

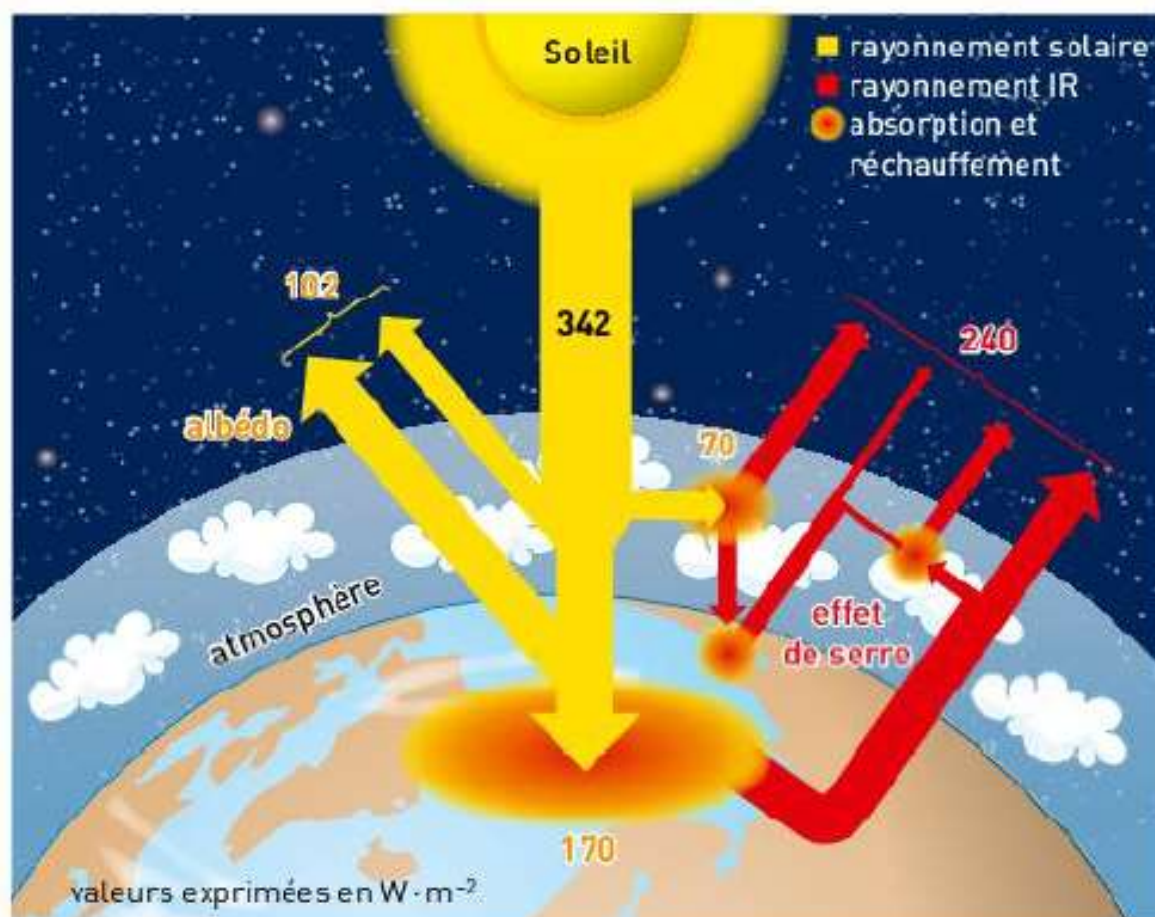
### **III. Un bilan radiatif déséquilibré**

---

**Problème posé : quelles sont les causes du déséquilibre radiatif ?**

**→ Répondez aux questions p 47 de votre livre.**

## Un bilan radiatif théoriquement équilibré



■ Le bilan radiatif terrestre résulte d'échanges complexes entre l'espace, l'atmosphère et la surface de la Terre.

## SCHÉMA ANIMÉ Le bilan radiatif terrestre

La Terre reçoit une puissance solaire moyenne de  $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Sa surface et les nuages réfléchissent environ 30 % de la lumière reçue, c'est le phénomène d'albédo\*.

Les 70 % restant sont absorbés par l'atmosphère et la surface de la Terre, ce qui provoque l'élévation de leur température. Cette chaleur est évacuée sous la forme d'un rayonnement infrarouge\* (IR) dirigé vers le sol et vers l'atmosphère. Une partie de ce rayonnement est piégée par certains gaz nommés gaz à effet de serre\* (GES). Ce phénomène participe à l'élévation de la température de l'atmosphère terrestre.

Au final, l'intégralité de l'énergie absorbée par la Terre sera réémise vers l'espace sous la forme d'un rayonnement IR d'où un bilan radiatif équilibré et une température théoriquement stable.

Le document 1 présente l'équilibre du bilan radiatif (Rappel de première).

Ainsi, la Terre reçoit une puissance solaire de  $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  dont environ 30 % sont directement réfléchis dans l'espace (soit  $102 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) du fait de l'albédo alors que la part restante est absorbée par la surface et l'atmosphère.

Cette énergie est renvoyée vers le sol et vers l'espace sous la forme d'un rayonnement infrarouge (IR) en partie absorbé, temporairement, par les GES d'où le réchauffement de l'atmosphère.

À terme, l'intégralité de l'énergie sera réémise vers l'espace (soit  $240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) d'où un bilan radiatif équilibré et nul ( $342 - 102 - 240 = 0$ ) et une température stable.



1. Indiquez deux autres possibilités de modification du bilan radiatif en précisant les conséquences sur la stabilité de la température moyenne globale.

DOC  
2

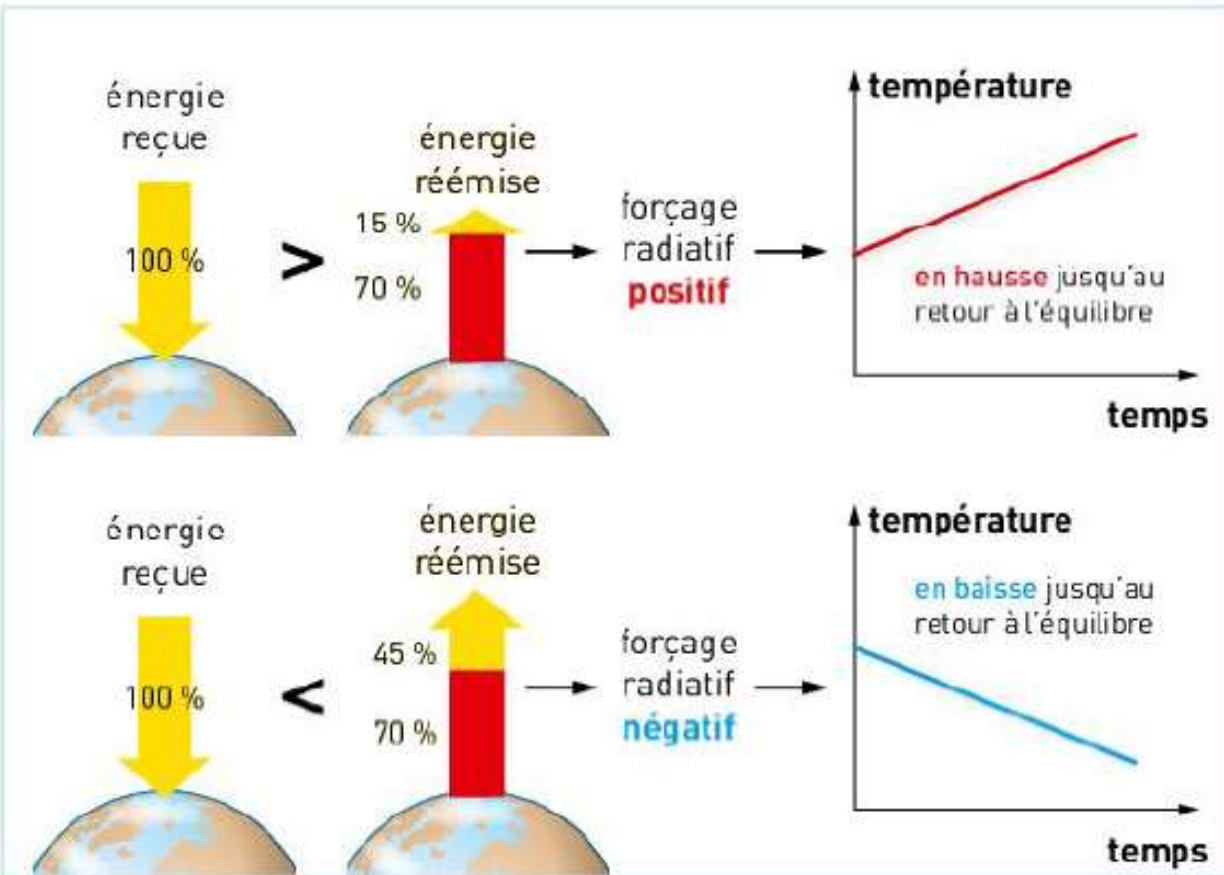
Un bilan radiatif en équilibre dynamique

La reconstitution des températures passées (voir p. 45) montre de nombreuses oscillations qui traduisent des variations de l'équilibre du bilan radiatif. On parle alors d'équilibre dynamique.

Une diminution de la température résulte d'un bilan radiatif négatif, c'est-à-dire d'une quantité d'énergie reçue inférieure à celle réémise.

Inversement, si la quantité d'énergie réémise est inférieure à l'énergie reçue, le bilan radiatif est positif, ce qui se traduit par une hausse de la température de l'atmosphère terrestre.

Ces variations du bilan radiatif sont appelées **forçages radiatifs**.



Deux situations de bilan radiatif déséquilibré causées par des variations de l'albédo.

D'après le schéma du doc. 2a, le bilan radiatif peut être par exemple modifié par une augmentation de l'albédo, d'où une quantité d'énergie sortante supérieure à ce qui est reçu donc un bilan radiatif négatif et une baisse de la température.

On pourrait aboutir à cette baisse de température en diminuant le flux entrant de l'énergie lumineuse reçue ou en diminuant l'effet de serre (augmentation du flux IR sortant).

Une augmentation de température provient d'un bilan radiatif positif dû à, par exemple, une diminution de l'albédo comme le montre le schéma ou à une augmentation du flux entrant ou encore à une augmentation de l'effet de serre (diminution du flux IR sortant).

## 2. Expliquez pourquoi le PRG du protoxyde d'azote est beaucoup plus élevé que celui du dioxyde de carbone.

Doc

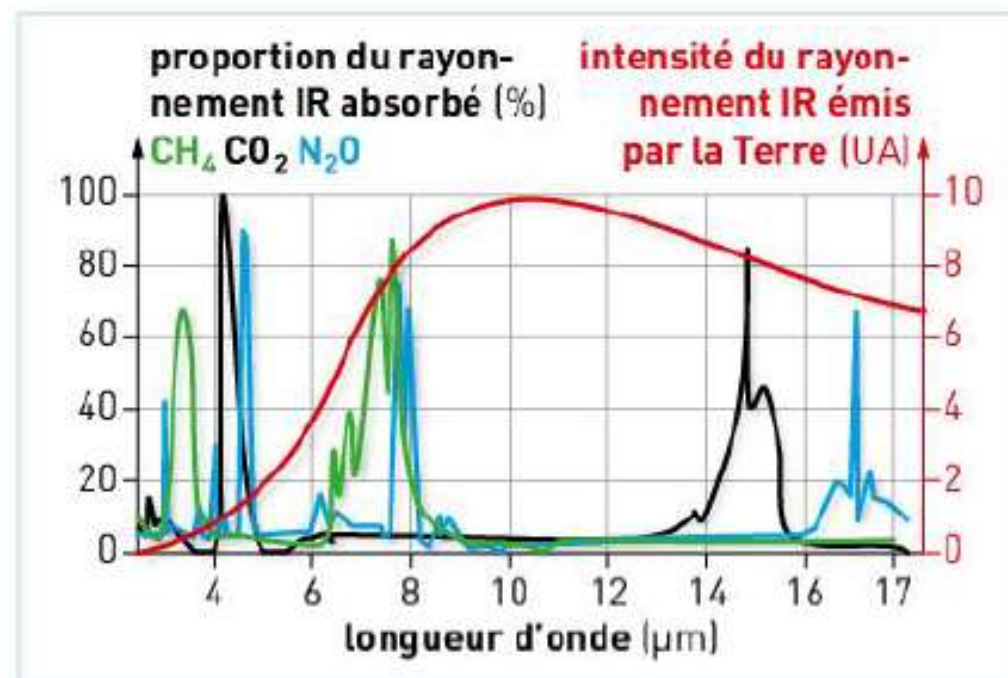
### 3 Des pouvoirs de réchauffement différents

Chaque gaz possède un pouvoir de réchauffement global (PRG) qui dépend :

- de sa capacité à absorber le rayonnement IR émis par la Terre (graphique ci-contre) ;
- de son temps de résidence\* dans l'atmosphère (tableau ci-dessous).

On peut ainsi montrer que, sur une durée de 100 ans, 1 kg de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) provoque un réchauffement équivalent à 265 kg de  $\text{CO}_2$  !

Gaz	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$
Temps de résidence	100 ans	10 ans	120 ans
PRG (à 100 ans)	1	28	265



■ Spectres d'absorption de quelques gaz de l'atmosphère superposés à l'intensité du rayonnement IR émis par la Terre. Rappel : plus une longueur d'onde est courte, plus l'onde véhicule une grande quantité d'énergie.

On ne doit pas tenir compte des pics d'absorption pour des longueurs d'ondes inférieures à  $5\text{ }\mu\text{m}$  car ces ondes ne sont que très peu émises par la Terre.

On observe que le spectre d'absorption du protoxyde d'azote présente deux pics majeurs dans le domaine des IR vers  $8\text{ }\mu\text{m}$  (60 à 70 % d'absorption) et entre 16 et  $17\text{ }\mu\text{m}$  (20 % d'absorption avec un pic à 70 % pour  $16,5\text{ }\mu\text{m}$ ) alors que le  $\text{CO}_2$  ne présente qu'un seul pic entre 14 et  $16\text{ }\mu\text{m}$  (environ 40 % d'absorption avec un pic à 90 % pour  $15\text{ }\mu\text{m}$ ).

Or, on nous indique que les courtes longueurs d'ondes sont plus énergétiques que les grandes longueurs d'onde.

Le protoxyde d'azote peut donc absorber plus d'énergie que le dioxyde de carbone du fait de son pic d'absorption vers  $8\text{ }\mu\text{m}$ .

De plus, son temps de résidence est beaucoup plus long (120 ans contre 10 ans pour le  $\text{CO}_2$ ).

Sur 100 ans, une certaine quantité de protoxyde d'azote pourra donc absorber plus d'énergie que la même quantité de  $\text{CO}_2$ .

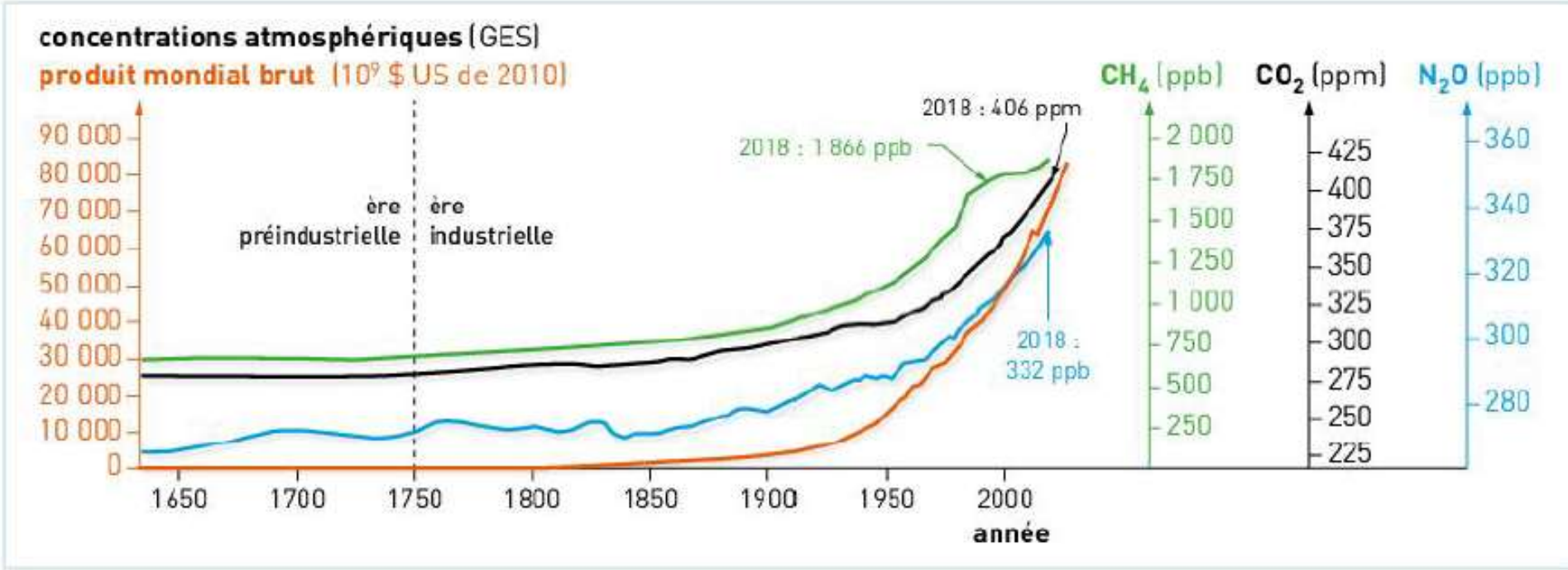


3. Expliquez alors pourquoi le dioxyde de carbone reste à plus de 20% un contributeur majeur de l'effet de serre.

DOC  
4

Activité économique et composition atmosphérique

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des teneurs en GES ainsi que l'évolution de la richesse mondiale exprimée par le produit mondial brut (PMB) qui est la somme des produits intérieurs bruts (PIB) de chaque nation. Le PMB est un indicateur de l'activité économique mondiale.



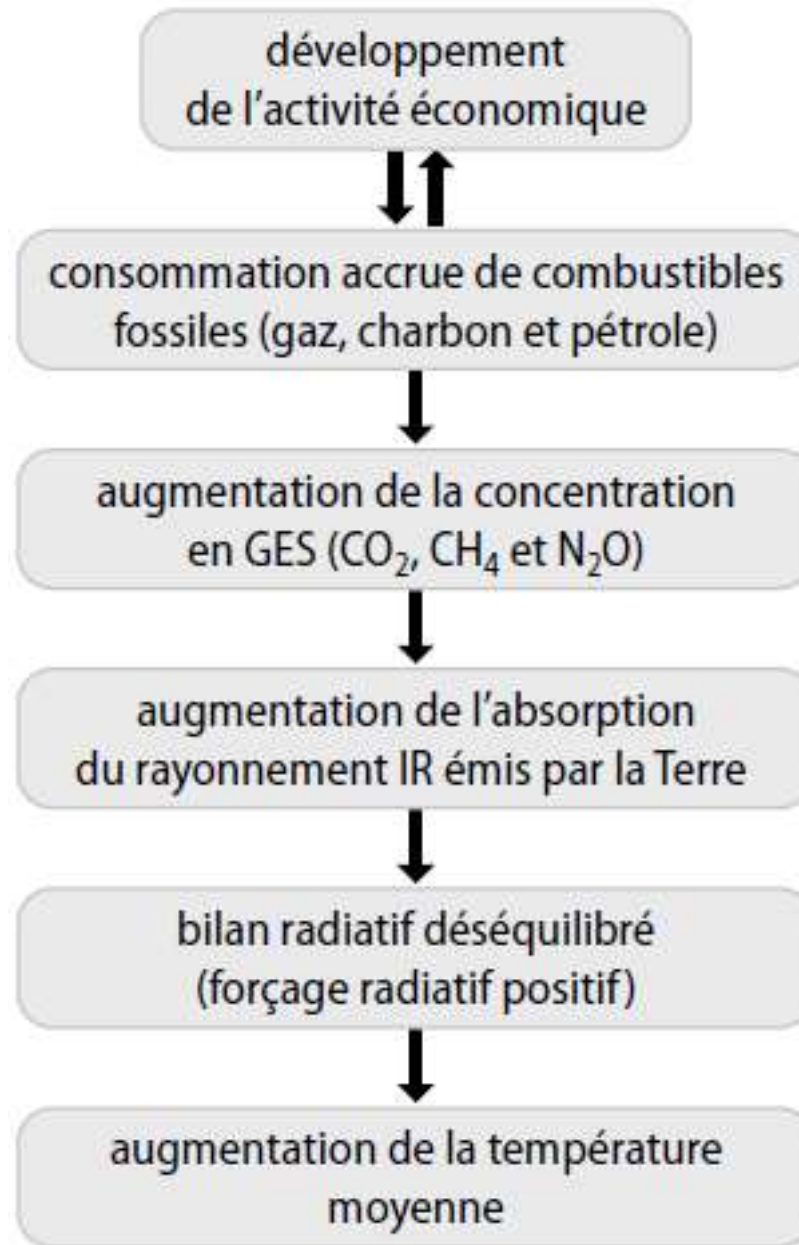
■ Évolution de la concentration en GES comparée à celle du PMB. 1 ppm = 1 000 ppb.



Le  $\text{CO}_2$  reste cependant un gaz à effet de serre plus important car il est beaucoup plus présent dans l'atmosphère que  $\text{N}_2\text{O}$ .

En effet, on remarque dans le document 4 que sa concentration actuelle est de l'ordre de 400 ppm alors que celle de  $\text{N}_2\text{O}$  est de l'ordre de 330 ppb soit 0,33 ppm.

On peut proposer le schéma suivant pour expliquer l'origine du déséquilibre actuel :



On observe en effet que l'augmentation de la teneur de ces différents GES débute à partir de 1900, parallèlement à l'augmentation du PMB qui traduit une activité économique de plus en plus importante, activité qui repose essentiellement sur la consommation de ressources fossiles.

**Depuis un siècle et demi, on mesure un réchauffement climatique global (environ +1°C).**

**Celui-ci est la réponse du système climatique à l'augmentation du forçage radiatif (différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise) due aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et vapeur d'eau principalement.**

**Lorsque la concentration des GES augmente, l'atmosphère absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre.**

**En retour, il en résulte une augmentation de la puissance radiative reçue par le sol de la part de l'atmosphère.**

**Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle.**

**L'énergie supplémentaire associée est essentiellement stockée par les océans, mais également par l'air et les sols, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et la montée du niveau des océans.**

**→ Bilan 3 p 53**

## **IV. Un réchauffement inéluctable?**

---

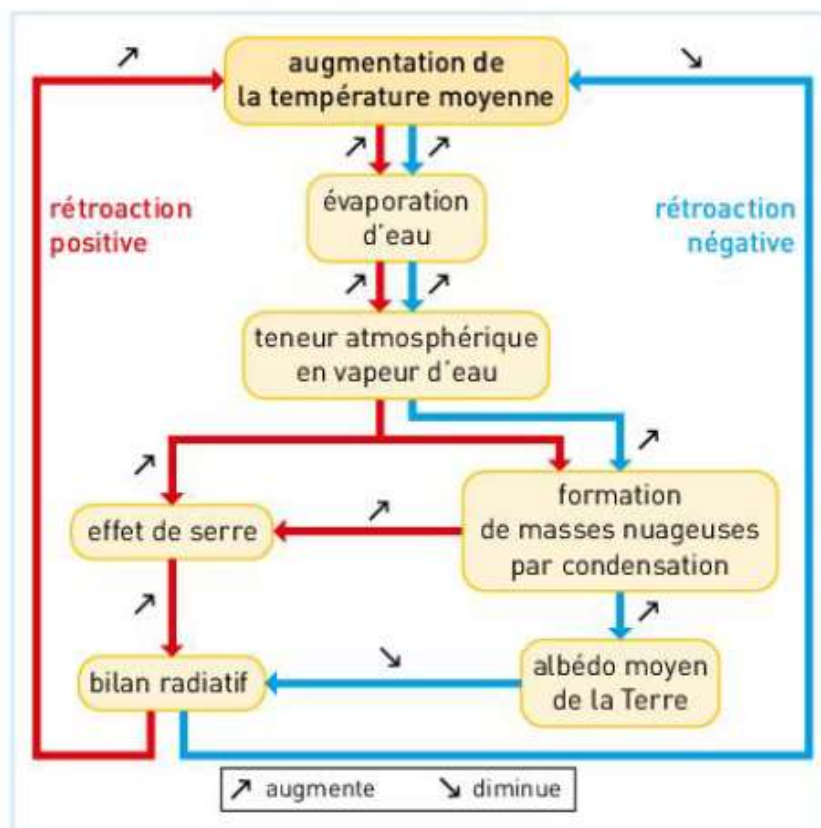
### **A. L'amplification du réchauffement climatique**

**Problème posé : comment expliquer cette amplification ?**

**→ Répondez aux questions p 49 de votre livre.**



## L'eau atmosphérique, paramètre essentiel du réchauffement



■ Les influences de l'eau sur la température de la Terre sont nombreuses et complexes.

L'eau atmosphérique est responsable à environ 70 % de l'effet de serre sous forme de vapeur (50 %) et sous forme de nuages (20 %).

Selon certains chercheurs, le réchauffement climatique augmente la concentration atmosphérique en vapeur d'eau. Ainsi, un réchauffement de 3 °C provoque une élévation de 20 % de l'humidité relative de l'air situé à proximité de l'eau. À l'échelle globale, cela provoquerait une accentuation de l'effet de serre et du réchauffement lui-même. Ce phénomène amplificateur de l'augmentation de la température initiale est appelé **rétroaction positive** (schéma ci-contre).

Cependant, ce processus favoriserait la formation de nuages qui, en augmentant l'albédo\* moyen, conduirait à une rétroaction négative donc à une modération du réchauffement voire à un refroidissement.

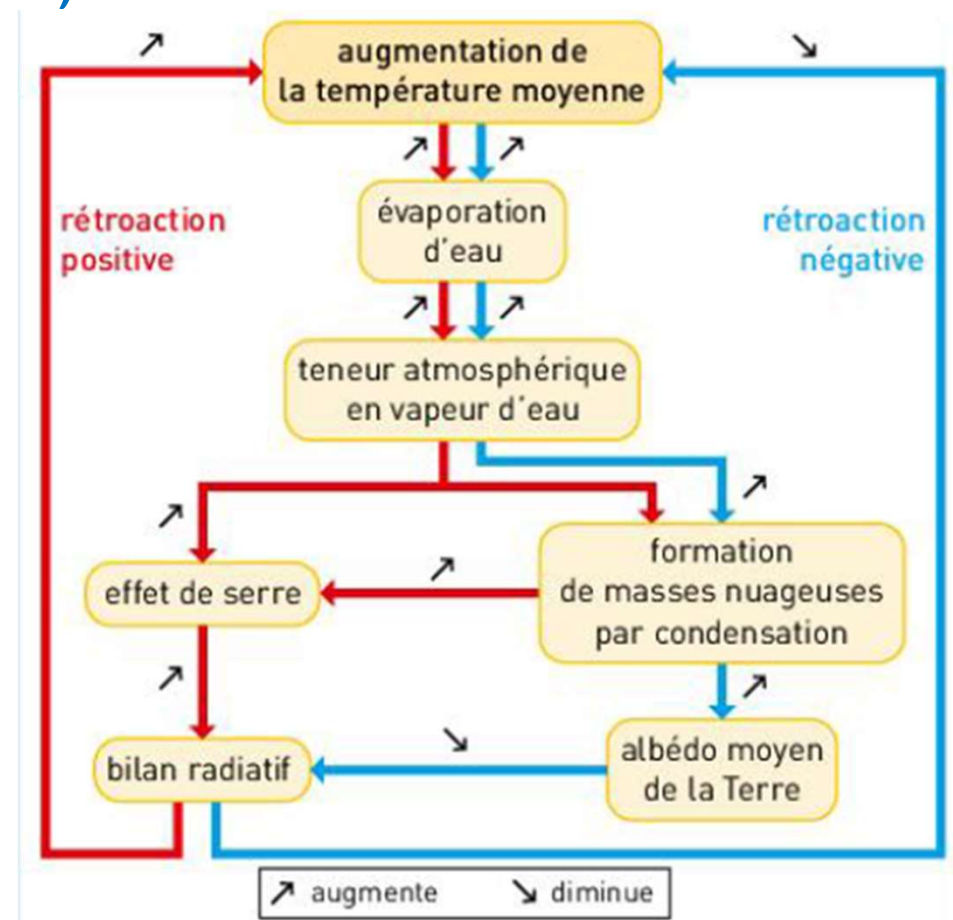
Ces phénomènes sont difficiles à quantifier du fait de la grande variabilité de la concentration atmosphérique en vapeur d'eau qui dépend des conditions météorologiques de la région étudiée et de son altitude.

Une boucle de rétroaction positive induit que toutes les rétroactions entre les différents chaînons conduisent à amplifier la perturbation, qui modifie l'équilibre entre les chaînons.

Si la boucle de rétroaction est négative, c'est qu'elle tend à atténuer la perturbation (elle ne va pas dans le même sens).

Les facteurs à l'origine d'une rétroaction positive sont l'augmentation de la teneur atmosphérique en vapeur d'eau et l'augmentation de la quantité de nuages, ces deux facteurs provoquant une accentuation de l'effet de serre.

Le facteur provoquant une rétroaction négative est l'augmentation de l'albédo due aux nuages.





## 2. Représentez, à l'aide d'un schéma fonctionnel, l'origine et les conséquences sur le climat du dégel du pergélisol et de la réduction des surfaces englacées.

DOC

2

### Le pergélisol, source de GES

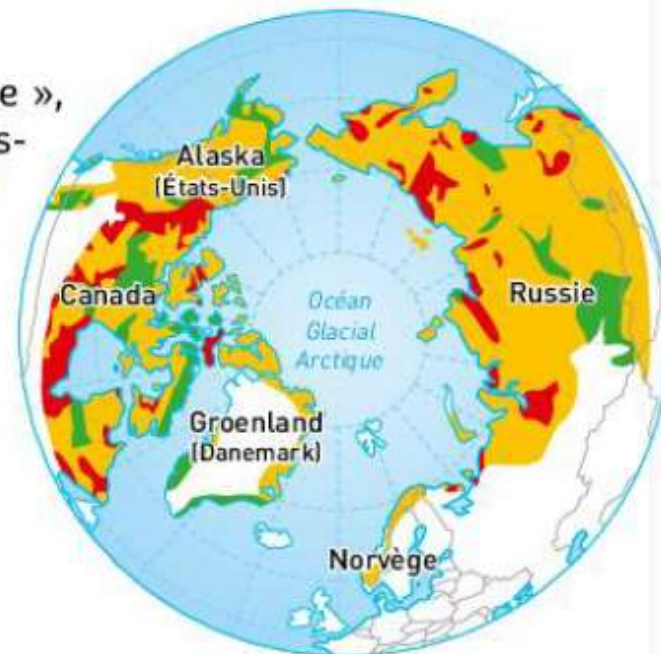
Le **pergélisol** (ou permafrost), littéralement « sol gelé en permanence », représente 25 % des terres émergées de l'hémisphère Nord (a). Son épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres et contient 1 700 Gt\* de carbone d'origine végétale, soit deux fois plus que l'atmosphère. Le réchauffement climatique provoque son dégel partiel d'où des glissements de terrain, une déstabilisation des routes et bâtiments mais surtout l'apparition de thermokarsts (b), cratères remplis d'eau où les bactéries, en décomposant la biomasse, émettent du dioxyde de carbone et du méthane (c).



b Vue aérienne de thermokarsts.



c Bulles de méthane encore piégées sous la glace.



densité de carbone :

■ de 0,01 à 10 kg·m<sup>-2</sup>

■ de 10,01 à 50 kg·m<sup>-2</sup>

■ plus de 50 kg·m<sup>-2</sup>

a Pergélisol dans l'hémisphère Nord et densités de carbone stocké.

### Fonte des glaces et incidence sur l'albédo

Les surfaces glacées et enneigées (banquise\*, calotte\*, glaciers de montagne) ont un albédo élevé (0,6 à 0,9) et sont responsables d'environ 13 % de l'albédo global de la Terre.

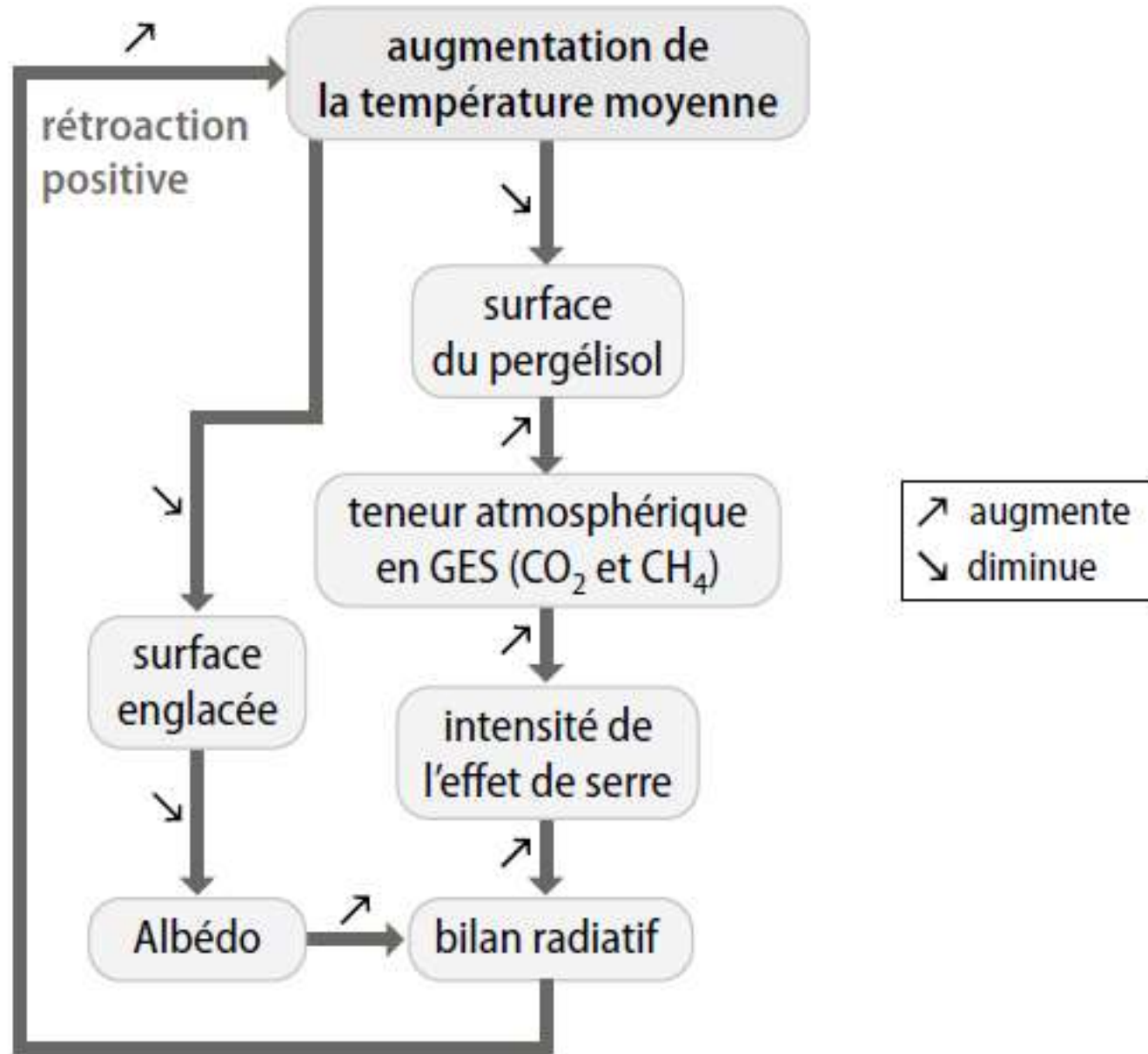
Sous l'effet du réchauffement, ces surfaces ont tendance à diminuer.

- Extension maximale de la banquise arctique en septembre 2018 comparée à celle de 1979 (en violet) et de 2000 (en orange). ➤





On propose le schéma suivant :



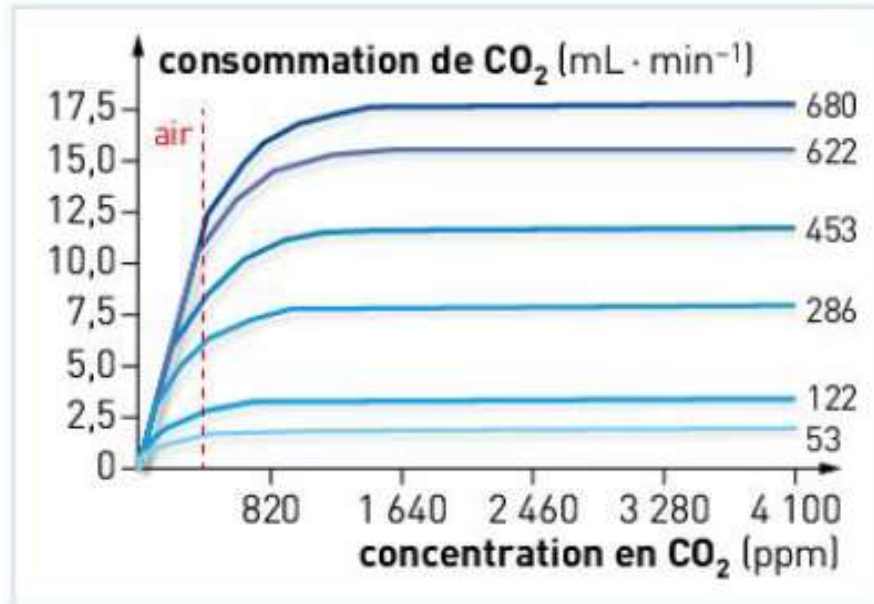
### 3. Démontrez qu'à court terme, l'augmentation de la végétalisation continentale est à l'origine d'une rétroaction négative sur la température moyenne puis complétez votre schéma.

DOC

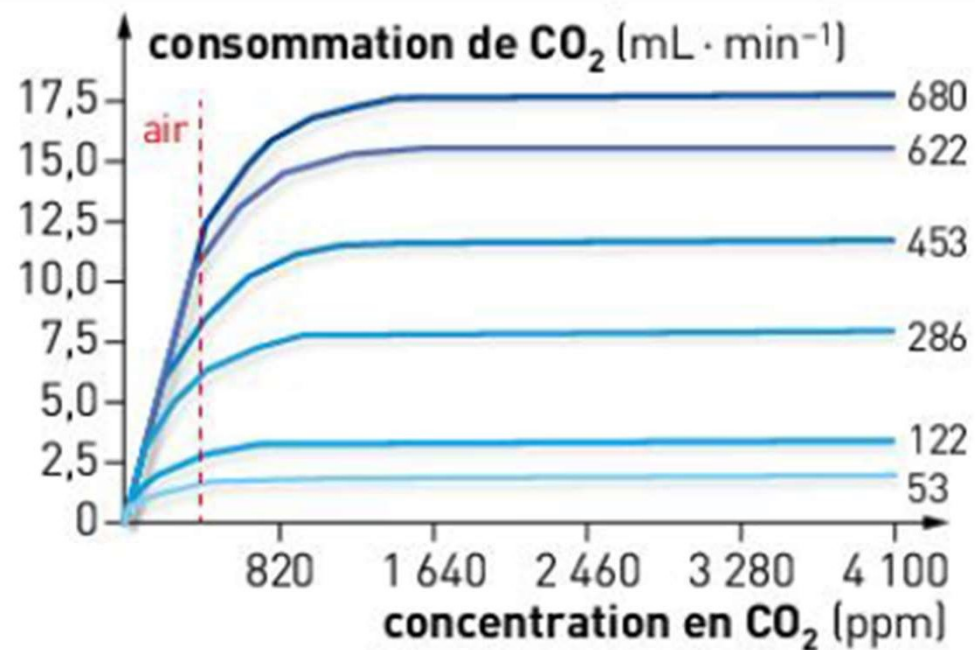
#### 4 L'effet stabilisateur de la végétalisation

Grâce à la photosynthèse\*, les végétaux utilisent le  $\text{CO}_2$  atmosphérique pour produire leur biomasse\*, stockant ainsi une partie de ce carbone dans le bois, les racines mais aussi le sol pour plusieurs dizaines d'années. Ainsi, chaque hectare de forêt tropicale humide contient près de 305 tonnes de carbone. On estime que la végétation mondiale absorbe 25 % de nos émissions de  $\text{CO}_2$  par an. L'efficacité de la photosynthèse dépend en partie du taux de  $\text{CO}_2$  (a).

Des chercheurs ont évalué l'évolution du nombre de feuilles par mètre carré à l'aide d'observations satellitaires (b) montrant une augmentation de la végétalisation d'environ  $18 \times 10^8$  ha. Cette croissance est due à 70 % à l'effet fertilisant du  $\text{CO}_2$  et à 8 % à l'augmentation de la température.



a Efficacité de la photosynthèse en fonction du taux de  $\text{CO}_2$  pour différentes puissances solaires (en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).



On observe dans le doc. 4a que la consommation de dioxyde de carbone lors de la photosynthèse augmente si sa concentration augmente, ce qui permet d'expliquer l'accroissement des surfaces végétalisées.

Cependant, on observe également que la photosynthèse atteint une consommation maximale de CO<sub>2</sub> qui dépend de l'intensité du rayonnement reçu.

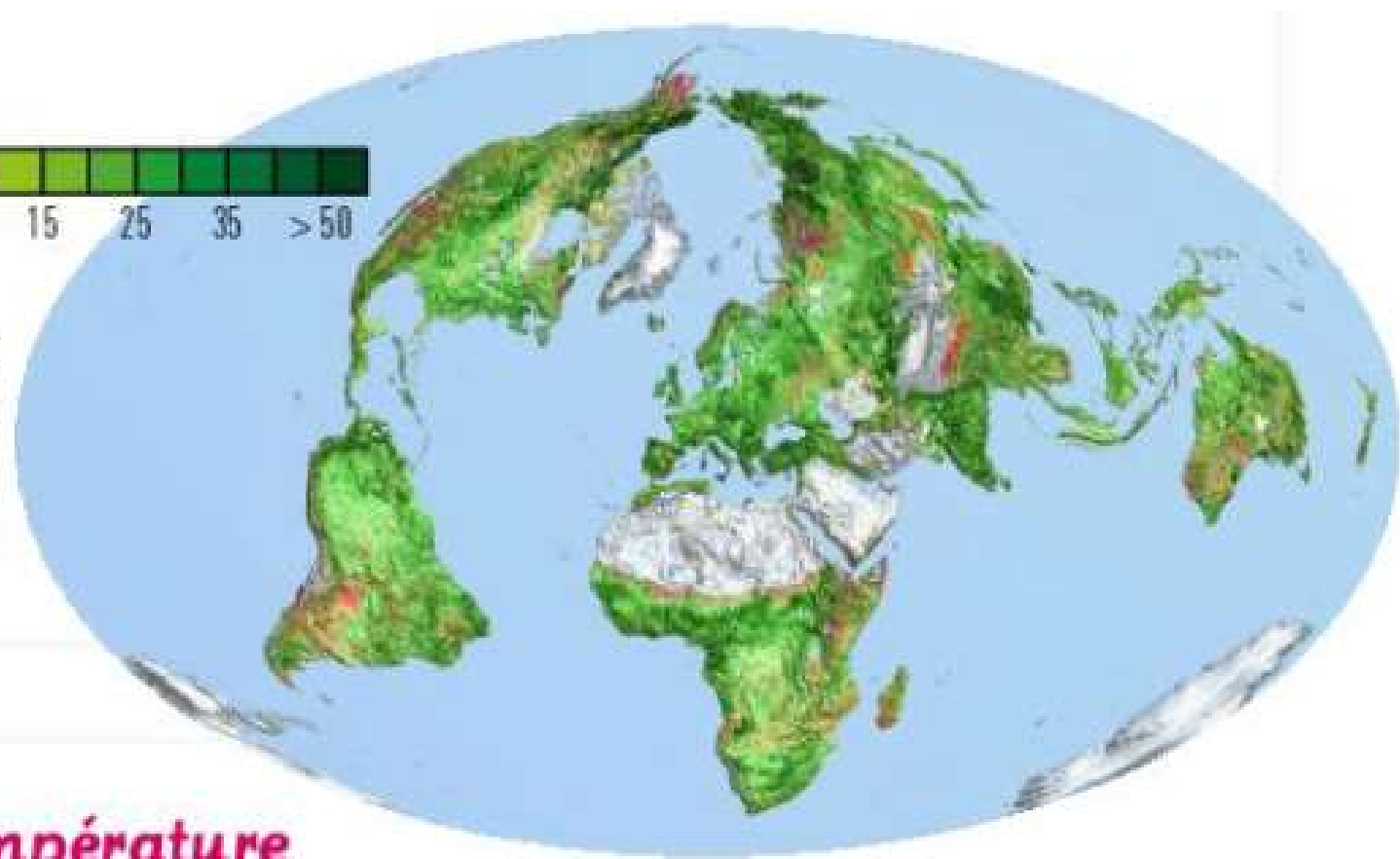
Par exemple, pour un rayonnement supérieur à 286 W · m<sup>-2</sup> (correspondant aux régions intertropicales), la photosynthèse atteint son maximum d'efficacité pour une teneur en CO<sub>2</sub> supérieure à 820 ppm (potentiellement atteinte d'ici la fin du siècle).

Cela signifie que l'effet bénéfique sur la végétalisation de l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> va s'amoinrir avec le temps sur le plus ou moins long terme.

Cependant, les techniques utilisées ne permettent pas de distinguer les écosystèmes forestiers des agrosystèmes\* dont les capacités de stockage sont inférieures. Sans oublier que la déforestation se poursuit à un rythme de  $30 \times 10^6 \text{ ha} \cdot \text{an}^{-1}$ .



**b** Variation de la surface foliaire (en %) de 1982 à 2015. ➤



tion de la température



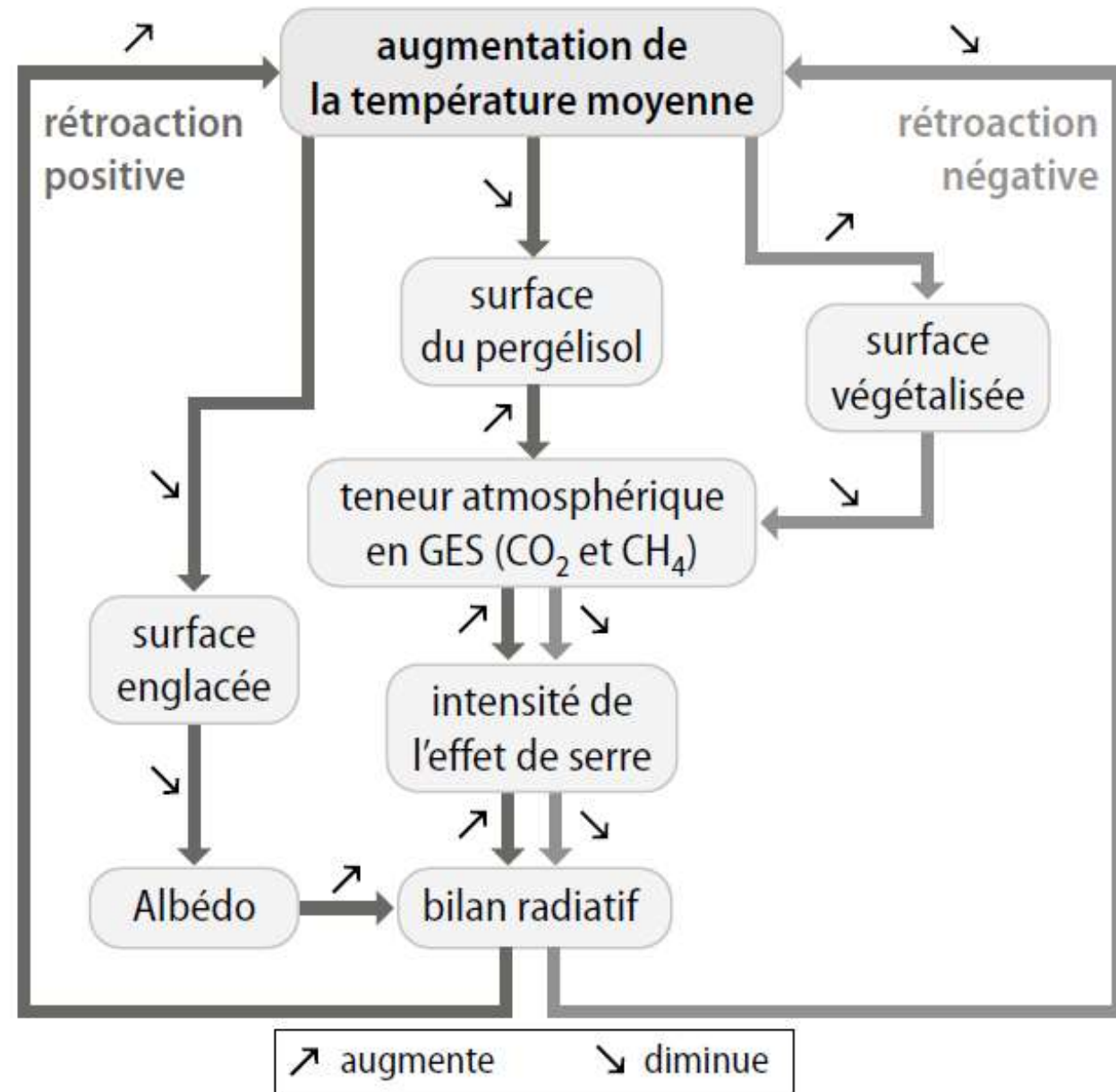
Et surtout, l'accroissement de la végétalisation se fait à une vitesse de 54,5 millions d'ha par an ( $18 \times 10^8 / (2015-1982)$ ) alors que la déforestation avance à raison de 30 millions d'ha par an.

Cette déforestation a en partie pour objectif de créer des zones cultivées dont la capacité de stockage du carbone est très inférieure à celle des forêts.

On peut donc penser qu'une grande partie de l'augmentation de la végétalisation se traduit en réalité par une perte de la capacité de stockage du carbone.

À long terme, cet avantage risque donc de disparaître.

Le schéma devient :



#### **4. Justifiez la position du GIEC quant à l'évolution future de la température moyenne de la Terre.**

On a vu que le réchauffement climatique était capable de s'auto-amplifier du fait de différents mécanismes de rétroaction positive (vapeur d'eau et nuages, libération de quantités massives de GES du pergélisol, albédo diminué par la fonte des glaces) plus nombreux et sans doute plus efficaces que les mécanismes de rétroaction négative (albédo augmenté du fait de la formation des nuages, végétalisation).

Cela conduit à l'idée que, même en cas d'arrêt des émissions de GES dues aux activités humaines, l'augmentation de la température du globe se poursuivra.

**L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont :**

- l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère ;**
- la décroissance de la surface couverte par les glaces et diminution de l'albédo terrestre ;**
- le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère.**

**À court terme, un accroissement de la végétalisation constitue un puits de CO<sub>2</sub> et a donc un effet de rétroaction négative (stabilisatrice).**

**→ Bilan 4a p 53**