

Comment comprendre la cause principale du changement climatique avec un minimum de prérequis ?

Proposition de nouvelles expériences et d'une logique de construction du lien entre l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et le réchauffement global.

Maron Valentin⁽¹⁾⁽²⁾, Dufresne Jean-Louis⁽³⁾, Pélissier Lionel⁽¹⁾⁽²⁾, Rabier Alain⁽²⁾, Cochepin Medhi⁽²⁾

⁽¹⁾EFTS (Education, Formation, Travail, Savoirs), Université Toulouse Jean Jaurès – France

⁽²⁾INSPE Toulouse Occitanie-Pyrénées, Université Toulouse Jean Jaurès – France

⁽³⁾IPSL (Institut Pierre-Simon-Laplace), École normale supérieure - Paris, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Institut National des Sciences de l'Univers, Ecole Polytechnique, Centre National d'Études Spatiales, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris Cité – France

Résumé

Nous proposons dans cette étude une approche d'enseignement du réchauffement climatique adaptée aux nouveaux programmes de lycée général et professionnel. L'objectif visé est la construction du lien entre augmentation de la concentration en CO₂ et élévation de la température moyenne de la Terre, en s'appuyant autant que possible sur des éléments empiriques explicites. Nous présentons dans un premier temps les approches d'enseignement existantes sur le sujet, qui sont ensuite mises en relation avec les idées et modes de raisonnement connus des élèves, en particulier : la non-évidence des interactions entre gaz et rayonnement. Les choix didactiques structurant le cheminement conceptuel proposé sont alors exposés. Ils s'articulent autour de l'interprétation d'expériences réalisées avec une caméra infrarouge permettant de mettre en évidence l'émission et l'absorption du rayonnement infrarouge par le CO₂.

Contexte

« Le réchauffement climatique annonce des conflits comme la nuée porte l'orage. [...] Ce qui est en cause avec cette conférence sur le climat, c'est la paix. ». Ces mots lors du [discours d'introduction de la COP21 en 2015](#)¹, par le président de la République française, rappellent tout l'enjeu de l'action climatique. Une des conditions nécessaires pour que des choix politiques forts puissent être acceptés par la population est qu'une majorité suffisante soit d'accord sur l'origine du problème. Si selon le 6^{ème} rapport du GIEC (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021) il est acquis que l'essentiel du changement climatique observé actuellement est dû aux activités humaines, cela ne fait pas encore consensus dans la population. En 2023, d'après une [enquête EDF-IPSOS internationale](#)², 27% des sondés (24000 personnes dans 30 pays) considèrent encore que celui-ci est principalement d'origine naturelle. Cette proportion est de 25% pour la France³, et s'élevait à 32% pour la tranche d'âge 16-24 ans en 2022⁴. A cela s'ajoute environ 10% des sondés niant l'existence même du réchauffement climatique. Parmi les raisons de ces constats figurent les stratégies de désinformations massives de l'industrie fossile aujourd'hui bien connues (Oreskes & Conway, 2010). Ces phénomènes sont également présents en France, avec en particulier un très fort regain depuis l'été 2022 sur les réseaux sociaux, où a eu lieu une multiplication par 6 de l'activité climatosceptique en ligne (Chavalarias et al., 2023). Celle-ci peut être reliée à la hausse de 8% en France des personnes niant l'origine principalement humaine du changement climatique, entre 2019 et 2022³.

Face à cette situation, le rôle de l'enseignement pour établir ce fait de la manière la plus convaincante possible est crucial, afin de « construire la confiance » envers les connaissances sur le climat (Léna & Wilgenbus, 2020). En France comme dans d'autres pays, la place de la physique du climat a été fortement renforcée dans les nouveaux programmes du secondaire, du cycle 4 au lycée, à la fois dans les voies générales et professionnelles. La question du rôle des gaz à effet de serre (GES) sur le réchauffement climatique est développée en particulier dans le programme d'enseignement scientifique de Terminale, où il apparaît de la façon suivante (section 2.2, p.9) :

"Lorsque la concentration des GES augmente, l'atmosphère absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre. Il en résulte une augmentation de la puissance radiative reçue par la surface terrestre de l'atmosphère. Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle [...] ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre [...]" (MEN 2023, p.9)

¹<https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-13543-fr.pdf>

² <https://www.edf.fr/groupe-edf/observatoire-international-climat-et-opinions-publiques/telechargements>

³ 28% selon l'enquête 2023 de l'ADEME : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6706-les-representations-sociales-du-changement-climatique-24eme-vague-du-barometre.html>

⁴ <https://www.jean-jaures.org/publication/climatoscepticisme-le-nouvel-horizon-du-populisme-francais/>

Cette logique de présentation du programme, reprise dans de nombreux manuels, pose d'importants problèmes, régulièrement exploités dans les rhétoriques climatosceptiques⁵. Le premier est que l'essentiel du rayonnement émis par la surface est absorbé par la vapeur d'eau qui se trouve dans la basse atmosphère. Seule une faible fraction est absorbée par le dioxyde de carbone (CO₂), et celle-ci n'augmente quasiment pas lorsque la concentration de CO₂ augmente. Ainsi, la première phrase est valable pour la vapeur d'eau, mais pas pour le CO₂, alors que c'est celui-ci dont il est principalement question lorsque l'on parle de l'augmentation de la concentration en GES. La seconde phrase mentionne une "augmentation de la puissance radiative reçue par la surface terrestre". Or les calculs radiatifs précis montrent que si c'est le cas pour la vapeur d'eau, cela est négligeable pour le CO₂ (la puissance reçue par la surface augmente très peu lorsque seule la concentration de CO₂ augmente). Ces considérations physiques remettent en question la légitimité de l'ensemble des raisonnements faits sur les schémas les plus classiques de l'effet de serre pour expliquer le lien entre émissions de GES et réchauffement climatique (schémas représentant les différents types de rayonnements entre la surface terrestre et l'atmosphère). Une explication valable de ce lien nécessite donc de changer de formulation, et de représentation.

Cette recherche, issue d'une collaboration entre didacticiens et physiciens du climat, a pour objectif de développer une logique de construction du lien entre augmentation de la concentration en CO₂ et élévation de la température moyenne de la Terre. La mise en évidence de ce lien apporte un premier argument qualitatif pour comprendre l'origine humaine du changement climatique, en amont de la modélisation permettant les simulations du climat passé et futur. L'intention centrale de cette approche est qu'elle soit accessible avec le minimum de prérequis conceptuels, afin d'être utilisable pour des élèves non spécialistes de physique, notamment dans le cadre de l'enseignement scientifique, adressé à l'ensemble des élèves de lycée général. Notre hypothèse est qu'une compréhension approfondie du lien entre CO₂ et température peut servir de point d'appui à d'autres modalités de l'éducation au changement climatique.

Cadre général de travail

Cette recherche s'inspire du « *Model of Educational Reconstruction* » (Kattmann et al., 1996). Celui-ci invite à une réflexion sur la transposition d'un contenu donné à un certain niveau, à partir de l'analyse conjointe et la mise en perspective :

- de la structure conceptuelle du contenu en jeu,
- des points de vue et conceptions des élèves et enseignant.es à propos de ce contenu.

Les différentes composantes de cette méthode de travail peuvent être représentées par le schéma suivant (figure n°1), issu de (Duit, 2007, p.4).

⁵ Voir notamment la synthèse faite dans cet article : <https://blogs.letemps.ch/richard-emmanuel-eastes/2019/09/27/la-trouble-posture-des-chimistes-francais-face-au-deni-climatique/>

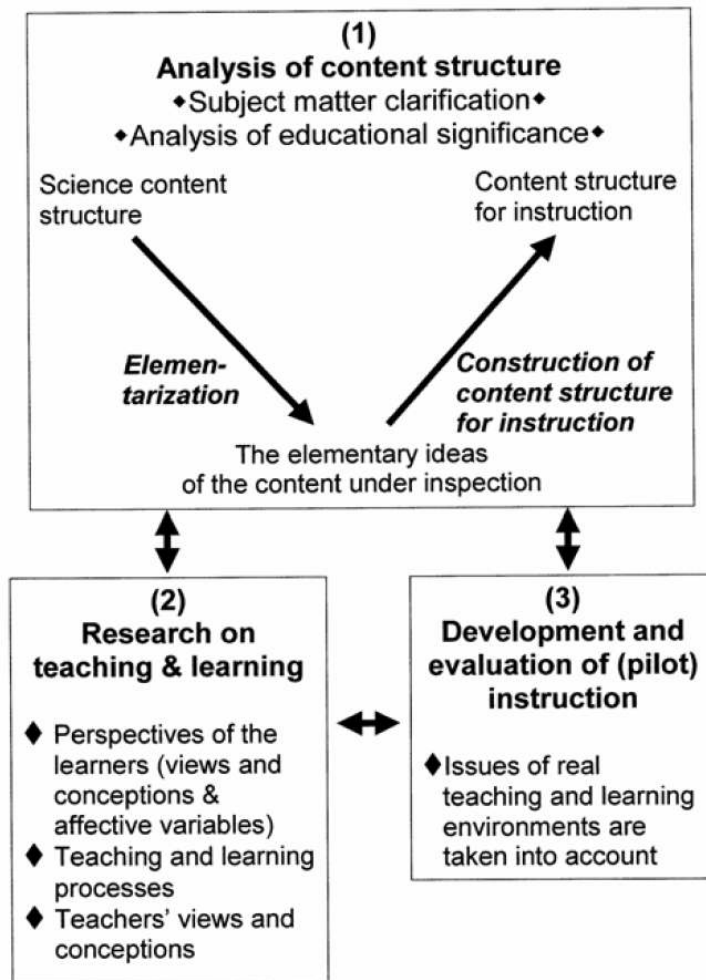


Figure n°1 - composante du Model of Educational Reconstruction selon (Duit, 2007)

Le travail présenté dans cet article se situe au niveau du bloc (1), avec comme intention la recherche d'une structure possible du contenu à enseigner ("content structure for instruction"), prenant en compte les recherches sur l'enseignement et l'apprentissage de ce contenu (2). Il ne s'agit donc pas à ce stade de proposer une séquence d'enseignement (3), mais de construire et justifier un ensemble de choix possibles vis à vis :

- des concepts élémentaires et représentations pour formuler le contenu scientifique au niveau visé,
- des contextes et expériences possibles pour introduire ces notions
- de l'articulation logique des concepts et contextes expérimentaux pour construire le contenu en jeu.

Nous désignerons cet ensemble de propositions par le terme de "logique de construction" du contenu à enseigner. Cette expression vise à expliciter d'une part l'intention de construction argumentée du savoir en jeu, et rappeler d'autre part qu'il s'agit uniquement d'une logique possible d'articulation des idées pour construire ce savoir. Cette logique pourrait être déclinée de diverses manières selon les contextes, en fonction du niveau scolaire, du temps disponible,

et de l'ensemble des contraintes. Des séquences d'enseignement ou des ressources pédagogiques s'appuyant sur cette logique de construction nécessitent donc des choix didactiques et pédagogiques complémentaires, dépendant de points de vue généraux sur l'apprentissage et l'enseignement. Il s'agit donc d'une première étape d'un travail de transposition didactique, visant à définir un certain « éclairage du contenu », au sens de Viennot (2009), en sélectionnant les éléments clefs et la manière de les mettre en lumière, compte tenu des conceptions et modes de raisonnement des élèves.

Nous commencerons par partager une analyse du contenu physique en jeu, dans la perspective d'une reconstruction didactique accessible avec un minimum de prérequis. Cela nous conduira à délimiter les éléments que nous considérons comme nécessaires à cette fin (« Subject Matter Clarification » & « Elementarization », bloc (1) de la figure n°1). Nous présenterons ensuite certaines approches d'enseignement courantes du sujet, que nous questionnerons relativement aux difficultés connues concernant la compréhension de l'effet de serre (bloc (2) de la figure n°1). La mise en lien de ces différents niveaux d'analyse nous permettra alors d'explicitier précisément notre question de recherche, puis de présenter et justifier les différents choix didactiques élaborés pour y répondre (« Construction of content structure for instruction », bloc (1) de la figure n°1). Les prérequis et limites de l'approche proposée seront enfin discutés.

Analyse du contenu et délimitation des savoirs visés

Comment l'influence du CO₂ sur le climat est-elle établie en physique du climat ?

La construction du lien entre l'augmentation du taux de CO₂ et l'élévation de température nécessite de mobiliser certains concepts impliqués dans le bilan énergétique terrestre, tel que représenté par exemple dans la figure n°2, issue du 6ème rapport du GIEC (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021).

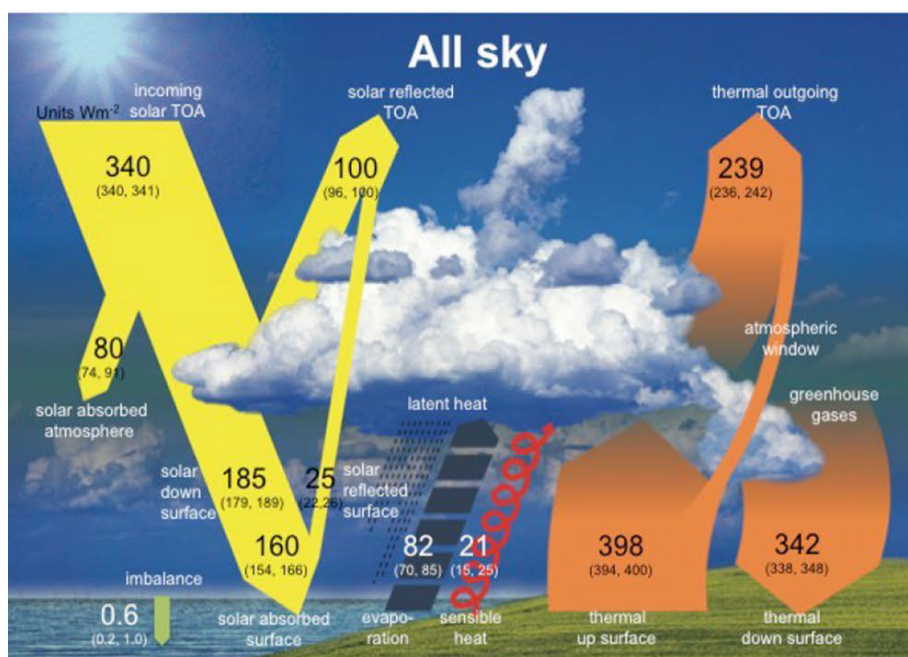


Figure n°2 - Schéma issu de la Figure 7.2 du 6ème rapport du GIEC, [chapitre 7, p.183](#). Les valeurs correspondent à des puissances en W/m². Les couples de valeurs entre parenthèses à l'intervalle d'incertitude)

Ce schéma permet de se faire une idée des différents types de rayonnement en jeu : rayonnement solaire entrant, absorbé et renvoyé par diffusion, rayonnement infrarouge émis et absorbé par la surface terrestre et par l'atmosphère. Il n'est cependant pas possible sur la base de cette représentation de formuler une explication qualitative cohérente du lien entre l'augmentation du taux de GES et le réchauffement global, bien que cela soit couramment tenté dans la vulgarisation scientifique ou l'enseignement scolaire. En premier lieu, ce schéma implique 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 orange). 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. Par ailleurs d'un point de vue académique, la définition de l'amplitude de l'effet de serre ne fait intervenir directement ni l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère, ni le rayonnement émis par l'atmosphère vers la surface (Raval & Ramanathan, 1989). L'importance de considérer le bilan des flux au sommet de l'atmosphère et non à la surface de la Terre lorsque l'on étudie les variations du climat a été formalisé (Manabe & Wetherald, 1967).

En limitant l'analyse au bilan des rayonnements entre le système Terre (incluant l'atmosphère) et l'Espace - c'est-à-dire uniquement les trois flèches du haut dans la figure n°2 - il est possible de développer un raisonnement plus simple et cohérent, sans avoir besoin de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques ayant lieu dans l'atmosphère. La température moyenne du système Terre dépend du bilan entre les puissances de rayonnement entrant et sortant du système. En particulier, si la puissance infrarouge sortante diminue, pour une même valeur de la puissance solaire entrante et réfléchie, alors la température doit augmenter. Ce raisonnement est représenté par exemple dans la figure n°3, extraite de la BD « Horizons Climatiques » (Dion & Henrion, 2024, p.61 et 65).

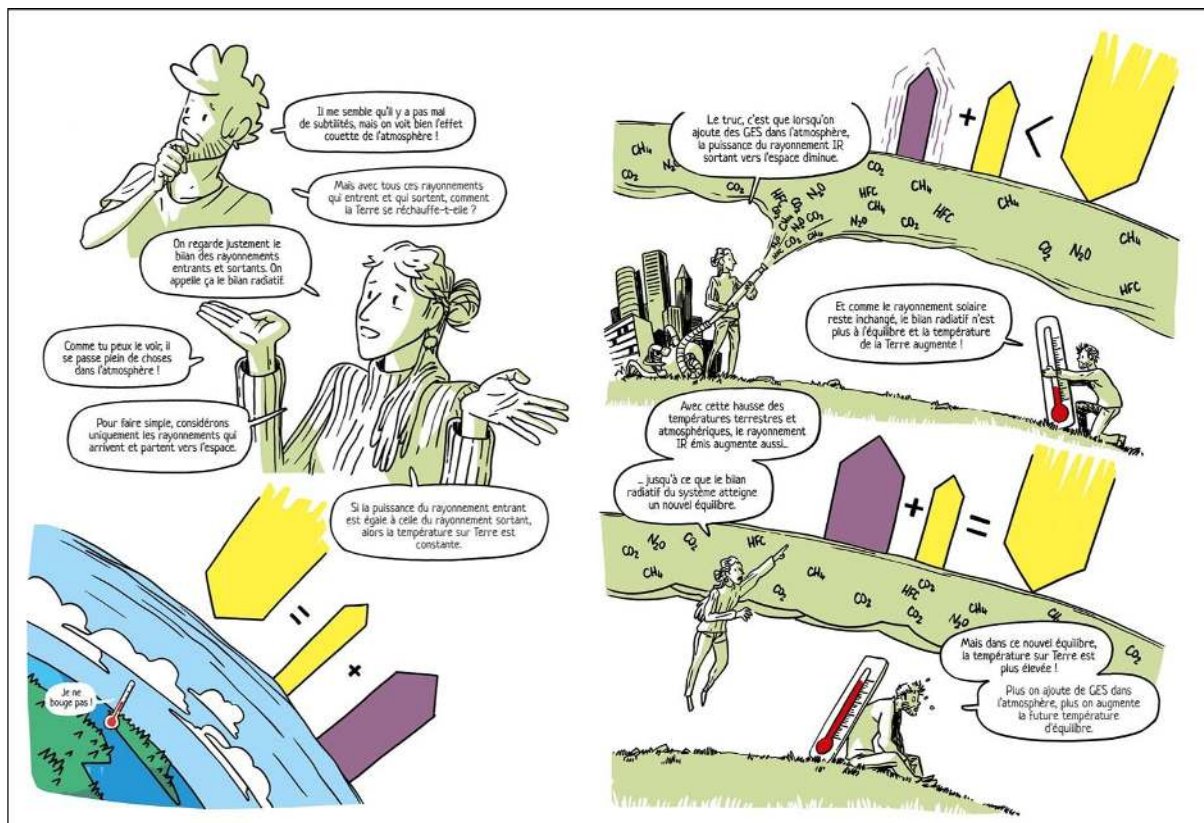


Figure n°3 – Représentation du bilan radiatif restreint à son interface avec l'Espace, et son évolution lors d'ajout de GES, extraite de la BD « Horizons Climatiques » (Dion & Henrion, 2024, p.61 et 65). Les schémas et l'explication proposés sont issus d'un travail collectif entre les auteurs de la BD et de cet article, sur la base de l'analyse critique de l'explication la plus courante présentée ci-dessus.

Une fois l'explication du phénomène posée en ces termes, il reste à montrer que l'augmentation de la concentration en GES (à un instant donné) implique effectivement la diminution de la puissance de rayonnement infrarouge sortante (au même instant). D'un point de vue physique, la relation entre puissance de rayonnement infrarouge et taux de GES est décrite localement en tout point de l'atmosphère, à partir des équations dites "du transfert radiatif", prenant en compte la température à une altitude donnée (voir par exemple

l'équation différentielle 2.6 du cours d'[introduction à la physique de l'atmosphère](#)⁶ du magistère des Sciences de la Terre à Paris (p.11), dans le cas d'un modèle simple). Ces équations, ajoutées à celles correspondant aux autres phénomènes en jeu, sont intégrées dans les modèles climatiques. À partir de ceux-ci, il est possible de simuler le climat passé en faisant abstraction de certains facteurs, afin de déterminer leur influence relativement aux autres. En particulier, lorsqu'on simule l'évolution du climat depuis 1850 sans prendre en compte l'augmentation des taux de GES et d'aérosols due aux activités humaines, on obtient une température moyenne globalement stable (cf. courbe bleue de la figure n°4). En ajoutant la prise en compte des facteurs humains, les simulations obtenues sont très proches de l'évolution de la température moyenne constatée depuis 1850 (courbe rouge).

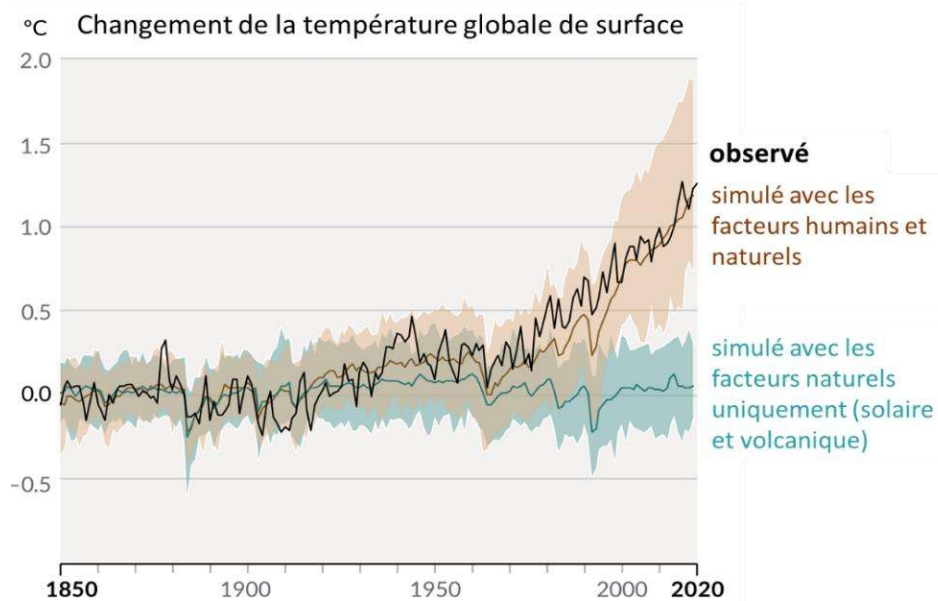


Figure n°4 : Changement de la température à la surface du globe (moyenne annuelle) tel qu'observé et simulé avec les facteurs naturels & humains et les facteurs uniquement naturels, sur la période 1850-2020. (Figure 1 du résumé à l'intention des décideurs du 6ème rapport du GIEC (2021)⁷, p.6)

D'autres analyses plus complètes permettent de confirmer que la quasi-totalité du réchauffement depuis 1850 est dû aux activités humaines. Parmi les facteurs humains, l'augmentation des aérosols a une tendance au refroidissement (en augmentant l'albédo). Cette tendance atténue le réchauffement dû à l'augmentation des GES, qui reste l'effet dominant du processus. Parmi les GES, les simulations permettent d'estimer que l'augmentation du taux de CO₂ est responsable à lui seul de l'ordre de deux tiers du réchauffement actuel. D'un point de vue qualitatif, on peut donc dire que la cause majeure du réchauffement climatique est bien l'augmentation de la concentration en GES dans

⁶ <https://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/cours.pdf>

⁷ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM> (notre traduction)

l'atmosphère issue des activités humaines, et en premier lieu celle du CO₂, émis par la combustion de ressources fossiles et le changement d'usage des sols (déforestation).

Malgré le consensus scientifique sur ce résultat, cela n'est pas consensuel dans l'opinion publique. Comme on l'a vu plus haut : entre un quart et un tiers de la population (mondiale comme française) considère que le réchauffement est principalement dû à des causes naturelles, c'est-à-dire indépendantes des activités humaines. Si de nombreux facteurs socio-économiques peuvent expliquer cette situation⁸, on peut supposer que le niveau de technicité pour obtenir le résultat précédent fait partie des obstacles à la confiance qui peut lui être accordée. Sa construction est en effet assez indirecte, au sens des nombreuses étapes nécessaires pour y parvenir, impliquant les « boîtes noires » que représentent, pour des non spécialistes, les notions d'« équations de la physique » et de « modèle climatique ».

Cette difficulté d'accès rend aussi possible des critiques climatosceptiques à partir de raisonnements à la fois plus accessibles, tout en pouvant donner une impression de rigueur et d'expertise. C'est le cas en particulier de l'influence du CO₂ sur le climat, qui est encore régulièrement remise en cause. L'argument mis en avant avec l'apparence la plus scientifique est celui souvent désigné par l'expression "d'argument de la saturation". Les raisons de son invalidité méritent une clarification, dans le but de justifier le choix de savoirs visés dans ce travail.

Pourquoi l'argument de la saturation n'est-il pas valable ?

Le raisonnement s'appuyant sur l'argument de la saturation consiste à dire que l'on peut montrer par le calcul que l'absorption du rayonnement infrarouge terrestre par l'ensemble de l'atmosphère n'augmente quasiment pas avec la concentration en CO₂, proche de la concentration actuelle (voir par exemple la figure 8 de (Dufresne & Treiner, 2011)). Cet effet est en grande partie dû à la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui absorbe également le rayonnement infrarouge sur une plage de longueur d'onde recouvrant celle du CO₂. L'argument de la saturation est donc le suivant : si le rayonnement infrarouge terrestre est déjà entièrement absorbé (pour la gamme de longueur d'onde où il peut l'être) par la vapeur d'eau et le CO₂ déjà présent dans l'atmosphère, alors ajouter plus de CO₂ ne devrait pas avoir d'effet sur la puissance infrarouge sortante vers l'Espace. D'après le raisonnement explicité plus haut sur le bilan radiatif du système Terre, l'absence de variation de la puissance sortante vers l'Espace implique l'absence d'évolution de la température.

Ce raisonnement, bien que basé sur des données de simulation valides, n'est pourtant pas valable, pour plusieurs raisons :

- La première et plus importante est qu'il s'agit d'un raisonnement uniquement basé sur la notion d'absorption du rayonnement infrarouge par les gaz de l'atmosphère, qui ne considère pas le phénomène pourtant indissociable d'émission de rayonnement

⁸ dont le lobbying et la désinformation climatosceptique financés par le secteur des énergies fossiles (Oreskes & Conway, 2010), et sa démultiplication via les réseaux sociaux (Chavalarias et al., 2023)

infrarouge par ces mêmes gaz. Or plus un gaz peut absorber, plus il peut émettre. De plus, comme pour les solides, la puissance infrarouge émise dépend de la température du gaz.

- Ensuite, le raisonnement sur la saturation ne prend pas en compte que la vapeur d'eau est concentrée essentiellement dans la basse atmosphère (essentiellement les trois premiers kilomètres de la troposphère). Or, d'après le point précédent, cette couche d'atmosphère qui absorbe "beaucoup" émet elle-même "beaucoup" de rayonnement infrarouge, et notamment vers la partie supérieure de l'atmosphère, en direction de l'Espace. Dans cette zone supérieure où il y a très peu de vapeur d'eau, l'absorption du rayonnement infrarouge par le CO₂ n'est pas entièrement saturée (cf. figure 8 dans Dufresne & Treiner (2011)). Autrement dit, pour la plus grande partie de l'atmosphère (au-delà de trois kilomètres environ), l'absorption du rayonnement infrarouge augmente donc bien en fonction de la concentration en CO₂. Cet aspect n'est pas développé dans Dufresne & Treiner (2011), mais clairement mis en évidence dans Jeevanjee et al. (2021) et Roms et al. (2022).
- La troisième raison est que le raisonnement sur la saturation ne prend pas en compte la variation de température de l'atmosphère en fonction de l'altitude. Or la puissance de rayonnement émise par une couche d'atmosphère dépend de cette température, donc plus on s'élève, plus la température décroît (dans la partie où l'essentiel du gaz est présent), et donc plus la puissance infrarouge émise est faible. La prise en compte du gradient de température verticale amplifie donc la diminution de la puissance infrarouge sortante vers l'Espace. Dufresne et Treiner (2011) ont proposé une explication qualitative du rôle du gradient de température lors de l'ajout de GES. L'objectif était de montrer que "même si" il y avait une saturation totale de l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère, l'effet du gradient de température vertical suffirait quand même à expliquer la diminution de la puissance infrarouge sortante.

Les modèles permettant d'obtenir les simulations de la figure n°4 prennent en compte l'ensemble de ces phénomènes.

Savoirs visés pour une approche avec un minimum de prérequis

Dans ce travail, nous cherchons à établir une logique de construction du lien entre CO₂ et température qui soit accessible avec un minimum de prérequis en physique. Pour cela, nous nous limiterons à l'analyse du bilan des rayonnements entre le système Terre et l'Espace (puissance solaire entrante, puissance réfléchie & puissance infrarouge sortante, cf. schéma de la figure n°3). Un premier point nécessaire à introduire sera le lien entre le bilan de puissance entrante et sortante et l'évolution de la température du système. L'enjeu sera alors de justifier la diminution de la puissance infrarouge sortante avec l'ajout de CO₂, de la manière la plus minimaliste possible, tout en étant légitime d'un point de vue scientifique. D'après l'analyse ci-dessus, cette relation dépend des trois phénomènes suivants :

- la capacité du CO₂ à émettre du rayonnement infrarouge, dépendant de sa température et de sa concentration,
- la capacité du CO₂ à absorber du rayonnement infrarouge, dépendant de sa concentration,
- Le gradient de température vertical de l'atmosphère.

Dans l'optique d'une approche qualitative, la considération des deux premiers points peut suffire à une déduction valide du sens de variation de la puissance infrarouge sortante suite à un ajout de CO₂. Cette déduction implique de prendre en compte que l'atmosphère est en moyenne plus froide que la surface terrestre, sans nécessairement avoir besoin d'expliquer dans le détail le rôle d'amplification du phénomène que joue le gradient de température.

Ces deux premiers points seront donc centraux parmi les contenus visés dans ce travail. Ils sont à la fois suffisants pour mettre en évidence la tendance du phénomène (la diminution de la puissance sortante), et nécessaires pour pouvoir approfondir ultérieurement le raisonnement sur le sujet, comme dans Dufresne & Treiner (2011).

Mobiliser les notions d'émissions et d'absorption de rayonnement avec un public non spécialiste, dans le but de raisonner sur la température de la Terre, pose de nombreuses questions sur les concepts nécessaires à introduire et la manière de les construire. L'ensemble des concepts choisis pour traiter du sujet avec un minimum de prérequis seront justifiés au fur et à mesure de la présentation de la structure logique proposée.

Limites des approches d'enseignement existantes

Utilisation des spectres d'absorption

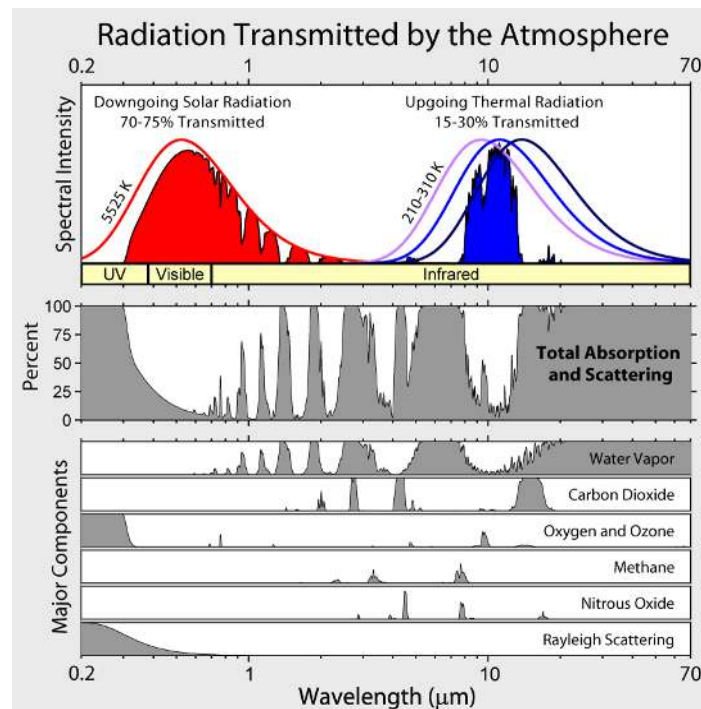
Parmi les scientifiques spécialistes du sujet, certains ont travaillé particulièrement sur des approches de vulgarisation du phénomène d'effet de serre atmosphérique, et ont produit des ressources pédagogiques destinées aux enseignants, dont notamment les deux suivantes, parmi les plus récentes et les plus développées :

- « [Principes de base de l'effet de serre](#) » (Dufresne, 2020)
- « [Rayonnement, opacité et effet de serre](#) » (Thollot & Dequincey, 2021)

Ces deux ressources ont un point commun : le fait de montrer que l'absorption du rayonnement dépend de la nature du matériau et du type de rayonnement. Suite à ces expérimentations impliquant des solides, est amenée l'idée que cela est également valable pour les gaz. La référence empirique utilisée est le spectre d'absorption de différents gaz

(figure n°5). Il s'agit également de l'approche choisie dans une récente recherche en didactique de la physique (Toffaletti et al., 2022).

Figure n°5 - Rayonnement transmis par l'atmosphère. Figure réalisée par Robert A. Rohde pour le



Global Warming Art project, citée par (Thollot & Dequinney, 2021)

Dans le cadre de ce travail, visant le développement d'une approche la plus accessible possible du sujet, nous avons cherché à éviter la référence à la notion de spectre. En effet, pour un public non spécialiste de physique, ayant une faible maîtrise (voire nulle) de la notion de longueur d'onde électromagnétique, les spectres d'absorption des gaz s'avèrent difficiles (voir impossibles) à comprendre, et donc à utiliser comme référence empirique. Si les spectres d'émissions contenu et spectre de raies d'absorption sont traités en seconde générale,

- ils le sont de manière qualitative (avec des couleurs présentes ou non) et pas en tant qu'intensité spectrale en fonction de longueur d'onde,
- ils se limitent au domaine du visible (contrairement à ceux dont on a besoin ici),
- le lien entre ces spectres et une approche énergétique du rayonnement n'est pas au programme, et représente un saut considérable. Le passage du spectre à une puissance de rayonnement infrarouge totale - dont on a besoin ici pour le bilan radiatif - nécessite une intégration de l'intensité spectrale sur toutes les longueurs d'onde du spectre, opération inaccessible pour la large majorité des élèves de lycée, autant d'un point de vue physique que mathématique (le début de l'intégration est seulement au programme de la spécialité mathématique de terminale).

Expérience du réchauffement d'une enceinte de CO₂

Une autre approche courante dans les ressources pédagogiques sur le climat (par exemple sur [le site de La main à la pâte](#)⁹), ainsi que dans certaines recherches en didactique (Besson et al., 2010), consiste à s'appuyer sur une manipulation en apparence simple. Celle-ci consiste à comparer l'élévation de température d'une enceinte fermée où a été ajoutée du CO₂ à une autre remplie d'air, les deux étant pareillement exposées au rayonnement (du soleil ou d'une lampe). Si on constate effectivement une élévation de température plus grande dans le cas du CO₂, cela est dû principalement aux phénomènes de conduction et convection, variant avec les propriétés thermophysiques du gaz (densité, viscosité, conductivité), et non à l'interaction du CO₂ avec le rayonnement infrarouge, comme dans le cas de l'atmosphère. Cela est mis en évidence expérimentalement dans l'article « *Climate change in a shoebox: Right result, wrong physics* » (Wagoner et al., 2010), où cette même expérience est faite deux fois, avec du CO₂ et de l'Argon. L'Argon est choisi pour sa densité plus élevée que l'air, proche de celle du CO₂, et le fait qu'il n'absorbe ni n'émette pas de rayonnement infrarouge. L'ajout d'Argon dans l'enceinte entraîne une élévation de température similaire à celle suite à l'ajout de CO₂. Ce phénomène de réchauffement dû à l'ajout d'un gaz plus dense n'a pas lieu dans le cas de l'atmosphère, du fait de la très faible proportion relative de CO₂ (0,04 %), dont la variation ne modifie quasiment pas les propriétés thermophysiques de l'atmosphère¹⁰.

Si l'expérience simple du réchauffement d'une enceinte CO₂ ne correspond pas au phénomène d'interaction entre gaz et rayonnement ayant lieu dans l'atmosphère, il ne reste donc aucune donnée expérimentale accessible pour justifier l'influence du CO₂ dans le réchauffement climatique. L'unique point d'appui utilisable est l'analogie avec l'absorption du rayonnement infrarouge par le verre ou le plastique. D'un point de vue didactique, l'utilisation de cette analogie pose la question de sa recevabilité par les élèves, au-delà de l'argument d'autorité. Autrement dit : dans quelle mesure pensent-il possible qu'un gaz tel que le CO₂ puisse absorber du rayonnement infrarouge ? Idées a priori et difficultés en jeu

À propos de l'interaction entre gaz et rayonnement

Des recherches ont montré qu'au niveau de l'école primaire, l'idée que « l'air soit de la matière » n'est pas du tout une évidence pour les élèves (Plé, 1997). D'un point de vue physique, les gaz ne partagent pas toutes les propriétés des solides. Pourquoi partageraient-ils *a priori* leurs propriétés concernant les interactions avec le rayonnement ? Pour les élèves, dans quelle mesure l'extrapolation des solides au gaz est-elle intuitive ? Une enquête a été conçue afin d'avoir des éléments de réponse sur ce point, menée par des étudiants de master

⁹ <https://fondation-lamap.org/sequence-d-activites/co2-effet-de-serre-et-activites-humaines>

¹⁰ A l'inverse, les propriétés optiques d'un système peuvent varier considérablement suite à l'ajout d'une substance très minoritaire. Par exemple, ajouter une seule goutte d'encre noire dans un aquarium suffit à obscurcir un grand volume d'eau de manière significative. De même suite à l'ajout d'une deuxième goutte d'encre.

MEEF (Amiel & Aubry, 2023; Cochepin, 2022; Romond & Lusson, 2023). Suite à une introduction classique à l'émission et l'absorption du rayonnement infrarouge par des solides à partir d'images de caméra infrarouge (comme par exemple dans (Dufresne, 2020)), les élèves doivent donner leur avis *a priori* concernant les gaz. Les résultats sont quasiment les mêmes pour les deux questions (émission et absorption) : plus de 3/4 des collégiens (N=208) et 2/3 des lycéens (N=280) répondent soit que les gaz ne peuvent ni émettre ni absorber de rayonnement, soit qu'ils ne savent pas.

Face à ce constat, la question se pose de la manière d'introduire ces phénomènes sans le donner à admettre, étant donné le caractère crucial de ce point pour faire le lien entre émissions de CO₂ et réchauffement climatique. À notre connaissance, aucun article de recherche en didactique de la physique, aucun manuel de terminale enseignement scientifique, ni aucun site proposant des ressources pédagogiques ou de vulgarisation sur le climat ([Eduscol](https://eduscol.education.fr/1132/changement-climatique)¹¹, [Office for Climate Education](https://www.oce.global/fr)¹², [EduClimat](https://educlimat.fr/)¹³, [Bonpote](https://bonpote.com/)¹⁴) n'apporte d'élément empirique convaincant et accessible concernant les capacités d'émission et d'absorption du rayonnement par certains gaz.

À propos de l'effet de serre

Une littérature importante existe à propos des difficultés relatives à la compréhension de l'effet de serre atmosphérique (Gautier et al., 2006 ; Shepardson et al., 2011 ; Handayani et al., 2021). Les points convergents de ces recherches sont synthétisés notamment dans Toffaletti et al. (2022). Parmi ceux-ci revient de manière récurrente l'idée selon laquelle les gaz à effet de serre constituent une sorte de « couche » ou de « couvercle » dans l'atmosphère, formant ainsi une « barrière » contre laquelle une partie de la chaleur ou du rayonnement émis par la Terre « rebondirait » pour revenir vers elle, « piégeant » ainsi l'énergie du Soleil.



¹¹ <https://eduscol.education.fr/1132/changement-climatique>

¹² <https://www.oce.global/fr>

¹³ <https://educlimat.fr/>

¹⁴ <https://bonpote.com/>

Figure n° 6 : schéma extrait de la Fresque du climat (<https://fresqueduclimat.org/>)

Cette idée de « piégeage » est souvent renforcée par les schémas proposés, comme par exemple celui de la Fresque du climat (figure n°6). Cette notion implique implicitement une idée de chronologie, avec un rayonnement qui part du sol, puis qui est empêché de sortir par l'atmosphère et qui revient ensuite vers la surface de la Terre, contribuant à la réchauffer « un peu plus ». Ce raisonnement de type séquentiel est incompatible avec les schémas associés la plupart du temps, représentant des bilans instantanés, c'est-à-dire où les valeurs des puissances de rayonnements sont considérées au même moment, et où la température est constante (Colin & Tran Tat, 2011). Un autre aspect problématique, relevé à la fois chez les élèves et dans les ressources de vulgarisation, est la non distinction entre les différents types de rayonnement (solaire, infrarouge terrestre, infrarouge atmosphérique). Cela participe à rendre possible l'idée de « rebond » ou de « piégeage » du rayonnement venant du sol. Une grande part des confusions autour de l'effet de serre se retrouve dans les représentations et explications des manuels d'enseignement scolaires, de même que dans la vulgarisation scientifique (Colin, 2011; Ravachol, 2023; Toffaletti et al., 2022).

Intentions et questions de recherche

Notre objectif est de développer une explication aussi accessible que possible de l'origine du réchauffement climatique, tout en minimisant l'usage de l'argument d'autorité. Autrement dit, nous cherchons à construire une logique de raisonnement qui puisse être suivie par un maximum de personnes, tout en limitant autant que possible les étapes où il est implicitement demandé de « croire sur parole » les scientifiques ou enseignant.es qui présentent le sujet. Dans le cadre de l'enseignement scolaire français, cette approche pourrait être utile notamment dans le cadre de l'enseignement scientifique de terminale générale, sur le point précis du lien entre émissions de gaz à effet de serre et réchauffement global. Cet enseignement s'adresse à l'ensemble des élèves de lycée général, c'est-à-dire y compris à des élèves n'ayant pas continué la physique au-delà de la classe de seconde générale. Les prérequis sur lesquels il est possible de s'appuyer sont donc très restreints. Parmi les gaz à effet de serre, nous avons fait le choix de nous focaliser sur le rôle du CO₂, en tant que principale cause du réchauffement climatique récent.

Notre étude vise à prendre en compte les trois constats précédents :

- Les expériences simples d'enceintes fermées avec ou sans CO₂ ne permettent pas de mettre en évidence les phénomènes physiques à l'origine du réchauffement climatique,
- Les spectres d'absorption du CO₂ sont très difficiles d'accès pour des élèves non spécialistes de physique,
- L'idée qu'un gaz puisse émettre ou absorber un rayonnement infrarouge, présentes dans l'ensemble des schémas d'effet de serre, n'est pas une évidence pour les élèves.

Etant donné ces trois constats, la question centrale de cette recherche est la suivante : comment construire le lien entre augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et élévation de la température moyenne de la Terre, en s'appuyant sur des éléments empiriques accessibles avec un minimum de prérequis ? En particulier : comment mettre en évidence la capacité des gaz à interagir avec le rayonnement infrarouge ? Et comment faire le lien entre cette interaction et l'évolution de la température globale, tout en prenant en compte les difficultés d'interprétation des représentations classiques de l'effet de serre ?

En plus du critère d'accessibilité de l'explication visée, nous cherchons également à ce que celle-ci permette de mettre en place les notions et représentations nécessaires à l'approfondissement du sujet avec des modèles plus complexes, prenant en compte plus de phénomènes. Notamment, si comme nous l'avons dit plus haut, nous ne comptons pas aborder directement le rôle de la vapeur d'eau dans la saturation de l'absorption infrarouge à basse altitude, ni l'effet du gradient de température de l'atmosphère, nous avons cependant l'intention que ces explications soient des prolongements compatibles avec les bases posées dans une première approche qualitative du sujet. Comme nous l'avons vu, celles-ci reposent en particulier sur la compréhension de la capacité d'émission infrarouge des GES, et sa dépendance en la température.

Face aux questions posées, l'objectif n'est pas de concevoir une séquence d'enseignement complète sur le sujet, mais d'établir une structure logique de construction du contenu en jeu, qui pourrait être déclinée ensuite de diverses manières selon les contextes. Cette structure logique est constituée de différents choix didactiques vis-à-vis des notions mobilisées ou non, des choix de définitions, des expériences, des représentations, des liens logiques ou encore des questionnements possibles pour des élèves. L'enjeu de cette recherche a été de développer et justifier ce noyau minimal de choix didactiques répondant à notre questionnement, qui soient rigoureux à la fois du point de vue des physiciens spécialistes du sujet et du point de vue des chercheurs en didactique de la physique, vis-à-vis de la prise en compte des difficultés connues et de la place de l'argument d'autorité.

Les deux points clefs centraux, à notre connaissance, inédits dans les approches existantes sur le sujet, sont les suivants :

- L'interprétation d'expériences réalisées avec une caméra infrarouge d'une gamme spectrale permettant de voir l'émission et l'absorption du rayonnement infrarouge par le CO₂,
- Le raisonnement sur un bilan radiatif à l'interface entre le système Terre-atmosphère et l'Espace, sans considération de ce qui se passe entre la surface terrestre et l'atmosphère.

Ce dernier point rejoint l'intention de produire une proposition aussi accessible que possible, c'est à dire avec le minimum de prérequis conceptuels. Cela a mené en particulier à concevoir une structure logique ne s'appuyant à aucun moment sur les concepts physiques suivants :

- **La notion d'onde électromagnétique, de longueur d'onde et de spectre de la lumière.**
Si ces notions peuvent être évoquées dans le cadre du programme de seconde de

physique-chimie (en 2023), elle reste d'une abstraction extrêmement élevée pour des élèves ne pouvant pas avoir d'idée à ce niveau de ce que représente les champs électrique et magnétique. De plus, l'affirmation selon laquelle « la lumière est une onde électromagnétique » relève au lycée (et même souvent au-delà), uniquement de l'argument d'autorité, au sens où aucune justification n'est donnée. Raisonner à partir des longueurs d'onde reviendrait alors à prolonger cet argument d'autorité, ce qui aurait été contraire à l'intention de construire une connaissance, au cœur de notre démarche.

- **La notion d'énergie.** Bien que présente tout au long du cursus scolaire, en physique-chimie comme dans d'autres disciplines, les recherches en didactique et en épistémologie montrent d'importantes difficultés associées à l'apprentissage du concept d'énergie, faisant écho à sa très grande abstraction comme à sa polysémie dans le langage courant (voir par exemple la synthèse effectuée dans (Bächtold, 2018), chapitre 3). Plutôt que de considérer le « bilan énergétique terrestre », nous n'avons considéré que des « bilans de puissances de rayonnement », cette notion pouvant se référer à l'intuition de "puissance lumineuse" ou de « luminosité ». Lorsque le contexte s'y prête, le lien avec la notion d'énergie est toujours possible a posteriori, en tant que produit de la puissance de rayonnement par une durée.

Nous avons également fait le choix de ne pas mobiliser d'autres concepts de physique couramment utilisés dans les approches du sujet. Il s'agit par exemple des notions de flux, chaleur, transfert thermique, équilibre dynamique, régimes transitoire et permanent.

Démarche de travail collaboratif

De nombreuses incompatibilités existent entre les différentes approches d'enseignement de l'effet de serre, même parmi les plus abouties issues de physiciens spécialistes du sujet et de chercheurs en didactique (Besson et al., 2010 ; Colin & Tran Tat, 2011 ; Dufresne & Treiner, 2011). Ces divergences nous ont mené à envisager un travail collaboratif entre représentants des deux disciplines, afin de pouvoir confronter les différents points de vue. La plus-value de cette collaboration se situe ainsi à l'intersection d'une double préoccupation :

- du point de vue des didacticiens : rechercher des façons de formuler des énoncés en prenant en compte au premier plan un ensemble d'hypothèses sur les connaissances du public auquel il s'adresse. Cela implique en particulier de chercher à éviter autant que faire se peut de proposer des situations et des termes totalement nouveaux sans mise en relation avec une dimension expérimentale, ou bien au sujet desquels les élèves pourraient mobiliser des connaissances naïves.
- du point de vue du physicien spécialiste : assurer tout au long du processus un contrôle sur la pertinence du discours au regard de ce que disent les modèles les plus avancés quant à l'influence des GES sur le climat. Ce niveau-là de discours présente une complexité qui nécessite pour les spécialistes d'appréhender un vaste ensemble de modèles de la physique de l'atmosphère.

Ainsi, certains points du travail commun sur les énoncés à destination des élèves ont conduit le spécialiste à questionner des manières de formuler la compréhension qui prévaut chez les spécialistes, de la même manière que ces formulations ont conduit les didacticiens à questionner les situations imaginées pour les élèves.

La toute première version de l'approche proposée est issue d'un premier travail des didacticiens, cherchant à concilier les apports des articles cités précédemment. Cette proposition a fortement évolué suite aux discussions avec Jean Louis Dufresne. Pensée comme relativement stabilisée, cette nouvelle version a été présentée à des étudiants de master enseignement (MEEF 1 et 2) dans le cadre de cours de didactique sur la physique du climat. Ces premières expérimentations exploratoires avaient plusieurs objectifs. D'une part pour les enseignants-chercheurs, l'enjeu était de travailler le discours sur le sujet : comment exprimer le cheminement des idées de la manière la plus synthétique possible ? Quelles étapes étaient finalement superflues relativement à l'objectif final ? Quels prérequis non anticipés étaient peut-être nécessaires à la compréhension ? D'autre part, le questionnement oral aux étudiants sur chaque étape du cheminement visait à sonder le degré de clarté des liens logiques proposés. Le partage et la discussion de chacune des versions, a permis de nouvelles remises en cause majeures. En particulier, la plus importante a été la prise de conscience collective avec les étudiants de la non évidence - du point de vue des élèves - de la capacité d'un gaz à interagir avec le rayonnement infrarouge. Cette réalisation a mené à l'enquête citée précédemment à ce sujet, objectivant cette intuition. Elle a également mené à élaborer toute une partie expérimentale avec des observations dans l'infrarouge de ballons de CO₂. Une fois sur cette piste, nous avons continué les expérimentations exploratoires de l'approche didactique intégrant désormais cette partie empirique, également avec les étudiants de master enseignement (de l'année suivante), et aussi d'autres personnes de profils différents, dont des enseignants en formation continue. Les retours obtenus ont à nouveau suscité de nouvelles remises en causes, de nouvelles expériences dans l'infrarouge (6 sessions en tout) et de nouvelles propositions didactiques, systématiquement discutées avec des physiciens du climat, jusqu'à la version actuelle, faisant suite à 24 précédentes versions.

À ce stade du travail, l'enjeu n'était pas ni de construire une séquence d'enseignement, ni d'obtenir des retours de la part d'élèves, mais uniquement de construire une articulation logique des idées respectant les conditions suivantes :

- la rigueur scientifique du contenu,
- la prise en compte des difficultés connues des élèves,
- la minimisation de l'argument d'autorité, en s'appuyant autant que possible sur des expériences qui soient interprétables au niveau visé,
- le principe de parcimonie, c'est-à-dire le fait de ne conserver que les éléments strictement nécessaires à l'élaboration du raisonnement.

C'est seulement une fois obtenue une structure logique respectant ces exigences que nous souhaitons la traduire en plusieurs possibles séquences d'enseignement pour l'expérimenter avec des élèves, et continuer de l'affiner.

Proposition d'une structure logique pour construire le lien entre l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère et réchauffement global de la Terre

Le problème général en question dans ce travail est celui de la recherche des causes du réchauffement climatique observé. Plus spécifiquement, il s'agit de questionner le rôle que peut avoir le CO₂ dans le réchauffement global de la Terre. Si la phase de construction de ce problème est également importante pour l'enseignement (Fabre & Orange, 1997 ; Klaassen, 1995), cela n'est pas l'objet de cet article, qui se focalise sur les éléments permettant sa résolution. L'introduction progressive de ces éléments est cependant pensée en cohérence avec une intention centrale de la « problem posing approach » (Klaassen, 1995) : « amener les élèves dans une position où ils voient eux-mêmes la pertinence d'étendre leur connaissance conceptuelle, leurs expériences et leur système de croyances dans une certaine direction » (Lijnse & Klaassen, 2004, p.539).

Le problème considéré peut-être séparé en deux sous questions :

- Quelles sont les causes possibles d'un réchauffement ?
- De quelle manière le CO₂ pourrait avoir une influence sur ces causes ?

La première question va permettre d'introduire les notions de rayonnement infrarouge et de bilan de puissance de rayonnements. Ces notions permettront d'interpréter des expériences mettant en évidence les interactions entre CO₂ et rayonnement infrarouge, et d'extrapoler les conséquences de l'ajout de CO₂ sur le bilan radiatif du système Terre, répondant ainsi à la seconde question.

1 – Quelles causes possibles d'un réchauffement ?

Cette première étape s'appuie sur l'expérience quotidienne, en questionnant l'interprétation des situations où on peut observer une élévation de température d'un objet (par exemple : sa main). Ces situations peuvent être réparties en trois catégories :

- être en contact direct avec quelque chose de plus chaud (solide, liquide ou gaz),
- être exposé à la lumière du Soleil, ou celle de certains types de lampes,
- être dans les environs d'un objet chaud (radiateur).

L'interprétation spontanée du premier cas est en souvent formulée comme le fait que l'objet qui se réchauffe « reçoit » de la « chaleur » de l'autre objet, plus chaud, avec lequel il est en contact. Il s'agit d'une utilisation du sens commun du terme, différent du concept physique de chaleur (Tiberghien, 1984). Dans le cas du réchauffement d'un objet à distance d'un autre objet plus chaud (par exemple une main au-dessus d'un radiateur), une première interprétation peut être que celui-ci réchauffe l'air, qui de proche en proche réchauffe la main, par contact direct. Or en considérant la même situation, mais avec une fenêtre ouverte, l'hiver un jour de vent, on constate toujours un réchauffement, malgré que l'air renouvelée entre la main et le radiateur soit toujours plus froid. Ce type de situation peut mener à imaginer que la « chaleur » pourrait aussi être « envoyée » par un objet vers un autre, d'une manière imperceptible. On peut se demander la nature de cette « chaleur » : est-elle la même que celle

qui peut « passer » entre deux corps en contact ? De quelle manière peut-elle voyager entre le radiateur à la main ? Comment en savoir plus, dans la mesure le phénomène n'est pas visible ?

2 – Introduction de la notion de rayonnement infrarouge

A ce stade, la caméra dite « thermique » peut être introduite, en tant qu'outil permettant de visualiser des choses en lien avec ces notions de température et de chaleur (figure n°7)



Figure n° 7 – Caméra infrarouge, ou improprement appelée aussi caméra « thermique »

Dans un premier temps, l'observation de tels images laisse penser que la caméra détecte des températures, puisque les différences de couleurs semblent cohérentes avec les différences de température (la peau plus chaude que les cheveux, le cou plus chaud que les joues et le nez). Cette interprétation paraît confirmée par les valeurs de température associées aux échelles de fausses couleurs, de même que par la proximité entre les appellations de « caméra thermique » et de « thermographie » avec le terme de « thermomètre » (terminologies les plus couramment utilisées, y compris dans les programmes et manuels scolaires). Malgré toutes ces raisons, d'autres observations assez simples suffisent à remettre en cause l'interprétation de ces images comme révélant la température (figure n°8).



Figure n° 8 – Reflet et transparence infrarouge

(NB : les expressions mathématiques au tableau ne sont pas utilisées dans la logique proposée, mais peuvent permettre d'interpréter ces observations)

Ces observations de reflet (1) et de transparence (2) impliquent que ce qu'on voit à l'écran ne peut pas correspondre à la température, puisque la température de la vitre de la bibliothèque est environ la même partout, de même que la température de la pochette plastique. Par conséquent, ce que détecte la caméra en provenance du corps, peut aussi - comme la lumière - se refléter et traverser plus ou moins certains matériaux. Le concept de « rayonnement » peut alors être introduit de manière justifiée pour exprimer ces points communs. La lumière peut alors être considérée comme un cas de « rayonnement visible » (au sens où il est perceptible par notre œil) tandis que le rayonnement émis par objet chaud n'est perceptible qu'avec la caméra « thermique ». Ces points communs entre les deux types de rayonnement sont assez compréhensibles quand on considère le cas d'un morceau de métal chauffé, pouvant émettre les deux types de rayonnement, selon la température (figure n°9). Lorsqu'il commence à se réchauffer, le métal émet un rayonnement invisible (1), pouvant se refléter. A partir d'une certaine température, il émet toujours un rayonnement invisible (2) et aussi un rayonnement visible (3).

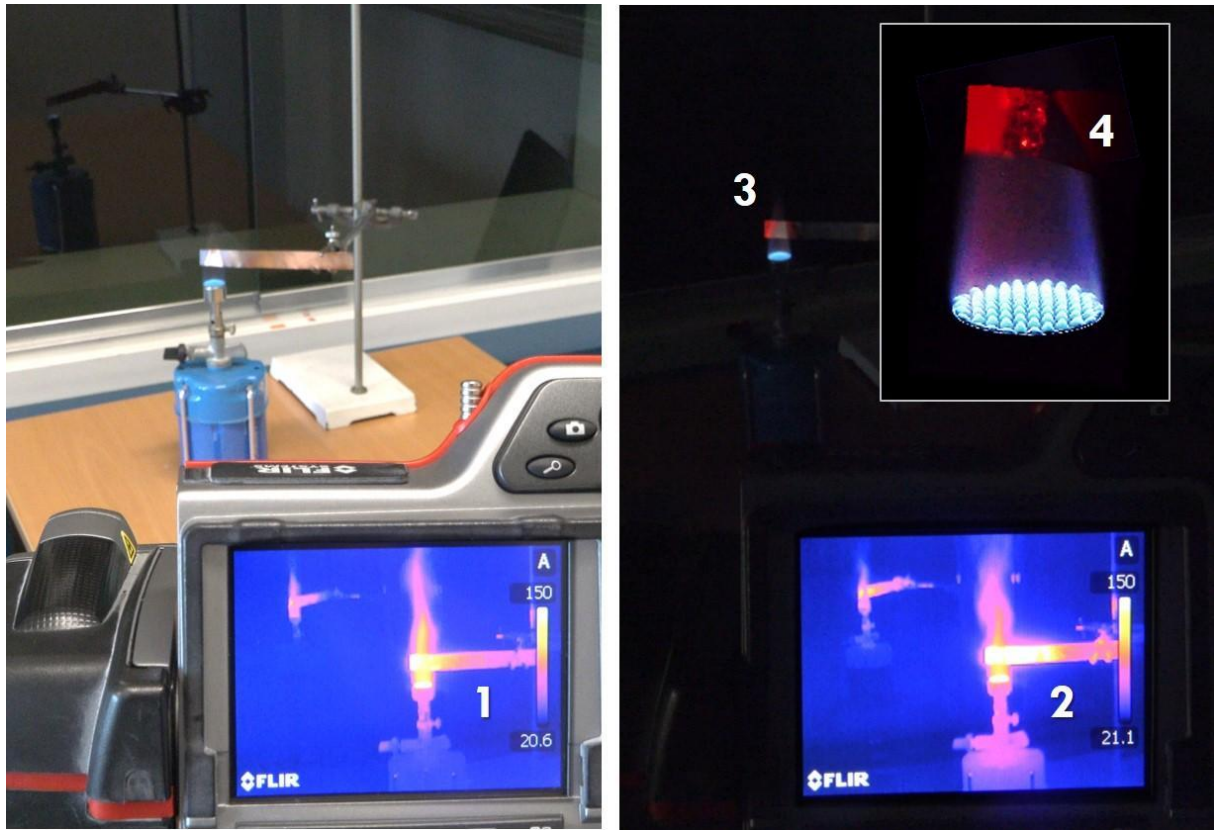


Figure n° 9 – Emission de rayonnement infrarouge et de lumière par un morceau de cuivre chauffé (la présence du reflet infrarouge est intentionnelle, afin de rappeler la nature radiative du phénomène)

Dans ce cas d'un métal incandescent, plus on s'éloigne de la flamme, plus la lumière émise est rouge sombre (4). Au-delà de cette zone rouge, il ne reste plus que le rayonnement invisible émis par le métal (2), qui est nommée rayonnement « infrarouge ». La caméra permettant de détecter ce rayonnement peut donc être nommée « caméra infrarouge », terme fortement préférable à celui de « caméra thermique », qui entretient la confusion avec la mesure de température.

Quand on continue de chauffer le métal incandescent, la couleur de la lumière émise change, et sa luminosité - ou puissance lumineuse - augmente. Puisqu'il s'agit d'un même phénomène, on peut imaginer de la même manière qu'il existe plusieurs « nuances » de rayonnement invisible, équivalentes aux nuances de lumières colorées (comme dans le cas de la décomposition de la lumière blanche par un prisme). On peut aussi imaginer que le rayonnement invisible peut être plus ou moins puissant, selon la température. Une caméra infrarouge permet en effet de mesurer la puissance de rayonnement infrarouge se propageant jusqu'à la caméra, pour une certaine gamme de nuances infrarouges de celui-ci. L'échelle de couleurs artificielles de la caméra correspond à une échelle de puissance de rayonnement infrarouge reçue. Autrement dit, la couleur en chaque point de l'image infrarouge correspond à la puissance de rayonnement reçue en chaque point (pixel) du capteur de la caméra (pour une certaine gamme de nuance infrarouge). Sachant cela, on

constate que plus la température est élevée, plus la puissance de rayonnement infrarouge émis est grande (figure n°10).

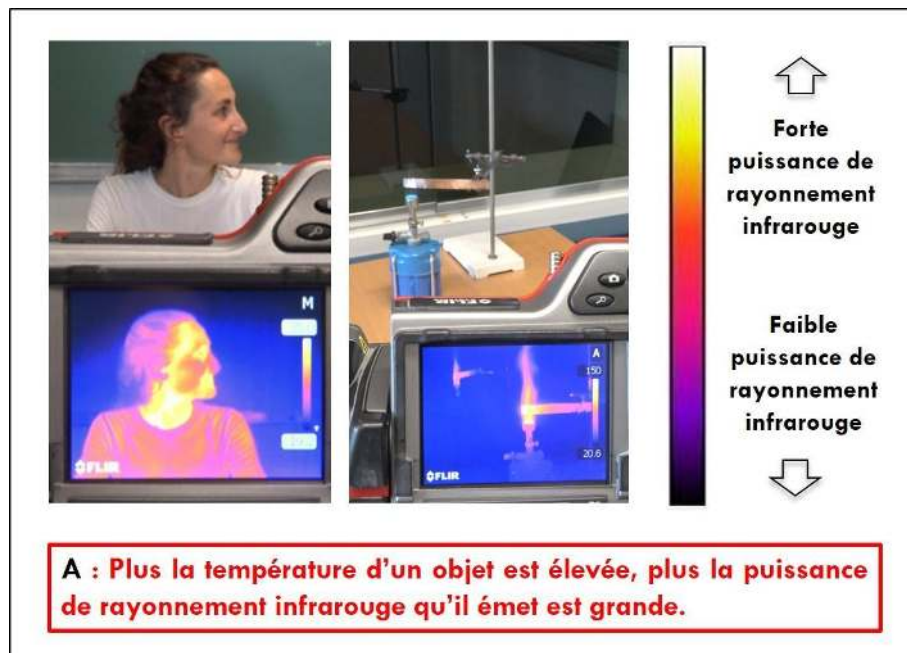


Figure n° 10 – Lien entre puissance infrarouge émise et température

L'ensemble de ces observations et analyses permet de revenir sur les interrogations de la section précédente, à propos de l'interprétation du réchauffement à distance d'un objet chaud : « quelle pourrait être la nature de cette « chaleur envoyée » par le radiateur vers la main ? De quelle manière celle-ci pourrait-elle voyager entre les deux ». Le cas du radiateur est au final très proche de celui de la barre de métal chauffée, qui permet ainsi de répondre : ce qui se propage est un rayonnement infrarouge, dont la puissance augmente avec la température. Dans toute la suite (et contrairement à beaucoup d'autres approches du sujet) le terme de « chaleur » ne sera plus du tout utilisé. Celui-ci repose en effet sur une idée intuitive mal définie, distincte du concept physique du même nom, tandis que la notion de rayonnement infrarouge a été construite progressivement, à partir de l'observation des points communs avec la lumière (émissions, réflexion, transparence).

3 – Bilan des rayonnements du système Terre

Après cette introduction du rayonnement infrarouge, il est possible de revenir plus précisément sur la question des causes possibles d'un réchauffement de la Terre. Si on considère l'ensemble de la Terre et de l'atmosphère (que l'on nomme « système Terre »), sa température dépend du rayonnement reçu en provenance du Soleil. De même que pour le morceau de métal incandescent, ce rayonnement solaire peut être composé à la fois d'une part visible et d'une part infrarouge. Une partie de ce rayonnement solaire est diffusée par la Terre (puisque l'on peut voir la Terre depuis l'Espace). La puissance du rayonnement renvoyé vers le ciel est d'autant plus grande qu'il y a plus de surfaces claires (nuages, neige, glace, déserts...). Enfin, on vient de voir qu'un objet peut émettre du rayonnement infrarouge, dont

la puissance dépend de sa température. Cela implique que le système Terre dans son ensemble, émet lui aussi du rayonnement infrarouge vers l'Espace. Ces considérations permettent de représenter les trois types de rayonnement en jeu pour le système Terre (figure n°11). Comprendre les causes possibles d'un réchauffement nécessite alors de comprendre comment ces différents types de rayonnement peuvent avoir une influence sur la température moyenne de la Terre.

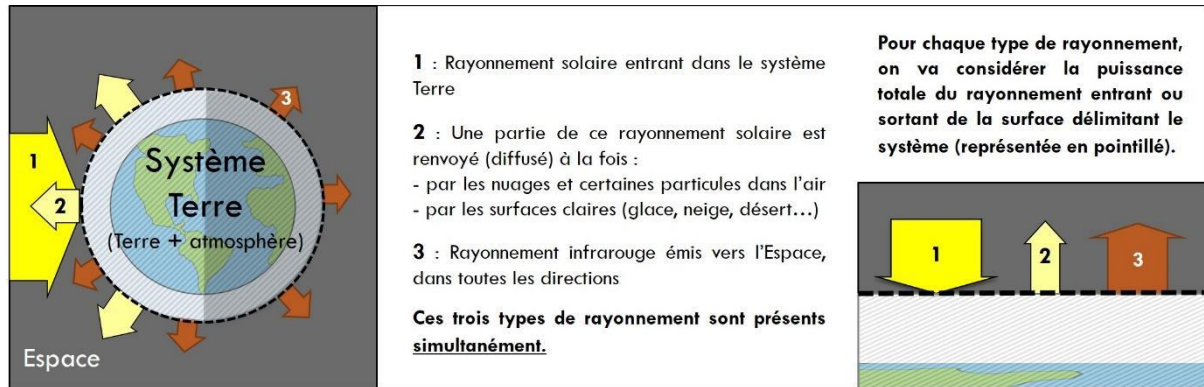


Figure n° 11 – Bilan des rayonnements du système Terre (à l'interface avec l'Espace)

4 – Bilan de rayonnements et évolution de la température

Pour faire le lien entre bilan de rayonnement et température, nous proposons ici de considérer le cas simple d'une plaque de métal éclairée par une lampe. Ici aussi, elle reçoit un rayonnement, en renvoie une partie, et émet un rayonnement infrarouge. La plaque est aussi en contact avec l'air, qui peut contribuer à la réchauffer ou la refroidir, selon qu'il est plus chaud ou plus froid que la plaque. Puisque ce phénomène n'a pas lieu pour le système Terre (comme par définition il n'y a plus d'air au-delà de l'atmosphère), pour pouvoir faire l'analogie entre les deux cas, une manière est de placer notre dispositif (lampe + plaque) dans une enceinte où on a retiré l'air avec une pompe (enceinte sous vide). De cette façon, comme pour le système Terre, les seuls phénomènes ayant une influence sur la température de la plaque sont les rayonnements. Comme on peut s'en douter, une fois placée sous la lampe, la température de la plaque augmente. Petit à petit elle se stabilise à une température maximale constante. Bien que cela soit assez technique en pratique, il est possible en principe de mesurer les puissances des différents rayonnements en jeu, dans des expériences similaires à celle ci-dessus. À partir de ces mesures, on peut faire les deux constats suivants :

- pendant la phase où la température augmente, la puissance du rayonnement arrivant sur la plaque est supérieure à la somme des puissances du rayonnement renvoyé et du rayonnement infrarouge émis par la plaque,
- lorsque la température est stabilisée, on a une égalité entre ces puissances entrantes et sortantes (figure n°12).

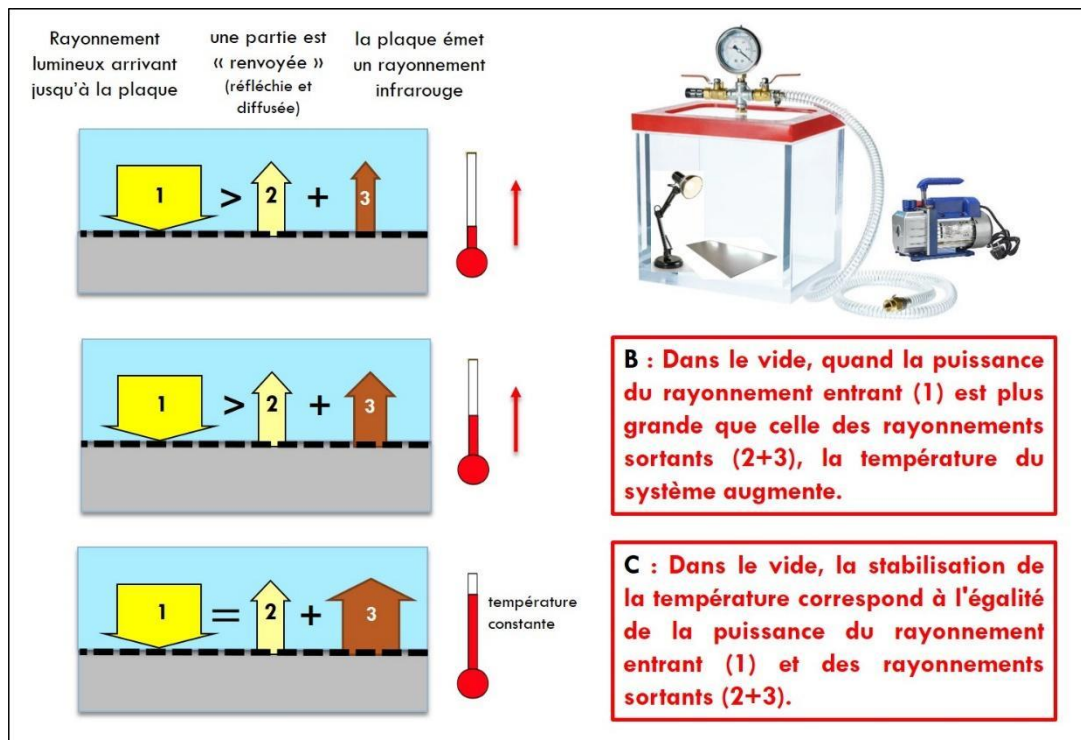


Figure n° 12 – Bilan des rayonnements et évolution de la température d'une plaque de métal éclairée dans le vide

Ces considérations permettent d'identifier les différentes modifications du bilan de rayonnement du système Terre (figure n°11) pouvant avoir une influence sur la température. A priori, trois variations sont susceptibles de provoquer un réchauffement :

- 1 – l'augmentation de la puissance du rayonnement solaire entrant,
- 2 – la diminution de la puissance du rayonnement solaire renvoyé,
- 3 – la diminution de la puissance du rayonnement infrarouge sortant du système.

5 – Influences possibles du CO₂ sur le bilan de rayonnement

Notre objectif étant d'étudier comment le CO₂ pourrait être une cause du réchauffement, l'analyse précédente implique de questionner les manières dont le CO₂ pourrait avoir une influence sur ces différents types de rayonnement. Plusieurs premières considérations et hypothèses peuvent être faites relativement aux trois causes possibles listées ci-dessus.

1 – Le rayonnement solaire entrant dans le système Terre est considéré à l'altitude où il entre dans l'atmosphère, depuis l'Espace. Ce rayonnement n'a donc pas encore rencontré l'atmosphère, et ne peut donc pas dépendre de sa composition (et donc de sa concentration en CO₂).

2 – Le rayonnement solaire renvoyé vers l'Espace correspond à la part qui est diffusée par le système Terre (en premier lieu par des surfaces claires, comme la banquise, les nuages, etc). Pour ce qui concerne la part de rayonnement visible diffusée par la Terre vers l'Espace, l'influence du CO₂ dépend de sa capacité à absorber ou non le rayonnement visible, ou autrement dit de sa transparence au rayonnement visible. Une expérience possible consiste à remplir un ballon transparent entièrement de CO₂ (100%), et à le comparer avec le même

ballon rempli d'air (contenant 0,04 % de CO₂). Malgré la très grande différence de proportion de CO₂ entre les deux (rapport de 2500), les deux ballons sont tous les deux également transparents (figure n°13).



Figure n° 13 – Comparaison de transparence à la lumière de l'air et du CO₂

Pour le cas de la Terre, visible depuis l'Espace, on peut faire l'hypothèse que la quantité de CO₂ dans l'atmosphère n'a pas d'influence non plus sur la part du rayonnement visible renvoyé vers l'espace.

3 – Pour le cas du rayonnement infrarouge, il est difficile de faire des hypothèses a priori en l'absence d'expérimentation supplémentaire. Il s'agit en effet de déterminer l'influence d'un gaz invisible sur un rayonnement invisible.

Pour aborder l'influence du CO₂ sur le rayonnement infrarouge, il est utile de revenir plus précisément sur les différentes interactions entre matière et rayonnement infrarouge.

6 - Interactions entre rayonnement infrarouge et matière

Nous avons vu qu'un objet peut émettre du rayonnement infrarouge, d'une puissance d'autant plus grande que sa température est grande. Ce rayonnement peut traverser partiellement certains objets, comme la pochette plastique (figure n°8).



Figure n° 14 – Observations pour mettre en évidence le phénomène d’absorption du rayonnement infrarouge

Dans le cas de la vitre en verre (figure n°14), on peut constater que bien qu’elle soit transparente pour la lumière (1) elle ne laisse pas du tout passer le rayonnement infrarouge émis par le visage. La couleur bleue en (2) correspond à la puissance de rayonnement émis par la vitre elle-même, ce qui a lieu des deux côtés, dans toutes les directions. On peut se demander si le rayonnement émit par le visage et qui n’a pas traversé la vitre a été réfléchi ou absorbé par la vitre. Pour y répondre, on se place de l’autre côté de la vitre : on observe le reflet du visage en infrarouge. La puissance mesurée en (3) est donc la somme de la puissance émise par la vitre et de la puissance reflétée par celle-ci. Or cette puissance en (3) est plus faible que celle du rayonnement émis par le visage (4). Une part de la puissance de rayonnement infrarouge émis par le visage semble donc avoir « disparue » lors de la réflexion. Cette part manquante peut être définie comme la puissance « absorbée » par la vitre. Tout cela est observé ici pour des objets solides, mais un gaz peut-il émettre ou absorber du rayonnement ? On a vu que même si un matériau est transparent pour la lumière, il peut cependant absorber plus ou moins le rayonnement infrarouge, soit complètement pour la vitre, soit en partie pour la pochette plastique. On peut aussi observer que lorsqu’on double l’épaisseur de la pochette, l’absorption est plus grande (figure n°15).



Figure n°15 – Transparence infrarouge d’une pochette plastique, en fonction de l’épaisseur traversée (simple ou double)

L’absorption du rayonnement semble ainsi dépendre de la quantité de matière qu’il rencontre. A priori, cette observation pourrait conduire à l’hypothèse que pour un gaz, où la quantité de matière est extrêmement faible relativement à un solide, le rayonnement infrarouge n’est pas absorbé. Pour tester cette hypothèse, il faut faire des expériences avec les gaz, et en particulier celui qui nous intéresse ici : le CO_2 .

Comme vu plus haut, il existe plusieurs nuances de rayonnement infrarouge (analogues aux nuances de lumières colorées, et une caméra infrarouge permet de mesurer une puissance de rayonnement pour une certaine gamme de nuances donnée. Pour faire l’expérience avec le

CO₂, il faut une caméra différente de la précédente, permettant de voir d'autres nuances infrarouges, correspondant à celles émises par le CO₂¹⁵.

7 - Interaction entre rayonnement infrarouge et CO₂

L'objectif est de déterminer l'influence d'un ajout de CO₂ dans l'atmosphère sur le rayonnement infrarouge terrestre. Pour cela, l'expérience proposée consiste à comparer des observations infrarouges de ballons d'air et de CO₂.

Lorsque du CO₂ est émis (à la suite d'une combustion par exemple), il se mélange rapidement dans l'air environnant. Même s'il peut être plus chaud au départ que celui-ci (en sortant d'un pot d'échappement), il se retrouve refroidi rapidement pour se retrouver à la même température. Or l'atmosphère est globalement plus froide que la surface terrestre, ce qui peut être introduit en considérant le refroidissement avec l'altitude (par exemple en haut d'une montagne). Pour se rapprocher de ces conditions, la proposition consiste observer en infrarouge des ballons d'air et de CO₂ plus froids que l'air ambiant¹⁶ (figure n°16).

¹⁵ En termes physiques, la gamme spectrale des caméras infrarouges les plus courantes - située entre 8 et 15µm - ne se superpose pas avec celle du spectre d'absorption du CO₂ (ni celle de la vapeur d'eau). Ces caméras sont en effet conçues notamment pour pouvoir relier la puissance infrarouge provenant d'un bâtiment à son champ de température, sans que cela soit affecté par la présence de gaz entre le bâtiment et la caméra, CO₂ ou vapeur d'eau. Malheureusement, les caméras infrarouges permettant de détecter les gaz sont beaucoup plus chères (de l'ordre de 50 000 €). Celle utilisée a une gamme spectrale de 3 à 5 µm. Si l'on peut regretter l'impossibilité de reproduire ces expériences en classe, il se trouve que c'est également le cas des expériences permettant d'obtenir les spectres d'absorption des gaz. La grande différence ici est que l'interprétation des expériences que nous proposons est beaucoup plus accessible, dans la mesure où elle ne nécessite pas la notion de longueur d'onde électromagnétique.

¹⁶ On pourrait se demander pourquoi ne pas commencer par observer les ballons d'air et de CO₂ à température ambiante. Cette situation est en fait plus subtile à interpréter : si on mesure une même puissance uniforme pour les deux ballons, les phénomènes physiques sont différents dans les deux cas. Dans le cas du ballon d'air, une grande part du rayonnement infrarouge arrivant vers le ballon le traverse, et très peu de rayonnement est émis par celui-ci. Dans le cas du ballon de CO₂, une part du rayonnement arrivant vers le ballon est absorbée par le CO₂, et celui-ci émet également du rayonnement infrarouge. Ainsi, pour comprendre cette interprétation, il faut déjà pouvoir mettre en évidence l'absorption et l'émission du CO₂. Une manière de le faire consiste à observer les ballons à plus basse ou plus haute température que leur environnement, de façon à ce que la puissance de rayonnement émis ne compense pas la puissance de rayonnement absorbée.

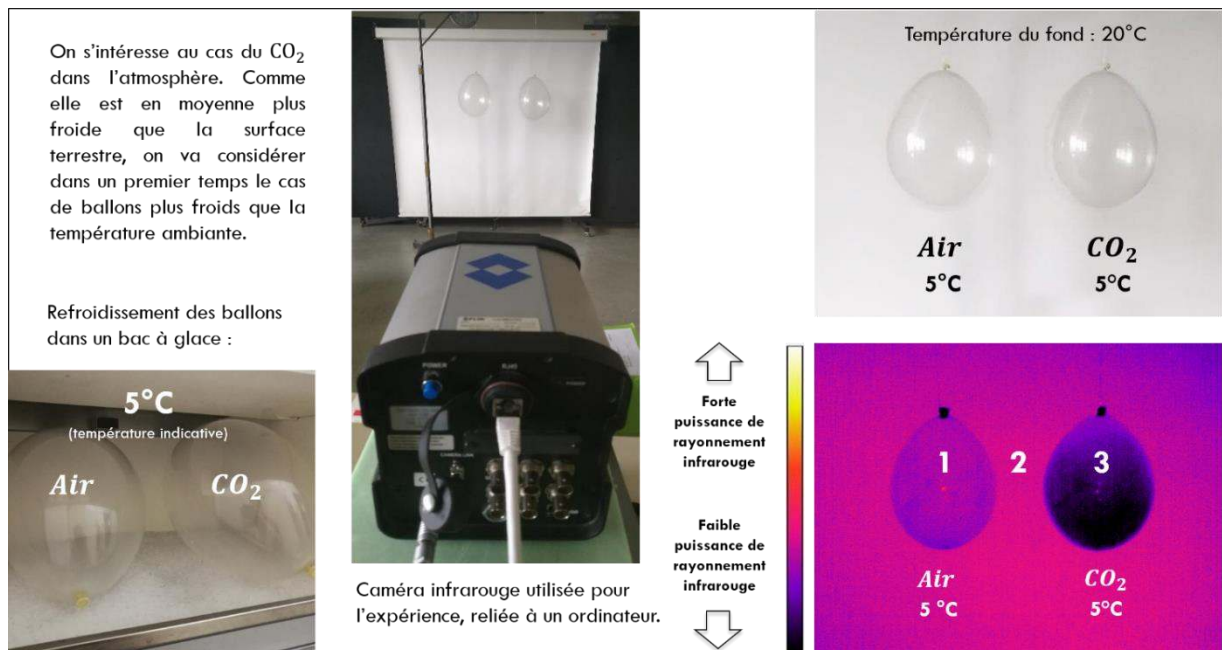


Figure n°16 - Ballons d'air et de CO_2 froids observés avec une caméra infrarouge

La puissance du rayonnement infrarouge arrivant depuis le ballon d'air (1) est plus faible que celle émise par le fond blanc (2). Cela peut s'interpréter par plusieurs facteurs :

- Le rayonnement émis par le fond blanc en direction du ballon peut être à la fois reflété et absorbé par la membrane du ballon.
- A celui-ci s'additionne le rayonnement directement émis par la membrane du ballon et l'air à l'intérieur, dont la puissance est a priori plus faible que celle du fond blanc, puisque le ballon est plus froid.

Dans le cas du ballon de CO_2 , ces trois phénomènes (réflexion, absorption et émission par la membrane) ont lieu de la même manière (car les deux ballons sont identiques et à la même température). L'unique paramètre qui change est la présence du CO_2 . On constate que la présence de plus de CO_2 , à une température plus basse, implique un rayonnement infrarouge sortant du ballon plus faible (3).

Cette observation peut mener à penser que le CO_2 absorbe uniquement le rayonnement infrarouge. Or dans les exemples précédents, on a vu que les objets pouvant absorber du rayonnement peuvent aussi en émettre, et ce d'autant plus que leur température est élevée. On peut se demander si cela est possible pour un gaz. Il est possible pour cela de refaire l'expérience précédente avec des ballons chauds plutôt que froids (figure n°17).



Figure n°17 - Ballons d'air et de CO₂ chauds observés avec une caméra infrarouge

Bien que cela ne soit pas évident a priori, le CO₂ peut donc également émettre du rayonnement infrarouge. Cette seconde expérience n'est pas directement utile pour la suite du raisonnement, dans la mesure où le CO₂ de l'atmosphère est plus froid que la surface terrestre. Cependant, comme on l'a vu dans la partie analyse du contenu, la connaissance de ce phénomène permet à la fois de désamorcer « l'argument de la saturation », et d'approfondir l'explication du phénomène vers un modèle plus complexe, incluant la vapeur d'eau.

La mise en évidence du phénomène d'émission permet aussi d'interpréter plus précisément l'ensemble des observations dans l'infrarouge ci-dessus, comme cela est développée dans l'annexe A. Que l'on choisisse ou non de rentrer dans le détail de cette interprétation, la conclusion minimale nécessaire pour poursuivre est la suivante : « lorsqu'on ajoute du CO₂ plus froid que le fond, la puissance de rayonnement infrarouge sortant est plus faible ».

Cette relation peut être travaillée à partir d'une autre situation : dans le cas où les ballons sont à température ambiante, et que l'on se déplace derrière eux. Une compréhension correcte des situations précédentes devrait permettre d'anticiper que dans ce cas, la puissance sortante du ballon de CO₂ est la plus faible (figure n°18).

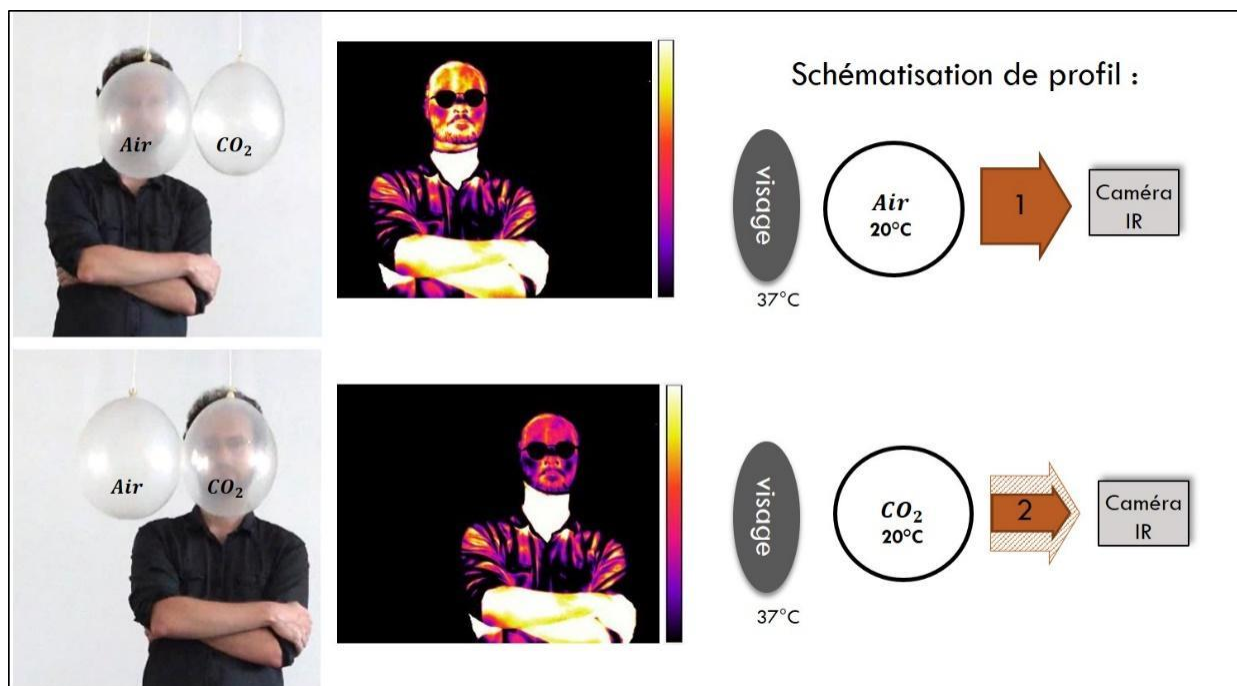


Figure n° 18 – Comparaison de la puissance de rayonnement infrarouge sortant de ballons d’air et de CO₂ à température ambiante, dans le cas d’une source plus chaude

Les expériences des figures 16 et 18 permettent de mettre en évidence que lorsqu’on ajoute devant une surface une quantité CO₂ plus froide que celle-ci, alors la puissance infrarouge sortante diminue. L’étape clef de la logique proposée consiste, à partir de ces observations, à extrapoler l’influence d’un ajout de CO₂ dans l’atmosphère sur le bilan radiatif terrestre (figure 19). Cette extrapolation demande de considérer l’effet potentiel des autres caractéristiques de l’atmosphère, relativement à la situation des ballons (par exemple : le fait que l’atmosphère contienne déjà une certaine quantité de CO₂, ainsi que de la vapeur d’eau, ou encore que sa température décroisse avec l’altitude). L’extrapolation de l’observation sur le cas du ballon de CO₂ froid relativement au cas de l’atmosphère implique donc de faire l’hypothèse que ces différences ne modifient pas qualitativement le sens de variation de la puissance infrarouge sortante, même si toutes ces caractéristiques influent sur la valeur quantitative de cette baisse. S’il n’est pas forcément possible de discuter l’ensemble de ces différences avec les élèves, en tout cas toutes peuvent être justifiées d’un point de vue physique, dont certaines de manière assez accessible, comme cela est présentée dans l’annexe B.

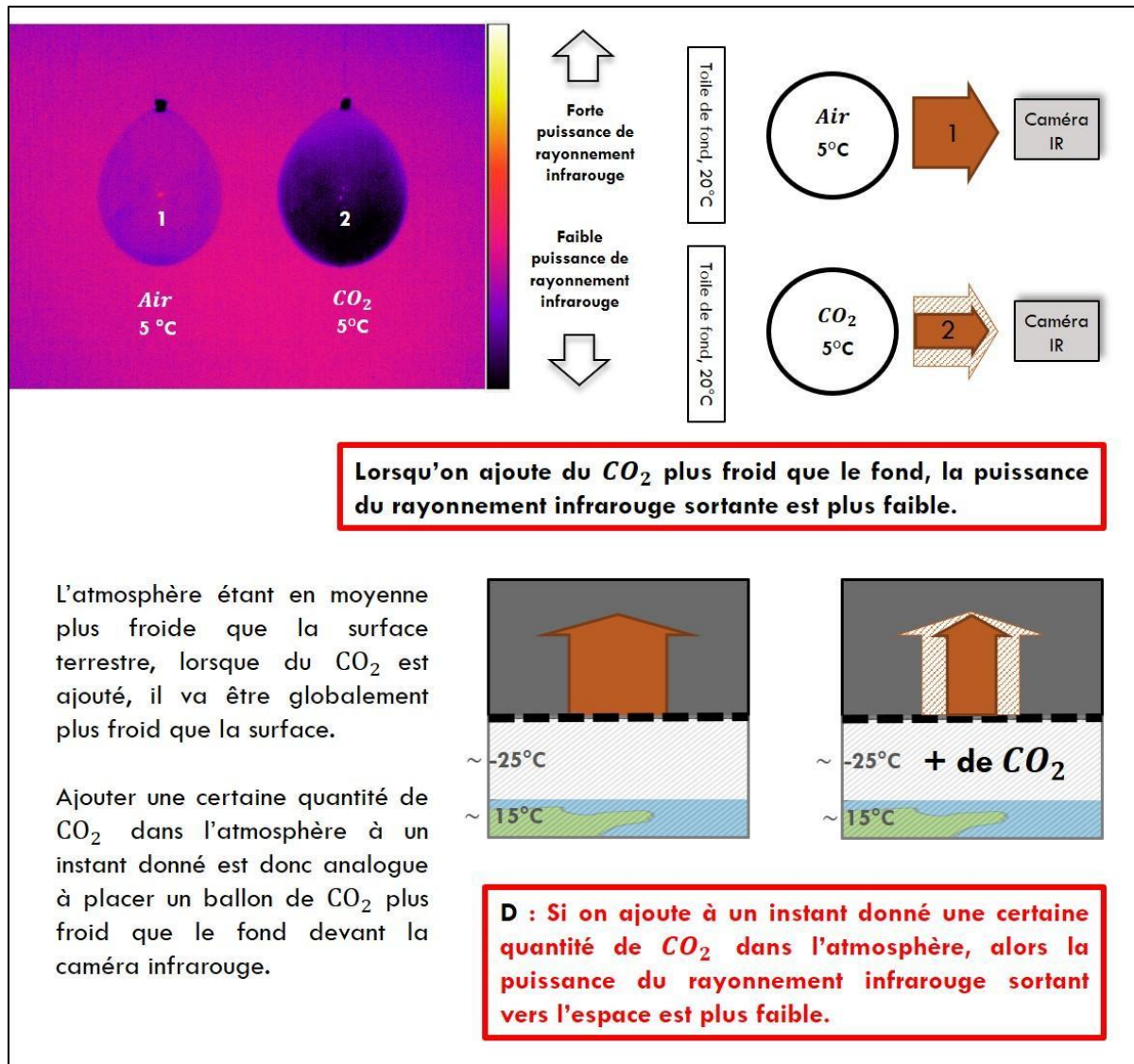


Figure n° 19 - Extrapolation de la conséquence d'un ajout de CO_2 dans l'atmosphère sur le rayonnement infrarouge sortant vers l'Espace

8 – Influence du CO_2 sur le bilan des rayonnements et la température du système Terre

L'influence du CO_2 sur la puissance de rayonnement infrarouge sortant du système Terre permet d'en déduire son impact sur le bilan de rayonnement et la température globale, comme cela est présenté dans la figure 20.

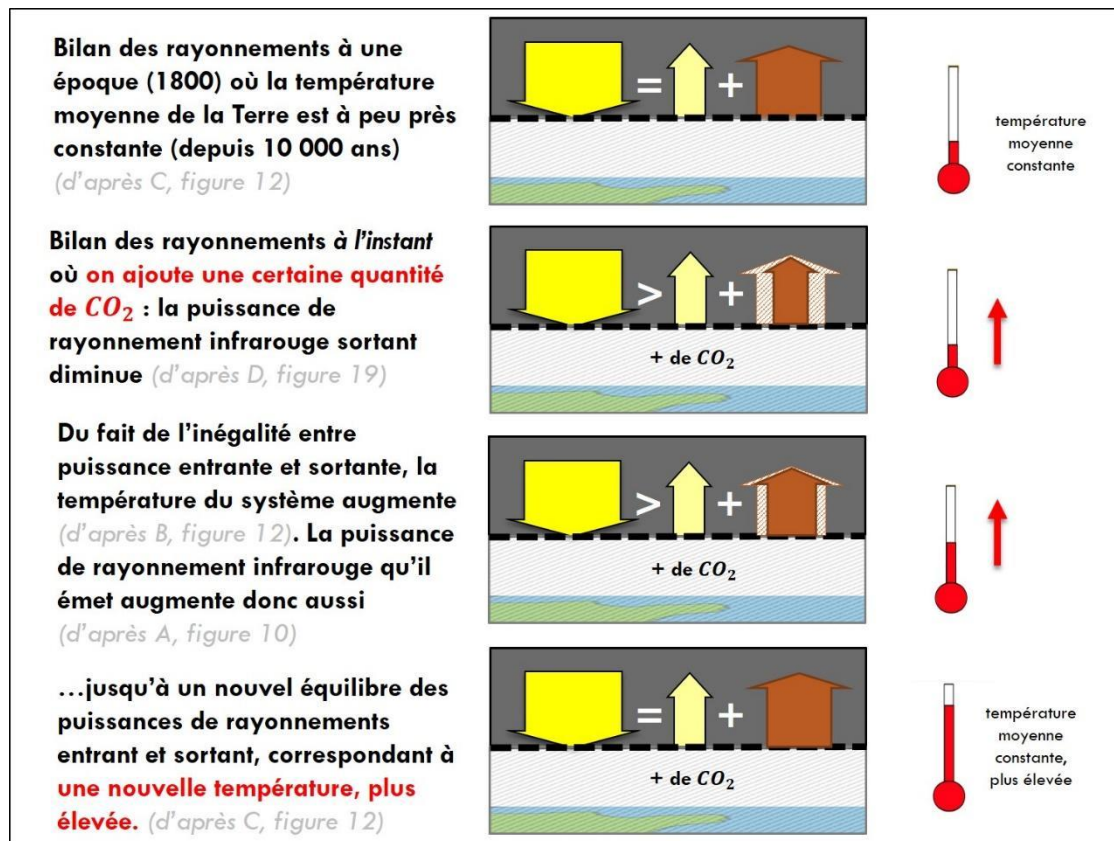


Figure n° 20 - Conséquence de l'ajout de CO₂ sur l'évolution de la température du système Terre-atmosphère

Le raisonnement sur l'évolution du bilan est analogue à celui fait précédemment pour le cas de la plaque en métal dans une enceinte sous vide (figure n°20). Une différence avec cet exemple concerne les situations initiales et finales, où les puissances de rayonnement infrarouge sont identiques, bien que la température du système soit différente. Cela est possible car il ne s'agit plus exactement du même système, puisqu'il contient davantage de CO₂ de l'atmosphère.

Discussions

Prérequis

La structure logique présentée vise à être accessible avec un minimum de prérequis en physique. Parmi les prérequis principaux que nous avons identifiés, figurent les suivants :

- Connaître le mécanisme de la vision (lumière partant d'un objet vers l'œil), dont on sait qu'il n'est pas une évidence pour de jeunes élèves (Hosson & Kaminsky, 2006). La compréhension de ce phénomène est nécessaire pour interpréter de manière analogue les images obtenues avec la caméra infrarouge.

- Avoir des notions sur le système Terre et l'Espace : le fait que l'atmosphère soit un mélange de gaz, dont le CO₂, en moyenne plus froid que la surface, que l'Espace soit vide de matière.
- Savoir que le CO₂ est un gaz émis dans l'atmosphère par les activités humaines, en premier lieu via la combustion des combustibles fossiles.
- Être capable de faire le lien qualitatif entre une échelle de couleurs, les valeurs d'une grandeur physique (puissance de rayonnement), et la largeur d'une flèche représentant cette grandeur.

Arguments d'autorité restants

Si nous avons cherché à minimiser l'usage de l'argument d'autorité - au sens des éléments non justifiés - il reste cependant certains éléments ne permettant pas de justification accessible au niveau visé. C'est le cas en particulier des quatre points suivants :

- Le fonctionnement de la caméra infrarouge. Il n'est en effet pas possible d'expliquer pourquoi elle détecte la puissance de rayonnement pour une gamme spectrale limitée.
- Les énoncés reliant le bilan de rayonnement et l'évolution de température, ne s'appuyant pas sur une expérimentation effectivement présentée.
- La non prise en compte de l'influence du CO₂ sur le rayonnement solaire renvoyé vers l'Espace. L'hypothèse est justifiée à partir de l'observation de la transparence du CO₂ pur à la lumière visible, bien qu'il soit 2500 fois plus concentrée que dans l'air, mais cela demande tout de même une généralisation pour la quantité de CO₂ présente dans une colonne d'atmosphère.
- Enfin, l'extrapolation du cas du ballon de CO₂ froid à celui des émissions de CO₂ implique d'accepter que cela est valable indépendamment de la présence des autres GES, en particulier la vapeur d'eau. Comme on l'a vu dans la partie analyse de contenu, la diminution quantitative de la puissance infrarouge sortante s'explique par d'autres facteurs, dont l'absorption et l'émission infrarouge par la vapeur d'eau dans la basse atmosphère, et le gradient de température vertical de l'atmosphère. Cela étant dit, les éléments introduits rendent possibles une analyse plus approfondie de ces phénomènes, comme cela est présentée dans l'annexe B.

Place de la construction du problème

Enfin, la structure logique développée correspond à la résolution du problème de la cause du réchauffement climatique, mais n'apporte pas d'élément vis-à-vis de la construction de ce problème, au sens de Fabre et Orange (1997). Les deux approches ne sont cependant pas exclusives, et des choix didactiques complémentaires peuvent permettre de travailler ces deux aspects dans une séquence d'enseignement. Cela a été fait notamment par une équipe européenne de chercheurs en didactique des sciences¹⁷ s'étant appuyé en partie sur ce travail pour développer une ressource pédagogique pour l'enseignement du changement climatique. Celle-ci consiste en un épisode d'une série de BD numérique (Bergey et al, 2024), accompagné de documents complémentaires pour construire une séquence (en libre accès sur le site

¹⁷ Dans le cadre du projet Erasmus + ECOSCOMICS (European CO-construction of a Science web-COMICS, en collaboration avec des auteurs de BD de l'association Stimuli.

grandiloquents.fr). Dans le but d'introduire le problème, il a été choisi d'une part de mettre en scène une remise en cause de l'origine anthropique du changement climatique, et d'autre part d'évoquer la corrélation entre température et taux de CO₂ à l'échelle des temps géologiques (figure n°21). Ce constat est en effet parfois présenté à tort en tant que « preuve » de l'influence du CO₂ dans la vulgarisation scientifique¹⁸. Une réflexion sur la distinction entre causalité et corrélation permet alors de rendre nécessaire le problème de départ de ce travail : en quoi le CO₂ pourrait-il causer une augmentation de la température ?

¹⁸Cette erreur a d'ailleurs été sujette à des critiques en partie pertinentes de personnes climatosceptiques influentes, ce qui a participé à leur donner du crédit.



Figure n°21 – Extrait chapitre 1 de l'épisode Climat de la série de BD numérique « Les Grandiloquents » (en libre accès sur le site : grandiloquents.fr)

Conclusion

A partir de l'analyse conjointe du contenu, des approches d'enseignement existantes et des idées a priori des élèves, nous avons proposé une structure logique de construction du lien entre augmentation du taux de CO₂ au réchauffement global. Celle-ci avait pour intention d'être aussi accessible que possible, en s'appuyant au maximum sur des expérimentations qui soient interprétables avec peu de prérequis en physique. En repartant d'expériences sur les phénomènes fondamentaux en jeu, cette approche vise ainsi à participer à « construire la confiance » (Léna et Wilgenbus, 2020, p.289) envers les connaissances sur le climat, en amont

des considérations plus techniques sur ce que sont les modèles et simulations climatiques.

Choix didactiques centraux

La structure logique proposée s'articule autour de trois choix didactiques principaux, différents de ceux les plus courants dans les ressources pédagogiques sur le sujet.

Bilan des rayonnements entre le système Terre et l'Espace.

L'analyse du bilan radiatif a été restreint à celui du système Terre dans son ensemble. Il s'agit d'un choix différent d'une grande partie des représentations existantes de l'effet de serre, schématisant également les interactions entre l'atmosphère et la surface. Nous avons montré en quoi ce type de représentation ne permet pas d'expliquer la conséquence d'une augmentation du taux de GES sur la température (cf. partie analyse de contenu). La restriction à l'interface avec l'Espace, en plus d'être plus facilement accessible, permet d'éviter de négliger les nombreux phénomènes de la physique de l'atmosphère, impliquant d'autres transferts d'énergie que ceux par rayonnement.

Utilisation de la notion de « puissance de rayonnement »

La focalisation sur le bilan des rayonnements entrant et sortant vers l'Espace permet une logique de raisonnement dans laquelle le concept d'énergie n'est pas nécessaire. La notion de « puissance de rayonnement » est en effet suffisante pour conclure, et celle-ci peut être reliée plus facilement à une référence empirique, par généralisation de la notion de luminosité. Ce choix didactique permet d'éviter d'ajouter à la complexité du contenu les difficultés connues dans la compréhension de l'énergie. Pour autant, l'approche proposée reste compatible avec une reformulation ou un approfondissement en termes d'énergie, dans les contextes où cela s'y prête.

Observations infrarouges des ballons d'air et de CO₂ à différentes températures

Les expériences proposées permettent de mettre en évidence la capacité d'émission et d'absorption du rayonnement infrarouge par le CO₂, sans avoir besoin d'étudier les spectres correspondants. Ces observations rendent ainsi accessibles une référence empirique à des élèves n'ayant pas ou peu de maîtrise des notions de longueur d'onde et d'intensité spectrale. La visualisation du phénomène d'émission infrarouge du CO₂ – même s'il n'est pas nécessaire en soi pour le raisonnement – permet d'une part une réponse simple à l'argument climatosceptique de la saturation, et d'autre part rend possible la construction du modèle plus complexe de l'interaction entre les rayonnements et l'atmosphère.

Ces trois points centraux sont l'aboutissement de très nombreux allers retours entre les auteurs, conciliant prises en compte des conceptions des élèves, rigueur du contenu scientifique et remises en causes successives issues des expérimentations exploratoires. La démarche d'élaboration collective de cette structure logique aura conduit le physicien parmi nous, spécialiste du sujet, à remettre en cause sa pratique d'enseignement de l'effet de serre depuis une quinzaine d'année (Dufresne, 2020 ; Dufresne & Treiner, 2011), pour prendre en compte désormais les trois perspectives ci-dessus, jusqu'ici non mobilisées dans ses interventions sur le sujet. Dans l'autre sens, il aurait été impossible pour les chercheurs en

didactique d'aller aussi loin dans la construction de ce cheminement sans l'éclairage scientifique, l'exigence et les idées du collègue physicien.

Perspectives de recherche

La suite du travail consiste à investiguer d'une part l'appropriation par les enseignants de cette proposition de structure logique, notamment à travers la conception de séquences d'enseignement, et d'autre part la compréhension par les élèves des différentes étapes clefs de cette construction (bloc (3) de la figure n°1).

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement :

- Benoît Roquesalane, pour son aide sur la mise en place de l'ensemble des expérimentations
- Pascal Lavieille, pour le prêt de la caméra infrarouge adaptée aux gaz et ses réglages.
- Iris-Amata Dion pour sa participation aux photos infrarouges. Iris est également l'autrice de la BD Horizons Climatiques (Dion & Henrion, 2024) dans laquelle l'explication du rôle du GES sur le climat s'inspire de la proposition de cet article, suite à un travail collaboratif. Ce travail a bénéficié de financements du projet MCG-Rad (ANR-18-CE46-0012).

Références

- AMIEL, A., & AUBRY, C. (2023). *Étude de quelques conditions d'enseignement et d'étude des transferts d'énergie par rayonnement au cycle 4*. Université Toulouse Jean-Jaurès.
- BÄCHTOLD, M. (2018). Épistémologie et didactique de la physique. Des interrelations multiples et fécondes. *Université de Montpellier. (Note de synthèse en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches)*.
- BERGEY L., GOVIN B. ET MARON V. (2023). Episode Climat, Les Grandiloquents, Stimuli Eds, www.grandiloquents.fr/fr/climat
- BESSON, U., DE AMBROSIS, A., & MASCHERETTI, P. (2010). Studying the physical basis of global warming : Thermal effects of the interaction between radiation and matter and greenhouse effect. *European Journal of Physics*, 31(2), 375.
- CHAVALARIAS, D., BOUCHAUD, P., CHOMEL, V., & PANAH, M. (2023). *Les nouveaux fronts du dénielisme et du climato-scepticisme*. <https://hal.science/hal-03986798>
- COCHÉPIN, M. (2022). *Conception et expérimentation d'une approche d'enseignement du réchauffement climatique. Quelles difficultés pour les élèves concernant l'émission et l'absorption d'un rayonnement par les gaz, et comment les prendre en compte ?* Université Toulouse Jean-Jaurès.
- COLIN, P. (2011). Enseignement et vulgarisation scientifique : Une frontière en cours d'effacement ? Une étude de cas autour de l'effet de serre. *Spirale - Revue de recherches en éducation*, 48(1), 63-84.
- DION, I.-A., & HENRION, X. (2024). *Horizons climatiques : Rencontre avec neuf scientifiques du G.I.E.C*. Glénat BD.
- DUFRESNE, J.-L. (2020). *Principes de base de l'effet de serre*. Planet Terre. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/principes-effet-serre.xml#serre>

- DUFRESNE, J.-L., & TREINER, J. (2011). L'effet de serre atmosphérique : Plus subtil qu'on ne le croit ! *La Météorologie*, 8(72), 31.
- DUIT, R. (2007). Science education research internationally : Conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(1), 3-15.
- FABRE, M., & ORANGE, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, 1997, 24" *Obstacles: travail didactique*".
- GAUTIER, C., DEUTSCH, K., & REBICH, S. (2006). Misconceptions about the greenhouse effect. *Journal of Geoscience Education*, 54(3), 386-395.
- HANDAYANI, R. D., PRASTOWO, S. H. B., PRIHANDONO, T., PUTRA, P. D. A., BACHTIAR, R. W., NURAINI, L., SUPRIADI, B., MARYANI, M., BEKTIARSO, S., & LESMONO, A. D. (2021). Students' thought pattern concerning the greenhouse effect. *Momentum: Physics Education Journal*, 21-28.
- HOSSON (DE), C. & KAMINSKY, W. (2006). *Un support d'enseignement du mécanisme de la vision inspiré de l'histoire des sciences*.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2021). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). Cambridge University Press.
- JEEVANJEE, N., SEELEY, J. T., PAYNTER, D., & FUEGLISTALER, S. (2021). An Analytical Model for Spatially Varying Clear-Sky CO₂ Forcing. *Journal of Climate*, 34(23), 9463-9480.
- KATTMANN, U., DUIT, R., GROPENGIESSER, H., & KOMOREK, M. (1996). Educational reconstruction—bringing together issues of scientific clarification and students' conceptions. *Annual meeting of the National Association of Research in Science Teaching (NARST)*.
- KLAASSEN, K. (1995). *A problem-posing approach to teaching the topic of radioactivity* (CD-b Press).
- LENA, P., & WILGENBUS, D. (2020). Changement climatique et éducation. *Comptes Rendus. Géoscience*, 352, 1-12.
- LIJNSE, P., & KLAASSEN, K. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching–learning sequences? *International Journal of Science Education*, 26(5), 537-554.
- MANABE, S., & R. T. WETHERALD, (1967). Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *J. Atmos. Sci.*, 24, 241–259,
- MEN (MINISTERE DE L'ÉDUCATION NATIONALE) (2023). Programme d'enseignement scientifique de Terminale générale. Bulletin officiel de l'Education Nationale, n° 25 du 22 juin 2023.
- ORANGE RAVACHOL, D (2023). Concilier l'engagement des élèves pour le climat et leur accès à des savoirs émancipateurs, est-ce possible et à quelles conditions ? *Educations*, 6(2).
- ORESQUES, N., & CONWAY, E. M. (2010). *Merchants of Doubt : How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming* (Reprint édition). Bloomsbury Press.
- RAVAL, A. & RAMANATHAN, V. Observational determination of the greenhouse effect. *Nature* 342, 758–761 (1989).

- ROMOND, N., & LUSSON, A. (2023). *Proposition d'enseignement à propos du réchauffement climatique : Comment amener les élèves à la compréhension de l'augmentation de la température liée à l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère ?* Université Toulouse Jean-Jaurès.
- ROMPS, D. M., SEELEY, J. T., & EDMAN, J. P. (2022). Why the Forcing from Carbon Dioxide Scales as the Logarithm of Its Concentration. *Journal of Climate*, 35(13), 4027-4047.
- SHEPARDSON, D. P., CHOI, S., NIYOGI, D., & CHARUSOMBAT, U. (2011). Seventh grade students' mental models of the greenhouse effect. *Environmental Education Research*, 17(1), 1-17.
- THOLLOT, P., & DEQUINCEY, O. (2021). *Rayonnement, opacité et effet de serre*. Planet Terre. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/rayonnement-effet-de-serre.xml#experiences-fausses>
- TIBERGHIE, A. (1984). Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens des notions de circuits électriques pour des élèves de 8 à 16 ans, in *Recherche en Didactique de la Physique, Les Actes du premier Atelier International: la Londe les Maures*, CNRS, Paris, pp 91–107.
- TOFFALETTI, S., DI MAURO, M., ROSI, T., MALGIERI, M., & ONORATO, P. (2022). Guiding Students towards an Understanding of Climate Change through a Teaching–Learning Sequence. *Education Sciences*, 12(11), 759. <https://doi.org/10.3390/educsci12110759>
- VIENNOT, L. (2009). Learning and conceptual understanding : Beyond simplistic ideas, what have we learned? *Physics education: Recent developments in the interaction between research and teaching*.
- WAGONER, P., LIU, C., & TOBIN, R. (2010). Climate change in a shoebox : Right result, wrong physics. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, 78, 536-540.

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

Les puissances infrarouges mesurées dans chacune des quatre expériences des figures n°16 et 17 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.

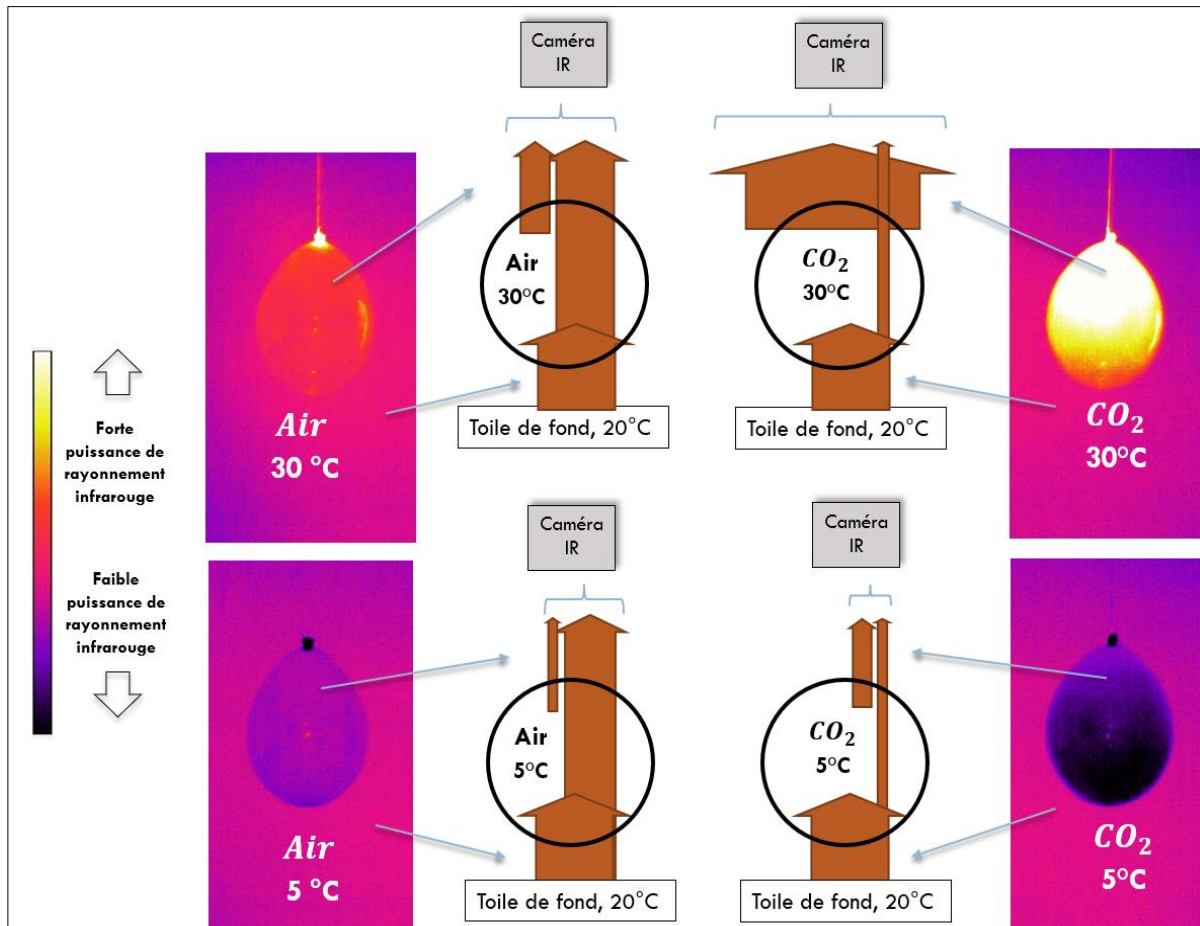


Figure n°22 – Interprétation des images infrarouges des ballons à partir des notions d'émission, transmission et absorption

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 attribué 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 B : Justification de l'extrapolation 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)¹⁹. 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.

¹⁹ 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>).

- 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

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).

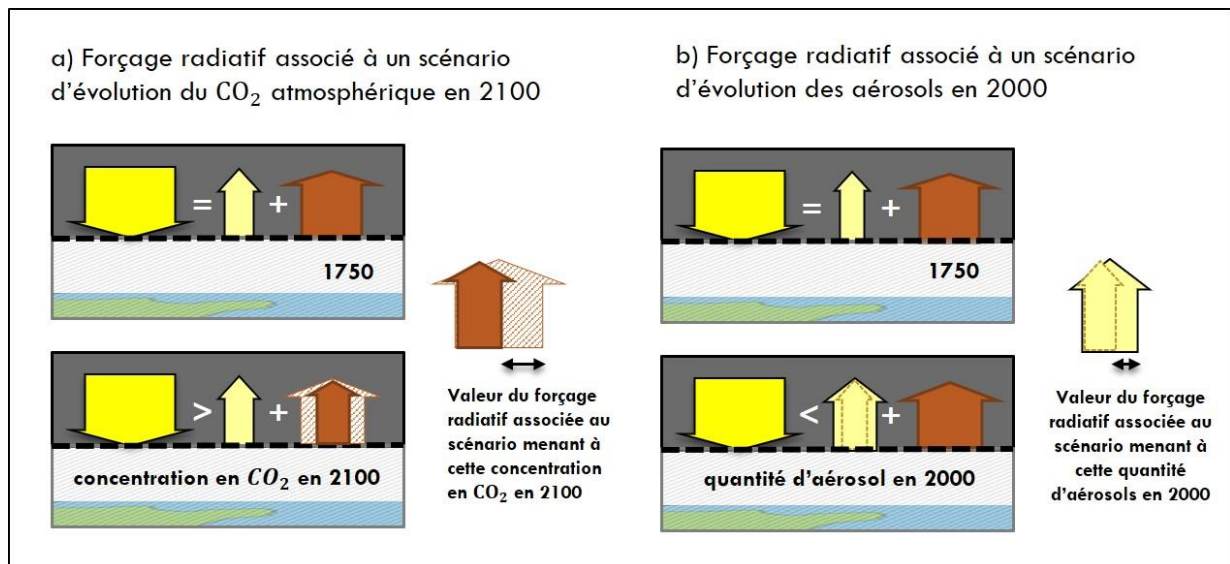


Figure n°23 – Représentation du forçage radiatif associé à un scénario d'évolution d'une grandeur physique

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.