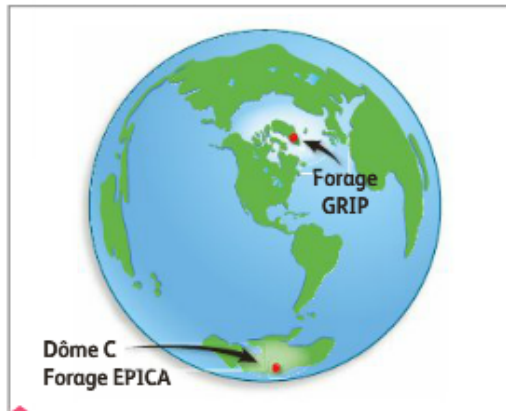


Thème 2 - Enjeux planétaires contemporains

TD3 - La glace : mémoire récente du climat

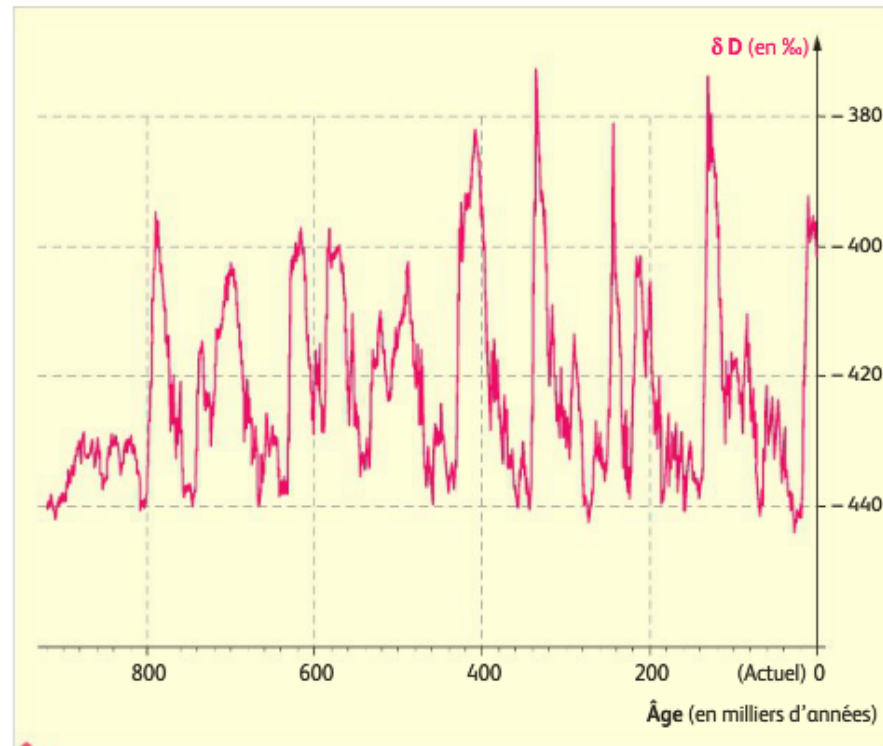
► Les forages réalisés au travers des calottes de glace polaires ont atteint des profondeurs de 3 000 m au Groenland et de 3 270 m en Antarctique sur le site du Dôme C.



b Localisation de quelques forages dans les calottes glaciaires :

GRIP : projet européen de carottage au Groenland.

EPICA : projet européen de carottage en Antarctique.



c δD de la glace en fonction de son âge dans la calotte glaciaire antarctique sur le site du Dôme C.

Introduction : mise en évidence de l'évolution de la composition atmosphérique depuis 800 000 ans.

- Activité 1 p 98-99 Bordas -

Reconstitution de l'histoire du climat depuis 800 000 ans grâce au carottage de glaces au Groenland et en Antarctique.



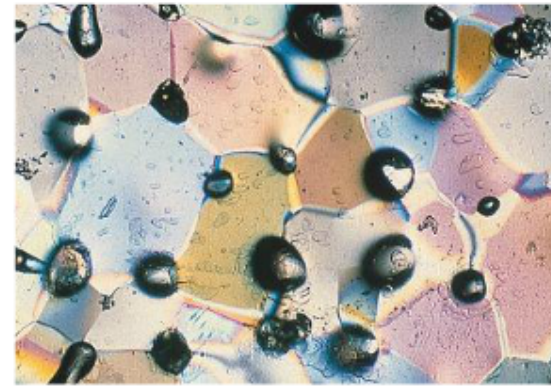
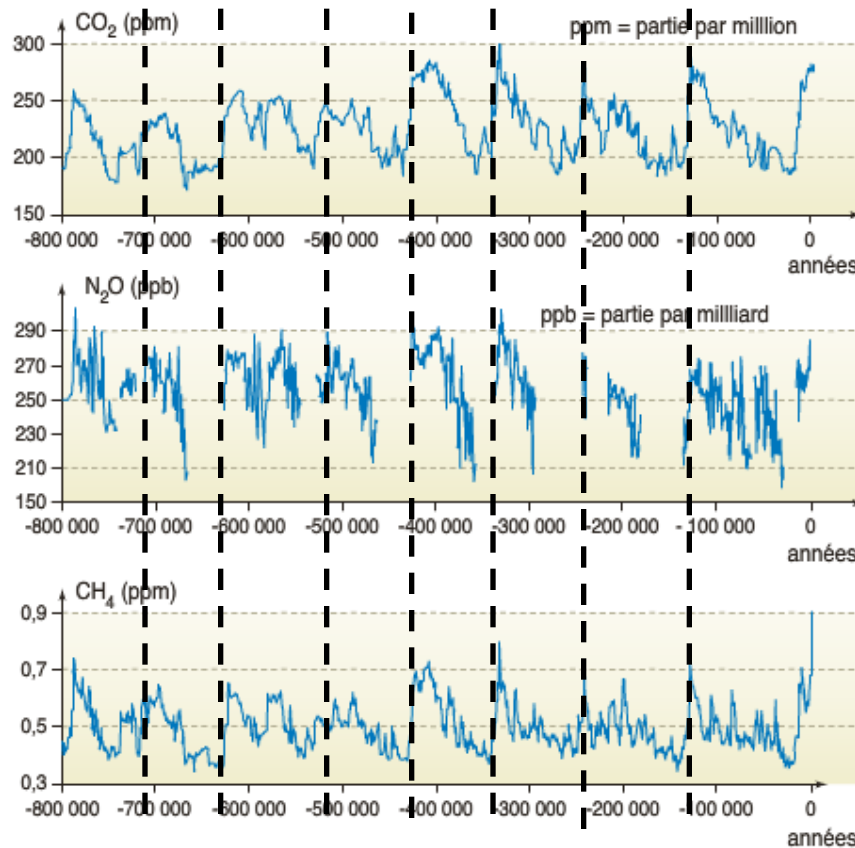
Un carottage de 3 200 m de profondeur, réalisé au Dôme C, en Antarctique, a permis d'atteindre des glaces âgées de 800 000 ans.

Les carottes, d'un diamètre d'environ 10 cm, sont découpées dans le sens de la longueur, une

moitié étant utilisée pour effectuer des mesures, l'autre étant soigneusement archivée pour d'autres mesures éventuelles dans le futur. Des analyses peuvent être faites soit sur la glace elle-même, soit sur les bulles d'air emprisonnées dans cette glace (*voir document 2*).

Carotte de glace extraite au Dôme C, en Antarctique

- Cyclité des variations des Gaz à Effet de Serre : CO_2 , N_2O et CH_4



Bulles d'air emprisonnées dans les cristaux de glace (observation au microscope polarisant)

Les bulles d'air piégées dans la glace lors de la transformation de la neige en glace contiennent de l'air de l'époque où s'est formée cette glace. Plus la glace est ancienne, plus ces bulles sont elles-mêmes anciennes. Leur analyse permet de connaître l'évolution de la concentration des gaz atmosphériques.

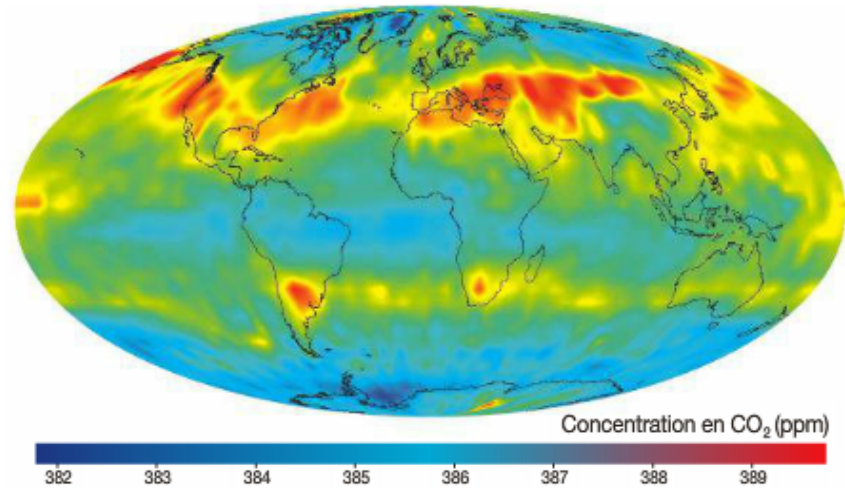
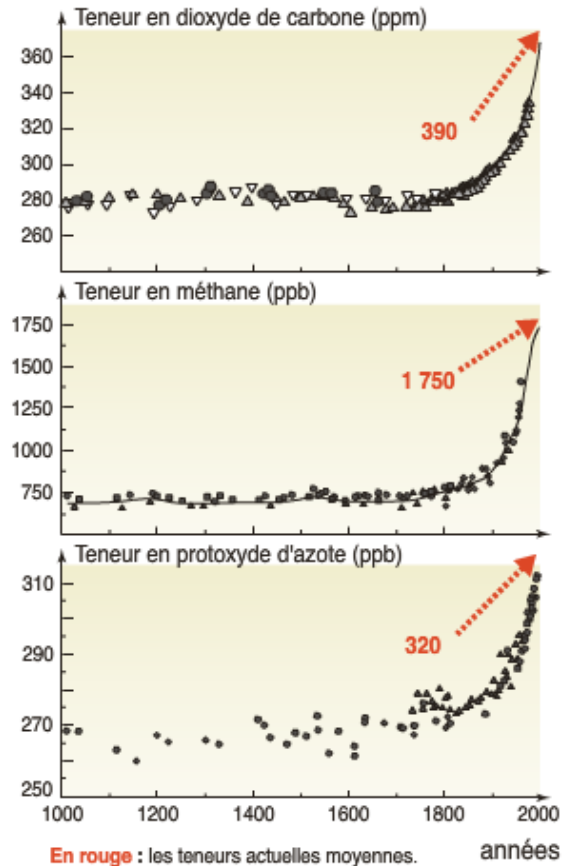
Le *graphe* représente cette évolution pour trois gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO_2), le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4) au cours des 800 000 dernières années.

Doc. 2 Les résultats de l'analyse des carottes de glace prélevées en Antarctique.

Fluctuations remarquables des GES :

« pics » de GES environ tous les 100 000 ans = mise en évidence de variations cycliques d'une périodicité d'environ 100 000 ans.

- Evolution actuelle de la composition atmosphérique



Mesure par satellite de la concentration en CO₂ dans la troposphère moyenne (8 km d'altitude), en juillet 2009

Les forages dans les glaces anciennes permettent de reconstituer l'évolution de la composition atmosphérique depuis -800 000 ans. L'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces plus récentes permet de retracer cette évolution au cours du dernier millénaire. Les données des graphiques proviennent de sites à forte accumulation de neige (sites côtiers de l'Antarctique, en particulier).

Pour les dernières décennies, des mesures directes ont été réalisées par satellite (*document ci-dessus*) et par des capteurs disséminés à la surface du globe.

Doc. 3 L'évolution millénaire de la teneur de l'atmosphère en certains gaz.

A plus petite échelle de temps, **augmentation très nette de la concentration des GES depuis 1850** (révolution industrielle). Conséquence des activités anthropiques.

Le taux de CO₂ dans l'air au plus haut depuis plus de 2,5 millions d'années

Le seuil de 400 parties par million (ppm) de dioxyde de CO₂ atmosphérique va être franchi au courant du mois de mai.

Un cap symbolique est en passe d'être franchi. Pour la première fois depuis que l'homme est apparu sur Terre. Et même depuis plus de 2,5 millions d'années. Le seuil de 400 parties par million (ppm) de dioxyde de carbone atmosphérique sera atteint courant mai, au point de mesure historique de Mauna Loa. Les premières mesures de l'ère moderne ont été menées, dès 1958, par l'Américain Charles David Keeling.

Actuellement 412 ppm !

La concentration de CO₂ dans l'hémisphère Sud, plus faible que celle de l'hémisphère Nord, ne franchira cependant le même palier que dans plusieurs années.

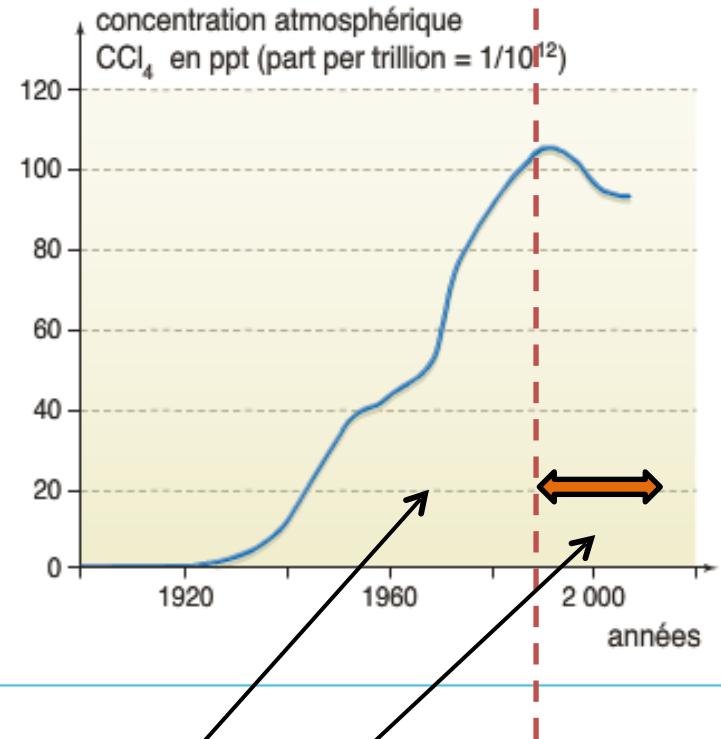
A Mauna Loa, la concentration de CO₂ pointait, vendredi 3 mai, à 399,29 ppm. La veille, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) rendait public son bilan climatologique pour 2012, notant l'abondance et l'intensité de phénomènes extrêmes : sécheresses, inondations, cyclones tropicaux, etc.

- L'évolution d'une pollution atmosphérique

Les **chlorofluorocarbures** ou **CFC** (dont le tétrachlorure de carbone, CCl_4) sont des molécules de synthèse qui ont été utilisées massivement à partir des années 1950 : leurs propriétés remarquables (inflammables, facilement compressibles, non solubles) expliquent leur utilisation dans l'industrie du froid comme fluide caloporteur, dans les bombes aérosols comme propulseur, dans les mousses synthétiques et les agents extincteurs.

Les CFC se retrouvent donc tôt ou tard dans l'atmosphère sous toutes les latitudes ; ils atteignent la haute atmosphère en une quinzaine d'années et participent alors de façon importante à la diminution de la concentration en ozone.

L'Union européenne a proposé, en 1989, une interdiction totale de l'utilisation des CFC durant les années 1990, interdiction approuvée par les États-Unis. La *courbe ci-contre* montre l'évolution de la concentration en CCl_4 mesurée soit dans les bulles d'air des glaces, soit par des capteurs pour les périodes les plus récentes.



Doc. 4 L'évolution d'une pollution atmosphérique.

- Augment^o des CFC : trou dans la couche d'ozone
- Diminution des CFC suite à leur interdiction

Problème :

Comment l'étude des glaces polaires peut-elle nous renseigner sur l'évolution récente du climat ?

Activité 1 - Utilisation des données géochimiques des glaces : le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD des glaces utilisés comme paléothermomètre

Q1- A partir des informations tirées de l'ensemble des documents suivants, **expliquez** pourquoi la glace « garde en mémoire » les conditions climatiques lors de sa formation.

Q2 - **Discutez** des variations de température depuis 800 000 ans.

Document 1 : Qu'est-ce que le $\delta^{18}\text{O}$? Qu'est-ce que le δD ?

L'oxygène est un mélange de deux principales formes isotopiques stables, en proportions très inégales : **99,8% de ^{16}O et 0,2% de ^{18}O** . Ces proportions se retrouvent dans les molécules d'eau de mer et d'eau douce : H_2^{16}O et H_2^{18}O . Les proportions relatives des deux isotopes dans un échantillon d'eau liquide ou de glace peuvent être calculées par le rapport suivant appelé $\delta^{18}\text{O}$:

$$\delta^{18}\text{O} = \left\{ \frac{\left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{échantillon}} - \left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{SMOW}}}{\left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{SMOW}}} \right\} \times 1000$$

Ce rapport est exprimé en ‰.

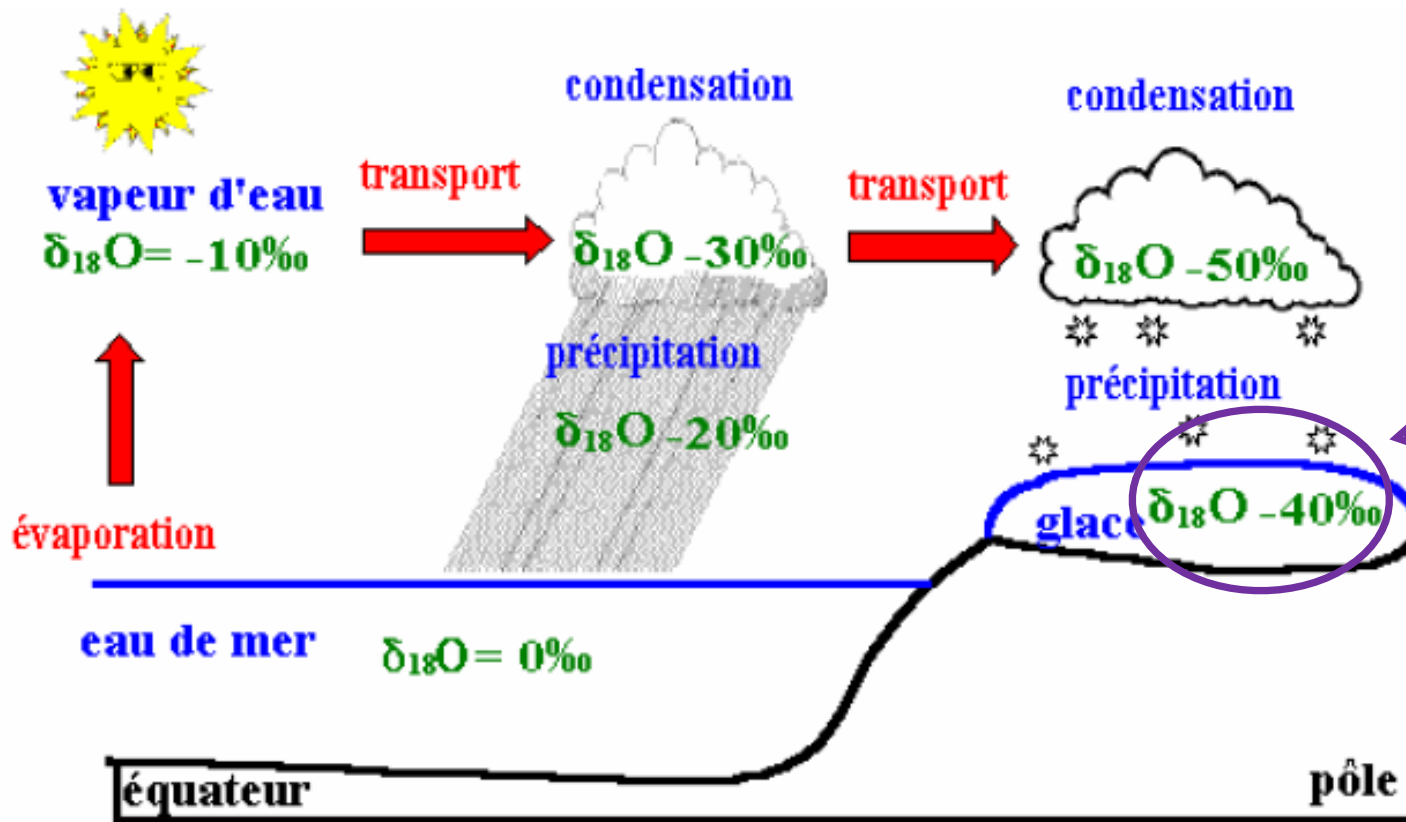
- Le $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}$ est une **référence** par rapport à laquelle on compare des compositions isotopiques. C'est la valeur moyenne de l'eau de l'océan actuel (SMOW = Standard Mean Ocean Water).
- On utilise cette référence car les différences relatives entre les rapports isotopiques sont faibles donc ceci permet de faciliter la lecture des mesures.
- La valeur du rapport $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$ de l'eau de mer actuelle (SMOW) est de $2 \cdot 10^{-3}$. La valeur du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer moyenne actuelle (SMOW) est logiquement de 0 ‰. (car $(2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 10^{-3} = 0 \dots$)

Un autre rapport isotopique est couramment utilisé comme thermomètre isotopique. Il s'agit du **rapport (D/H)**. Le deutérium (D) est l'isotope lourd de l'hydrogène de masse atomique 2 (^2H). Pour des raisons similaires à celles évoquées pour les isotopes de l'oxygène, on n'utilise pas ce rapport directement mais l'écart δD (en ‰) par rapport à un standard de référence de composition proche de celle de l'océan mondial. (Le rapport isotopique du standard $(\text{D}/\text{H}) = 155,76 \cdot 10^{-6}$)

$$\delta\text{D}_{\text{glace}} = \left[\frac{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{glace}} - (\text{D}/^1\text{H})_{\text{SMOW}}}{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{SMOW}}} \right] \times 1000$$

Document 2 : Variation du $\delta^{18}\text{O}$ et cycle de l'eau (idem pour δD)

L'évaporation favorise le passage de l'océan vers l'atmosphère des molécules les plus légères : la **vapeur d'eau se retrouve enrichie en ^{16}O** ; au contraire, la condensation favorise la précipitation des molécules les plus lourdes : **les océans se retrouvent enrichis en ^{18}O** .



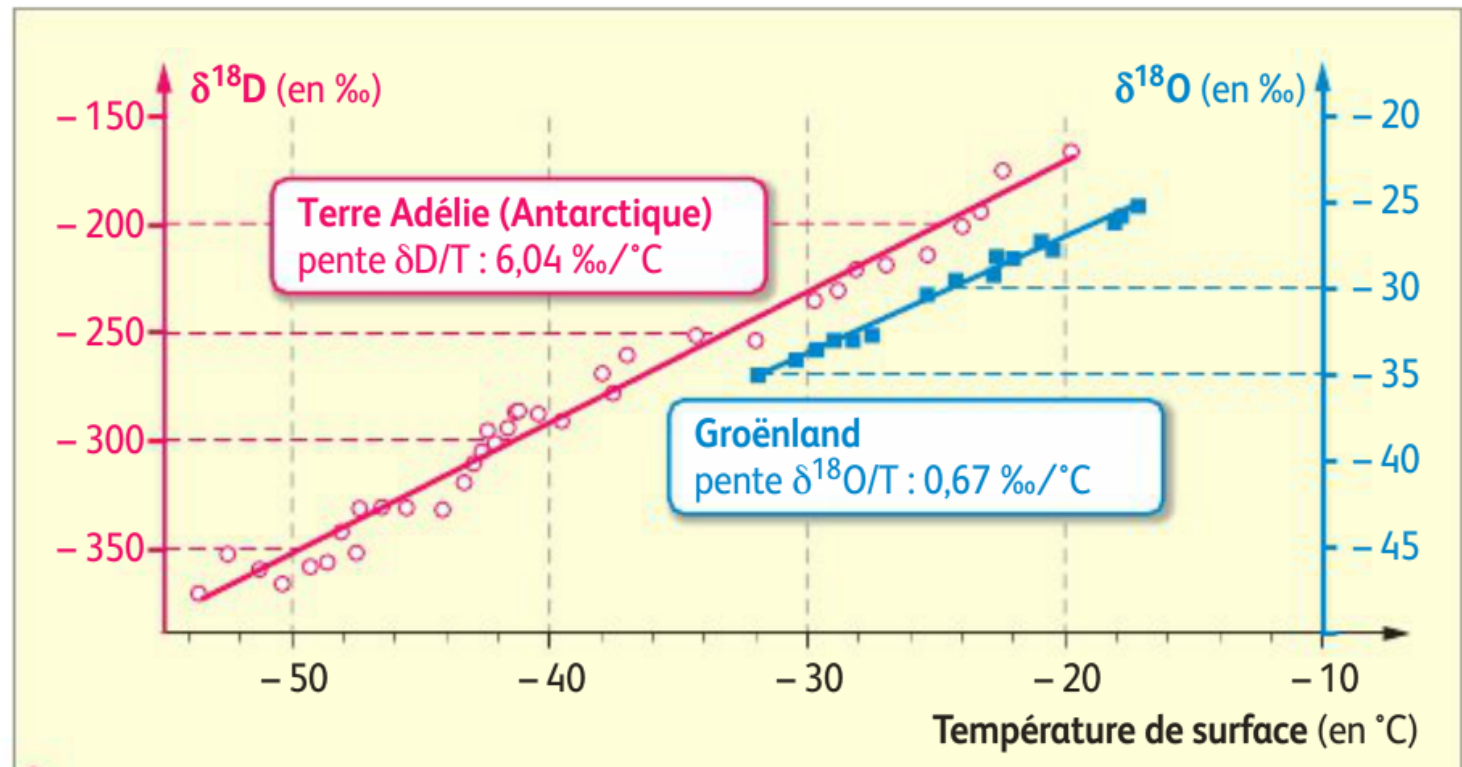
Ce qui nous intéresse, ce qu'on mesure dans les carottes de glace

Après évaporation à l'équateur, les masses d'air qui remontent vers les pôles se condensent et génèrent des précipitations plus riches en ^{18}O . Ainsi, la vapeur d'eau qui arrivera aux hautes latitudes (pôles) et qui se condensera sous forme de neige (échantillonnée dans les carottes de glace) aura « perdu » beaucoup de ^{18}O et **sera donc fortement enrichie en ^{16}O** . Le $\delta^{18}\text{O}$ de la neige (donc de la glace) est donc bien plus faible que celui de l'eau de mer dont elle est issue. C'est pourquoi il **est négatif**.

Document 3 : $\delta^{18}\text{O}$ et δD des glaces comme paléothermomètre (doc.1 p.100 Bordas)

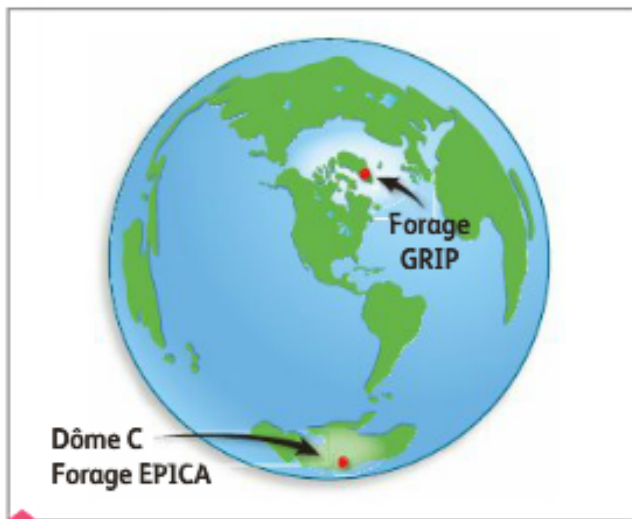
Compositions isotopiques de la neige en fonction des températures moyennes de formation de ses cristaux

▶ À différents endroits, on a mesuré la température moyenne au cours de l'hiver et la composition isotopique de la neige s'y étant accumulée au cours de cette même saison.



Document 4 : La composition isotopique des glaces anciennes

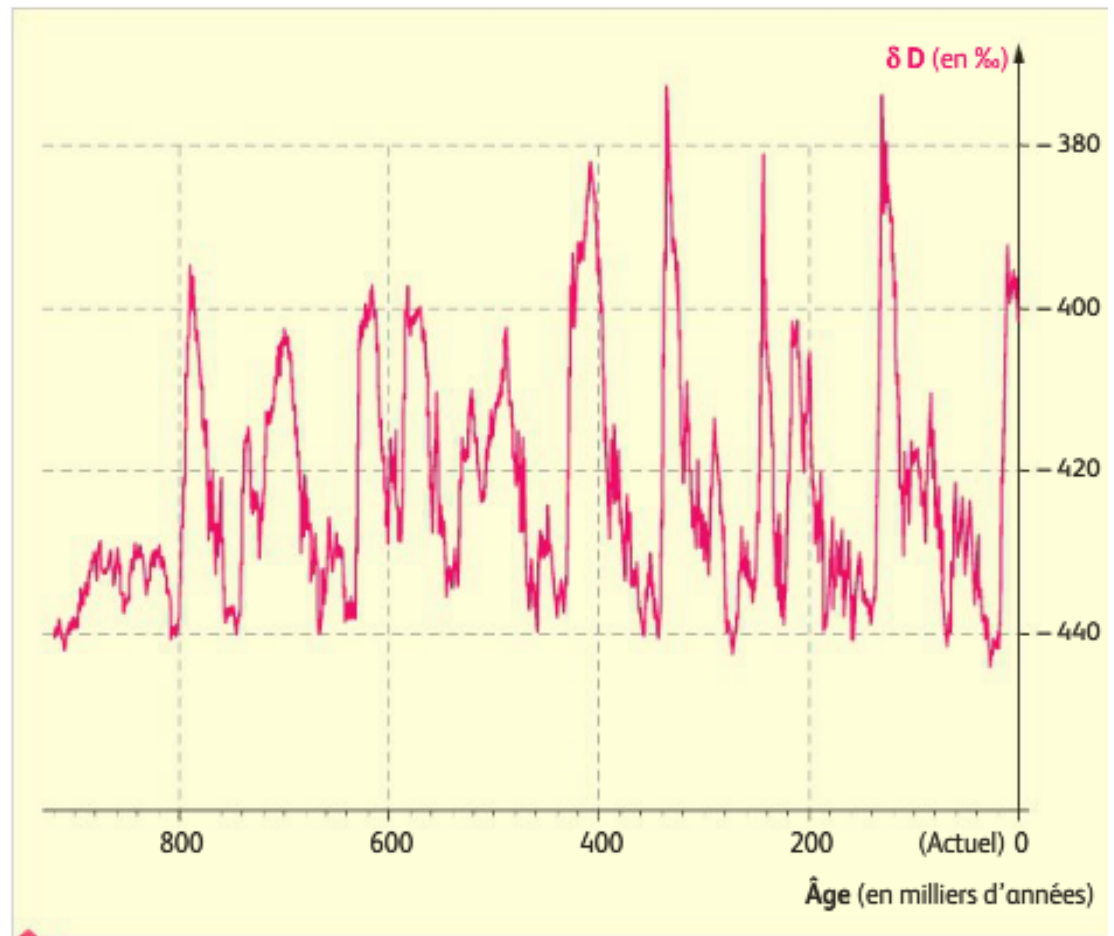
► Les forages réalisés au travers des calottes de glace polaires ont atteint des profondeurs de 3 000 m au Groenland et de 3 270 m en Antarctique sur le site du Dôme C.



b Localisation de quelques forages dans les calottes glaciaires :

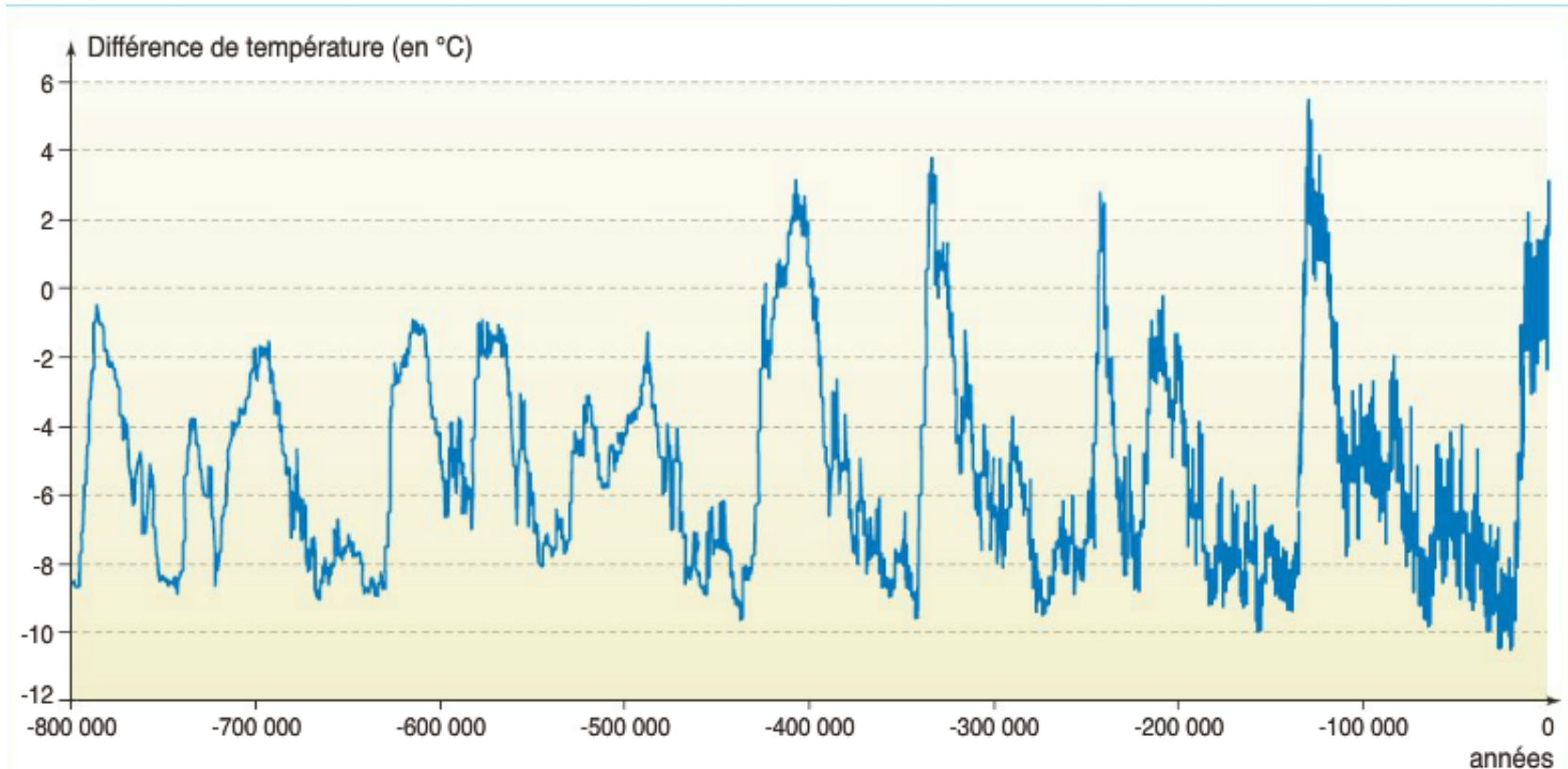
GRIP : projet européen de carottage au Groenland.

EPICA : projet européen de carottage en Antarctique.



c δD de la glace en fonction de son âge dans la calotte glaciaire antarctique sur le site du Dôme C.

Document 5 : Evolution de la température depuis 800 000 ans (doc.2 p.101 Bordas)



Ci-dessus, reconstitution des températures en Antarctique depuis 800 000 ans à partir des carottes de glace issues du site

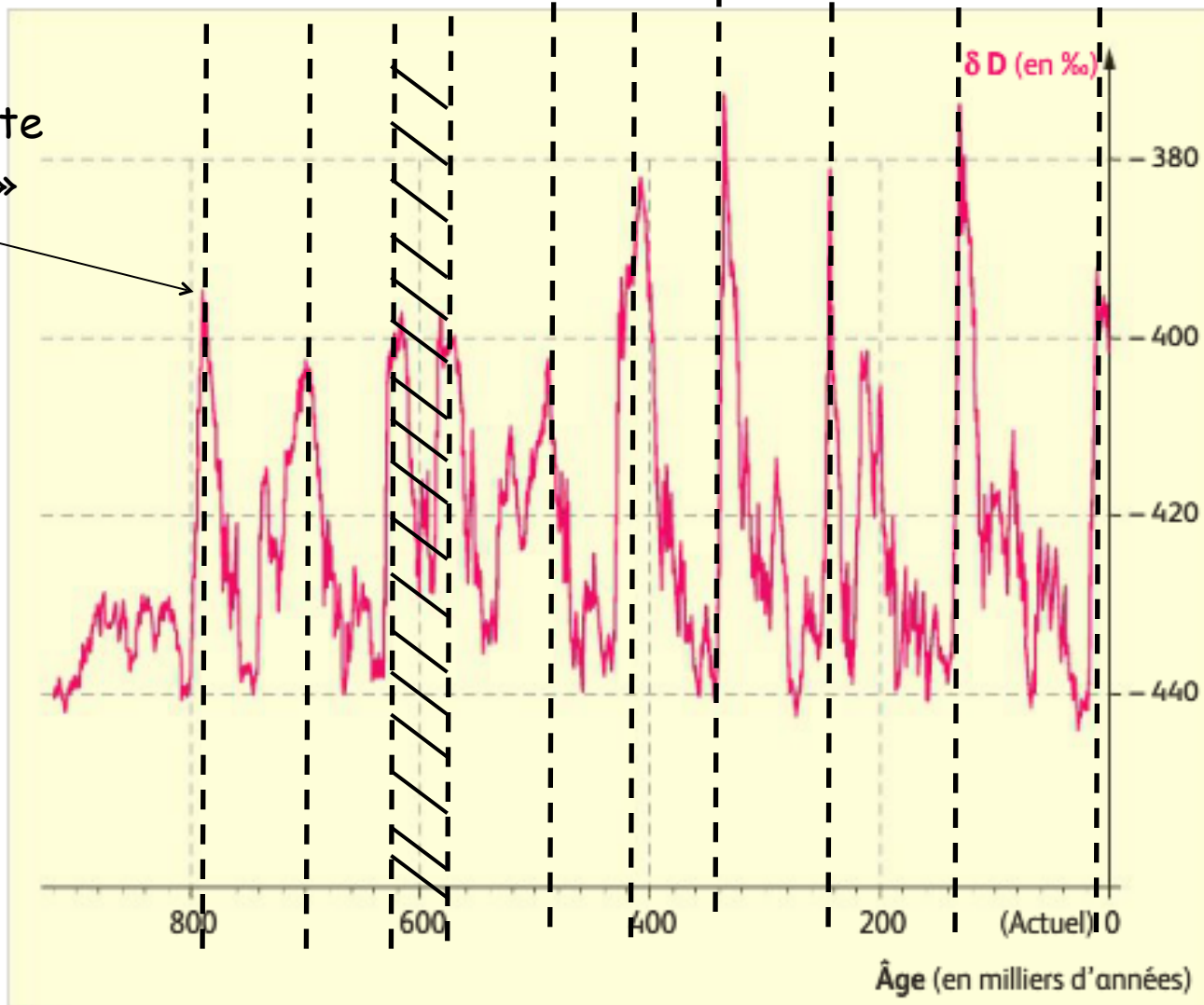
Dôme C. Le *graphique* représente la différence des températures par rapport à la moyenne des 1 000 dernières années.

Doc. 2 Évolution de la température depuis 800 000 ans (à partir des données du forage Epica, Dôme C).

Q1 - Plus il fait froid, plus lors de la remontée des masses d'air vers les pôles il y a « séparation » du ^{16}O et du ^{18}O . Le ^{16}O reste à l'état vapeur. Ainsi, plus il fait froid, plus la neige au niveau des pôles est enrichie en ^{16}O , et donc plus le $\delta^{18}\text{O}$ est faible.

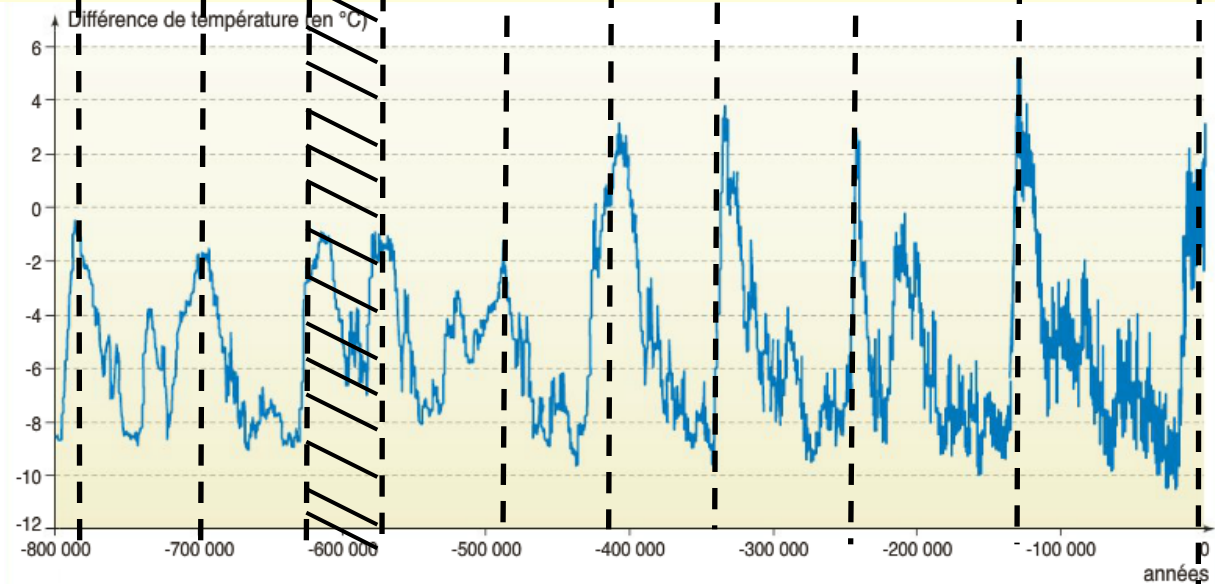
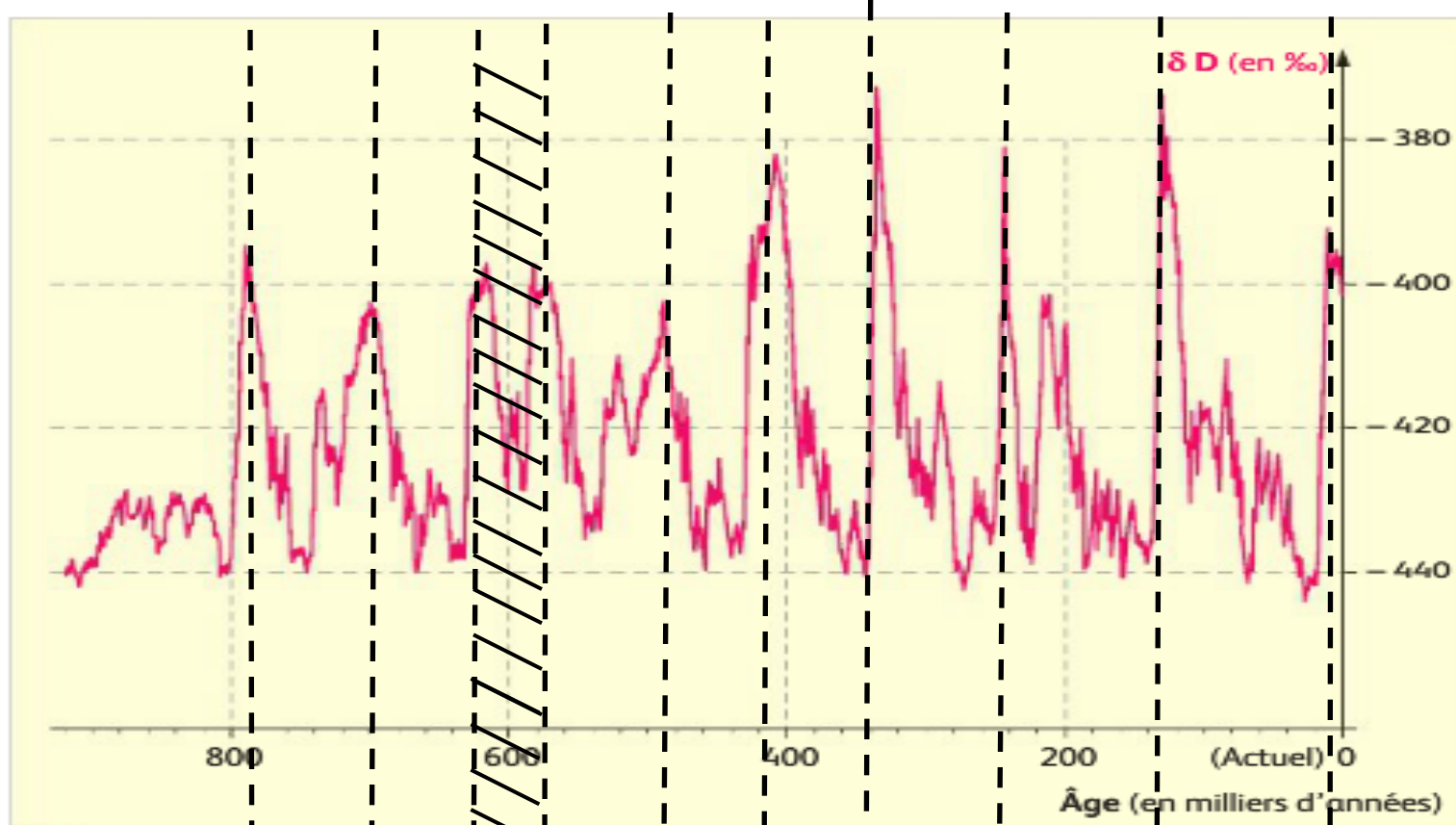
Conclusion à retenir : plus le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré dans les glaces est faible, plus la température était faible au moment des précipitations neigeuses.
Idem pour le δD .

« pic de haute température »

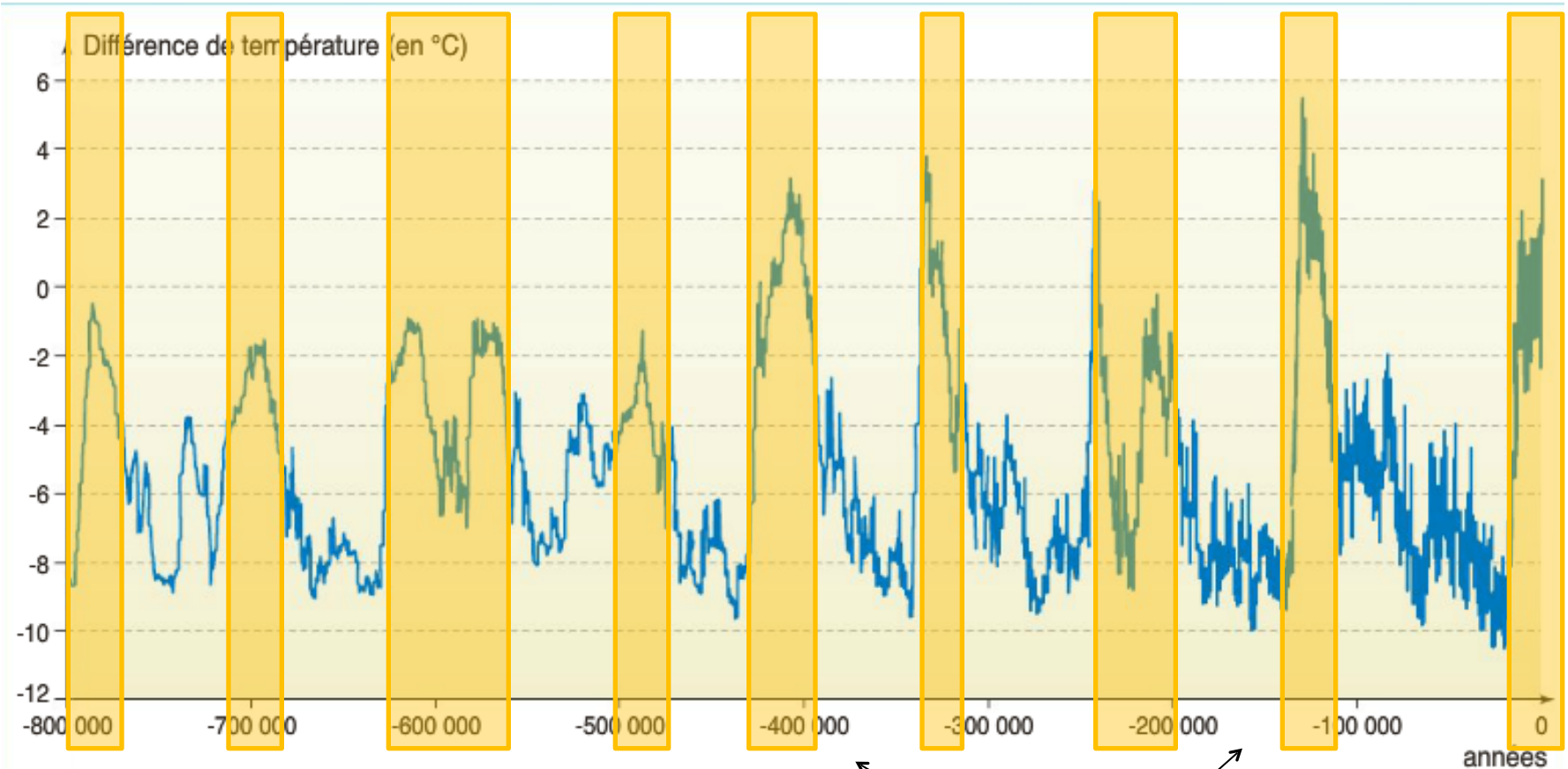


Q2. Ts les 100 000 ans env, « pic » de δD , donc période de haute température. Vérification à l'aide du doc 5.

Confirme la cyclicité de période 100 000 ans vue en intro.



Q2. Au cours de ces cycles de 100 000 ans, les températures ont variées de 8 à 12°C. Ce sont les cycles des **périodes glaciaires -interglaciaires**.



Périodes interglaciaires

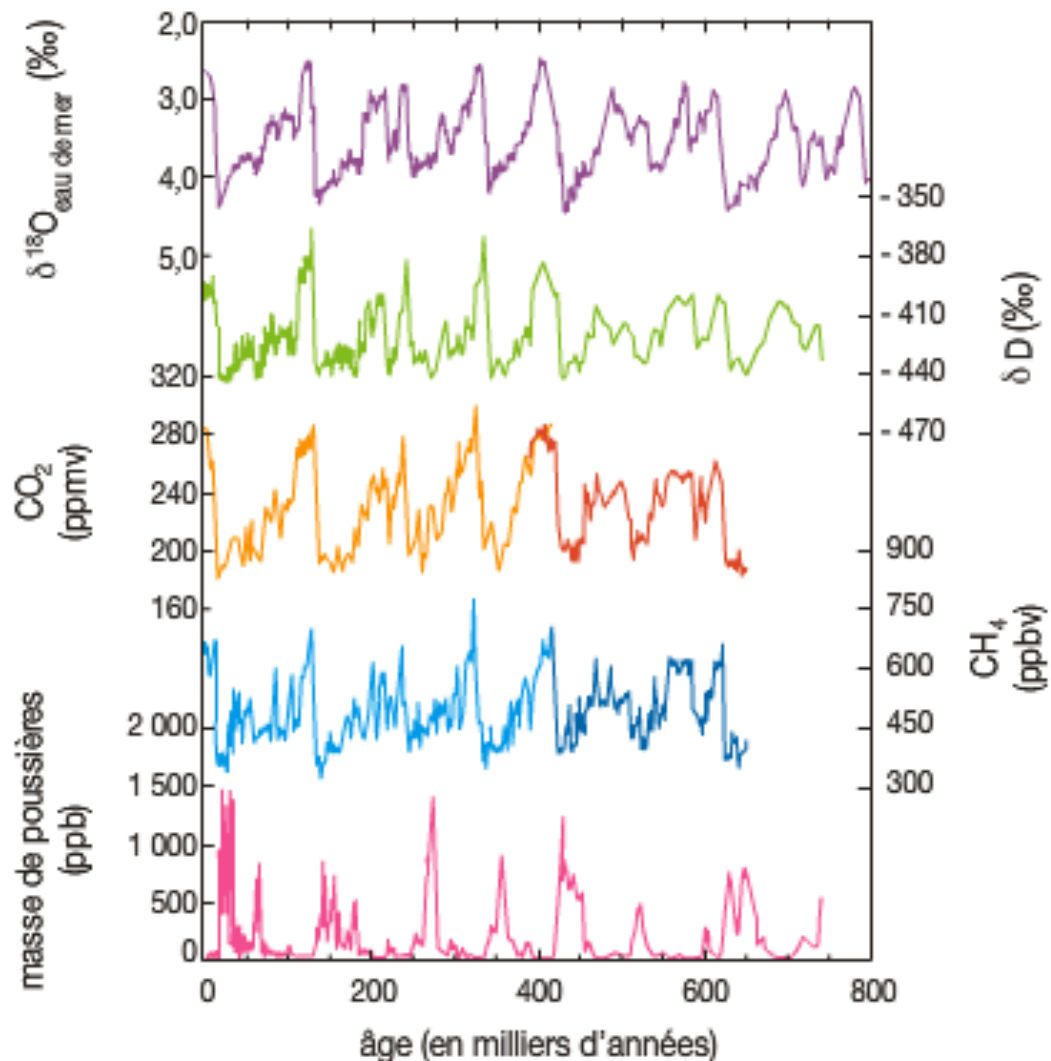
Périodes glaciaires

A l'intérieur de chacun de ces cycles, **d'autres variations existent**, d'une périodicité de 41 000 ans et 22 000 ans environ.

Activité 2. Mise en relation des différentes données issues de l'analyse des glaces

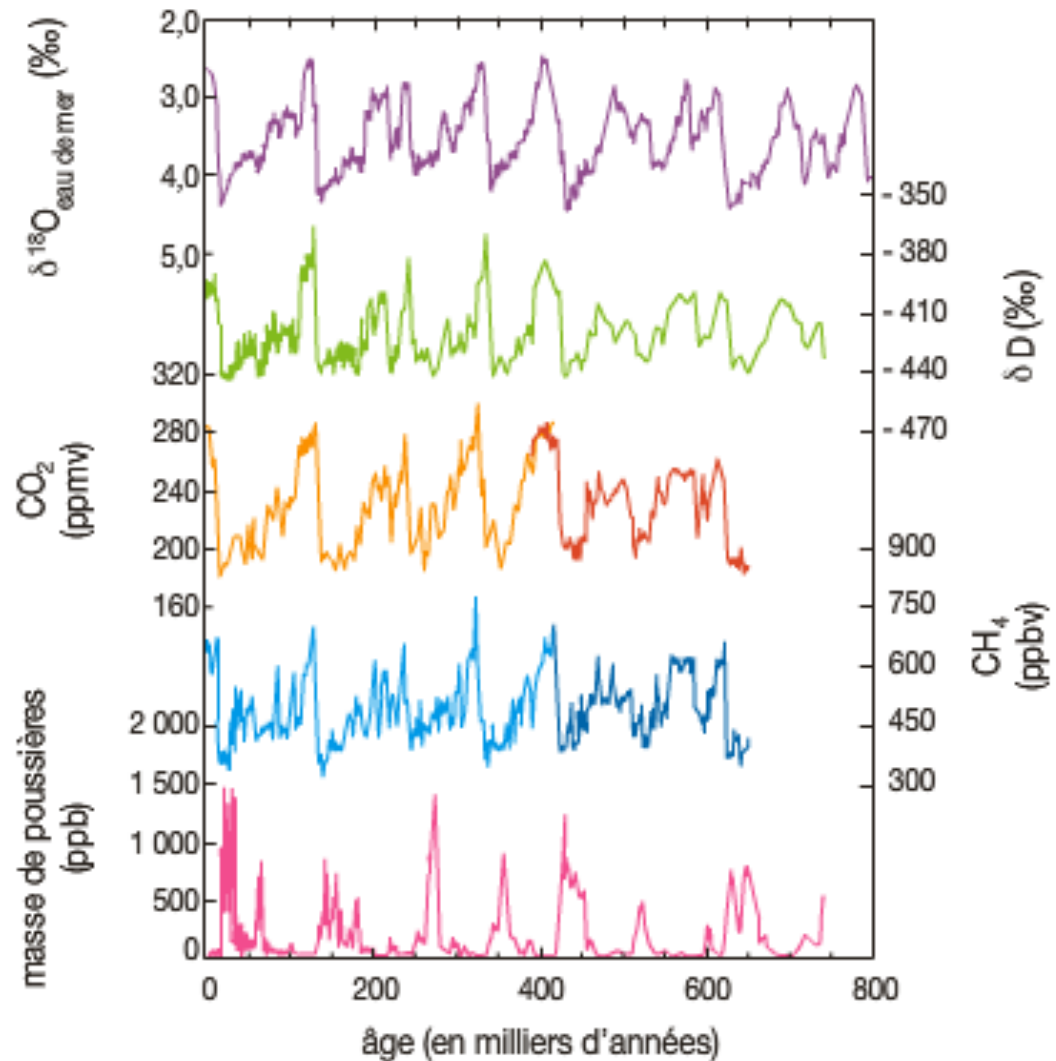
Q1 - Analysez le document suivant en mettant en relation les différentes données.

Le document ci-contre représente l'évolution de différents paramètres au cours du temps.



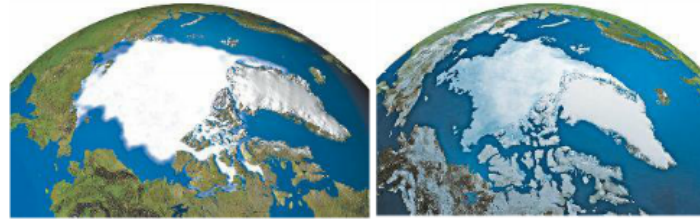
Q1 - Corrélation entre augmentation du taux des GES et périodes interglaciaires ($\delta^{18}\text{O}$ et δD élevés donc T° élevée)

- Cyclicité de 100 000 ans.
- A chaque fois : augmentation assez brutale des GES puis diminution plus lente.
- pas vraiment de corrélation avec la masse de poussière retrouvée dans les glaces.



Activité 3 - Les glaces polaires et l'évolution récente du climat

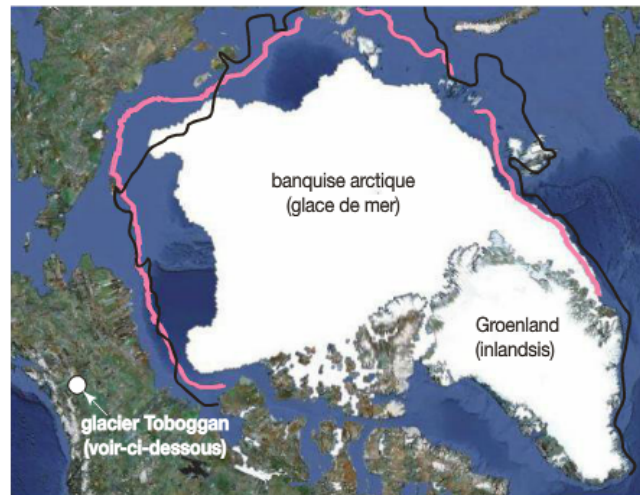
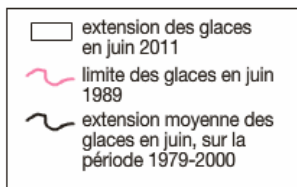
La surveillance par satellite de l'étendue de la banquise (glace de mer) bénéficie maintenant d'un bon « recul » : les données disponibles de 1979 à 2011 permettent de comparer l'étendue de la banquise à une même période, d'année en année. À long terme, des changements dans la banquise arctique sont un indice du changement climatique.



Extension minimale de la banquise au cours de l'année 1979 (septembre)

Extension minimale de la banquise au cours de l'année 2011 (septembre)

Activité 5 p 106
Bordas

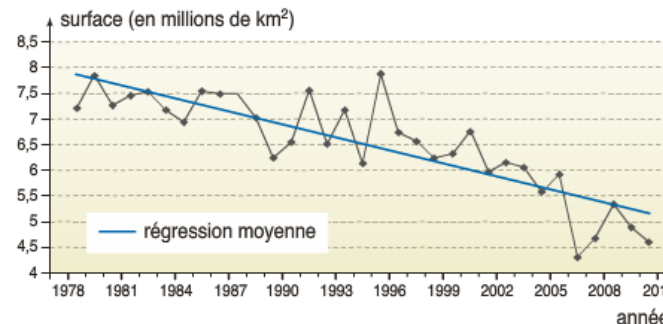


Été 1905



Été 2008

Modifications du glacier Toboggan, en Alaska, (61° nord ; 148° ouest) depuis un siècle

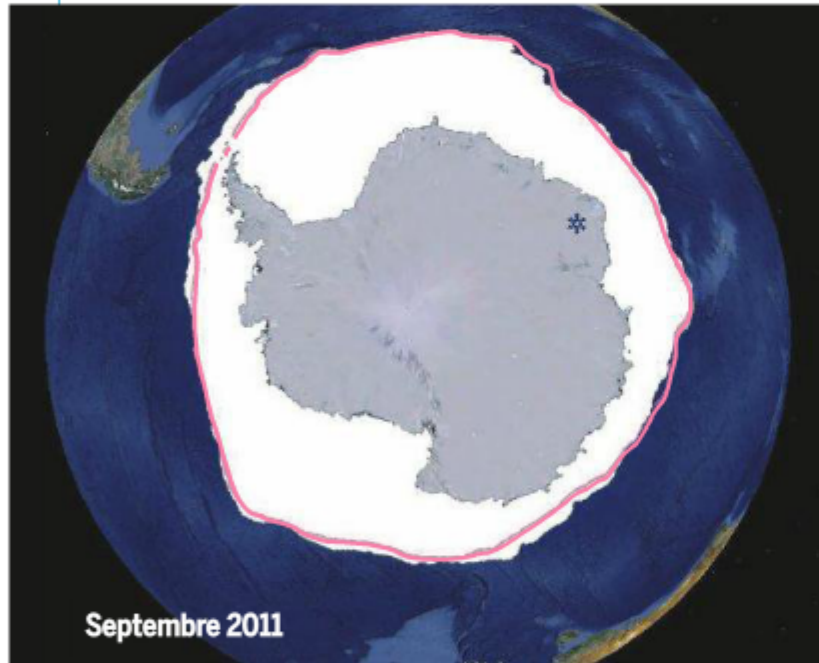




Évolution de l'extension de la banquise arctique au cours des trente dernières années

Q1 - Quels arguments permettent de mettre en évidence des modifications très récentes des glaces polaires ?

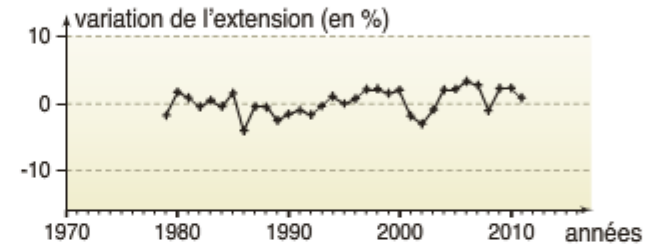
Q2 - Comparez les modifications dans la région arctique à celle de l'Antarctique.

Le continent Antarctique (en grisé sur l'image ci-dessous) est recouvert d'un **inlandsis** et entouré d'une large banquise. L'ensemble est surveillé par satellite.

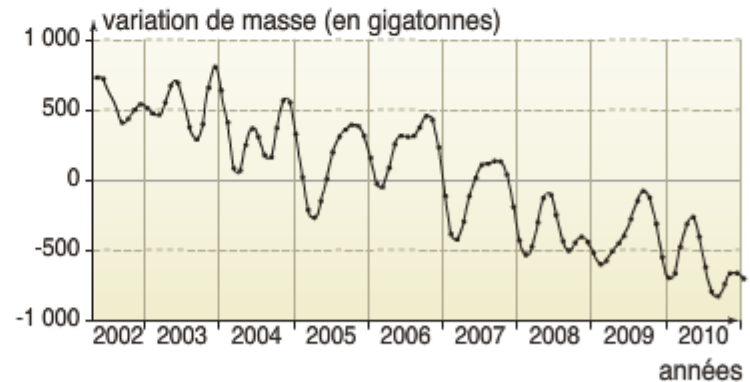


- a**
-  Extension des glaces en juin 2011
 -  Extension moyenne entre 1979 et 2000

Ainsi l'évolution de la surface occupée par les glaces (**a** et **b**) mais aussi l'épaisseur de la glace, et donc le volume et la masse de la calotte antarctique, sont évalués (**c**).

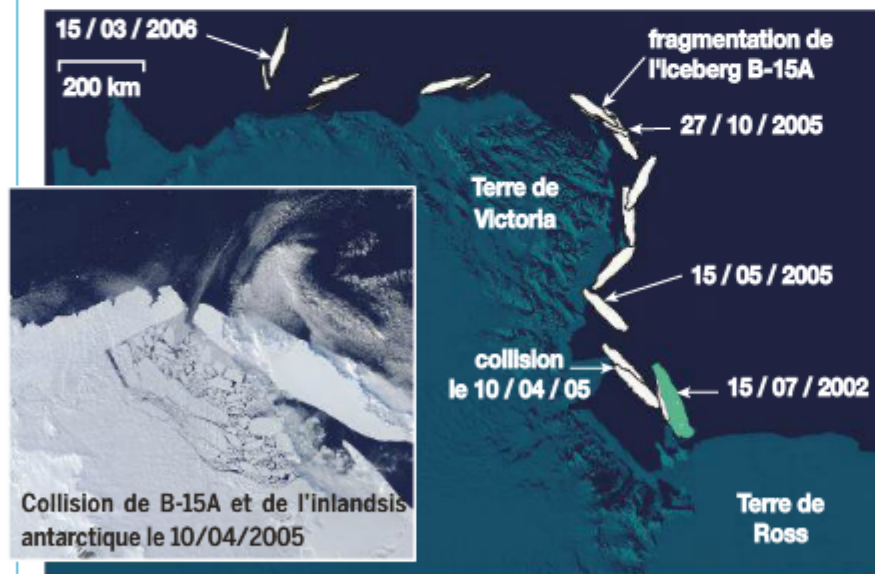


b Variation de l'extension des glaces antarctiques par rapport à la moyenne 1979-2000



c Variation de masse par rapport à la moyenne 2002-2011

Doc. 2 L'évolution de la superficie et de la masse des glaces en Antarctique.



Les images ci-contre correspondent au suivi par satellite d'un iceberg, l'iceberg B-15, qui s'est détaché de la Terre de Ross en 2000. Avec une surface de 11 000 km² (soit 25 % de plus que la Corse), c'est le plus gros iceberg jamais observé.

Au cours de sa dérive autour de l'Antarctique, il s'est fragmenté :

- le 10 avril 2005 (*photographie*), le plus gros fragment, l'iceberg B-15A, qui mesurait encore près de 3 000 km², a percuté l'inlandsis antarctique entre la Terre de Ross et la Terre de Victoria ;
- fin 2006, plusieurs fragments, dont un de près de 2 km de long, sont aperçus au large des côtes sud de la Nouvelle Zélande.

Doc. 3 La banquise entourant l'inlandsis antarctique se fragmente et génère de gigantesques icebergs.

Glaces polaires = banquise (étendue de glace saisonnière qui flotte sur l'eau - en Arctique principalement) + calotte polaire = inlandsis (glacier reposant sur un substratum rocheux - Groënland + continent Antarctique)

- En Arctique : diminution de la superficie (-2,7%) et de l'épaisseur (-40%) de l'Arctique en moins de 40 ans.

- En Antarctique : diminution importante de la masse de glace + fragmentation de nombreux icebergs

Bilan général (p 112 Bordas) :

• Les glaces polaires = archives climatiques

- Rapports isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD permettent de retrouver les paléotempératures de l'atmosphère au moment de la formation de la glace : reconstitution des températures depuis 800 000 ans.

- Mise en évidence de périodes glaciaires et interglaciaires qui se succèdent tous les 100 000 ans environ + variations à + petite échelle.

- Actuellement : période interglaciaire avec augmentation rapide et importante des T° depuis le milieu du XIX^{ème}.

• L'extension des glaces = marqueur des modifications récentes

- Diminution importante du volume des calottes et de la banquise depuis 30 ans. Preuve d'un réchauffement climatique.