

Devoir surveillé n°4

Samedi 15 janvier 2022

Épreuve d'analyse de documents de géologie et biogéosciences

durée : 2 heures

Thème 1 – L'Océan Indien

(tiré des sujets Agro-Véto 2021 et 2017 et IESO 2013)

Partie A – Tectonique globale

Cette partie a pour but de caractériser la dynamique de l'Océan Indien, afin d'en identifier le moteur et d'en dresser un mode de fonctionnement général. Il se base principalement sur l'étude de deux cartes de l'Océan Indien (figures 1 et 2).

1) Caractéristiques de l'Arc de la Sonde

Question 1 - Indiquez à quel contexte géologique correspond l'arc de la Sonde. Vous argumenterez à partir d'observations exclusivement tirées des cartes 1 et 2, en un paragraphe de 10 lignes maximum, sans schéma.

L'arc de la Sonde correspond à un contexte de subduction. La lithosphère océanique de l'Océan Indien plonge sous la lithosphère de l'Arc de la Sonde, probablement de nature océanique. Les arguments en faveur de cette conclusion sont :

- *la présence d'un arc volcanique, l'Arc de la Sonde : les volcans actifs sont parallèles à la ligne de suture, sur la plaque chevauchante ;*
- *la présence d'une fosse océanique le long de l'arc ;*
- *la présence de foyers sismiques qui sont de plus en plus profonds en s'éloignant de la suture, et témoignant de l'enfoncement de la plaque océanique indienne ;*
- *des mouvements de convergence enregistrés par les balises GPS (balise COCO ou XMIS) : la plaque océanique se déplace vers l'est contrairement à la plaque chevauchante.*

La figure 3 montre une tomographie sismique d'ondes P au niveau de l'arc de la Sonde. Cette méthode est basée sur la mesure de vitesse d'ondes P, qui dépend des propriétés physiques des matériaux traversés. On rappelle que la vitesse des ondes P et S s'expriment selon :

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

- où K est le module d'incompressibilité,
- μ est le module de cisaillement,
- et ρ la masse volumique du matériau.

Question 2 - D'après vos connaissances :

- précisez quels sont les types de milieux que peuvent traverser les ondes P ;

Tous les milieux sont traversés par les ondes P, solides comme liquides.

- d'après les propriétés des ondes S, estimez la valeur de μ dans un liquide ;

Les ondes S ne traversent pas les liquides donc $\mu = 0$.

- d'après les équations, indiquez comment varient V_P et V_S avec la masse volumique ;

La vitesse augmente quand la masse volumique diminue (pour K et μ constants).

- indiquez quel(s) paramètre(s) du milieu est susceptible d'impacter à la fois μ , K et ρ .

La température et la nature du matériau peuvent jouer sur ces paramètres, ainsi que la pression, la porosité du matériau, la présence de fluides...

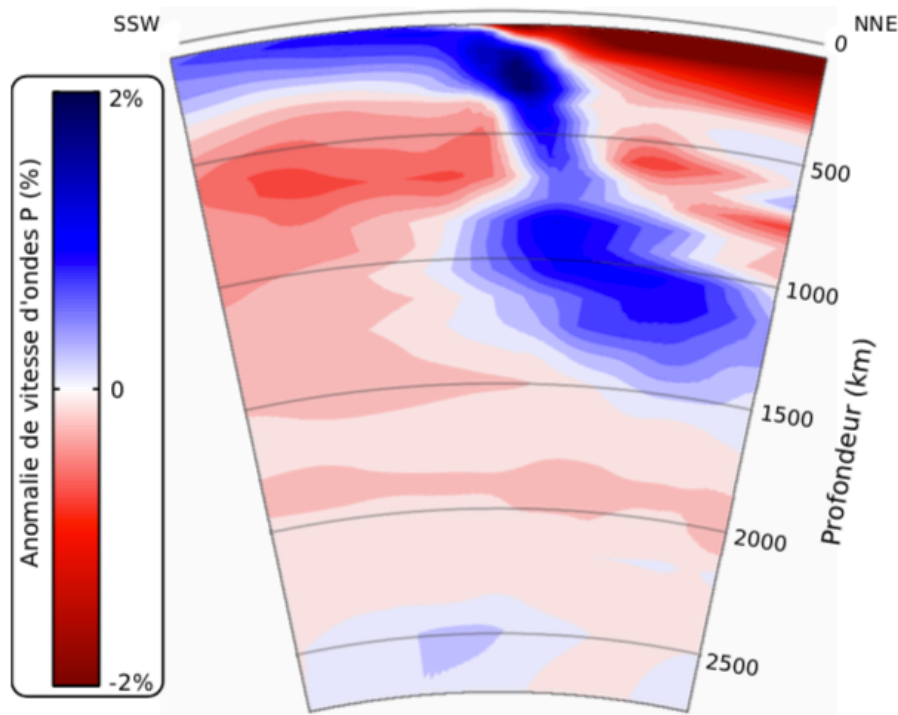


Figure 3 – Tomographie sismique d'ondes P au niveau de l'arc de la Sonde

Le profil est repositionné sur la figure 1.

Données de tomographie : modèle GAP-P4 (JAMSTEC Obayashi et al. (2011))

Question 3 - Après avoir rappelé la définition d'une anomalie de vitesse, vous interprétez rigoureusement la tomographie de la figure 3 en raisonnant à partir de la formule de vitesse des ondes P.

Une anomalie de vitesse est la différence entre la valeur de vitesse mesurée et la vitesse théorique obtenue dans le modèle PREM.

La tomographie sismique permet de montrer un panneau superficiel au SSW qui s'enfonce vers le NNE jusqu'à une profondeur de 1500 km environ. La vitesse des ondes P y est accélérée jusqu'à + 2%. Le matériau est donc plus dense (les modules K et μ varient davantage que la masse volumique) : soit de nature plus dense, soit plus froid. La grande majorité du volume représenté est du manteau (la croûte de 10 km est trop fine par rapport à l'échelle du document) donc l'anomalie positive est interprétée en baisse de température.

Un panneau lithosphérique de 150 km d'épaisseur entre en subduction : il s'agit de la plaque indienne. L'angle de plongement semble très élevé, quasiment vertical.

L'anomalie est plus diffuse au-delà de 670 km, ce qui correspond à l'entrée dans le manteau inférieur.

La plaque chevauchante montre une anomalie négative jusqu'à - 2% : elle peut être associée au magmatisme de l'Arc de la Sonde, dû à la déshydratation de la plaque plongeante, qui décale le solidus du manteau chevauchant, entraînant sa fusion partielle.

2) Propriétés de la dorsale Nord de l'Océan Indien

L'Océan Indien est parcouru par trois dorsales, en contact au niveau d'un point triple. On s'intéresse ici à la branche la plus au Nord de l'Océan Indien.

Question 4 - La carte 1 montre des enregistrements de vitesse de déplacement de différentes stations GPS.

- Les déplacements enregistrés par les stations à l'ouest de la dorsale (REUN, ABPO) et ceux enregistrés à l'est (DGAV, HYDE) sont-ils compatibles avec une dorsale ? Justifiez en comparant les déplacements de deux stations GPS que vous choisirez.

Les balises REUN et ABPO montrent un déplacement de 1 à 2 cm.a^{-1} vers le Nord-Est.

Les balises DGAV et HYDE montrent un déplacement d'environ 6 cm.a^{-1} vers le Nord-Est.

La résultante des mouvements est donc bien un écartement au niveau de la zone située entre ces 2 jeux de balises, qui concorde avec la position de la dorsale.

Balise REUN = résultante d'un déplacement vers l'Est important + un déplacement vers l'Ouest, dû à la dorsale.

Balise DGAV = sommes des mouvements de déplacements de la région vers l'Est + la dorsale.

- Décrivez le mouvement actuel de la dorsale.

La dorsale se déplace vers l'ENE à une vitesse W . Si la dorsale a une activité d'expansion symétrique de vitesse $2V$, alors :

REUN : $2 \text{ cm.a}^{-1} = W - V$ et DGAV : $6 \text{ cm.a}^{-1} = W + V$

Alors $W = 4 \text{ cm.a}^{-1}$ et $V = 2 \text{ cm.a}^{-1}$.

La figure 5 montre des tomographies sismiques horizontales (i.e. dans un plan parallèle à la surface) au niveau de la dorsale et de l'arc de la Sonde.

Question 5 - À partir d'arguments tirés de cette figure et de vos connaissances :

- montrez qu'un modèle de convection du manteau en grandes cellules de convection fermées (type «casserole», voir figure 4) n'explique pas l'ouverture de l'Océan Indien ;

Dans le modèle proposé, le panache de chaleur provient de zones profondes or l'image de tomographie sismique montre une anomalie de vitesse négative superficielle au niveau de la dorsale.

- proposez un modèle convectif alternatif à l'ouverture de l'Océan Indien, en indiquant les sources de chaleur et le moteur de ce modèle ;

Le modèle convectif repose sur l'enfoncement de la lithosphère océanique froide au niveau de la zone de subduction. Ce mouvement provoque un étirement au niveau de la dorsale, compensé par une remontée de matériel mantellique. Or le manteau profond est chaud car il est radioactif et il subsiste une chaleur d'accrétion résiduelle. Une remontée adiabatique de manteau chaud provoque sa fusion partielle et donc l'activité de la dorsale.

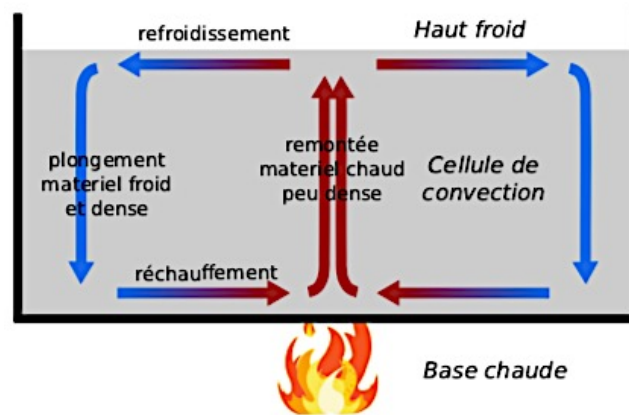


Figure 4 - Modèle de convection de type « casserole d'eau »

Le réchauffement par la base et le refroidissement par le haut de l'eau dans une casserole provoque la mise en place de cellules de convection fermées.

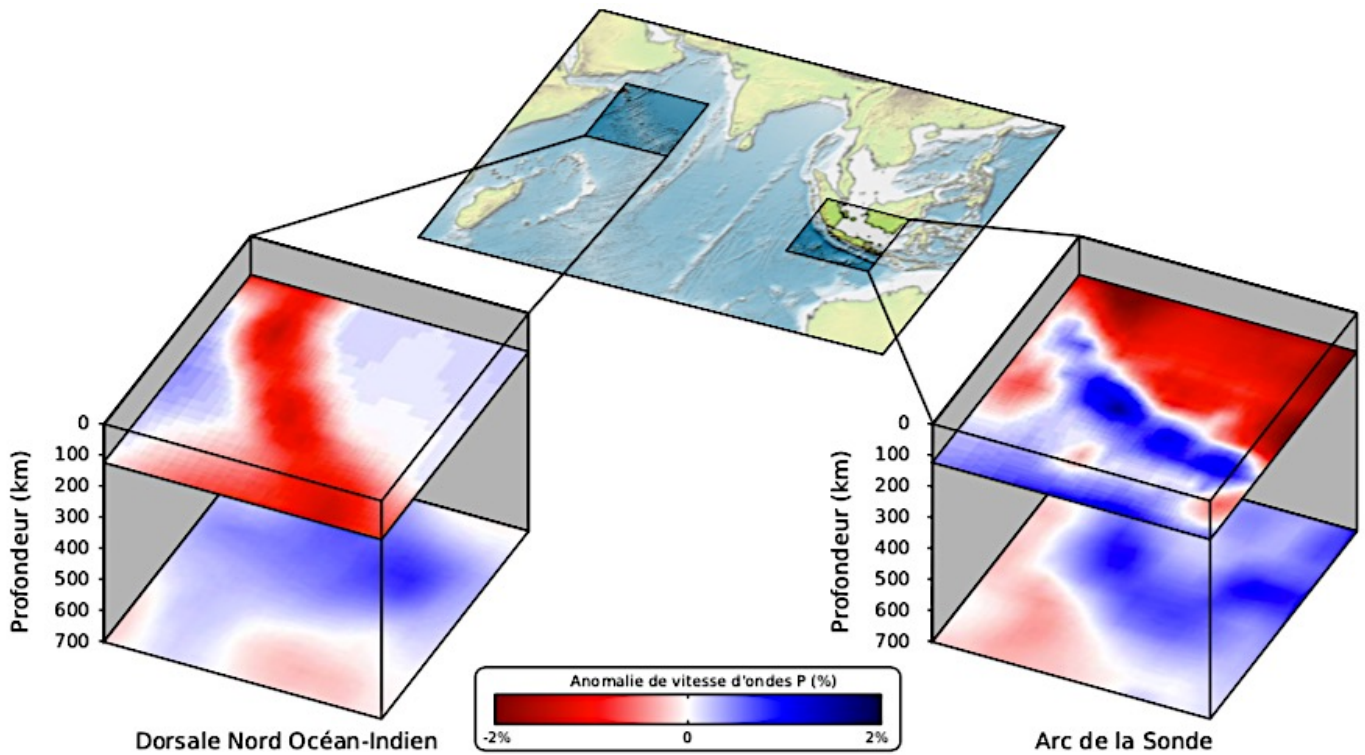


Figure 5 - Tomographies sismiques horizontales d'ondes P dans deux zones de l'océan indien
 Pour les deux zones, les tomographies horizontales sont proposées pour une profondeur de 125 km et 700 km. Données de tomographie : modèle LLNL-G3Dv3 (Simmons et al. (2012))

Partie B – Géodynamique externe

1) Climat et pluviométrie en Inde

La présence du relief de la chaîne himalayenne a des effets sur la dynamique atmosphérique et entraîne la mise en place du régime de mousson (vents violents associés à des pluies intenses).

Question 6 - Tracez le plus précisément possible, dans les rectangles rouges des cartes du document 6 (page à intégrer dans la copie), le trajet des vents de surface au niveau de l'Inde. Vous justifierez votre tracé. Déduisez-en la période de l'année à laquelle doit avoir lieu la mousson humide en Inde.

La mousson a lieu en été car les vents chargés d'humidité, venant de l'Océan, pénètrent dans le continent et l'Himalaya forme une barrière froide qui induit la précipitation.

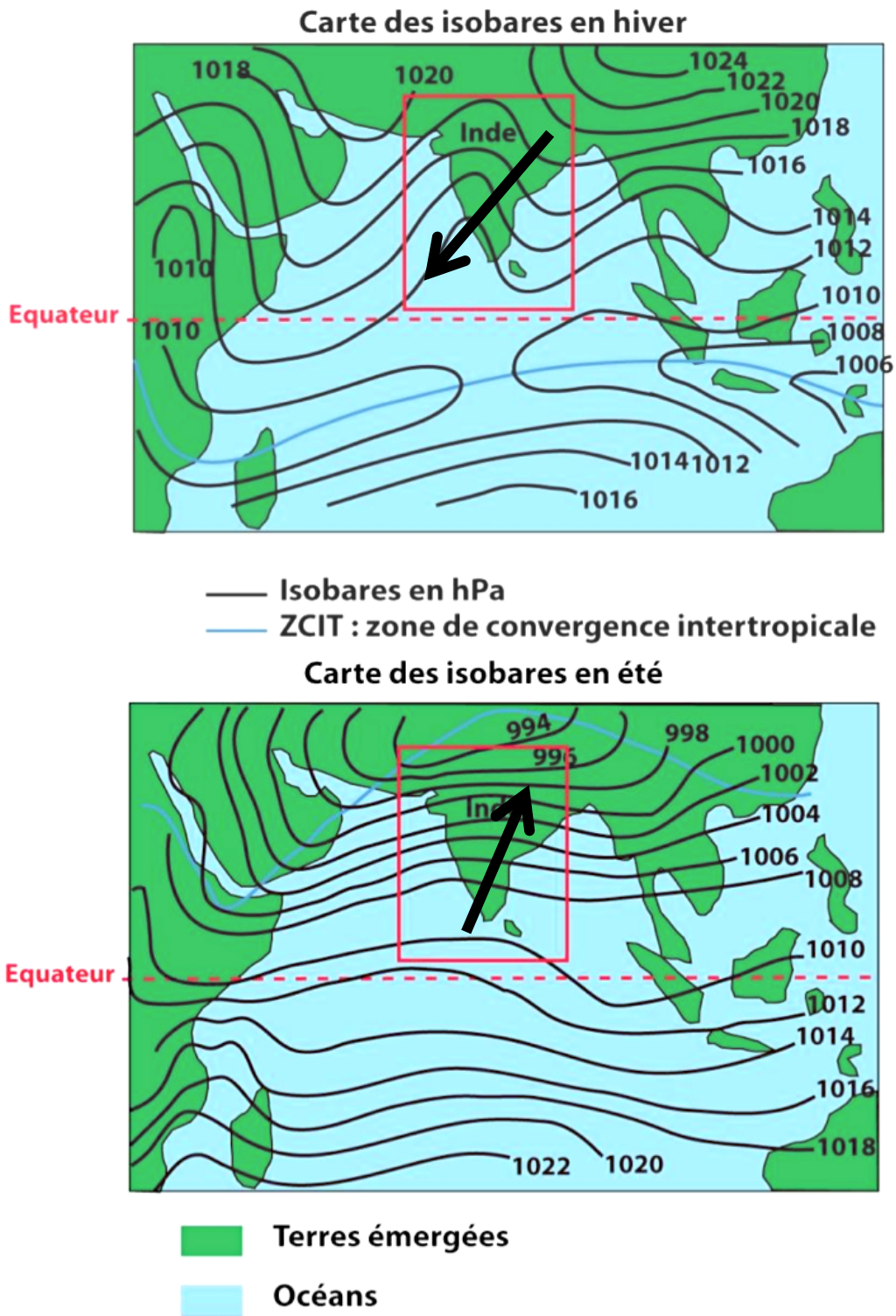


Figure 6 - Cartes des pressions atmosphériques en janvier et en août au niveau de l'océan indien.
 (source : Sciences de la Terre et de l'Univers ; page à intégrer dans la copie).

Question 7 - En utilisant les cartes des figures 7 et 8, expliquez la pluviométrie observée sur la façade ouest de l'Inde. Vous intégrerez un schéma à votre réponse.

La mousson est un vent qui vient du SW. Il parvient sur le continent par la façade ouest. Or la topographie montre un relief le long du rivage ouest. Donc l'air chargé d'humidité monte en altitude, se refroidit et l'eau se condense : il pleut.

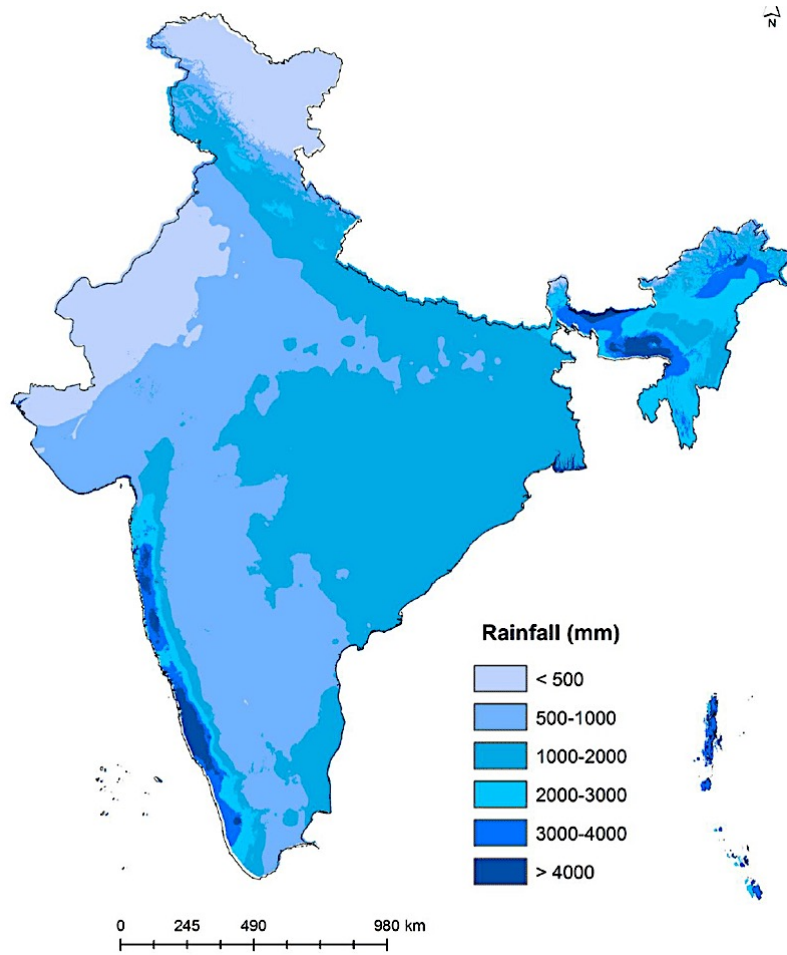


Figure 7 - Carte des précipitations annuelles en Inde (Source : S. Reddy, Environmental Monitoring and Assessment, 2015)

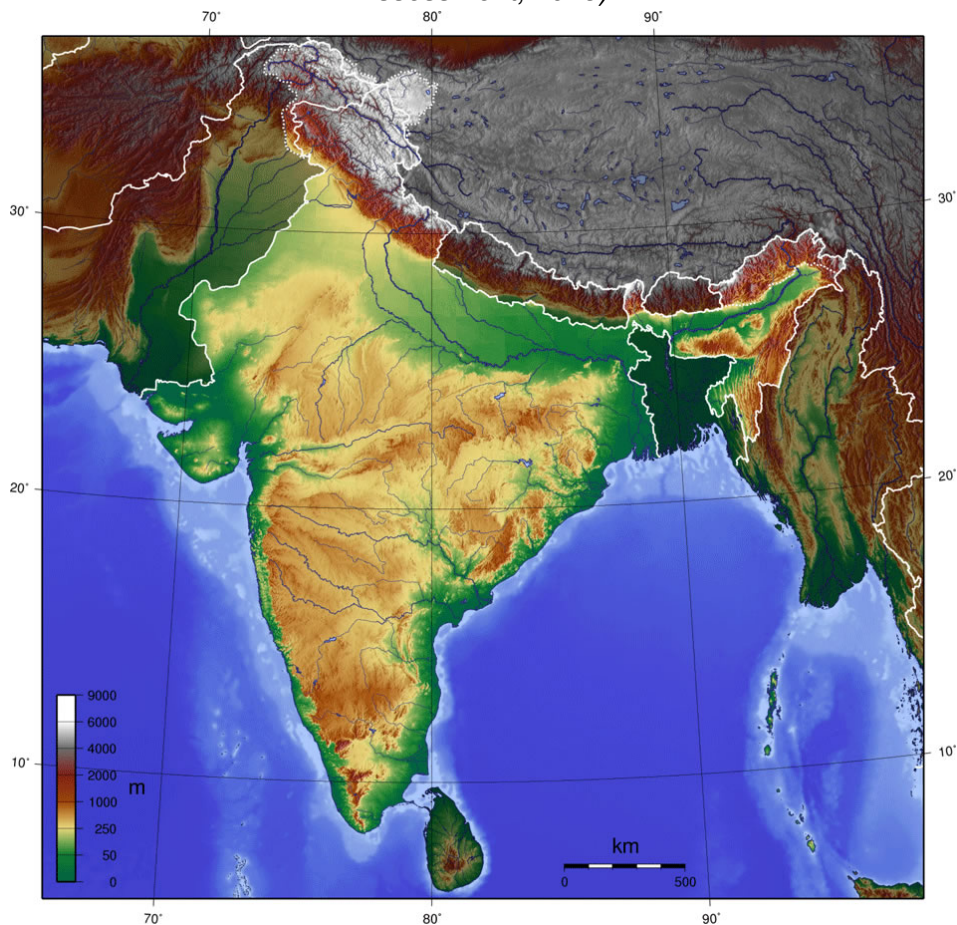


Figure 8 - Carte topographique de l'Inde (Source : maps-of-india.com)

2) Salinité de l'Océan Indien

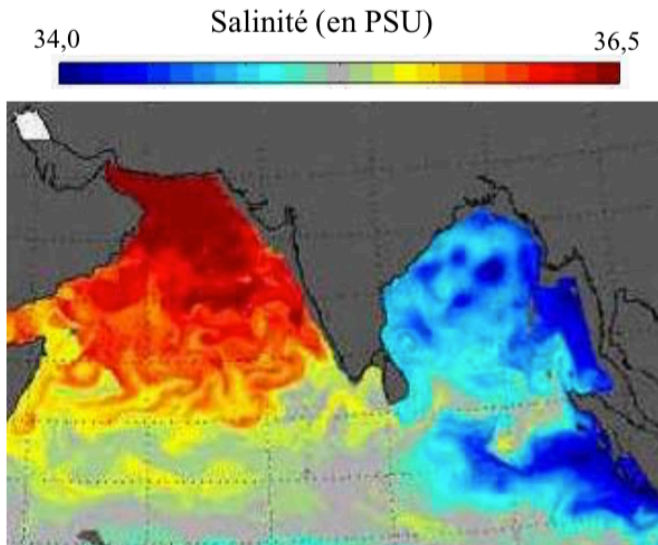


Figure 9

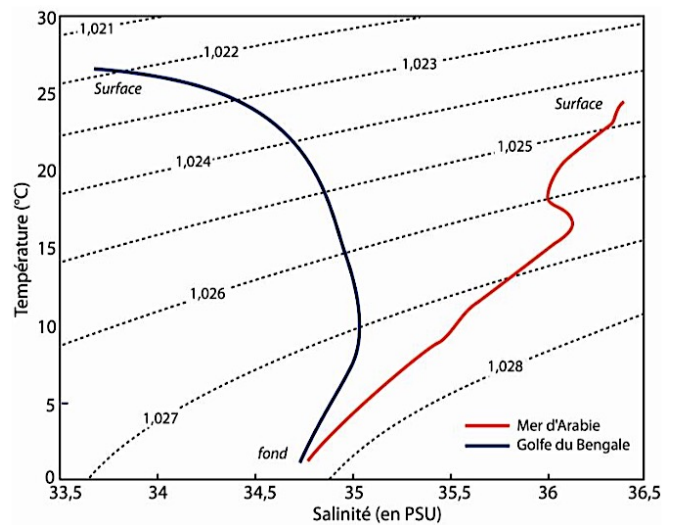


Figure 10

Figure 9 - Prédiction de salinité à 100 m du modèle Mercator-Océan le 29 avril 2008.

Figure 10 - Profils moyens des eaux de la mer d'Arabie et du Golfe du Bengale sur le diagramme température – salinité. Les droites en pointillés joignent les points de même densité.

Question 8 - Comparez la salinité de l'Océan Indien entre la mer d'Arabie et le Golfe du Bengale.

La mer d'Arabie et le Golfe du Bengale ne montrent pas de différence de salinité en profondeur.

Sur les 100 m superficiels, la mer d'Arabie présente une salinité très élevée de presque 36,5 PSU et une température de 23°C. Le Golfe du Bengale montre en surface une salinité faible de 33,8 PSU avec une température de 26°C.

Afin d'expliquer ces différences, deux séries de mesures sont données.

Série 1

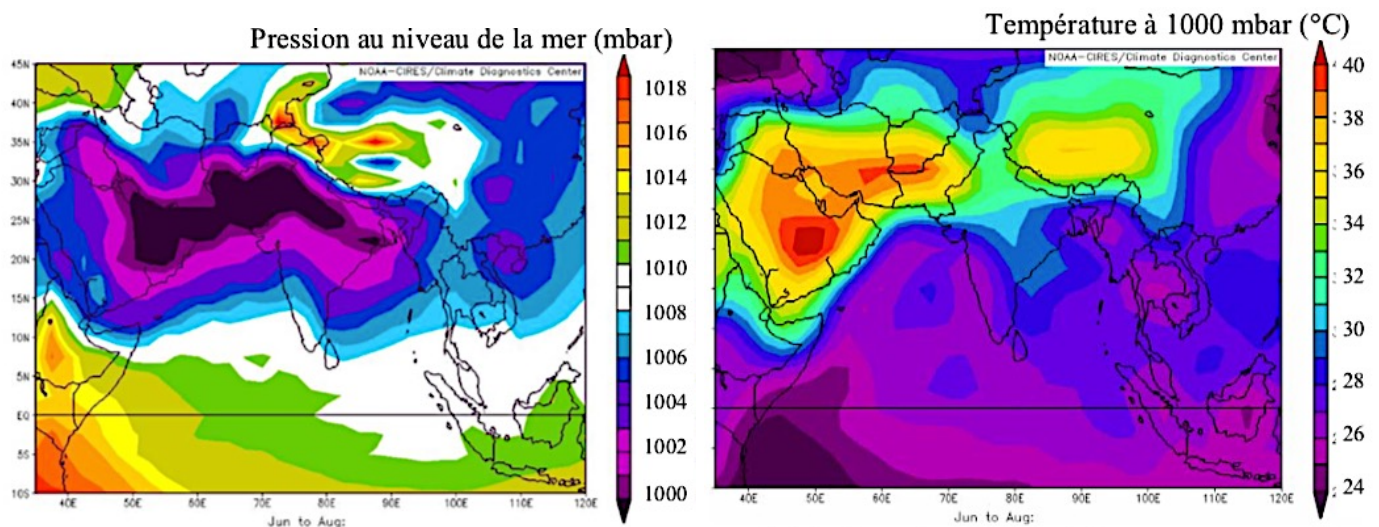


Figure 11 : Température et pression estivales (moyenne de juin à août) au niveau de la mer Moyennes sur 30 ans (source : NOAA).

Question 9 - Expliquez les données de pression relevées dans la Mer d'Arabie.

La mer d'Arabie montre une pression très faible, entre 1 000 et 1 004 mbar : la région étant également très chaude, on peut imaginer un flux d'air ascendant important, initiant une cellule de convection et donc diminuant la pression au niveau de la mer.

Série 2



Figure 12 - Réseau hydrographique de l'Inde (Source : IESO 2013)

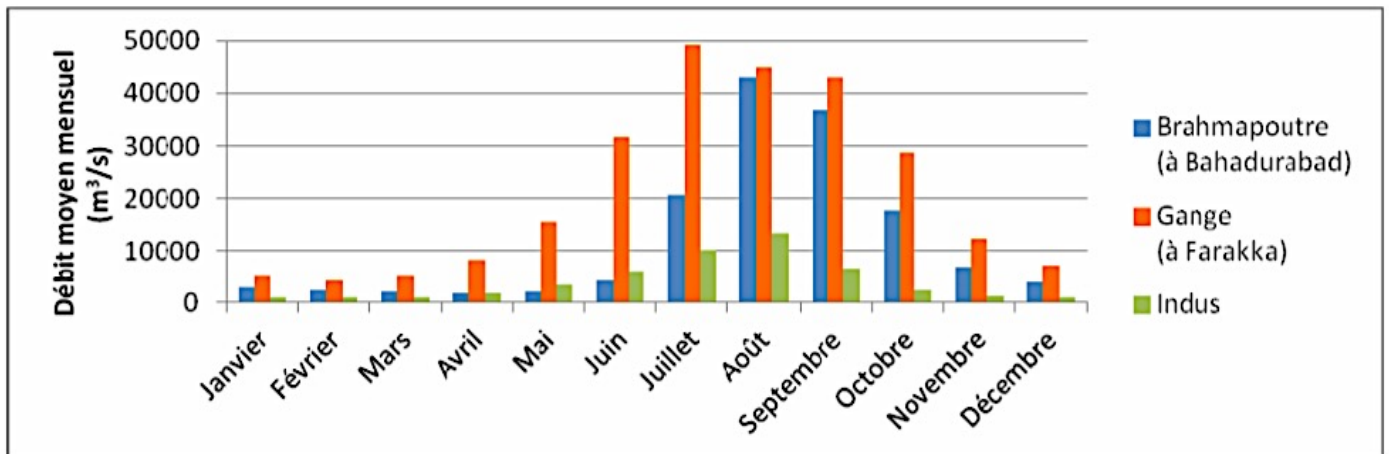


Figure 13 - Débits moyens mensuels des grands fleuves indiens.

Question 10 – En utilisant les données des séries 1 et 2 et les réponses aux questions précédentes, proposez trois explications à la différence de salinité entre la mer d'Arabie et le Golfe du Bengale.

Série 1 = forte évaporation dans la mer d'Arabie qui augmente la salinité résiduelle en surface

Série 2 = tous les fleuves déversent leur eau douce vers le Golfe du Bengale, surtout lors des précipitations des moussons.

Mousson en été avec un vent orienté de SW vers NE => plus de précipitation sur le Golfe du Bengale.

Thème 2 – Les courants de l'ouest brésilien

(tiré de Castelao et Barth, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2006)

Question 1 - Expliquez l'origine et la direction du courant équatorial Sud visible sur la carte de la figure 1.

Convergence des alizées avec un vent globalement d'Est vers l'Ouest.

Pas de force de Coriolis au niveau équatorial donc le vent pousse l'eau dans la même direction.

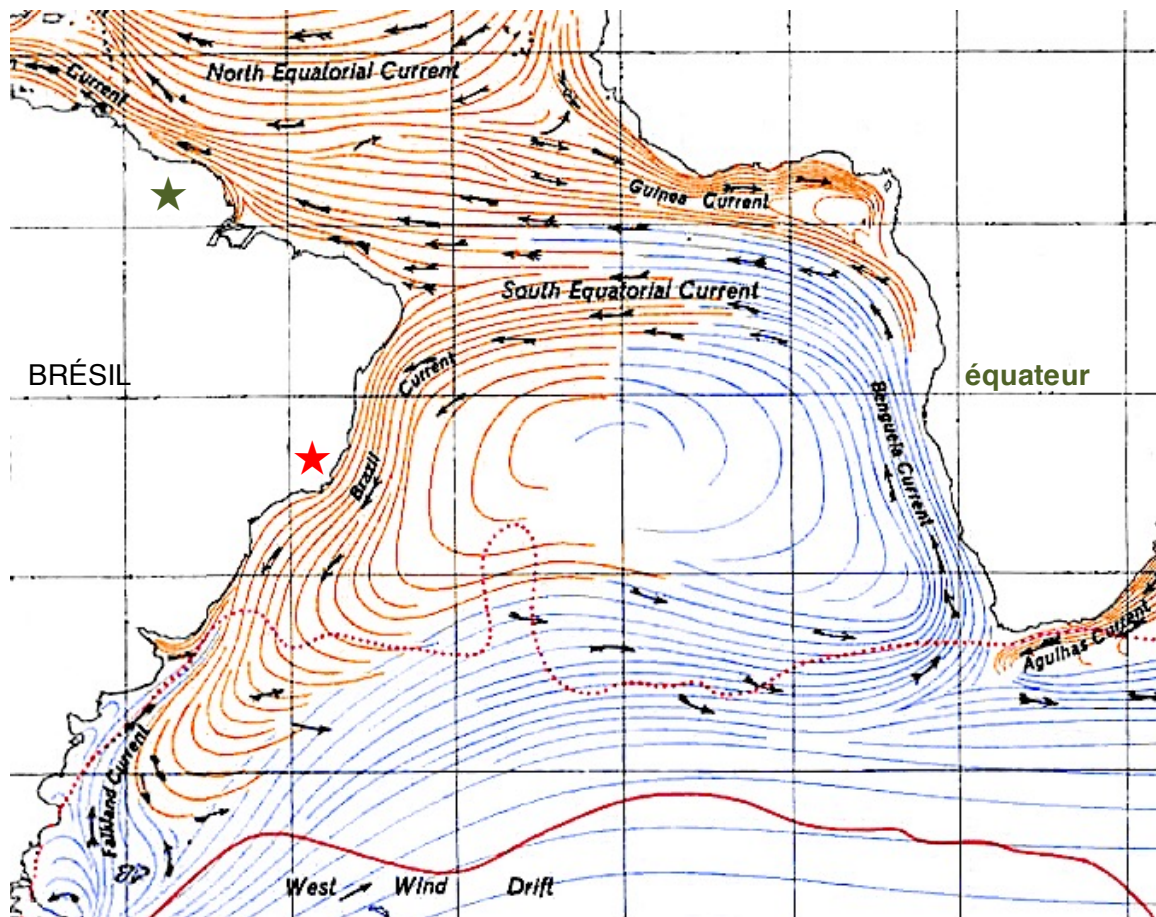
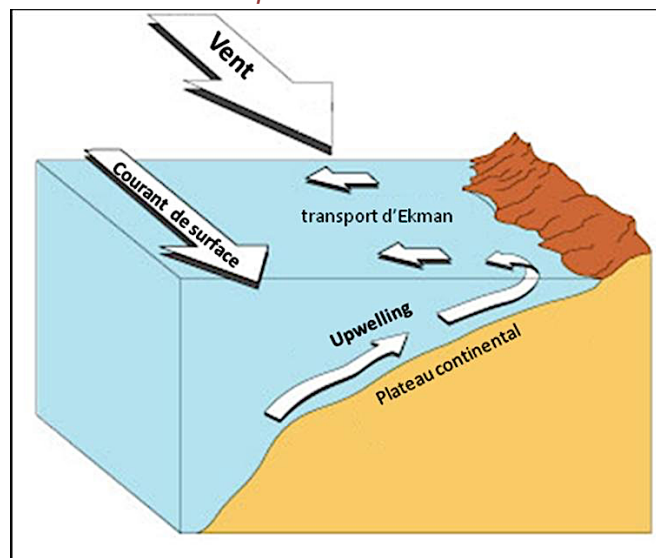


Figure 1 – Carte des courants de surface des Océans Atlantiques et Antarctiques (Source : Ocean Currents and Sea Ice from Atlas of World Maps, US Army Service Forces Manual, 1943)

Le courant équatorial Sud se scinde en 2 courants côtiers au niveau du Brésil. La côte Sud étudiée ci-après est dans la région de l'étoile rouge. La question 3 porte sur la côte Nord, au niveau de l'étoile verte.

Question 2 – Nommez, décrivez puis expliquez sous la forme d'un schéma le phénomène observé au niveau de Cabo Frio et présenté dans les figures 2 et 3.

Il s'agit d'un upwelling : les eaux de surfaces au sud de Cabo Frio sont très froides (20°C) alors que le littoral présente plutôt des eaux de surface au-delà de 25°C vers Caravelas ou Ilha Comprida. Ce sont des remontées d'eau profondes liées à un déficit d'eau de surface, envoyées vers le large en raison du transport d'Ekman animé par le courant Nord-Sud qui longe la côte. Le transport d'Ekman est dévié vers la gauche puisque la zone est située dans l'hémisphère sud.



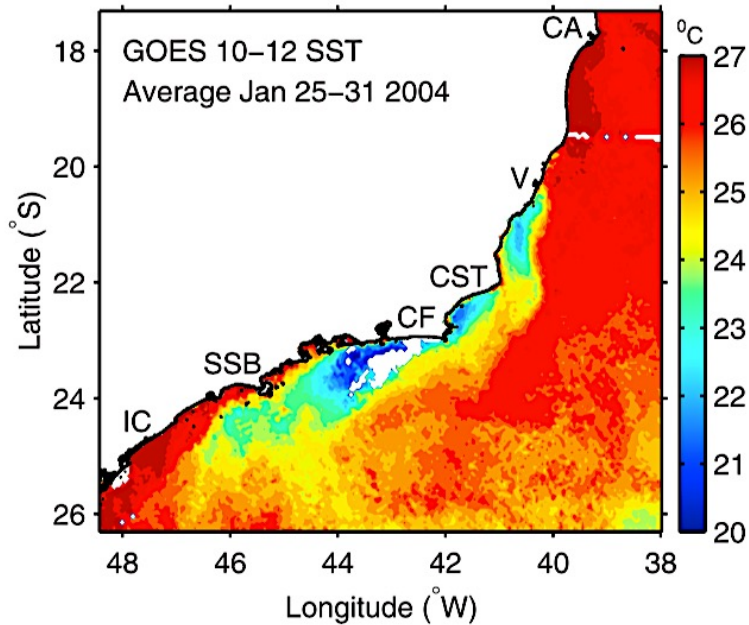


Figure 2 – Température de l'eau de surface mesurée par altimétrie satellitaire pendant 7 jours de janvier 2004 (été austral) – IC = Ilha Comprida – SSB = São Sebastião Island – CF = Cabo Frio – CST = Cabo de São Tomé – V = Vitória et CA = Caravelas

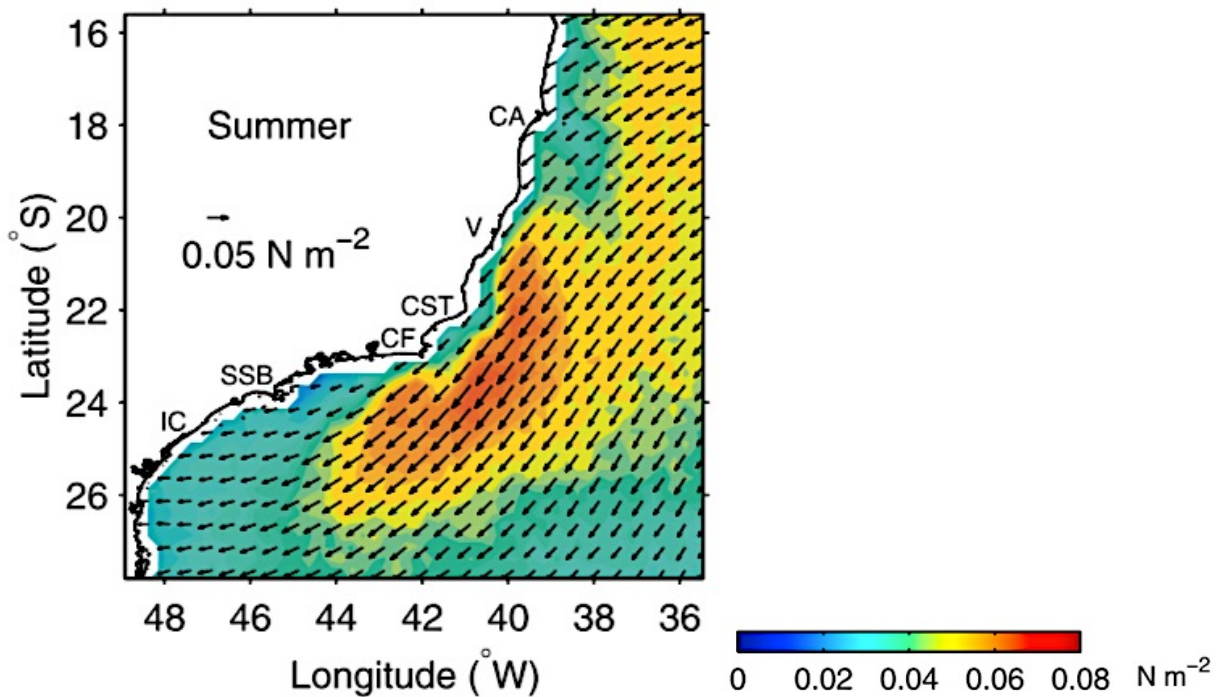


Figure 3 – Direction et force du vent lors de l'été austral.

Question 3 – Par analogie, indiquez le type de phénomène qui a lieu sur la côte Nord du Brésil (région de l'étoile verte sur la carte de la figure 1).

Il s'agit aussi d'un upwelling : le courant est opposé mais il s'agit de l'hémisphère Nord, avec une déviation vers la droite.

Thème 3 – Fossiles et datation

Source : IESO 2011

Les fossiles sont des traces de vie riches en informations pour les géologues. Appliquons leur utilisation à deux cas.

Cas 1 : une biozone de Drôme et de Provence

On a étudié la répartition des espèces d'ammonites dans des formations du Crétacé inférieur (Valanginien) correspondant à la « fosse vocontienne » (un domaine marin assez profond qui occupait une partie de la Drôme) et à la plate-forme provençale (domaine peu profond qui bordait la fosse). Ces deux domaines sont représentés par les séries d'Angles et de Carajuan, respectivement.

Question 1 – Listez les caractéristiques des fossiles stratigraphiques.

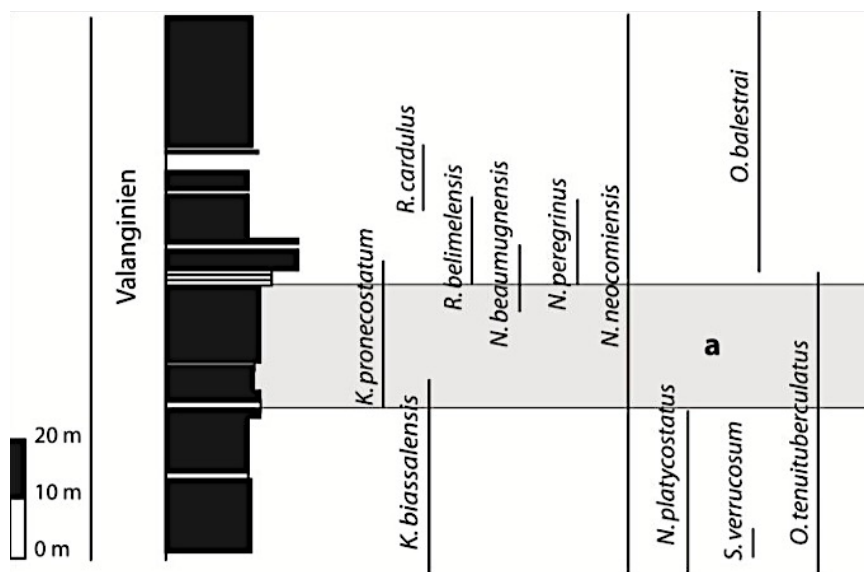
Un fossile stratigraphique doit correspondre à une espèce fossilisable (coquille, squelette interne, trace de vie) ayant eu une durée d'existence très courte et dont les individus étaient abondants, avec de faibles exigences des conditions de leur milieu de vie.

Question 2 - En étudiant ces deux séries, indiquez le meilleur fossile stratigraphique. Justifiez votre choix.

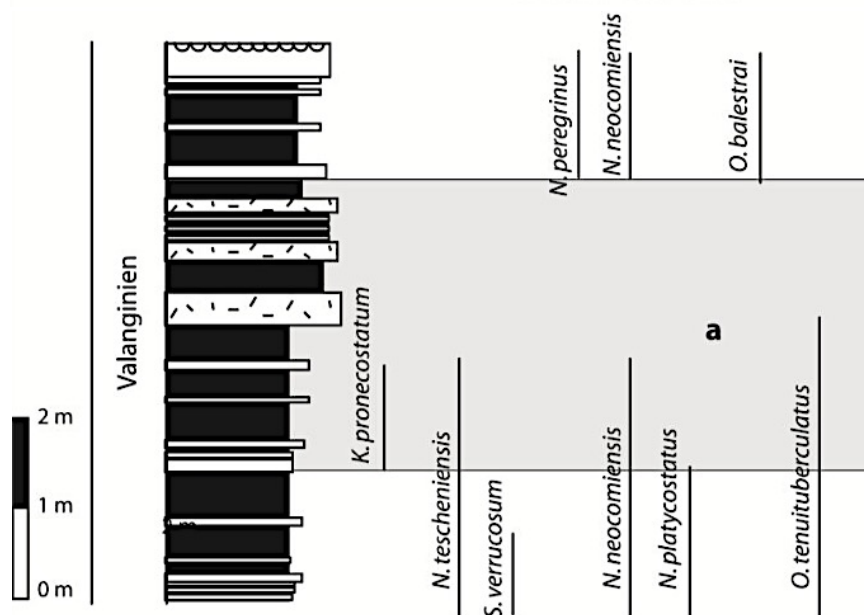
N. peregrinus est présent dans les deux régions avec une durée courte. Éventuellement K. pronecostatum.

Question 3 - Indiquez la meilleure façon de définir la biozone notée « a ».

Biozone définie par la présence de K. pronecostatum et l'absence de N. peregrinus ou R. belimelensis.



SERIE D'ANGLES



SERIE DE CARAJUAN

Cas 2 – Affleurement de Turquie

La coupe idéalisée en figure 2 correspond à une situation rencontrée à l'Ouest des monts du Taurus, en Turquie. Les fossiles trouvés sur place sont montrés en figure 1.



Fossile I (taille : 11 mm)



Fossile II (taille : 5 cm)



Fossile III (taille : 15 cm)

Figure 1 – Fossiles trouvés dans les Monts Taurus (Turquie)

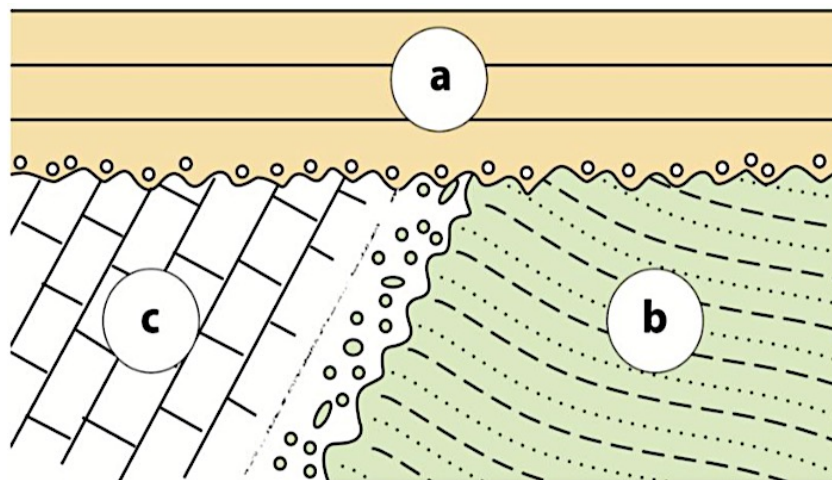


Figure 2 – Schéma de l'affleurement turc

Question 4 – Identifiez les 3 fossiles de la figure 1. Précisez le nom de leur ère d'existence.

Fossile I = Nummulite (Foraminifère) de l'ère Cénozoïque

Fossile II = Trilobite de l'ère Paléozoïque

Fossile III = Ammonite de l'ère Mésozoïque.

Question 5 – Associez chaque fossile à l'ensemble a, b ou c de l'affleurement.

Ordre = b puis c puis a donc IIb cIII aI

Thème 4 – Gravimétrie et isostasie au Tibet

Le plateau tibétain fait partie de la grande chaîne himalayenne. Des études gravimétriques ont été réalisées à l'aide de satellites. Le secteur pointé par l'étoile jaune sur la figure 1 sera la zone d'étude.

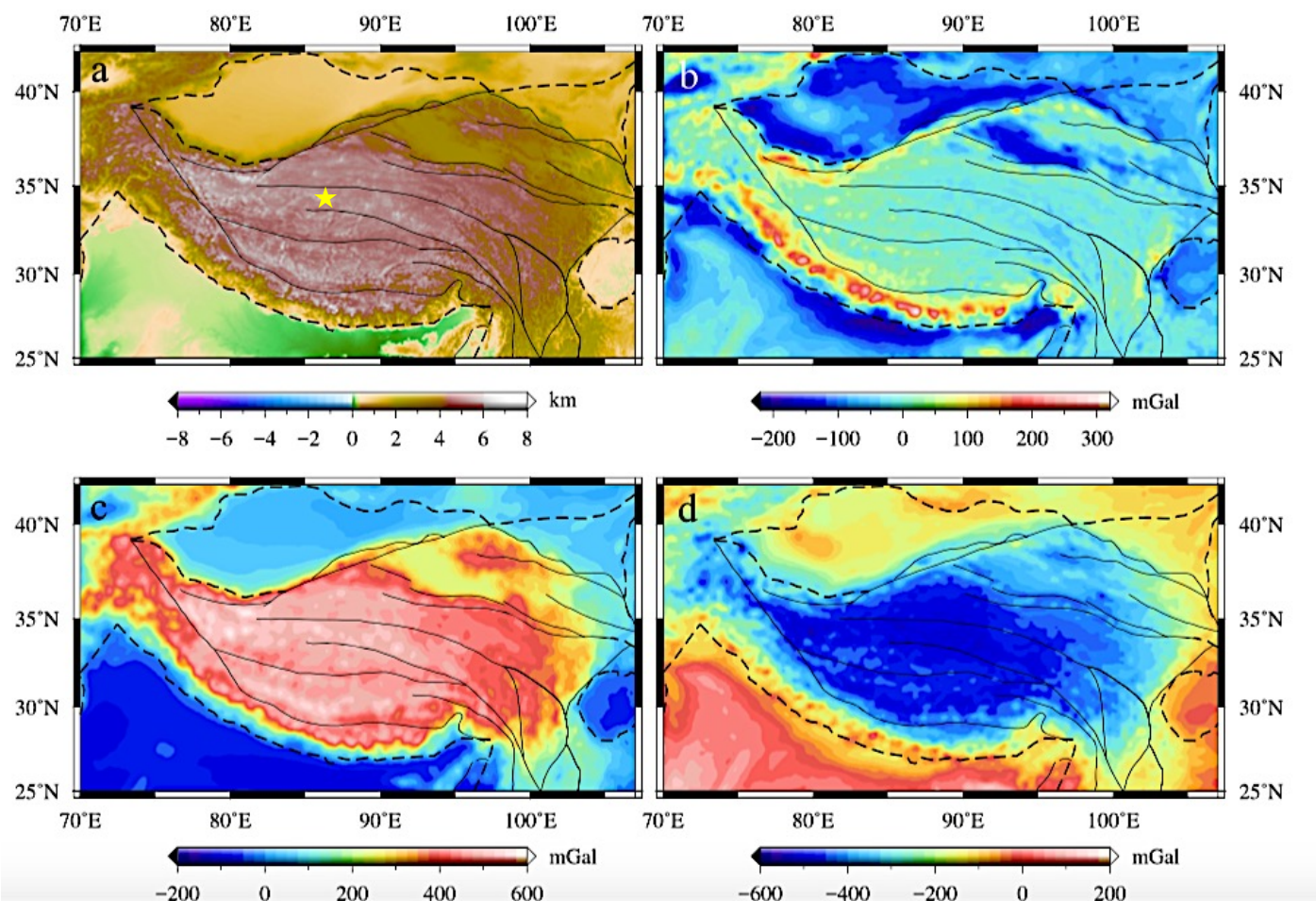


Figure 1. (a) Topographie du plateau tibétain ; (b) anomalie à l'air libre ; (c) correction de Bouguer ; (d) anomalie de Bouguer.

Source : Zhao et al, *Geochemistry Geophysics Geosystems* · January 2020

Sachant que le Tibet est à une latitude de 35°N, il est possible de calculer la valeur de g théorique en employant la formule :

$$g = 9,78031846 \times [1 + 0,0053024 \cdot \sin^2\theta - 0,0000058 \cdot \sin^2(2\theta)] \text{ avec } \theta = \text{latitude}$$

Ceci donne une valeur de g théorique (g_t) de 9,797329511 m.s⁻² soit environ $g_t = 979\,733$ mgal.

Des mesures de la valeur de g à l'altitude 5 000 m, donnent la valeur mesurée de $g_m = 978\,218$ mgal.

Données :

Correction à l'air libre $\Delta g_{\text{air}} = 0,3086 \times h$ en mgal, avec h altitude en m

Correction de plateau $\Delta g_{\text{plateau}} = 0,04 \cdot d \cdot h$ pour la correction de plateau en mgal
avec d = densité de la roche (2,7 pour la croûte) et h l'altitude en m.

Question 1 – Calculez approximativement la correction à l'air libre au niveau du plateau tibétain.

Correction à l'air libre = $0,3 \times 5\,000 = 1\,500$ mgal : il faut ajouter 1 500 mgal à la valeur mesurée.

Question 2 – Rappelez la définition d'une anomalie en géophysique. Calculez l'anomalie à l'air libre. La valeur obtenue est-elle compatible avec la carte de la figure 1b ?

Une anomalie est la différence entre la valeur mesurée et la valeur théorique obtenue que un modèle de référence.

$$\text{Anomalie à l'air libre} = (g_m \text{ corrigé}) - g_t = (978\,218 + 1500) - 979\,733 = 15 \text{ mgal}$$

La carte indique une valeur proche de zéro : c'est donc cohérent.

Question 3 – Calculez la correction topographique au lieu d'étude.

La correction de Bouguer est d'environ 600 mgal sur le lieu d'étude, d'après la carte 1c.

Or la correction de Bouguer est issue de deux corrections : la correction de plateau et la correction topographique Δg_{topo} .

Correction de Bouguer = $\Delta g_{\text{plateau}} - \Delta g_{\text{topo}}$.

Correction de plateau = $\Delta g_{\text{plateau}} = 0,04 \times 2,7 \times 5\,000 = 540 \text{ mgal}$

La correction topographique est donc de $540 - 600 = -60 \text{ mgal}$.

Question 4 – Calculez l'anomalie de Bouguer et la comparer à la valeur de la carte 1d.

Anomalie de Bouguer = $g_m \text{ corrigé} - g_t = (978\,218 + 1500 - 600) - 979\,733 = -585 \text{ mgal}$.

La valeur est cohérente avec celle de la carte.

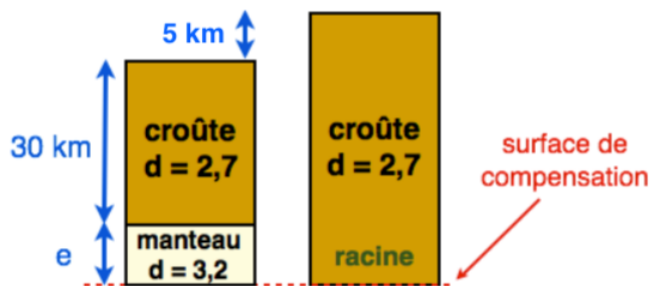
Question 5 – Interprétez la valeur obtenue pour l'anomalie de Bouguer.

La valeur de l'anomalie est très négative : cela montre qu'il y a un déficit de masse au niveau de la zone étudiée, par rapport au modèle de référence (ici l'ellipsoïde de référence). Il peut s'agir d'un déficit de masse dû à une racine crustale.

Question 6 – Calculez l'épaisseur de la croûte au niveau du plateau tibétain, à une altitude de 5 000 m.

Vous préciserez l'hypothèse et le modèle choisis. Un schéma est attendu.

Données : densité des roches crustales = 2,7 et densité du manteau = 3,2



Hypothèse = l'équilibre isostatique est atteint

Modèle d'Airy.

$3,2 e = 2,7 (e+5)$ donc

$0,5 e = 5 \times 2,7$ donc $e = 27 \text{ km}$

donc l'épaisseur de la croûte vaut $27 + 30 + 5 = 62 \text{ km}$.