THERMIQUE DE LA BIOSPHERE

La biosphère désigne l'ensemble des écosystèmes de la Terre, incluant la basse atmosphère, l'hydrosphère (océans, lacs, rivières) et la lithosphère (sols et terres émergées). Elle comporte la totalité de la zone où la vie se manifeste. Le système thermique de la biosphère est une enveloppe autour du globe terrestre limité à l'intérieur par le sol et les océans (une dizaine de km de profondeur) et à l'extérieur par la partie inférieure de l'atmosphère (une dizaine de km d'altitude).

Nous constatons aujourd'hui une hausse régulière de la température moyenne de l'air ambiant. Cette hausse induit de nombreuses catastrophes : sécheresses, incendies, inondations, tempêtes, réduction de la biodiversité, chute des productions agricoles et forestières, désertifications, fonte des glaces, hausse du niveau de la mer,...

Comment expliquer la sécheresse et les inondations en des temps rapprochés et sur la même planète ? la désertification et l'accroissement des intempéries ? les tempêtes et la fonte des glaces ? Une généralisation du second principe de la thermodynamique pourrait répondre à ces questions. On observerait alors que le suivi de la concentration en CO_2 et de la température moyenne de l'atmosphère devrait être complété par d'autres mesures pouvant conduire à une plus grande efficacité dans la réduction des catastrophes.

1 – Le second principe de la thermodynamique.

G. Bruhat [1] rappelle que de nombreux auteurs se sont attachés à préciser ce principe fondamental :

Enoncé de Clausius : « *le passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud n'a jamais lieu spontanément ou n'a jamais lieu sans compensation* ».

Enoncé de Lord Kelvin : « *A l'aide d'un système qui décrit un cycle et qui n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur, il est impossible de recueillir du travail* ».

Tel quel on en déduit le théorème de Carnot : « *Toutes les machines thermiques dithermes réversibles fonctionnant entre deux températures données t_1 et t_2 ont le même rendement* ».

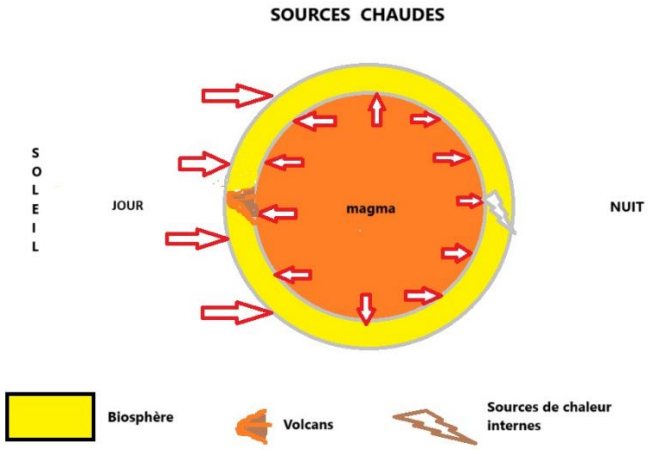
Si l'on considère le fond de la question, ces énoncés prouvent que l'on ne peut en aucun cas tirer de l'énergie mécanique au moyen d'une seule source de chaleur. Il est absolument nécessaire de disposer d'une source froide (bien souvent le milieu naturel, mais pas uniquement) pour produire de l'énergie mécanique et par conséquent de l'électricité. Ils permettent de définir les limites théoriques des rendements que l'on peut espérer atteindre avec des machines exploitant deux sources thermiques différentes. Ces considérations sont adaptées à des cycles thermiques utilisant un seul produit passant alternativement de l'état vapeur à l'état liquide (eau, ammoniac, liquides frigorigènes).

Que peut-on en déduire pour la biosphère ? Les sources thermiques sont multiples et diffuses. Les écarts de température varient en permanence en tous lieux et tout le temps. Ils engendrent des variations de masse volumique de l'air et d'humidité de l'air. Lesquelles génèrent des effets mécaniques (vents, tempêtes et tornades) et hydriques (inondations, neige, fonte des glaces). Nous sommes confrontés à deux produits (l'eau alternant les états vapeur, liquide et solide d'une part - l'air plus ou moins humide restant gazeux d'autre part) évoluant en mélange ou séparément. L'ensemble effectue des échanges thermiques directement, sans passer par des échangeurs.

Le second principe de la thermodynamique pourrait se généraliser à l'atmosphère de la manière suivante : « *La multiplication des sources thermiques internes et externes de la biosphère génèrent des phénomènes mécaniques et hydriques* ». Pour suivre l'évolution thermique de la biosphère nous ne disposons actuellement que de deux paramètre : la température moyenne de l'air et la concentration en CO_2.

2 – Les sources chaudes de la biosphère.

La première et plus importante source chaude est le rayonnement solaire pendant la journée. Le flux de chaleur capté par la terre est fonction de la distance Terre-Soleil suivant une loi qui varie avec le carré de cette distance. La Terre décrivant une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers, le bilan de chaleur reçu doit s'établir sur une année : il est estimé en moyenne à 1 368 W/m^2 en continu [2] sur la section recevant le flux solaire. Comme la Terre est sphérique, il convient de diviser cette valeur par 4 pour obtenir le flux moyen soit 342 W/m^2. On observe que plus le sol est incliné par rapport à l'orientation du flux de chaleur, plus l'apport de chaleur se réduit par unité de surface de sol.



Le bilan thermique doit tenir compte de l'albédo (partie réfléchie du rayonnement solaire vers l'espace) estimé à 30% [2] :

$$W_s = 0,7 \times 342 \times 4\pi R^2 \times 24 \times 365 = 239,4 \times 4 \times 3,14\ (6,315.10^6)^2 \times 8\ 760$$

$$W_s = 3\ 006,86 \times 39,88.10^{12} \times 8\ 760 = 1\ 050\ 442\ 933.10^{12}\ \text{Wh/an}$$

La chaleur reçue annuellement par la biosphère est de l'ordre de : $1,05.10^{21}$ Wh/an = $1,05.10^9$ TWh/an

Le magma est la seconde source de chaleur de la biosphère transmise selon deux moyens :

- L'activité volcanique qui épand une lave brûlante sur le sol ;
- La transmission de chaleur au travers de la croute terrestre vers la surface du sol. La géothermie exploite ce gisement en refroidissant localement les couches de sol traversées par l'eau qu'elle y injecte et qu'elle récupère une fois réchauffée.

La troisième source de chaleur réside dans les sources de chaleur internes de la biosphère : essentiellement dues aux activités de la flore et des animaux.

Le métabolisme des plantes (C3, C4 et CAM) alterne l'absorption d'énergie (le jour) et sa production plus faible la nuit.

L'apport des humains est indéniable. Nous prendrons l'exemple d'une centrale thermique au charbon :

- La température de flamme est de 1 750 – 1 800°C dans le générateur de vapeur à charbon pulvérisé (source chaude) ; après passage en turbine, la vapeur passe par le condenseur (source froide – rivière ou aéroréfrigérant à température ambiante).
- Les centrales disposant d'un cycle à surchauffe et resurchauffe atteignent au mieux des rendements de 42%.
- Manifestement 58% sont émis vers le milieu naturel et contribuent à son échauffement.
- La centrale thermique au charbon est donc doublement nocive : par le CO_2 émis qui renforce l'effet de serre d'une part, et par sa contribution directe à l'échauffement de la biosphère d'autre part.

La production mondiale d'électricité en 2022 s'établissait à 28 510 TWh dont 35,7% issue du charbon [3].

Soit au moins 28 510 x 0,357 x 58 / 42 = 14 055 TWh/an émis vers le milieu naturel, ce qui représente :

14 055 / 1 050.10^6 = 13,39.10^{-6} du flux de chaleur reçu du rayonnement solaire, ce qui est faible par rapport au rayonnement total reçu.

En fait, les activités humaines sont parfois ambivalentes : sources de froid et de chaleur simultanément ou pas selon le lieu et selon le moment. Il convient néanmoins de considérer le solde des énergies échangées (calories et frigories reçues sur une année) à l'égard de la biosphère.

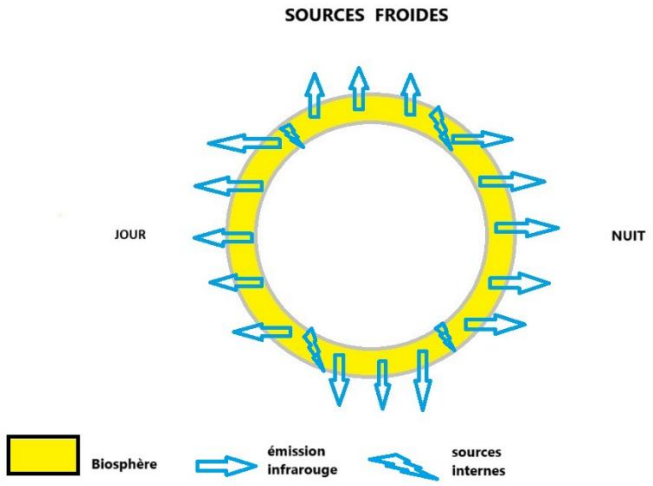
3 – Les sources froides de la biosphère.

La principale source froide est le rayonnement infrarouge du sol, des océans et de l'atmosphère vers l'espace sidéral de jour comme de nuit.

Le solde de la fonte des glaces (glaciers, arctique, antarctique) constitue la seconde source froide disponible. La perte globale mondiale des glaciers s'évalue aujourd'hui à 267 milliards t/an [4]. Sur la base de la chaleur latente de fusion de la glace de 333 kJ/kg, on déduit l'énergie nécessaire à cette fusion :

267.10^9 x 1 000 x 333 = 88 911.10^{12} kJ = 24,7.10^{12} kWh car 1 W = 1 J/s donc 1 kWh = 3 600 kJ

14 055 (TWh/an) / 24 700 (TWh/an) = 0,57 → La chaleur dégagée par les centrales thermiques au charbon représente de l'ordre de la moitié de la perte annuelle des glaces des glaciers. Ce n'est plus négligeable.



Certains volcans (Islande) émettent périodiquement des nuages de particules fines. Ces particules interdisent le trafic aérien, mais surtout captent une bonne partie du flux de chaleur solaire : ceci diminue la chaleur fournie aux sols et aux océans. Les particules fines réchauffées par le rayonnement solaire émettent en infrarouge cette chaleur reçue. Ce phénomène est identique à celui d'une éclipse totale du soleil où l'on ressent un net refroidissement au sol au moment du passage de la lune devant le soleil.

Les sources internes de froid sont plus rares. L'exemple le plus intéressant est celui des plantes. Leur métabolisme chlorophyllien durant la journée capte une partie du flux de chaleur solaire qui échaufferait le sol en leur absence. Comme elles captent aussi au même moment du CO_2 pour produire des matériaux (racines, feuilles, tronc), leur activité est doublement favorable.

4 – Bilan thermique de la biosphère.

Pour que la température moyenne de l'atmosphère reste constante, il conviendrait que, sur un an, la quantité de chaleur captée par la biosphère soit égale à la quantité de froid générée.

On constate que cette température moyenne s'accroît régulièrement chaque année, alors qu'elle ne variait que très peu voici quelques décennies. Les leviers pour réduire très sensiblement cette hausse de température sont réduits : pas d'action envisageable sur le soleil ou le magma (en dehors de la géothermie dont l'effet demeure très limité). La fonte des glaces aura une fin alors que le rayonnement infrarouge planétaire ne compense déjà plus l'accroissement de chaleur produit par les sources internes de la biosphère.

Que reste-t-il pour limiter l'accroissement annuel de la température moyenne ?

- **La multiplication des plantes** adaptées aux conditions pédoclimatiques locales ;
- **L'irrigation des zones désertiques** afin de les rendre fertiles pour des cultures adaptées ;
- **Limiter davantage et au maximum les émissions de CO_2** ;
- **Utiliser le plus possible la chaleur fatale** produite par les activités humaines ;
- **Les rejets thermiques dans le milieu naturel des activités humaines** sont à prendre en considération : leur influence est faible en regard du bilan thermique global mondial annuel ; par contre leur apport sur la variation marginale du bilan thermique d'une année à l'autre ne semble pas négligeable (*voir le cas des rejets thermiques des centrales thermiques au charbon dans le milieu naturel ci-dessus*) au même titre que les rejets annuels de CO_2. Nous manquons d'informations sur les bilans froid-chaud des rejets thermiques de ces activités (positifs ou négatifs) respectifs à l'égard de la biosphère ? C'est un point qu'il conviendrait d'ajouter aux ACV (analyses de cycle de vie) qui couvrent déjà les émissions de CO_2 de chaque produit et de chaque activité.

Conclusion

Il importe d'évaluer, autant que faire se peut, le bilan thermique de la biosphère et les apports annuels respectifs des sources de chaleur et de froid internes et externes, afin de mieux cibler les actions à mettre en œuvre et les investissements à effectuer pour obtenir l'efficacité maximale en vue d'une réduction des catastrophes et cesser de les amplifier. On ne peut plus se limiter à une transition énergétique s'étalant sur des dizaines d'années, il convient de passer à une révolution énergétique réfléchie et optimisée plus rapide : la fonte définitive des glaces « permanentes » ne ferait qu'accélérer l'échauffement annuel de l'atmosphère. Les conséquences sur les effets mécaniques et hydriques de la biosphère seraient alors sans commune mesure avec les catastrophes que nous constatons aujourd'hui.

Alain DAMIEN

2 février 2025

Bibliographie

[1] G. Bruhat, R. Vichnievsky, J. Chanu et A. Kastler, cours de physique générale – thermodynamique, 6ème édition, éd. Masson et Cie, 1968.

[2] Jacques Beauchamp, Bilan radiatif de la Terre, université de Picardie Jules Verne, MBG7, https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mbg6/radiatif.htm

[3] www.connaissancedesenergies.org/levolution-du-mix-electrique-mondial-en-2022-en-2-infographies-241104

[4] www.cnrs.fr/fr/presse/fonte-des-glaciers-une-cartographie-complete-revele-lacceleration