

Annexe A - Pourquoi les schémas de bilan radiatif complet ne permettent-ils pas de raisonner qualitativement sur l'influence du CO2 ?

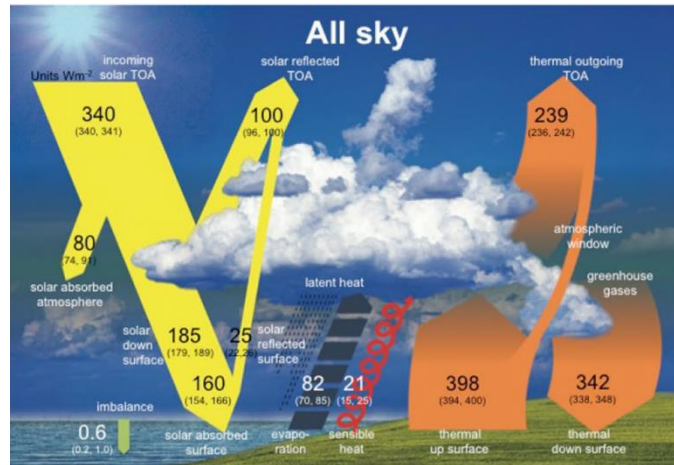


Schéma issu de la Figure 7.2 du 6ème rapport du GIEC, chapitre 7, p.7-177. Les valeurs correspondent à des puissances en W/m². Les couples de valeurs entre parenthèses à l'intervalle d'incertitude.

Si ce schéma est très utile pour comprendre l'ensemble des phénomènes en jeu dans l'atmosphère, il ne permet cependant pas de mener un raisonnement valable sur l'effet de l'augmentation des GES sur la température globale. Cette représentation implique en effet de raisonner parallèlement sur le bilan énergétique de la surface terrestre et celui de l'atmosphère. Or l'ajout de GES a des conséquences simultanées, différentes, et non évidentes sur l'évolution des trois puissances infrarouges impliquées dans ces deux bilans (les trois flèches oranges). En particulier, pour la puissance infrarouge émise par l'ensemble de l'atmosphère vers le sol (flèche de droite), plus de GES implique à la fois plus d'émission infrarouge, mais aussi plus d'absorption par les basses couches de l'atmosphère. Comment savoir alors si la puissance infrarouge arrivant à la surface terrestre devrait au final augmenter ou diminuer lors de l'ajout de GES ? Cela nécessite de prendre en compte la dépendance des puissances infrarouges émises et absorbées en fonction de la concentration en GES et de la température, les deux variant avec l'altitude. A ce stade, le raisonnement qualitatif sur le schéma complet n'est techniquement plus possible, et d'ailleurs les physiciens du climat d'en n'ont pas besoin, car ils simulent directement l'ensemble des phénomènes ayant lieu simultanément dans l'atmosphère, prenant en compte toutes les dépendances entre grandeurs physiques.

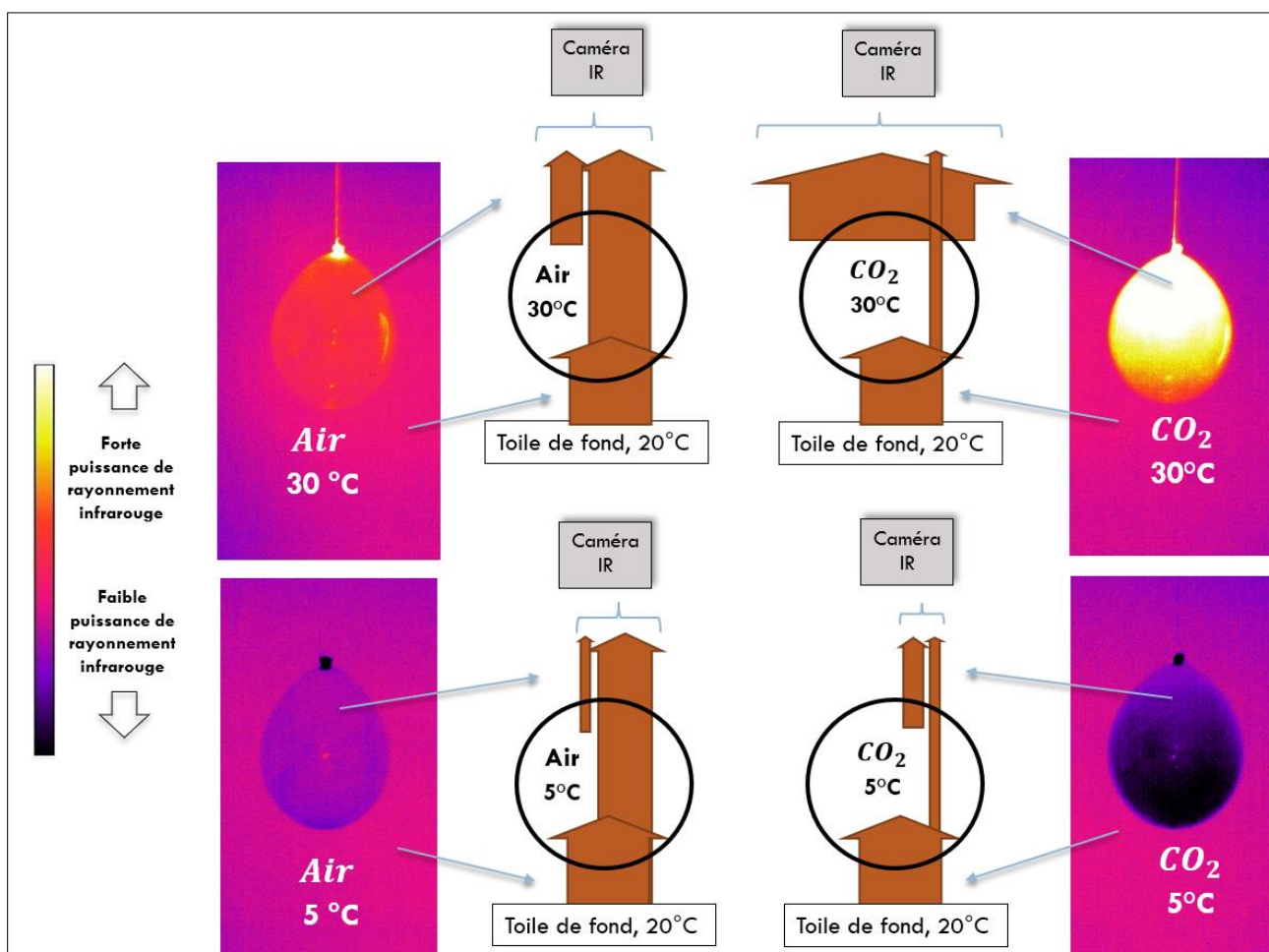
Lorsqu'on veut raisonner qualitativement, le fait de limiter l'analyse au bilan des rayonnements entre le système Terre et l'Espace [remettre le schéma] il est possible de développer un raisonnement plus simple et cohérent, sans avoir besoin de prendre en compte *ni de négliger* l'ensemble des autres phénomènes. Par ailleurs d'un point de vue académique, la définition de l'amplitude de l'effet de serre des rapports du GIEC ne fait intervenir directement ni l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère, ni le rayonnement émis par l'atmosphère vers la surface. Le choix d'un bilan radiatif

restreint au sommet de l'atmosphère est donc aussi plus proche de la définition officielle de l'effet de serre.

Les Grandiloquents – Episode Climat – contenu pédagogique

Annexe B : Interprétation détaillée des images infrarouges des ballons chauds et froids

Les puissances infrarouges mesurées pour les ballons froids ou chauds sont les résultantes de plusieurs composantes. Nous représentons ci-dessous les parts de rayonnement émis par le ballon (membrane + gaz) et de rayonnement transmis par le ballon, issu du fond.



Dans cette représentation, le rayonnement en provenance de la pièce, arrivant jusqu'à la caméra par réflexion sur la membrane, n'est pas représenté, car il est le même dans chaque cas. Pour la composante du rayonnement émise par le ballon, il n'y a pas de distinction entre ce qui est émis par la membrane et ce qui est émis par le gaz à l'intérieur. Lors de la comparaison entre les ballons d'air et de CO₂ à une même température, la différence ne peut être attribuée qu'au paramètre qui change : la nature du gaz (la composante d'émission par la membrane est la même dans les deux cas, puisqu'à la même température). Enfin, cette représentation nécessite de faire l'hypothèse que la capacité d'absorption (largeur de la flèche transmise) ne dépend pas de la température (ce qui est vrai pour

cette différence de température, mais ne peut pas être justifiée dans ce cadre). Pour le cas du ballon de CO₂ froid, le fait que la puissance de rayonnement sortant soit plus faible est donc dû à deux phénomènes : davantage d'absorption du rayonnement du fond (moins de transmission) et une émission plus faible, du fait de la température plus basse du CO₂. Dans le cadre de la recherche d'une explication minimaliste du phénomène, cette interprétation plus précise n'est pas forcément nécessaire pour la suite du raisonnement, pour l'analogie avec le système Terre. Elle est cependant nécessaire pour répondre à « l'argument de la saturation » détaillé plus haut, pour lequel le phénomène d'émission et sa dépendance en la température est omis. C'est la raison pour laquelle il a été choisi, dans la structure logique proposée, de mettre en évidence ce phénomène avec le ballon de CO₂ chaud, même si celui-ci n'est pas directement nécessaire pour la suite du raisonnement.

Annexe C : Justification de l'extrapolation des observations des ballons au cas de l'atmosphère

Une étape clef de la logique de construction proposée consiste à extrapoler l'influence d'un ajout de CO₂ dans l'atmosphère sur le bilan radiatif terrestre, à partir de l'observation infrarouge de ballons d'air et de CO₂ froids. Cette extrapolation demande de considérer l'effet potentiel des autres caractéristiques de l'atmosphère, relativement à la situation des ballons. Ces justifications reprennent les points centraux développés dans la section analyse de contenu.

Une première différence est l'écart de concentration : 0,04% de CO₂ dans l'atmosphère, pour 100% dans le ballon. En prenant en compte la grande différence de volume de gaz traversée dans les deux cas on peut déterminer que le ballon contient environ 26g de CO₂, tandis qu'une colonne verticale d'atmosphère de 30cm de diamètre en contient environ 424g. L'ajout d'un ballon de CO₂ est ainsi équivalent à l'augmentation de la quantité de CO₂ dans une colonne d'atmosphère en environ 10 ans (entre 2014 et 2024)¹. On peut exprimer à partir de cette comparaison quelques différences importantes entre la colonne et le ballon. Dans la colonne d'atmosphère :

- 1) La température et la pression du CO₂ décroissent avec l'altitude (alors qu'elles sont homogènes dans le ballon)
- 2) La colonne d'atmosphère contient aussi de la vapeur d'eau, interagissant avec la même gamme de rayonnement infrarouge que le CO₂
- 3) L'ajout de 26g de CO₂ dans la colonne fait passer sa quantité de 424 à 450g, tandis que pour le ballon, elle passe de 0 à 26g.
- 4) L'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère est progressive, tandis qu'elle est immédiate dans le cas de l'ajout du ballon.

Quelle influence pourrait avoir ces différents points sur la variation de la puissance infrarouge sortante vers l'Espace ?

1) Effet du gradient de température et de pression

¹ A partir de la masse totale de CO₂ dans l'atmosphère, on obtient la valeur de 6kg de CO₂ pour une colonne verticale d'atmosphère de 1m². Une colonne de 30cm de diamètre (3,14 x 15² cm²) contient donc 424g de CO₂. En prenant 14 litres comme volume d'un ballon de 30cm de diamètre, on obtient 26g de CO₂ dans le ballon (1,87g/litres). La colonne d'atmosphère complète contient donc la même quantité de CO₂ que dans 16 ballons de CO₂. La quantité de CO₂ dans le ballon d'air étant négligeable, la baisse de rayonnement infrarouge sortant du ballon de CO₂ froid est donc due à la présence de 26g de CO₂ supplémentaire (plus froid) sur son chemin. Dans le cas de l'atmosphère actuelle, une augmentation de 26g de CO₂ dans une colonne en contenant déjà 424g correspondrait à une augmentation de la concentration de l'ordre de 6%, soit celle entre 2014 et 2024 (d'après la courbe d'évolution du CO₂ : <https://ourworldindata.org/grapher/global-co2-concentration>).

En premier lieu, on peut considérer l'influence du gradient de température dans la colonne d'atmosphère. Une analogie possible est d'imaginer une superposition de ballons de CO₂ de plus en plus froids. Chaque ballon étant plus froid que le précédent, la puissance infrarouge sortante est un peu plus faible après chaque nouveau ballon rencontré (de bas en haut). Le gradient de température ne change donc pas la conclusion qualitative obtenue avec un ballon de température homogène (plus froid que le fond) : une baisse de la puissance infrarouge sortante. Cette analogie ne permet cependant pas de prendre en compte la baisse de pression avec l'altitude dans la colonne d'atmosphère. Physiquement, la diminution de pression a pour effet qu'une même masse de CO₂ est moins absorbante, mais continue quand même à absorber. La conclusion qualitative est donc à nouveau la même qu'en l'absence de gradient de pression.

2) Présence de vapeur d'eau

Une autre différence majeure dans la colonne d'atmosphère est la présence d'autre GES, en particulier la vapeur d'eau, qui absorbe également le rayonnement infrarouge sur une plage de longueur d'onde recouvrant en partie celle du CO₂. Comme on l'a vu, la vapeur d'eau est située dans la basse atmosphère. En reprenant l'analogie des ballons superposés, cela reviendrait à considérer qu'elle est présente essentiellement dans les premiers ballons. Or les ballons au-dessus (ne contenant que du CO₂) sont plus froids, comme ils sont plus haut. La puissance infrarouge sortant de ces ballons est donc plus faible que celle sortant des premiers ballons contenant la vapeur d'eau.

3) Saturation de l'effet du CO₂ avec sa quantité

Dans le cas de l'ajout d'un ballon, on passe de 0 à 25g de CO₂ traversé par le rayonnement, contre 424 à 450g dans le cas d'une colonne d'atmosphère. On pourrait supposer qu'à partir d'une certaine quantité de CO₂, l'effet soit saturé, c'est-à-dire que le passage de 424 à 450g n'ait plus d'influence sur la baisse de puissance infrarouge, quand bien même on en observe une quand on passe de 0 à 25g. Or comme on l'a vu dans la partie analyse de contenu, cet effet de saturation n'a lieu qu'en présence de vapeur d'eau. Autrement dit dans l'analogie précédente, pour les ballons de CO₂ au-dessus de ceux contenant de la vapeur d'eau, en ajouter un supplémentaire aurait donc un effet de baisse de la puissance infrarouge sortante, malgré la quantité de CO₂ déjà présente. Cette implication reste donc qualitativement valable pour un ajout de CO₂ dans une colonne d'atmosphère, celui-ci se répartissant sur toute l'épaisseur, et donc aussi au-dessus de la vapeur d'eau.

4) Ajout progressif ou instantané du CO₂

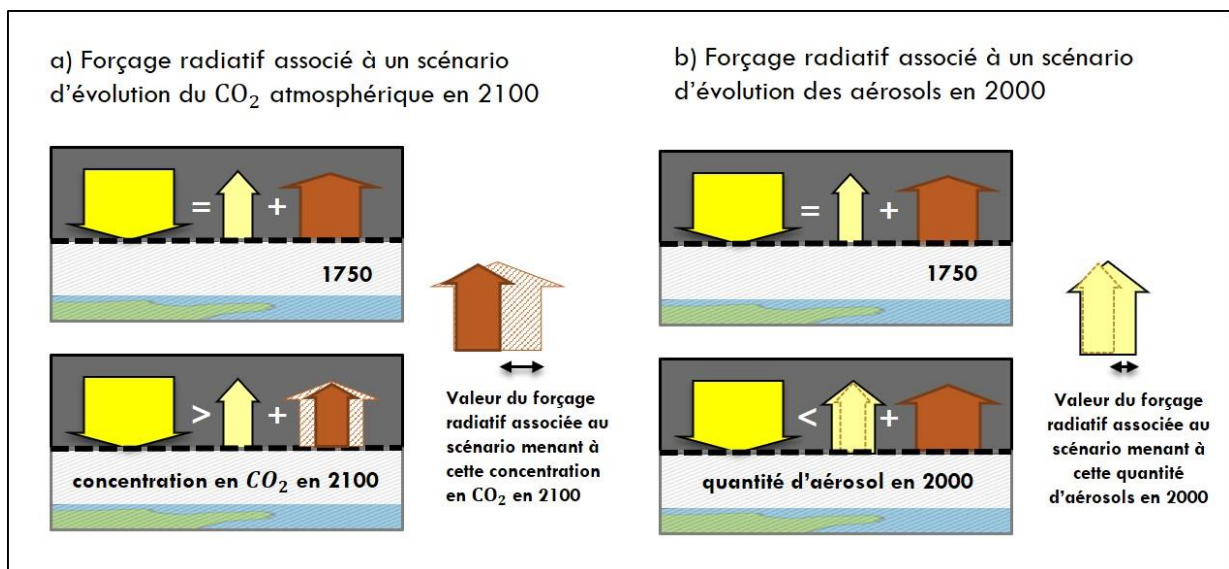
La dernière différence considérée ici entre l'ajout d'un ballon de CO₂ et l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère, et que dans celle-ci se produit petit à petit, impliquant un ajustement progressif des puissances de rayonnement impliquées dans le bilan. Cette augmentation continue de la concentration peut cependant être modélisée comme en une somme de petites d'augmentations discontinues, dont chacune impliquerait une petite baisse de rayonnement sortant, et ainsi une petite élévation de température.

Par ailleurs, l'ajout « d'un seul coup » d'une certaine quantité de CO₂ dans le cas du ballon, et la représentation de la baisse de puissance infrarouge sortante à cet instant, peut permettre une définition du concept de « forçage radiatif », pour non spécialiste. Par exemple, le forçage radiatif

associé à un scénario d'évolution du CO₂ en 2100, s'obtient à partir du calcul suivant (cf. cas a) de la figure n°23) :

- On se place dans la situation de référence : 1750, où les puissances de rayonnement entrant et sortantes sont égales.
- On remplace d'un seul coup la concentration en CO₂ par la valeur qu'elle aurait en 2100, selon un certain scénario.
- A cet instant, il y a une diminution de la puissance de rayonnement infrarouge sortante. La différence entre la puissance entrante et sortante correspond au « forçage radiatif » en 2100 associé à ce scénario d'évolution du CO₂.

Avec cette même logique, on peut définir le forçage radiatif associé à l'évolution de n'importe quelle grandeur ayant une influence sur le bilan radiatif, en n'importe quel moment. Il suffit, partir d'un bilan équilibré, de remplacer instantanément la valeur de cette grandeur à ce moment (cf. cas b) de la figure n°23, pour le forçage radiatif associé aux aérosols en 2000).



Cette représentation permet ainsi de rendre accessible une définition du forçage radiatif compatible avec celle utilisée en physique du climat, ce qui n'est pas le cas de la définition donnée dans le programme scolaire de terminale enseignement scientifique, où dans beaucoup d'autres ressources de vulgarisation, comme la Fresque du climat. Le forçage radiatif y est défini comme « la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise » (MEN, 2023, p.9), sans référence à la temporalité, ce qui laisse penser a priori qu'il s'agit d'une différence à un instant donné. Cette définition, qui correspond en physique à celle du « déséquilibre radiatif », donne l'idée - à tort - que le forçage radiatif pourrait être une grandeur physique mesurable. Or ce n'est pas le cas, puisque sa définition implique l'effet d'une variation instantanée de la valeur du paramètre en jeu, bien que son évolution soit quasiment toujours progressive (sauf éventuellement dans le cas d'une éruption volcanique). Comme vu précédemment, une évolution progressive d'un paramètre implique un réajustement du bilan radiatif au fur et mesure, de sorte que la notion de « forçage radiatif » ne correspond pas en général à une valeur mesurable, même indirectement. L'utilité de cette grandeur est de pouvoir comparer avec la même unité l'effet de plusieurs paramètres, via la même règle de calcul. Une présentation plus détaillée du concept de forçage radiatif est proposée notamment dans « Horizons Climatiques » (Dion & Henrion, 2024, p68-70), suite à une réflexion collective entre les auteurs de la BD et de cet article.