HAL
open science

L'eau sur Terre : un réfrigérant qui gère les énergies solaire et anthropique et combat le réchauffement climatique

Michel Vert

To cite this version:

Michel Vert. L'eau sur Terre : un réfrigérant qui gère les énergies solaire et anthropique et combat le réchauffement climatique. 2020. hal-02865896

HAL Id: hal-02865896

https://hal.science/hal-02865896

Preprint submitted on 12 Jun 2020

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.

L'eau sur Terre : un réfrigérant qui gère les énergies solaire et anthropique et combat le réchauffement climatique

Michel Vert

Institut des Biomolécules Max Mousseron, UMR CNRS 5247, Département des Biopolymères Artificiels, Université de Montpellier-CNRS-ENSCM, Faculté de Pharmacie, 15 Avenue Charles Flahault, BP 14491, 34093 Montpellier Cedex 5, France

*courriel : michel.vert@umontpellier.fr

Résumé : Le rôle attribué au dioxyde de carbone anthropique (CO_2) dans le réchauffement climatique et le changement climatique prête à confusion. Les experts des effets de serre prédisent que les changements du niveau des océans et de la température atmosphérique, qui sont encore très faibles actuellement, augmenteront considérablement dans un avenir lointain. En revanche, la fonte des glaces est d'ores et déjà dramatique. Les gaz à effet de serre, en particulier CO_2, sont dits responsables mais n'expliquent pas la dominance de la fonte des glaces. Néanmoins, la réduction des sources fossiles de CO_2 est universellement recommandée. Une corrélation entre la fonte des glaces et les dégagements de chaleur anthropiques a été récemment proposée sur la base de principes fondamentaux chimiques et physiques bien identifiés. Pour approfondir cette approche originale, la présente contribution compare la gestion de la chaleur solaire absorbée sur Terre au cycle thermodynamique utilisé pour contrôler la température dans les réfrigérateurs. La discussion montre que la chaleur solaire absorbée et la chaleur anthropique sont gérées de la même manière en utilisant l'eau comme réfrigérant. Il est également montré que la combustion d'hydrocarbures libère une énorme quantité d'eau nouvelle. Cependant, cette eau supplémentaire reste mineure par rapport à l'eau issue de la fonte des glaces cumulée année après année. La dernière partie propose d'utiliser l'évaluation du cycle thermique de l'origine à l'exploitation comme moyen de comparer les différentes sources d'énergie dans la recherche de moyens pour minimiser les rejets de chaleur anthropique. L'eau pourrait être une source d'énergie renouvelable si l'électricité requise pour produire de l'hydrogène par électrolyse peut être fournie à grande échelle avec un cycle thermique et un cycle de vie meilleurs que ceux des sources traditionnelles.

Mots-clés : Changements climatiques, Sources d'énergie fossiles, Rejet de chaleur anthropique, Effet de serre, Évaluation du cycle thermique, Équilibres entre phases de l'eau, Hydrogene

1. Introduction

Jusqu'à présent, les prévisions de changements climatiques sont fondées sur des hypothèses et des calculs de données pour le futur lointain. Il existe un large consensus pour attribuer le contrôle de la température sur Terre à la capture et à la réémission équilibrées de l'énergie solaire par les échanges d'entrée et de sortie des radiations électromagnétiques et par l'effet de serre dérivé dû aux gaz atmosphériques. Le dioxyde de carbone anthropique est considéré comme jouant le rôle de thermostat dans le maintien d'une température équilibrée sur Terre. Il diffère du thermostat d'une maison en ce que le dioxyde de carbone lui-même est un puissant gaz à effet de serre qui réchauffe les éléments de l'environnement. L'équilibre global signifie que la Terre ne retient pas l'énergie solaire radiative puisque l'entrée et la sortie sont dites équivalentes [1-2]. Cependant, l'équilibre n'est plus revendiqué. Une petite partie de l'énergie solaire est maintenant proposée comme étant absorbée par l'environnement où elle provoque un réchauffement qui doit être équilibré au niveau global, sinon la Terre se réchaufferait de

plus en plus [3-5]. Si une partie de l'énergie solaire est bien retenue, elle doit venir s'ajouter à l'excès d'effet de serre du CO_2. Récemment, la NASA a introduit le cycle de l'eau comme moyen de contrôle du climat mondial par l'intermédiaire du phénomène d'évaporation-précipitation et a proposé un programme destiné à surveiller l'évolution de la glace polaire [6]. La fonte spectaculaire des glaces est aujourd'hui indéniablement observée au niveau des calottes glaciaires, des glaciers et du permafrost [7]. Cependant, la fonte des glaces est généralement considérée comme une source d'élévation du niveau des océans, mais pas spécifiquement comme un régulateur du climat.

Dans un article précédent [8], nous avons suggéré que les concepts et les méthodologies de la chimie et de la physique peuvent être exploités pour spéculer sur l'évolution du climat mondial en l'absence de possibilité d'expérimentation, la planète étant trop grande et trop complexe. Le Dégagement de Chaleur Anthropique (DCA), (anthropogenic heat release (AHR) en anglais) y est introduit comme alternative ou comme complément à la génération de chaleur par effet de serre du surplus anthropique de CO_2. Cette approche originale a conduit à plusieurs conclusions majeures qui peuvent être confirmées ou rejetées en une décennie au plus. Tout d'abord, les anomalies climatiques qui alertent une majorité de scientifiques, de politiciens, de médias et, en fin de compte, de citoyens, peuvent être reliées à l'apport de chaleur anthropique provenant de la production et de l'exploitation des différentes sources d'énergie. Deuxièmement, la chaleur anthropique libérée dans l'environnement peut être raisonnablement corrélée à la fonte des glaces mondiales en croissance rapide depuis l'an 2000, ce qui pouvait être négligé auparavant lorsque le DCA était moindre qu'aujourd'hui. Troisièmement, la lutte contre le CO_2 anthropique en tant que source d'effet de serre pourrait ne pas être la bonne solution si les sources d'énergie de remplacement génèrent des quantités similaires de rejets thermiques anthropiques. Enfin et surtout, la production continue de chaleur anthropique devrait entraîner la fusion des glaces qui continuera néanmoins à absorber le DCA jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de glace. La compensation du DCA sera alors assurée par le déplacement vers la formation de nuages des équilibres physiques qui régissent les transitions entre les phases eau liquide ↔ vapeur ↔ eau liquide. L'analyse a conduit à la conclusion que le contrôle de la croissance démographique et la recherche de solutions pour accéder à des sources d'énergie suffisantes avec de meilleurs rendements pour le travail et moindres pour la production de chaleur résiduelle peuvent être la bonne politique. Le pétrole fossile resterait essentiel pour des applications spécifiques comme la chimie et la production de matières dérivées, à moins que la chimie verte ne fournisse des accès alternatifs.

La présente contribution vise à renforcer les conclusions ci-dessus en montrant que les radiations solaires qui chauffent l'environnement mondial depuis des milliards d'années et la chaleur nouvellement apparue comme sous-produit des énergies consommées par les humains sont traitées de manière similaire pour maintenir la basse atmosphère terrestre sous contrôle thermique malgré la différence d'histoire et d'ampleur. En effet, la Terre peut être considérée schématiquement comme un immense globe dont la surface solide, les eaux de surface et l'atmosphère qui le constituent chauffent en raison de l'excitation des molécules par interaction avec l'énergie radiative solaire absorbée. Sans processus de compensation pour maintenir la température à un niveau compatible, l'échauffement continue n'aurait pas permis

l’apparition de la vie sur Terre. Si l’effet de serre peut expliquer une température terrestre supérieure de 18°C à celle due au Soleil seul, il ne permet pas d’expliquer la compensation d’un cumul de chaleur solaire au niveau de l’atmosphère depuis que celle-ci existe, ne serait-ce que pour éviter l’évaporation de l’eau. Pour cela, il a été nécessaire de faire intervenir le rejet d’ondes électromagnétiques infrarouge vers l’espace. Il y a quelques milliers d’années, les humains ont commencé à utiliser la biomasse comme source d'énergie terrestre libérant ainsi de la chaleur supplémentaire mais en fait négligeable par rapport à l’apport de chaleur solaire. Il y a environ 150 ans, il y a eu une progression quand les humains ont commencé à exploiter le pétrole, puis à produire de l'électricité et à extraire du gaz naturel, tout cela pour la production des biens, du travail et de la chaleur dont ils avaient besoin. L'effet secondaire a été l'apparition de chaleur anthropique nettement plus importante. Cette énergie supplémentaire aussi a dû être compensée sinon la température de la planète aurait augmentée par cumul de chaleur jour après jour. En fait, ce n’est pas le cas. La Terre est comme un énorme corps de mammifère qui chauffe intérieurement et doit être refroidi pour maintenir sa température sous contrôle. Dans ce qui suit, nous allons comparer l'eau terrestre au réfrigérant qui permet de contrôler la température dans les réfrigérateurs.

2. Régulation de la température à l’intérieur d’un réfrigérateur

D'un point de vue thermodynamique, le fonctionnement d’un réfrigérateur est fondé sur la règle physique qui indique que lorsque deux substances sont en contact, la plus chaude cède de la chaleur à la plus froide jusqu’à équilibre. Dans un réfrigérateur, le transfert se fait par contact avec un fluide volatil, le réfrigérant, qui absorbe la chaleur localement par évaporation, puis la transfère dans un autre endroit où elle est libérée par condensation. Dans une certaine mesure, c'est ainsi que la température des humains et des mammifères est fixée. Une quantité d'eau liquide tiède, la sueur, est expulsée à travers la peau par la transpiration. La sueur refroidit le corps par évaporation. La vapeur formée diffuse alors dans l'atmosphère. Le transfert de chaleur se fait spontanément du chaud vers le froid. En revanche, les échanges de chaleur d'un milieu froid vers un milieu chaud ne peuvent pas être spontanés. Une certaine quantité d'énergie doit être fournie. C'est le rôle du compresseur qui est présent dans les réfrigérateurs. La chaleur interne qui est extraite de l’espace clos est finalement rejetée à l'extérieur dans l'atmosphère. Pour l'homme, il n'y a pas de compresseur et la pression dans les tissus est la seule force motrice qui évacue la sueur dont l'évaporation permet le maintien de la température du corps constante. Le schéma d'un réfrigérateur avec les étapes d'évaporation-condensation du réfrigérant est présenté Figure 1.

Étape 1 : Évaporation

De 1 à 2, le réfrigérant entre dans l'évaporateur interne sous forme liquide. En passant par ce dispositif multitubulaire, le liquide absorbe une partie de la chaleur de l'espace fermé et de ce qui s'y trouve. Le réfrigérant sort de l'évaporateur sous forme de gaz chaud alors que la température à l'intérieur de l'espace fermé a légèrement diminué.

Étape 2 : Compression

Du point 2 au point 3, le gaz chaud est comprimé et surchauffé par le compresseur avant d'être transférer vers le condenseur multitubulaire extérieur.

Étape 3 : Condensation

Du point 3 au point 4, le gaz surchauffé entre dans le condenseur multitubulaire extérieur en contact avec l'air froid environnant. La chaleur véhiculée par le gaz est transférée vers l'atmosphère tandis que le réfrigérant redevient liquide. La chaleur absorbée par le réfrigérant dans le réfrigérateur se trouve ainsi évacuée à l'extérieur.

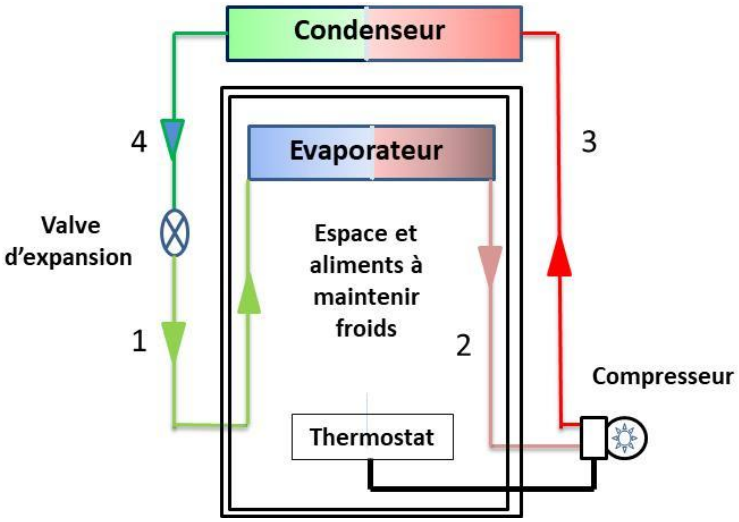

Figure 1 - Représentation schématique du cycle évaporation-condensation d'un réfrigérateur qui permet de maintenir l'intérieur et son contenu à température constante via le thermostat.

Étape 4 : Expansion du réfrigérant et fin du cycle

Du point 4 au point 1, le réfrigérant liquide passe par le dispositif d'expansion qui réduit sa pression et contrôle le débit dans l'évaporateur. Le cycle est répété jusqu'à ce que la température dans le réfrigérateur atteigne la température fixée par le thermostat.

3. Application à la gestion de l'énergie solaire thermique résiduelle sur Terre

Si la Terre est un système ouvert pour les radiations électromagnétiques, elle est un système fermé pour les matières solides, liquides et gazeuses qui la constituent. Ainsi, la surface du sol, l'eau (océans, mers, étangs et rivières), l'atmosphère liée au globe par la gravité, et les glaces (calottes polaires, glaciers et glaces flottantes) chauffés par le Soleil pendant des milliards d'années sans accumulation de chaleur et sans élévation de température excessive sont comparables aux marchandises à l'intérieur du réfrigérateur où la température est fixée.

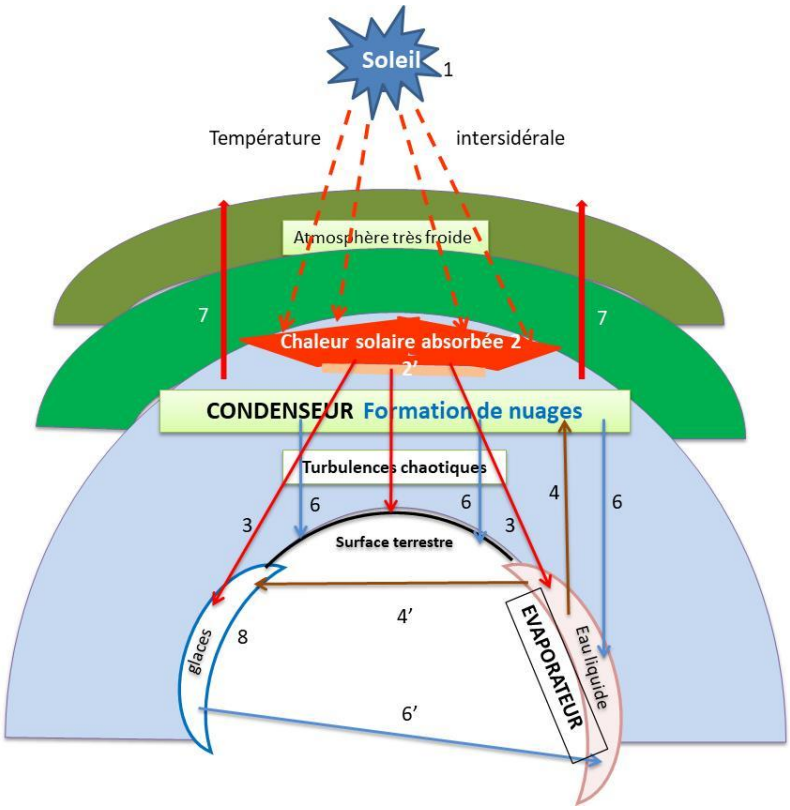

Figure 2 : Représentation schématique de la machinerie qui gère l'énergie thermique solaire absorbée par la Terre et celle générée par effet de serre par l'intermédiaire des équilibres de transition de phase entre les différentes forme physique de l'eau (glace, eau liquide et eau vapeur).

Le soleil (**1**) chauffe tout l'environnement comme chacun peut le ressentir lorsque le soleil brille (**2** et **3**). L'énergie provenant de l'effet de serre (**2'**) vient en complément. L'apport de chaleur géothermique à l'environnement est généralement considéré comme très faible. La température de la surface du sol, celle de l'atmosphère et celle de l'océan ont tendance à augmenter mais la température moyenne est en partie équilibrée par évaporation de l'eau vers la basse atmosphère (**4**). L'autre partie (**4'**) est absorbée par la fonte des calottes glaciaires qui refroidit les océans (**6'**) et celle de glaciers qui refroidit l'atmosphère. L'eau formée par le processus d'évaporation (évaporateur) rejoint l'atmosphère sous forme de vapeur tiède. L'air humide tiède étant moins dense que l'air sec, il s'élève jusqu'à une zone suffisamment froide pour condenser la vapeur sous forme de gouttelettes dispersées qui forment des nuages ce qui libère la chaleur véhiculée. Une fois les nuages formés, les pluies (**6**) renvoient l'eau à la surface et ferment le cycle. Ce cycle n'est pas uniforme. En réalité, le Soleil ne chauffe pas en permanence. L'inclinaison de la Terre et sa rotation entraînent un réchauffement et un refroidissement cycliques selon le jour et la nuit, l'été et l'hiver et les hémisphères nord et sud. Il s'y ajoute les cycles solaires. Le processus de fonte et de reformation des glaces est donc cyclique avec des hauts et des bas comme dans un réfrigérateur. Toutefois, il existe des différences importantes. Le compresseur présent Figure 1 pour accélérer les échanges thermiques des zones chaudes vers les zones froides est remplacé par les turbulences chaotiques de l'atmosphère (vents, tornades, ouragans) et les courants chauds et froids dans

les océans. Le condenseur est remplacé par l'atmosphère froide où la vapeur forme des nuages et libère la chaleur transportée. Le réfrigérant présent dans le circuit de refroidissement du réfrigérateur est remplacé par l'eau, et en fin de cycle, la chaleur libérée dans l'atmosphère est éliminée par rayonnement vers l'espace (**7**). Il faut noter que dans le cas du réfrigérateur, si la glace qui se forme sur l'évaporateur disparait suite à une panne de courant électrique par exemple, la température intérieure va commencer à augmenter pour atteindre la température extérieure, sauf si l'électricité revient pour relancer le cycle qui refroidit l'intérieur et y reforme la glace.

4. L'évolution suite à l'apparition de la chaleur anthropique

Le processus de contrôle thermique décrit dans la section précédente a fonctionné pendant des milliards d'années en gérant la chaleur solaire par évaporation-condensation de l'eau, par la fonte cyclique de la glace, et par le rayonnement électromagnétique vers l'espace. L'exploitation de l'énergie dérivée du pétrole fossile a changé cet équilibre en apportant une chaleur supplémentaire. Puis, le gaz naturel et, plus récemment, l'électricité ont amplifié cet apport dont le cumul au fil des ans a dû être compensé par intégration dans le bilan global représenté schématiquement Figure 3.

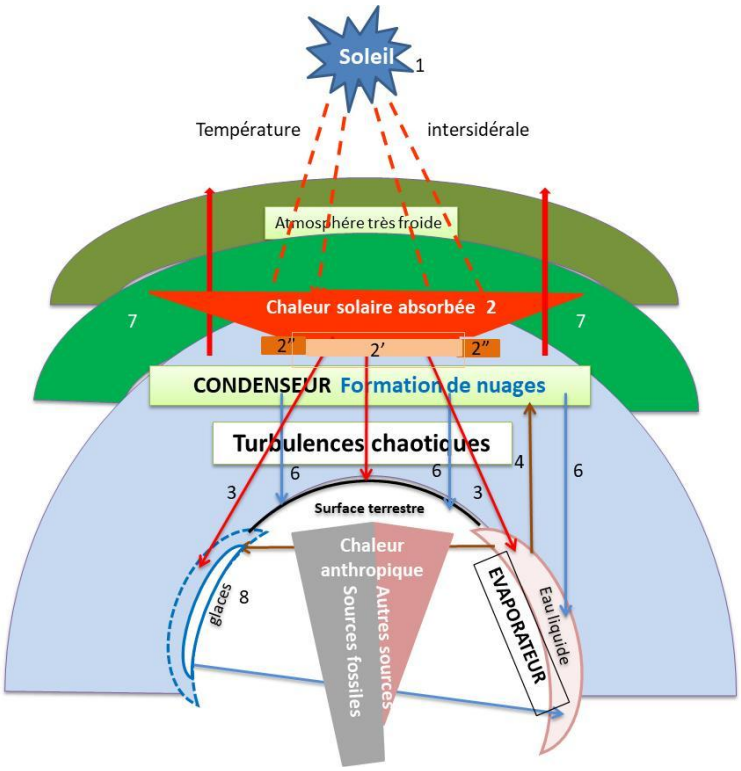

Figure 3 : Représentation schématique de la gestion de la quantité croissante de chaleur anthropique par action sur les équilibres fusion-évaporation-condensation-évaporation de l'eau et par la fonte des glaces.

La comparaison entre les Figures 2 et 3 ne révèle pas de grand changement par rapport à l'ensemble de la machinerie thermique. La part de l'énergie solaire absorbée continue de chauffer la Terre de manière dominante (**2**), avec la partie de l'effet de serre qui en résulte (**2'**)

et un complément relativement mineur attribué aux gaz à effet de serre anthropique (**2"**). En revanche, la chaleur anthropique libérée par la production et l'exploitation des diverses sources d'énergie est un apport de chaleur supplémentaire devenu de moins en moins négligeable car croissant d'année en année [8]. En compensation, davantage d'eau de surface s'évapore (**4**) et davantage de glace fond (**8**). Etant en quantité plus importante, la vapeur produite par évaporation forme davantage de nuages dont l'eau retourne vers la surface sous forme de pluies plus importantes et plus fréquentes (**6**) qu'en absence de chaleur anthropique. Les turbulences chaotiques (ouragan, tornade, pluie, inondation, etc.) qui doivent répartir plus de chaleur de même que la fonte des glaces sont donc également plus importantes. L'activité solaire est toujours modulée par des hauts et des bas cycliques. En revanche, l'apport d'énergie thermique anthropique est quasiment continue jour après jour tout au long de l'année, cela en accélération. Lorsque toutes les glaces et leur effet tampon thermique auront disparu, une chaleur anthropique croissante conduira à une évaporation toujours plus importante qui, après condensation formera des nuages de plus en plus abondants et épais qui bloqueront l'apport de chaleur solaire. Il y a aura alors reformation des glaces comme dans le cas du réfrigérateur. On constate déjà que la fonte des glaces mondiales est en croissance rapide, mais il est encore trop tôt pour affirmer que les turbulences sont réellement accrues.

5. Qu'en est-il du surplus d'eau produite à partir des hydrocarbures fossiles ?

Pour une majorité de scientifiques qui tentent de comprendre et de rendre compte des changements climatiques, la chaleur anthropique générée par les humains et les activités humaines sont négligeables par rapport aux effets des gaz à effet de serre, en particulier ceux liés au surplus de CO_2 anthropique. Parmi les sources d'énergie fossiles, la combustion du charbon principalement composé de carbone génère de la chaleur et des oxydes de carbone chauds mais pas d'eau, du moins directement. En revanche, la combustion de tous les hydrocarbures (pétrole, gaz naturel et biomasse) génère du CO_2 chaud à partir du carbone et de la vapeur d'eau chaude à partir de l'hydrogène dont ils sont formés. Nous avons déjà discuté la contribution de cette vapeur chaude dans le cadre du DCA [8]. Après refroidissement et condensation, l'eau correspondante s'additionne à celle déjà présente. Il s'avère aussi difficile d'en quantifier la quantité que de quantifier les rejets de chaleur. Néanmoins, des données sur la production globale de pétrole et de gaz naturel fossiles depuis qu'ils ont commencé à être utilisés sont disponibles et permettent d'estimer le supplément d'eau produit par la combustion d'hydrocarbures d'origine fossile. Depuis 1870, environ 180 Gt de pétrole et 30 Gtep de gaz naturel ont été extraits [9-10], soit environ 210 Gt d'hydrocarbures. En supposant que les hydrocarbures fossiles, y compris le méthane (CH_4), sont composés d'alcanes dont la formule chimique générale est C_nH_{2n+2} que l'on peut raisonnablement simplifiée en nCH_2, 210 Gt d'équivalents alcanes contiennent environ 180 Gt de carbone et 30 Gt d'hydrogène. A partir de l'équation générale $CH_2 + 3\ O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ + chaleur où 14 g d'hydrocarbure (12 + 2) génèrent 44 g de CO_2 (12 + 32) et 18 g d'eau (16 + 2), on peut déduire que 210 Gt d'hydrocarbures ont produit 270 Gt d'eau supplémentaire qui ont rejoint l'eau déjà présente en 1870. Par rapport à l'eau générée par 3×10^3 Gt de glaces disparues entre 1992 et 2018, la quantité d'eau supplémentaire libérée depuis 1870 par la combustion d'hydrocarbures est faible mais n'est peut-être pas négligeable au regard d'une

contribution éventuelle à l'effet de serre. Cette possibilité n'a pas encore été abordée à notre connaissance. Quoi qu'il en soit, le DCA deviendra de plus en plus problématique si la consommation de pétrole et de gaz naturel continue d'augmenter année après année [11]. La lutte contre les sources de CO_2 est une solution dans le contexte d'un surplus d'effet de serre. Cependant, cette politique semble inadéquate pour ne pas dire absurde par rapport à des changements climatiques liés à l'énergie thermique anthropique. En effet, l'humanité en croissance rapide va avoir besoin de plus en plus d'énergie pour son confort, ses activités et plus généralement l'économie. Essayer de minimiser les conséquences sur le climat tout en maintenant la croissance de la consommation d'énergie peut rapidement apparaître comme tenter de solutionner la quadrature du cercle.

6. Une solution potentielle séduisante

Si le DCA est bien responsable de la fonte globale des glaces, toute solution doit idéalement satisfaire la demande d'énergie avec une production de chaleur anthropique beaucoup moins importante qu'aujourd'hui. C'est essentiel pour ralentir la fonte des glaces et maintenir les turbulences chaotiques comme elles étaient à l'époque où l'énergie solaire résiduelle était la seule source de chaleur à gérer sur Terre. L'hydrogène est une solution potentielle car il peut être produit à partir de l'eau et régénère l'eau après exploitation comme source d'énergie selon les réactions : énergie + $H_2O \rightarrow H_2 + ½\ O_2 \rightarrow$ énergie + H_2O. Cette chimie est particulièrement intéressante si l'énergie nécessaire à la dissociation de l'eau par électrolyse provient de sources d'électricité renouvelables produisant peu de chaleur [12]. Pour l'instant, l'hydrogène est encore largement issu de la chimie du pétrole. Ce qui manque pour décider si une source d'énergie sera plus respectueuse du climat et de l'environnement qu'une autre, c'est une évaluation du cycle thermique de l'origine à l'exploitation, comme celle faite actuellement à l'aide de l'évaluation du cycle de vie pour comparer les matières, les matériaux et les dérivés finis en fonction de leur impact sur l'environnement [13]. Il semble ne pas y avoir d'information disponible pour comparer les cycles thermiques des éoliennes et des sources d'électricité solaires à ceux des autres sources d'énergie. L'hydroélectricité présente un intérêt particulier à cet égard. Ce sera aux thermodynamiciens conjointement avec les climatologues et les spécialistes d'autres disciplines de faire cette évaluation si la présente analyse est validée dans les années à venir.

7. Conclusion

Pour compléter l'analyse de la gestion de la chaleur sur Terre qui a conduit à attribuer la fonte spectaculaire des glaces observée au cours des dernières décennies à l'énergie calorifique anthropique, la gestion de chaleur sur Terre a été comparée à celle qui gère la température dans un réfrigérateur. La comparaison a montré que l'eau agit effectivement comme un réfrigérant pour transférer la chaleur, qu'elle soit d'origine solaire ou anthropique, vers la haute atmosphère refroidie par transfert radiatif vers l'espace. Il a également été montré que sur Terre comme dans un réfrigérateur, la glace contribue au contrôle de la température, cela jusqu'à disparition totale. A côté de leur contribution à la formation de chaleur anthropique, les sources d'énergie à base d'hydrocarbures génèrent de l'eau. Cette eau supplémentaire, une fois condensée, rejoint année après année l'eau présente avant l'exploitation du pétrole et du

gaz. Cependant, cette eau supplémentaire reste apparemment minoritaire par rapport à l'eau générée par la fonte des glaces. Enfin, l'évaluation du cycle thermique des diverses sources d'énergie est proposée pour les comparer et déterminer lesquelles sont susceptibles de remplacer celles qui sont actuellement exploitées tout en produisant moins de chaleur, voire moins de CO_2. L'eau semble être une source d'énergie renouvelable intéressante par l'intermédiaire de l'hydrogène lorsque celui-ci est produit par électrolyse et à condition que le cycle thermique par rapport au climat et le cycle de vie par rapport à l'environnement soient effectivement favorables.

Références

1) NASA Earth Observatory, The Atmosphere's energy budget, 2009, (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page6.php).
2) Mackenzie F.T., Lerman A. Heat Balance of the Atmosphere and Carbon Dioxide. In: Carbon in the Geobiosphere — Earth's Outer Shell —. Topics In Geobiology, 2006, vol 25. Springer, Dordrecht, Chap. 3.
3) Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., and von Schuckmann, K.: Earth's energy imbalance and implications, *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11 : 13421–13449, https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011, 2011.
4) Hansen, J., Earth's Energy Imbalance, NASA Goddard Institute for Space Studies, 2012. https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen_16/.
5) Trenberth, K., Fasullo, J.T., Magdalena, C., Balmaseda, A., Earth's Energy Imbalance, *J. Climate*, 2014, 27:3129-3144.
6) NASA Science, Share the Science, Water Cycle, https://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/ocean-earth-system/ocean-water-cycle/.
7) Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B., van den Broeke M., van Wessem M.J., Morlighem M., Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017, PNAS, 2019, **116:** 1095-1103. (https://www.pnas.org/content/116/4/1095).
8) M. Vert, Earth's Ices Melting: And if the Greenhouse Effect of Anthropogenic CO2 is not the (Only) Cause?, *HAL archives* n° 02362816 (2019).
9) Jones et al., Total amounts of oil produced over the history of the industry. *International Journal of Oil Gas and Coal Technology*, 2009, **2**: 199-200, DOI: 10.1504/IJOGCT.2009.024887
10) BP Statistical Review of World Energy 2019 , 68th Edition, https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf.
11) US Energy Information Administration, Today in Energy, (2019), https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433.
12) Gardner, D., Hydrogen production from renewables, Renewable Energy Focus, (2009), http://www.renewableenergyfocus.com/view/3157/hydrogen-production-from-renewables/.
13) Iyyanki V.MuralikrishnaValliManickam, Chapter 5 Life Cycle Assessment, in Environmental Management, Science and Engineering for Industry, Iyyanki V.MuralikrishnaValliManickam, Eds, Butterworth Henneman Elsevier, UK, (2017) 57-75, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1.