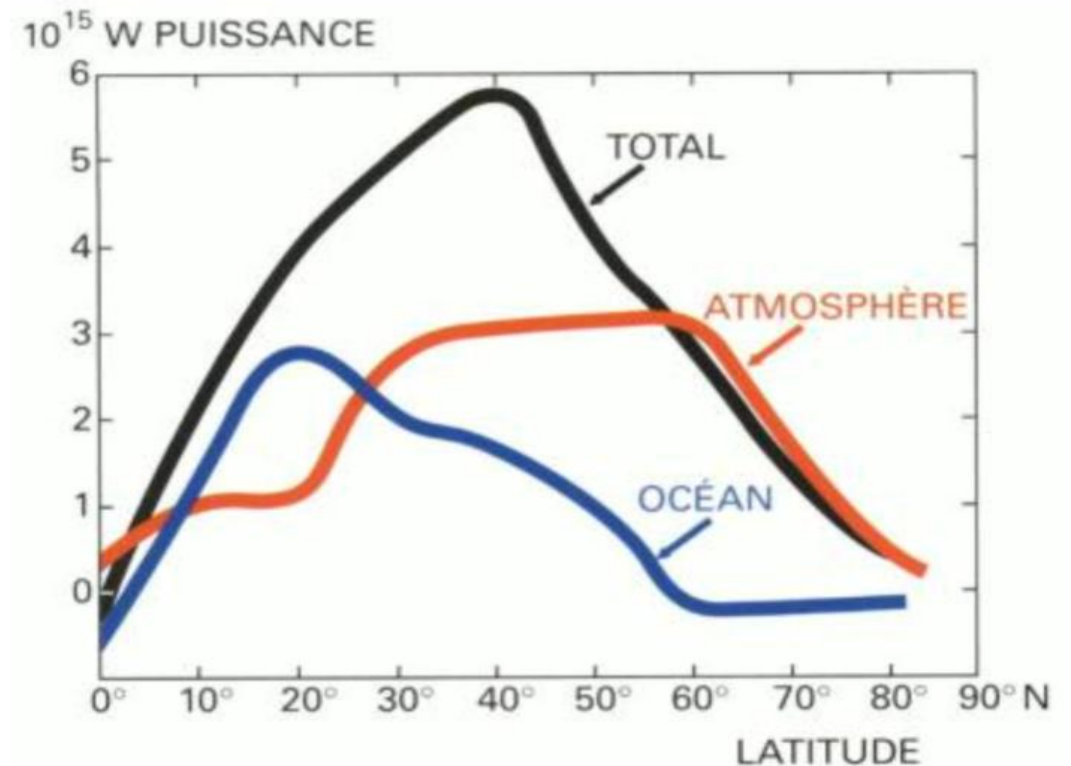


La redistribution latitudinale de l'énergie par les enveloppes fluides
(<https://books.openedition.org/irdeditions/25553>)

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

A. UNE REDISTRIBUTION DE L'ENERGIE SOLAIRE PAR LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES

- Constat:
 - Circulation troposphérique plus efficace que circulation océanique au niveau des Pôles.
 - Circulation océanique plus efficace que circulation troposphérique entre 10 et 25° latitudinal.
- Nous allons étudier comment les circulations atmosphérique et océanique permettent cette redistribution, grâce notamment à la convection et aux changements d'état de l'eau.

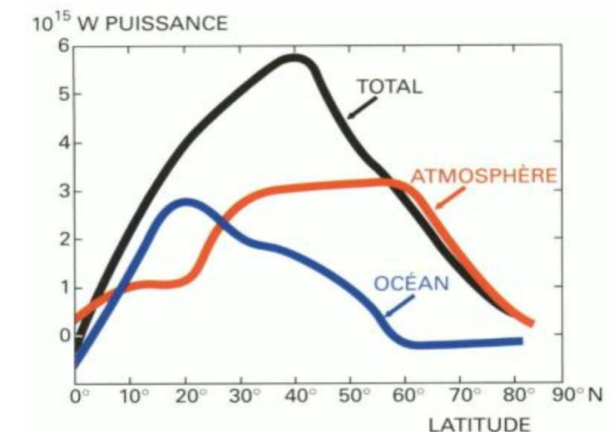
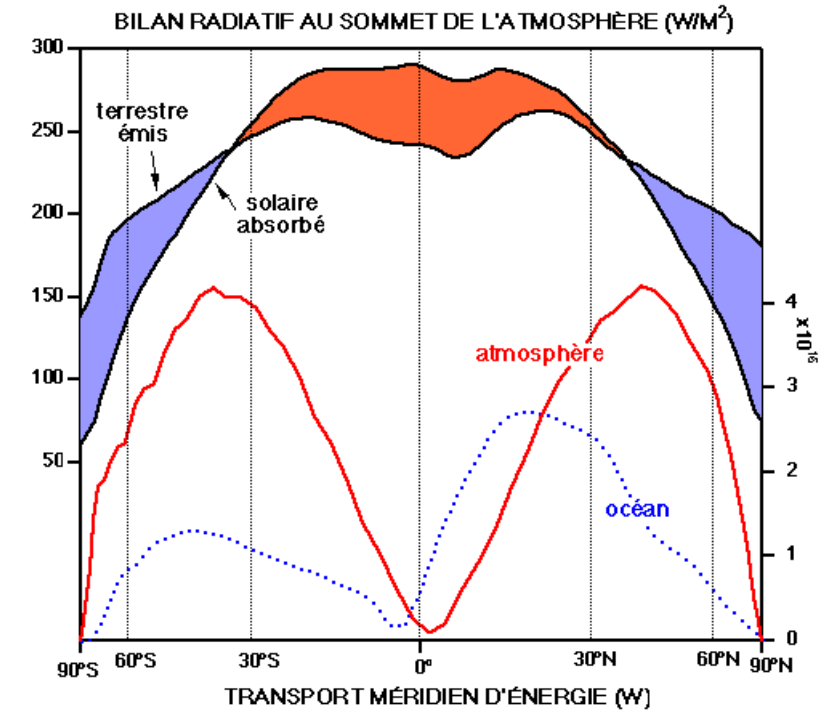


*La redistribution latitudinale de l'énergie par les enveloppes fluides
(<https://books.openedition.org/irdeditions/25553>)*

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

A. UNE REDISTRIBUTION DE L'ENERGIE SOLAIRE PAR LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES

- **Équateur: bilan radiatif positif** (réémet moins de chaleur qu'il n'en a reçu):
 - Contribution océanique: grande surface libre (océan à équateur) + Eau chaude
 - ⇒ **chaleur consommée pour évaporer eau** (enthalpie massique de changement de phase: 2250 kJ/L d'eau)
 - ⇒ Moins de chaleur émise
 - ⇒ énergie libérée à l'équateur < 0!
 - Contribution océanique: **Beaucoup d'eau** (capacité thermique élevée)
 - ⇒ Beaucoup d'énergie emmagasinée redistribuée aux moyennes latitudes
- **Aux pôles (hautes latitudes): Bilan radiatif thermique négatif** (émettent plus qu'ils n'en reçoivent) car:
 - Absorption d'énergie solaire faible :
 - ✓ sphéricité de la Terre
 - ✓ Albédo élevé
 - Émission d'énergie par mouvements troposphériques car:
 - ✓ Dans océan polaire : $T^{\circ}\text{C}$ de surface = $T^{\circ}\text{C}$ à 3000 m = 0°C pas de thermocline
 - ✓ Peu de surface océanique libre (glaciers)
 - ✓ Troposphère: air froid descend vers les faibles latitudes

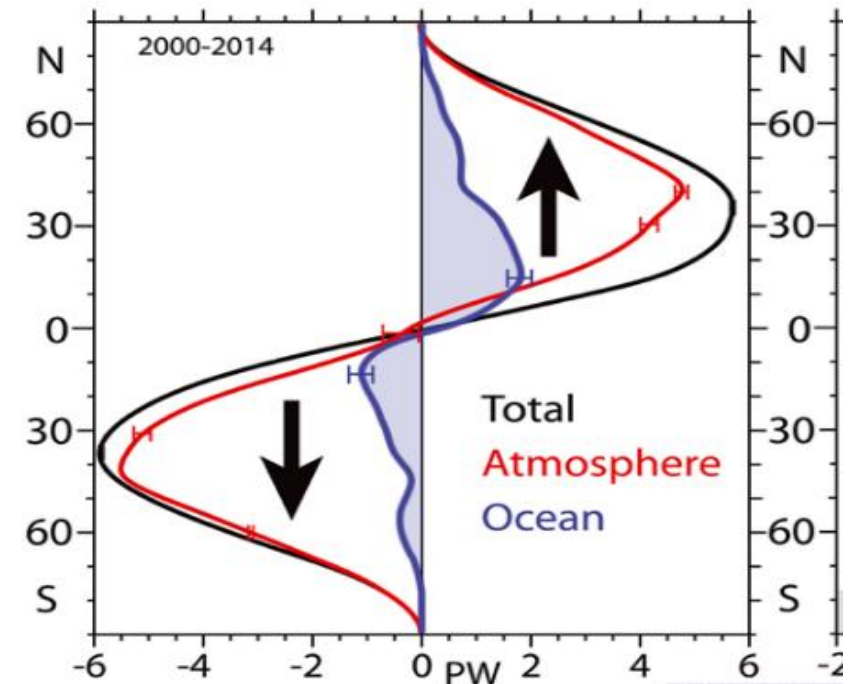


La redistribution latitudinale de l'énergie par les enveloppes fluides
(<https://books.openedition.org/irdeditions/25553>)

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

A. UNE REDISTRIBUTION DE L'ENERGIE SOLAIRE PAR LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES

- S'il n'y avait pas de redistribution de l'énergie, les Pôles ne cesseraient de se refroidir et l'Equateur ne cesserait de se réchauffer... Ce n'est visiblement pas le cas ! Les **circulations troposphérique et océanique** assurent une **redistribution** de l'énergie, de l'Equateur vers les Pôles.
- **Mouvements atmosphériques contribuent davantage** à la redistribution de l'énergie solaire que mouvements océaniques:
 - air **moins visqueux** (dense) que eau
 - ⇒ convection facilitée
 - **Chaleur latente de changement d'état de l'eau**
 - ⇒ une partie de l'énergie solaire est consommée pour évaporation (équateur)
 - **Capacité calorifique de l'eau élevée**
 - ⇒ Océan = réservoir thermique (surtout à l'équateur: eau 25°C)
- **Efficacité de distribution océanique plus importante dans hémisphère Nord:**
 - **importance du Gulf Stream +++ alors que circumpolaire à latitude constante donc faible redistribution**



Contribution inégale de l'atmosphère et de l'hydrosphère à la redistribution de l'énergie de l'équateur vers les pôles (les valeurs positives correspondent aux transports dans l'hémisphère nord, les valeurs négatives aux transports dans l'hémisphère sud en Petawatts (10^{15} W))

PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques
 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

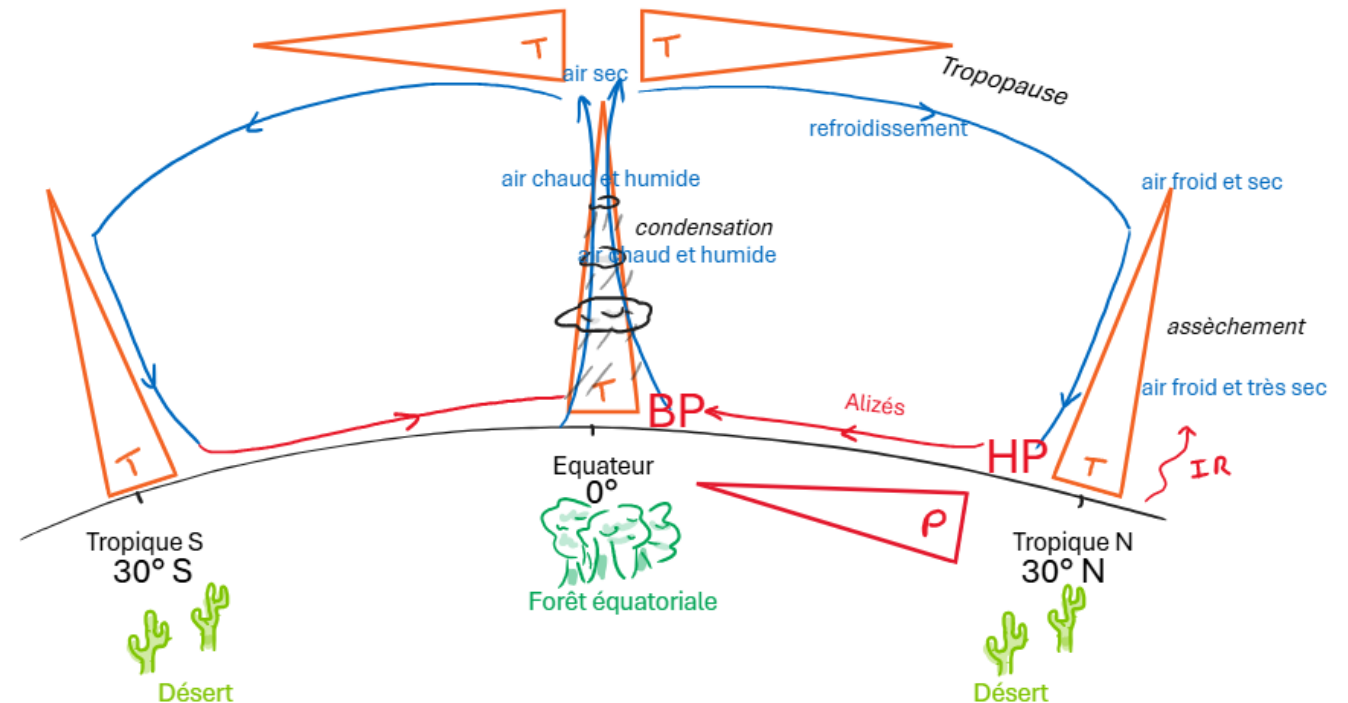
B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

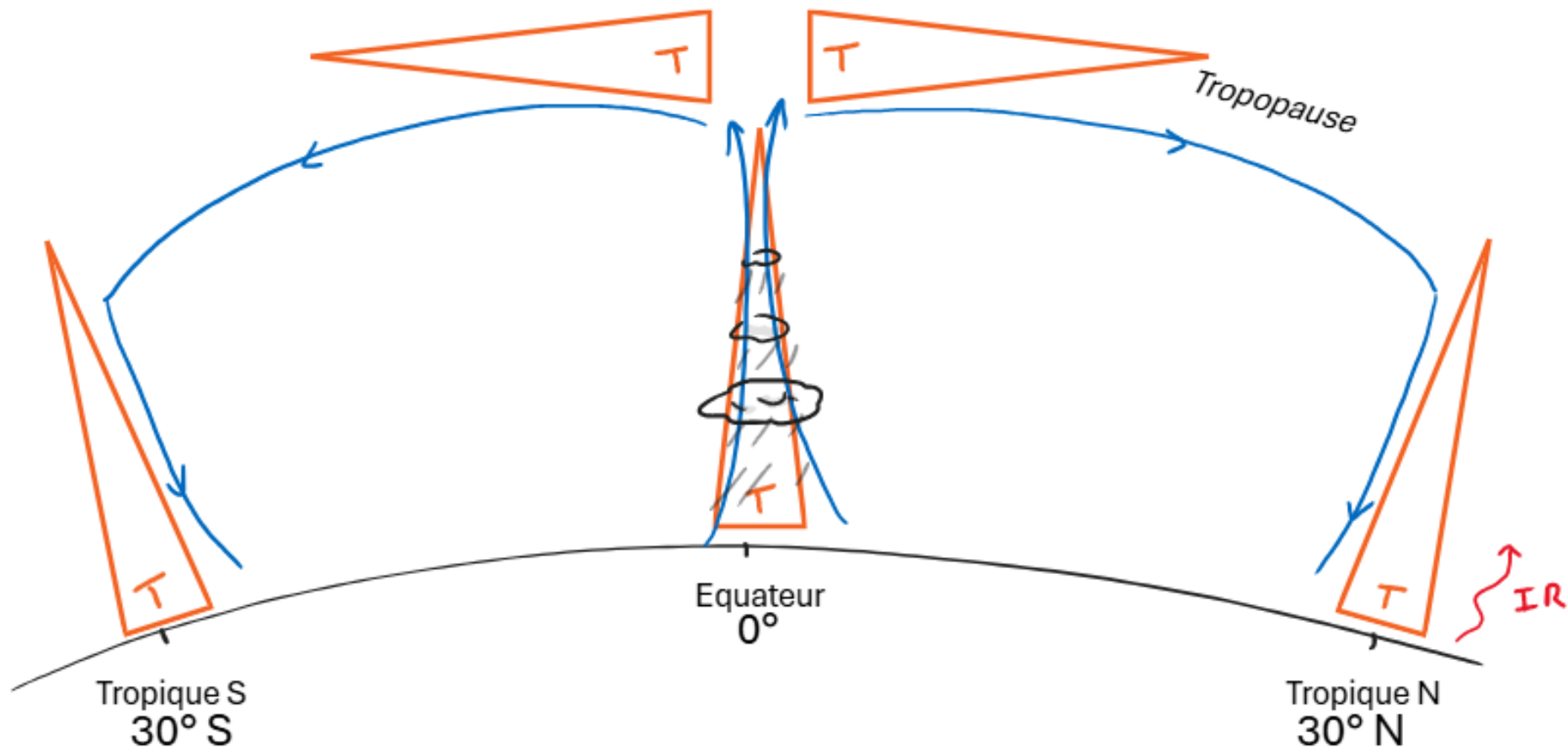
I.1. Généralités sur les mouvements verticaux et horizontaux des masses d'air



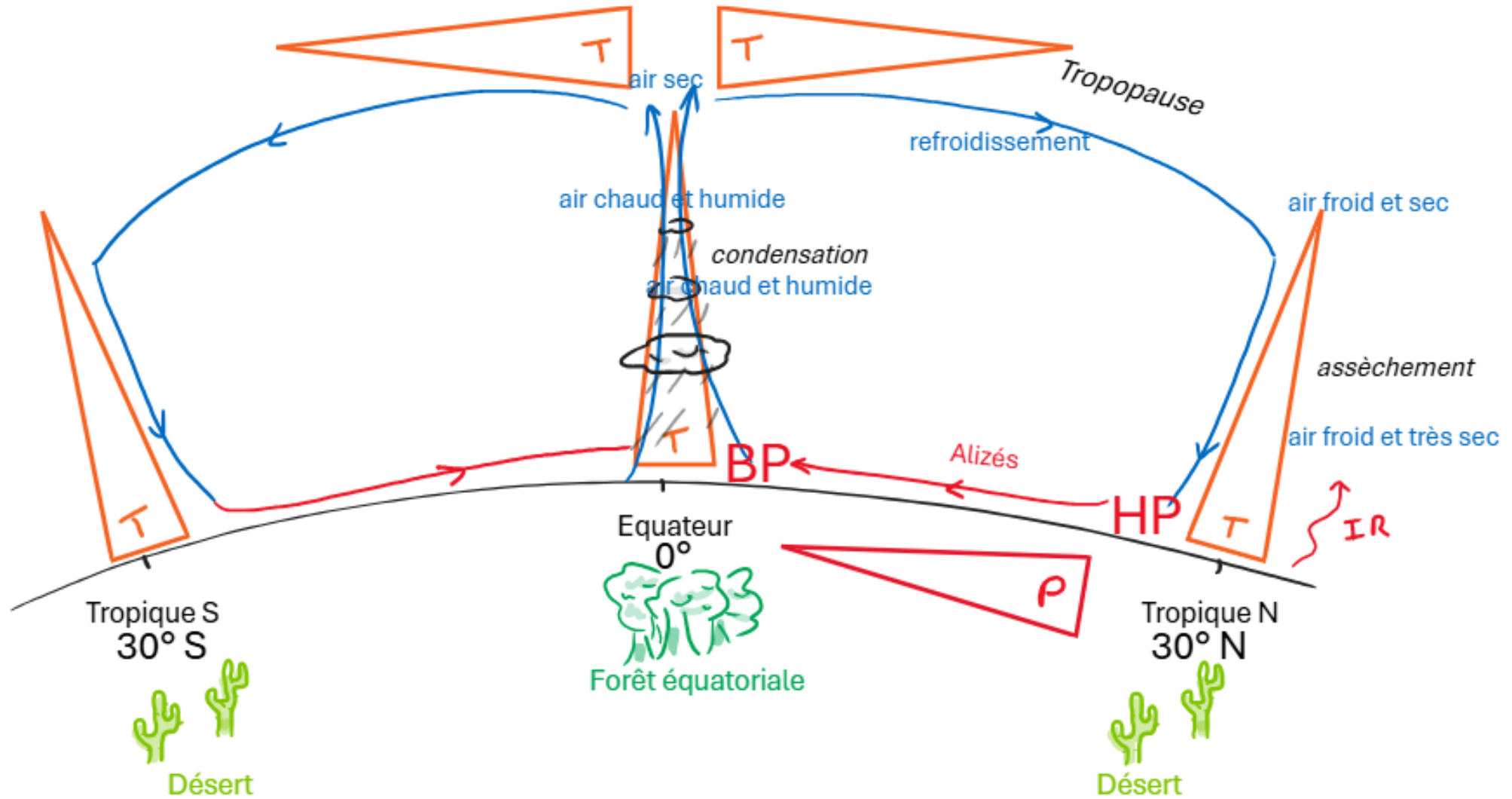
- Sphéricité de la Terre $\Rightarrow$ énergie solaire reçue = $f(\text{latitude})$
- **Gradient latitudinale de $T^{\circ}\text{C}$ = moteur de la circulation verticale** atmosphérique
 - **CSQ sur les climats:**
 - ✓ À l'équateur: air chaud et humide, peu dense monte et s'étale au niveau de la haute troposphère (absence de mélange)
 - $\Rightarrow$ Air chaud, humide, peu dense monte et vapeur d'eau se condense : nuages $\rightarrow$ pluie $\rightarrow$ forêt équatoriale
 - ✓ Au niveau des tropiques: air froid et sec plus dense descend (en descendant il s'assèche) $\rightarrow$ air froid et très sec $\rightarrow$ désert
 - **CSQ sur les pressions:**
 - ✓ A l'équateur air chaud monte $\rightarrow$ **dépression**
 - ✓ Aux tropiques accumulation d'air froid qui descend: **anticyclone**
 - ✓ **Gradient de pression** en surface des tropiques vers équateur
- Mise en place d'une cellule de circulation verticale et horizontale: la circulation horizontale est la CSQ de la circulation verticale



Les mouvements de masse d'air sont dus aux gradients thermiques et de pression liés à la sphéricité de la Terre: mise en place d'une cellule de convection atmosphérique



Les mouvements de masse d'air sont dus aux gradients thermiques et de pression liés à la sphéricité de la Terre: mise en place d'une cellule de convection atmosphérique



Les mouvements de masse d'air sont dus aux gradients thermiques et de pression liés à la sphéricité de la Terre: mise en place d'une cellule de convection atmosphérique

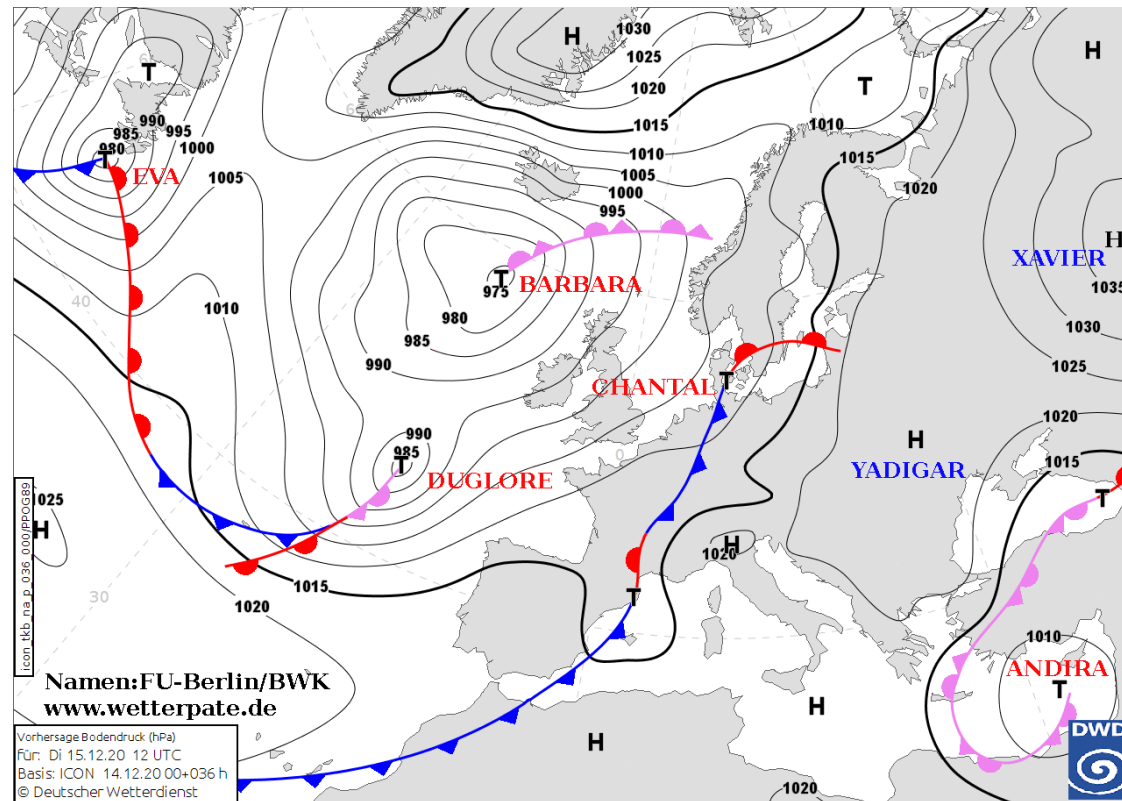
III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.1. Généralités sur les mouvements verticaux et horizontaux des masses d'air

- Les vents se déplacent des zones de haute pression vers les zones de basse pression.
- **Pression atmosphérique** : poids par unité de surface de la colonne d'air qui surmonte une localité.
 - Au niveau de la mer, la pression atmosphérique moyenne est d'environ 1013 hPa.
- **Carte des isobares** (courbes d'égale pression)
 - Direction des vents
 - **Anticyclone (HP)**
 - **Dépression (BP)**



Noms des dépressions et anticyclones prévus pour mardi 15 décembre 2020 à midi (Berlin)

<https://www.meteo-paris.com/bulletins/semaine-douce-et-hesitante-entre-depression-et-anticyclone>

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

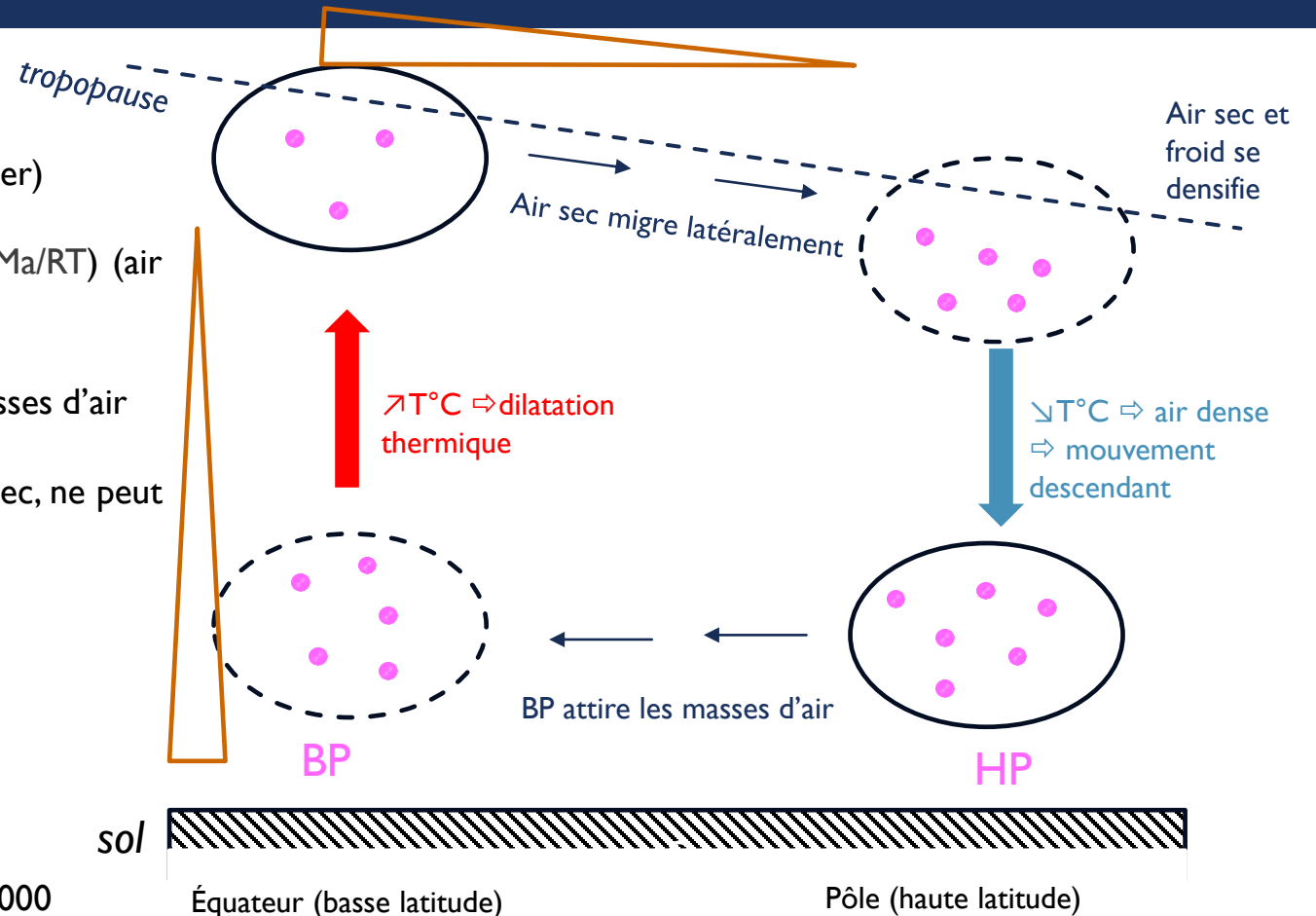
I.2. Rôle de la convection

- A l'équateur: bilan radiatif positif

1. Réchauffement de l'air en surface (par rayonnement IR sol/mer)
2. dilatation thermique ($\nearrow$ volume $\Rightarrow \searrow$ densité car $\rho = P \times M_a / RT$) (air ascendant se détend : une zone de climats pluvieux)
3. L'air s'élève créant une zone de BP au sol qui ATTIRE les masses d'air
4. Arrivé sous la tropopause, couche limite, air est désormais sec, ne peut plus monter et migre latéralement aux plus hautes latitudes
4. Air se refroidit $\Rightarrow$ Air se densifie
5. Air froid sec redescend au sol : zone de HP (anticyclone)

$\Rightarrow$ Mise en place d'une cellule de convection:

- ✓ nbre de Rayleigh est de $10^{22} \gg \gg$ nbre critique de 2000



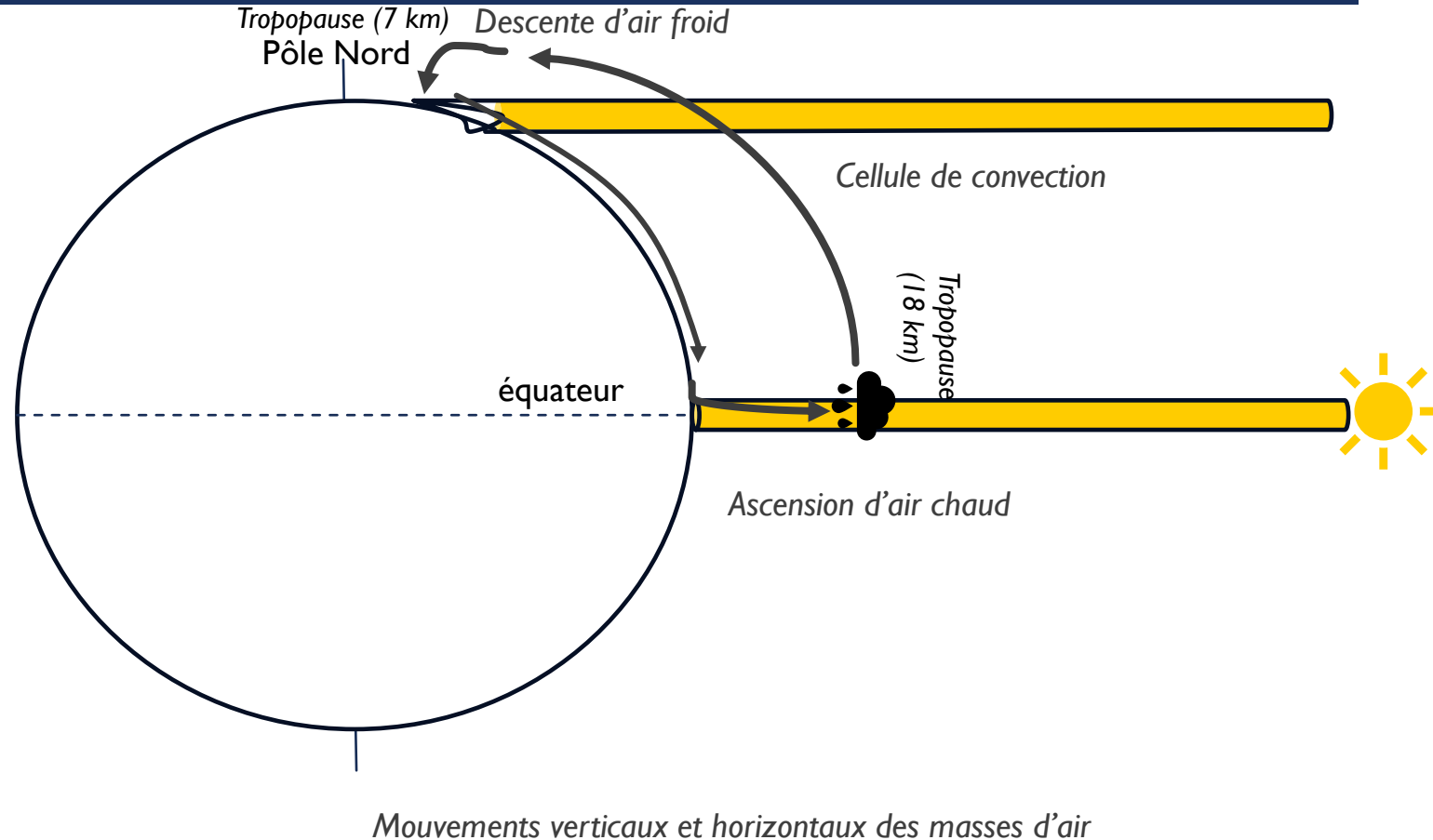
III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.2. Rôle de la convection

- A l'équateur: bilan radiatif positif $\Rightarrow$ air chaud monte
 - ✓ nbre de Rayleigh est de $10^{22} \gg$ nbre critique de 2000).
 - L'équateur, au sol, zone de BP : l'air y est chauffé à sa base par radiation IR, il se dilate thermiquement et s'élève, ce qui attire les masses d'air sous forme de vents de surface : les Alizés.
 - Aux pôles, l'air froid et dense est en convection descendante (pôles HP = Anticyclones)
- $\Rightarrow$ Mise en place d'une cellule de convection



III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.3. La pseudo-force de Coriolis dévie la trajectoire des masses d'air

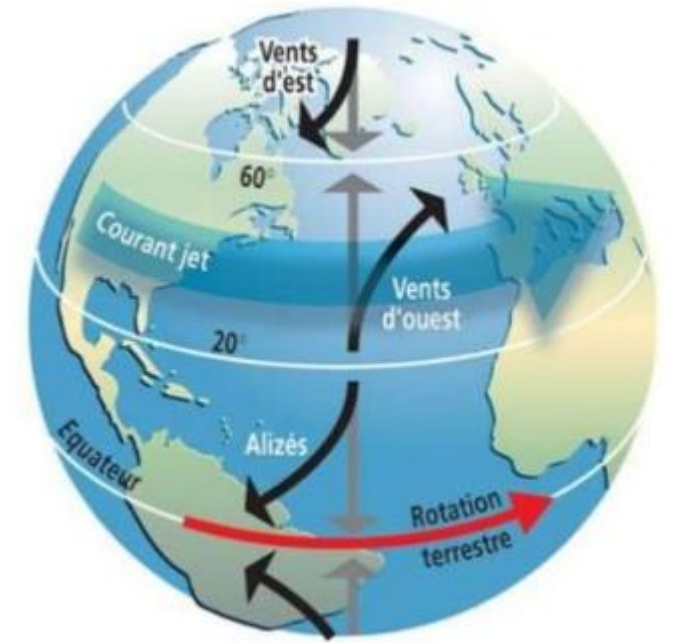
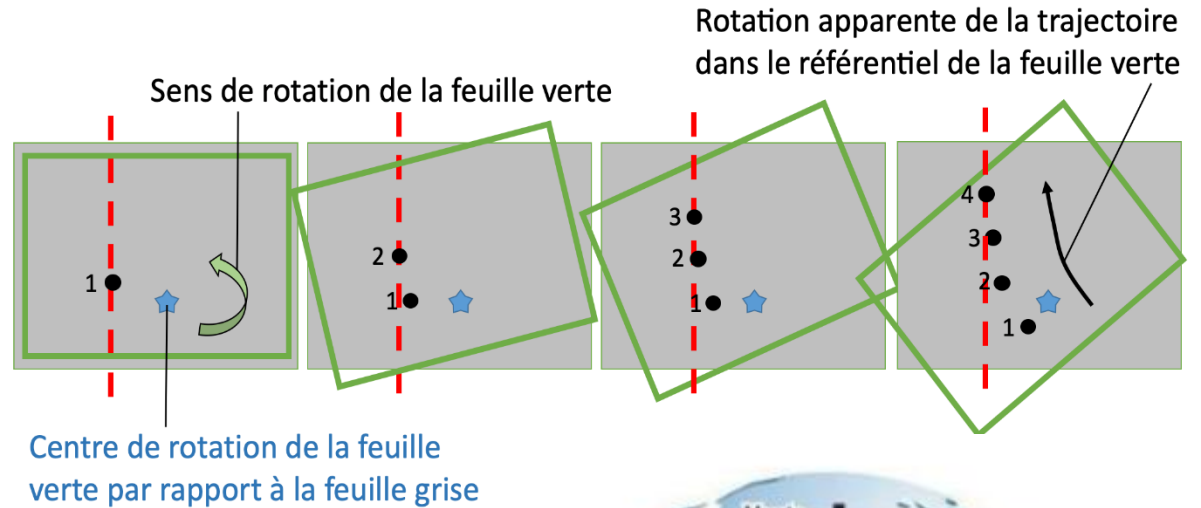
■ Modélisation:

- Feuille verte: référentiel terrestre en rotation
- Feuille grise: trajectoire linéaire suivie par les points noirs en direction du Nord (observée de l'univers)

■ Définition de pseudo-force de Coriolis:

- Pseudo force due à la rotation de la Terre (dextre), provoquant une déviation des trajectoires rectilignes vers droite dans HN (gauche dans HS)
- Pseudo-force de Coriolis d'autant plus **grande** qu'on est près des pôles

Modélisation avec 2 feuilles, dont l'une tourne



La force de Coriolis, due à la rotation dextre de la Terre, provoque des déviations vers la droite dans l'hémisphère Nord (source A. denis)

- Pseudo force de Coriolis dépend de la latitude !

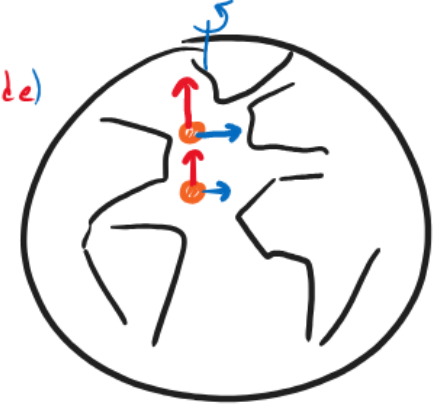
- $\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot \vec{\Omega} \wedge \vec{v}$

- $|\vec{F}_c| = 2 \cdot m \cdot |\vec{\Omega}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos(\lambda)$

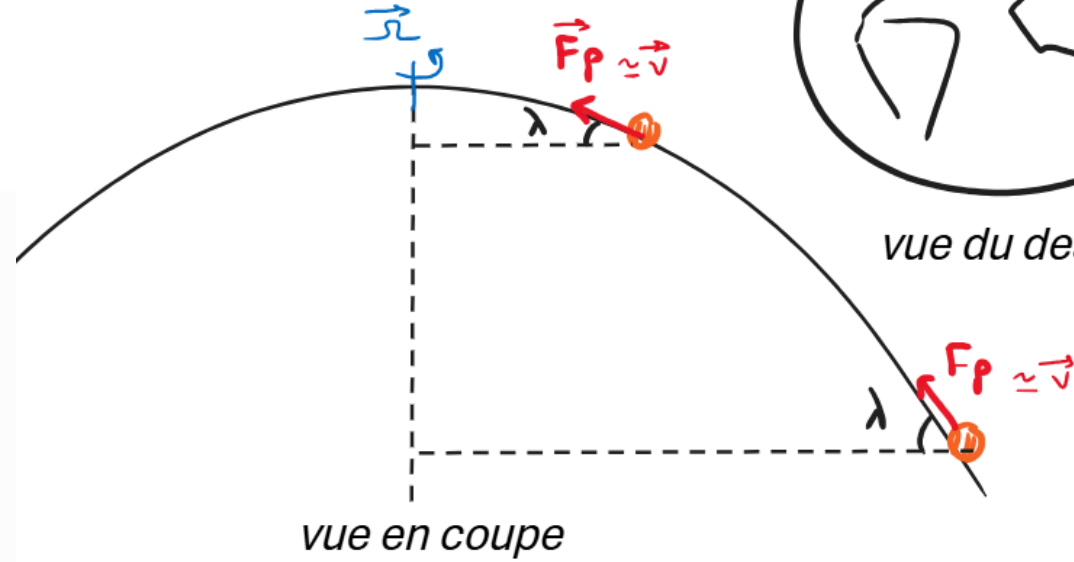
$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot \vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

$$F_c = f(\text{latitude})$$

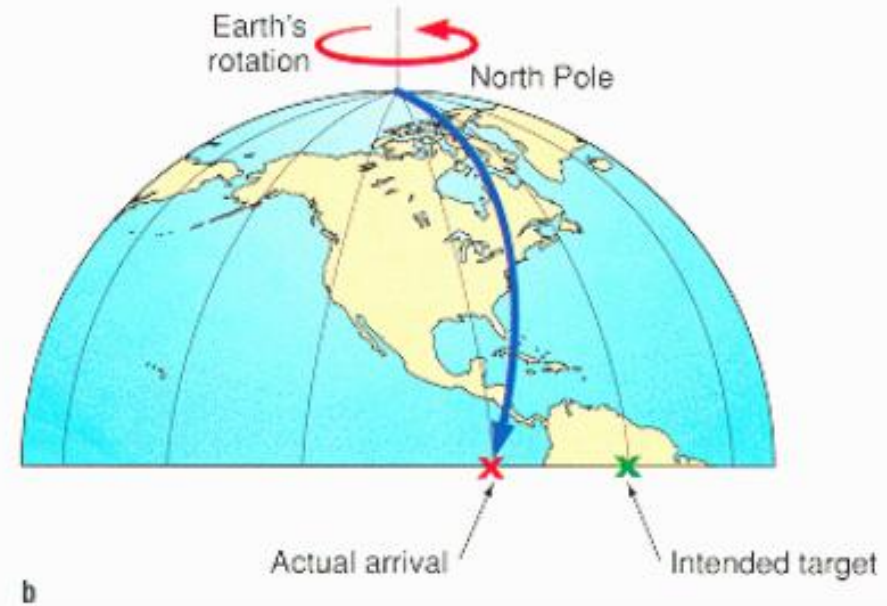
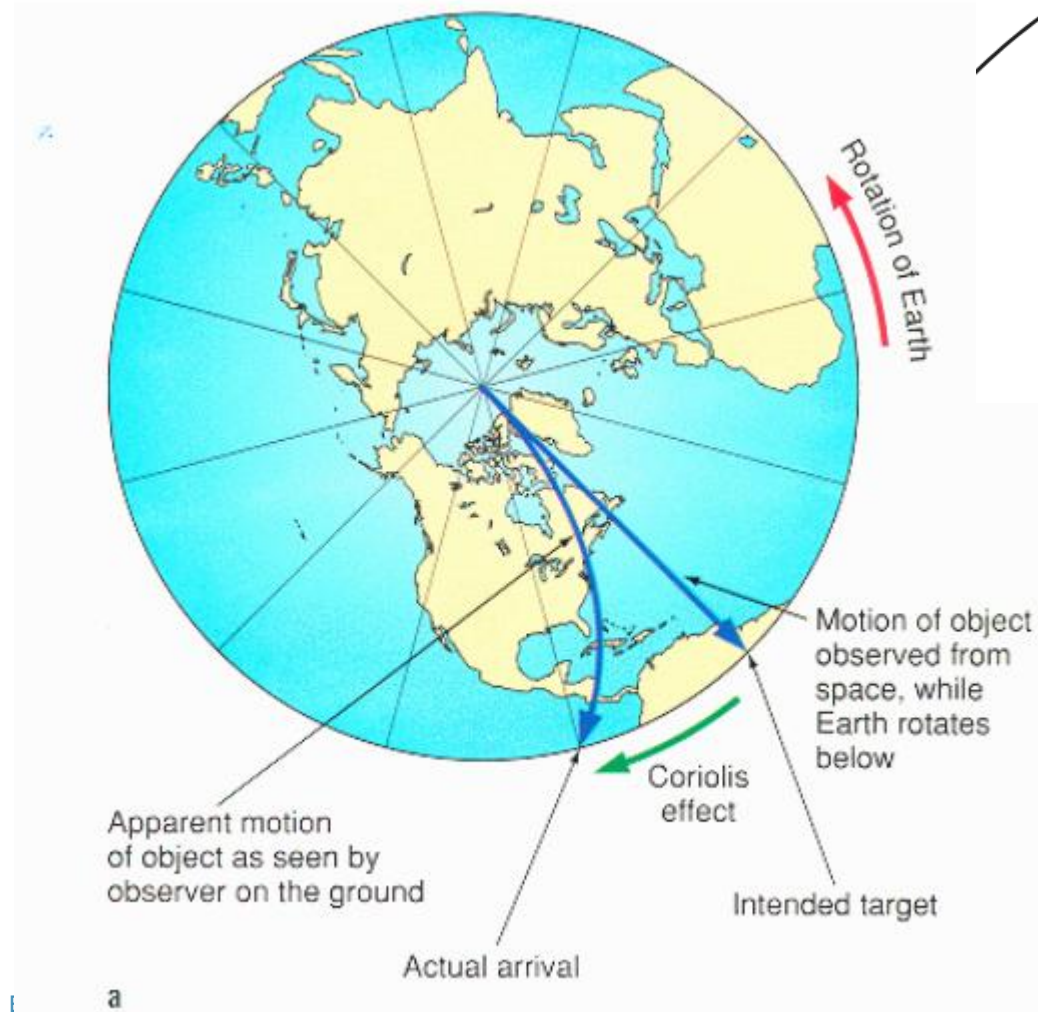
$$|\vec{F}_c| = 2 \cdot m \cdot |\vec{\Omega}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos(\lambda)$$



vue du dessus



vue en coupe

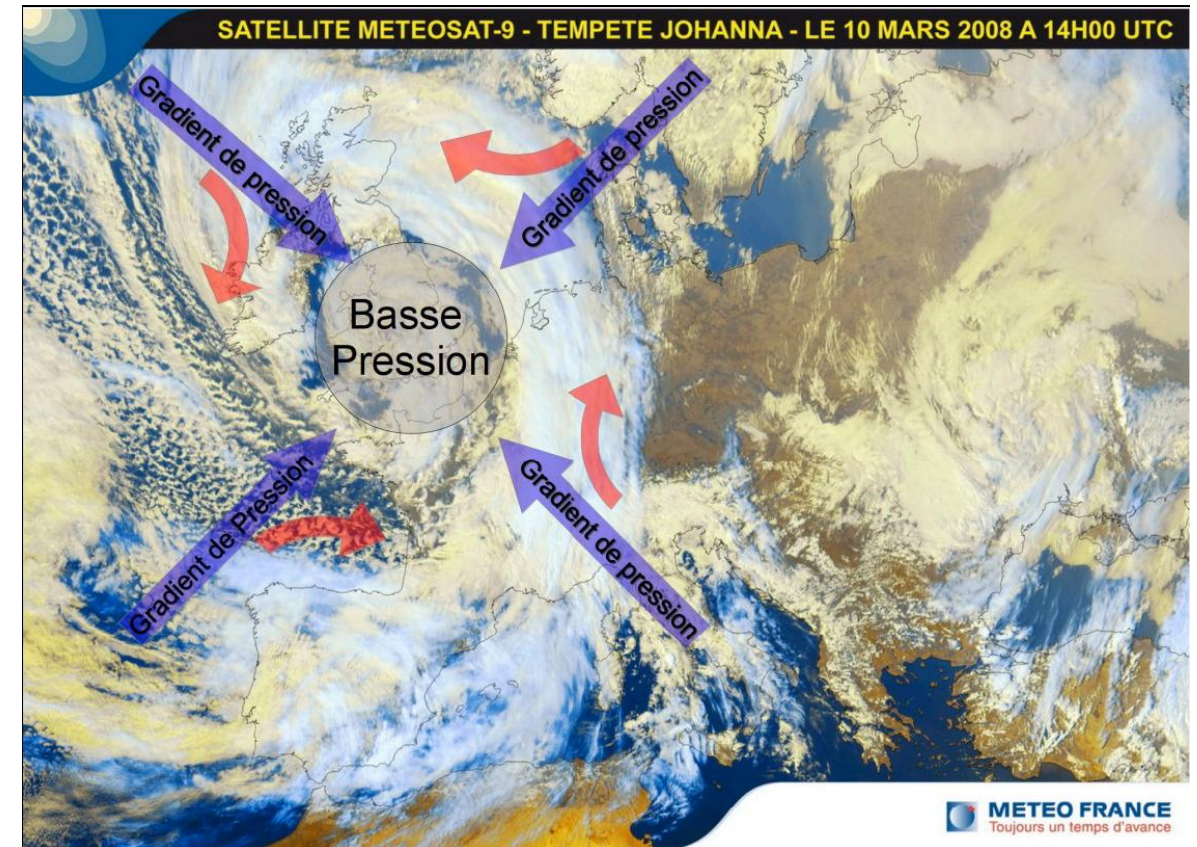


B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.3. La pseudo-force de Coriolis dévie la trajectoire des masses d'air

- Les vents se déplacent des zones de haute pression vers les zones de basse pression.
- Pression atmosphérique : poids par unité de surface de la colonne d'air qui surmonte une localité.
 - Au niveau de la mer, la pression atmosphérique moyenne est d'environ 1013 hPa.
- Déviation du mouvement horizontal de masses d'air par la pseudo force de Coriolis (due à rotation dextre de Terre)
 - déviation vers la droite (dans hémisphère Nord)
 - déviation vers la gauche (dans hémisphère Sud)



La pseudo-force de Coriolis, due à la rotation de la Terre. (A Proust)

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.4. Rôle de la pseudo-force de Coriolis et équilibre géostrophique

■ Anticycloniques: zone de HP

⇒ vents allant du centre vers périphérie (Forces de pression)

➤ mais pseudo-force de Coriolis

⇒ **Déviat**ion des vents vers la **droite (dans HN)**

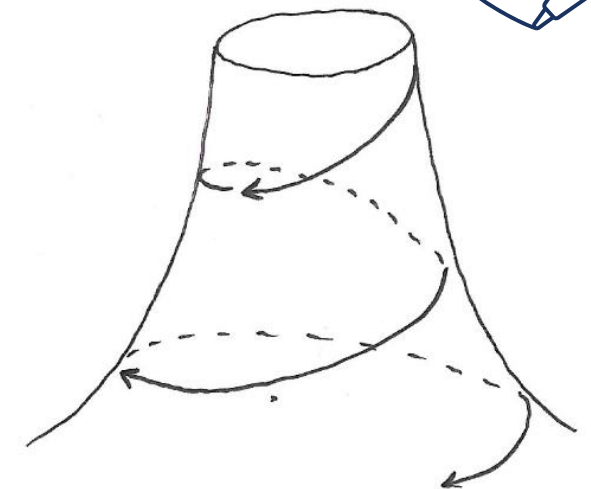
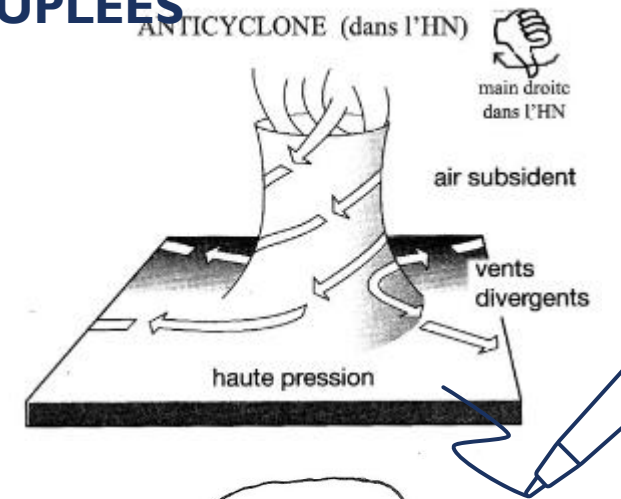
⇒ zone anticyclonique: vents tournent dans le sens des aiguilles d'une montre (dans HN)

Unités: hPa

Forces de pression

Forces de Coriolis

Représentation schématique d'une particule quittant un maximum de pression dans l'hémisphère nord



Fonctionnement d'un anticyclone

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.4. Rôle de la pseudo-force de Coriolis et équilibre géostrophique

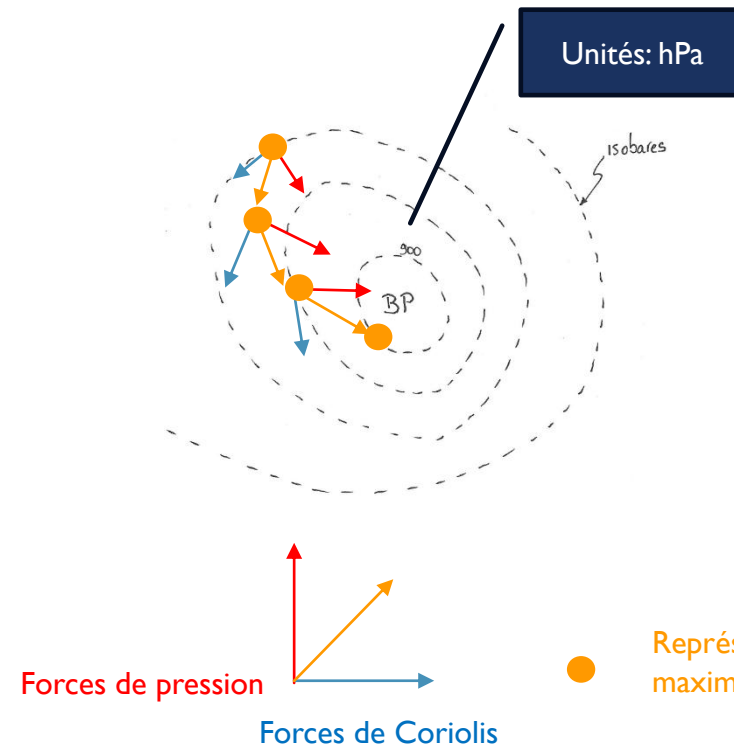
■ Dépression: zone de BP

⇒ vents allant de **périphérie vers le centre** (**Forces de pression**)

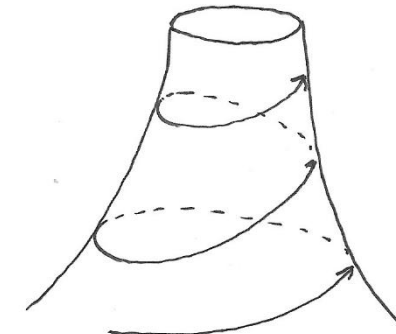
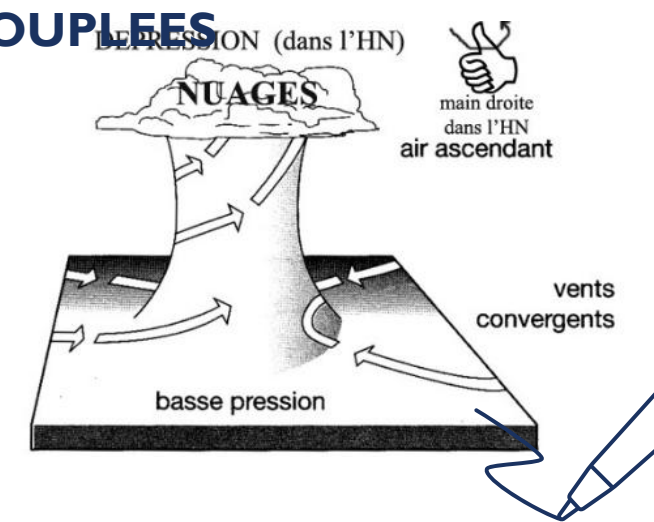
➤ mais **pseudo-force de Coriolis**

⇒ **Déviation des vents vers la droite** (**dans HN**)

⇒ zone **dépressionnaire**: vents tournent dans le **sens inverse des aiguilles d'une montre** (**dans HN**)



● Représentation schématique d'une particule quittant un maximum de pression dans l'hémisphère nord



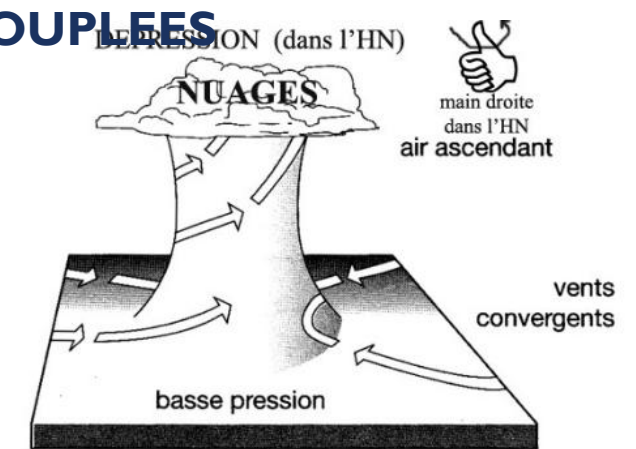
Fonctionnement d'une dépression dans l'hémisphère Nord

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

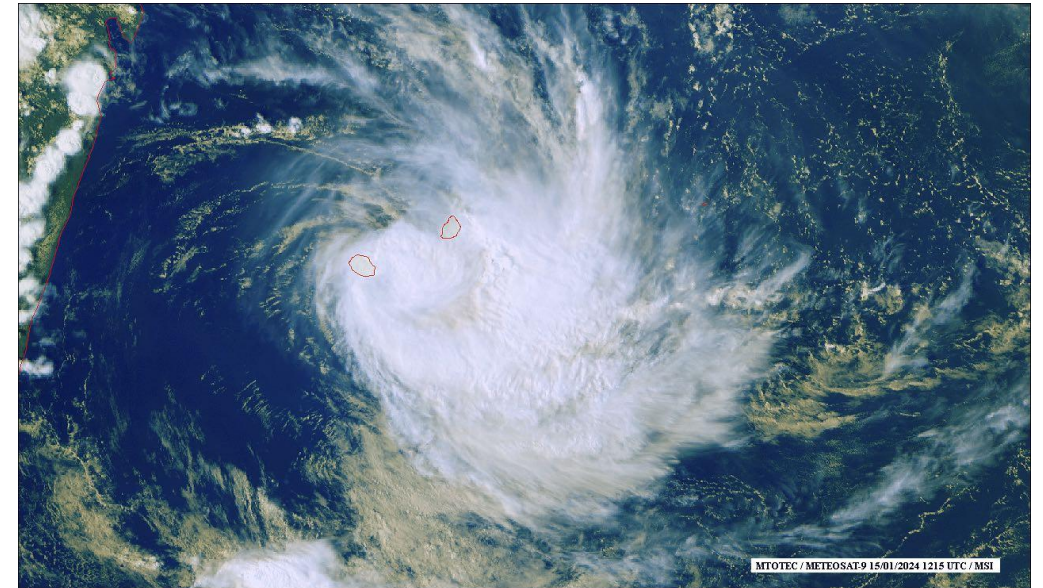
B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.4. Rôle de la pseudo-force de Coriolis et équilibre géostrophique



Dépression à l'ouest de l'Islande



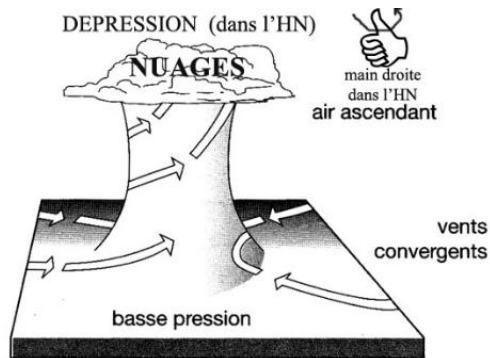
Dépression sur l'Île Maurice

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

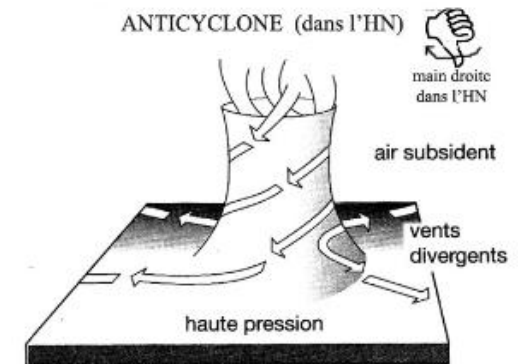
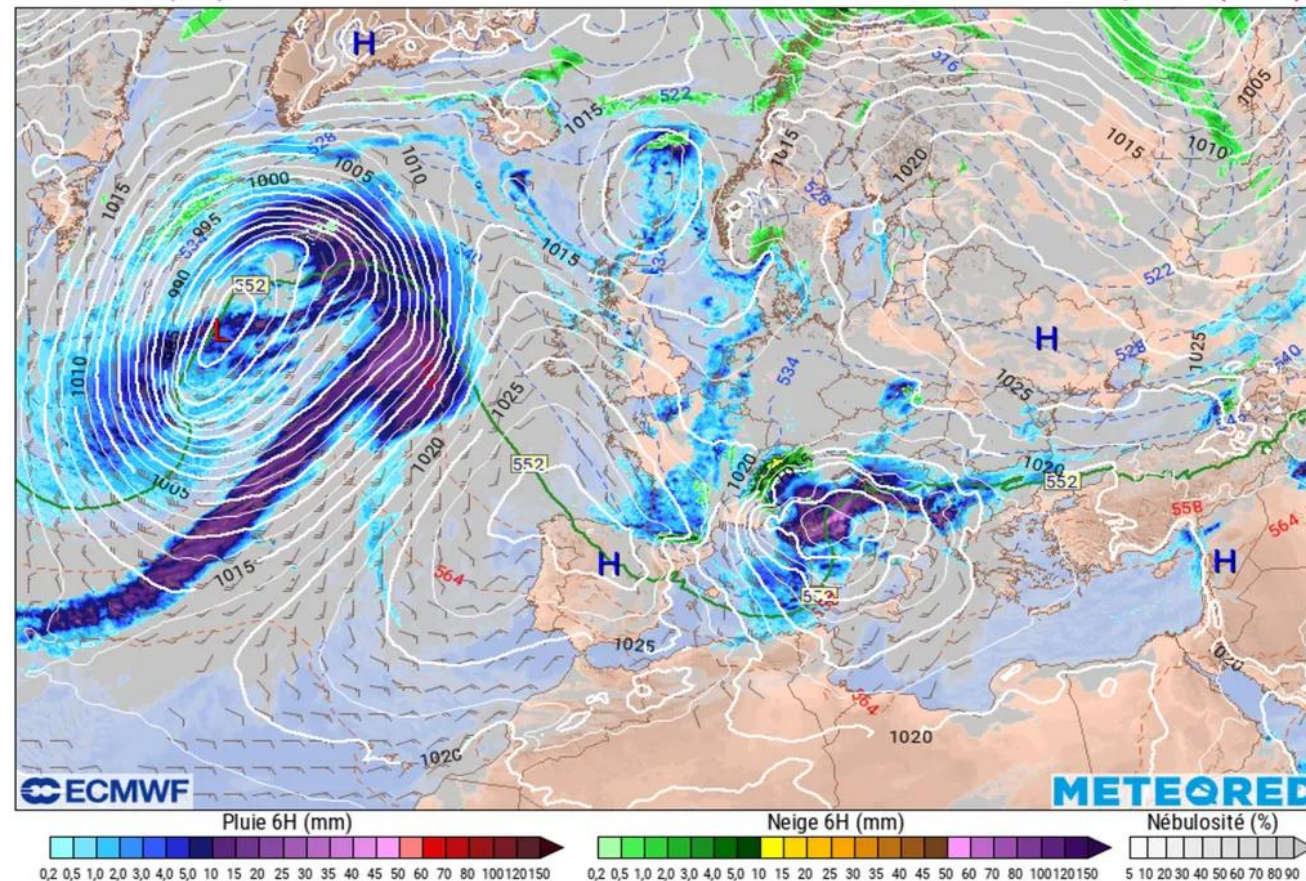
I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.4. Rôle de la pseudo-force de Coriolis et équilibre géostrophique



Surface: pression, vent > 10kn, nébulosité, pluie et épaisseur 500-1000 hPa.
ECMWF HRES (0.1°)

Initiale: Ven. 10 nov. 2023, 00 UTC
Valide: Ven. 17 nov. 2023, 06 UTC (H+174)



L: Low pressure – H: High pressure (anticyclone)

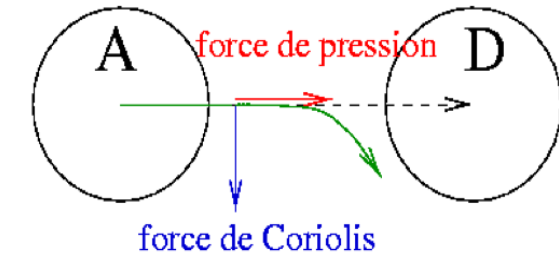
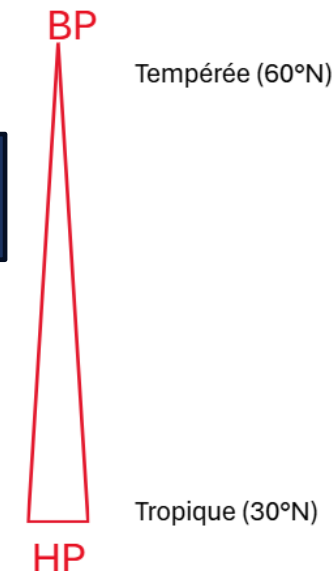
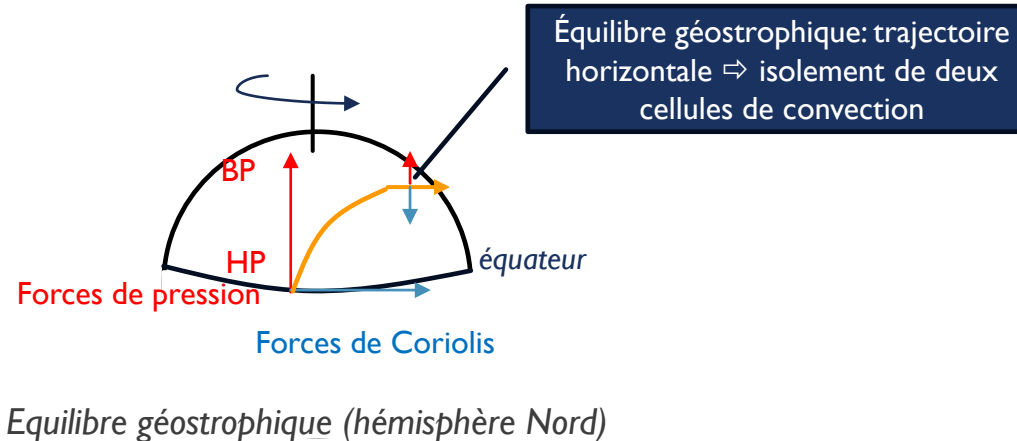
III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

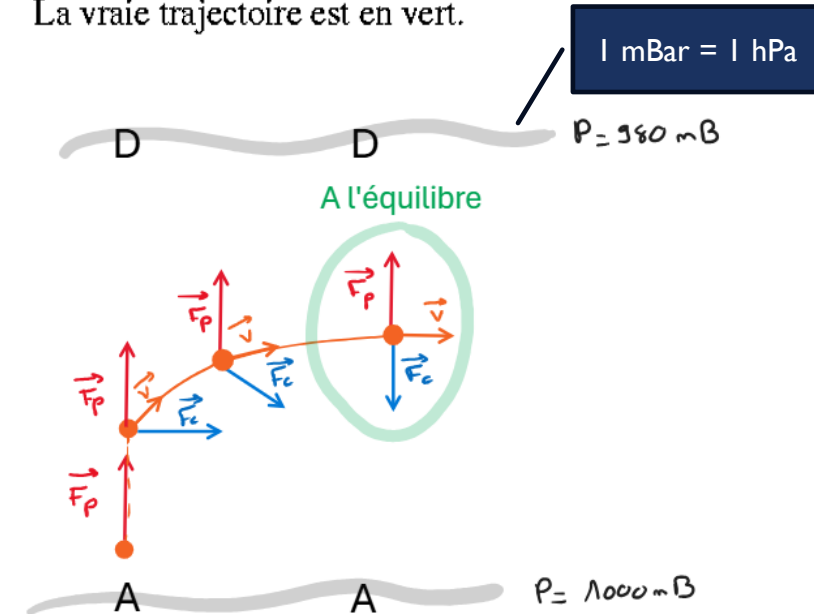
I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

I.4. Rôle de la pseudo-force de Coriolis et équilibre géostrophique

- Masse d'air provenant de l'équateur et se dirigeant vers le pôle progressivement déviée vers la droite: **pseudo force de Coriolis**
- Vers **50°-60° latitudinal**: déviation telle de la masse d'air $\Rightarrow$ **mouvement perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre (i.e. parallèlement aux isobares)**
 - $\Rightarrow$ **gradient de pression compensé par la force de Coriolis = équilibre géostrophique**
 - ✓ *Ex: vents d'ouest prédominants aux latitudes tempérées*



En pointillés, la trajectoire sans force de Coriolis.
La vraie trajectoire est en vert.



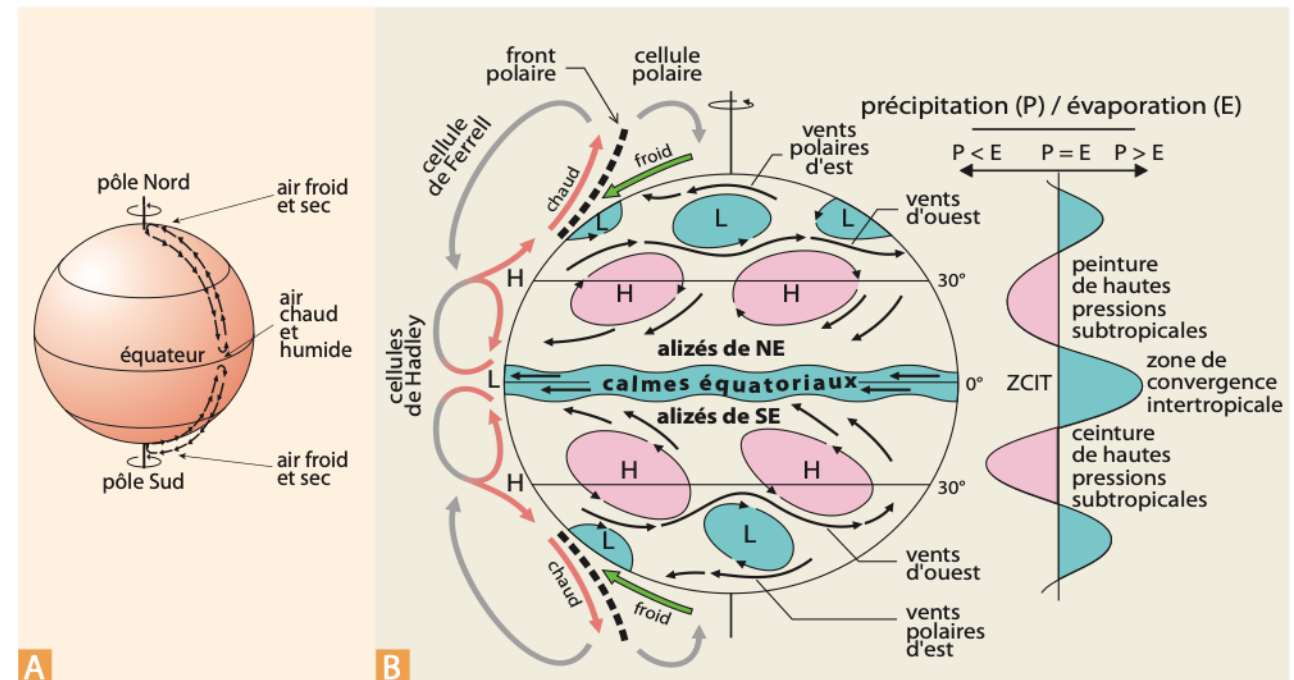
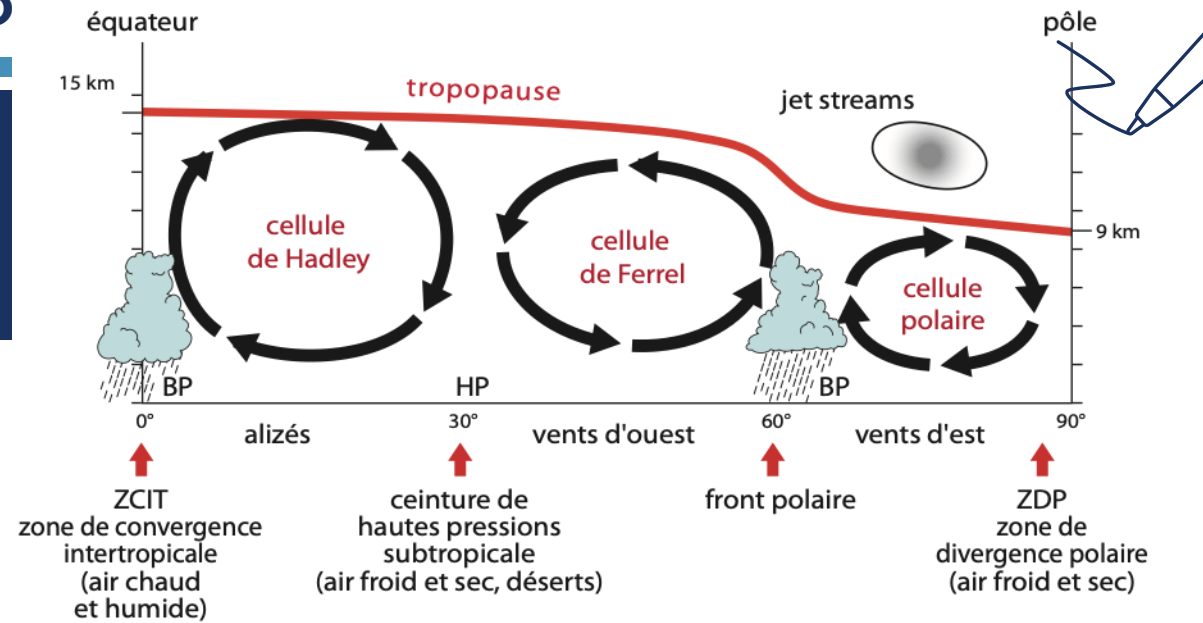
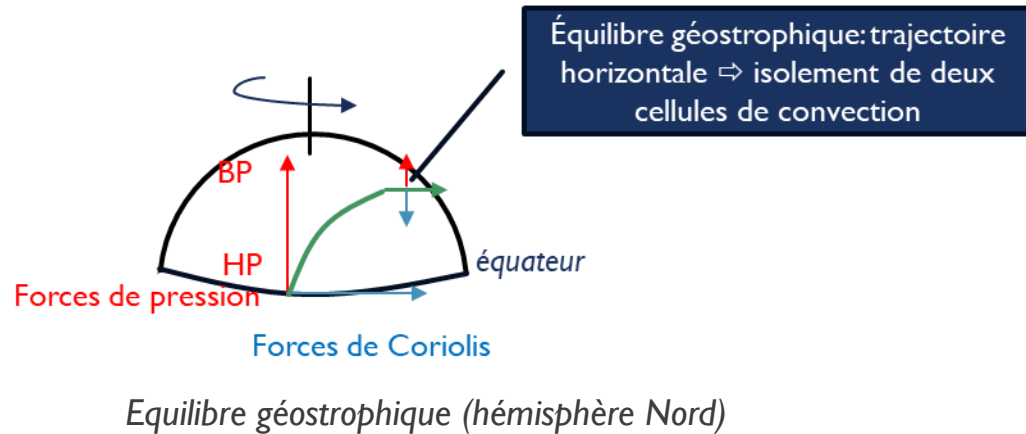
III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET O

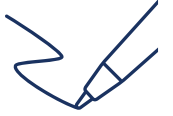
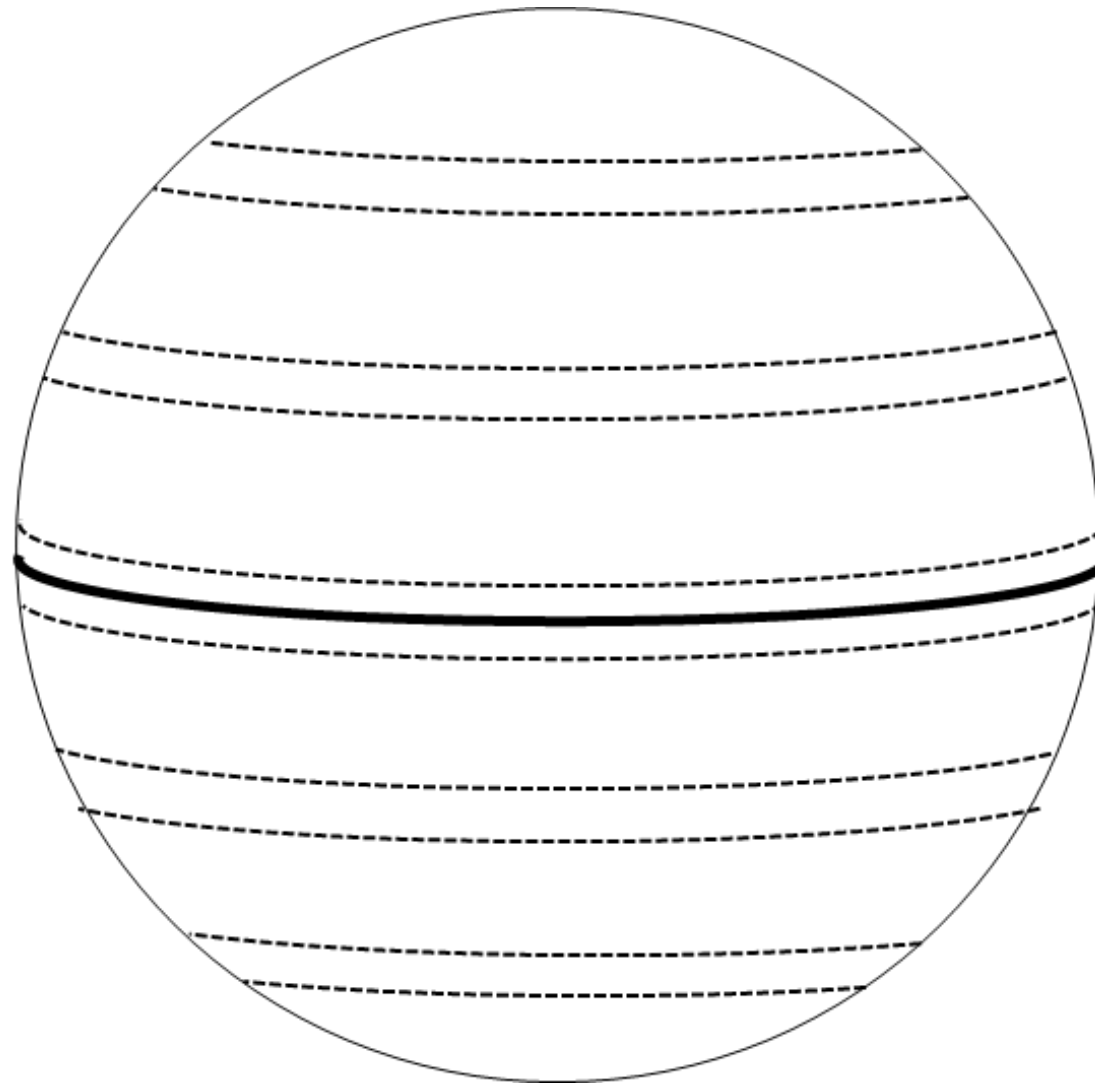
B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. Vue d'ensemble de la circulation atmosphérique

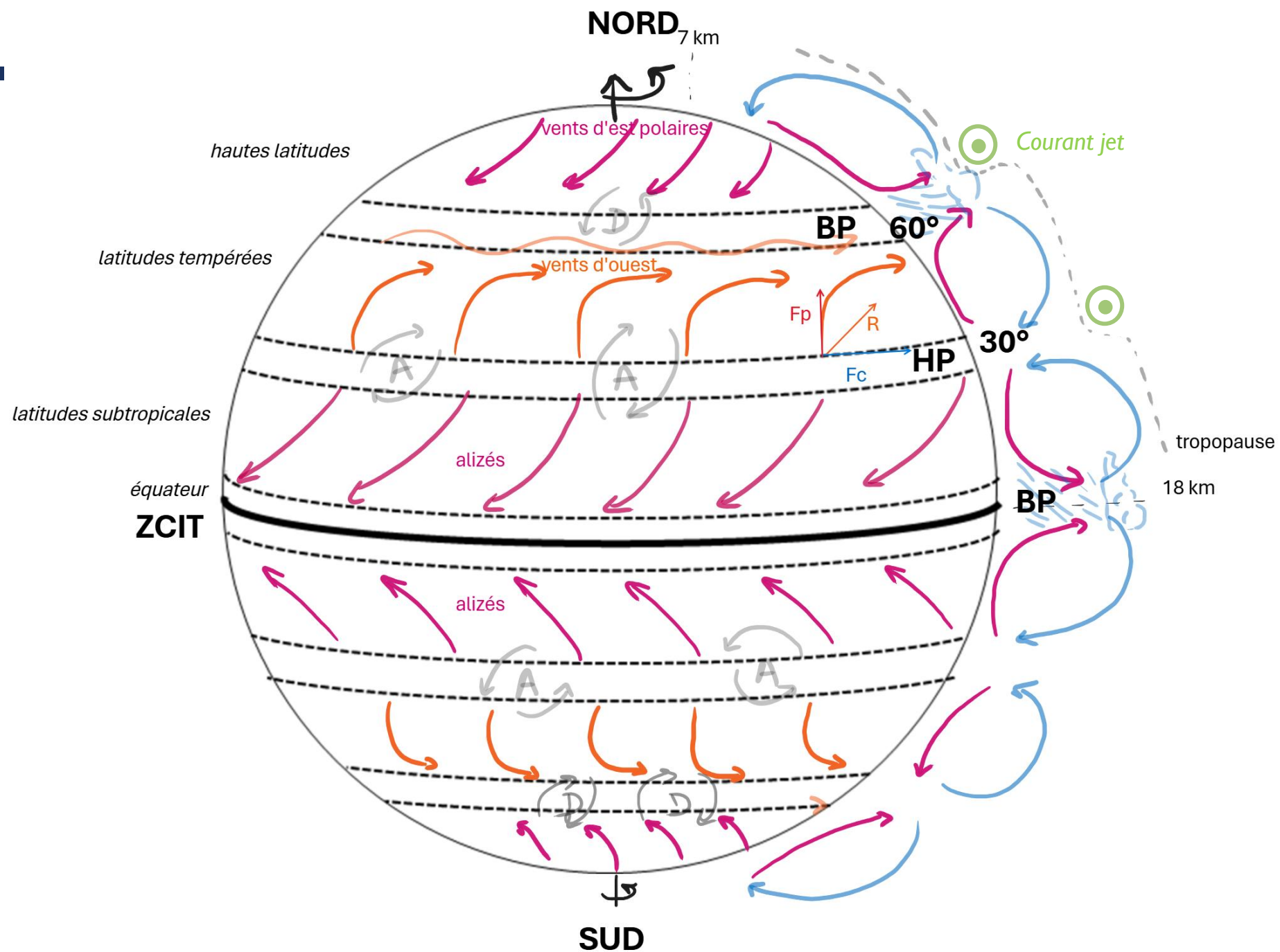
I.4. Rôle de la pseudo-force de Coriolis et équilibre géostrophique

- équilibre géostrophique: isolement de deux cellules de convection

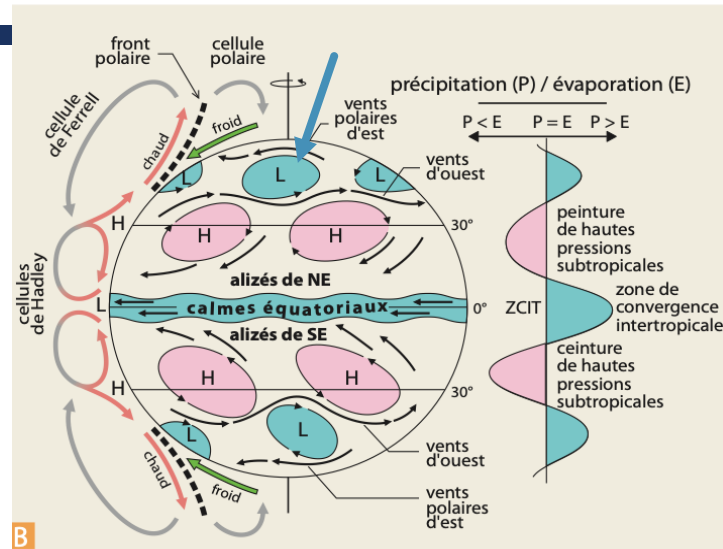




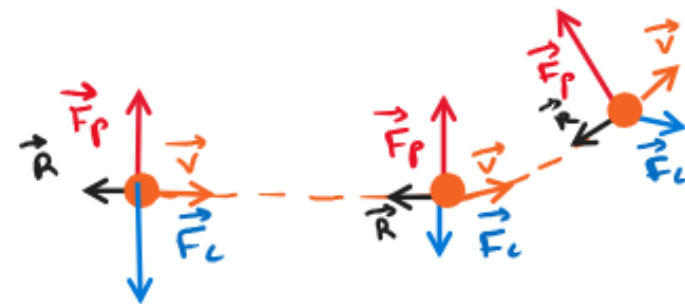
Les cellules de convection atmosphériques : redistribution de l'énergie à la surface de la Terre



Les cellules de convection atmosphériques : redistribution de l'énergie à la surface de la Terre

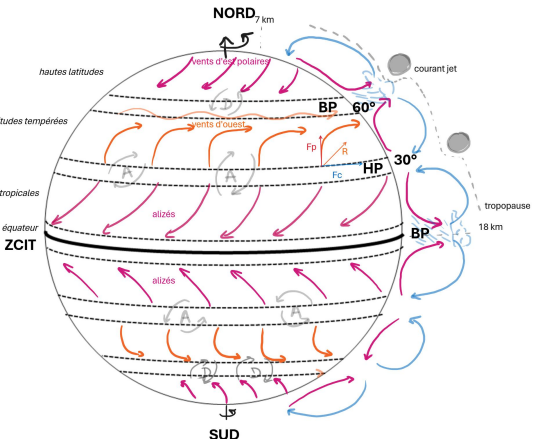


D

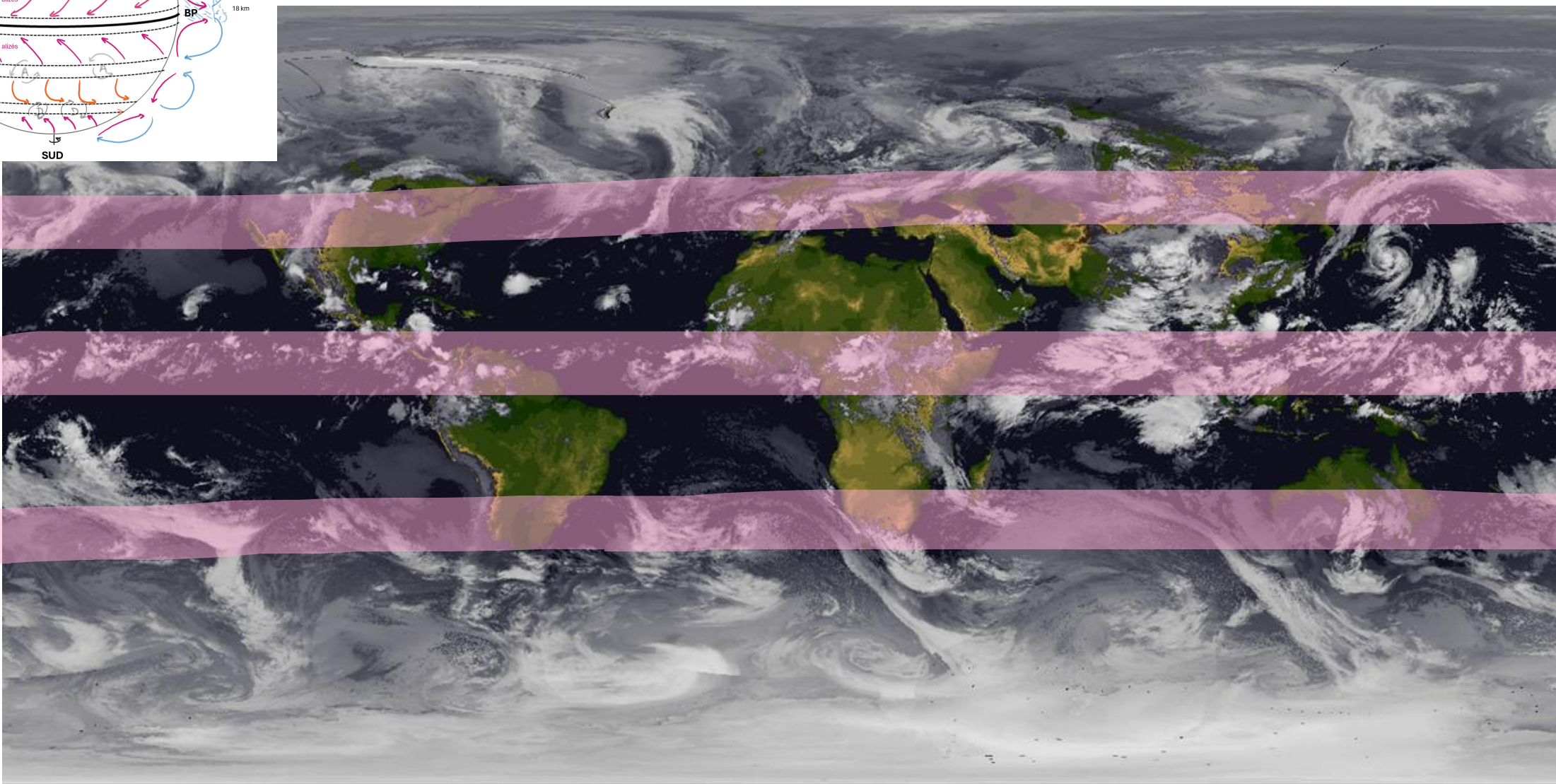


Gyre dans l'hémisphère Nord





Les 3 régions de BP, avec remontée des masses d'air (climats humides)

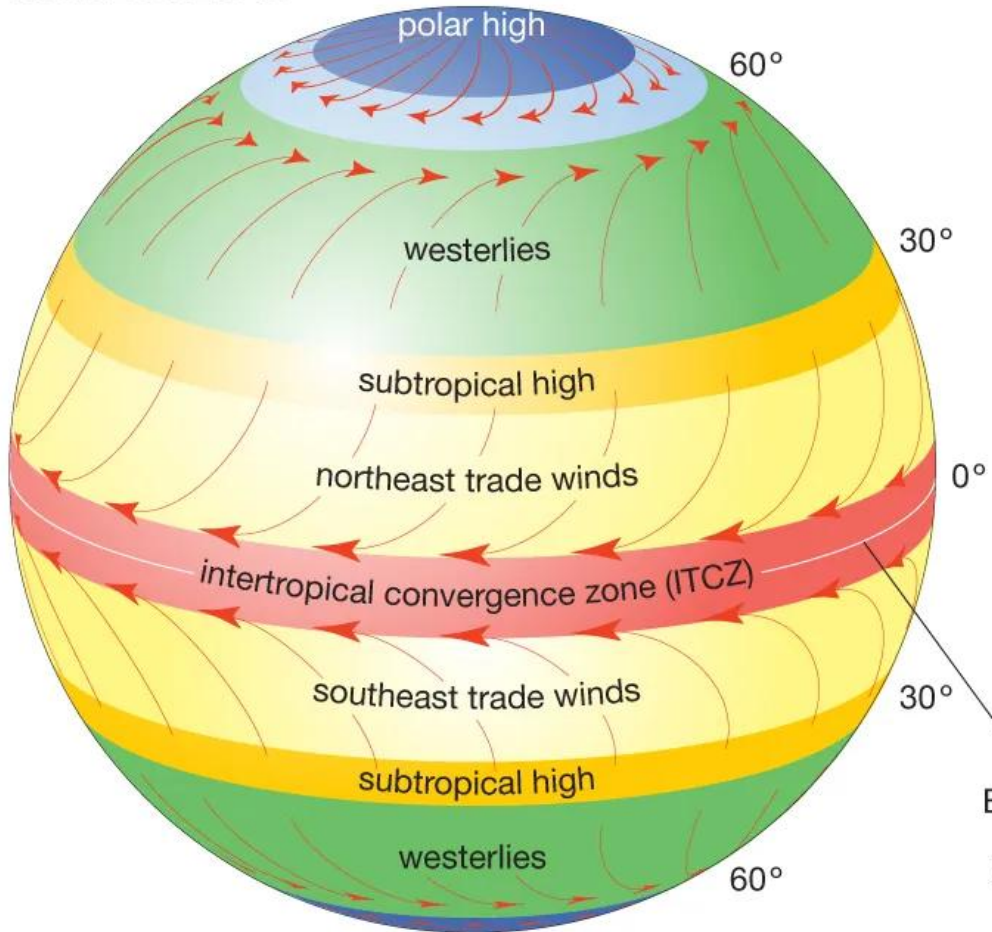


60° N

0°

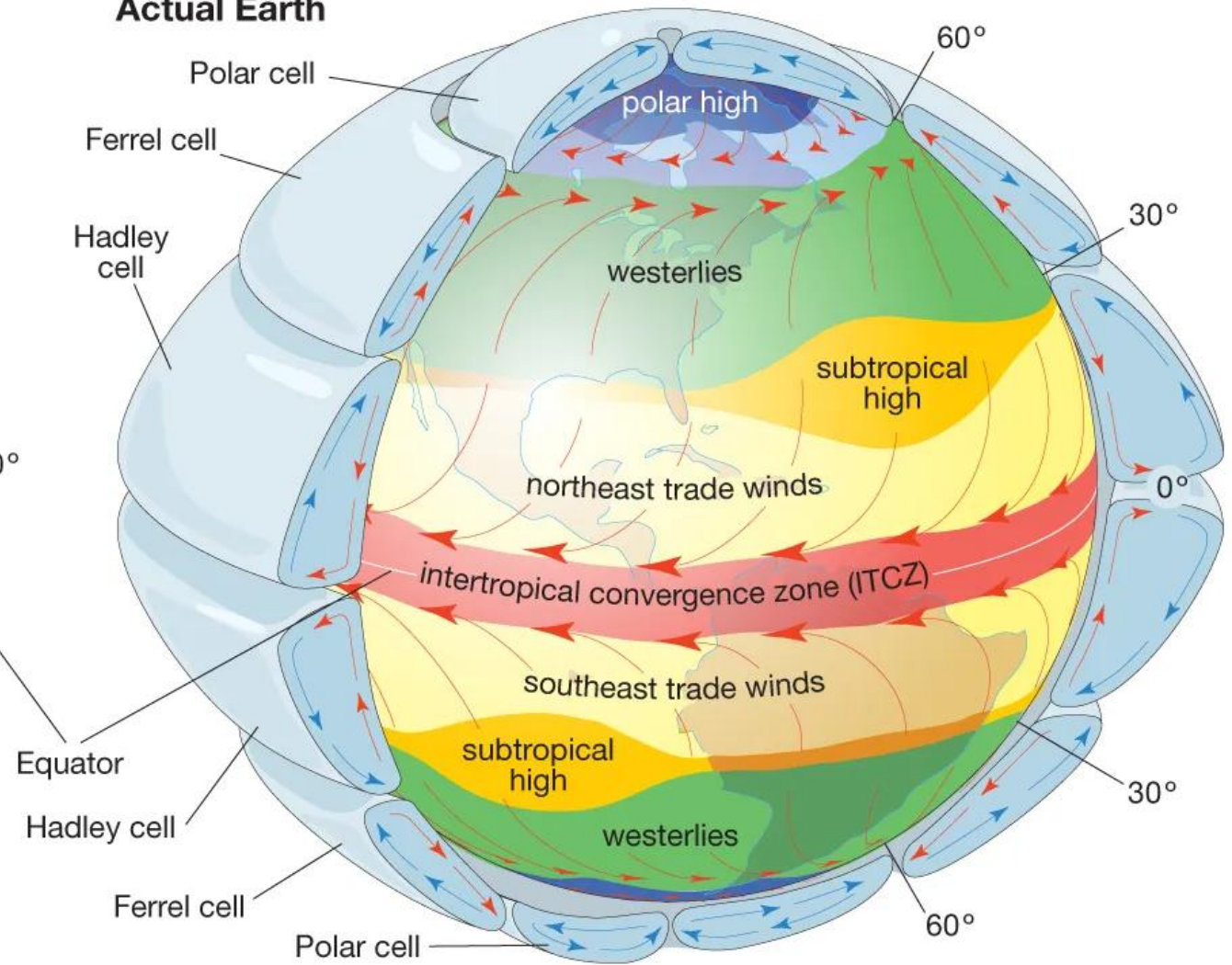
60° S

Idealized Earth



© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

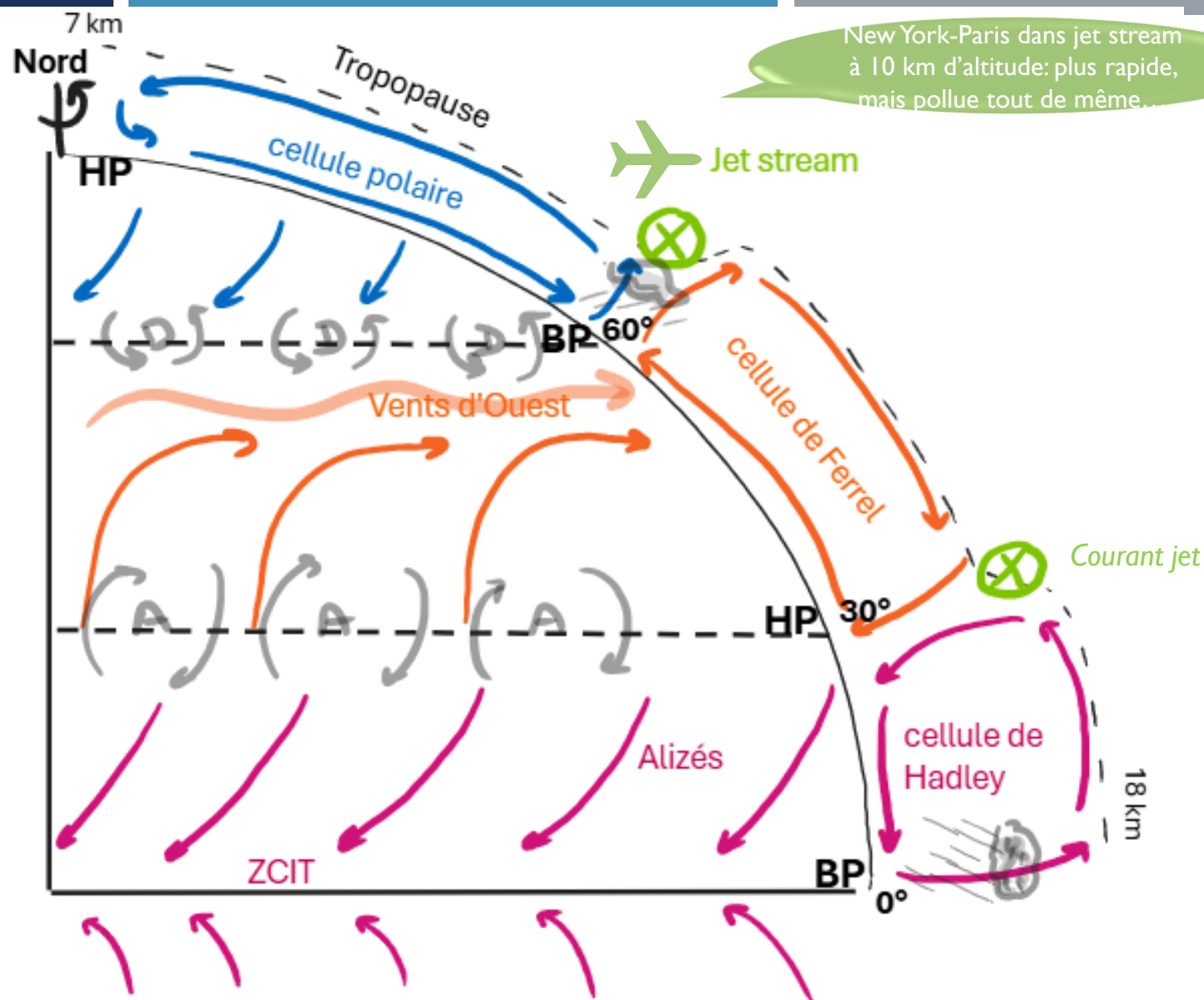
Actual Earth



La circulation atmosphérique globale : un résumé



ZCIT: pot au noir des marins: grande instabilité (obliquité de la Terre => ZCIT à latitude variable...)



La circulation atmosphérique globale dans l'hémisphère Nord (S. Dalaine)

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

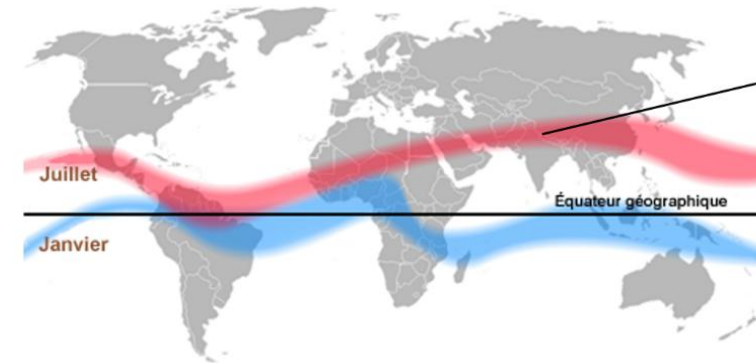
B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

2. La circulation atmosphérique aux latitudes tropicales

- Equateur météorologique (variable selon l'année cf inclinaison de Terre) = **zone de convergence intertropicale (ZCIT)**

- lieu de la convergence des alizés (des vents d'est –HN-)
- provenant des cellules de Hadley
- ZCIT: 1200 km de large
 - ✓ globalement dépressionnaire
 - ✓ « le pot au noir des marins » (car variation au cours des saisons: donc zone météo très instable)
 - ✓ La ZCIT présente des oscillations annuelles responsables de la mousson indienne : voir BCPST2 (déplacement selon les saisons)

Oscillation annuelle de la ZCIT (zone de convergence intertropicale)



Mousson indienne

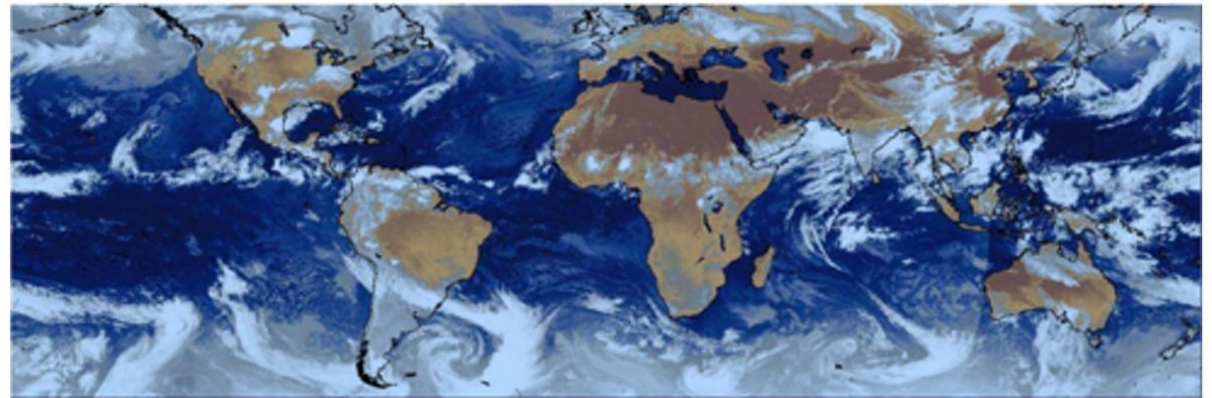
ZCIT juillet

ZCIT janvier

Source : wikimedia commons : Auteur : Mats Halldin

<https://www.lavionnaire.fr/MeteoCirculation.php>

ZCIT pleine de nuage !



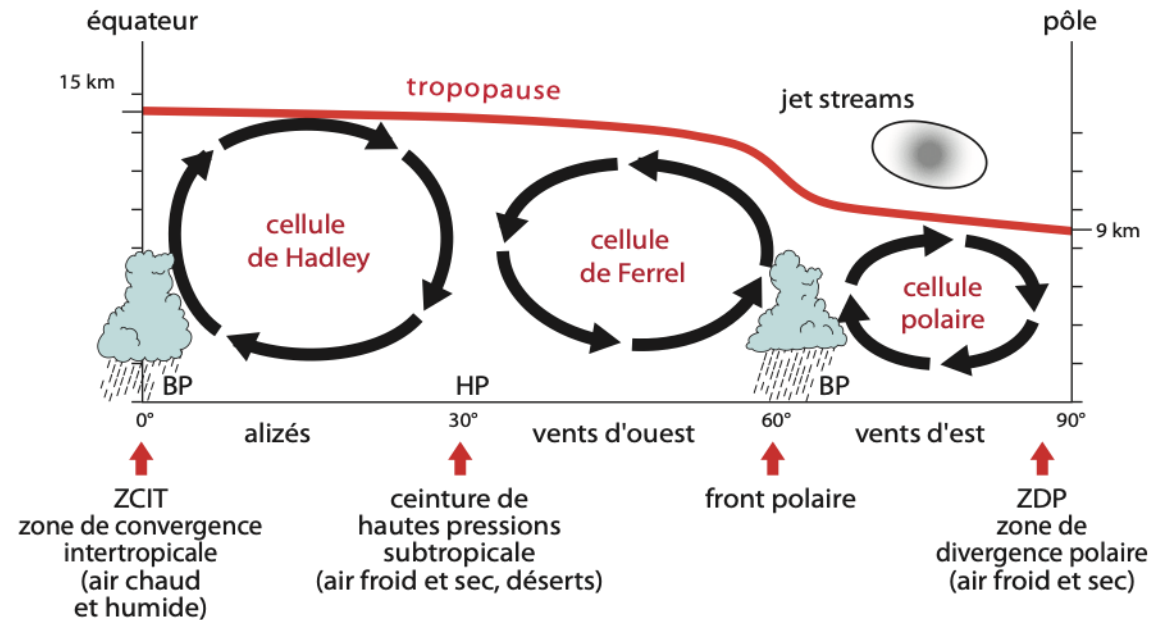
- Aux latitudes tropicales: certaines zones dépressionnaires peuvent se renforcer localement

⇒ Ouragans (jusqu'à 300 km.h⁻¹)

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation atmosphérique aux latitudes tempérées

- Latitudes tempérées : 30° à 60°
 - **Cellules de Ferrel**
 - **Zones anticycloniques et dépressionnaires**
 - ⇒ météo changeante



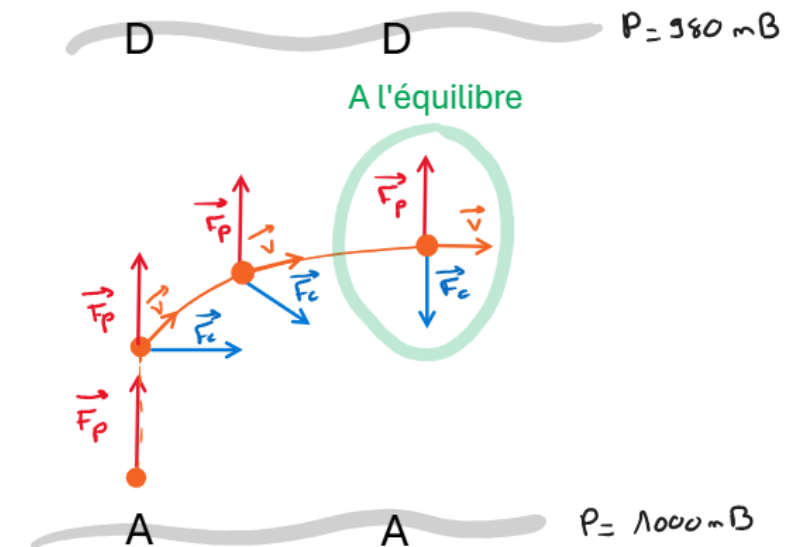
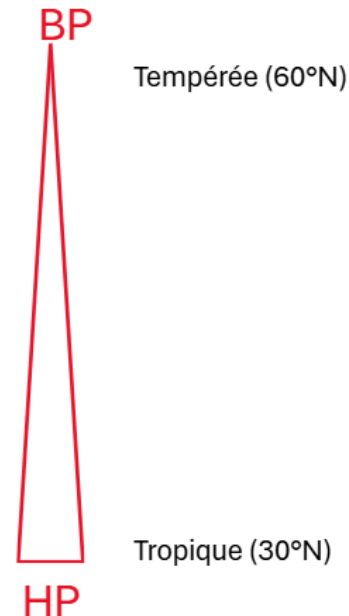
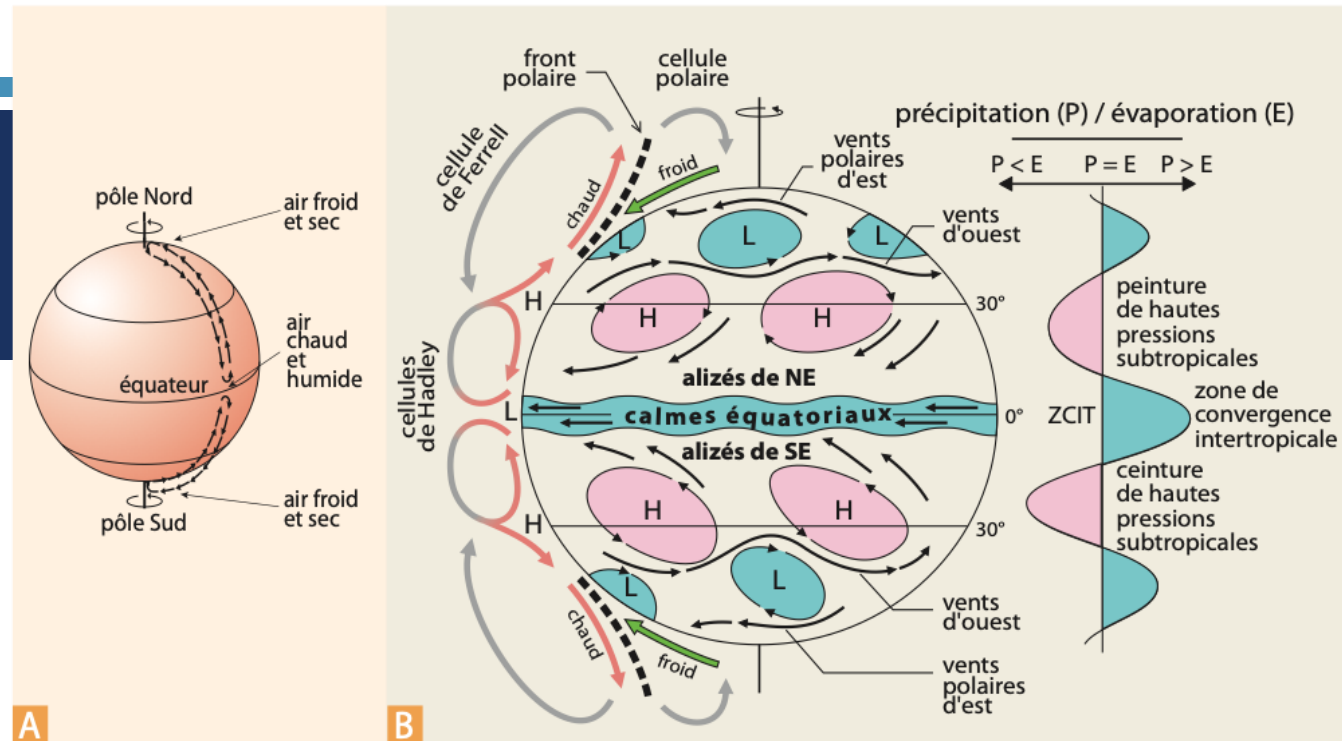
Les 3 cellules de convection de la troposphère (par hémisphère)

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation atmosphérique aux latitudes tempérées

3.1. L'équilibre géostrophique prédomine aux latitudes tempérées

- Aux latitudes tempérées: vent souffle **parallèlement aux isobares**:
 - **courant géostrophique** = équilibre entre gradient de pression et pseudo force de Coriolis
→ uniquement aux latitudes d'environ 50-60°
 - Vent se déplace parallèlement aux latitudes (ligne droite)
 - ✓ vitesse du vent proportionnelle au gradient de pression ; quelques dizaines de km.h^{-1}
 - ✓ A la latitude de la France (48°N à Paris), les vents d'ouest sont prédominants.
- Remarque : équilibre géostrophique pas aux latitudes tropicales, car force de Coriolis trop faible.
 - différences de régimes entre les circulations atmosphériques tropicales et tempérées.



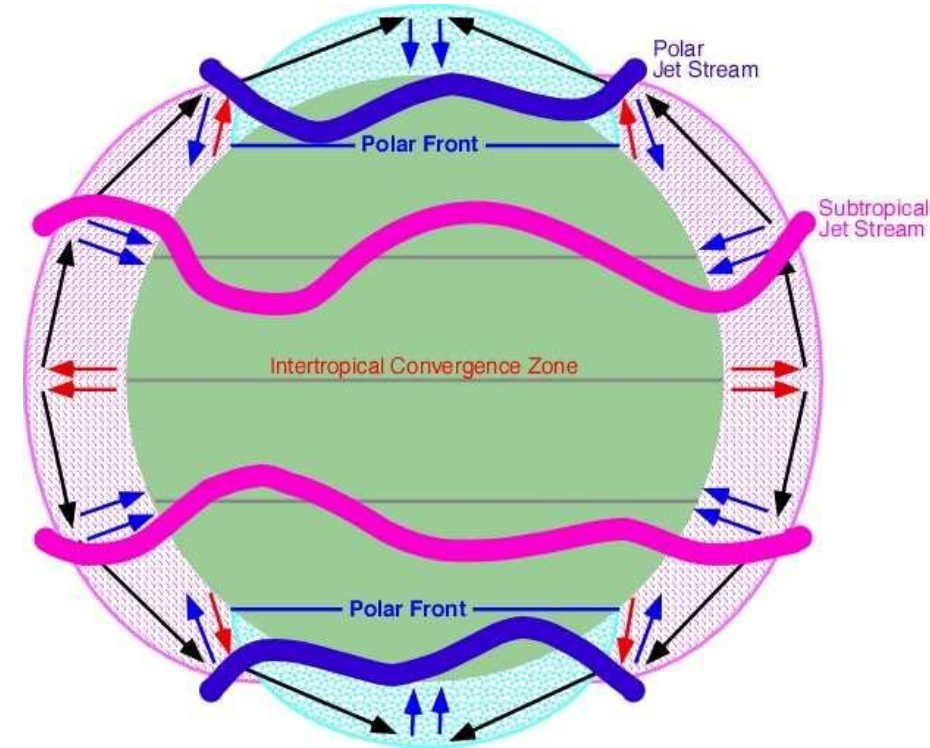
III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

B. LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation atmosphérique aux latitudes tempérées

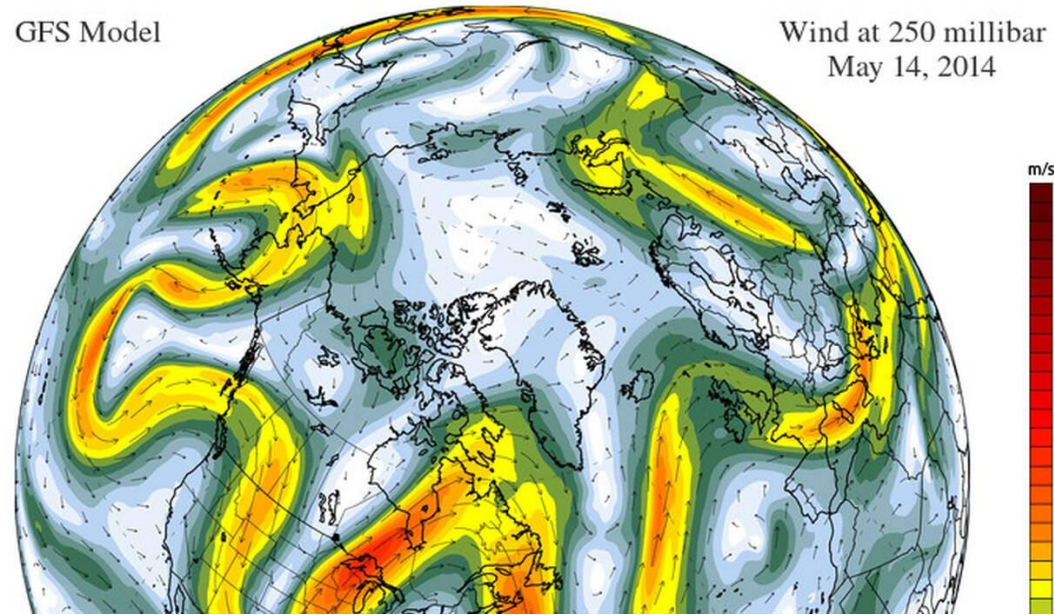
3.2. Les jets d'altitude se forment au niveau des fronts

- haute altitude (**tropopause**): **jets d'altitude** = **courants-jets** (en anglais : *jet stream*).
 - plusieurs **milliers de kilomètres de longueur** / quelques centaines de kilomètres de large / **quelques kilomètres d'épaisseur**
 - Circulation d'**ouest en est**
 - $> 100 \text{ km.h}^{-1}$ jusqu'à 360 km.h^{-1} (comme pour un ouragan)
 - **forme sinueuse**
 - Formation dans les zones de conflits entre **fronts** (grand différentiel de température et de pression) : **frontière entre les cellules de convection** :
 - ✓ entre cellule de Hadley et cellule de Ferrel (vers 30° de latitude) :
 - ⇒ *jets subtropicaux, stables en direction, position et intensité*
 - ✓ entre cellule de Ferrel et cellule polaire (vers 60° de latitude) :
 - ⇒ **jets polaires**, beaucoup plus instables.
 - ✓ choix du trajet emprunté par les **avions** effectuant des vols à longue distance.
trajet New-York - Paris : dans le même sens que le jet polaire

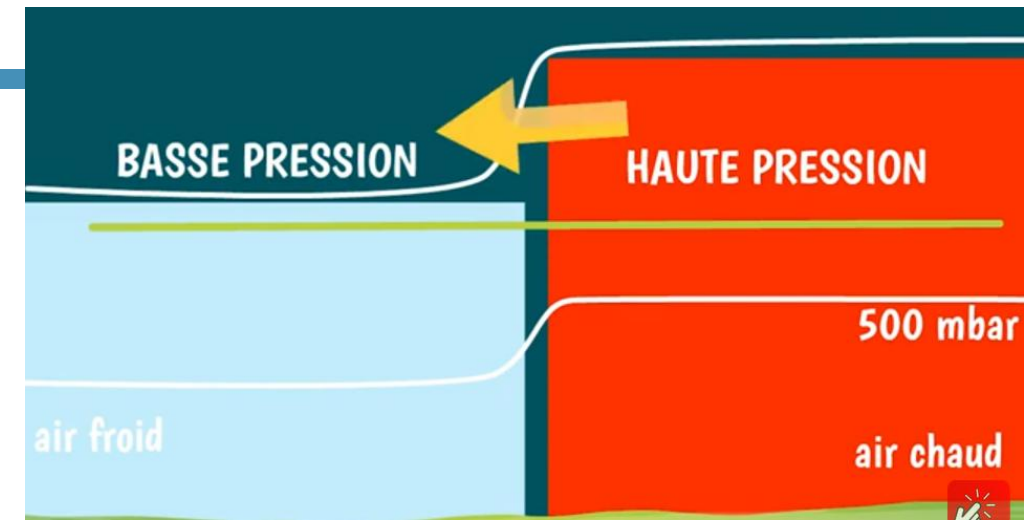


Les courants-jets dans les deux hémisphères se forment au niveau de la branche descendante des cellules de circulation atmosphérique. En rose, les courants-jets subtropicaux (*subtropical jet streams*). Ces vents sont générés au niveau de la branche descendante de la cellule de Hadley, qui distribue l'air de l'équateur (flèches rouges) vers les plus hautes latitudes. En bleu, les courants-jets des latitudes moyennes. Ces vents sont générés au niveau de la branche descendante de la cellule de Ferrel. © M. Pidwirny, *Fundamentals of Physical Geography*, 2006

GFS Model

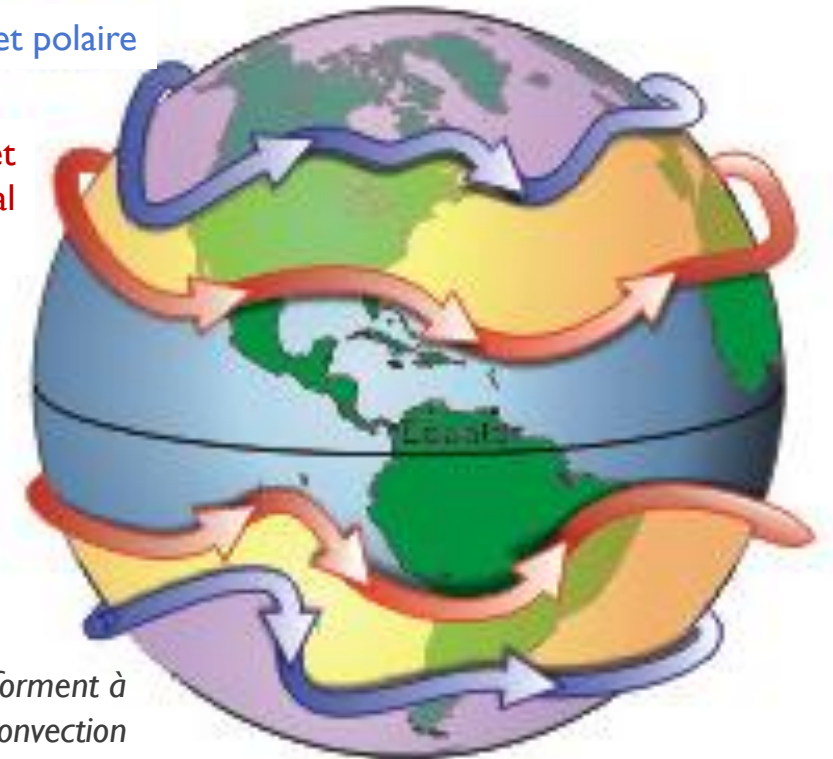


Visualisation du courant jet polaire

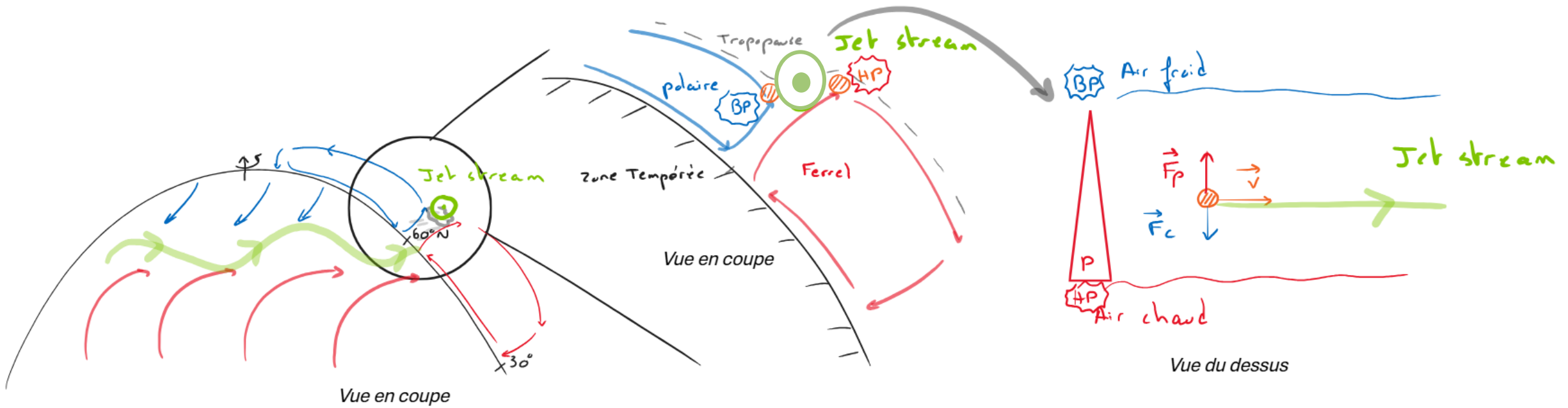


Courant jet polaire

Courant jet
subtropical



Les 2 courants jets se forment à
l'interface entre les cellules de convection
atmosphériques



Le jet stream: un courant atmosphérique de haute altitude et de grande vitesse entre deux cellules de convection

PLAN DU COURS

- I. L'atmosphère et l'hydrosphère : des enveloppes fluides et stratifiées
 - A. Composition et stratification de l'atmosphère
 - B. Composition et stratification de l'océan
 - C. Instabilité des enveloppes fluides / déséquilibre

- II. La circulation des enveloppes résulte d'une inégale répartition de la chaleur
 - A. L'énergie solaire reçue par la Terre chauffe les enveloppes fluides
 - B. Il existe différents modes de transferts de l'énergie au sein des enveloppes fluides
 - C. L'énergie solaire reçue par la Terre est inégalement répartie

- III. Les circulations atmosphériques et océaniques sont couplées
 - A. Une redistribution de l'énergie solaire par les circulations atmosphériques et océaniques
 - B. La circulation atmosphérique
 - C. La circulation océanique est couplée à la circulation atmosphérique

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. La circulation de surface de l'océan est étroitement couplée au régime des vents troposphériques et aux gradients thermiques

- Jusqu'à **200 m** de profondeur: **courants de surface**
 - courants de surface **couplés** aux déplacements des masses d'air
 - cinq grands **gyres** = tourbillons d'eau de grande ampleur (centaines à milliers de kilomètres de diamètre) rassemblant chacun plusieurs courants marins de surface

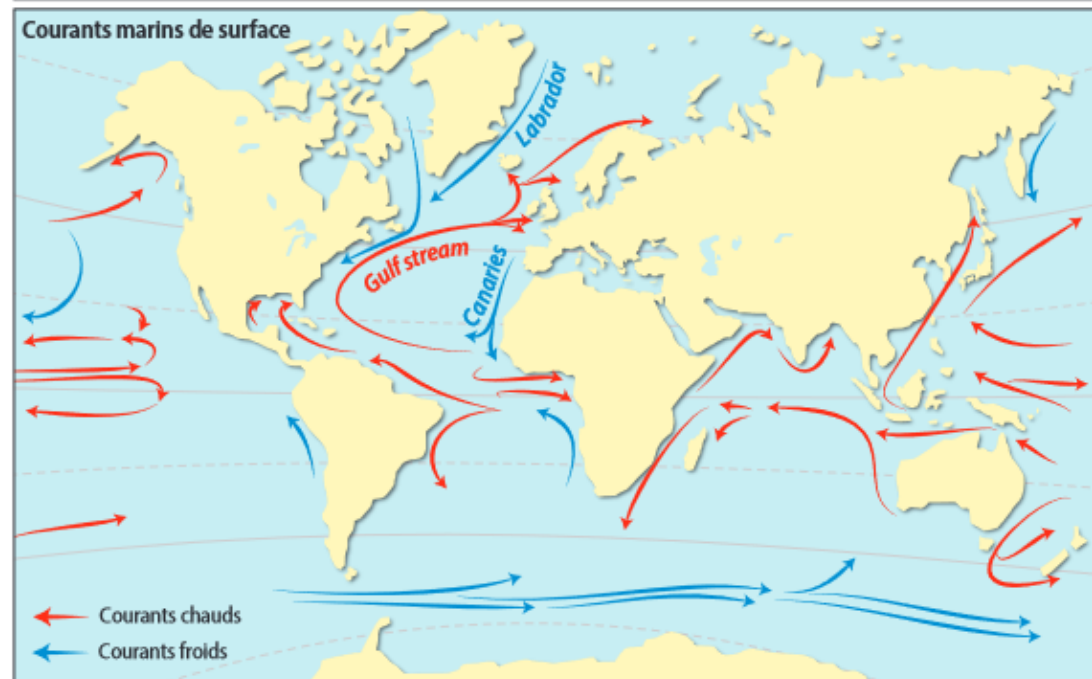
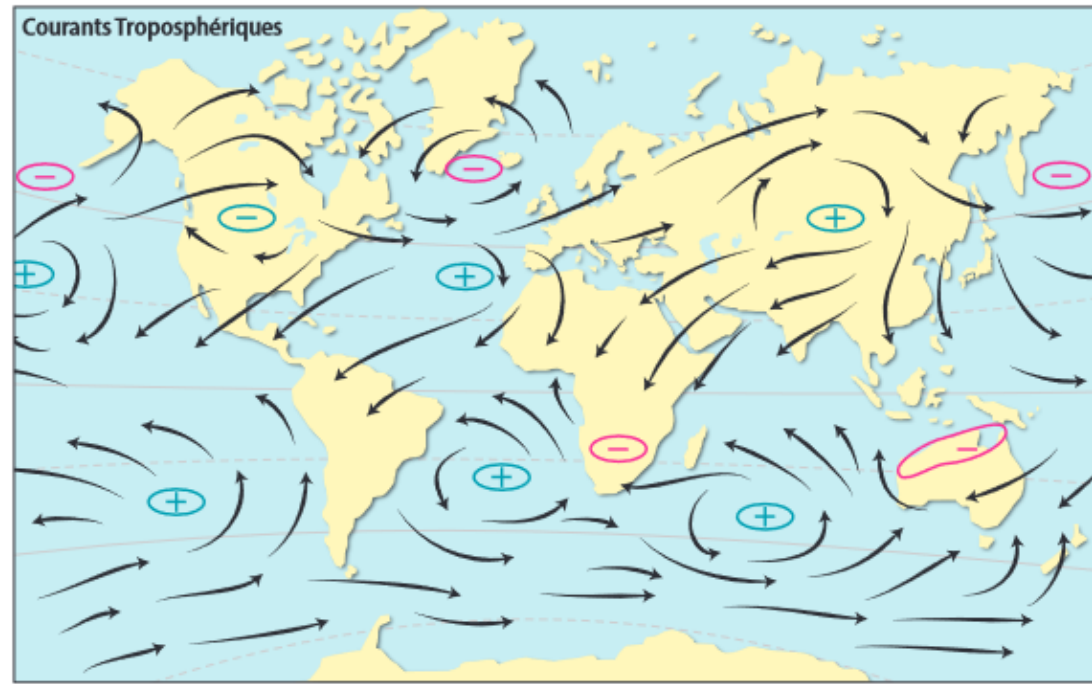
Couplages entre les deux enveloppes fluides: échanges de matière, d'énergie et de quantité de mouvement



Continent plastique au cœur des gyres



Carte des grands gyres océaniques
(<https://vimeo.com/154149905>)

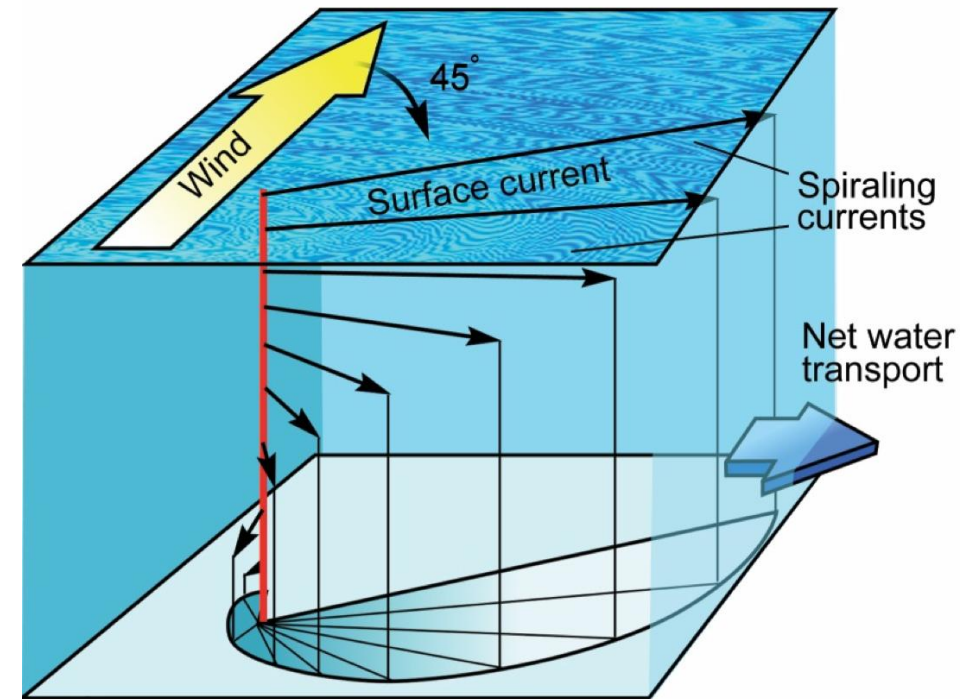


III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

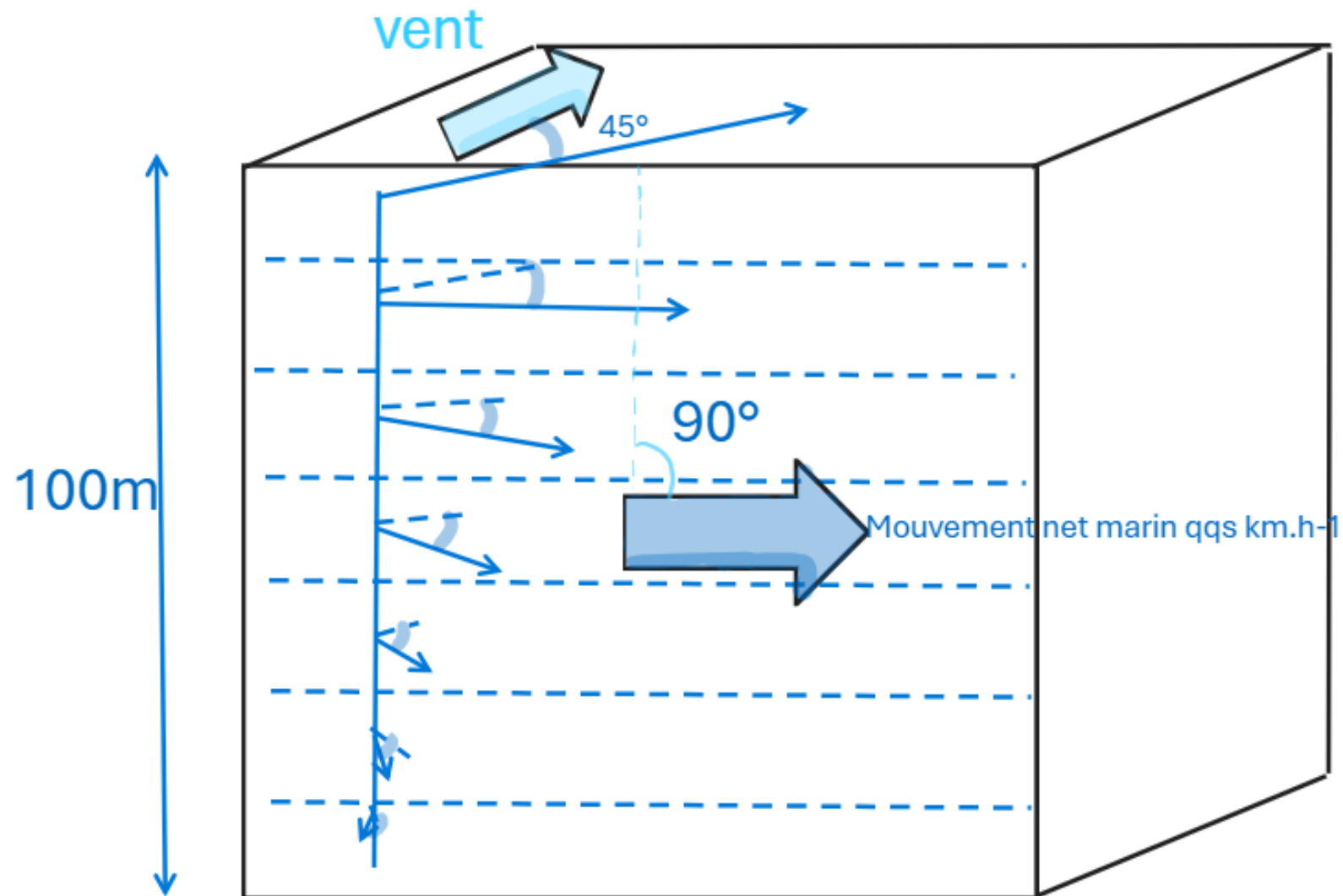
I. La circulation de surface de l'océan est étroitement couplée au régime des vents troposphériques et aux gradients thermiques

- **Force de frottement** due à énergie mécanique des vents sur surface de mer
- **Force de frottement + pseudo force de Coriolis** $\Rightarrow$ courant de surface 45° à droite de direction du vent dans HN
 - **Courant de surface (100 m à 200 m max)** $\Rightarrow$ courant de tranche d'eau sous-jacente avec perte d'énergie
 - Mouvement d'ensemble = **spirale d'Ekman 90° à droite** de direction du vent dans HN
 - Echange de quantité de mouvement
 - **Vitesse: qqs km.h⁻¹**



Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc. or related companies. All rights reserved.

Le couplage mécanique troposphère-océan : la spirale d'Ekman et ses conséquences



La spirale d'Ekman : un couplage mécanique entre le vent et les masses d'eau induisant une déviation du courant marin de 90° par rapport à la direction du vent

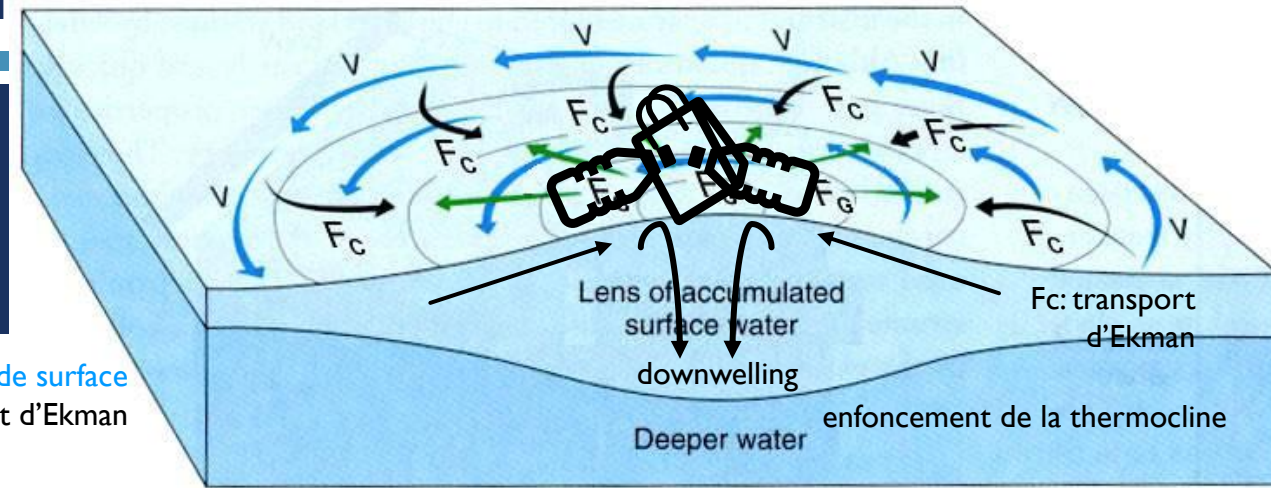
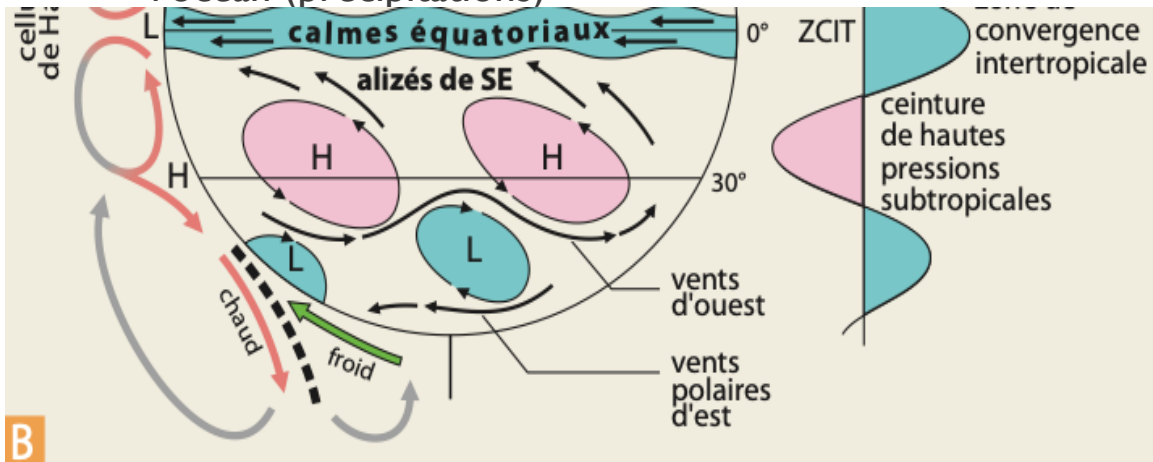
III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. La circulation de surface de l'océan est étroitement couplée au régime des vents troposphériques et aux gradients thermiques

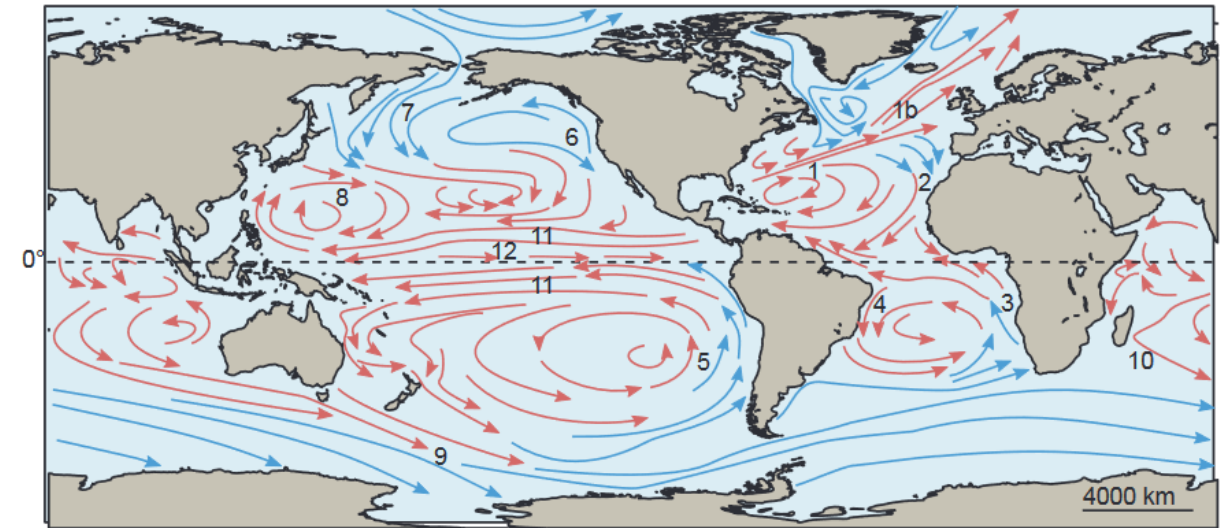
■ Couplage thermique atmosphère-océan:

- Variations annuelles de $T^{\circ}\text{C}$ (couche de mélange)
- Évaporation de l'eau de l'océan vers atmosphère
 - ✓ Forte enthalpie de changement d'état; transfert thermique de l'atmosphère vers océan
- Dans atmosphère: condensation de l'eau en gouttelettes → libération d'énergie, restitution à l'océan (précipitations)



V: vent de surface
F_c: transport d'Ekman

Formation du gyre subtropical **dans HS**
http://biophysics.sbg.ac.at/atmo/el_nino.htm



1 : Gulf stream. 1b : dérive Nord-Atlantique. 2 : courant des Canaries. 3 : courant de Benguela.
4 : courant du Brésil. 5 : courant du Pérou - Chili. 6 : courant de Californie. 7 : Oyashio. 8 : Kuroshio
9 : courant circumpolaire antarctique. 10 : courant des Aiguilles. 11 : courants équatoriaux. 12 : contre-courant équatorial
→ courants chauds → courants froids = ramenant des eaux en provenance des plus hautes latitudes

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES E

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

1. La circulation de surface de l'océan est étroitement couplée au régime des vents troposphériques et aux gradients thermiques

- Vents(V) + Coriolis (Fc): transport d'Ekman
 - ⇒ **Bosses d'eau** avec écoulement centrifuge (Fg)
 - ⇒ Courant giratoires autour des HP et des BP
- **Zones en bosse: eaux chaudes** : zones de downwelling
- Zones en creux: eaux froides: zones de upwelling

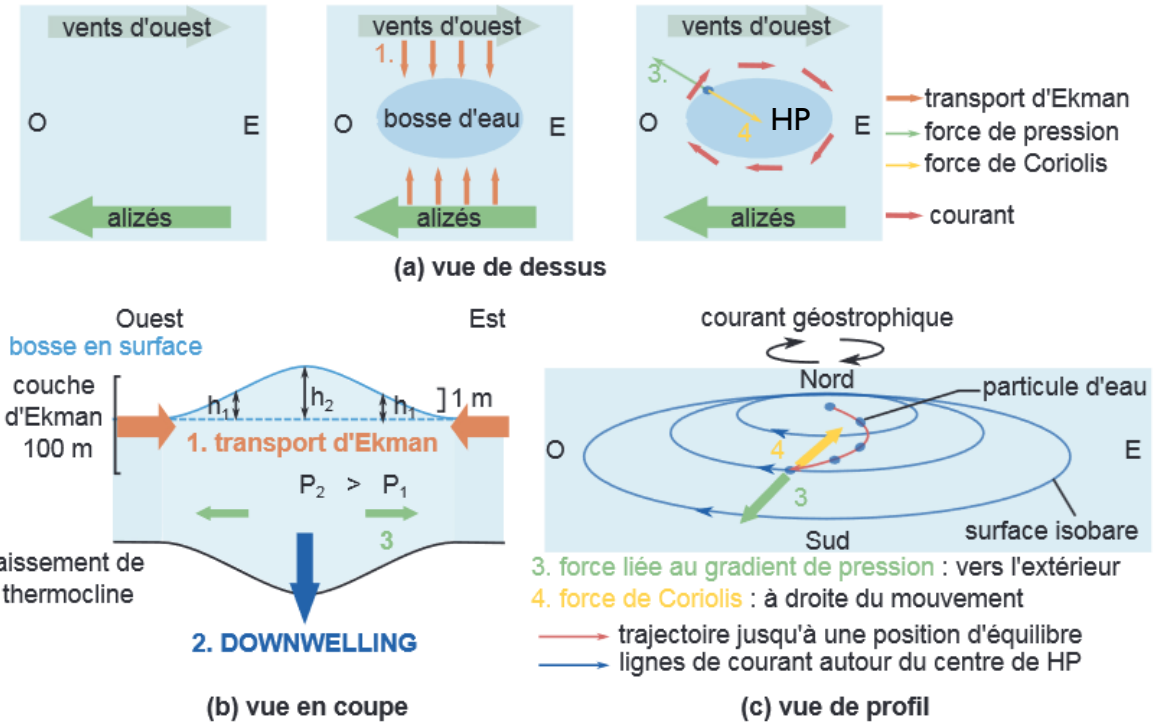
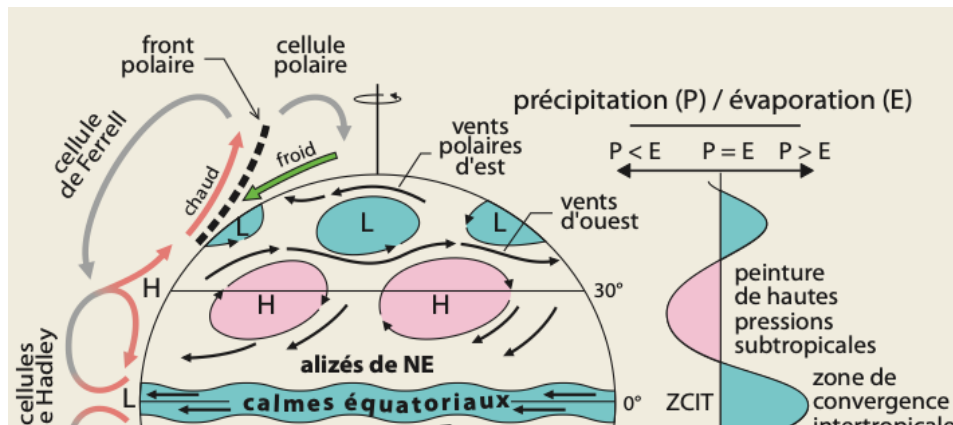
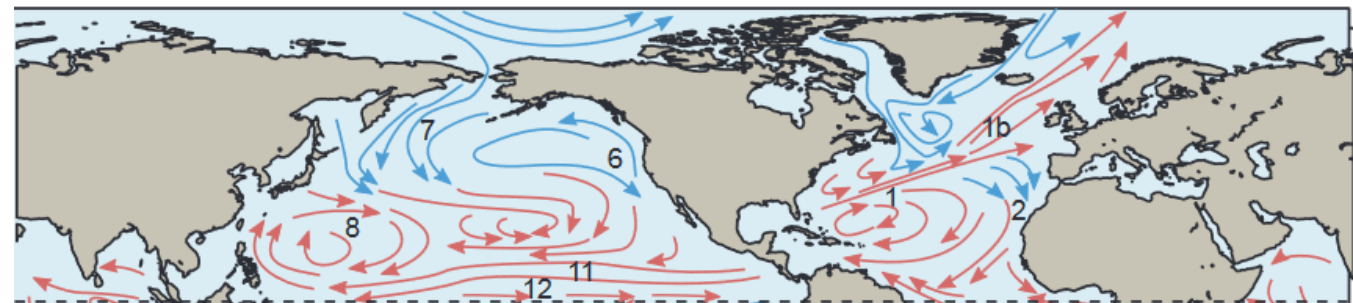


Figure 30.8 Mise en place d'une circulation géostrophique au niveau d'un gyre subtropical situé dans l'hémisphère Nord.

1. Le transport d'Ekman dû au vent provoque une accumulation des masses d'eau au centre du gyre. 2. Cette accumulation induit un downwelling avec abaissement de la thermocline. 3. Les hautes pressions (P_2) présentes au centre du gyre provoquent le mouvement des masses d'eau vers l'extérieur (zone où $P_1 < P_2$). 4. La force de Coriolis dévie ces mouvements jusqu'à un équilibre pour lequel les trajectoires sont circulaires autour du centre du gyre.

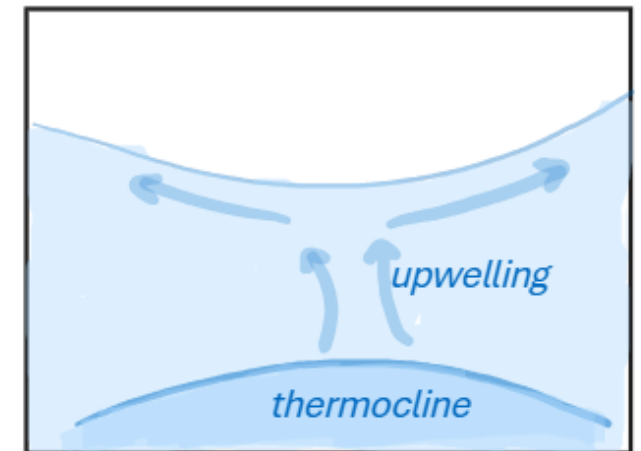
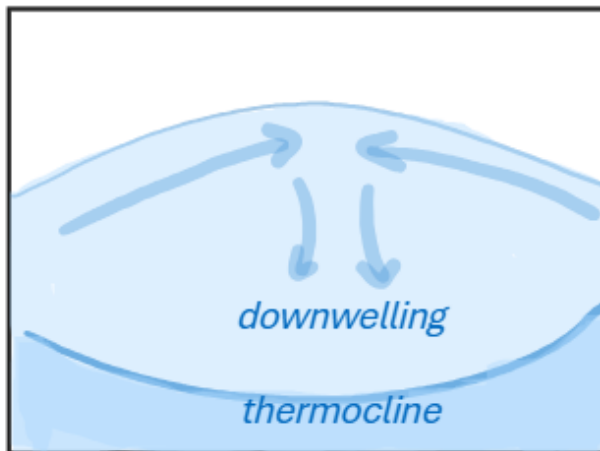
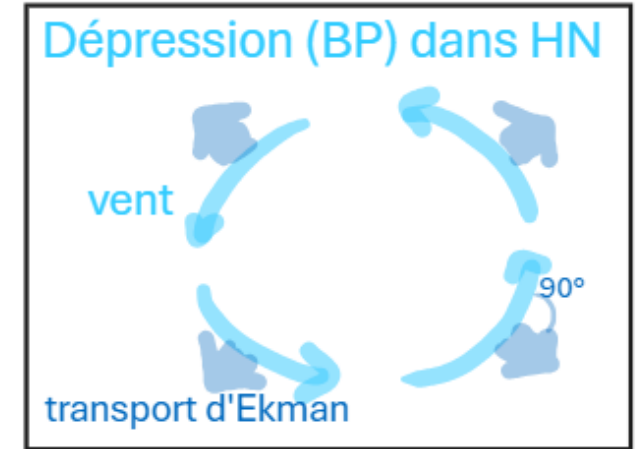
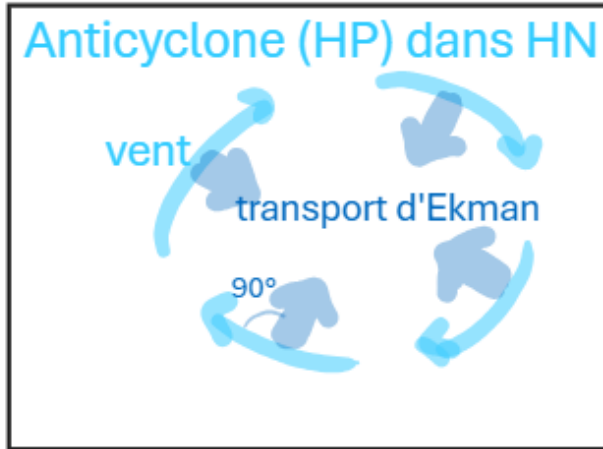


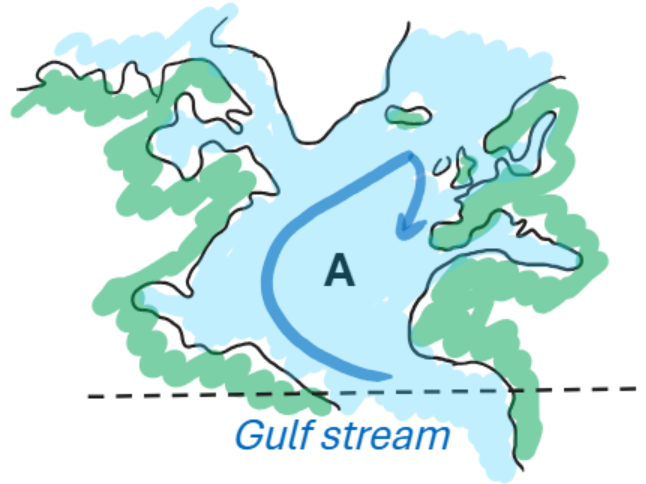
- 1 : Gulf stream. 1b : dérive Nord-Atlantique. 2 : courant des Canaries. 3 : courant de Benguela.
 4 : courant du Brésil. 5 : courant du Pérou - Chili. 6 : courant de Californie. 7 : Oyashio. 8 : Kuroshio
 9 : courant circumpolaire antarctique. 10 : courant des Aiguilles. 11 : courants équatoriaux. 12 : contre-courant équatorial
- courants chauds → courants froids = ramenant des eaux en provenance des plus hautes latitudes

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

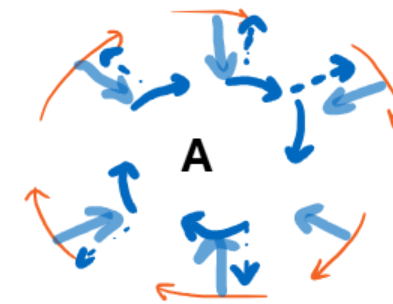
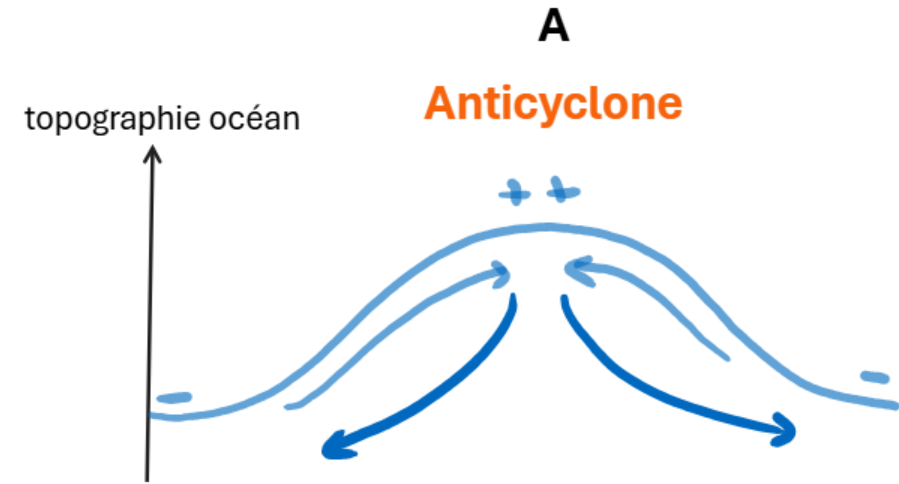
I. La circulation de surface de l'océan est étroitement couplée au régime des vents troposphériques et aux gradients thermiques

- Vents(V) + Coriolis (Fc): transport d'Ekman
 - ⇒ **Bosses d'eau** avec écoulement centrifuge (Fg)
 - ⇒ Courant giratoires autour des HP et des BP
- Variation du niveau marin au centre des anticyclones et des dépressions expliquée par le transport d'Ekman
 - **Zones en bosse: eaux chaudes** : zones de downwelling
 - Zones en creux: eaux froides: zones de upwelling

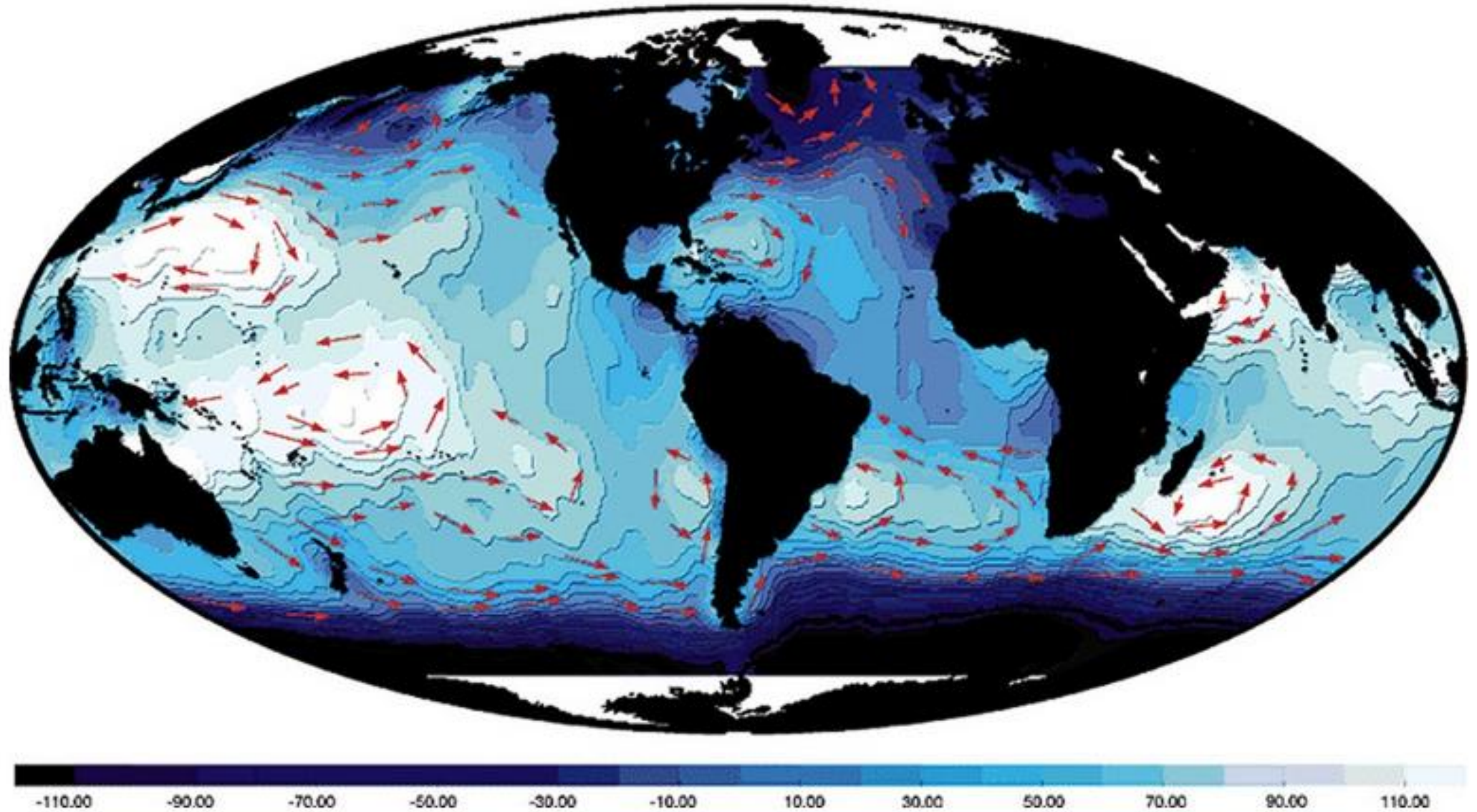




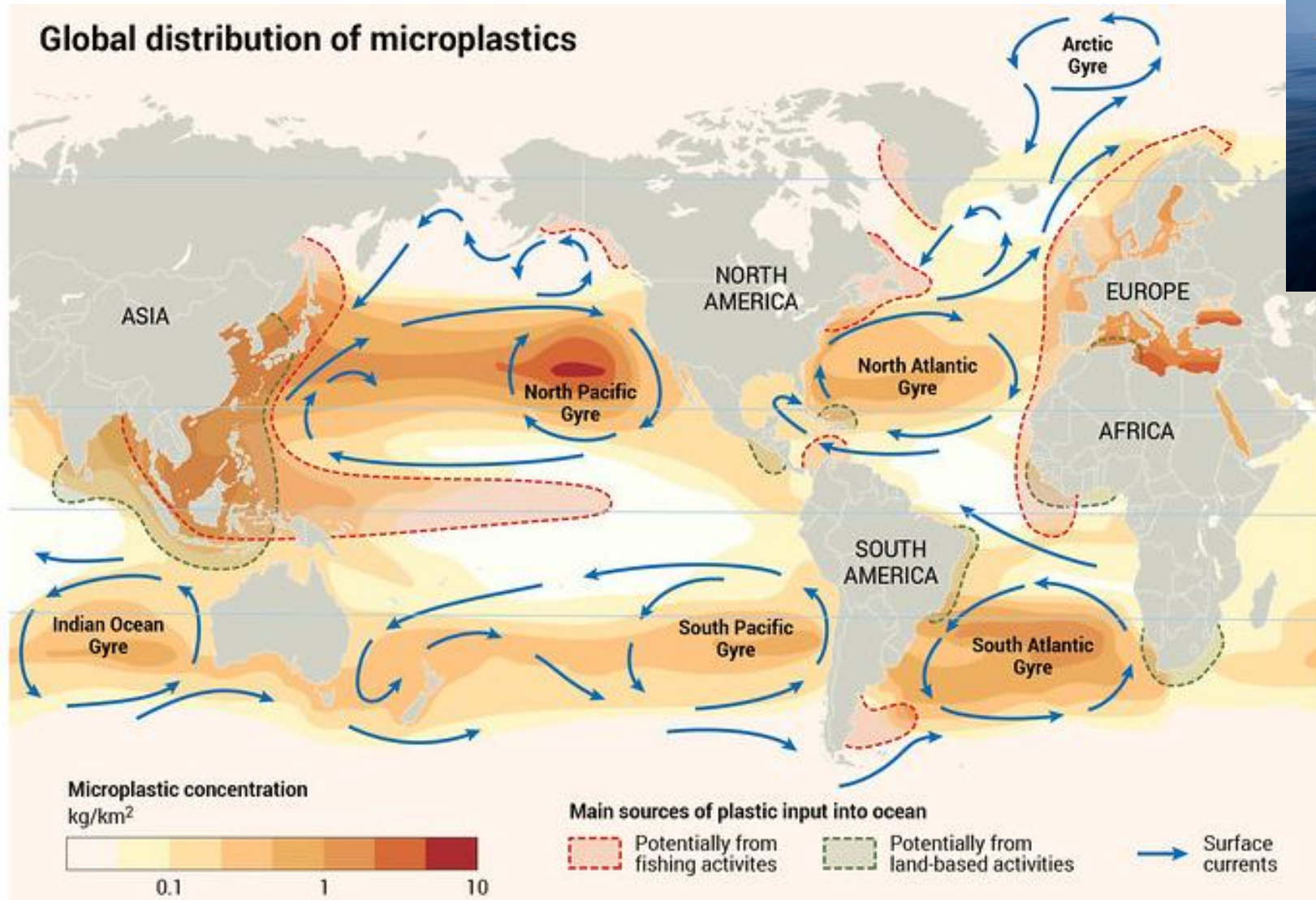
Circulation géostrophique



Couche d'Ekman



Différence de hauteur des océans dans les gyres océaniques (données Topex Poséidon)



Les gyres océaniques sont les lieux d'accumulation des plastiques

Year: 2019

From collection: *Global linkages – a graphic look at the changing Arctic (rev. I)*

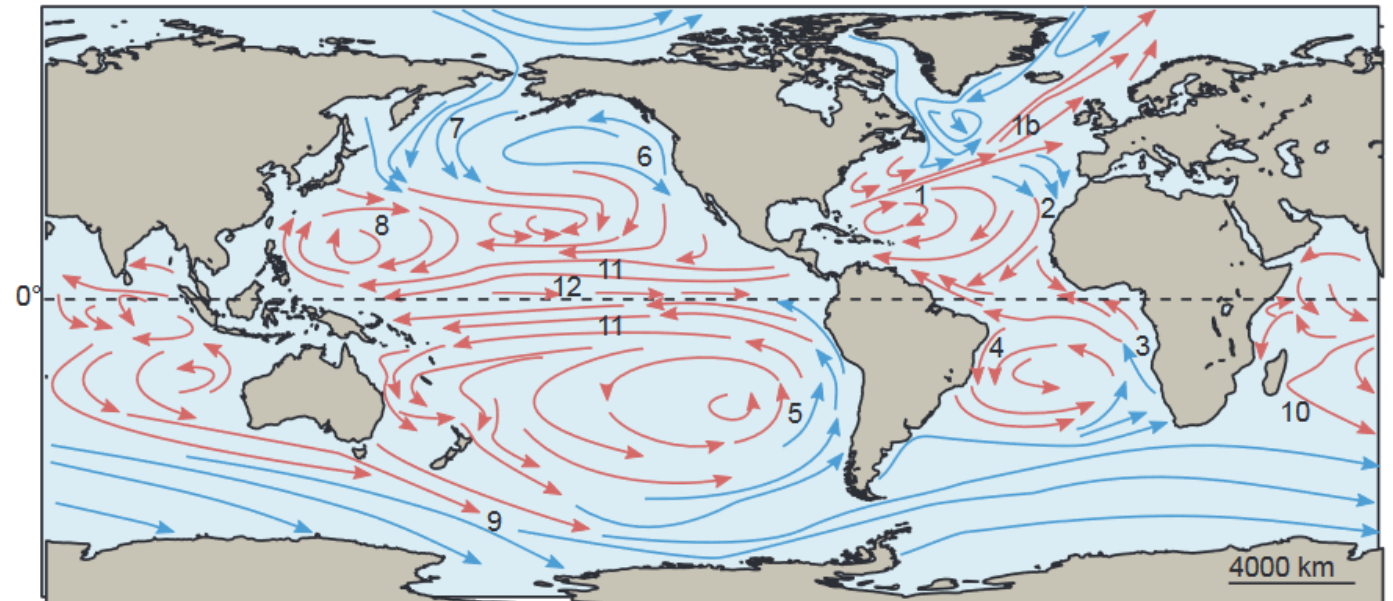
Cartographer: Riccardo Pravettoni and Philippe Rekacewicz

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

I. La circulation de surface de l'océan est étroitement couplée au régime des vents troposphériques et aux gradients thermiques

- Vitesse des courants de surface: 1 à 10 km.h^{-1}
 - ✓ Ex: Gulf stream; courant circumpolaire antarctique
- Circulation sous forme de gyre corrélée aux mouvements atmosphériques
 - 5 gyres majeures
 - Gyres subtropicales: anticycloniques
 - Gyres subpolaires: cycloniques
- Antarctique: communication entre bassins océaniques
 - ⇒ Grand courant circumpolaire antarctique



1 : Gulf stream. 1b : dérive Nord-Atlantique. 2 : courant des Canaries. 3 : courant de Benguela.
4 : courant du Brésil. 5 : courant du Pérou - Chili. 6 : courant de Californie. 7 : Oyashio. 8 : Kuroshio
9 : courant circumpolaire antarctique. 10 : courant des Aiguilles. 11 : courants équatoriaux. 12 : contre-courant équatorial
→ courants chauds → courants froids = ramenant des eaux en provenance des plus hautes latitudes

La circulation océanique de surface (Dunod, 2021, p.875)

FIGURE 18.10 Surface currents of the world's oceans.

→ Cold → Warm



Surface-water temperatures reveal swirling eddies of the Gulf Stream.

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUE SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE A LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

2. Aux latitudes tropicales, ce couplage atmosphère-océan amène à la formation de la cellule de Walker

- Océan Pacifique: **alizés** poussent les eaux de surface chaudes **vers l'ouest**
 - ⇒ accumulations d'eaux chaudes sur la côte est de l'Australie.
 - ⇒ eau chaude s'évapore
 - ⇒ nouveau type de cellule convective = **cellule de Walker**, qui tourne **au-dessus de l'océan Pacifique**
- ✓ vents d'altitude = vents d'ouest
- ✓ cellule de Walker à **très faible extension latitudinale** car non **déviée par la force de Coriolis** (qui est nulle à l'Equateur).

Google Earth,
cliquer sur
nuages animés!

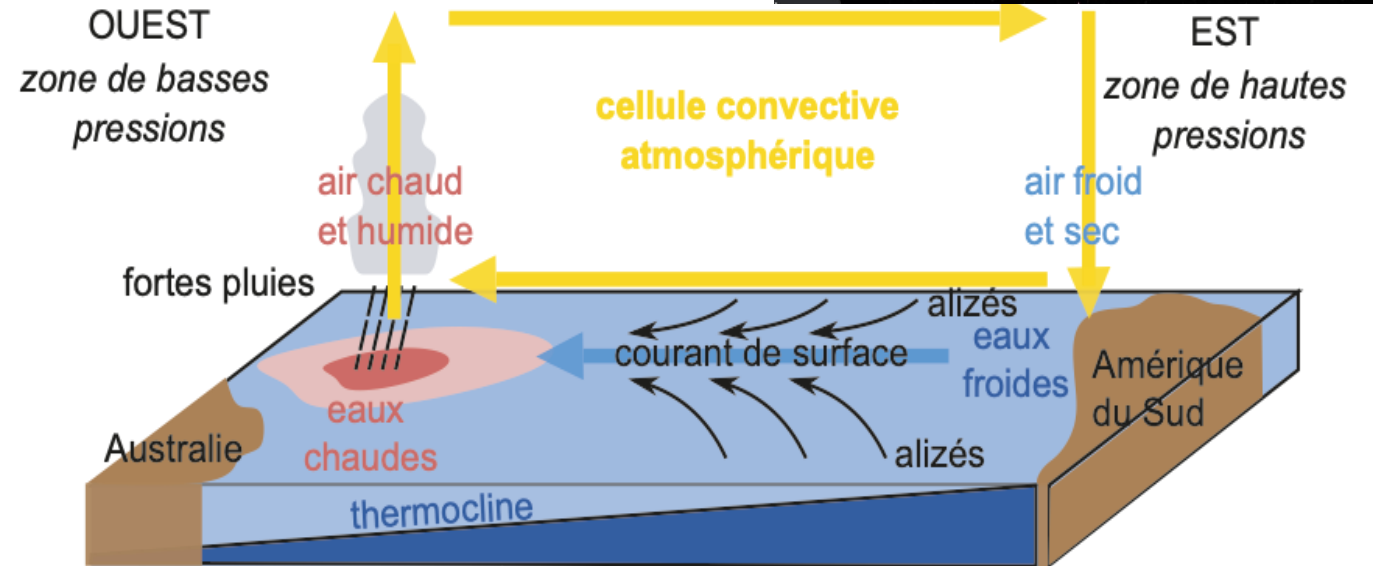
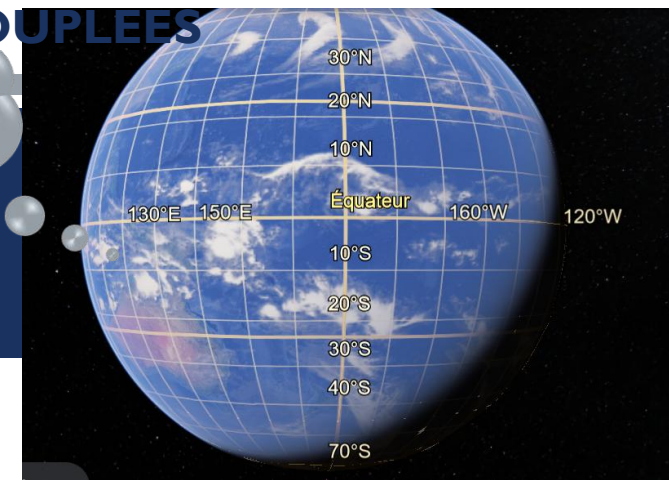
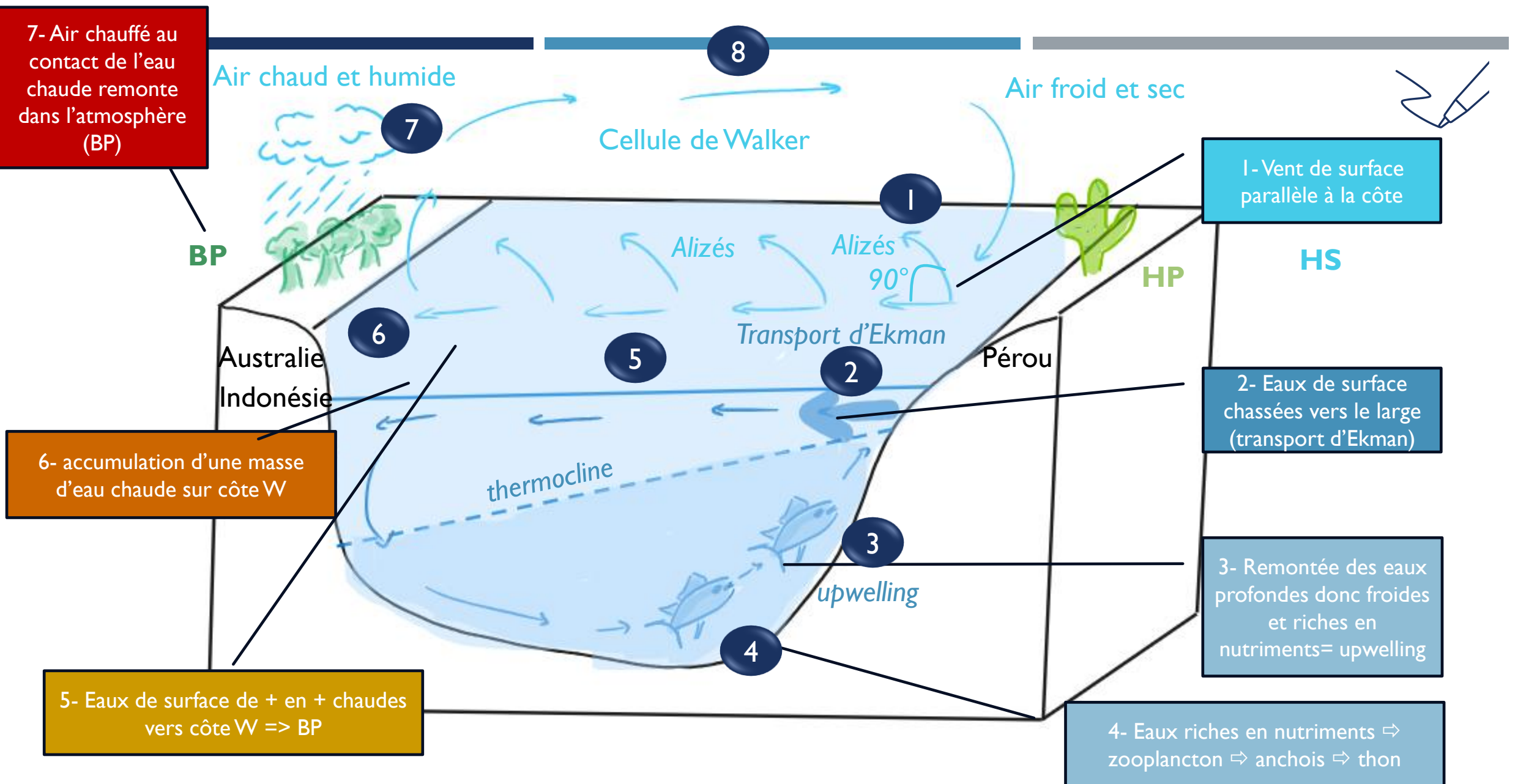


Figure 30.3 Cellule de Walker du Pacifique vue en coupe.

Les alizés et la formation de la cellule de Walker dans l'océan Pacifique. (in Dunod, 2021)

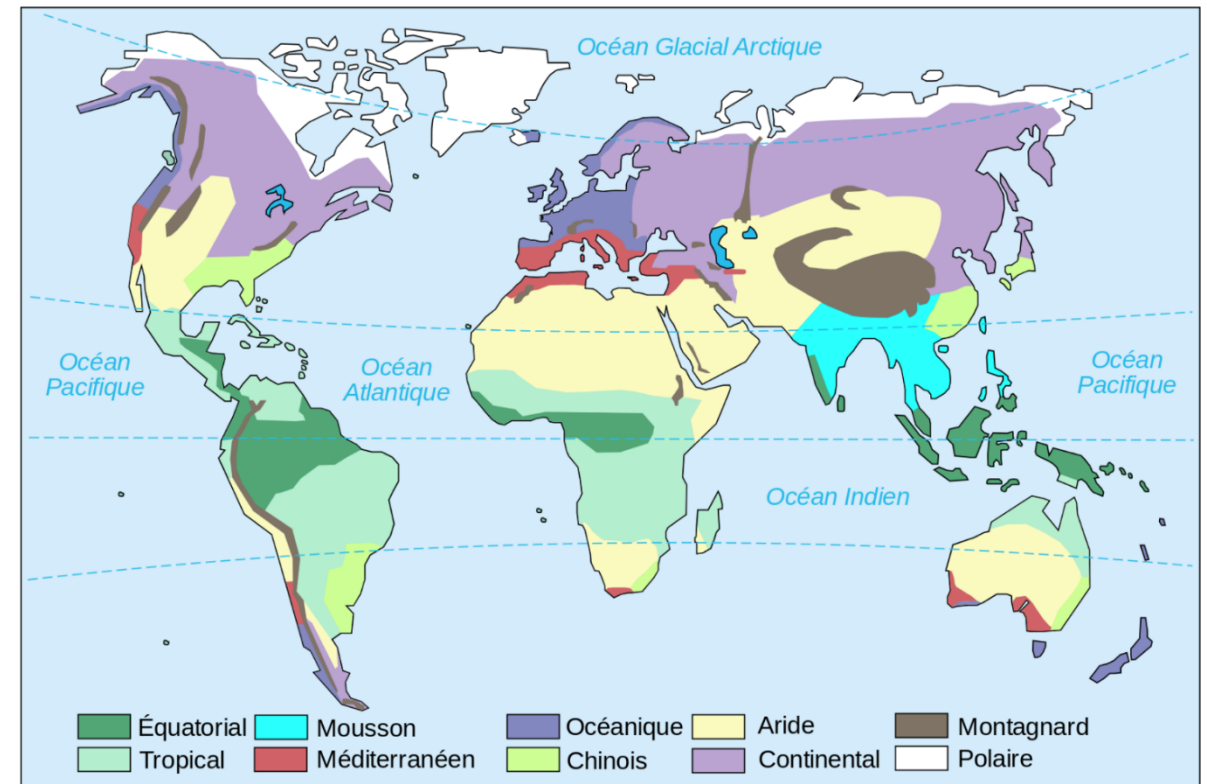


Les alizés et la formation de la cellule de Walker dans l'océan Pacifique (S. Dalaine)

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. Le couplage entre atmosphère et eaux océaniques de surface détermine la répartition des grands biomes

- couplage thermomécanique entre eaux de surface et atmosphère
 - ⇒ répartition des températures de surface et des précipitations
 - ⇒ répartition des climats à l'échelle régionale ou continentale.
- ✓ *Par ex: zones côtières souvent climats relativement doux avec de fortes précipitations*
- ✓ *intérieur des continents présente des contrastes de température saisonniers beaucoup plus marqués.*



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_world_climate_zones_\(simplified_to_10\)-fr.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_world_climate_zones_(simplified_to_10)-fr.svg)

La répartition des climats

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

2. Le couplage entre atmosphère et eaux océaniques de surface détermine la répartition des grands biomes

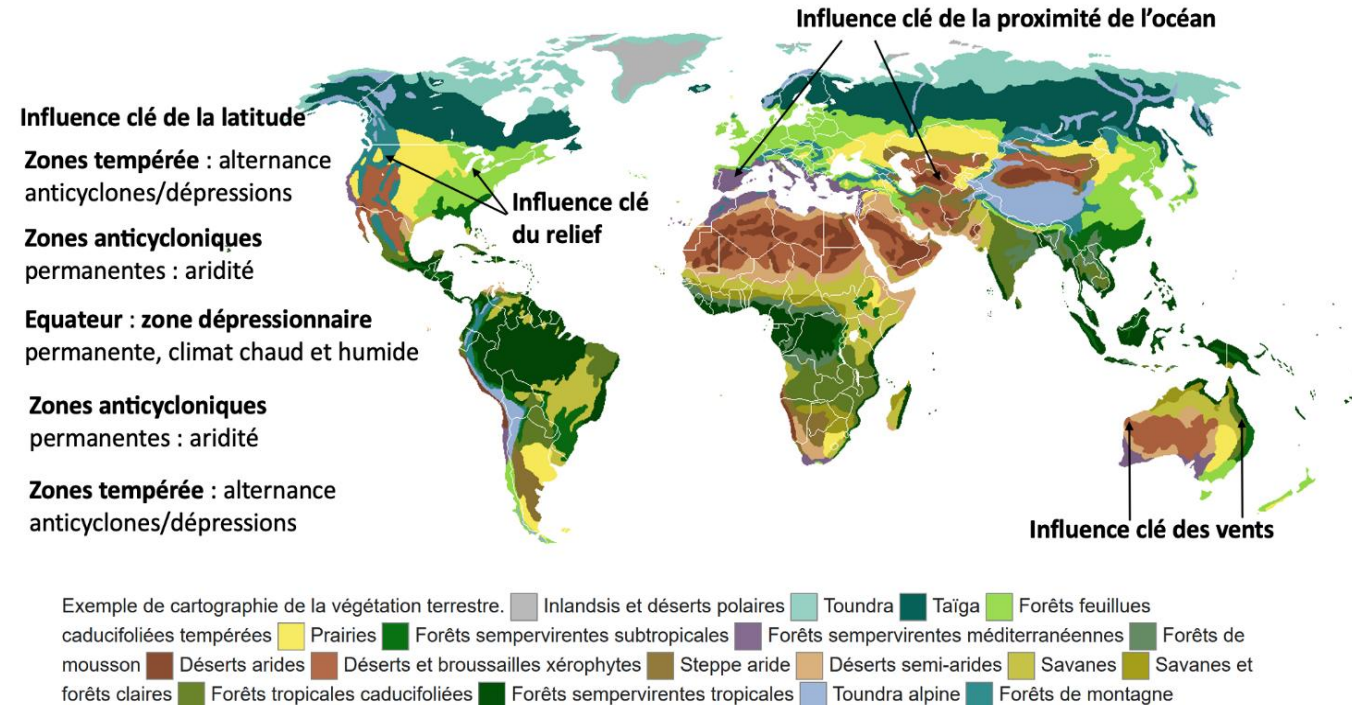
- **biome** : **ensemble d'écosystèmes** caractéristique d'une **aire biogéographique** et dotée d'un **climat** et d'un **type de sol** particulier (celui-ci dépendant aussi du climat, voir chapitre sur la sédimentation)

✓ *Ex: toundra, savane, steppe aride etc.*

- Chaque biome caractérisé par des **communautés d'espèces** qui y sont adaptées.

✓ *Ex: Afrique saharienne : températures élevées (faibles latitudes) + très peu de précipitations (zone de haute pression atmosphérique) ⇒ air très chaud et sec stationne en permanence au-dessus du Sahara. De plus, vaste étendue continentale éloignée de l'océan et sans aucun cours d'eau.*

⇒ *Afrique saharienne: biomes adaptés à l'aridité : désert aride ou semi-aride, steppe aride etc.*



Par Sten Porse — Image:Vegetation.png, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3344457>

La répartition des grands biomes

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation méridienne de retournement caractérise l'océan profond

- Constat: tritium ^3H émis lors des essais nucléaires (1950-1960) → peu de mélange sur courtes échelles de temps entre eaux profondes et eaux de surface
- Moteurs de la circulation : variations de densité de l'eau de mer liées
 - Température
 - Salinité
 - Aux marées
 - Régimes de vents
- Vitesse lente (qqs dizaines de mètres par heure)
- Dans régions polaires Nord (Groenland, Norvège) et Sud:
 - en hiver $\searrow$ $T^\circ\text{C}$ des eaux de surface
 - En hiver; formation de banquise → extraction de l'eau douce $\Rightarrow$ $\nearrow$ salinité
 - $\Rightarrow$ $\nearrow$ densité de l'eau de mer, qui plonge vers le fond disparition de la thermocline saisonnière

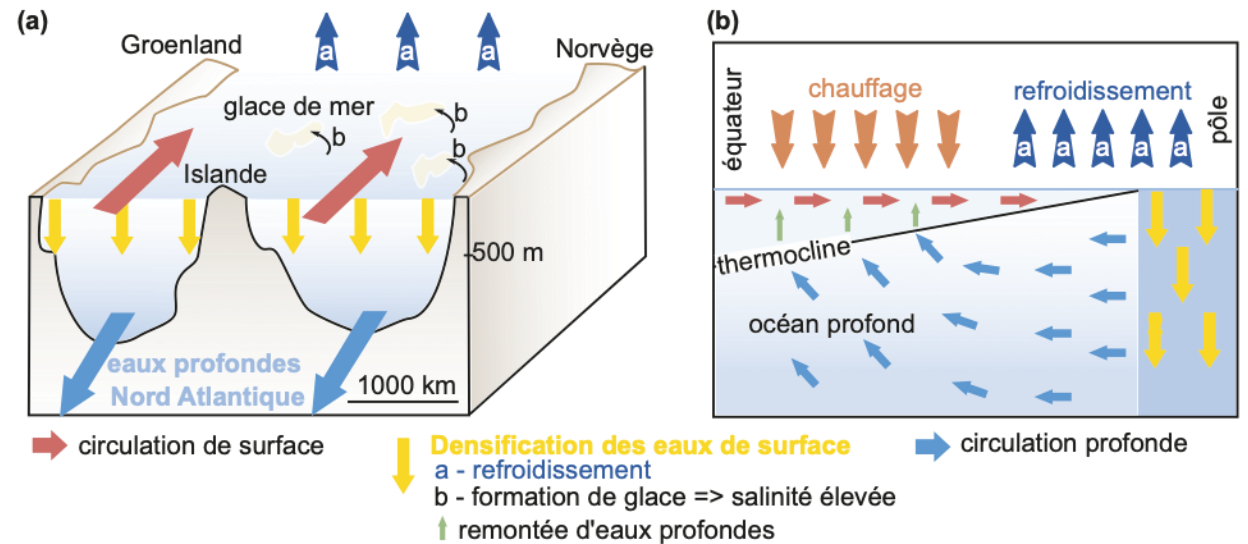


Figure 30.9 Processus induisant la convection profonde (a) et schéma général montrant le principe de la circulation convective due aux gradients de densité (b).

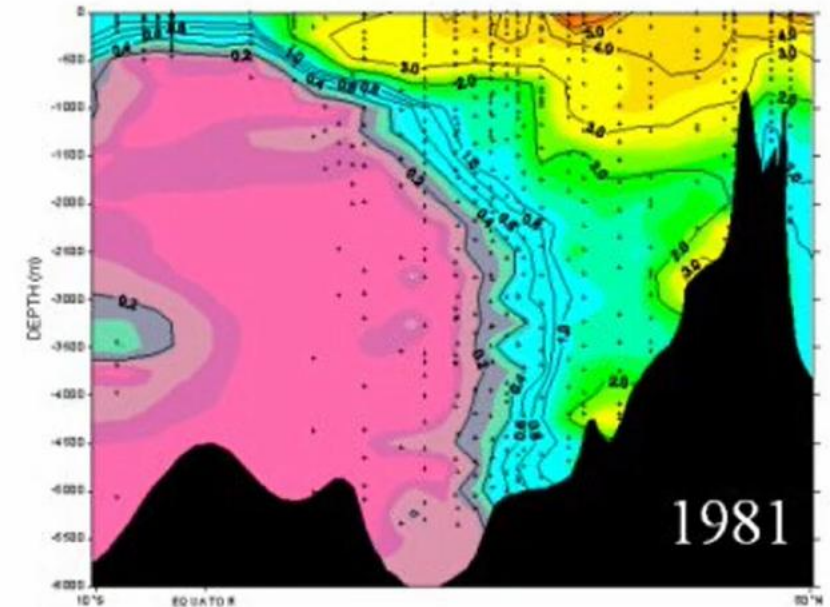
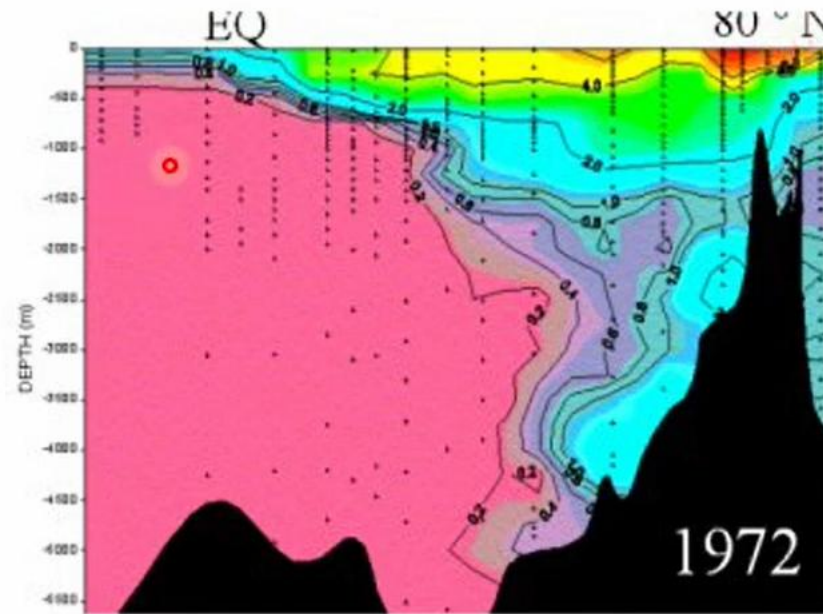
La circulation profonde a pour moteur la densité de l'eau de mer (Dunod p.878, ed 2021)

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation méridienne de retournement caractérise l'océan profond

- Essais nucléaires de Mururoa: tritium libéré dans air

- **Absence de diffusion du Tritium**
- 1972: Concentration du tritium en surface (Gulf stream) dans les eaux de surface
- 1981: Enfoncement des eaux de surface entre 1972 et 1981
- Volumes d'eau importants
- Mouvements lents: 2000 ans pour que la boucle se réalise

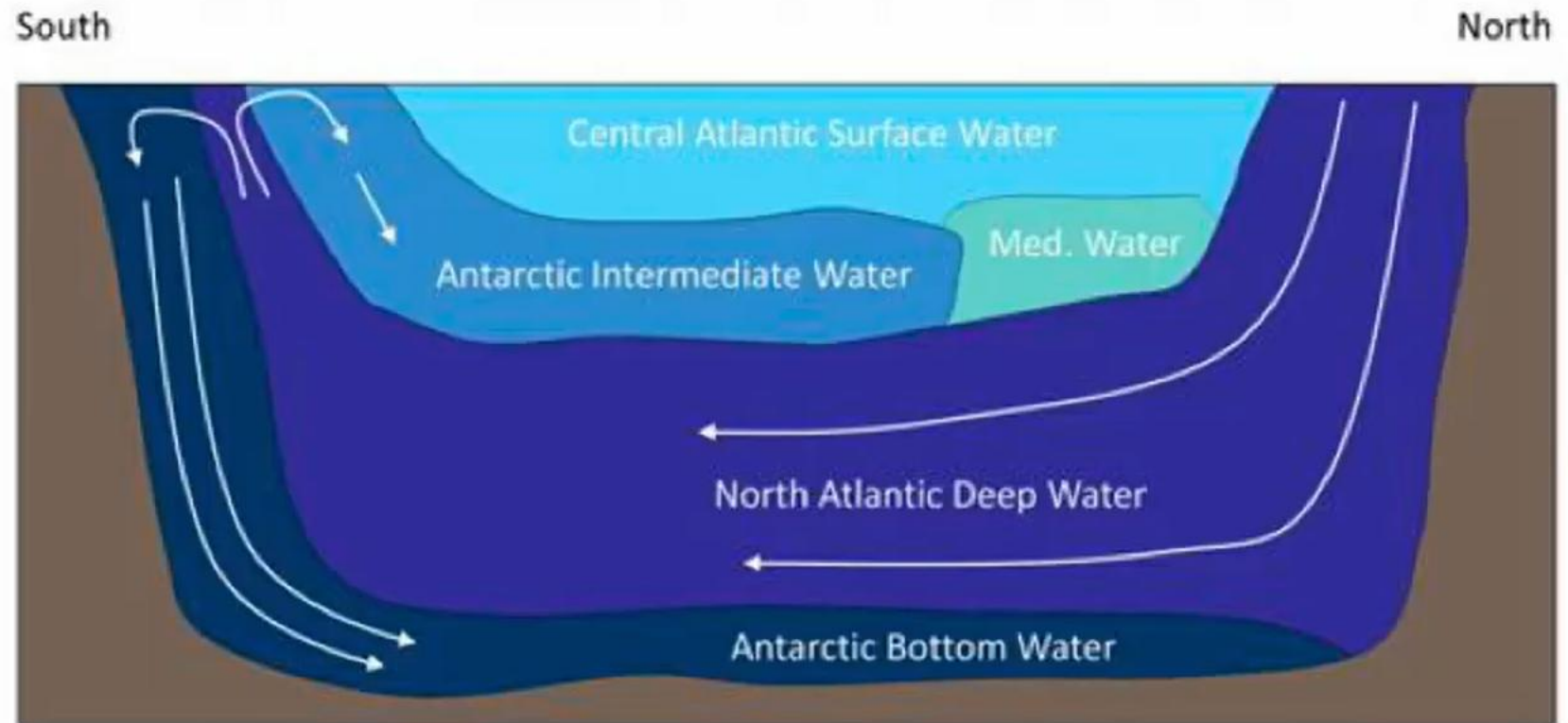


Evolution de la concentration en tritium dans l'Atlantique Nord entre 1972 et 1981

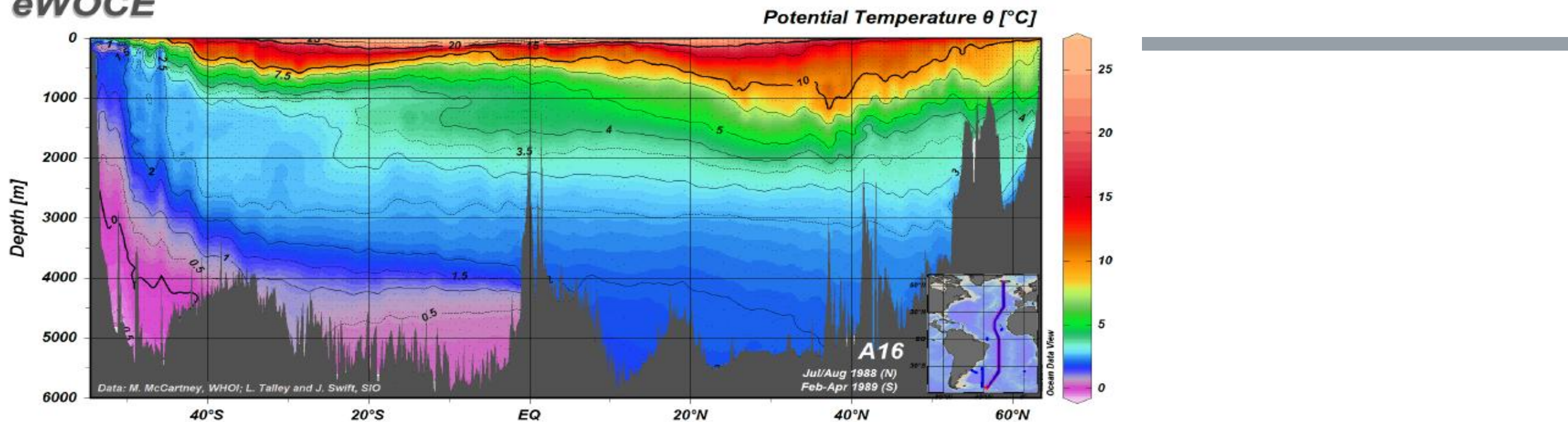
C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation méridienne de retournement caractérise l'océan profond

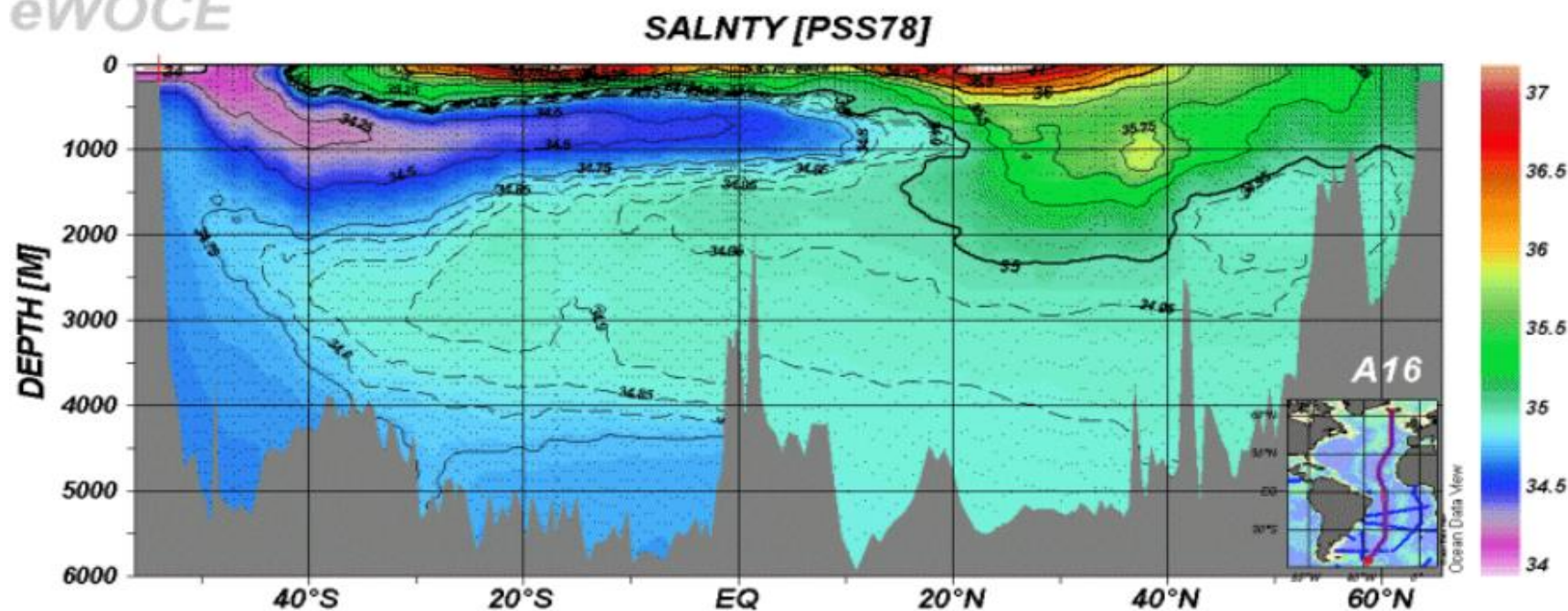
- Courant profond au départ de l'Atlantique Nord: Mer de Norvège et mer du Labrador = zone de retournement
- Courant profond de l'Atlantique Sud: Mer de Wedell = zone de retournement



Circulation profonde dans l'Atlantique Nord



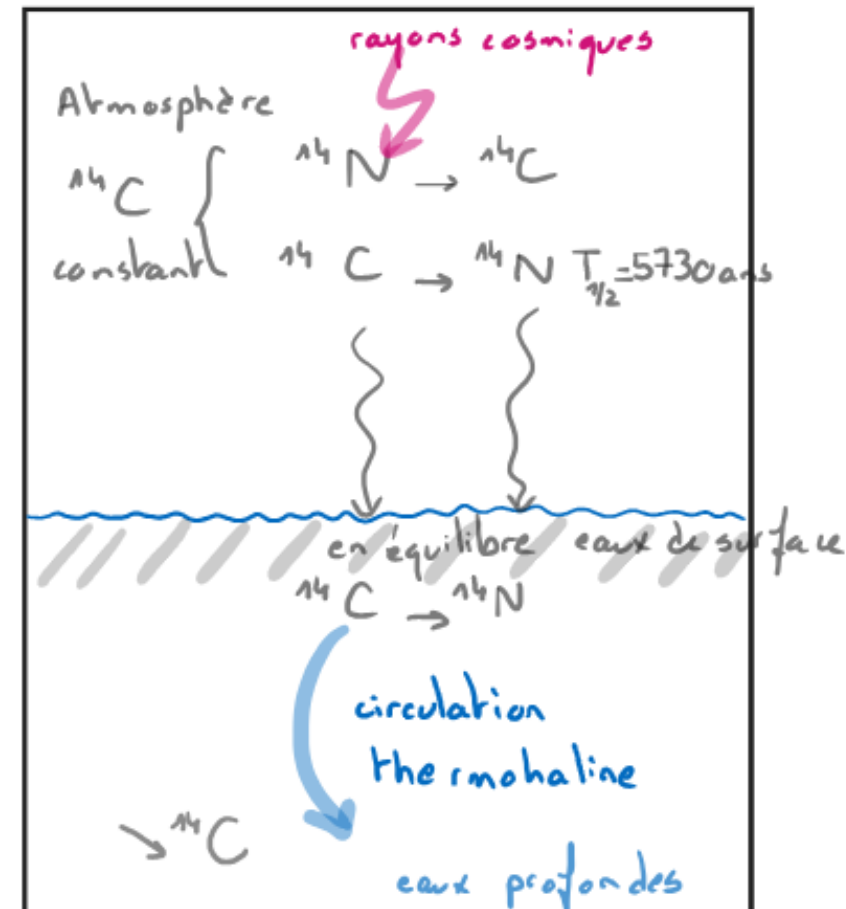
température et salinité dans l'océan Atlantique
en fonction de la profondeur et de la latitude



C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation méridienne de retournement caractérise l'océan profond

- Datation des eaux profondes:
 - **Dans atmosphère: compensation** entre production et désintégration de ^{14}C
 - Eaux de surface **en équilibre** avec atmosphère : ^{14}C constant
 - **Eaux profondes: absence de compensation** par ^{14}N : diminution progressive de ^{14}C qui se désintègre en ^{14}N
 - Mesure du taux de ^{14}C dans eau profonde : temps de parcours depuis isolement de l'eau de surface

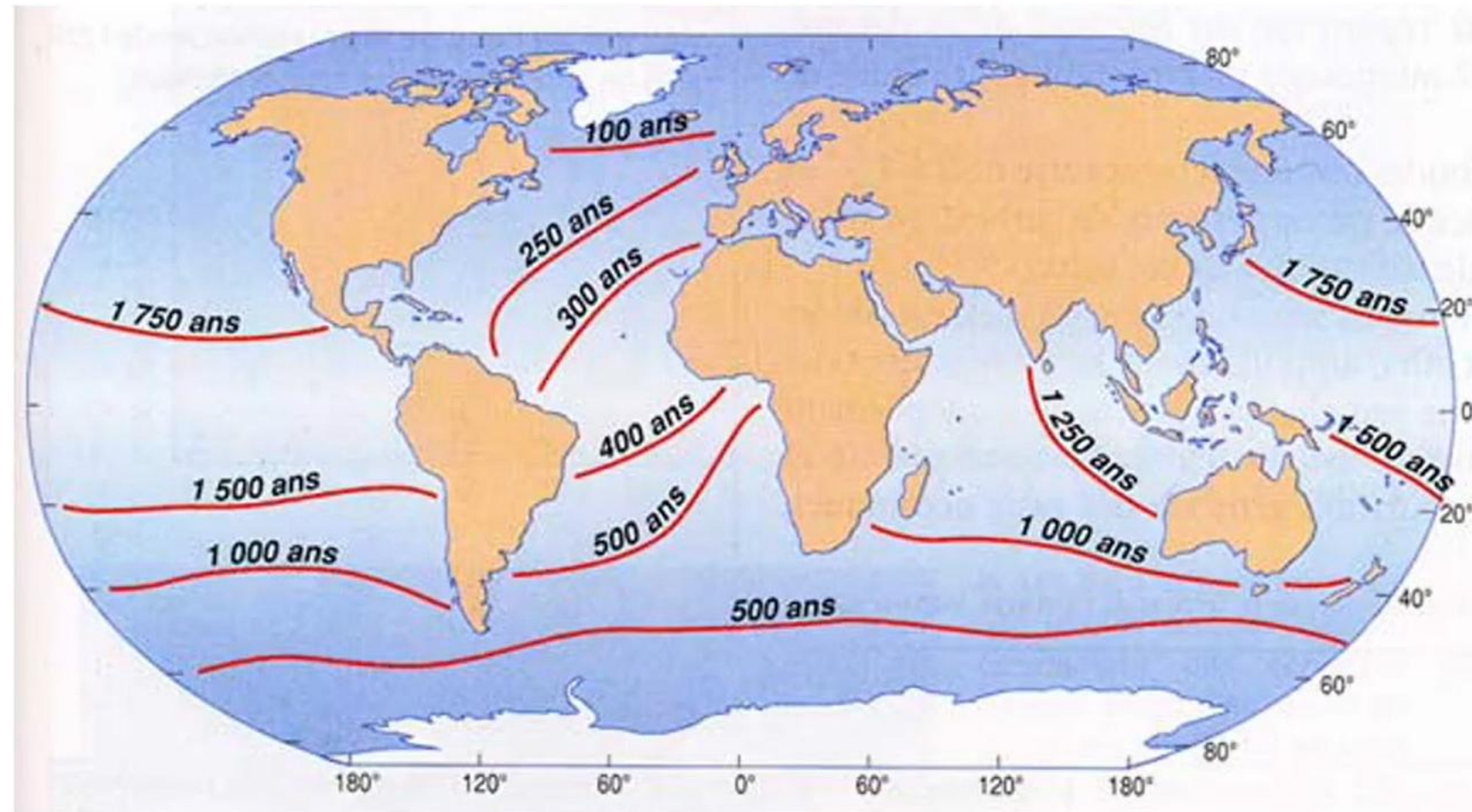


Datation des eaux profondes

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

3. La circulation méridienne de retournement caractérise l'océan profond

- Données ^{14}C : datation du temps de parcours de la circulation méridienne de retournement
- Eaux de surface: 100 ans pour enfouissement au plancher océanique = zone de retournement (mer de Norvège, mer du Labrador)
- 2000 ans : retour au point initial de retournement



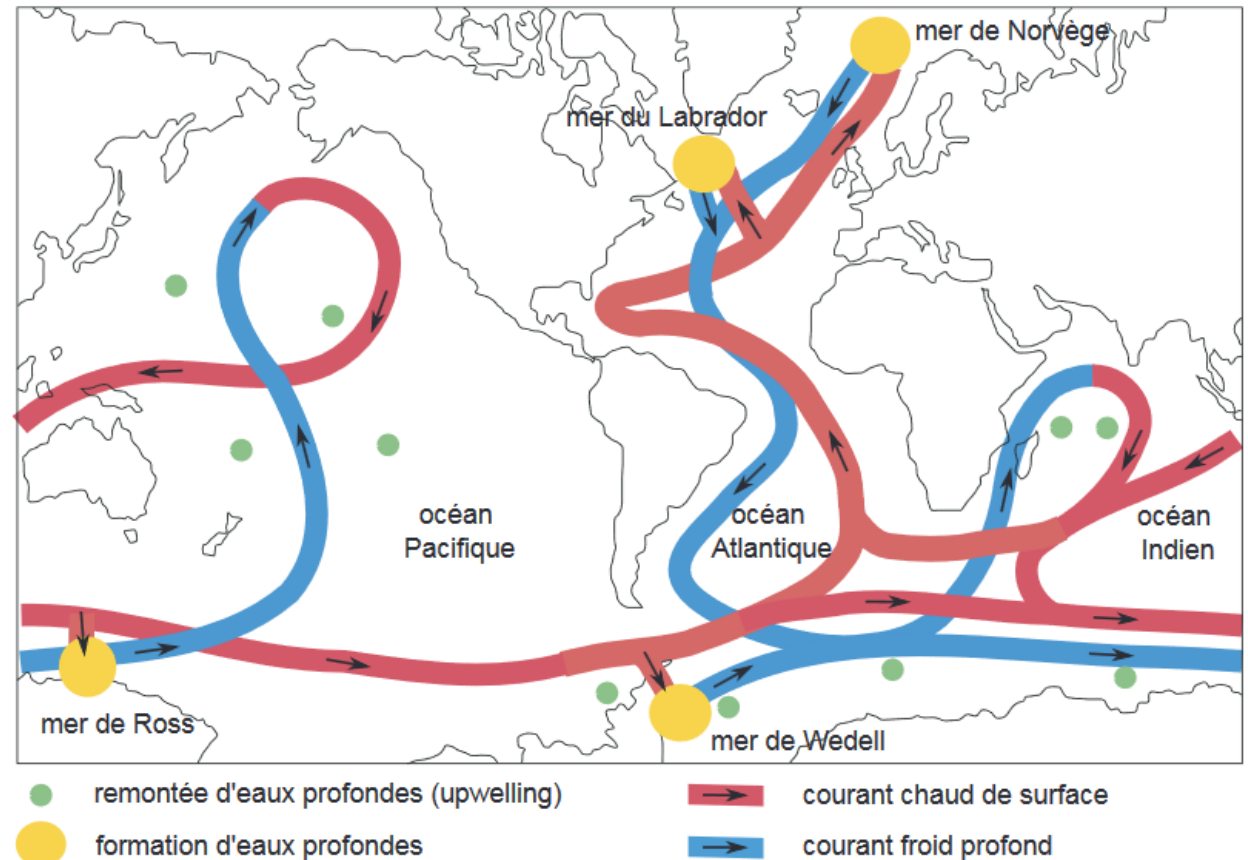
Datation des eaux profondes

III. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET OCEANIQUES SONT COUPLEES

C. LA CIRCULATION OCEANIQUE EST COUPLEE À LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

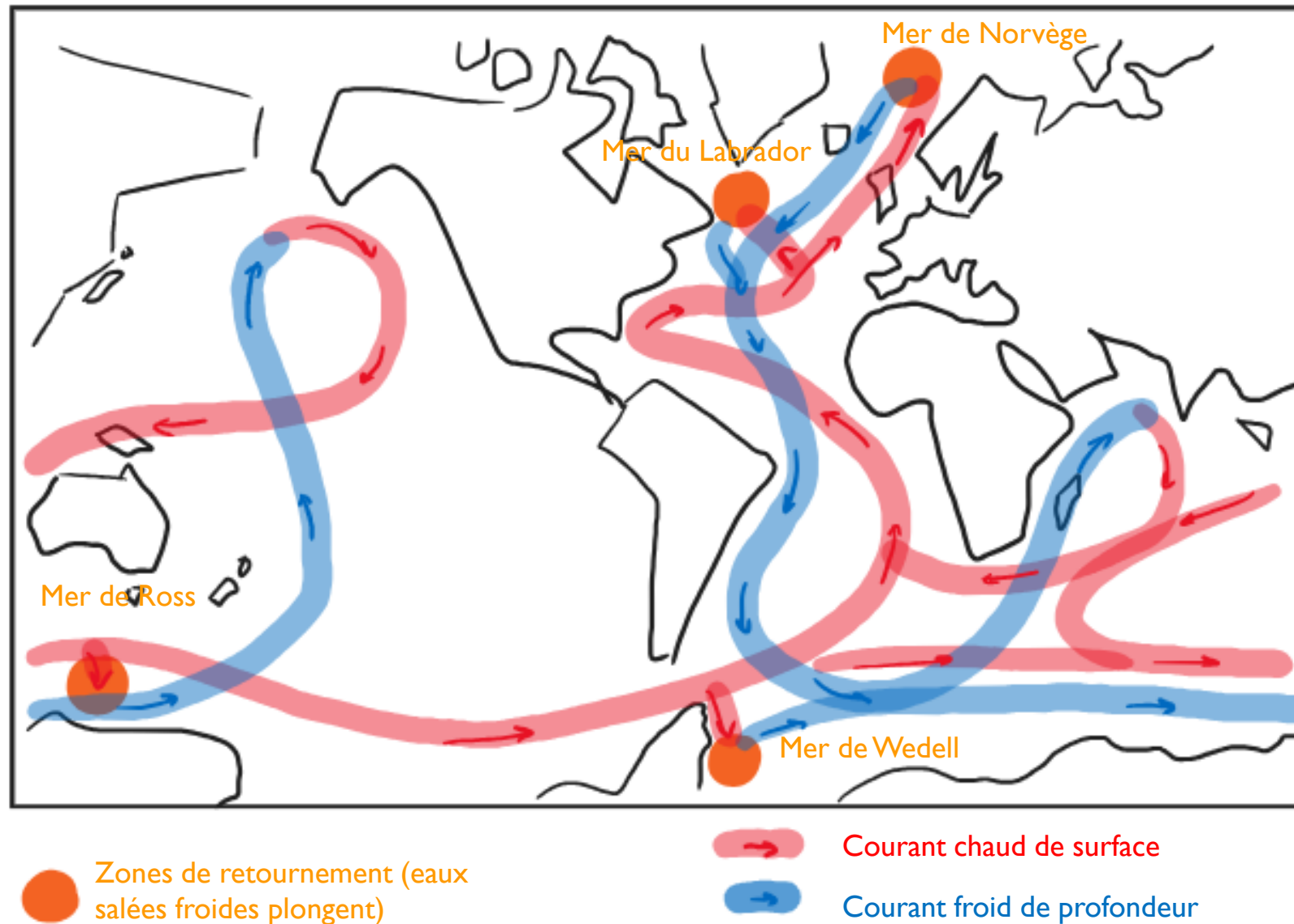
3. La circulation méridienne de retournement caractérise l'océan profond

- Utilisation du ^{14}C : traceur
- Vitesse moyenne: qqs **10 m/h** (100 fois plus lent que eaux de surface)
 - ✓ Temps de parcours d'une parcelle de fluide: **1000 à 2000 ans**
- Formation des eaux profondes: très localisée
 - ✓ Mer du Labrador, mer de Norvège, mer de Ross et mer de Wedell
- Remontée de ces eaux profondes et froides
 - au niveau des upwellings
 - Mélange vertical (océans Indien et Pacifique)
 - ⇒ **Redistribution de la chaleur** au niveau du globe
 - ⇒ **Piégeage du CO_2 atmosphérique** d'origine anthropique (dans 1000 ans: relargage massif de CO_2 dans atmosphère ...!)

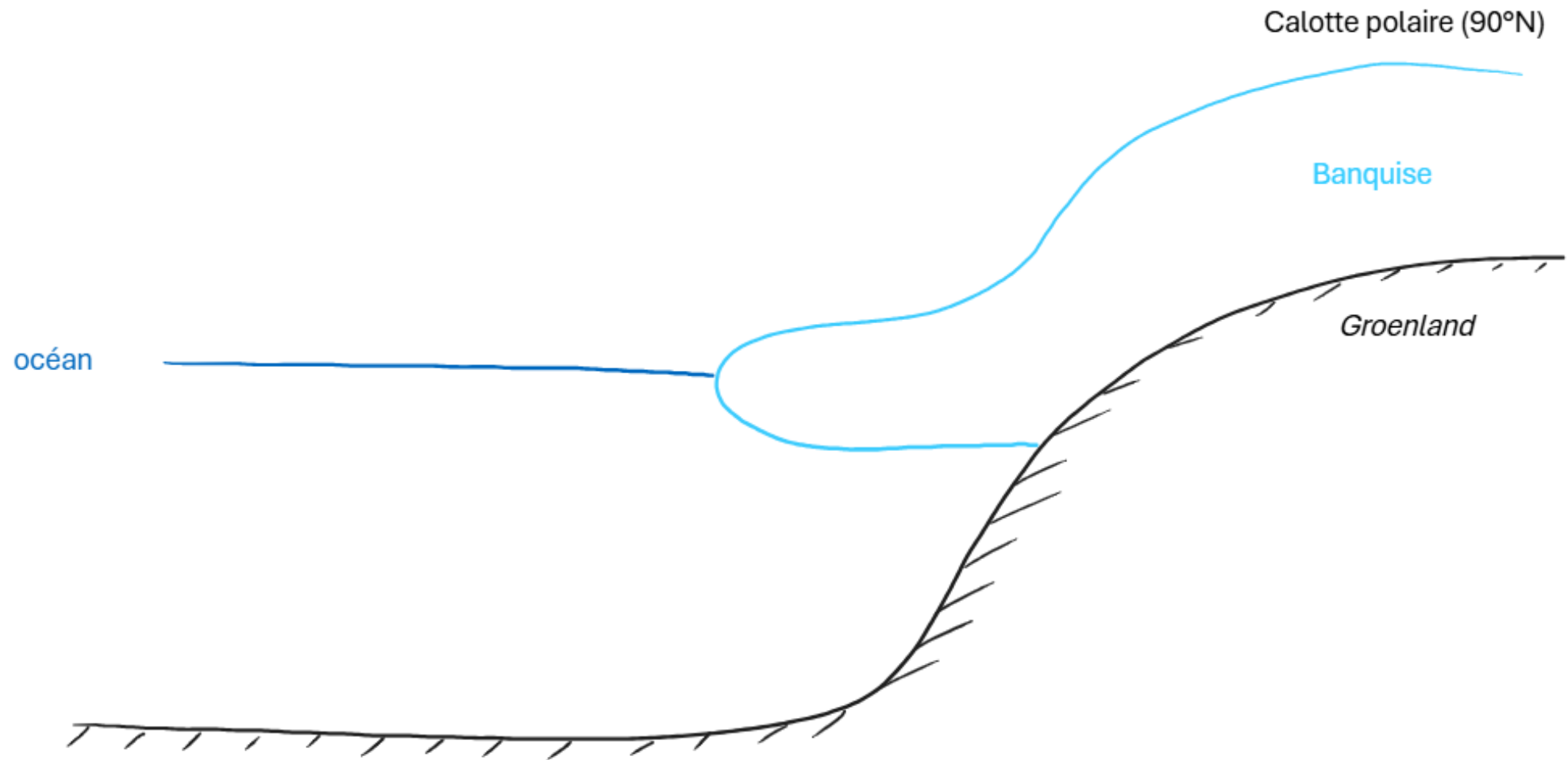


La circulation méridienne de retournement (Dunod p.879, ed 2021)



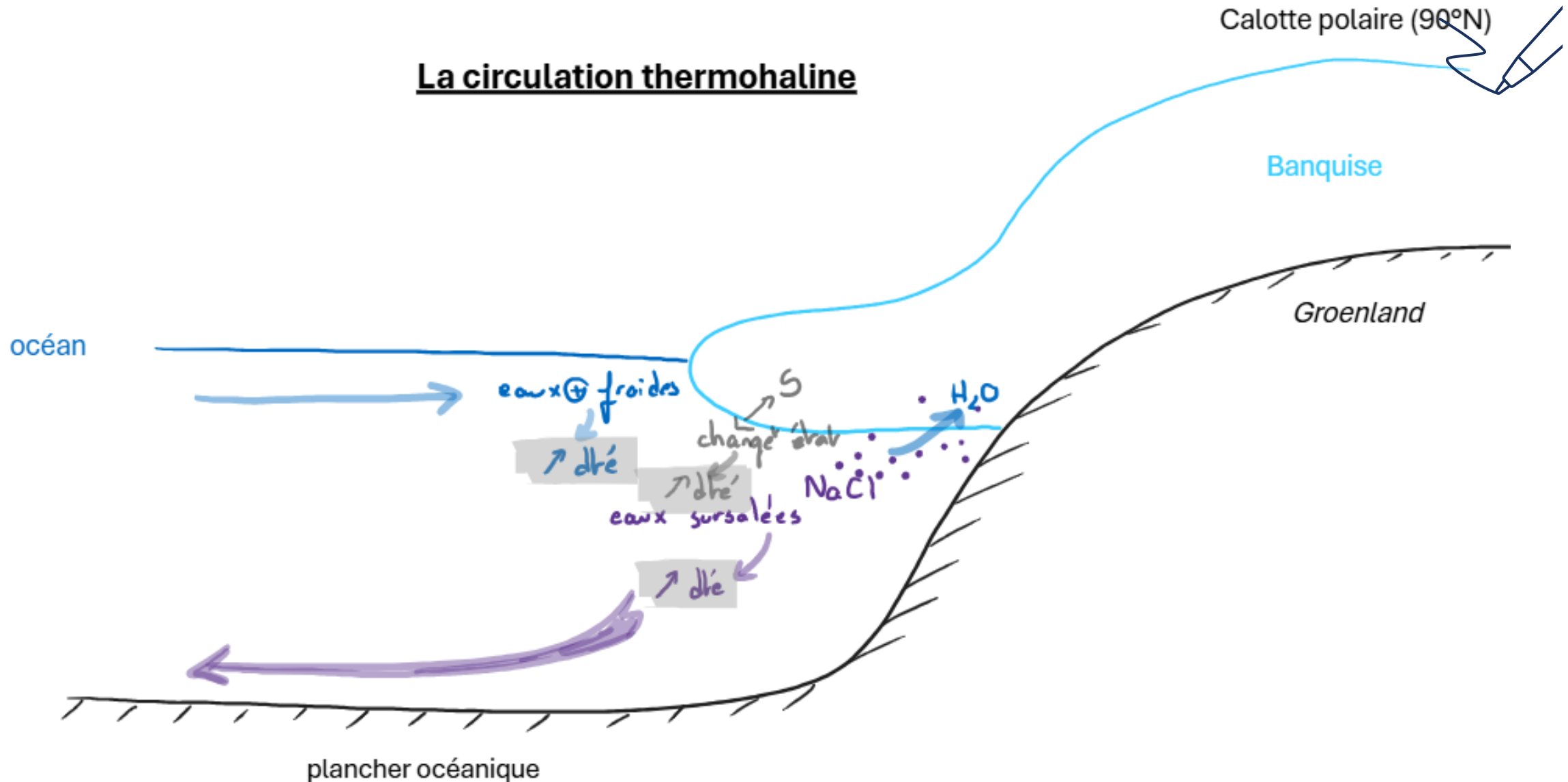


La circulation méridienne de retournement (S. Dalaine)

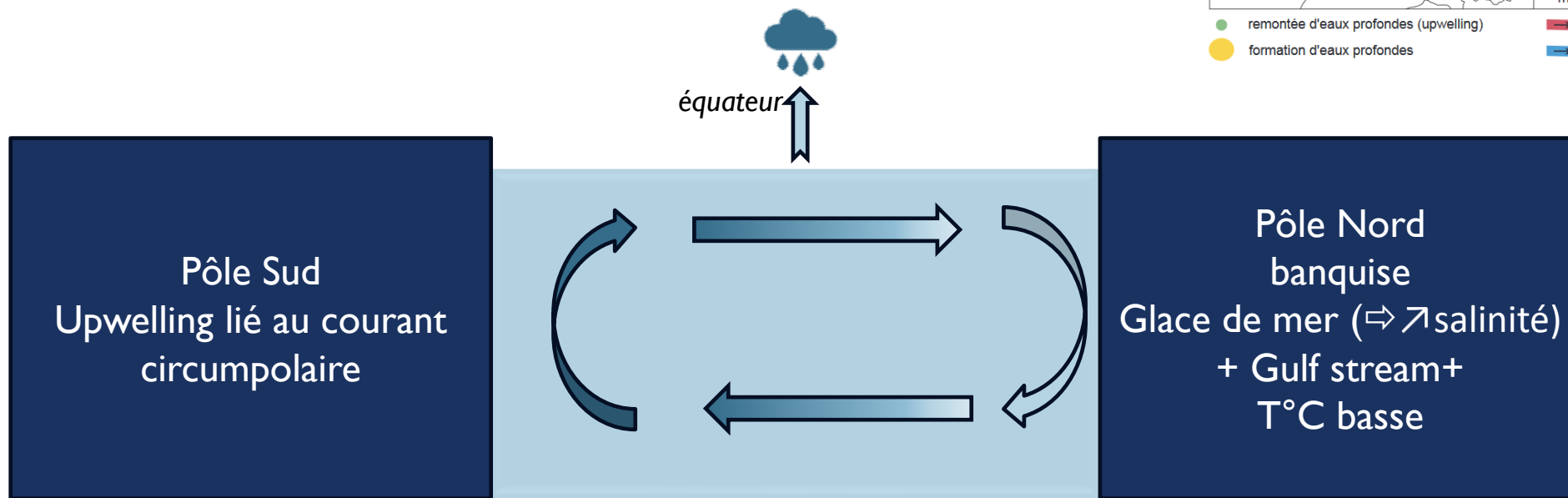


La circulation méridienne de retournement (S. Dalaine)

La circulation thermohaline



La circulation méridienne de retournement (S. Dalaine)



+ influence des marées et de la répartition des continents

Circulation de l'océan profond (qqs 10m.h^{-1} soit qqs km.an^{-1})

BILAN

1. Sphéricité de Terre $\Rightarrow$ déséquilibre du bilan radiatif latitudinal
2. Transferts thermiques de l'équateur vers les pôles via circulations troposphériques et océaniques
 - Échanges d'énergie: transferts thermiques, enthalpie de changement d'état, énergie mécanique
 - Forces : gradients de pression, force de Coriolis, forces de frottement
3. Circulation troposphérique selon 3 cellules de convection
4. Circulation océanique de surface étroitement couplée au régime des vents
 - Transport d'Ekman perpendiculaire à direction du vent $\Rightarrow$ remontée d'eaux profondes (upwelling) ou $\Rightarrow$ plongées depuis surface (downwelling) $\Rightarrow$ gyres
5. Circulation générale de l'océan = circulation méridienne de retournement surtout due aux variations de densité ($T^{\circ}\text{C}$, salinité) + marées et vents
6. Échanges d'énergie entre océan et atmosphère $\Rightarrow$ rôle majeur dans la régulation du climat

L'OCÉAN : UN Puits DE CARBONE

- Dissolution du CO_2 dans l'eau de mer :



- Formation d'une coquille :



⇒ **Piégeage net de 1 molécule de CO_2 lors de la précipitation des carbonates!**



SUJETS D'ORAUX

- La vie dans l'océan (2023)
- Importance du couple océan – atmosphère dans les climats passés, présent et futur (2023)
- Importance du couple océan-atmosphère
- Les dynamiques de l'atmosphère et de l'océan (2025)
- Dynamique des enveloppes fluides : mécanismes et conséquences sur le vivant (2025)

