

Thème 2 : Enjeux planétaires contemporains

TD1 : Evolution de l'atmosphère et développement de la vie



Introduction :

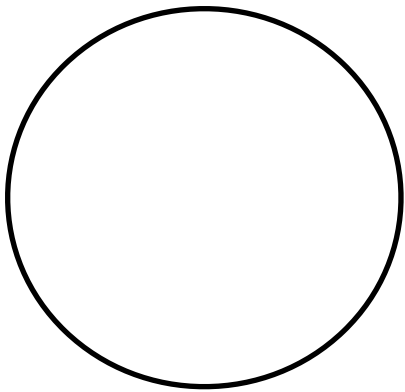
On sait aujourd'hui que l'atmosphère initiale de notre planète était bien différente de l'atmosphère actuelle.

Il s'agit ici de :

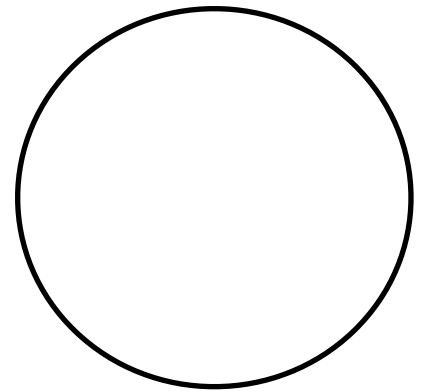
- Comprendre sur quels indices les scientifiques ont pu s'appuyer pour établir la composition de l'atmosphère primitive.
- Comprendre comment cette atmosphère a pu se transformer, et plus particulièrement le lien entre ces transformations et l'évolution de la vie.

Problème :

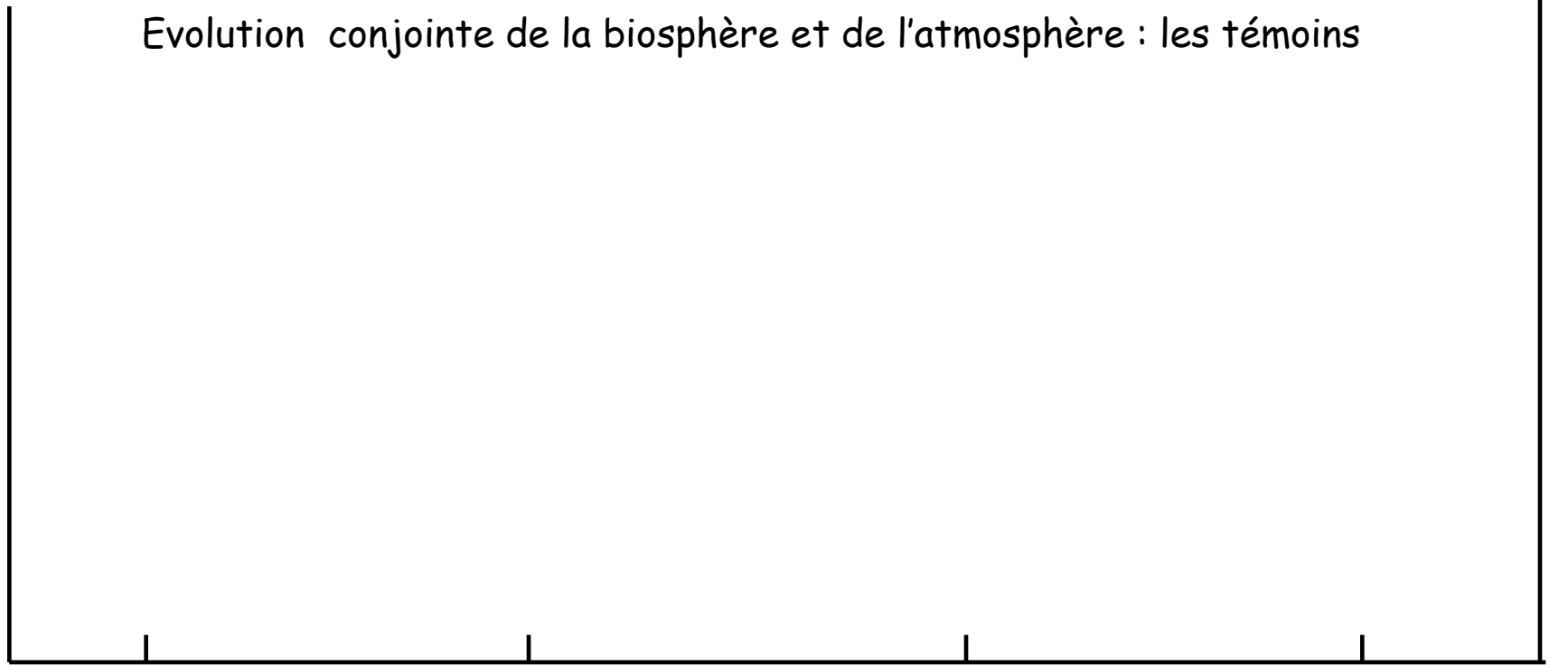
Comment expliquer l'évolution de l'atmosphère au cours des temps géologiques et quelle est son lien avec l'évolution de la vie sur Terre ?



Atmosphère primitive / Atmosphère actuelle



Evolution conjointe de la biosphère et de l'atmosphère : les témoins



4

3

2

1

Ga

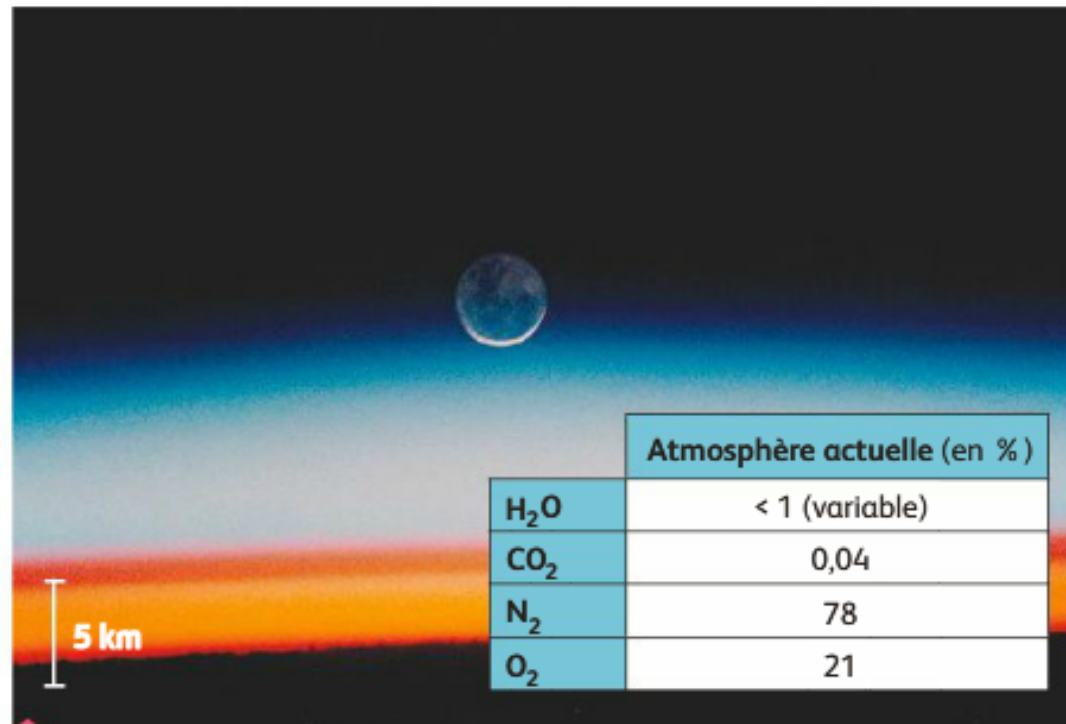
Activité 1 - Atmosphère primitive versus atmosphère actuelle

Question - A partir des informations tirées de l'ensemble des documents suivants, complétez les deux diagrammes circulaires du document-bilan et expliquez comment les scientifiques ont pu établir la composition de l'atmosphère primitive de la Terre.

Activité 1 - Atmosphère primitive versus atmosphère actuelle

Document 1 : l'atmosphère actuelle : une atmosphère oxydante

► L'atmosphère terrestre est une mince couche de gaz retenue par la gravité puisque 90 % de sa masse se trouve en-dessous de 16 km d'altitude. Cette enveloppe dite fluide est animée de mouvements verticaux et horizontaux du fait de l'inégale répartition de l'énergie solaire à la surface du globe. Sa richesse en O_2 et la présence d'eau en font une enveloppe originale dont la composition est unique dans le système solaire.



Composition de l'atmosphère terrestre actuelle.

Document 2 : La formation des enveloppes terrestres et l'apport des météorites.

a. Accrétion et différenciation de la Terre

Il y a 4,5 milliards d'années, âge du système solaire, la Terre a commencé sa formation par **accrétion** de petits corps célestes, de poussières et de gaz, qui se sont agglutinés pour former des « embryons de planète ».

Accrétion : croissance d'un objet géologique par apports successifs de matière.

La Terre subit au début de sa formation un bombardement météoritique intense, entraînant une forte élévation de la température et donc la fusion des roches : on parle alors de « **Terre primitive magmatique liquide** ».

Au sein de cette Terre magmatique, les éléments chimiques les plus lourds (Fe et Ni) se rassemblent par gravité vers le centre pour former un noyau dense, les éléments plus légers (O, Si, Ca, Na et K) migrent vers la surface pour former les roches silicatées de la croûte. Entre croûte et noyau, se forme le manteau. Il s'agit de la **différenciation** de la Terre.

Différenciation : mise en place des enveloppes concentriques de la Terre par migration des éléments chimiques.

L'intensité des bombardements diminue, donc la température de la Terre aussi, elle se solidifie : on parle de « **Terre solide différenciée** ».

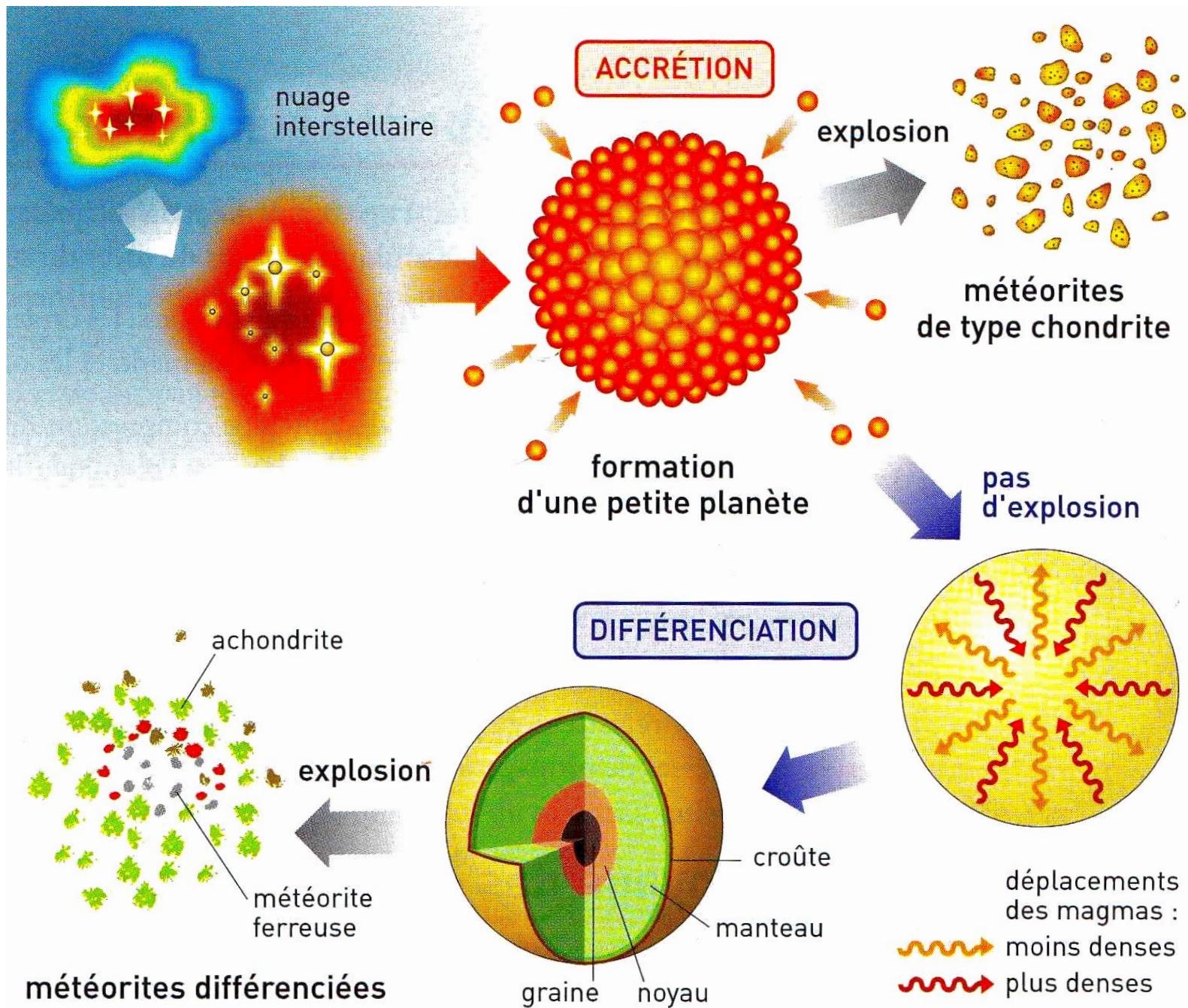
b. Les météorites, témoins de la formation de la Terre (doc 4 p 81 Bordas)

- Les plus vieilles roches du système solaire sont des météorites (4,5 Ga). Parmi celles-ci, les **chondrites** sont apparues en même temps que le reste du système solaire et n'ont subi aucune évolution notable. En revanche, les achondrites proviennent de la fragmentation d'objets ayant préalablement subi une différenciation (à l'origine du noyau, du manteau et des croûtes) et un dégazage (à l'origine de l'atmosphère).
- N'ayant subi ni différenciation ni dégazage significatif, **on considère que les chondrites ont une composition chimique semblable à la composition chimique globale moyenne de l'ensemble de la Terre.** Elles fournissent une « image » de la Terre primitive peu après son accrétion. En laboratoire, on peut chauffer fortement ces chondrites et provoquer leur dégazage afin d'estimer la composition chimique probable de l'atmosphère primitive de la Terre.



Gaz obtenus par chauffage d'une chondrite (en %)

H ₂ O	80
CO ₂	12
N ₂	5
Autres gaz (SO ₂ ...)	3
O ₂	0



Document 3 : Atmosphère primitive et analyse des gaz volcaniques (doc 3 p 81)

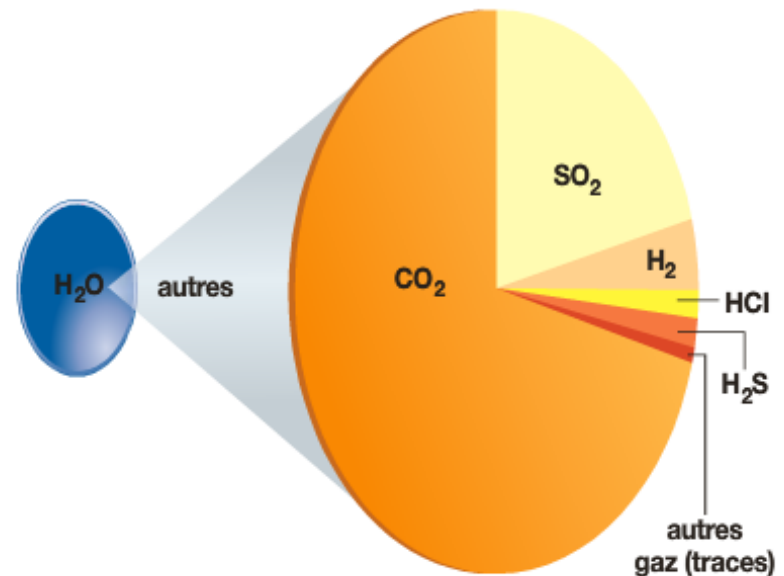
• L'analyse isotopique des **gaz rares de l'atmosphère (argon, xénon et hélium)** fournissent des informations sur l'origine de l'atmosphère primitive. Cette « signature » particulière a permis aux scientifiques d'établir que **l'atmosphère terrestre s'est formée par un dégazage intense et précoce du manteau terrestre** au tout début de la différenciation de la Terre (pendant les premiers 150 millions d'années environ). Ce dégazage s'est poursuivi par la suite mais de manière lente et continue.

• Les gaz volcaniques résultent du dégazage du manteau. Ils sont émis lors de la remontée de magmas vers la surface. Chaque année, les volcans produisent ainsi plusieurs dizaines de millions de tonnes de gaz (de 20 à plus de 100 millions selon les estimations et l'importance de l'activité volcanique).

• La composition des gaz volcaniques varie en fonction du type d'éruption. Cependant, d'une façon générale, les trois composants les plus importants sont respectivement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et l'anhydride sulfureux. Le *graphique* fournit les proportions des principaux gaz émis par les volcans.



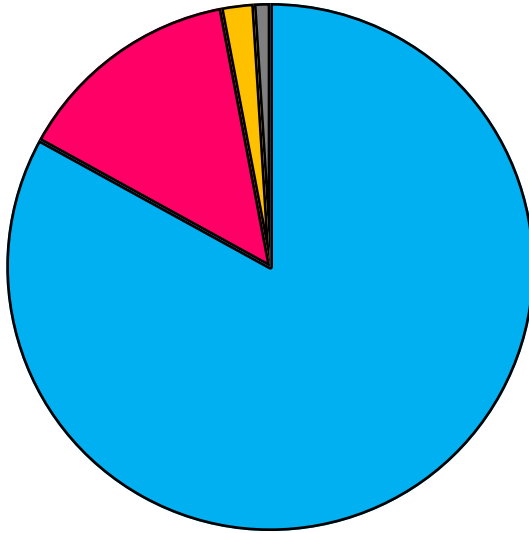
Prélèvement de gaz au niveau d'une fumarolle



Composition des gaz volcaniques

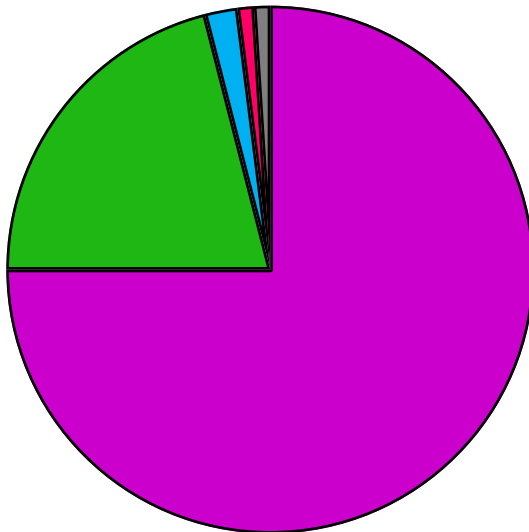
Bilan :

Atmosphère primitive (150 Ma) avant formation des océans



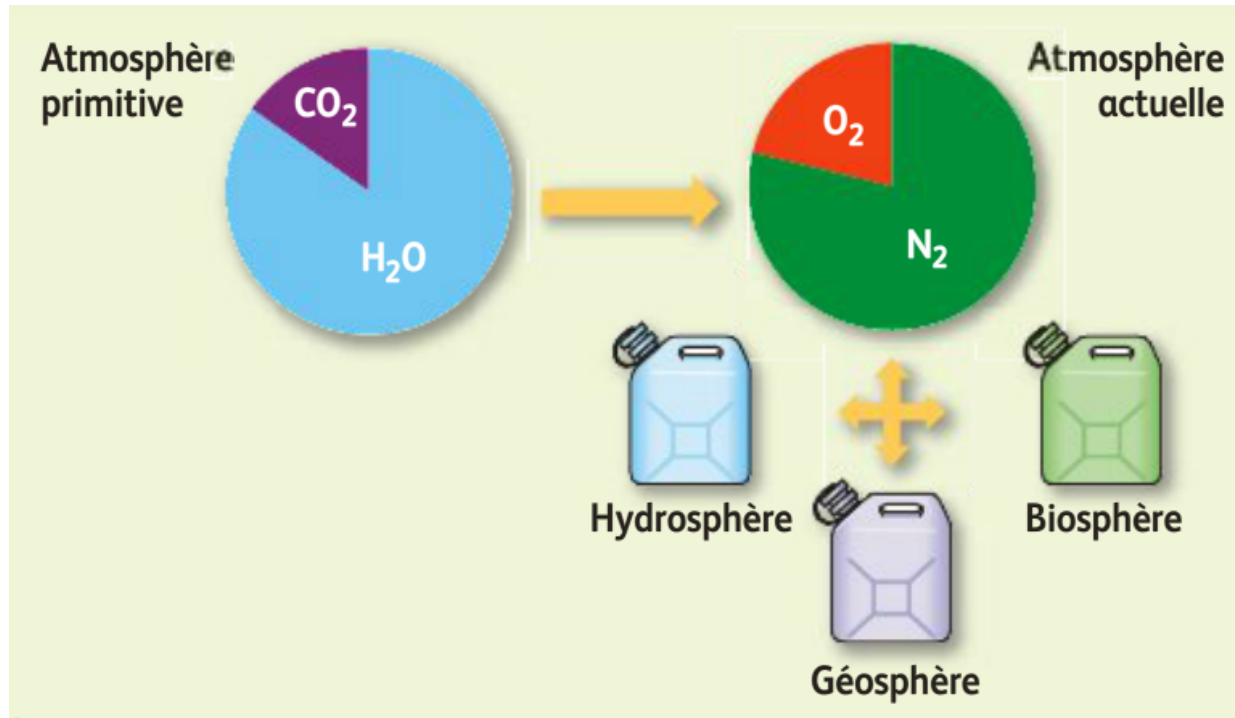
- H2O (83%)
- CO2 (14 %)
- SO2 (2 %)
- autres (1 %) : N2, H2S, gaz rares...

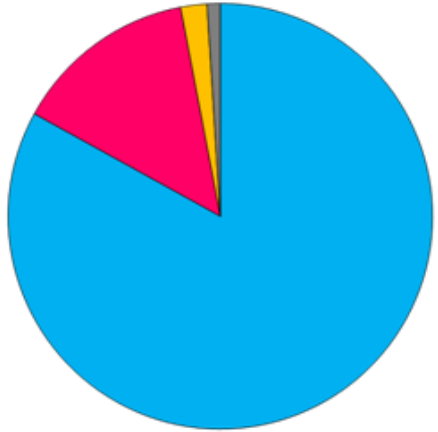
Atmosphère actuelle



- N2 (78 %)
- O2 (21 %)
- H2O (<1%)
- CO2 (0,04%)
- autres (CH4, O3, autres gaz rares)

- L'analyse des gaz rares indique que l'atm s'est formée essentiellement par **dégazage du manteau** ds les 100 premiers Ma qui ont suivi la format° de la T. Ce dégazage continue auj mais de manière lente et continue.
- La composi° de l'atm primitive (avant format° des océans) a été établie grâce à l'étude des chondrites et des gaz volcaniQ. Elle devait être **réductrice** (pas de O_2), **très riche en H_2O (85 %)** et en **CO_2 (15%)**.

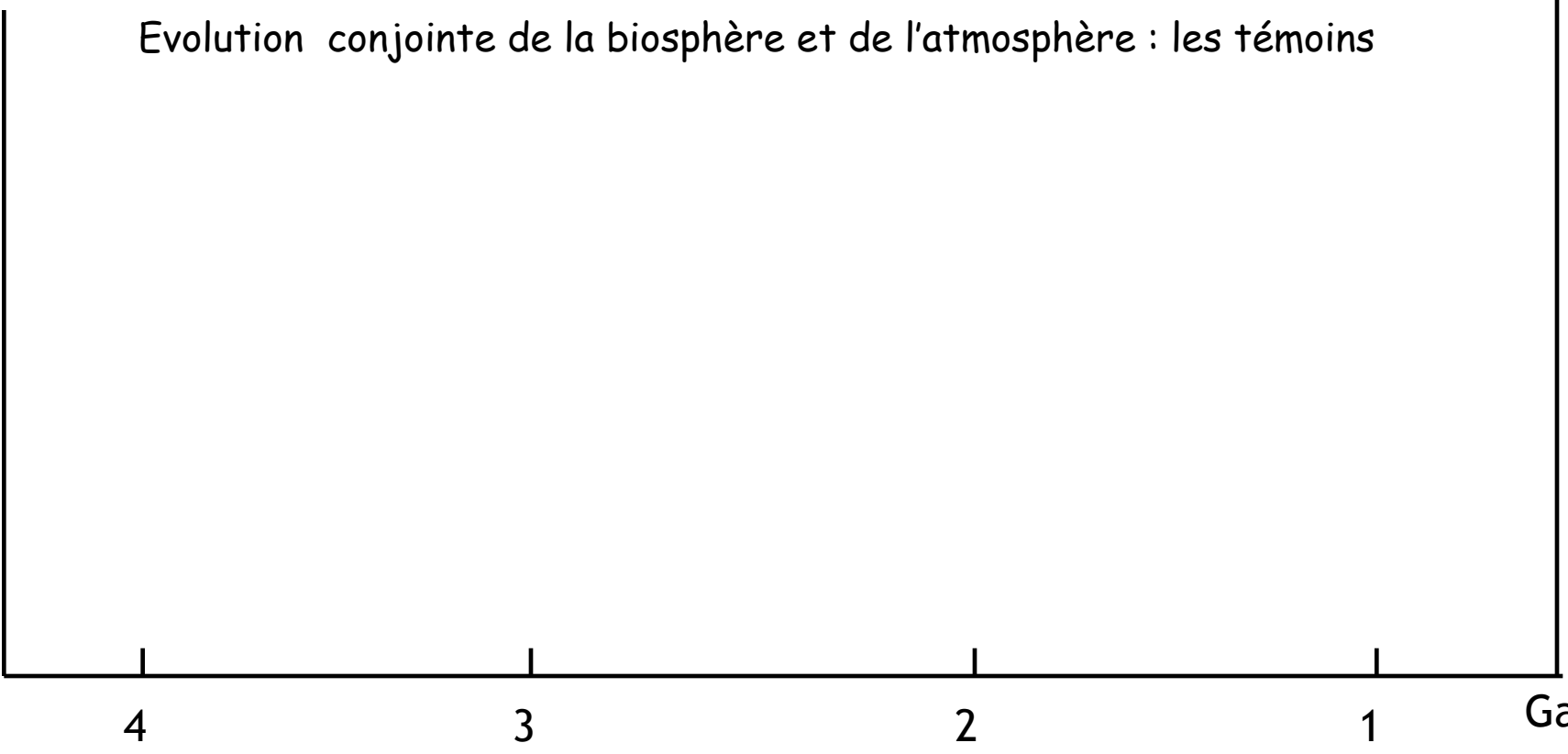




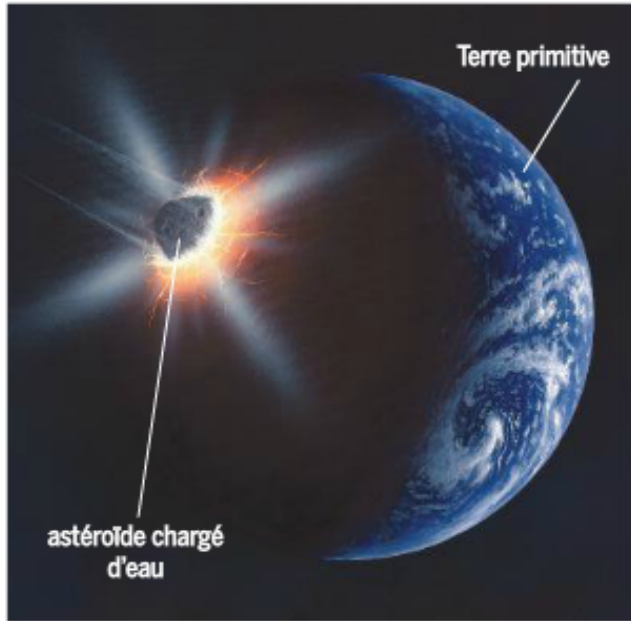
Atmosphère primitive / Atmosphère actuelle



Evolution conjointe de la biosphère et de l'atmosphère : les témoins

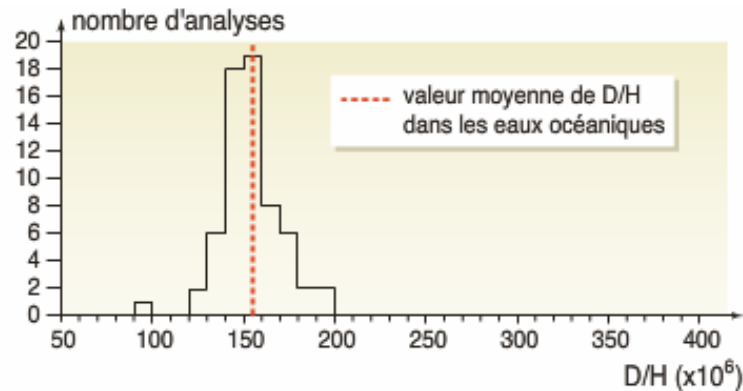


Transition : refroidissement de la Terre et formation des premiers océans (doc 1 p 82 Bordas)



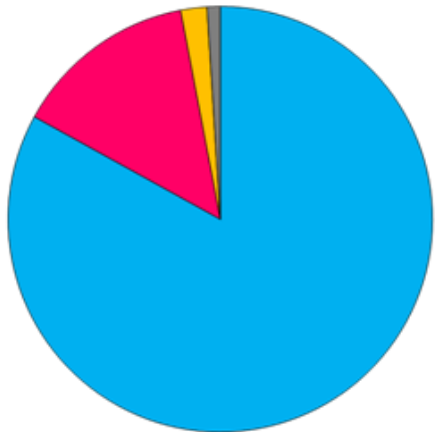
• La Terre s'étant formée par accréation d'objets célestes, l'eau a nécessairement été apportée par ces objets : les **comètes** (de « grosses boules de neige sale »), les **astéroïdes** et les **météorites**.

• Des mesures de la proportion des isotopes de l'hydrogène, H et D (deutérium), dans des météorites que l'on récolte actuellement sur Terre (*graphe ci-dessous*) confirment cet apport d'eau extraterrestre. Les spécialistes pensent que la formation des océans a été « rapide ». Que la vapeur d'eau ait été libérée directement lors des collisions de météorites ou secondairement par dégazage intense du manteau supérieur, cette vapeur d'eau a pu se condenser en pluies diluviennes lorsque la température de surface est devenue suffisamment faible. Certains arguments suggèrent qu'un ou des océans existaient déjà quelques 150 Ma après la formation de la Terre.

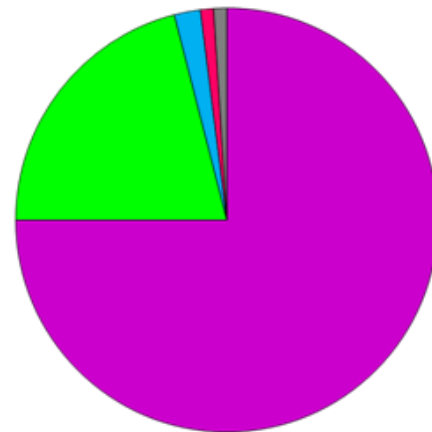


Doc. 1 La formation des premiers océans.

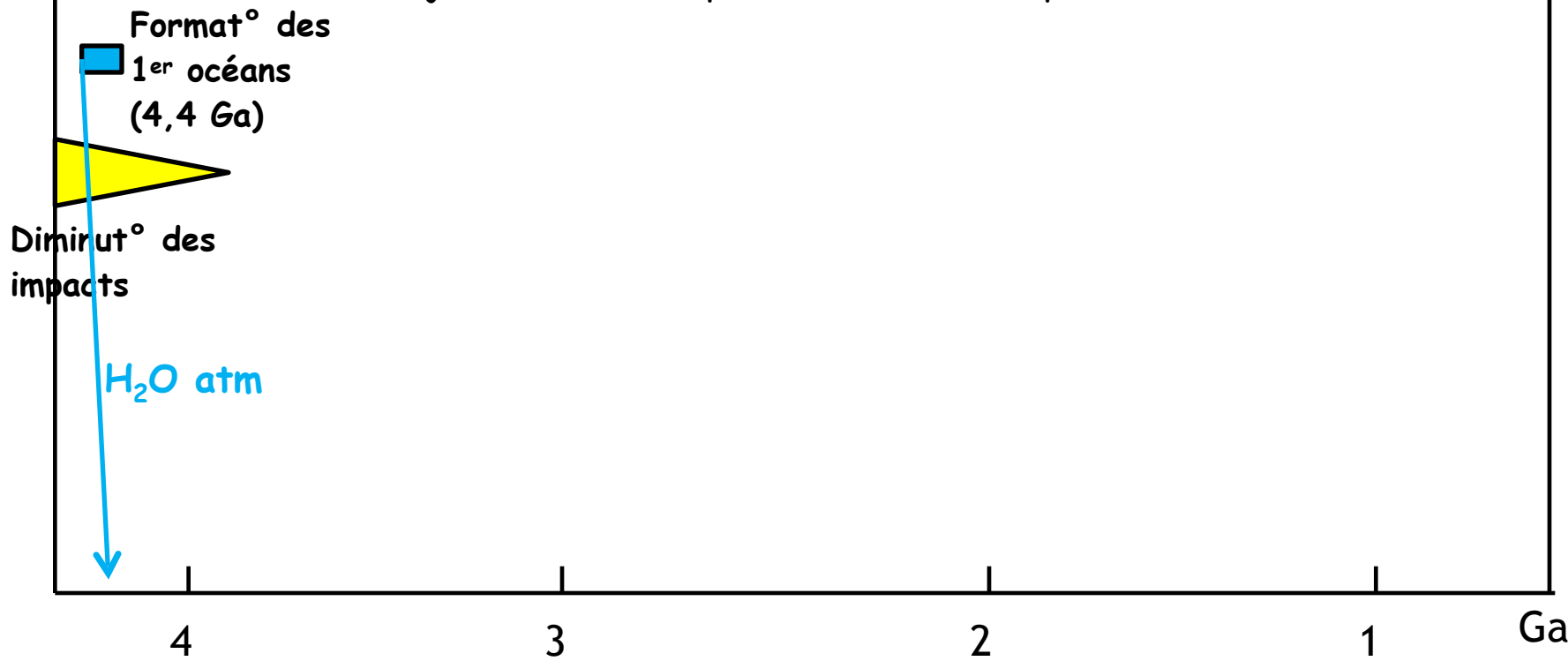
Complétez votre document-bilan.



Atmosphère primitive / Atmosphère actuelle



Evolution conjointe de la biosphère et de l'atmosphère : les témoins



- Une partie de la **vapeur d'eau** de l'atm primitive a été apportée par des **météorites** au tout début de la format° de la T. Celle-ci provient aussi du **dégazage du manteau**.
- Le **refroidissement** de la planète (diminution des bombardements météoritiques + évacuat° de la chaleur accumulée lors de l'accrét°) a entraîné la **condensat° de la vapeur d'eau** et la formation d'océans dès les 150 premiers Ma après la format° de la T (donc très tôt).

Ceci a donc entraîné la **diminut° de la vapeur d'eau ds l'atm primitive**.

Activité 2 - Evolution conjointe de la biosphère et de l'atmosphère

A. La chute du CO₂ atmosphérique

Document 1 : Un stockage probable du CO₂ dans les roches carbonatées (doc.3 p.83 Bordas)

- La roche ci-contre, âgée de 3,5 milliards d'années (Ga), est un conglomérat. Il s'agit d'une roche sédimentaire formée de galets soudés entre eux par un ciment. Les galets (des fragments de laves, de granitoïdes...) ont été roulés et usés par l'eau avant de se déposer et de se cimenter. De telles roches attestent donc de la présence d'eau liquide à cette époque ancienne. En effet, avec le rayonnement solaire de l'époque (estimé à 75 % du rayonnement actuel), si le un taux de CO₂ atmosphérique avait été identique au taux actuel, la température de la Terre aurait dû être de - 20 °C, donc sans eau liquide. Le taux de CO₂ dans l'atmosphère était beaucoup plus élevé qu'aujourd'hui, augmentant d'autant l'effet de serre.

- Par ailleurs, des traces glaciaires, trouvées en Amérique du Nord et en Finlande, ont un âge de 2,5 Ga ou un peu plus. Si, à cette époque, le taux de CO₂ était resté le même que celui d'il y a 3,5 Ga, il aurait fait trop chaud. Il faut donc supposer un effet de serre moins important, et donc un taux de CO₂ dans l'atmosphère plus faible.

- Ces indices montrent que le taux de CO₂ atmosphérique n'a pas cessé de diminuer depuis l'atmosphère primitive : de 100 000 fois la quantité actuelle il y a 4,5 Ga, à environ 5 à 15 fois la quantité actuelle il y a 600 Ma. La formation de roches carbonatées pourrait expliquer le stockage du CO₂ atmosphérique (*voir document 2*). Cependant, les carbonates ne sont fréquents qu'à partir de - 2,2 Ga. De telles roches se sont-elles formées avant ? Ont-elles disparu depuis ? Cela reste en discussion.



Une roche âgée de 3,5 milliards d'années à Baberton (Afrique du Sud)

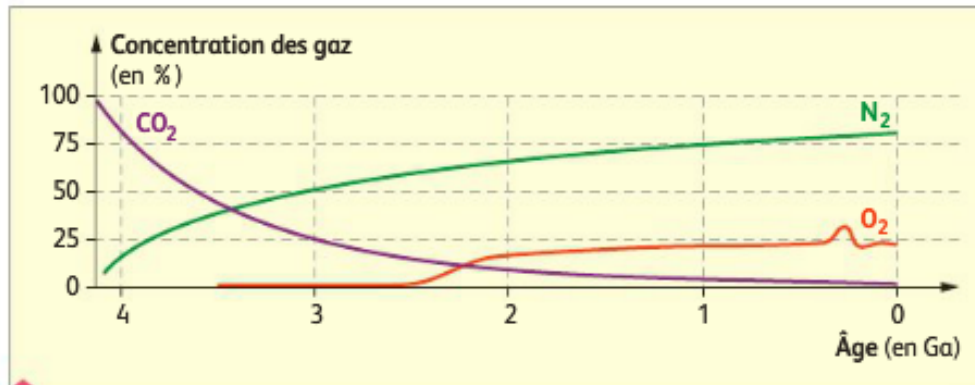
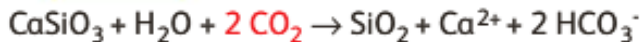
Quelques chiffres concernant les réservoirs actuels de carbone inorganique

- atmosphère : 800 Gt (gigatonnes) de carbone
- océans : 38 000 Gt de carbone
- roches carbonatées : 70 000 000 Gt de carbone

Document 2 : CO₂ atmosphérique et précipitation des carbonates

► Lorsque la température de l'atmosphère primitive est devenue inférieure à 100°C, l'eau s'est condensée, des précipitations abondantes ont formé les premiers fleuves et océans et le cycle de l'eau a pu s'amorcer. Le soleil fournit l'énergie nécessaire à la dynamique de l'**hydrosphère** et de l'atmosphère constituant les enveloppes fluides de la Terre.

► Le CO₂ atmosphérique étant très soluble dans l'eau, sa teneur a diminué rapidement. L'eau de pluie, chargée en CO₂ dissous, participe à l'altération des roches (silicates, **carbonates**...) libérant ainsi des ions Ca²⁺ qui subissent un **lessivage**. Exemple d'altération d'un silicate calcique :

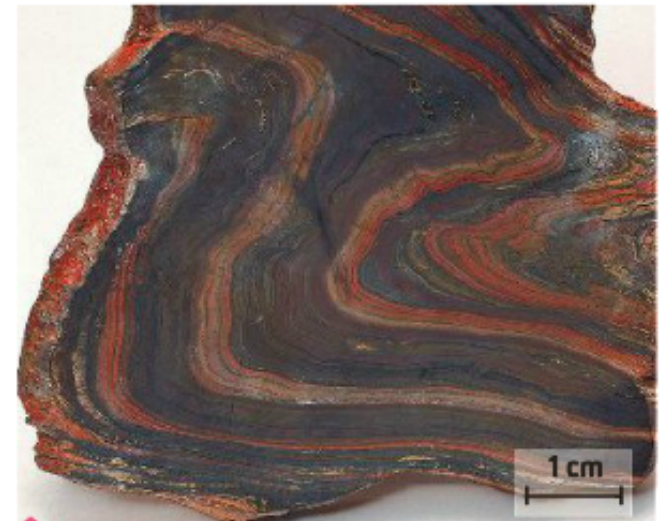


► **Évolution de la composition chimique de l'atmosphère depuis 4 Ga.**

Equation de la précipitation des carbonates :



► Les êtres vivants sont les principaux responsables de la « séquestration » du carbone sous forme de carbonates (stromatolites, récifs coralliens, tests d'organismes planctoniques...). Une fois ces organismes morts, une partie des squelettes carbonatés échappe à la dissolution, sédimente et constitue des roches calcaires.



► **Coupe dans une stromatolite fossile.**

Des lamines claires (calcaire) alternent avec des lamines sombres (matière organique attestant d'une origine biologique). Cette succession est liée à l'alternance de périodes favorables et défavorables à la photosynthèse.

Document 3 : Les stromatolithes, des traces très anciennes d'une activité photosynthétique (doc.1 p.86 Bordas)



Stromatolites fossiles d'Afrique du Sud (- 2,5 Ga environ)

Longtemps, les géologues se sont interrogés sur l'origine de ces étranges roches en boules que l'on appelle stromatolites (a). Ces structures ont été observées un peu partout dans le monde et dans des couches géologiques de tous les âges. Les plus anciennes sont âgées de 3,5 Ga.

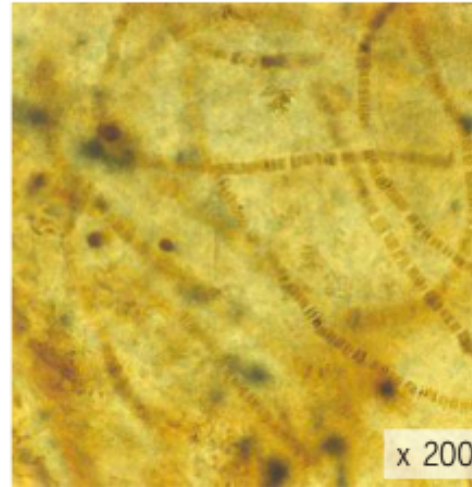


Stromatolites actuels (Shark Bay au nord-ouest de l'Australie)

On a découvert assez récemment des stromatolites qui se forment encore actuellement en milieu marin (b).



Stromatolites du nord du Québec (- 2 Ga)



Cyanobactéries fossiles
(environ - 400 Ma)

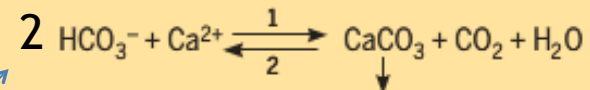


Cyanobactéries actuelles

Les stromatolites s'édifient progressivement par l'accumulation de lits formés de calcaire et de petits débris rocheux entre lesquels s'entremêlent des filaments de colonies bactériennes. Ces bactéries sont des procaryotes photosynthétiques nommés **cyanobactéries** (voir *exercice p. 95*).

Les cyanobactéries :

- **absorbent le CO₂** dissous dans l'eau (l'équilibre chimique ci-après est donc déplacé dans le sens 1 ce qui provoque la précipitation du calcaire autour d'elles)



- **dégagent du dioxygène** (c'est cette activité qui est à l'origine de l'apparition de dioxygène dans les océans dès - 3,5 Ga).

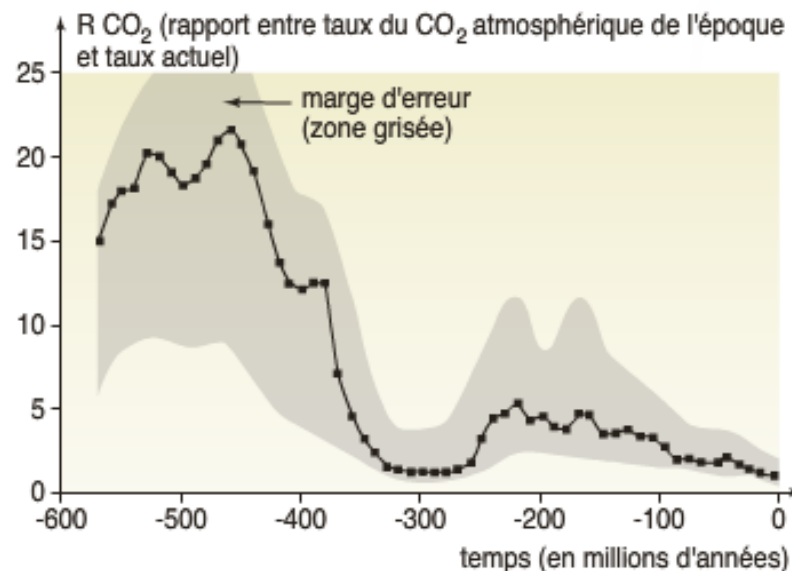
Attention erreur !!!

Document 4 : Evolution du taux de CO_2 depuis - 600 Ma (doc.4 p.83 Bordas)

- L'évolution du taux de CO_2 depuis - 600 Ma est bien connue grâce aux indices fournis par les archives sédimentaires. En admettant que la quantité totale de carbone est depuis cette époque à peu près constante, la connaissance de la quantité de roches carbonatées (calcaires) et carbonées (charbon, pétrole) formées à une période donnée permet de déduire la quantité de CO_2 atmosphérique correspondant à la formation de ces roches.

- Par ailleurs, à partir de - 300 Ma, l'étude des feuilles fossiles fournit d'autres indices. On a en effet établi que la quantité de stomates est directement liée à la concentration en CO_2 : plus il y a de stomates, moins la teneur en CO_2 est élevée.

Le graphique ci-contre est établi en intégrant ces différents indices. La chute du taux de CO_2 , constatée à partir de - 400 Ma, est liée à la colonisation des continents par les végétaux.



Fossile de fougère arborescente récolté dans des terrains datant du Carbonifère (300 Ma).

- ▶ Dans tout écosystème, il y a production de biomasse (absorption de CO_2 par photosynthèse) et dégradation de biomasse (rejet de CO_2 par respiration ou fermentation).

- ▶ À partir de 500 Ma, on assiste à une diversification de la vie dans les océans, puis à la conquête des continents par les végétaux au Silurien. La plupart des grands gisements de charbon datent du Carbonifère. À cette époque, les végétaux contenaient de la **lignine** alors qu'il n'existait pas encore d'organismes capables de décomposer efficacement cette substance.

Q1 - A l'aide du doc.1, déterminez les indices de la variation du taux de CO_2 atmosphérique.

Q2 - A partir du doc.2, réalisez le bilan global de l'utilisation du CO_2 par l'altération des roches et la formation de roches carbonatées.

Q3 - En quoi l'apparition de la vie (cyanobactéries) a-t-elle joué un rôle dans l'évolution de la concentration de CO_2 atmosphérique ?

Q4 - Etablissez le lien entre développement du règne végétal et chute du taux de CO_2 atmosphérique.

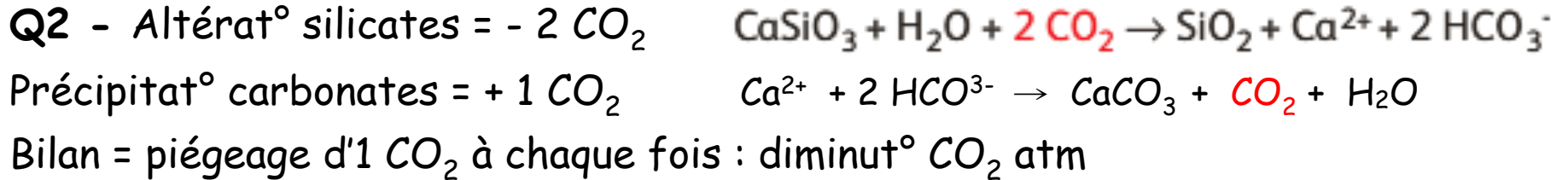
Q5 - Complétez le schéma-bilan à l'aide de des nouvelles informations et expliquez comment s'est effectué le piégeage du CO_2 .

Q1 - A l'aide du doc.1, déterminez les indices de la variation du taux de CO_2 atmosphérique.

Q1 - 3,5 Ga : roches sédimentaires = preuve présence d'eau liquide
Or, seulement 75% du ray solaire actuel. Donc forcément effet de serre + important, donc CO_2 très élevé.

Puis traces glaciaires, donc diminut° du CO_2 atm.

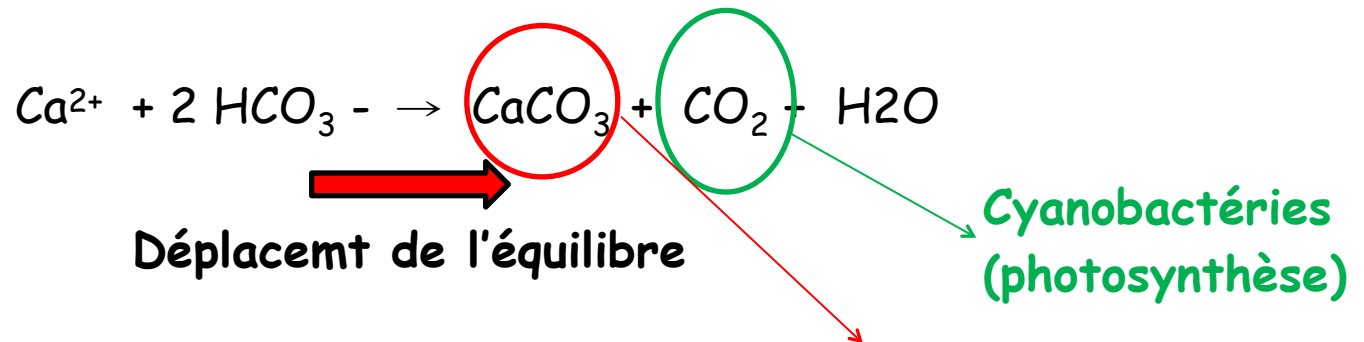
Q2 - A partir du doc.2, réalisez le bilan global de l'utilisation du CO_2 par l'altération des roches et la formation de roches carbonatées.



Q3 - En quoi l'apparition de la vie (cyanobactéries) a-t-elle joué un rôle dans l'évolution de la concentration de CO_2 atmosphérique ?

Q3 - Stromatolithes = alternance de dépôts calcaires et dépôts orga preuve d'une activité biologique. Etres vivants concernés = cyanobactéries qui réalisent la photosynthèse.

Or : photosynthèse prélève du CO_2 , donc déplace l'équilibre de la réaction vers la précipitat° des carbonates CaCO_3 :



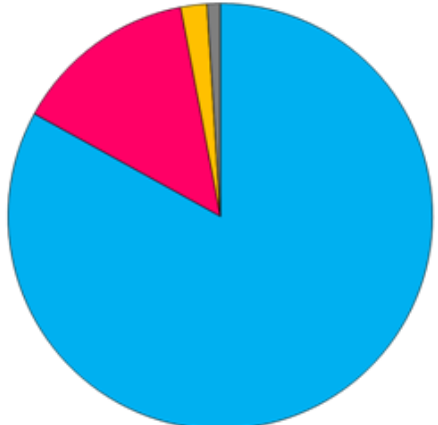
Conséquence = formation des lits calcaires des stromatolithes

Q4 - Etablissez le lien entre développement du règne végétal et chute du taux de CO_2 atmosphérique.

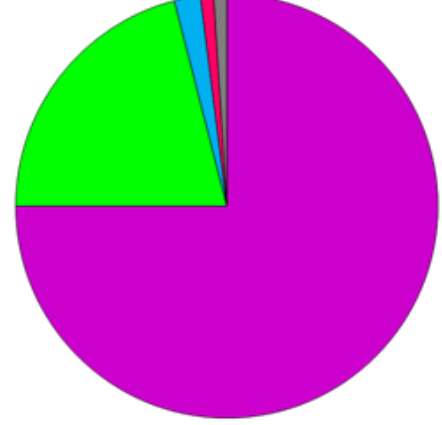
Q4 - -400 Ma : chute du taux de CO_2 atm en même temps que la colonisation des continents par les vgtx : mise en place de forêts gigantesques

Augmentat° de la photosynthèse donc piégeage en C organique, puis formation de roches carbonées (charbon + pétrole + gaz)

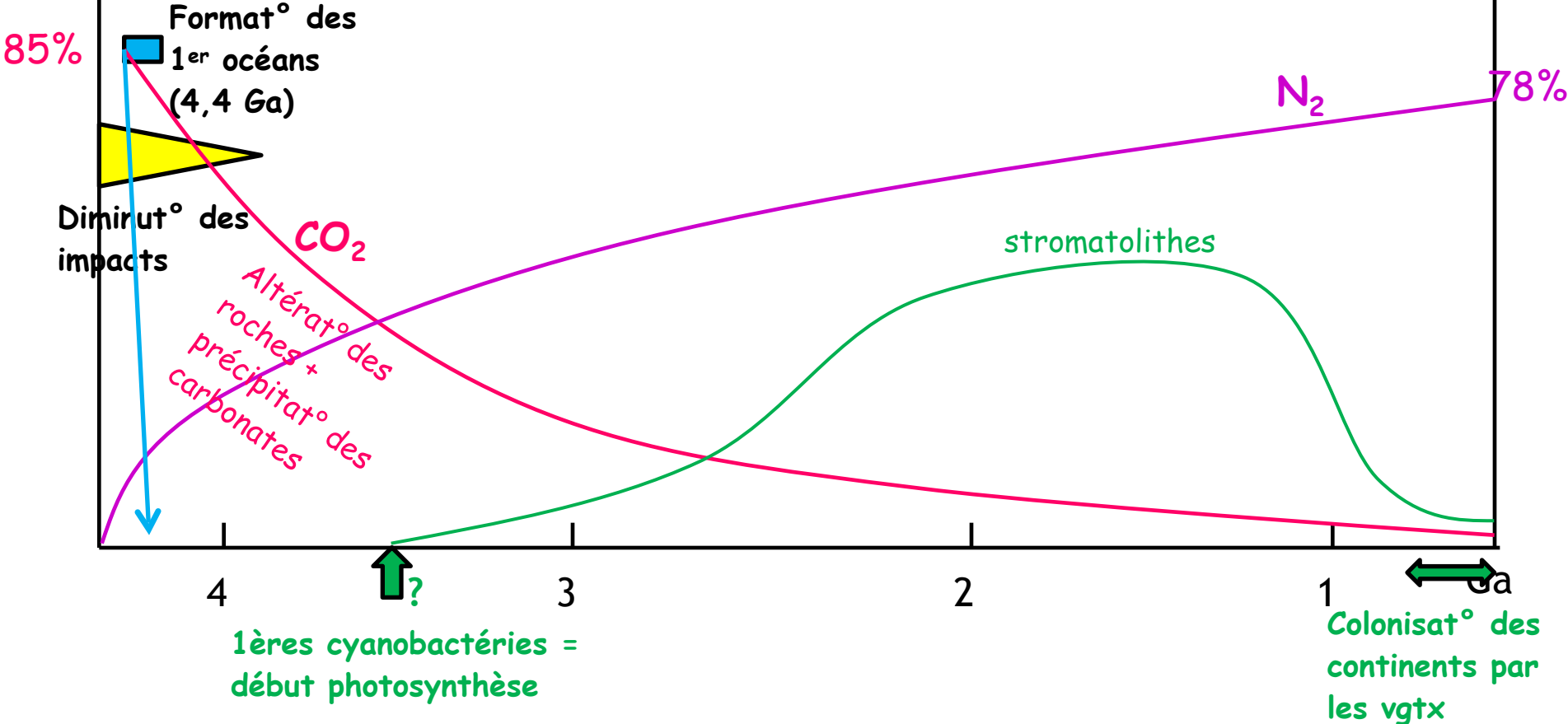
Q5 - Complétez le schéma-bilan à l'aide de des nouvelles informations et expliquez comment s'est effectué le piégeage du CO_2 .



Atmosphère primitive / Atmosphère actuelle



Evolution conjointe de la biosphère et de l'atmosphère : les témoins



Bilan du A : Le piégeage du CO₂

- Depuis 4,5 Ga, teneur atm en CO₂ est passée de 85% à 0,04 %.

CO₂ séquestré ds deux grands réservoirs : roches carbonatées (calcaire) + roches carbonées (charbon + pétrole).

- 1^{er} mécanisme consommateur = altérat° des roches silicatées + précipitat° des roches carbonatées. Les EV photosynthétiQ favorisent la **précipitat° des carbonates CaCO₃**.



b Polypiers fossiles **1** dans du calcaire urgonien et polypiers actuels **2**.



d Île Maurice et sa barrière de corail. Le lagon est la zone peu profonde comprise entre les terres émergées et le récif; au-delà, la profondeur de l'océan augmente rapidement.

-2^{ème} mécanisme consommateur = la **photosynthèse** : il arrive que le CO_2 piégé par les vgtx ss forme de C orga ne soit pas restitué à l'atm par respirat°. Ceci a lieu ds des conditions géol particulières et ds ce cas, le Carbone est piégé dans les **roches carbonées**, d'où une diminut° du CO_2 atm.

► L'essentiel du charbon exploité en France a livré de nombreux fossiles de fougères. Les troncs fossilisés indiquent qu'il s'agissait de **fougères arborescentes**.



3 Tronc d'une fougère arborescente actuelle **1** vivant à La Réunion et fossile de tronc de *Lepidodendron* **2** datant du Carbonifère (300 Ma).

Rq :

H₂O atm diminue par condensat°

CO₂ atm diminue par « double-piégeage »

Par conséquent, le N₂ devient « passivement » le gaz majoritaire de l'atm.

B. L'atmosphère devient oxydante

Document 1 : Les fers rubanés (BIF = Banded Iron Formation) : du fer qui a précipité en milieu marin (voir aussi doc.1 p.84 Bordas)

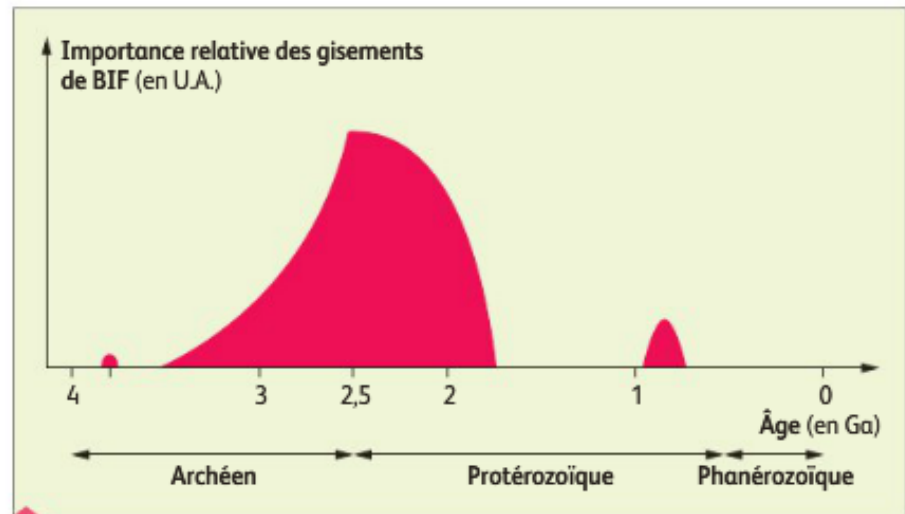
- ▶ Les transformations de l'atmosphère sont inscrites dans les roches sédimentaires qui constituent de véritables archives du passé.
- ▶ La majorité du minerai de fer exploité dans le monde se présente sous forme de fer rubané appelé BIF (Banded Iron Formation). Des niveaux clairs riches en silice (SiO_2) alternent avec des niveaux rouges riches en **hématite**. La cause de l'alternance n'est pas connue avec certitude. Les gisements de

BIF sont toujours très localisés et leur âge est compris entre 3,5 et 1,9 Ga. Ils sont d'origine océanique et il ne s'en forme plus actuellement.

- ▶ Jusqu'à 2 Ga, les océans sont riches en Fe^{2+} (soluble) provenant de l'activité volcanique et des **sources hydrothermales**. En présence d' O_2 et aussi longtemps qu'il y a du Fe^{2+} , celui-ci s'oxyde pour former du Fe^{3+} insoluble qui précipite sous forme d'oxydes tels que l'hématite.



a Échantillon de fer rubané (3,3 Ga, Afrique du Sud).



b Évolution de l'importance relative des principaux gisements de fer rubané (BIF) au cours du temps.

Document 2 : Les stromatolithes, des traces très anciennes d'une activité photosynthétique (doc.1 p.86 Bordas)



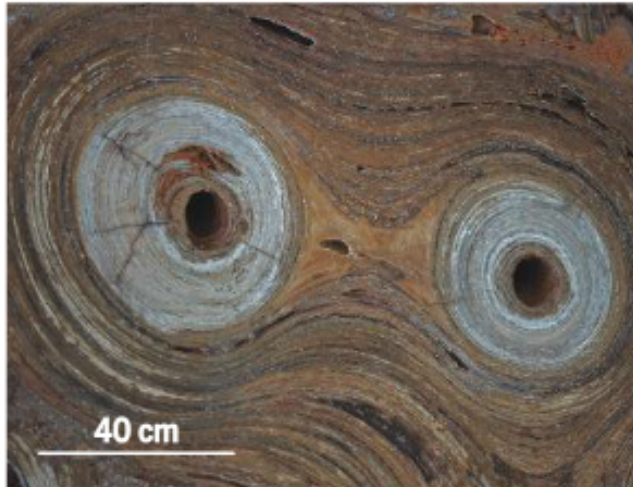
Stromatolites fossiles d'Afrique du Sud (- 2,5 Ga environ)

Longtemps, les géologues se sont interrogés sur l'origine de ces étranges roches en boules que l'on appelle stromatolites (a). Ces structures ont été observées un peu partout dans le monde et dans des couches géologiques de tous les âges. Les plus anciennes sont âgées de 3,5 Ga.

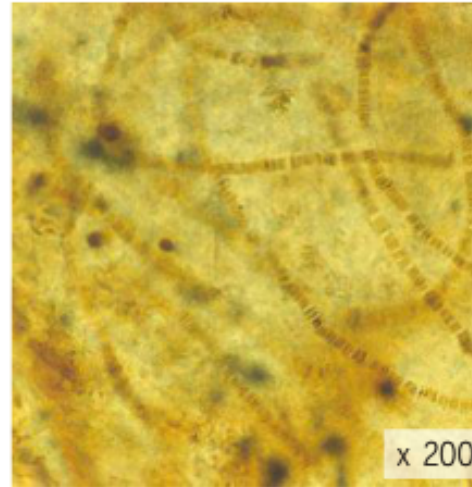


Stromatolites actuels (Shark Bay au nord-ouest de l'Australie)

On a découvert assez récemment des stromatolites qui se forment encore actuellement en milieu marin (b).



Stromatolites du nord du Québec (- 2 Ga)



Cyanobactéries fossiles
(environ - 400 Ma)

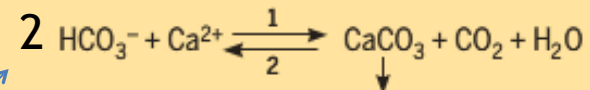


Cyanobactéries actuelles

Les stromatolites s'édifient progressivement par l'accumulation de lits formés de calcaire et de petits débris rocheux entre lesquels s'entremêlent des filaments de colonies bactériennes. Ces bactéries sont des procaryotes photosynthétiques nommés **cyanobactéries** (voir *exercice p. 95*).

Les cyanobactéries :

- **absorbent le CO₂** dissous dans l'eau (l'équilibre chimique ci-après est donc déplacé dans le sens 1 ce qui provoque la précipitation du calcaire autour d'elles)



- **dégagent du dioxygène** (c'est cette activité qui est à l'origine de l'apparition de dioxygène dans les océans dès - 3,5 Ga).

Attention erreur !!!

Document 3 : Les grès rouges continentaux : du fer qui a précipité en milieu continental (doc 3 p 85 Bordas)

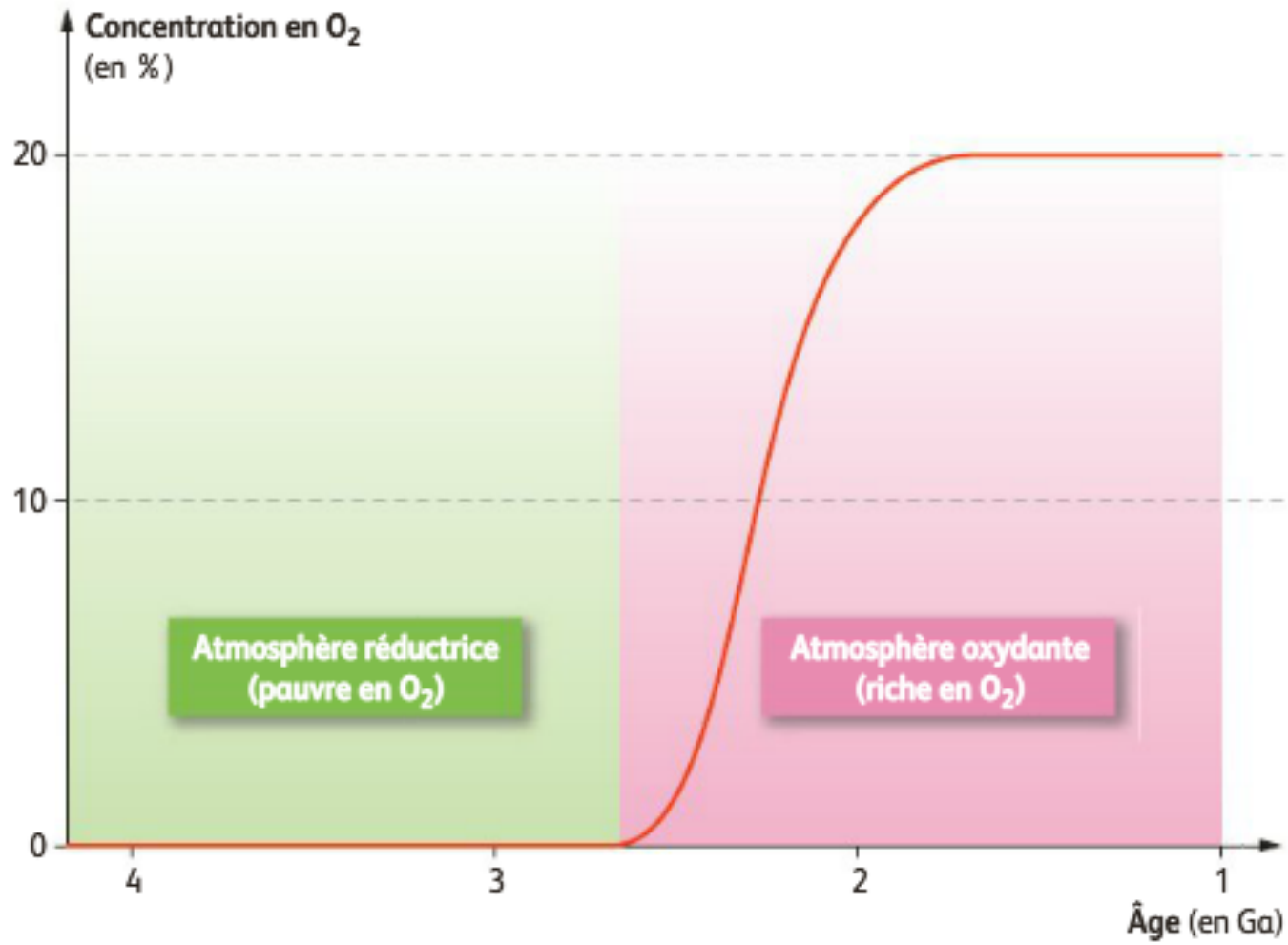
Un sol qui s'est formé à l'air libre peut être fossilisé dans une formation sédimentaire : on parle alors de paléosol.

Entre - 3,4 et - 2,2 Ga, les paléosols montrent un appauvrissement en fer qui est la conséquence d'un lessivage par les eaux. En revanche, après - 2 Ga, les paléosols sont au contraire riches en hydroxydes ferriques qui ont précipité sur place. Ces sols ont alors une couleur rouge comme les sols tropicaux actuels : on parle de couches rouges ou « red beds ». Les formations sédimentaires continentales sont désormais rouges comme en témoignent les strates de grès qui bordent aujourd'hui la Blyde river en Afrique du Sud (*photographie*). Ces dépôts fluviaux sont datés autour de - 2,2 Ga.



Doc. 3 Des formations continentales oxydées.

Document 4 : Evolution de la quantité de dioxygène dans l'atmosphère au cours du temps

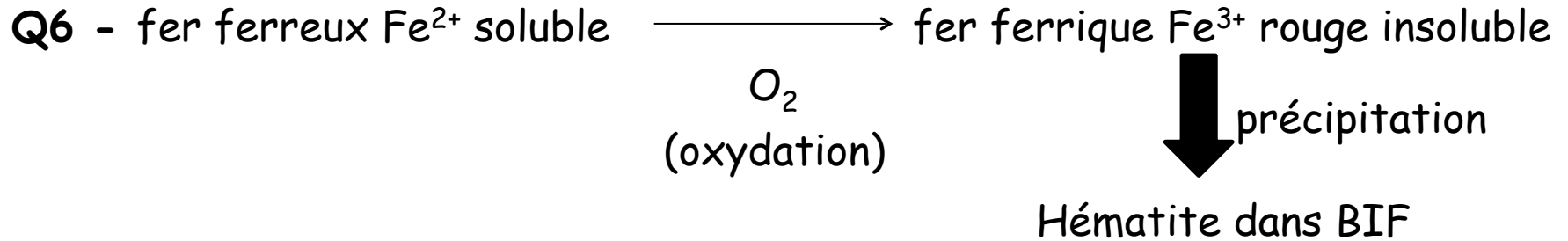


Q6 - De quoi les BIF sont-ils un indice intéressant ? D'où provient le O_2 ?

Q7 - En quoi les informations du documents 3 ont-elle permis d'établir le graphique du document 4 ?

Q8 - Complétez le schéma-bilan à l'aide de des nouvelles informations et expliquez comment on est passé d'une atmosphère réductrice à une atmosphère oxydante.

Q6 - De quoi les BIF sont-ils un indice intéressant ? D'où provient le O_2 ?



BIF entre -4 et - 2,2 Ga, pas de + jeune.

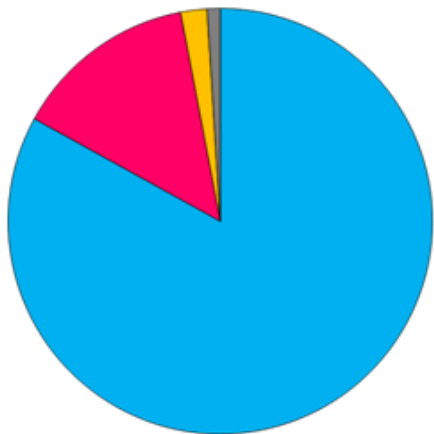
Ceci prouve que les océans étaient riches en O_2 jusqu'à 2,2 Ga.

Les BIF ont piégé le O_2 dégagé par la photosynthèse et ceci jusqu'à 2,2 Ga.

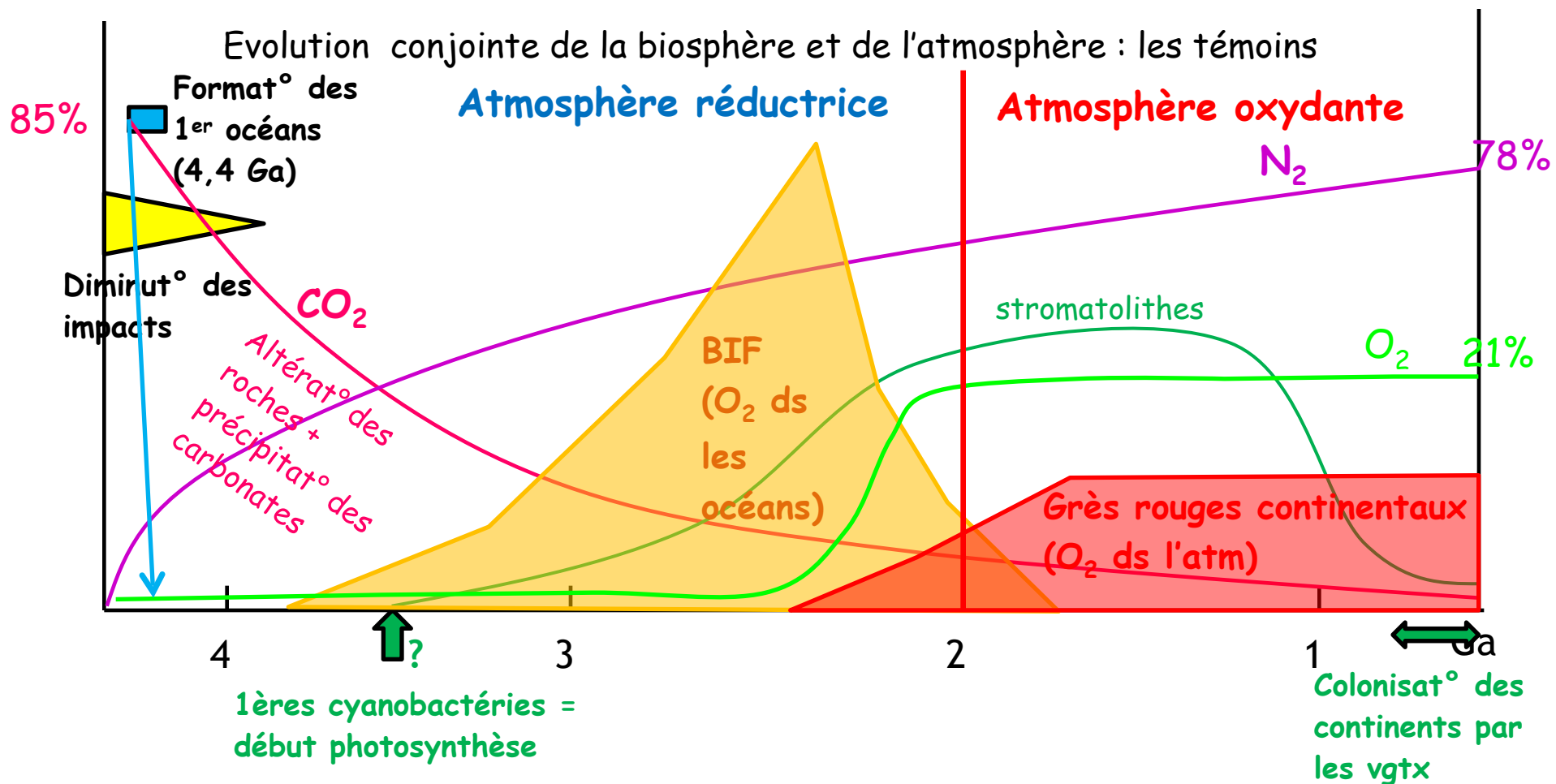
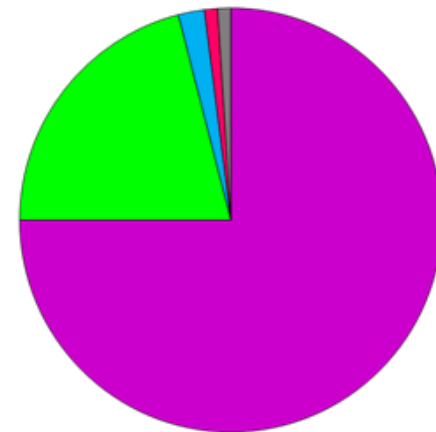
Q7 - En quoi les informations du documents 3 ont-elle permis d'établir le graphique du document 4 ?

Q7 - Découverte de grès rouges continentaux (paléosols) oxydés datant de 2,2 Ga mais pas avant. Présence de O₂ ds l'atmosphère seulement à partir de ce moment là.

Q8 - Complétez le schéma-bilan à l'aide de des nouvelles informations et expliquez comment on est passé d'une atmosphère réductrice à une atmosphère oxydante.



Atmosphère primitive / Atmosphère actuelle



Bilan du B : L'atmosphère devient oxydante

Le fer précipite en oxyde ferrique (Fe_2O_3) dans les eaux oxygénées :

- De -3,5 à -2,2 Ga, des format° sédimentaires contenant du fer précipitent en milieu océanique (fers rubanés = BIF).
- Après 2,2 Ga, les gisements de fer sont continentaux (paléosols rouges)

Du dioxygène a donc été produit sur Terre à partir de 3,5 Ga. Cet O_2 a d'abord été piégé dans les océans ; ce n'est qu'à partir de 2,2 Ga qu'il apparaît dans l'atmosphère.

Bilan général : Evolution de l'atmosphère et celle de la vie sont liées

Les 1ers producteurs de O_2 sont probablement des **procaryotes photosynthétiques**, proches des cyanobactéries actuelles qui édifiaient des st calcaires, les **stromatolithes** (les + anciennes de -3,5 Ga).

La product° de O_2 a ds un premier temps été toxique pour certains organismes, mais elle a ensuite permis d'accélérer **l'évolut° des espèces grâce à la respirat°** et, bien plus tard, a permis la conquête des milieux continentaux par la mise en place de la **couche d'ozone** (O_3).

