CO1-TD n°6:
Le cycle de l'eau et les précipitations

Définitions 1

Les étapes du cycle de l'eau 2

Les formations nuageuses 3

Bilan de l'eau à l'échelle globale et locale 4

Conclusion 5

Exercices 6

Les états de l'eau…

- l'eau (H_2O: deux atomes d'hydrogène et 1 atome d'oxygène) coexiste sous les trois états de la matière: le solide/liquide/gazeux

- l'eau recouvre 70% de la surface de la terre (épaisseur: 1/1700 du rayon terrestre) et a une masse 300 fois > à celle de l'atmosphère

- changements de phase de l'eau (ou d'état) à température constante absorbe consomme) ou libère de la chaleur = chaleur latente

- le fait d'absorber ou de libérer de la chaleur en changeant d'état est lié à l'organisation de la matière

Changement d'état	Nom du changement d'état	Conséquence énergétique
Gaz ⇒ Liquide	Condensation (Liquéfaction)	Libère de la chaleur
Liquide ⇒ Solide	Solidifcation (Cristallisation)	"
Gaz ⇒ Solide	Solidification	"
Liquide ⇒ Gaz	Évaporation	Absorbe de la chaleur
Solide ⇒ Liquide	Fusion	"
Solide ⇒ Gaz	Sublimation	"

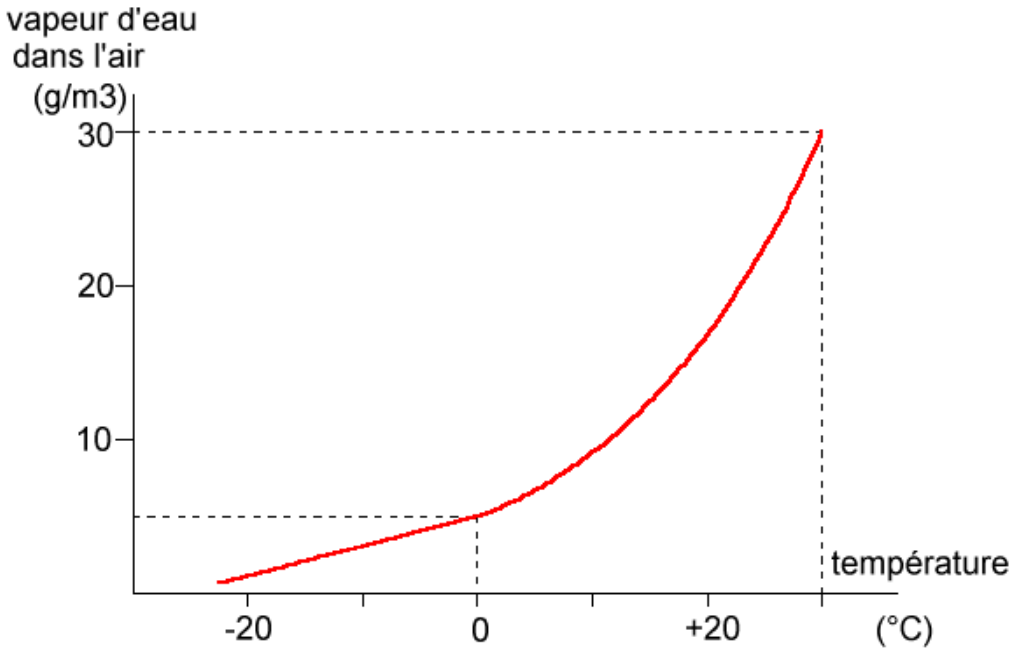
Etat solide: aussi appelé état « cristallin », les molécules ont des positions fixes et leur mouvement se réduit à une vibration sur place. Un solide est indéformable

Etat liquide: les liens entre les molécules sont plus lâches de telle sorte qu'elles peuvent pivoter les une par rapport aux autres; un liquide peut occuper un espace donné

Etat gazeux: les molécules peuvent « voguer » librement dans un espace donné

= ces états correspondent à un niveau d'activité d'agitation interne (énergie cinétique interne), pour passer d'un solide à un liquide, il faut apporter de l'énergie alors que la transformation inverse libère de l'énergie

Vapeur d'eau saturante: masse (en grammes) de vapeur d'eau maximale que peut contenir un volume d'air (en mètre cube). Cette quantité augmente de façon non-linéaire en fonction de la température



- cette non-linéarité exprime le fait qu'une variation d'une des deux variables (la température) n'entraîne pas une variation proportionnelle de l'autre (la pression de vapeur saturante)

Température (en °C)	Pression de vapeur saturante (en g/m³)
-30	0.5
-20	0.7
-10	2.4
0	4.9
+10	9.4
+20	17.3
+30	30.4
+40	51.1

- humidité absolue: quantité de vapeur d'eau pour un volume d'air unitaire (g/m3)
- humidité relative (HR): humidité absolue / pression de vapeur saturante
- HR d'une masse d'air contenant 2 g/m3 de vapeur d'eau à -10°C et à 30°C:

HR à -10°C = 2/2.4=0.83 (83%)
HR à 30°C = 2/30.4= 0.07 (7%)

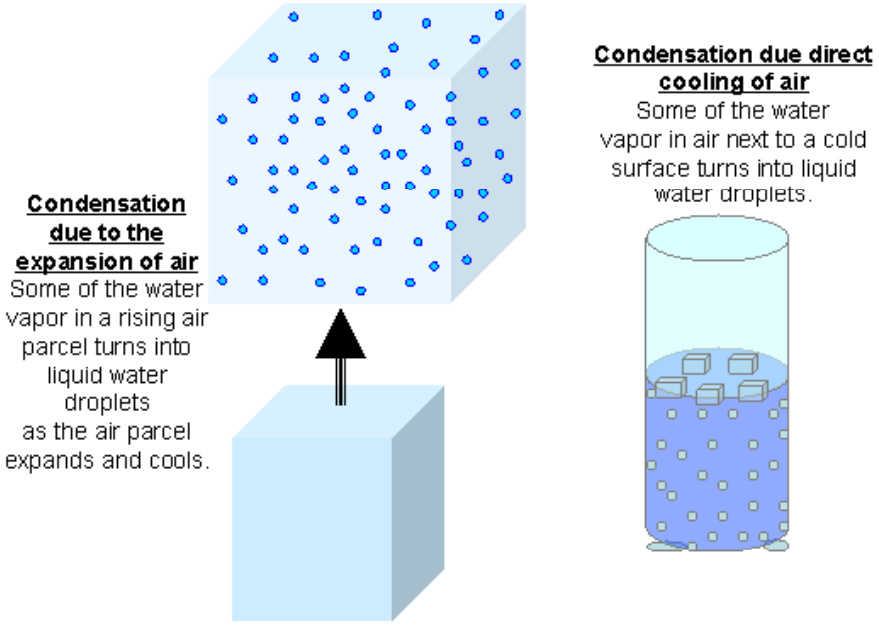
- **sublimation/évaporation/évapotranspiration**; les facteurs favorisant la production de vapeur d'eau sont (i) une surface humide (condition sine qua non), (ii) un apport de chaleur importante, (iii) un fort déficit en vapeur d'eau de l'air, (iv) un vent fort

- **précipitation solides ou liquides:** retour de l'eau vers la surface

- **ruissellement :** étape de retour de l'eau des continents vers les océans

Les processus…

- **condensation/ solidification** de la vapeur d'eau; ces processus conduisent à la formation des constitués de gouttelettes d'eau et de cristaux de glace en suspension dans l'air; la formation des nuages correspond à une libération de chaleur latente = transfert de chaleur de la surface vers l'atmosphère



L'atmosphère est composée d'impuretés (fragments de végétaux, sels, poussière…) certains de ces noyaux servent de support à la condensation / solidification de la vapeur d'eau: ils sont appelés les noyaux de condensation et provoquent la condensation parfois avant que l'HR atteigne 100% = formation de microgouttelettes avec un diamètre entre 1 et 100 µm

La formation des nuages…

- formation des nuages se réalise selon deux processus:

  - **ajout de vapeur d'eau au-delà de la pression de vapeur saturante à température constante**

  - **refroidissement d'une masse d'air jusqu'au point de rosée sans ajout de vapeur d'eau**

- le second processus est de loin le plus important; on peut refroidir une masse d'air de 2 façons:

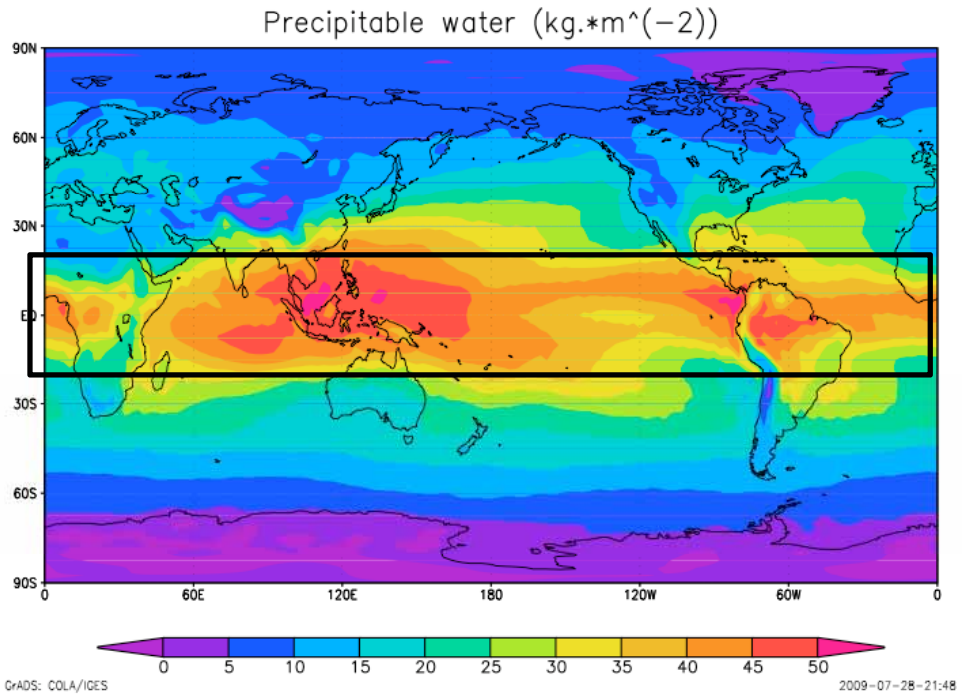
  - **refroidissement lié au passage ou à la stagnation de l'air au-dessus d'une surface froide** (formation de rosée, givre ou brouillard)

  - **refroidissement lié à un mouvement d'ascendance de l'air** (l'air se détend en montant et se refroidit), ce processus est efficace au sein du système climatique et peut avoir plusieurs origines: différences de densité au sein de l'air, convergence du vent en surface, obstacle orographique…)
    = naissance des nuages qui engendrent les précipitations les plus significatives

La quantité d'eau dans l'atmosphère en moyenne annuelle…

- géographie zonale : abondance de l'eau dans la ZIT et atmosphère quasi-sèche an Antarctique ou sur le Groenland + continents tropicaux

- ZIT = disponibilité en eau + RS absorbé élevé = forte évaporation (les nuages les plus épais (cumulonimbus) se forment dans les tropiques)



Les nuages…

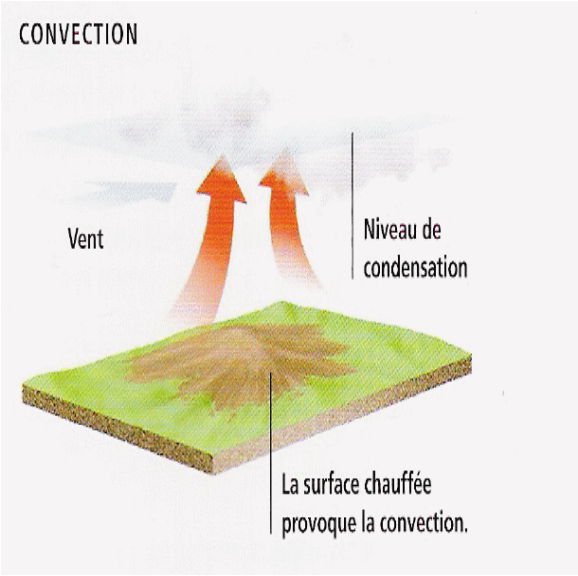
- il existe, de façon générale, 2 méthodes de classification des nuages:

  - une classification en fonction de leur formes (deux grandes catégories par Luke Howard en 1802): les nuages stratiformes et cirriformes (nuages en nappes qui se développent près de la surface terrestre et en haute atmosphère) ou les nuages cumuléiformes à fort développement vertical (colonnes ascendantes des systèmes convectifs)

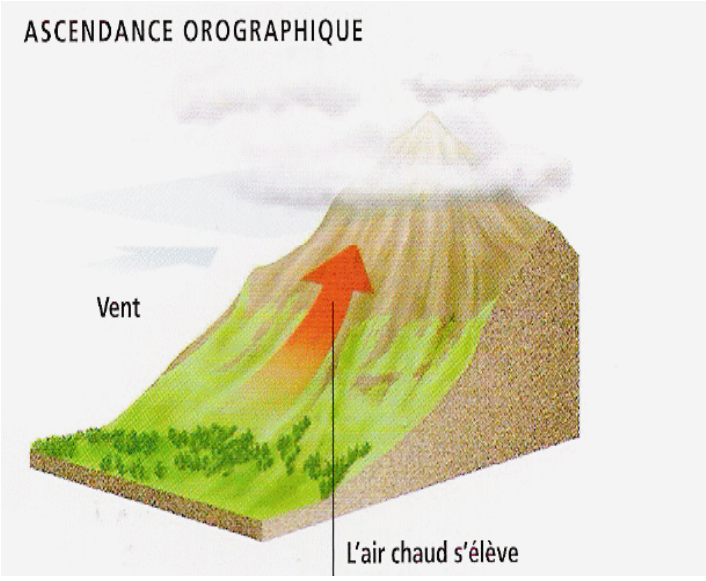
  - soit en fonction du mécanisme de formation du nuage :
    - les nuages convectifs
    - les nuages orographiques
    - les nuages de front

Les mécanismes de formation…

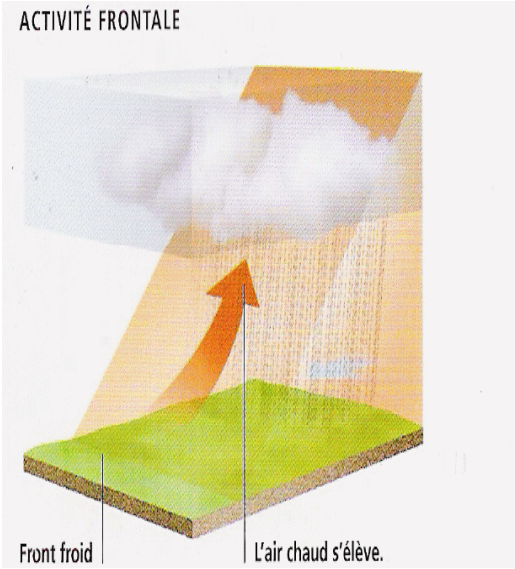
Les nuages convectifs



Les nuages orographiques



Les nuages de front

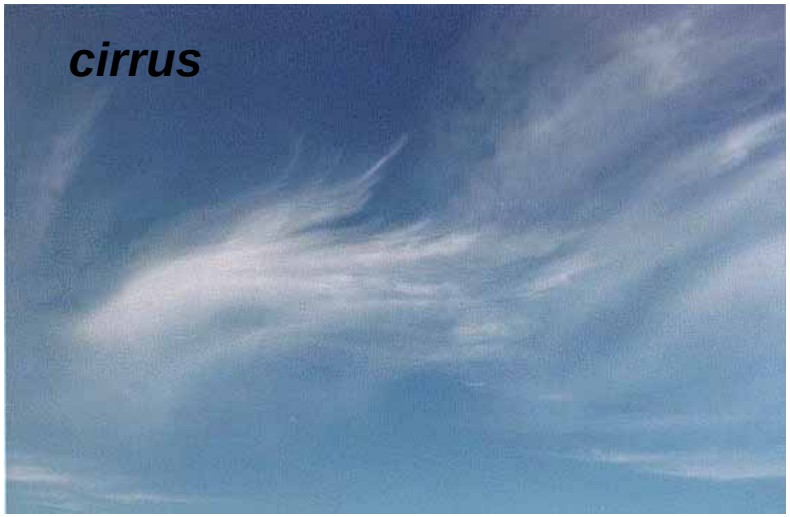


Les nuages stratiformes…

- nuages se formant à proximité du sol (brouillard) ou en basse altitude (stratus). Ils correspondent à une atmosphère stable ou peu instable = précipitations de faible intensité

Les nuages cirriformes…

- nuages cirriformes ont des caractéristiques identiques avec les stratiformes, mais ils n'apparaissent qu'en très haute altitude dans de l'air très froid. Ils ne donnent pas lieu à des précipitations en surface (même si les cristaux de glace précipitent, ils s'évaporent avant d'atteindre le sol)



Les nuages cumuléiformes…

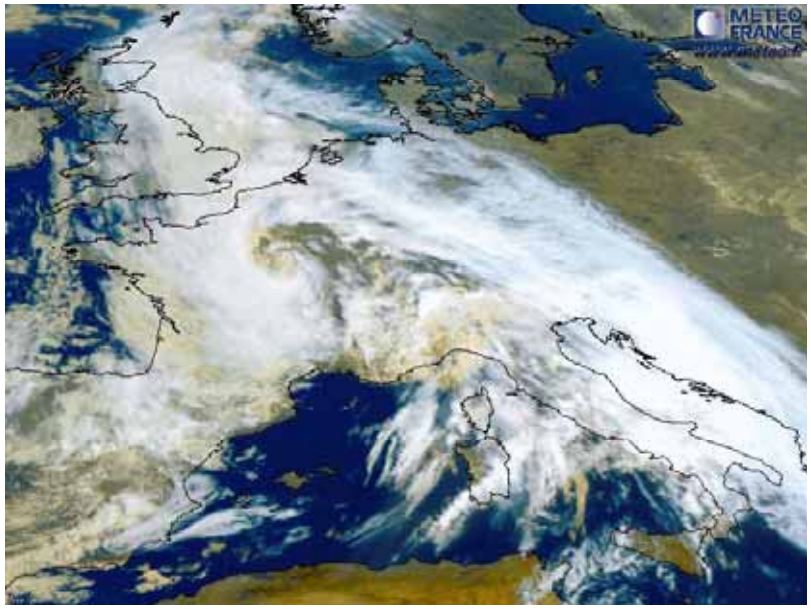
- nuages cumuléïformes s'opposent aux familles précédentes car leur extension est surtout verticale = ils se développent dans une atmosphère instable avec de puissants mouvements ascendants

Les types intermédiaires…

- nuages qui combinent à la fois un aspect cumuléïforme et un aspect stratiforme. Le nom du nuage est alors composé par un préfixe pour indiquer l'altitude approximative (cirro- vers 8-10 km, alto- vers 5-7 km et strato- en dessous de 4 km) et un suffixe pour indiquer leur nature plutôt stratiforme ou cumuléïforme

Les nuages vus par le haut…

Composition colorée à partir d'une image satellite dans le visible (6 mai 2002)



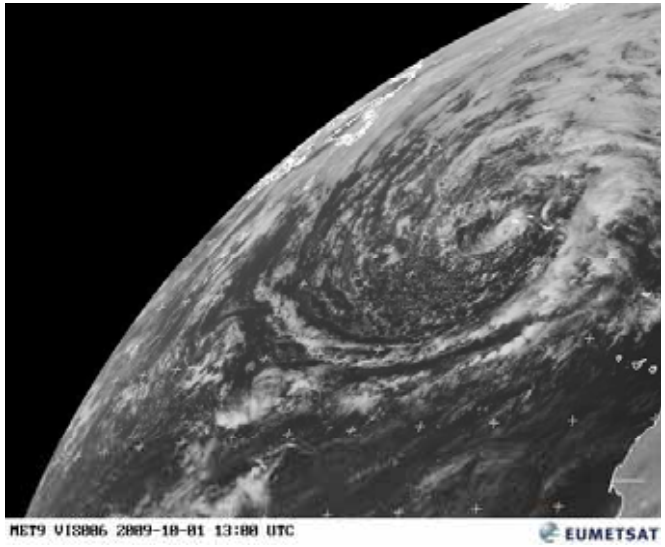
- enroulement typique d'une perturbation tempérée dont le centre est sur l'est du bassin parisien
- différents nuages peuvent cohabiter à différentes altitudes (mais on ne voit que la limite supérieure)

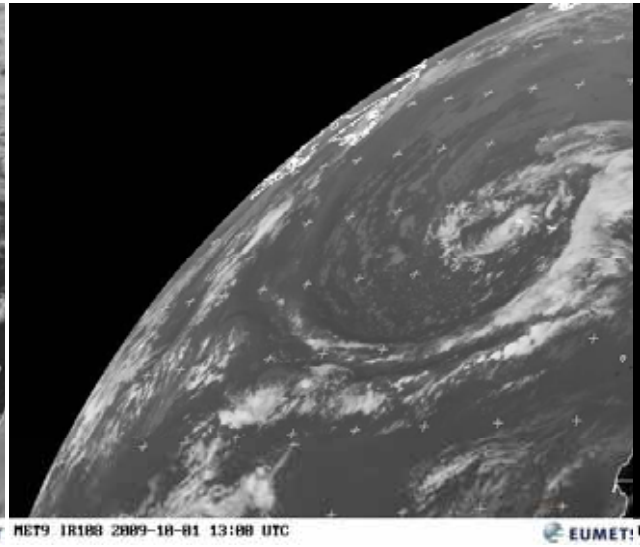
Les différentes bandes spectrales

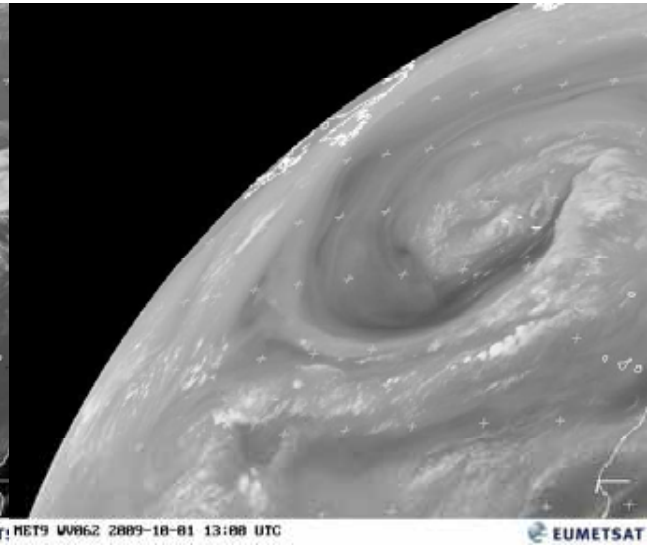
0.6 µm (visible) = réflectance du sommet nuageux (blanc = réfléchissant)

10.8 µm radiance thermique (blanc = froid et noir = chaud)

6.2 µm (absorption de l'IR par l'eau = teneur en eau de la moyenne et haute troposphère (blanc = riche en eau)



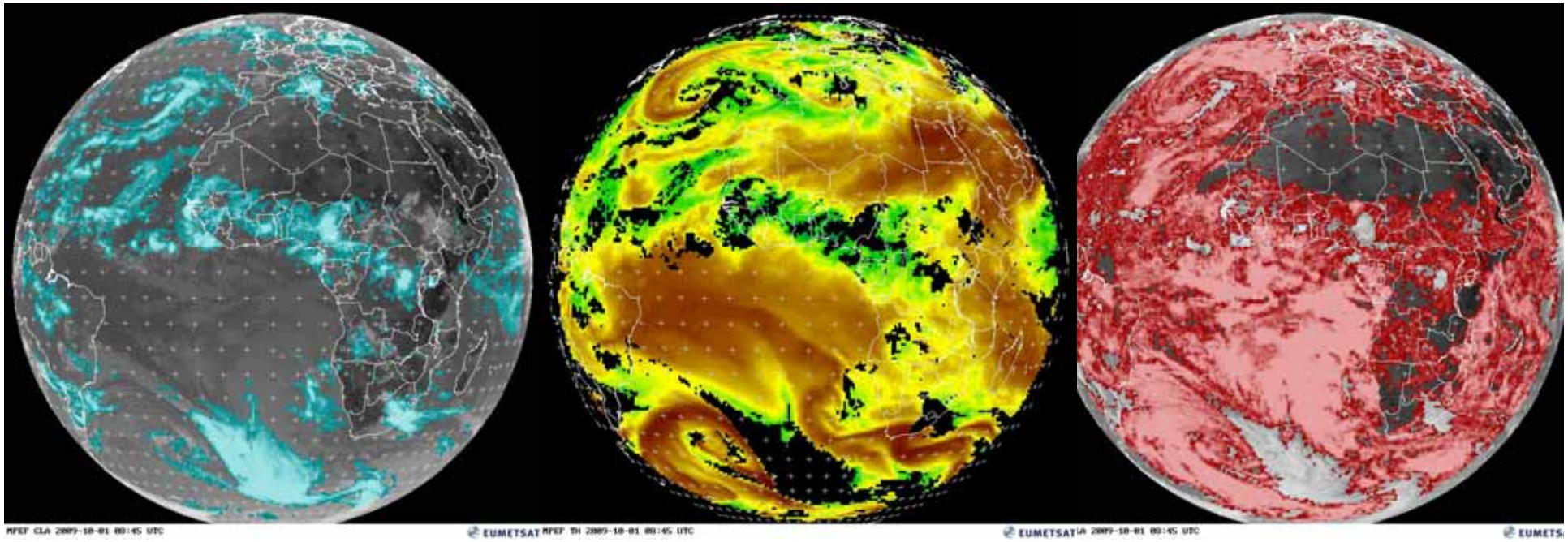




Pourcentage de couverture nuageuse dans les hautes couches de la troposphère

Pourcentage d'humidité troposphérique

Pourcentage de couverture nuageuse dans les basses couches de la troposphère



Les précipitations…

- les gouttelettes d'eau (et les cristaux d'eau) d'un nuage sont soumis à 3 forces:

  - **la gravité** qui les entraîne vers le bas

  - **l'ascendance de l'air** qui les entraînent vers le haut

  - **la friction** qui les freinent dans un sens ou dans l'autre

- les précipitations correspondent donc à un déséquilibre entre la force de gravité et la force d'ascendance de la masse d'air (force de g. > à force d'a.)

- le poids d'une gouttelette croît par deux processus:
  - **l'effet Bergeron:** condensation solide de la vapeur d'eau à la surface de cristaux de glace déjà formés

  - **la coalescence** (effet le plus efficace) : agglomération de plusieurs gouttelettes sur un cristal ou sur une autre gouttelette = collisions aboutissant à un grossissement des gouttelettes

À retenir pour le cycle de l'eau…

- processus du cycle de l'eau indiquent les différentes transformations de l'eau entre les 3 états de la matière: gaz, liquide et solide

- l'évaporation nécessite la présence d'une surface d'eau liquide et est favorisée par un fort apport de chaleur, un vent fort et un air sec

- la condensation (solidification) de l'eau dans l'atmosphère se produit surtout via le refroidissement de l'air et le mécanisme le plus efficace est l'ascendance de l'air

- la morphologie des nuages indique le niveau de stabilité de la colonne d'air

- gravité des gouttes d'eau doit être > à la force d'ascendance et à la force de friction afin de produire des précipitations

La répartition de l'eau sur terre…

- l'eau se répartit de la façon suivante:
    - 97% dans les océans
    - 2% dans les glaciers continentaux
    - environ 1% dans sols et les lacs
    - 0.001 % dans l'atmosphère

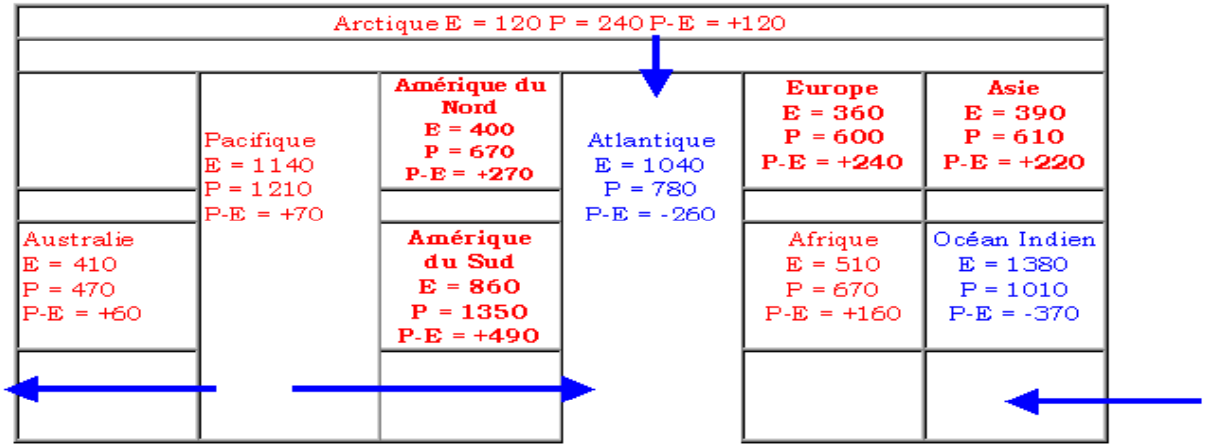
- la masse d'eau présente au sein du système climatique dans l'ensemble des réservoirs reste constante au fil du temps. On distingue deux type de réservoirs:

    - les « **accumulateurs »** (océan, glacier, lac, nappe d'eau) où l'eau réside longtemps

    - les **« conducteurs »** (rivière et atmosphère) où l'eau ne réside peu de temps

- la part de l'eau infime qui transite dans l'atmosphère est très importante pour le fonctionnement du système climatique car elle va engendrer les nuages et les précipitations

Le bilan P-E…



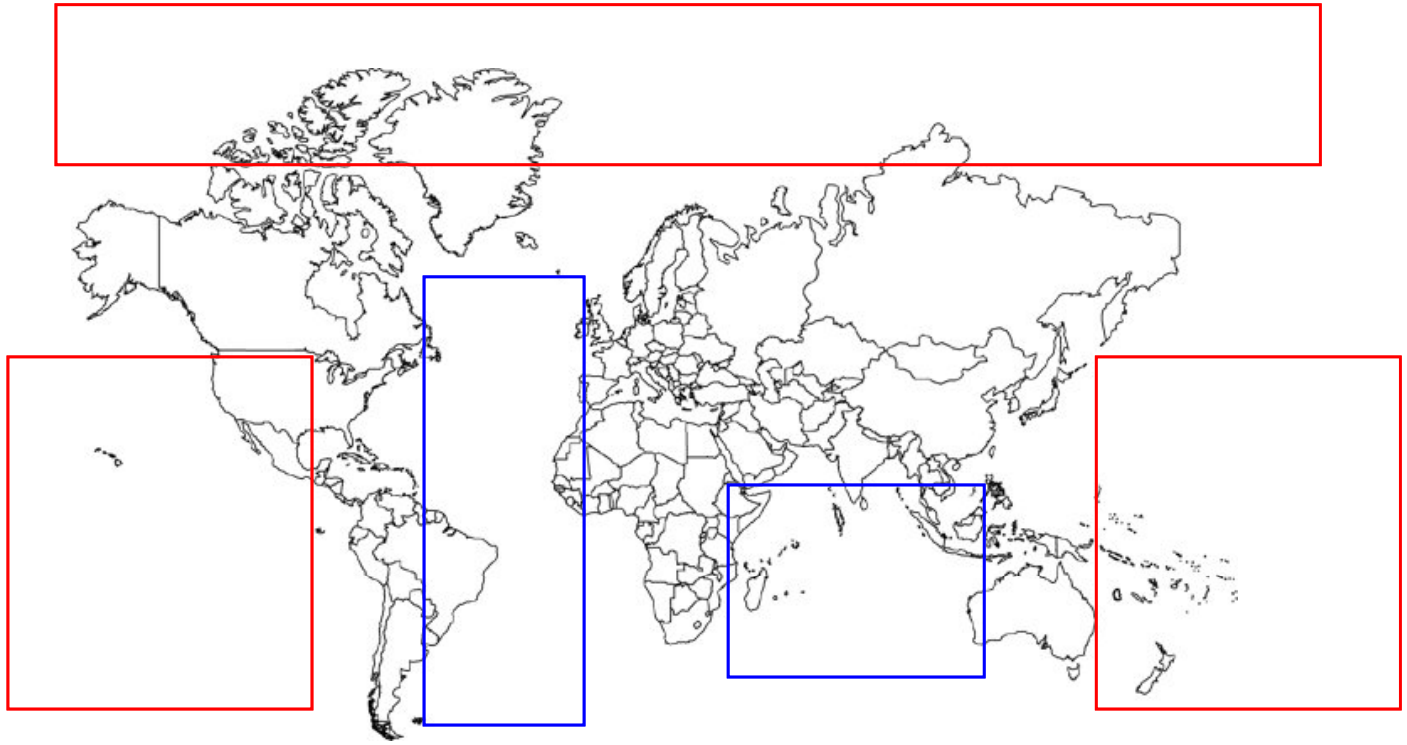
Bilan de l'eau (moyenne annuelle) pour les masses continentales et les océans (valeurs en mm). E= évaporation et P = précipitations. La moyenne globale est de 0. Les flèches identifient les flux au sein de l'océan

- ce bilan a une importance fondamentale car c'est une des raisons principales de la circulation océanique (circulation thermohaline)

- les continents ont un bilan positif (les précipitations excèdent l'évaporation)

- la différence entre P et E est le ruissellement des rivières à la mer

- le bilan P – E est positif pour l'Arctique et pour le Pacifique et négatif pour l'Atlantique et l'océan Indien, ce qui signifie:
  - que les eaux atlantiques et indiennes sont plus salées que le Pacifique
  - qu'il faut un flux compensatoire d'eau douce (ou peu salée) depuis le Pacifique et l'Arctique vers l'océan Indien et Atlantique



La salinité des eaux de surface (en moyenne annuelle…)

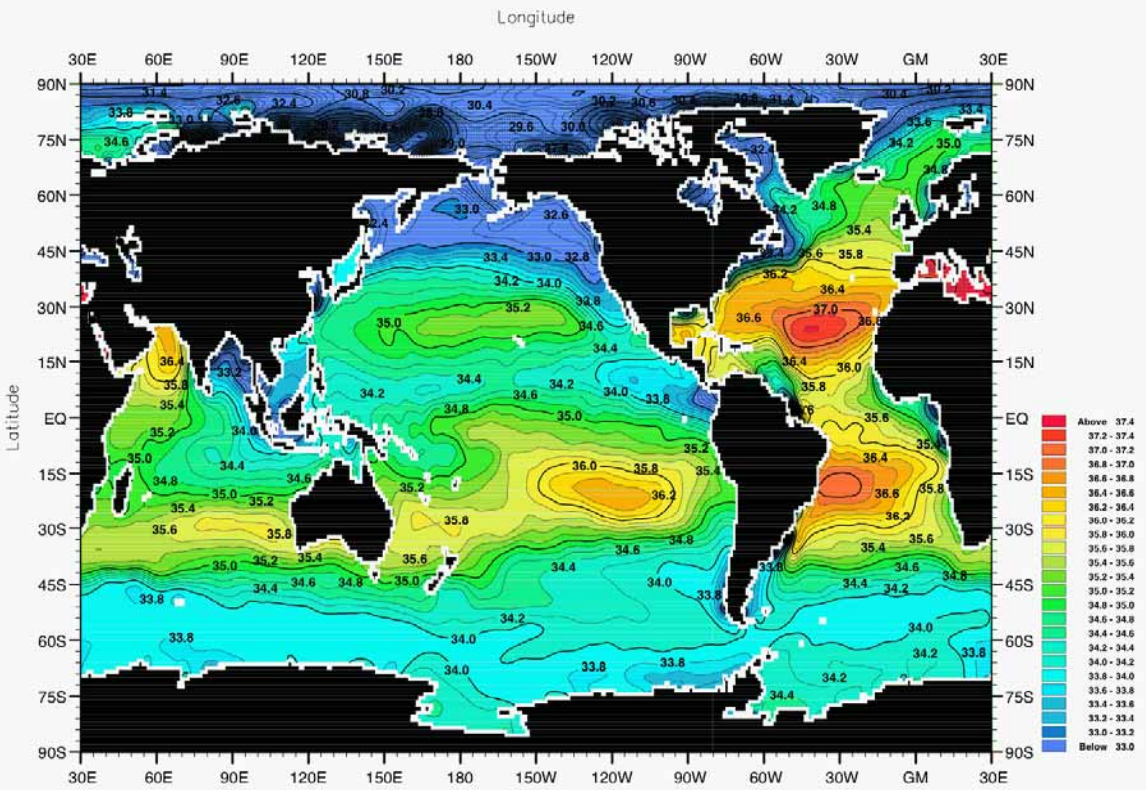


Fig. A2-1. Annual mean salinity (PSS) at the surface.

Minimum Value= 2.37 Maximum Value= 40.37 Contour Interval: 0.20

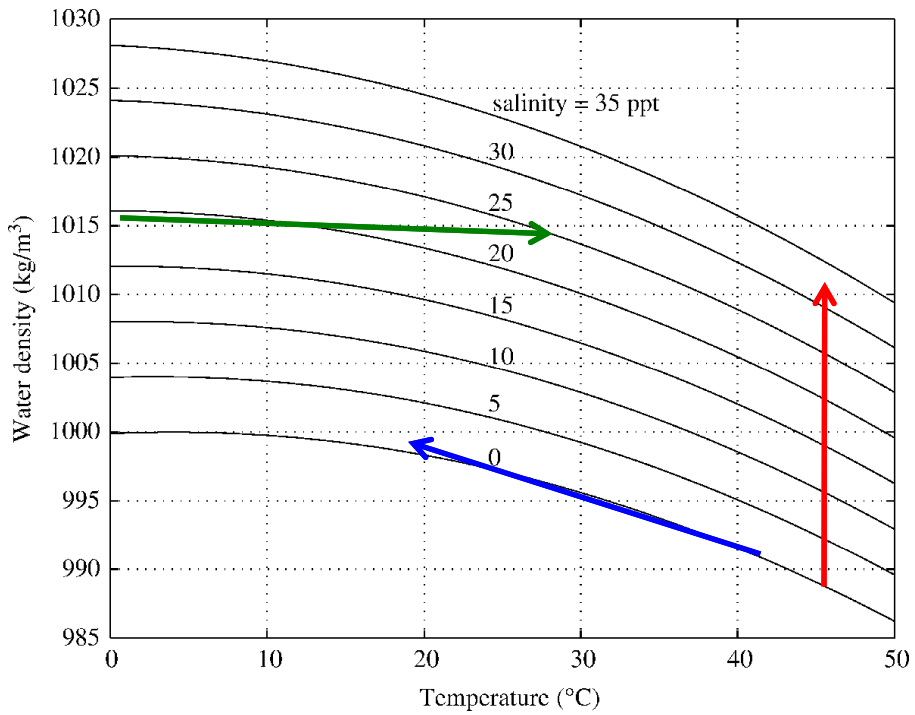
World Ocean Atlas 2001
Ocean Climate Laboratory/NODC

- une troisième conséquence est liée au fait que les eaux salées sont plus lourdes que les eaux douces
- la densité de l'eau est donc conditionnée par sa température (les eaux froides étant plus lourdes que les eaux chaudes) et par sa salinité

- à température constante : hausse de la salinité = augmentation de la densité

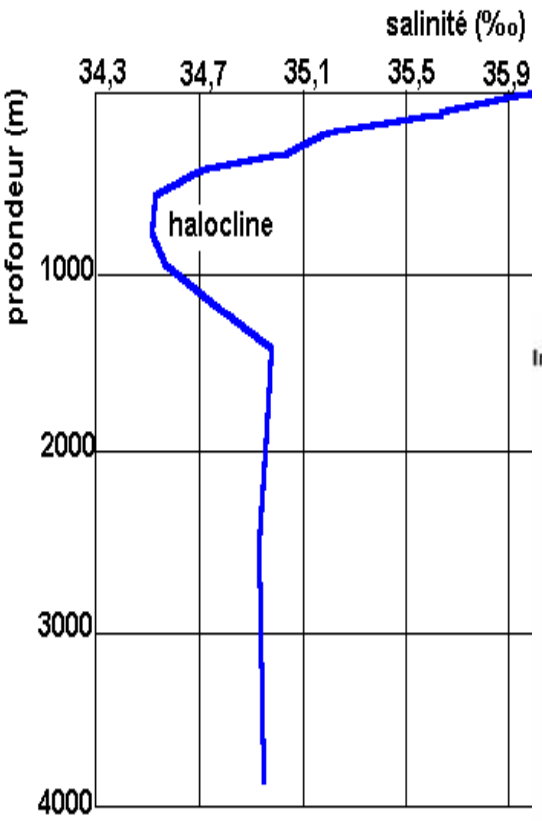
- à salinité constante : une baisse de température = augmentation de la densité

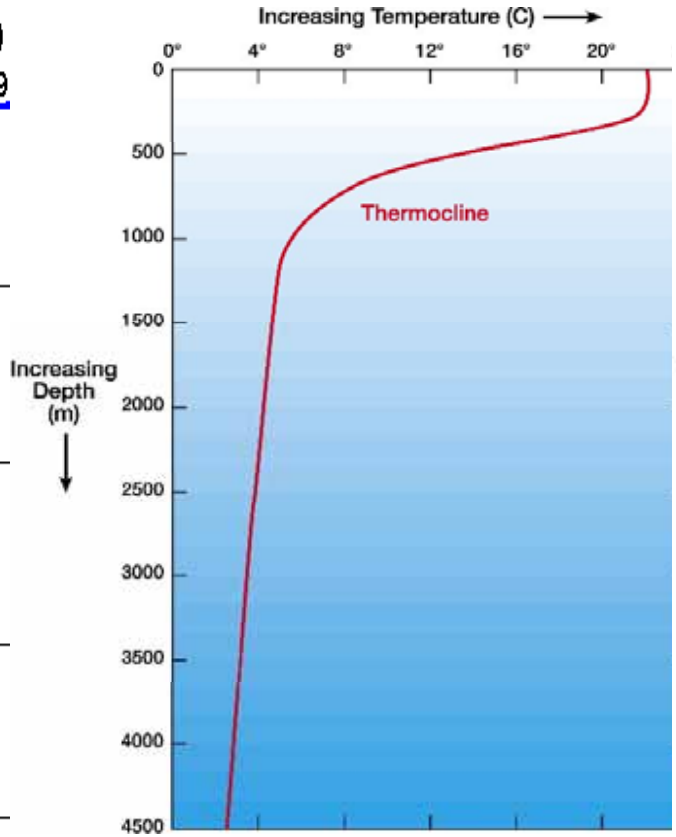
- à densité constante : une augmentation de t° est compensée par une hausse de la salinité

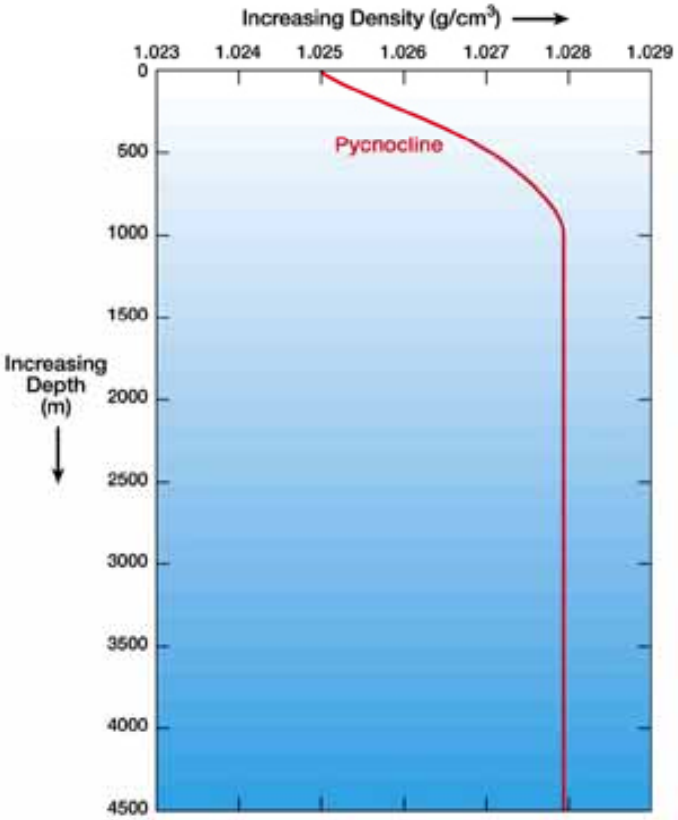


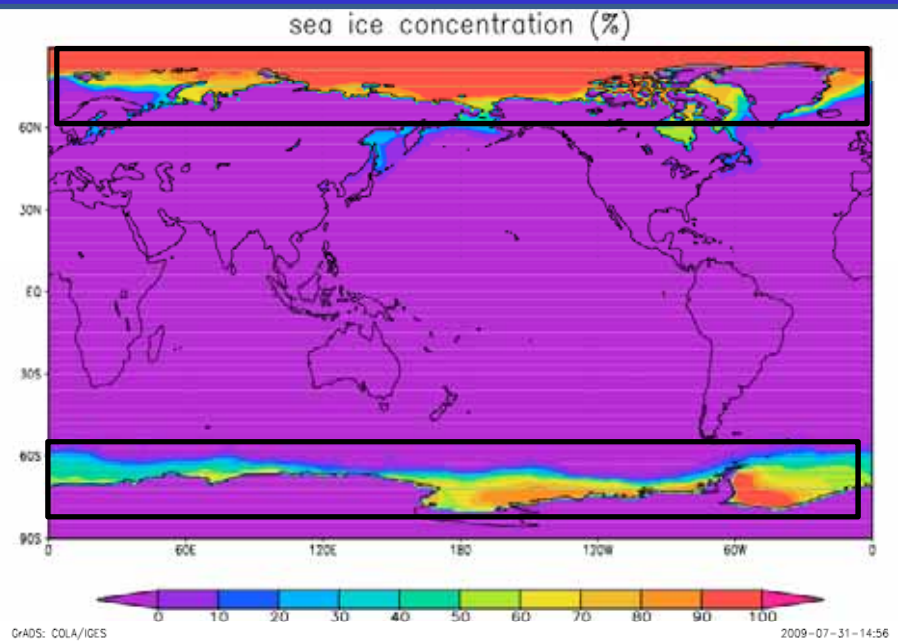
Thermocline et halocline…

- une discontinuité thermique (thermocline) et une discontinuité de salinité (halocline)
- stratification stable puisqu'à l'arrivée les couches supérieures de l'océan sont – denses que les couches inférieures



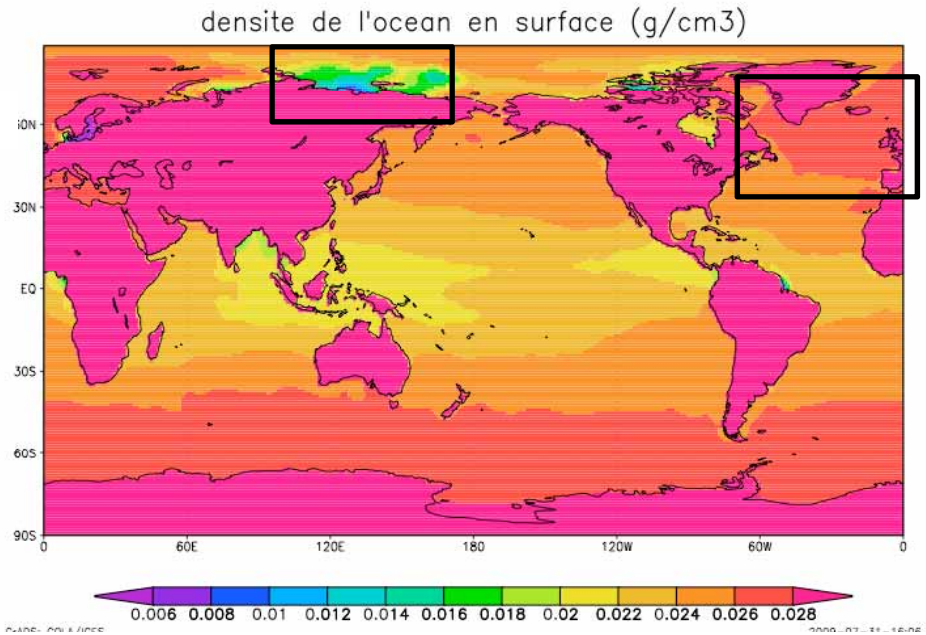






banquise = libération de sel sur les pourtours arctique et antarctique et notamment en Atlantique – Nord

- ce mécanisme accroît la densité des eaux de surface aux hautes latitudes (en plus du fait que les eaux sont froides)

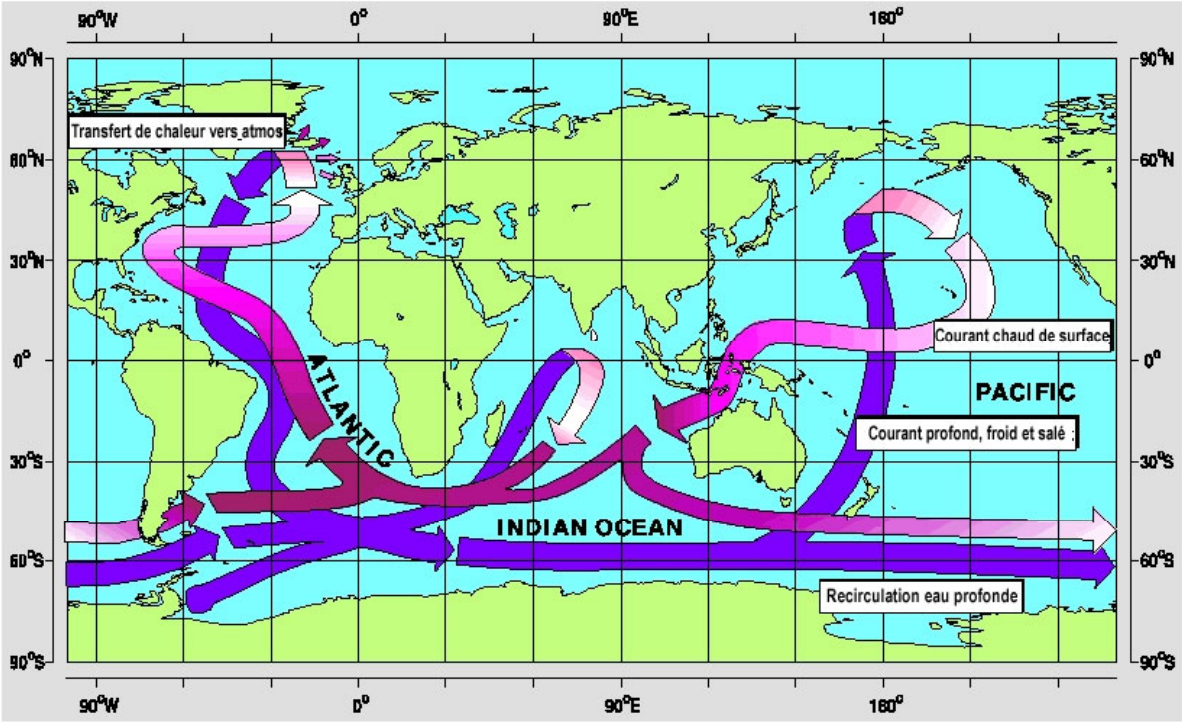


- en moyenne annuelle, la densité en surface est élevée en Atlantique Nord ainsi que sur le pourtour Antarctique et faible au nord de la Russie (apports fluviaux)

La circulation thermohaline…

Circulation thermohaline atlantique

Adapté par Maier-Reimer d'après Broeker



- l'Atlantique nord (et le pourtour Antarctique) sont les deux seuls secteurs où les eaux sont suffisamment lourdes pour engendrer des courants océaniques verticaux (convection) vers le bas. L'océan, en raison de son chauffage par le haut ne peut pas être agité par la convection

La cheminée convective de l'Atlantique Nord…

- ❑ Arrivée massive des eaux très froides de l'Arctique qui ne peuvent quasiment pas se déverser dans le Pacifique en raison de l'étroitesse et de la faible profondeur du détroit de Béring

- ❑ La densité de l'eau s'accroît également autour de la banquise car la glace de mer (formation d'iceberg en hiver) qui se forme libère le sel contenu dans l'eau (enrichissement en sel des eaux froides)

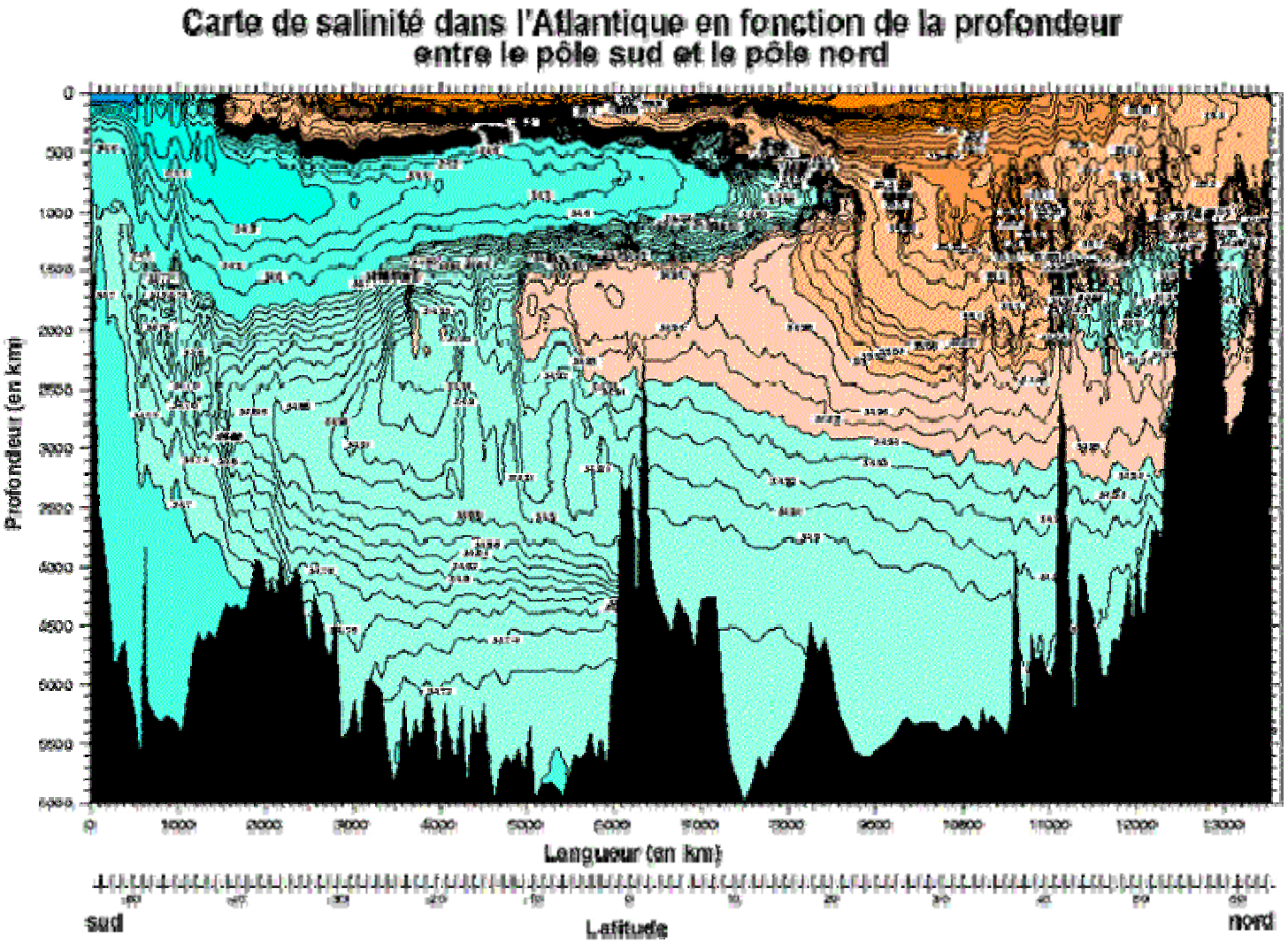
- ❑ Augmentation de la densité du fluide

- ❑ Les eaux nord atlantiques plongent jusqu'à 3 km de profondeur

- ❑ Convection vers le bas (mécanisme similaire dans la mer de Ross et la mer de Weddell)

- ❑ Impulsion de la circulation tridimensionnelle

La cheminée convective de l'Atlantique Nord…



L'échelle locale…

- on s'intéresse à la phase atmosphérique de l'eau et aux échanges avec la surface et les premiers niveaux du sol

Le vocabulaire:

- **la capacité au champ:** quantité d'eau retenue dans les premiers niveaux du sol quand la percolation naturelle vers la profondeur et vers l'aval stoppe

- **la réserve utile (RU):** quantité d'eau que la plante peut théoriquement utiliser dans ses conditions optimales. Cette quantité est toujours < à la capacité au champ et dépend des plantes. La quantité d'eau qui reste dans le sol, mais qui ne peut pas être utilisée par les plantes définit le point de flétrissement permanent

- **évapotranspiration (ET):** somme de l'évaporation depuis le sol et à la surface des végétaux + transpiration directe de vapeur d'eau par la végétation. L'ET varie en fonction de la physiologie de la plante

- **évapotranspiration potentielle (ETP):** quantité d'eau évaporée par un végétal et une surface *si et seulement si* les besoins en eau sont intégralement satisfaits

- **évapotranspiration réelle (ETR):** quantité d'eau réellement évaporée

si P > ETP alors ETR = ETP

- mais si ETR < P alors il y a un surplus hydrologique qui va alimenter la RU et l'écoulement

si P < ETP alors ETR = P + RU

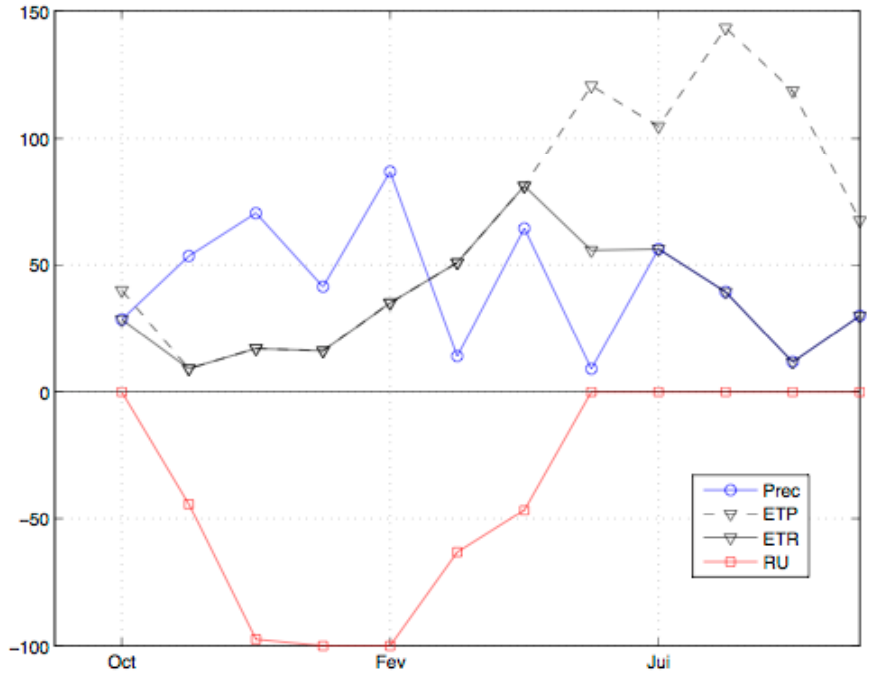
- la RU peut être suffisante pour alimenter l'évaporation et ETR = ETP mais lorsque la RU s'épuise ETR devient < à ETP. ETR = 0 quand P et RU = 0

Élaboration et analyse des bilans hydriques…

- exemple d'un bilan hydrique pour une station du bassin parisien

- ce découpage temporel correspond au cycle physiologique d'un grand nombre de végétaux

- la RU est comptabilisée négativement . Une valeur de -100 mm indique qu'elle est pleine et une valeur de 0 signifie qu'elle est vide



BH avec une RU à 0 en octobre…

		P (en mm)	ETP (en mm)
P < ETP donc ETR= P et RU reste à 0	Octobre 89	28.6	40
P > ETP donc ETR= ETP et P - ETR (44.2) va alimenter la RU	Novembre 89	53.4	9.2
P > ETP donc ETR = ETP et P – ETR (53.2) va alimenter la RU (97.4)	Décembre 89	70.3	17.1
P > ETP donc ETR = ETP et P – ETR (25.2) va alimenter la RU qui atteint sa limite (= 100 mm)	Janvier 90	41.4	16.2
P > ETP donc ETR = ETP et P – ETR (51.4) va au ruissellement (RU pleine)	Février 90	86.5	35.1
P < ETP mais la RU permet d'alimenter la différence ETP – P = 36.8 donc ETR = ETP mais la RU baisse de 36.8 et il reste 63.2	Mars 90	14.1	50.9
P < ETP mais la RU permet d'alimenter ETP – P donc ETR = ETP et la RU baisse de 16.6mm et il reste 46.6mm à la fin avril	Avril 90	64.3	80.9
P < ETP et la RU ne permet pas de combler le déficit; ETR = P + RU= 9.1+46.6 = 55.7 < ETP = les besoins en eau ne sont plus totalement satisfaits et la RU est à 0	Mai 90	9.1	120.6
P < ETP et RU = 0 donc ETR = P et la RU ne peut plus être alimentée	Juin 90	56.2	104.7
ETR = P + RU à 0	Juillet 90	39.4	143.2
ETR = P + RU à 0	Août 90	11.8	118.7
ETR = P + RU à 0	Septembre 90	30	67.4

À retenir…

- cycle de l'eau = transfert de l'eau entre des réservoirs dont la capacité de stockage et dans lesquels le temps de résidence de l'eau sont très différents

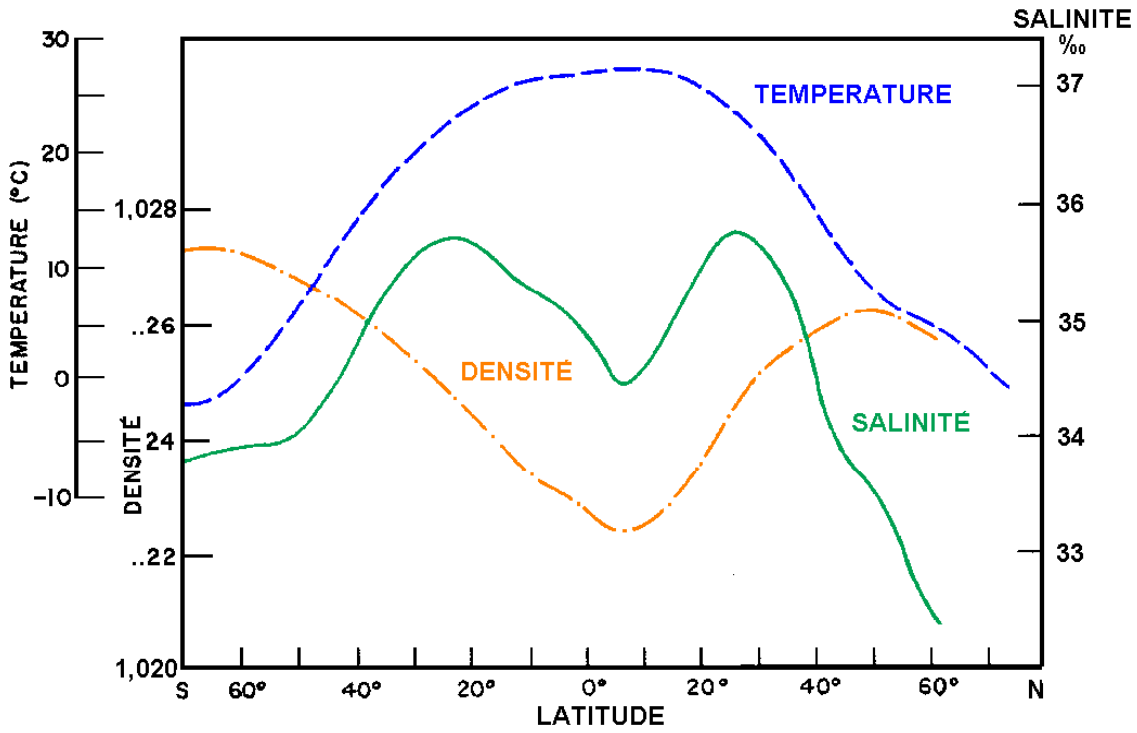
- à l'échelle globale, le résultat fondamental des bilans hydriques globaux (P – E) est la salinité plus importante de l'Atlantique et de l'océan Indien par rapport au Pacifique = il s'agit d'une des causses de la circulation tridimensionnelle au sein de l'océan

- à l'échelle locale, le bilan hydrique mesure les échanges d'eau entre le réservoir supérieur du sol, l'atmosphère et le réseau hydrographique

- l'ETP mesure la capacité évaporatoire de l'air mais l'ETR n'est égale à l'ETP que si la demande en eau est satisfaite par les pluies et/ou la RU

- *à quelle classe de nuages attribuez-vous les photos suivantes ?*

• *Commentez et expliquez les variations latitudinales de la température, de la salinité et de la densité des eaux océaniques de surface.*



- *Complétez les valeurs de la RU et de l'ETR pour chacun des mois.*

	P (en mm)	ETP (en mm)	RU (en mm)	ETR (en mm)
Janvier	43	15	?	?
Février	48	36	?	?
Mars	49	63	?	?
Avril	52	96	?	?
Mai	55	120	?	?
Juin	43	150	?	?
Juillet	29	162	?	?
Août	49	141	?	?
Septembre	58	93	?	?
Octobre	86	45	?	?
Novembre	49	21	?	?
Décembre	47	15	?	?