



**HAL**  
open science

## Cheminement conceptuel empiriquement fondé pour comprendre le rôle du CO<sub>2</sub> dans le réchauffement climatique

Valentin Maron, Jean-Louis Dufresne, Lionel Pélissier Pelissier, Alain Rabier,  
Medhi Cochepin

### ► To cite this version:

Valentin Maron, Jean-Louis Dufresne, Lionel Pélissier Pelissier, Alain Rabier, Medhi Cochepin. Cheminement conceptuel empiriquement fondé pour comprendre le rôle du CO<sub>2</sub> dans le réchauffement climatique. 12ème rencontres scientifiques de l'Association pour les Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies (ARDiST), Nov 2022, Toulouse, France. hal-03881838v3

**HAL Id: hal-03881838**

**<https://hal.science/hal-03881838v3>**

Submitted on 11 Mar 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Après les 12<sup>èmes</sup> Rencontres Scientifiques...

Actualité des recherches en didactique  
des sciences et des technologies

sous la direction de Lionel Pélissier et Patrice Venturini

---

Toulouse 2022

AR *di* ST

# **Cheminement conceptuel empiriquement fondé pour comprendre le rôle du CO<sub>2</sub> dans le réchauffement climatique**

Maron Valentin<sup>(1, 2)</sup>, Dufresne Jean-Louis <sup>(3)</sup>, Pélissier Lionel<sup>(1,2)</sup>, Rabier Alain <sup>(2)</sup>,  
Cochebin Medhi <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>EFTS (Education, Formation, Travail, Savoirs), Université Toulouse Jean Jaurès – France

<sup>(2)</sup>INSPE Toulouse Occitanie-Pyrénées, Université Toulouse Jean Jaurès – France

<sup>(3)</sup>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 émissions de CO<sub>2</sub> 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 pour les élèves. Les choix didactiques structurant l'approche proposée sont alors exposés. Ils s'articulent autour de l'interprétation d'expériences réalisées avec une caméra infrarouge d'une gamme spectrale permettant de voir l'émission et l'absorption du CO<sub>2</sub>.

## Introduction

« 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<sup>30</sup>, par le président de la République française, rappelle 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<sup>ème</sup> rapport du GIEC (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021) il est clair que *l'intégralité* du changement climatique observé actuellement est due aux activités humaines, cela ne fait pas encore consensus dans la population. En 2022, d'après une enquête EDF-IPSOS<sup>31</sup>, 37% des sondés (24000 personnes dans 30 pays) désapprouvent l'idée que « le changement climatique actuel est principalement dû à l'activité humaine », une proportion en hausse de 6% relativement à 2019. Ce pourcentage atteint 48% aux Etats-Unis, en Russie et en Norvège, ou encore 60% en Arabie Saoudite, les quatre premiers pays producteurs d'énergies fossiles. Parmi les raisons de ce constat figurent les stratégies de désinformations massives de l'industrie fossile aujourd'hui bien connues (Oreskes et Conway, 2010). Ces phénomènes sont également présents en France, avec en particulier un fort regain depuis l'été 2022 sur les réseaux sociaux (Chavalarias et al., 2023). Celui-ci peut être relié à la hausse de 8% en France des personnes niant l'origine principalement humaine du changement climatique, entre 2019 et 2022<sup>3</sup>. Face à cette situation, le rôle de l'enseignement pour établir ce fait de la manière la plus convaincante possible est crucial. En France comme dans d'autres pays, la place de la physique du climat a été fortement renforcée dans les nouveaux programmes du secondaire, dès le cycle 4, et en particulier dans l'enseignement scientifique des classes de première et terminale du lycée général, et dans le programme de physique du lycée professionnel.

Ce travail, issu d'une collaboration entre didacticiens et physiciens du climat, a pour objectif de développer une approche d'enseignement visant à construire le lien entre émissions de

---

<sup>30</sup> <https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-13543-fr.pdf>

<sup>31</sup> <https://www.edf.fr/groupe-edf/observatoire-international-climat-et-opinions-publiques/telechargements>

dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub> et température peut servir de point d'appui à d'autres modalités de l'éducation au changement climatique.

Nous commencerons dans ce chapitre par préciser notre cadre méthodologique. Après avoir synthétisé les savoirs en jeu, nous présenterons certaines approches d'enseignement courantes du sujet, que nous questionnerons ensuite relativement aux difficultés connues concernant la compréhension de l'effet de serre. Cette analyse conduira à expliciter nos questions de recherche, puis à présenter et justifier les différents choix didactiques constituant la proposition issue de cette recherche.

## Cadre méthodologique

Ce travail s'inspire du « *Model of Educational Reconstruction* » (Kattmann et al., 1996). Cette formalisation 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.

Notre objectif final est de produire une « *structure open source* », au sens de Besson et al. (2010, p.3) :

*To bridge the gap between research project and school reality and, to facilitate the reproducibility in an actual classroom context, the sequences are designed in a form that we call an 'open-source structure'. This means that there is a core of contents, conceptual correlations and methodological choices with a cloud of elements that can be re-designed, omitted, or added by the teacher, who may thereby create new versions of the sequence. Some elements redesigned by the teachers can be included in the standard version issued by the research group. In this sense, the teachers' work provides useful feedback that allows us*

*not only to test the effectiveness of the proposal and to identify its points of weakness, but also to enrich it with new elements. A variety of approaches is expected in the actual organization of educational activities, depending on the constraints of the classroom and teacher preferences.* (Besson et al., 2010, p.3)

## Savoirs visés

La première mise en évidence du rôle du CO<sub>2</sub> sur le climat a été établie par le scientifique Arrhenius dans son article « *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground* » (Arrhenius, 1896). Celui-ci a pu déterminer les coefficients d'absorption du CO<sub>2</sub> à partir d'observations de la Lune à différentes longueurs d'onde effectuées par le physicien Samuel Langley. Depuis, les interactions entre l'atmosphère et le rayonnement sont comprises de plus en plus précisément par les spécialistes du domaine et intégrées dans les modèles de climat. Les équations en jeu pour rendre compte de ces phénomènes sont accessibles à un niveau universitaire, comme par exemple dans le cours d'introduction à la physique de l'atmosphère<sup>32</sup> du magistère des Sciences de la Terre à Paris.

Dans le cadre d'une approche d'enseignement avec le minimum de prérequis, les savoirs en jeu pour construire le lien entre CO<sub>2</sub> et température sont les suivants :

- La notion de rayonnement infrarouge (ses points communs et différences avec la lumière visible), et en particulier l'interprétation d'images de caméra infrarouge, en tant que représentatives de la puissance de rayonnement, et non de la température.
- Le lien qualitatif entre puissance de rayonnement infrarouge émis et température.
- La capacité de certains matériaux à absorber le rayonnement infrarouge (verre, eau).
- La capacité du CO<sub>2</sub> à absorber et émettre du rayonnement infrarouge.

---

<sup>32</sup> <https://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/cours.pdf>

- La notion de bilan de puissances de rayonnement d'un système et son lien avec l'évolution de sa température (en particulier : le fait que la température augmente lorsque la puissance entrante est supérieure à celle sortante).
- La notion de bilan radiatif terrestre, l'influence de l'ajout de CO<sub>2</sub> sur ce bilan, et sa conséquence sur la température du système Terre.

## Limites des approches d'enseignement existantes

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

Dans le cadre de ce travail, visant le développement d'une approche la plus accessible possible du sujet, ces choix didactiques ne sont pas adaptés. 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 (voire impossibles) à comprendre, et donc à utiliser comme référence empirique.

Une autre approche courante dans les ressources pédagogiques sur le climat (par exemple sur le site de *La main à la pâte*<sup>33</sup>), ainsi que dans certaines recherches en didactique (Besson

---

<sup>33</sup> <https://fondation-lamap.org/sequence-d-activites/co2-effet-de-serre-et-activites-humaines>

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 remplie de dioxyde de carbone et une autre remplie d'air, pareillement exposées au rayonnement. Si on constate effectivement une élévation de température plus grande dans le cas du CO<sub>2</sub>, cela est dû principalement aux phénomènes de conduction et convection, variant avec la densité du gaz, et non à l'interaction du CO<sub>2</sub> avec le rayonnement infrarouge, comme dans le cas de l'atmosphère. Une démonstration de la fausseté du raisonnement est notamment faite dans l'article « *Climate change in a shoebox: Right result, wrong physics* » (Wagoner et al., 2010).

Si cette expérience simple ne correspond pas au phénomène d'interaction entre gaz et rayonnement ayant lieu dans l'atmosphère, il ne reste donc aucune preuve expérimentale accessible du rôle du CO<sub>2</sub> dans le réchauffement climatique. L'unique point d'appui utilisable est l'analogie avec le verre ou le plastique, via les expériences montrant l'absorption du rayonnement infrarouge. 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.

## **Idées a priori et difficulté en jeu**

### **A 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 MEEF (Amiel et Aubry, 2023; Cochapin, 2022; Romond et Lusson, 2023). Suite à une introduction classique à l'émission et l'absorption du rayonnement infrarouge par des solides, 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 ce phénomène sans le donner à admettre, étant donné le caractère crucial de ce point pour faire le lien entre émissions de



CO<sub>2</sub> et réchauffement climatique. A 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<sup>34</sup>, Office for Climate Education<sup>35</sup>, EduClimat<sup>36</sup>, Bonpote<sup>37</sup>) n'apporte d'élément empirique convaincant et accessible concernant les capacités d'émission et d'absorption du rayonnement par certains gaz.

### A 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 le rayonnement émis par la Terre « rebondirait » pour revenir vers elle, « piégeant » ainsi l'énergie du Soleil.



Figure n° 1 : schéma extrait de la Fresque du climat (<https://fresqueduclimat.org/>)

Cette idée de « piégeage » est régulièrement présente dans les textes de vulgarisation et les manuels d'enseignement, et est renforcée par les schémas proposés (comme par exemple celui de la figure n°1). Cette notion implique implicitement une idée de chronologie, avec

---

<sup>34</sup> <https://eduscol.education.fr/1132/changement-climatique>

<sup>35</sup> <https://www.oce.global/fr>

<sup>36</sup> <https://educlimat.fr/>

<sup>37</sup> <https://bonpote.com/>

rayonnement qui part du sol, puis qui est empêché de sortir par l'atmosphère et qui revient ensuite vers la surface de la Terre, et contribue 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 et 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). Cette confusion participe à rendre possible l'idée de « rebond » ou de « piégeage » du rayonnement venant du sol.

## **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 déterminer un raisonnement qui puisse être suivi par un maximum de personnes, quel que soit leur bagage scientifique, tout en limitant au maximum 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 CO<sub>2</sub>, en tant que principale cause du réchauffement.

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

- Les expériences simples d'enceintes fermées avec ou sans CO<sub>2</sub> ne sont pas valides pour expliquer le réchauffement climatique.
- Les spectres d'absorption du CO<sub>2</sub> ne sont pas accessibles 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 émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et température moyenne de la Terre, pour un public non spécialiste de physique ? Comment établir cette relation 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 ?

L'objectif n'est pas de concevoir une séquence d'enseignement complète sur le sujet, mais plutôt construire la structure logique d'un cheminement conceptuel, qui pourrait être déclinée ensuite de diverses manières selon les contextes. Cette structure « open source » est constituée de différents choix didactiques vis-à-vis des notions mobilisées ou non, des choix de définitions, les expériences, les représentations, les liens logiques ou encore les questionnements possibles. L'enjeu de cette recherche a été de développer et justifier ce noyau minimal de choix didactiques répondant à notre question, qui soit rigoureux à la fois du point de vue des physiciens spécialistes du sujet que du point de vue des chercheurs en didactique de la physique, vis-à-vis de 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 CO<sub>2</sub>,
- 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

construire un cheminement conceptuel 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 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 la « luminosité ». Si le contexte s'y prête, l'introduction de 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 nous appuyer du tout sur 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, régime transitoire et permanent.

## **Méthodologie**

De nombreuses divergences existant entre les approches d'enseignement de l'effet de serre (Besson et al., 2010; Colin et Tran Tat, 2011; Dufresne et Treiner, 2011), nous avons

souhaité travailler directement en collaboration entre chercheurs en didactique et physiciens du climat spécialistes du sujet, afin de pouvoir confronter les différents points de vue, et garantir la rigueur scientifique de nos propositions sur ce sujet particulièrement technique. La toute première version de l'approche proposée est issue d'un 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 de cheminement visait à sonder le degré de clarté des liens logiques proposés. Ce travail de tâtonnement itératif par la pratique, pour 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 les 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 « infrarouge » de ballons de CO<sub>2</sub> (cf. section suivante). 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 infrarouges (5 sessions en tout) et de nouvelles propositions didactiques, systématiquement discutées avec les physiciens du climat, jusqu'à la version actuelle, faisant suite à 23 précédentes versions.

A ce stade du travail, l'enjeu n'était pas encore d'obtenir des retours de la part d'élèves sur le cheminement conceptuel élaboré, mais de construire un enchaînement logique d'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 obtenu un cheminement conceptuel respectant ces exigences que nous souhaitons le traduire en plusieurs possibles séquences d'enseignement pour l'expérimenter avec des élèves, et continuer de l'affiner.

## Proposition de cheminement conceptuel pour relier CO<sub>2</sub> et température

La structure du cheminement conceptuel proposée ici consiste en six points clefs centraux, chacun étant illustré par une figure. Certaines figures comportent une ou plusieurs questions, qui sont des exemples de questionnements pouvant être adressés à des élèves. L'ensemble des choix didactiques présentés et justifiés ici pourrait être adapté, complété et mis en œuvre dans le cadre de différentes séquences d'enseignement, adaptées selon le niveau, les contraintes pratiques et les points de vue sur l'apprentissage.

### Introduction au rayonnement infrarouge

La première notion à construire dans l'approche proposée est celle de rayonnement infrarouge. Son introduction s'appuie sur sa détection par une caméra infrarouge (figure n°2).

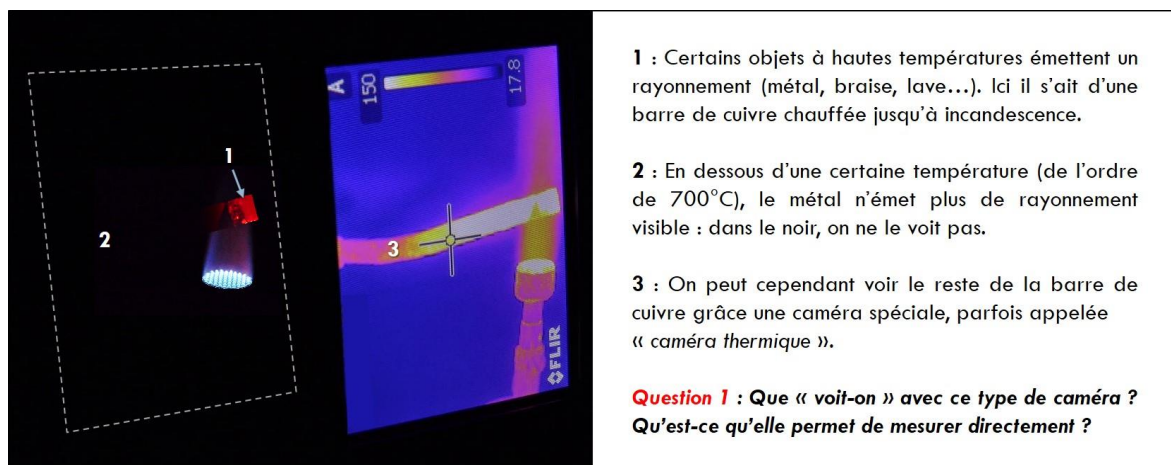


Figure n°2 – Une barre de cuivre chauffée jusqu'à incandescence, dans le noir, observée avec une caméra « thermique »

Le choix a été fait de faire cette image dans le noir, de manière à éliminer une possible confusion entre les deux manières pour un objet d'être visible : par diffusion (source secondaire) ou émission (source primaire). Le terme de « caméra thermique » est en soit problématique dans la mesure où il renforce l'idée d'une caméra permettant de « voir » la température, à la façon d'un thermomètre. Cela est d'autant plus renforcé par l'échelle de température (reconstruite) associée à ce type d'image, comme dans la figure n°2 (en haut à droite). La suite du cheminement nécessite la compréhension de ce que mesure directement ce type de caméra : des puissances de rayonnement infrarouge. Des premières expérimentations en classe sur ce point (Cochepin, 2022) ont montré la forte tendance à continuer d'interpréter les images infrarouges en termes de température ou de chaleur, malgré une clarification de ce point en début de cours. Cette conception erronée interfère par la suite avec l'interprétation des images mettant en jeu les phénomènes d'émissions et absorption du rayonnement infrarouge, où les couleurs ne correspondent plus aux températures des objets observés. Afin d'anticiper et d'insister sur ce point, il a été choisi de considérer la réflexion infrarouge (figure n°2), dans le but de mettre en évidence l'impossibilité de l'interprétation en température, et le point commun avec la lumière visible. Dans toute la suite, il est intentionnel d'avoir laissé présent ce reflet infrarouge en arrière-plan des autres expériences, afin de pouvoir s'y référer régulièrement pour rappeler que les couleurs ne peuvent pas correspondre à des températures.




Figure n°3 – Mise en évidence du reflet infrarouge dans une vitre

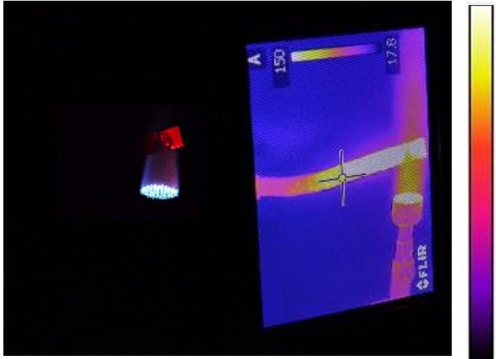
Après avoir amené l'idée que la caméra permet de détecter un type de rayonnement, l'interprétation de la figure n°2 peut être clarifiée : en dessous d'une certaine température, le métal n'émet plus de rayonnement visible (dans le noir, on ne le voit pas). Il émet cependant toujours un rayonnement, invisible pour notre œil. Comme il s'agit d'un rayonnement émis après la zone rouge de plus en plus sombre, on l'appelle rayonnement


infra-rouge. On privilégiera donc systématiquement l'appellation de « caméra infrarouge » plutôt que « caméra thermique ».

Reste à préciser la nature de la grandeur physique mesurée par ce détecteur. D'un point de vue physique, il s'agit de la puissance de rayonnement par unité de surface, pour une gamme de longueurs d'onde donnée. Le choix fait ici est de se restreindre à la notion de « puissance de rayonnement ». Le rapport à la surface est laissé implicite par le fait que les valeurs mesurées (traduites en couleurs) peuvent varier spatialement, ce qui sous-entend une grandeur locale sans nécessairement qu'il y ait besoin de l'expliquer la notion de puissance surfacique à ce stade. L'avantage de raisonner sur la notion de puissance est qu'elle peut s'appuyer sur l'idée intuitive de luminosité d'une lampe, ayant un sens à un instant donné.




La « **puissance du rayonnement** » émis par une lampe correspond au fait qu'elle soit **plus ou moins lumineuse, qu'elle brille plus ou moins.**



  
**Forte puissance de rayonnement infrarouge**

Un rayonnement infrarouge peut également avoir une puissance plus ou moins grande.

**Faible puissance de rayonnement infrarouge**  


**Une caméra infrarouge mesure une puissance de rayonnement infrarouge, qu'on peut visualiser par une échelle de couleur.**

**A : Plus la température d'un objet est élevée, plus la puissance de rayonnement infrarouge qu'il émet est grande.**

Figure n°4 : Introduction de la notion de puissance de rayonnement infrarouge

Une fois introduite la notion de puissance, le lien entre puissance de rayonnement émis et température peut être facilement mis en évidence. Dans le cas de la barre de cuivre chauffée, il suffirait de montrer avec un thermomètre que plus on s'éloigne de la flamme, plus la température diminue. De même, la puissance de rayonnement infrarouge émise par la barre décroît avec la distance à la flamme. L'exemple de la barre de cuivre incandescente pouvant donner l'impression que seul des objets très chauds peuvent émettre un rayonnement infrarouge, il peut être intéressant d'associer explicitement une puissance de rayonnement



infrarouge à des objets à des températures proches de la température ambiante, comme par exemple dans la figure n°3 avec un corps humain, des habits, une vitre...

### Rayonnement à travers la matière solide

Avant d'introduire l'interaction entre rayonnement infrarouge et gaz, nous proposons de commencer par considérer le cas de solide (de même que dans Dufresne, 2020; Thollot et Dequinsey, 2021)). L'expérience de la figure n°5 a été pensée cependant de manière à servir d'appui pour interpréter celles avec le CO<sub>2</sub>, comme nous le montrerons ensuite.



Figure n°5 : Rayonnement visible et infrarouge à travers la matière

Cette photo permet plusieurs observations :

- La puissance de rayonnement infrarouge émis par le verre d'eau chaude est plus grande que celle du verre d'eau froide.
- La puissance du rayonnement infrarouge en provenance du verre d'eau froide est plus faible que la puissance du rayonnement venant de la personne derrière. Le verre ne laisse donc pas (ou du moins pas entièrement) le rayonnement infrarouge. A ce stade, il n'est pas encore possible d'introduire la notion d'« absorption » du rayonnement par la matière, car cette baisse de puissance est également liée à la réflexion du rayonnement infrarouge par le verre.
- Dans le cas du verre d'eau chaude, même si une part du rayonnement venant de la personne ne traverse pas non plus le verre, cela ne peut pas se voir : la puissance du rayonnement émis par le verre chaud est

suffisamment forte pour compenser la part venant de derrière qui ne traverse pas (et même être plus grande que celle-ci).

Un second exemple d'interaction rayonnement matière est également utilisé, celui d'une pochette plastique (figure n°6).



Figure n°6 : Rayonnement infrarouge à travers une pochette plastique et un verre d'eau

Après avoir considéré ces différents exemples, la question peut être posée en ce qui concerne les gaz. En effet, comme on l'a vu précédemment avec l'enquête effectuée à ce sujet, il semble que pour la large majorité des élèves du secondaire l'idée que les gaz puissent émettre ou absorber du rayonnement n'est pas une évidence.

### Rayonnement à travers les gaz

Les expériences qui suivent visent à mettre en évidence l'interaction entre CO<sub>2</sub> et rayonnement infrarouge. Malheureusement, elles ne sont pas possibles avec les caméras infrarouges les plus courantes (celles présentes dans les établissements scolaires) dont la gamme spectrale de sensibilité ne se superpose pas<sup>38</sup> avec celle du spectre d'absorption du

---

<sup>38</sup> La gamme spectrale des caméras infrarouge les plus courante se situe entre 8 et 15µm, ce qui correspond précisément à une plage pour laquelle le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau n'émettent pas de rayonnement infrarouge.

CO<sub>2</sub>. Ces expériences ont été réalisées avec une caméra infrarouge prêtée par un laboratoire de physique. 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.

La première expérience consiste à comparer des ballons en latex, l'un rempli d'air, l'autre de CO<sub>2</sub> pur. A température ambiante, si l'on observe les deux ballons avec la caméra infrarouge, on observe la même chose pour les deux : une puissance uniforme. L'interprétation de l'observation de chacun des ballons est cependant différente. 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 CO<sub>2</sub>, une part du rayonnement arrivant vers le ballon est absorbée par le CO<sub>2</sub>, et celui émet également du rayonnement infrarouge. Ainsi, pour comprendre cette interprétation, il faut déjà pouvoir mettre en évidence l'absorption et l'émission du CO<sub>2</sub>. 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. Nous commencerons avec des ballons refroidis dans un bac à glace (figure n°7).

---

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, CO<sub>2</sub> ou vapeur d'eau. Malheureusement, les caméras infrarouges permettant de détecter les gaz sont beaucoup plus chères (de l'ordre de 50 000 € en 2023).

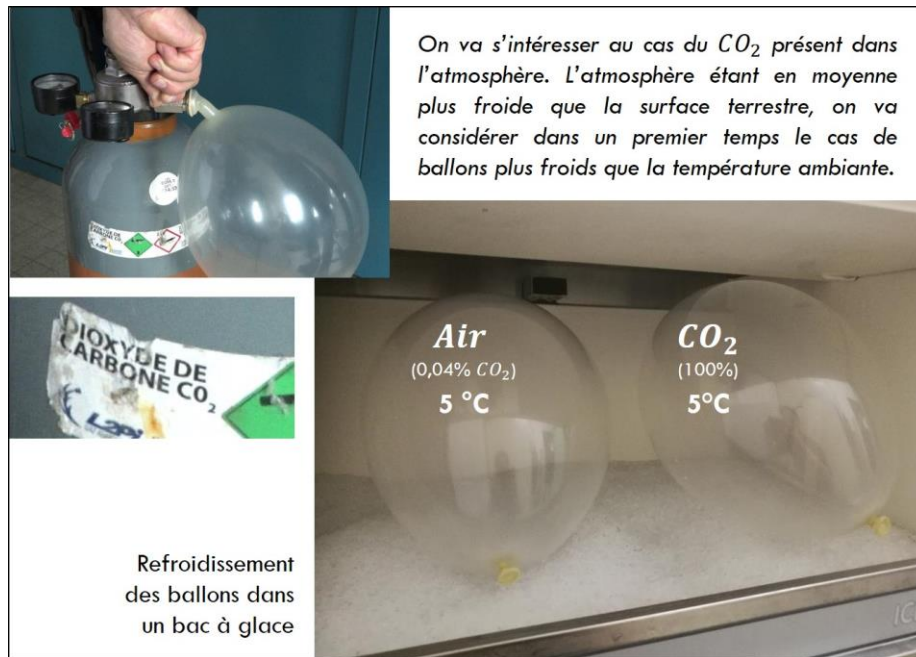


Figure n°7 : Gonflage d'un ballon de  $CO_2$  et refroidissement des ballons

En lumière visible, on constate dans un premier temps que le  $CO_2$  est aussi transparent que l'air. Observé avec la caméra infrarouge, on obtient l'image suivante (figure n°8) :

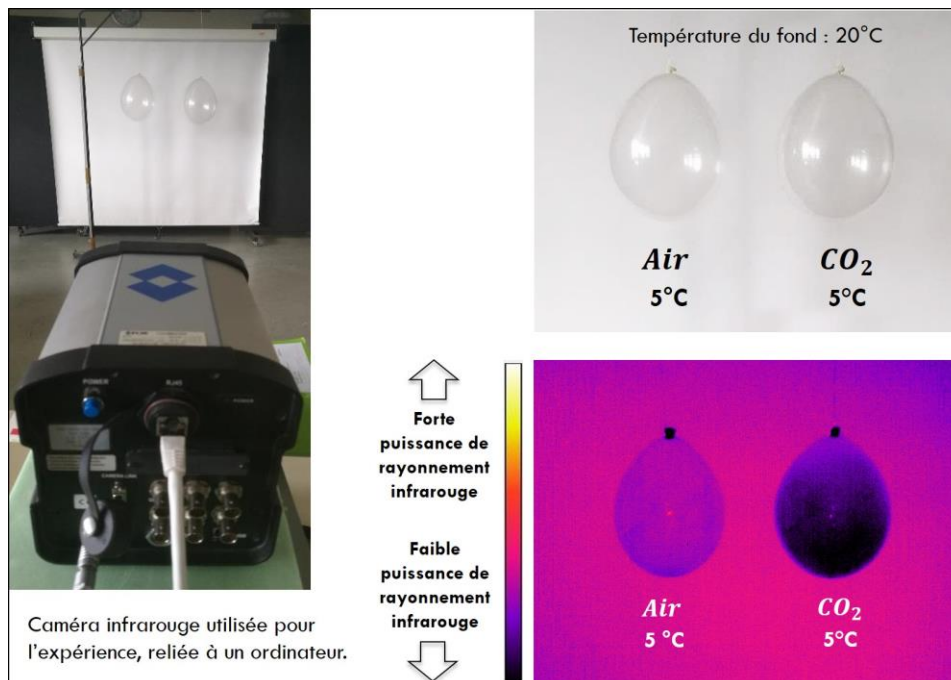


Figure n°8 : Ballons d'air et de  $CO_2$  froids observés avec une caméra infrarouge

La comparaison avec le ballon d'air à la même température permet de dissocier l'influence du  $CO_2$  de celle de la membrane du ballon, qui à la fois peut réfléchir et absorber une part

du rayonnement infrarouge. La seconde expérience consiste à observer des ballons plus chauds que la température ambiante (figure n°9).

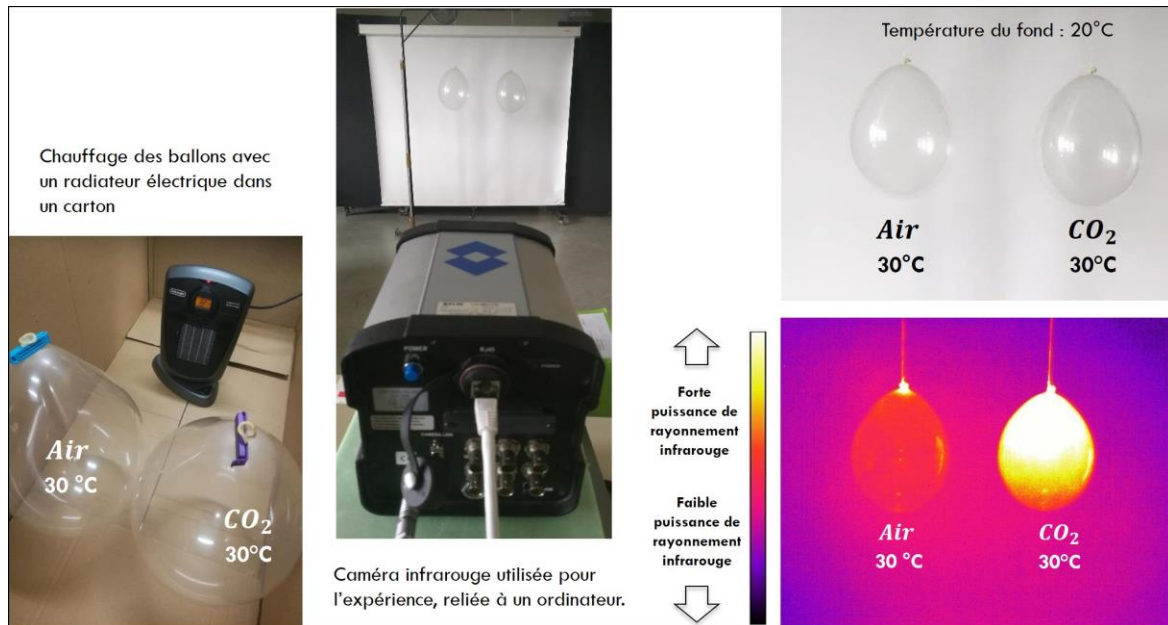


Figure n°9 : Ballons d'air et de CO<sub>2</sub> chauds observés avec une caméra infrarouge

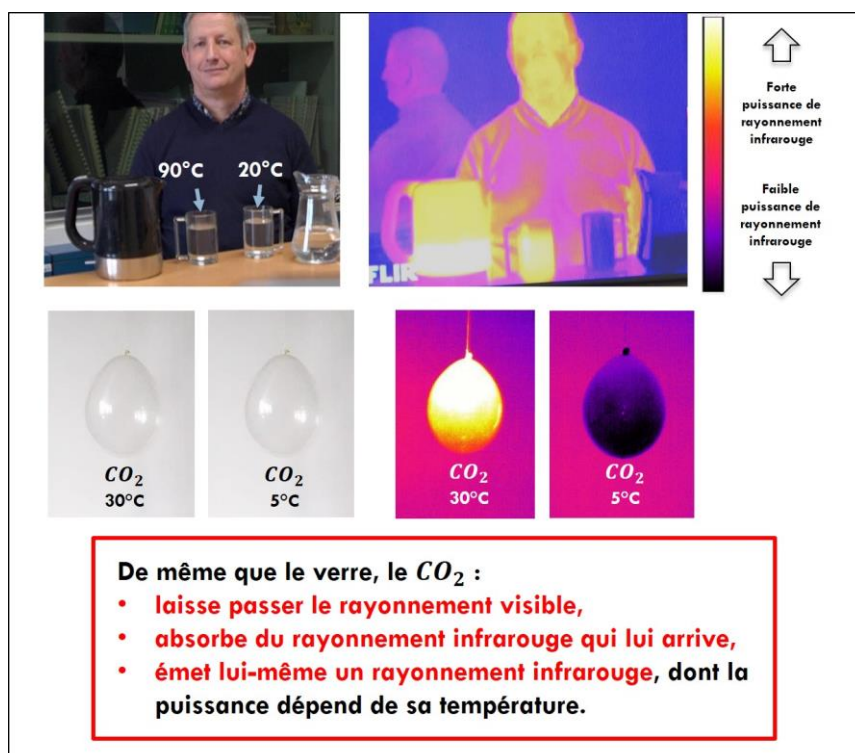


Figure n°10 : Comparaison entre les verres d'eau et ballons de CO<sub>2</sub> à différentes températures



La comparaison complète peut alors être faite avec le cas des verres d'eau chaud et froid (figure n°10). L'extrapolation au système Terre-atmosphère peut alors être questionnée (figure n°11) et établie (figure n°12)

La surface terrestre et l'atmosphère - en tant que mélange de gaz - émettent du rayonnement infrarouge, dépendant de leur température.

Ils émettent un rayonnement dans toutes les directions, mais nous ne représentons ici que la partie qui sort du système Terre + atmosphère.

On représentera la puissance totale du rayonnement infrarouge sortant par une seule flèche représentant la somme de toutes les contributions :

**Question 4 : Comment évolue cette puissance de rayonnement infrarouge lorsque du CO<sub>2</sub> est ajouté dans l'atmosphère ?**

Figure n°11 : Deux représentations du rayonnement infrarouge émis par le système Terre-atmosphère

↑  
Forte puissance de rayonnement infrarouge

↓  
Faible puissance de rayonnement infrarouge

Toile de fond, 20°C

Toile de fond, 20°C

**Si on interpose du CO<sub>2</sub> plus froid que le fond, alors la puissance du rayonnement infrarouge sortante est plus faible.**

L'atmosphère étant en moyenne plus froide que la surface terrestre, lorsque du CO<sub>2</sub> est ajouté, il va être globalement plus froid que la surface.

Ajouter une certaine quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à un instant donné est donc analogue à placer un ballon de CO<sub>2</sub> plus froid que le fond devant la caméra infrarouge.

**B : Si on ajoute à un instant donné une certaine quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, alors la puissance du rayonnement infrarouge sortant vers l'espace est plus faible.**

Figure n°12 : Extrapolation de la conséquence d'un ajout de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère sur le rayonnement infrarouge sortant vers l'Espace

## Bilan de rayonnements et évolution de la température

Le dernier élément nécessaire pour relier CO<sub>2</sub> et température est la notion de bilan de rayonnements. L'exemple choisi est celui d'une plaque de tôle au soleil (figure n°13).

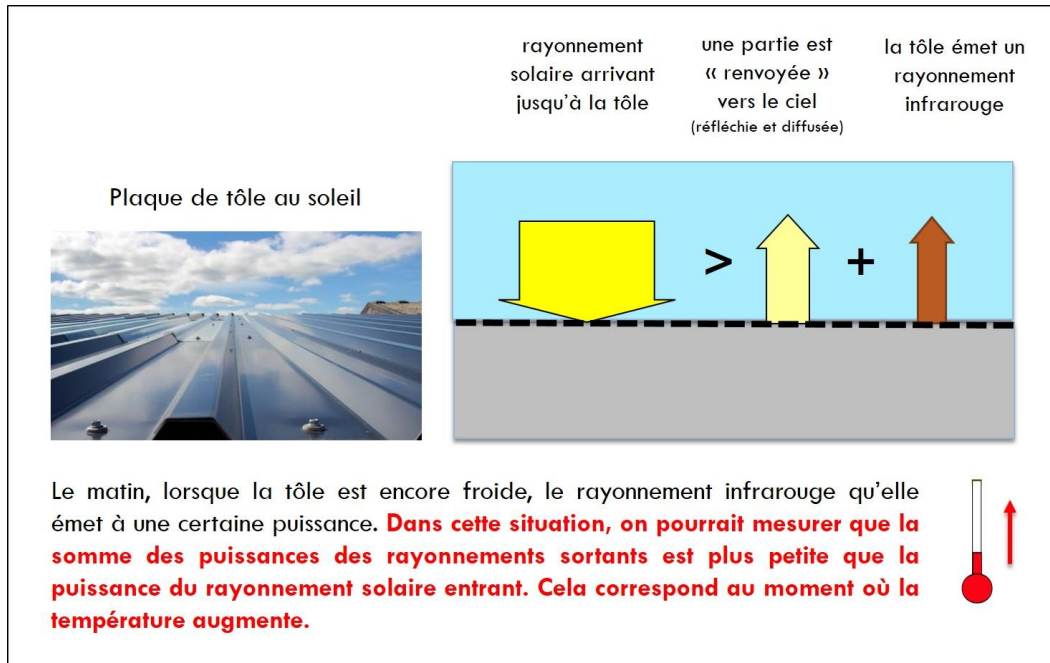


Figure n°13 : Bilan des rayonnements pour une plaque de tôle au Soleil

Cet exemple permet de relier la comparaison des puissances de rayonnement entrant et sortant à l'évolution de la température (figure n°14).

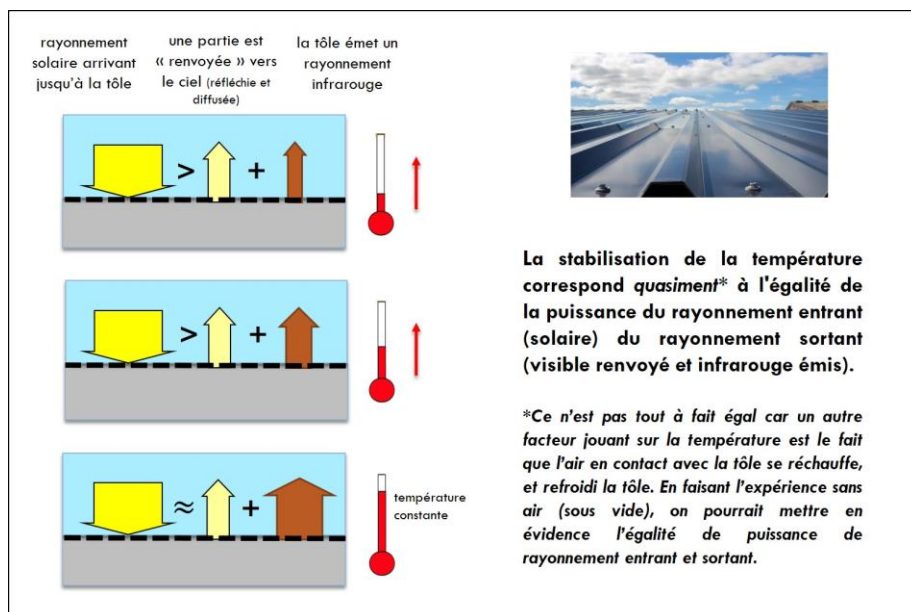


Figure n°14 : Bilan des rayonnements et évolution de la température, dans l'air

La prise en compte de l'influence de l'air sur la température de la tôle mène à imaginer le cas d'une plaque de métal dans une enceinte sous vide (figure n°15). Cette expérience va correspondre à la situation du système Terre-atmosphère, dans le vide de l'Espace.

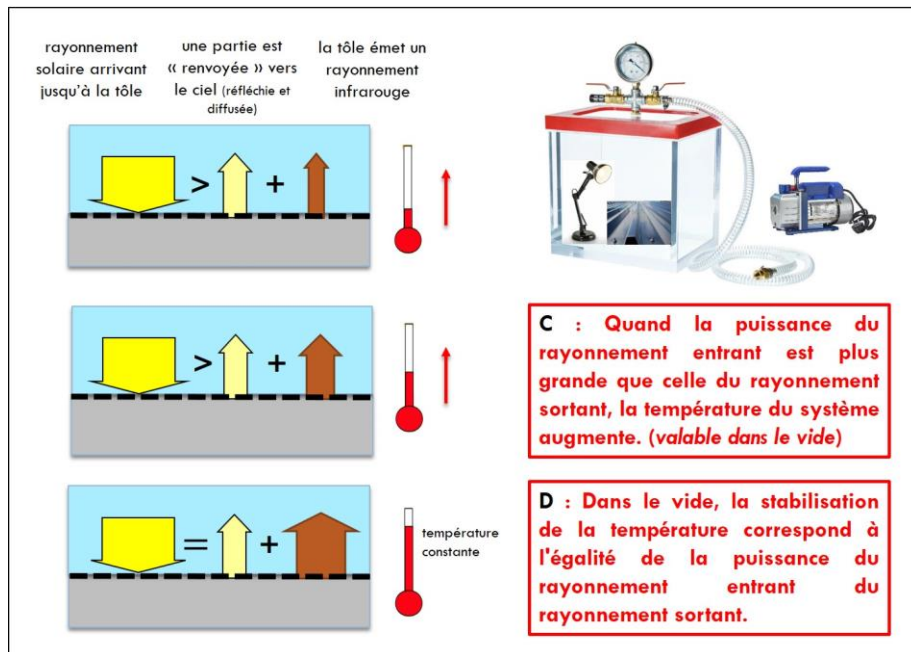


Figure n°15 : Bilan des rayonnements et évolution de la température, dans le vide

### Bilan des rayonnements du système Terre-atmosphère

La dernière étape du cheminement conceptuel proposé consiste à mettre en relation les conclusions des figures précédentes (A, B, C, D, figures n°4, 12 et 15), dans le cas du système Terre-atmosphère (figure 16).



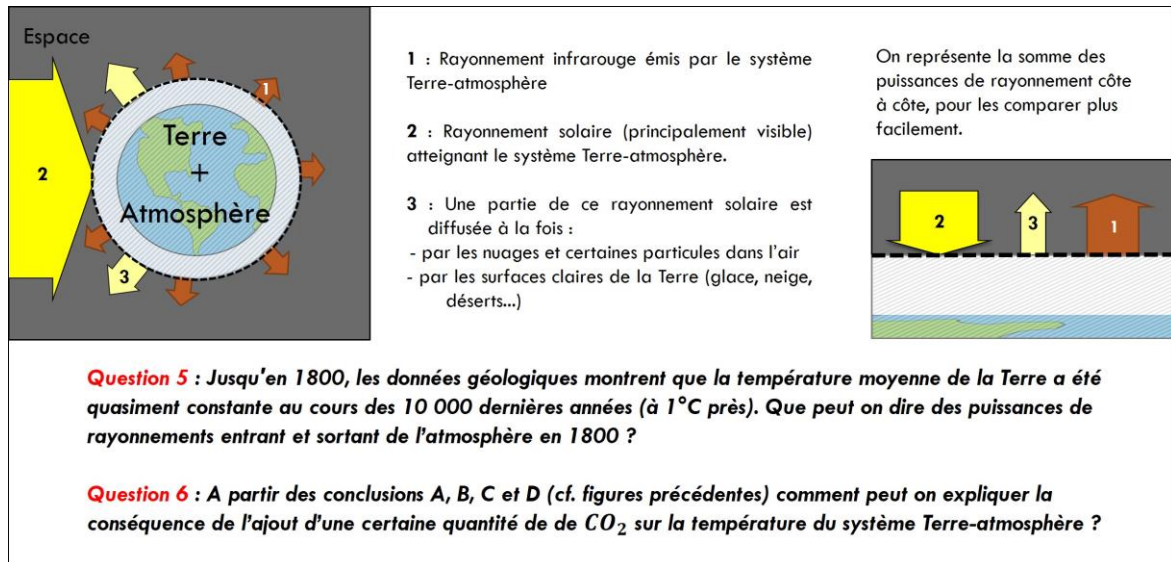


Figure n°16 : Bilan des rayonnements du système Terre-atmosphère

Ici, un choix didactique central consiste à ne pas représenter les différents rayonnements émis par la surface terrestre et l'atmosphère, pour se concentrer uniquement sur l'interface entre le système Terre-atmosphère et l'Espace. La raison de ce choix est qu'une représentation du bilan des rayonnements impliquant la surface terrestre et l'atmosphère (figure n°17) ne permet pas d'aller au bout de raisonnement suite à l'ajout de  $CO_2$ .

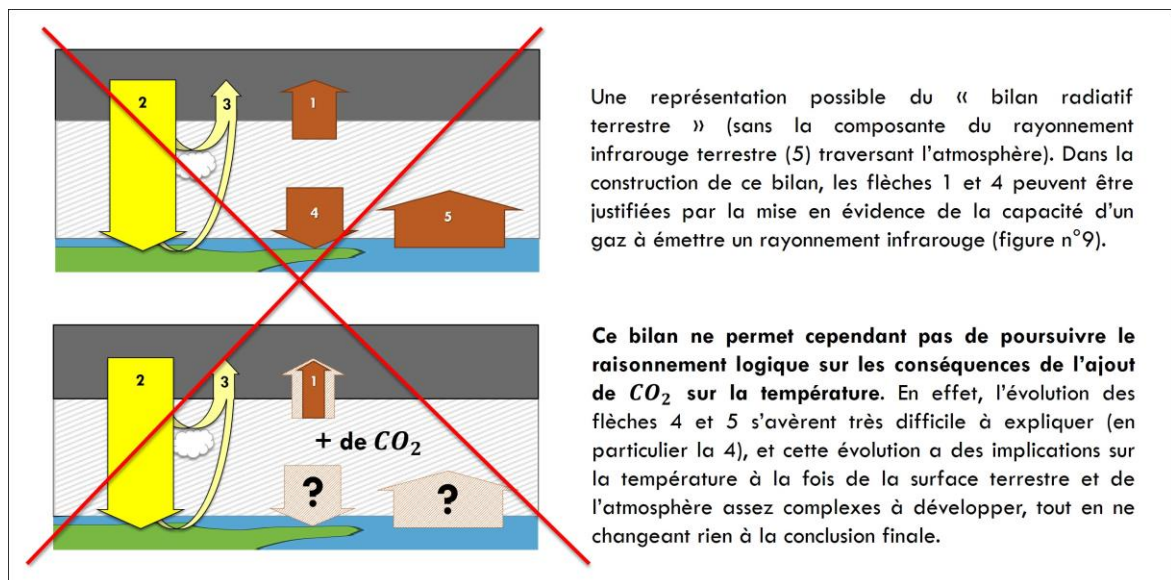


Figure n°17 : Bilan radiatif prenant en compte les interfaces Terre-Atmosphère et Atmosphère-Espace (non utilisé dans la proposition présentée ici)

En effet, ce bilan ferait figurer notamment le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère vers la Terre (4 dans la figure n°17). Or celui-ci est également affecté par l'ajout de  $CO_2$ ,

d'une manière contre-intuitive et difficile à expliquer pour un public non spécialiste. Ce niveau de détail n'est par ailleurs pas nécessaire pour arriver à la conclusion recherchée, pour laquelle un raisonnement sur le schéma de la figure n°16 suffit, comme par exemple celui de la figure n°18, répondant aux questions 5 et 6 de la figure n°16.

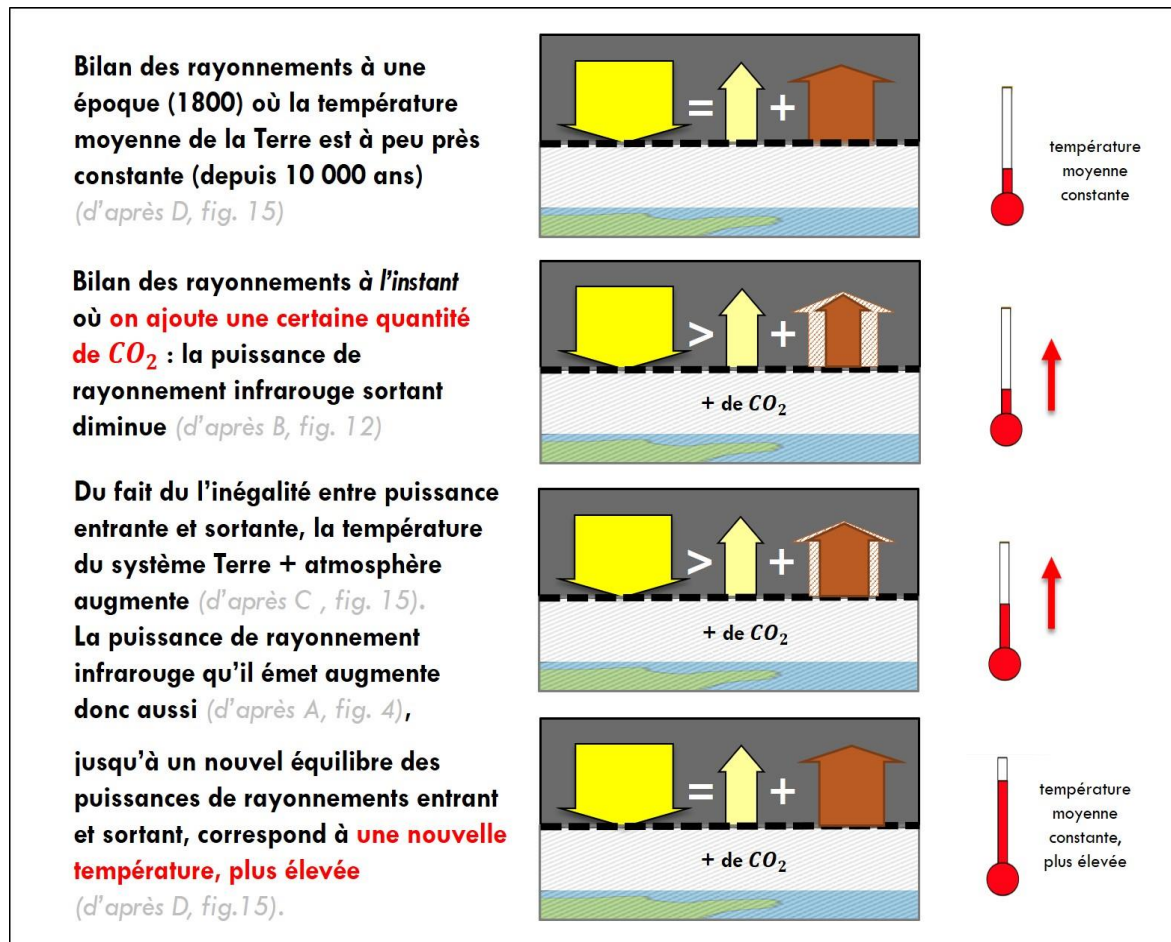


Figure n°18 : Conséquence de l'ajout de  $CO_2$  sur l'évolution de la température du système Terre-atmosphère

Dans le cadre de cette représentation, il est également possible de considérer les effets amplificateurs du réchauffement. Ceux-ci permettent de mettre en évidence la nécessité d'une description locale du système et la quantification des différents phénomènes en jeu (figure n°19).

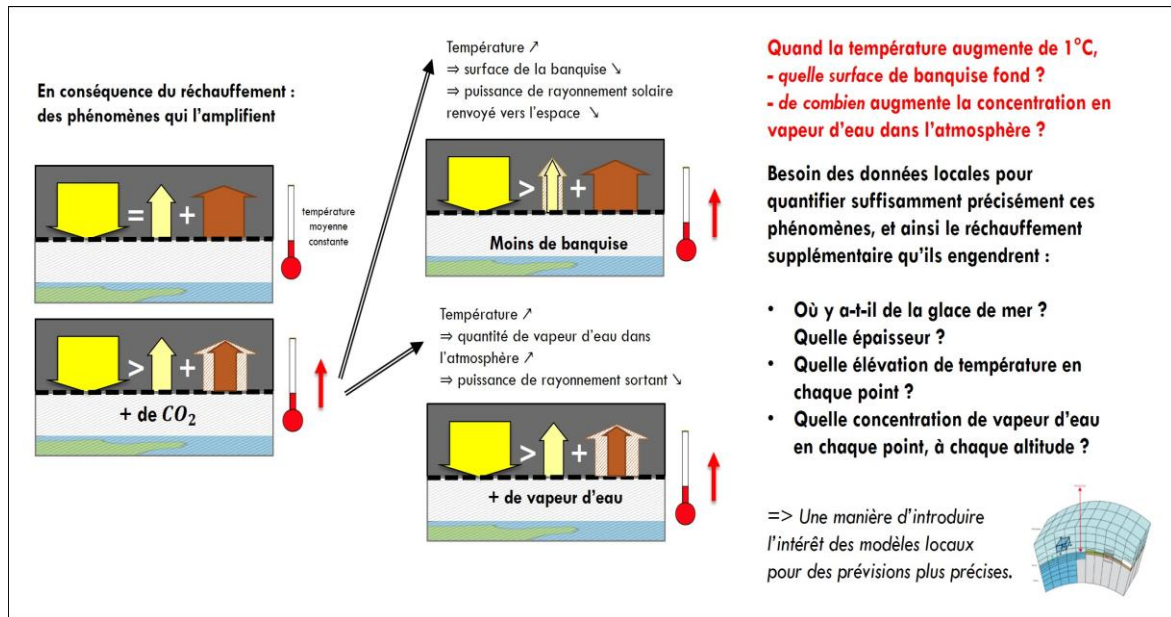


Figure n°19 : Deux phénomènes d'amplification du réchauffement

## Conclusion

Ce travail montre qu'il est possible de construire une approche qualitative rigoureuse pour relier émissions de  $\text{CO}_2$  et réchauffement global, sans avoir besoin de faire appel à un grand nombre de notions abstraites traditionnellement utilisées. Cette proposition permet ainsi de diminuer considérablement le rôle de l'argument d'autorité, présent implicitement dans de nombreuses approches vulgarisées du sujet, dès qu'elles s'appuient sur des concepts inaccessibles à un public non spécialiste ou débutant en physique (énergie, longueur d'onde, spectre d'absorption...).

Les choix didactiques essentiels du cheminement conceptuel proposé sont les suivants :

- l'utilisation de la notion de puissance de rayonnement (généralisée à partir de la luminosité) et d'expériences de reflet infrarouge (pour comprendre qu'une caméra infrarouge ne mesure pas une température),
- l'interprétation d'images infrarouges de ballons d'air et de  $\text{CO}_2$  à différentes températures, permettant de visualiser la capacité d'émission et d'absorption du gaz,
- le raisonnement, pour le cas du système Terre, sur un bilan radiatif centré sur l'interface avec l'Espace (sans considération de l'interface sol - atmosphère).

Ce raisonnement apporte un premier argument qualitatif pour comprendre l'influence des émissions de CO<sub>2</sub> sur la température, en amont de la modélisation permettant les simulations du climat futur, prenant en compte l'ensemble des phénomènes. La compréhension de comment sont construits ces modèles de climat est essentielle pour justifier les projections quantitatives de réchauffement à partir de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. La conception d'une approche didactique de la construction d'un modèle climatique est actuellement en cours, avec la même intention d'accessibilité et de minimisation de l'argument d'autorité.

Une séquence d'enseignement basée sur les choix didactiques présentée de cet article a été expérimentée avec un petit groupe d'élève de seconde générale, en deux heures. L'analyse des données vise à évaluer l'accessibilité de certaines étapes de raisonnement, notamment à partir de l'analyse des réponses des élèves (individuellement puis en binôme) aux six questions présentées dans les figures précédentes (n°2, 3, 5, 11, 16), ainsi que l'ensemble des interactions verbales.

Une difficulté systématique dans l'évaluation des choix didactiques est que les retours d'expérimentation avec les élèves impliquent nécessairement à la fois les choix structurant le cheminement conceptuel et les options pédagogiques pour le mettre en œuvre, à travers les situations d'apprentissage proposées. Il est ainsi délicat de distinguer ce qui peut être attribué à l'un ou l'autre de ces deux types de facteurs, pouvant parfois se coupler. Sur la base de ce constat, nous prévoyons d'expérimenter plusieurs mises en œuvre possibles à partir du même cheminement conceptuel, afin de permettre une analyse croisée des résultats. Les premiers retours d'élèves seconde pourront ainsi nourrir la conception de différentes séquences d'enseignement, de manière collaborative avec des enseignants du secondaire, à visée d'expérimentation avec les élèves. Afin de nourrir également ce projet de recherche collaborative, deux autres expérimentations ont eu lieu avec des enseignant.es, stagiaires (N=8) et confirmé.es (N=15), dans le but de recueillir leur point de vue les choix didactiques proposés. Un dossier leur a été fourni avec l'ensemble des figures de ce chapitre, sur lesquelles ils ont réagi par écrit en précisant ce qu'ils modifieraient, enlèveraient ou ajouteraient à chaque document. Il leur est proposé ensuite d'échanger en binôme à partir de leurs commentaires et questions sur le dossier, avant une mise en commun et réponses aux questions par les auteurs. L'objectif de l'analyse des commentaires et des enregistrements

audio est de prendre en compte ces retours à la fois pour les choix didactiques en eux même et pour la manière de les présenter et de les justifier dans un document de formation.

## Références bibliographiques

- Amiel, A., et Aubry, C. (2023). *Étude de quelques conditions d'enseignement et d'étude des transferts d'énergie par rayonnement au cycle 4* [Mémoire de master 2]. Université Toulouse Jean-Jaurès.
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237-276.
- Bächtold, M. (2018). *Epistémologie et didactique de la physique. Des interrelations multiples et fécondes*. [Note de synthèse en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches]. Université de Montpellier
- Besson, U., Borghi, L., De Ambrosis, A., et Mascheretti, P. (2010). A Three-Dimensional Approach and Open Source Structure for the Design and Experimentation of Teaching-Learning Sequences : The case of friction. *International Journal of Science Education*, 32(10), 1289-1313.
- Besson, U., De Ambrosis, A., et 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., et Panahi, M. (2023). *Les nouveaux fronts du dénielisme et du climato-scepticisme*. <https://hal.science/hal-03986798>
- Cochepin, 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 ?* [Mémoire de Master 2] Université Toulouse Jean-Jaurès.
- Colin, P., et Tran Tat, N. (2011). Difficile compréhension de l'effet de serre : Comment concevoir un parcours d'enseignement-apprentissage au lycée ? *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 4, Article 4. <https://doi.org/10.4000/rdst.504>
- 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., et Treiner, J. (2011). L'effet de serre atmosphérique : Plus subtil qu'on ne le croit ! *La Météorologie*, 8(72), 31. <https://doi.org/10.4267/2042/39839>
- Gautier, C., Deutsch, K., et 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., et Lesmono, A. D. (2021). Students' thought pattern concerning the greenhouse effect. *Momentum: Physics Education Journal*, 21-28.
- 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<sup>re</sup> éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengiesser, H., et 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)*.
- Komorek, M., et Duit, R. (2004). The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. *International Journal of Science Education*, 26(5), 619-633.  
<https://doi.org/10.1080/09500690310001614717>
- Oreskes, N., et 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.
- Plé, E. (1997). Transformation de la matière à l'école élémentaire : Des dispositifs flexibles pour franchir les obstacles. *Aster*, 24(24, p. 231). <https://doi.org/10.4267/2042/8674>
- Romond, N., et 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 ?* [Mémoire de Master 2]. Université Toulouse Jean-Jaurès.
- Shepardson, D. P., Choi, S., Niyogi, D., et Charusombat, U. (2011). Seventh grade students' mental models of the greenhouse effect. *Environmental Education Research*, 17(1), 1-17.
- Thollot, P., et Dequincey, O. (2021). *Rayonnement, opacité et effet de serre*. Planet Terre. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/rayonnement-effet-de-serre.xml#experiences-faussees>
- Toffaletti, S., Di Mauro, M., Rosi, T., Malgieri, M., et 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>
- Wagoner, P., Liu, C., et Tobin, R. (2010). Climate change in a shoebox : Right result, wrong physics. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, 78, 536-540.  
<https://doi.org/10.1119/1.3322738>