

La Terre est-elle une serre ou une machine thermique ?

Une autre approche des mécanismes
du réchauffement climatique
et de leurs implications

Georges MARGUERITE
Climat & Avenir

(texte intégral – juin 2022)

Résumé

Depuis plus de trente ans que l'effet de serre s'est imposé comme LA cause évidente du réchauffement climatique, ce postulat n'a pas été remis en question, au risque d'occulter d'autres causes. Pour convaincre les États de l'urgence de cette menace, le GIEC a privilégié la corrélation au détriment d'une analyse plus profonde de causalité : les activités humaines produisent du CO₂. Le CO₂ interfère dans le rayonnement infrarouge émis par la Terre pour se refroidir. Le réchauffement climatique devient alors inéluctable...

Ce raisonnement paraît imparable, et c'était de bonne guerre, il y a trente ans. Mais le forçage radiatif de la théorie de l'effet de serre est en infraction avec le principe fondamental de la conservation de l'énergie. Dès lors, la relation de cause à effet ne tient plus.

Le CO₂ est-il le seul responsable d'une catastrophe annoncée ? Ne cache-t-il pas en fait des causes autrement plus importantes ? Ne peut-il pas être une manifestation visible de phénomènes plus subtils ? À nous focaliser sur le carbone, ne risquons-nous pas de nous faire dépasser par les événements climatiques ?

Revenons aux fondamentaux. Ce qui fait le climat, ce sont le vent et l'eau. Le climat est le produit de déséquilibres et d'inerties. Le vent naît du déséquilibre thermique entre l'équateur et les pôles. Il transporte la vapeur d'eau pour arroser les terres émergées et permet ainsi la vie. C'est exactement ce qui différencie la Terre de la Lune. Or, il n'existe pas de climat lunaire.

La Terre est une machine thermique. Il y a une source chaude : l'équateur, et une source froide : les pôles. Une part de la chaleur reçue du Soleil est convertie en énergie motrice, qui crée un mouvement au sein des fluides : les océans et les couches denses de l'atmosphère.

La troposphère est le théâtre d'affrontements perpétuels entre les masses d'air chaud de l'équateur et des masses d'air froid des pôles, transportant les nuages, qui sont de véritables éponges thermiques.

Nous sommes loin de l'homogénéité et de la tranquillité d'une serre. Nous sommes plutôt dans un immense maelström énergétique, qui sédentarise une part de l'énergie solaire à la surface du globe. Cette masse thermique échappe à l'équation d'équilibre thermique de la Terre. C'est cette énergie sédentaire, perpétuellement renouvelée, qui fait le climat.

La chaleur endogène des activités humaines se déverse dans les courants thermiques autour du globe, tandis que les perturbations industrielles, agricoles et urbaines du cycle de l'eau contribuent à retenir davantage de chaleur à la surface de la Terre, là, dans notre biotope.

L'Homme a fait de la Terre une machine à vapeur, qui assèche les nappes phréatiques et engendre des pluies diluviennes. Les sols ne pouvant pas absorber de telles

précipitations, l'eau reste en surface et rejoint les océans. L'eau qui n'est plus dans les nappes n'abreuve plus la végétation. La sécheresse gagne du terrain, favorisant les départs de feu et l'ampleur des incendies. La chaleur et la vapeur d'eau dégagées par ceux-ci alimentent à leur tour les courants convectifs. Le système s'emballe.

Nous avons ainsi tous les ingrédients des liens de causalité entre les activités humaines et le réchauffement climatique :

- les énergies endogènes sont en quantité plus que suffisante pour générer le réchauffement climatique ;
- la vapeur d'eau renforce la sédentarisation de la chaleur dans les basses couches de l'atmosphère ;
- les énergies endogènes et la vapeur d'eau alimentent directement les courants convectifs à l'origine des phénomènes climatiques extrêmes.

Le terme de « réchauffement » climatique focalise trop l'attention sur la seule température. Or, ce n'est qu'un paramètre du climat, et pas le plus important. Ce qui impacte le plus le climat, c'est l'eau. La crise climatique, c'est avant tout un important déséquilibre hydrique, qui se traduira par un recul des terres cultivables, face aux sécheresses, d'un côté, et aux inondations, de l'autre.

Si l'on n'enraye pas cette dérive, cela entraînera des mouvements migratoires de centaines de millions de personnes vers les régions du globe les moins touchées.

Nous le savons, c'est une crise civilisationnelle majeure qui s'annonce.

La bonne nouvelle, c'est que l'on peut encore éviter le pire, et même revenir vers un bilan thermique naturel de la Terre, en agissant sur ce qui alimente la machine thermique terrestre : les énergies endogènes et la vapeur d'eau.

Pour cela, il faut mettre en place une volonté politique éclairée de domestication de l'énergie solaire et de gestion de l'eau. Ce n'est pas qu'une simple question de technologies. Cela demande une profonde remise en question de nos modèles économiques et de développement. Le monde de demain sera en rupture avec le monde d'hier.

Si nous ne le bâtissons pas, nous le subirons.

Mais ne faisons-nous pas l'inverse ? La conception dominante de la transition écologique consiste essentiellement à déplacer le problème, à éloigner les sources énergétiques de leur lieu de consommation, à les rendre moins visibles. Ces ajustements ne modifient pas fondamentalement notre impact sur le climat. Ils ne remettent pas en cause nos modèles économiques, pour lesquels la transition écologique semble être une aubaine pour relancer la consommation.

La promesse de limiter le dérèglement climatique est-elle tenue ?

Sommaire

Première partie

Mécanismes du réchauffement climatique

1 – État des lieux climatique

- 1-1 Qu'est-ce que le climat ?
- 1-2 Bilan thermique naturel de la Terre
- 1-3 Les cycles paléo-climatiques du Quaternaire
- 1-4 Plateau climatique de l'Holocène

2 – Effet de serre

- 2-1 Qu'est-ce qu'une serre ?
- 2-2 À l'origine de la notion de l'effet de serre
- 2-3 Un modèle abstrait
- 2-4 Liens avec les phénomènes météorologiques
- 2-5 Limites de l'effet de serre

3 – Approche thermodynamique de l'atmosphère terrestre

- 3-1 Caractéristiques de la troposphère
- 3-2 Importance des variations et des déséquilibres
- 3-3 Advection / Convection
- 3-4 L'Anthropocène
- 3-5 La machine thermique terrestre

4 – Cycle de l'eau

- 4-1 Transferts de chaleur
- 4-2 La pluie et le beau temps
- 4-3 Importance du cycle de l'eau
- 4-4 Un double déséquilibre hydrique

5 – Phénomènes en jeu dans le réchauffement climatique

- 5-1 La machine thermique terrestre naturelle
- 5-2 Que se passe-t-il quand les activités humaines ajoutent de l'énergie endogène et de la vapeur d'eau à ce système ?
- 5-3 Effets en cascades

En guise de conclusion partielle

—

Seconde partie

Implications

6 – Enjeux climatiques et crise civilisationnelle

6-1 Une cause peut en cacher une autre

6-2 Un monde rempli de bonnes intentions

7 – Pour un retour possible à l'état climatique naturel de la Terre

7-1 Production énergétique et bilan thermique de la Terre

7-2 L'eau : essence du climat

7-3 Domestiquer l'énergie solaire

8 – Quelle transition énergétique ?

8-1 Tableau de bord élémentaire

8-2 Mirages d'un monde décarboné

Annexes

A Définitions

B Fonctionnement d'une serre

C Rayonnement, Forçage radiatif et Conservation de l'énergie

D Florilège de commentaires météo – avril 2021

E Sècheresse, incendies & inondations

F Intérêts et limites des résolutions climatiques

G Science, croyances et savoirs. La place du doute.

H À propos de l'auteur

Première partie

Mécanismes du réchauffement climatique

1 – État des lieux climatique

Pour cerner en quoi les activités humaines sont responsables du réchauffement climatique actuel, il faut définir ce que l'on entend par climat et faire un état des lieux de la situation antérieure.

1-1 Qu'est-ce que le climat ?

Définitionⁱ

Pour *le Larousse* :

Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.

Synonymes : air – atmosphère

Pour *Futura Planet* :

Le climat correspond aux conditions météorologiques moyennes (températures, précipitations, ensoleillement, humidité de l'air, vitesse des vents, etc.) qui règnent sur une région donnée durant une longue période. Pour l'Organisation météorologique mondiale, elle doit être d'au minimum 30 ans.

Le climat et la météo se composent des mêmes paramètres. C'est la constante de temps qui diffère : plus de trente ans pour le premier, lorsqu'elle est de quelques heures pour l'autre. Ce que l'on pourrait résumer en disant que le climat est un regard sur les constantes, alors que la météo s'intéresse aux écarts.

Il y a autant de climats que de situations, et sous des appellations de climat océanique ou de climat méditerranéen se cachent de multiples climats locaux, propices au développement de telle ou telle culture, de fleurs, dans la région de Grâce, ou de cépages sur les reliefs de Banyuls...

Chaque climat local se caractérise par la température, le vent et l'hygrométrie que l'on y trouve et des variations de ces paramètres autour de la valeur moyenne.

L'on perd cette finesse de perception avec l'échelle de représentation, de la parcelle de terrain au local, puis au régional, au national et au global. Il faut donc garder à l'esprit cette diversité de situations lorsque l'on parle de réchauffement climatique de la planète. Sinon, on aboutit à une vision doublement réductrice : par la focalisation sur la température, en occultant le vent et l'hygrométrie, et par une perception uniforme du climat, purement statistique...

ⁱ Voir l'ensemble des définitions en annexe A

Le danger de cette approche est d'occulter les interactions entre les microclimats et les biotopes qu'ils abritent. Un sol végétalisé agit différemment sur le climat qu'un sol nu. Le climat, sur Terre, n'est pas dissociable du vivant. On ne peut pas (ne doit pas) l'aborder comme celui d'une exoplanète.

L'approche globale est cependant nécessaire. Mais, pour qu'elle reste pertinente, il faut que l'on soit en mesure de décrire les liens de causes à effets entre les hypothèses générales et les observations de terrain.

La question de la température est la plus facile à traiter, car la plus facile à mesurer et à mettre en équations. C'est sans doute là l'origine de la terminologie de « réchauffement » climatique, alors que ce sont des manifestations météorologiques extrêmes que l'on observe.

1-2 Bilan thermique naturel de la Terre

La Terre n'est pas un caillou inerte. Son activité sismique rappelle à notre mémoire qu'elle renferme un noyau dont la température est de plus de 5 000 °C...

*Dans son mémoire sur la *Température du globe terrestre*¹, Fourier écrit en parlant de la chaleur primitive de la Terre : « Les observations recueillies à ce jour indiquent que les divers points d'une même verticale, prolongée dans la terre solide, sont d'autant plus échauffés que la profondeur est plus grande, et l'on a évalué cet accroissement à 1° pour 30 m ou 40 m. Un tel résultat suppose une température intérieure très élevée ; il ne peut provenir de l'action des rayons solaires : il s'explique naturellement par la chaleur propre que la Terre tient de son origine. »*

Nous savons aujourd'hui que la chaleur interne de la Terre provient d'une part de son origine, dont le noyau est le témoin, mais également et surtout de l'activité radioactive de son manteau.

La position centrale de la chaudière terrestre induit une diffusion isotrope de la chaleur en son sein, suivant un gradient thermique régulier, jusqu'à ce qu'elle entre en opposition avec l'action du rayonnement solaire à sa surface.

En d'autres termes, la température baisse régulièrement du centre de la Terre vers l'extérieur. Toutefois, cette condition n'est pas toujours respectée à la surface de la Terre, notamment à l'équateur, là où l'action du rayonnement solaire est la plus importante, réchauffant le sol sur plusieurs dizaines de mètres. Il y a alors une inversion thermique. Au lieu de diminuer en s'éloignant du centre de la Terre, la température du sol augmente sous l'action du Soleil. Ne pouvant s'échapper radialement vers l'espace, la chaleur tellurique s'écoule vers des régions plus froides (fond des océans et terres froides).

Fourier écrit à ce sujet : « *La chaleur du globe terrestres dérive de trois sources qu'il est d'abord nécessaire de distinguer :*

1. *La terre est échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats ;*
2. *Elle participe à la température commune des espaces planétaires, étant exposée à l'irradiation des astres innombrables qui environnent de toutes parts le système solaire ;*
3. *La Terre a conservé dans l'intérieur de sa masse une partie de la chaleur primitive qu'elle contenait lorsque les planètes ont été formées. »*

Même si la température du fond spatial (*température commune des espaces planétaires*) a été surestimée par l'auteur, il pose d'abord toutes les sources de chaleur qui peuvent influencer le climat, pour ensuite évaluer l'importance de chacune d'elle. Il ne présume pas.

Notons qu'il anticipe la part due au développement des activités humaines :

« *L'établissement et le progrès des sociétés humaines, l'action des forces naturelles peuvent changer notablement, et dans de vastes contrées, l'état de la surface du sol, la distribution des eaux et les grands mouvements de l'air.*

De tels effets sont propres à faire varier, dans le cours de plusieurs siècles, le degré de la chaleur moyenne ; car les expressions analytiques comprennent des coefficients qui se rapportent à l'état superficiel et qui influent beaucoup sur la valeur de la température. »

Aux pôles, le rayonnement solaire effleure à peine la surface du globe. Le sol ne présente pas d'inversion thermique pour s'opposer à l'écoulement de la chaleur de la chaudière terrestre. Là, c'est la présence de glace qui perturbe le mécanisme de diffusion de la chaleur tellurique. Elle agit un peu à la manière d'une éponge, absorbant la chaleur interne de la Terre en changeant d'état, en fondant (chaleur latente de fusion). La chaleur tellurique reste ainsi à la surface de la Terre, grossissant les océans. C'est seulement à partir d'ici, dans les régions froides (mais non gelées), qu'elle peut *in fine* gagner l'espace.

Fourier écrit à ce sujet : « *Quoi que l'effet de la chaleur intérieure ne soit plus sensible à la surface de la Terre, la quantité totale de cette chaleur qui se dissipe dans un temps donné, comme une année ou un siècle, est mesurable, et nous l'avons déterminée : celle qui traverse durant un siècle un mètre carré de superficie et se répand dans les espaces célestes pourrait faire fondre une colonne de glace qui aurait pour base ce mètre carré et une hauteur d'environ 3 m. »*

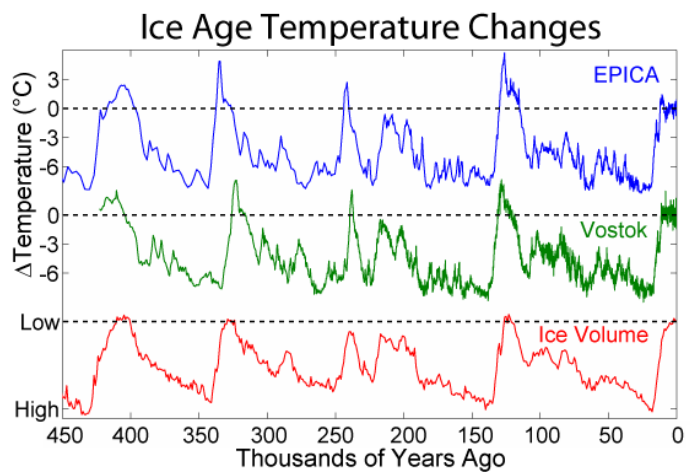
Cette source interne de chaleur n'élève pas la température de la planète (la glace joue un rôle de modération important) et ne dégage pas de CO₂. Pourtant, elle impacte le climat naturel de la Terre en changeant le niveau des océans et la nature des sols. Même la vapeur d'eau, dans l'atmosphère, et les eaux de surface en sont affectées.

La fonte des glaciers de montagne et de la banquise n'est pas un phénomène récent. Ce qui pose question, c'est pourquoi elle se poursuit ? Nous étions arrivés à un extremum interglaciaire. La Terre devrait se refroidir. La température moyenne était même légè-

rement baissière, de l'ordre de 0,1 °C par millénaireⁱ, dix fois moins vite que lors des périodes glaciaires précédentes. Or, elle se retrouve à la hausse, à un rythme actuel dix fois plus rapide que durant les périodes interglaciaires. Le risque est alors de sortir de l'ère glaciaire (présence de glaces) du Quaternaire. La glace ne jouera plus son rôle de modérateur climatique, ce qui affectera fortement les courants océaniques et éoliens. La répartition de la vapeur d'eau et des précipitations bouleverseront les écosystèmes existants à un rythme trop rapide pour assurer une adaptation des plus fragiles.

1-3 Les cycles paléoclimatiques du Quaternaire

Le Quaternaire présente de longues périodes glaciaires auxquelles succèdent des périodes interglaciaires environ dix fois plus courtes, suivant un cycle d'un peu plus de cent mille ans, et dont les profils sont assez semblables. Elles présentent notamment des minima et maxima de températures singulièrement répétitifs.



La succession des périodes glaciaires et interglaciaires présente une forte dissymétrie, marquée par un refroidissement lent suivi d'un réchauffement dix fois plus rapide, comme si la Terre se libérait spontanément d'une contrainte contre nature.

Il faut que l'axe de rotation de la Terre soit suffisamment incliné par rapport à l'écliptique pour que la glace puisse se former à ses pôles.

Cycles glaciaires et interglaciaires du Quaternaire.

Graphique de Wikipedia : Ice age²

La Terre se refroidit lentement depuis quatre milliards d'années. Son noyau est encore chaud et la radioactivité de son manteau est persistante. Au total, cela représente environ 46 TW³ que la Terre doit dissiper vers l'espace, en plus des 120 000 TW issus du rayonnement solaire.

Si l'on ne regarde que les chiffres, cela paraît négligeable devant l'énergie reçue du Soleil. Il ne faut toutefois pas s'en tenir à une vision froidement mathématique. En physique, les déséquilibres comptent autant sinon plus que les équilibres.

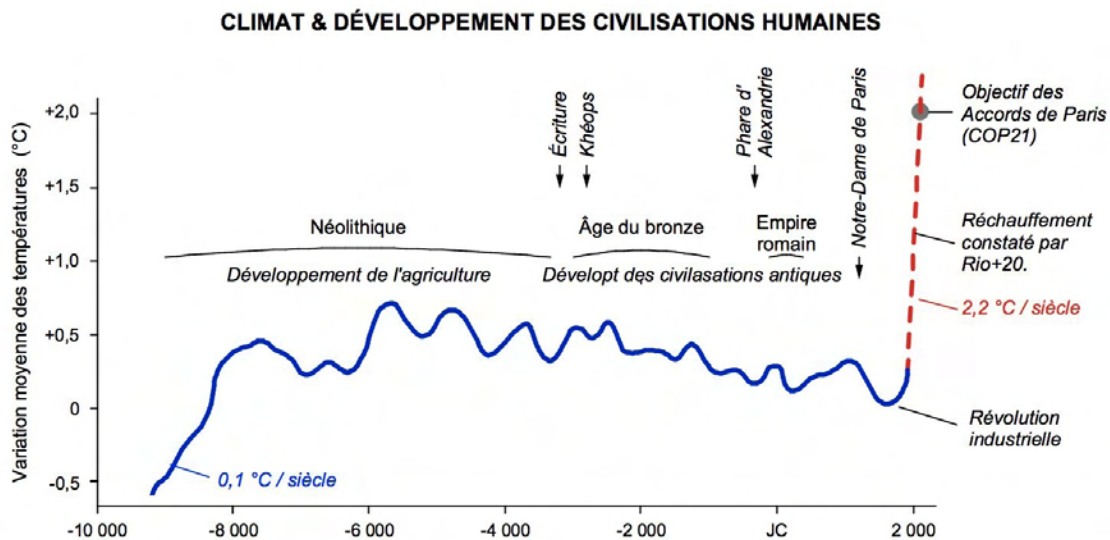
La spécificité de la chaleur tellurique est de venir des profondeurs de la Terre, lorsque le rayonnement solaire n'intéresse que sa surface, avec une très forte dissymétrie entre l'équateur et les pôles. Les températures de surface élevées, dans les régions chaudes, bloquent la chaleur tellurique, qui ne peut s'évacuer que par les régions froides : le fond des océans, le pergélisol et les glaciers, qui agissent comme des ponts thermiques.

ⁱ Voir le plateau climatique de l'Holocène, au chapitre 1-4.

Aussi modestes que puissent paraître les 46 TW de la chaudière terrestre, cela représente de quoi faire fondre quelque 140 000 tonnes de glace par seconde. C'est six fois plus que nécessaire pour faire monter le niveau des océans de 120 mètres depuis les dix-huit mille ans qu'a commencé la période interglaciaire actuelle.

La question est alors de savoir pourquoi la Terre se refroidit périodiquement, lorsqu'elle a atteint un maximum, assez répétitif d'une période à l'autre, soit l'inverse des études de Milankowitch. Il faut que les hivers soient suffisamment froids pour que la formation de la glace l'emporte sur la fonte naturelle et cela n'est possible que lorsque l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est suffisamment importante. Cette variation d'inclinaison est liée, au moment d'inertie du globe terrestre. Celui-ci est influencé par la dérive des continents (variation plutôt continue) et par la masse des calottes glaciaires (variations périodiques). Durant les périodes glaciaires, l'eau des océans migre vers les pôles où elle s'accumule sous forme de glace. La masse des océans diminue, tandis que celle des pôles et des terres gelées augmente. Cette modification de la répartition des masses agit sensiblement sur le moment d'inertie de la Terre et sur son axe de rotation⁴. Suffisamment pour que la répartition du rayonnement solaire en soit affectée. Les deux effets s'opposent et font alterner les périodes de refroidissement et de réchauffement. Cela expliquerait la lenteur des refroidissements, fruit d'influences antagonistes, par rapport aux périodes de réchauffement, où elles se conjuguent.

1-4 Plateau climatique de l'Holocène



L'Holocène présente la particularité d'un plateau au cours duquel la température varie peu, oscillant dans une fourchette de $\pm 0,5$ °C. Alors qu'au cours des périodes interglaciaires, la température croît en moyenne de 0,1 °C par siècle, le réchauffement actuel (Anthropocène) se distingue par une élévation de la température moyenne au rythme de 2 °C par siècle (Rapport Rio + 20⁵)

La seconde partie de l'Holocène présente un plateau climatique singulier durant le Quaternaire, qui a permis aux Hommes de sortir de leurs cavernes pour développer l'agriculture et édifier toutes les civilisations connues.

Ce n'est pas seulement le réchauffement actuel en tant que tel, mais c'est aussi le rythme auquel il se produit qui est préoccupant. La rapidité de celui-ci (d'un facteur 20, par rapport au réchauffement des périodes interglaciaires) bouleverse nos écosystèmes, ne leur laissant pas le temps de s'adapter. Or, la disparition des maillons les plus faibles met en danger tout le reste de la chaîne alimentaire, par effet domino... Cela est déjà sensible pour certaines cultures, alors que nous sommes encore au début du siècle et que le plus dur est à venir...

La stabilité climatique est donc un bien précieux qu'il faut préserver, dans notre intérêt. Si nous ne faisons rien ou si nous nous trompons de combat, notre civilisation pourrait connaître un sort semblable à celui des dinosaures.

2 - Effet de serre

2-1 Qu'est-ce qu'une serre ?

Pour *le Larousse* :

Construction légère à parois translucides permettant de créer pour les plantes de meilleures conditions de végétation que les conditions naturelles.

Pour *Wikipedia* et *Techno-Sciences* :

*Une **serre** est une structure close ou semi-ouverte translucide, en verre ou en plastique, soutenue par une structure métallique ou en bois, destinée en général à la production agricole. Elle vise à protéger les cultures vivrières ou de loisir des éléments climatiques, afin d'améliorer la production des plantes, d'en accélérer la croissance et de les produire indépendamment des saisons grâce à un gain de température par blocage de la convection (et non par effet de serre) sous la structure.*

Pour *Dicocitation* :

Galerie close de vitrages dans une exposition chaude, où l'on serre pendant l'hiver les plantes qui craignent la gelée. On admet trois espèces de serres : les serres chaudes, où le degré de chaleur doit être maintenu depuis quinze degrés jusqu'à trente ; la serre tempérée, où le thermomètre ne doit pas descendre en hiver au-dessous de six degrés, ni monter au delà de quinze ; et la serre froide, où le thermomètre ne doit pas descendre au delà du terme de la congélation, ni monter au-dessus de huit ou dix degrés.

Tous s'accordent à dire que la serre est un milieu protégé des éléments extérieurs.

La question est alors de savoir ce que sont ces éléments extérieurs. N'est-ce pas de l'atmosphère dont il est sujet ? Du vent ? De la pluie ? De la sécheresse ? De tout cela à la fois ? Si la serre est un milieu protégé des paramètres incontrôlés de l'atmosphère terrestre, la Terre peut difficilement être assimilée à une serre.

Une serre est une enceinte restreinte dans laquelle les conditions ambiantes (température et hygrométrie) sont homogènes et à l'abri du vent. La convection est naturelle et les mouvements de l'air sont lents. On est proche des conditions formulées par Fourier et de la description qu'il donne de l'héliothermomètre de *de Saussure*. Comme il le précise, « l'air échauffé est contenu de toutes parts... La chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est point dissipée immédiatement par le renouvellement de l'air. »

Au-delà de la température de la serre, il est intéressant de déterminer la quantité de chaleur retenue par celle-ci.

Un exemple peut aider à saisir les phénomènes en jeu :

Prenons pour cela une serre de culture de 2,5 m de hauteur et voyons ce qui se passe à l'intérieur de celle-ci

Apport solaire

Au cours d'un cycle journalier, elle reçoit un rayonnement solaire^(a) de 30 MJ/m².

Convection naturelle

Une serre est un lieu clos qui se caractérise par le confinement de l'air qu'elle contient. L'air se réchauffe au contact du sol, lui-même chauffé par le rayonnement solaire, et en cède une partie aux parois de la serre.

Transitoire thermique

Ce faisant, la température moyenne au sein de la serre s'élève progressivement jusqu'à obtenir un nouvel équilibre des échanges thermiques internes et externes à la serre.

Ce délai est appelé transitoire thermique. Au-delà de cette période, les échanges thermiques sont stabilisés sans laisser de traces visibles de la période transitoire.

Confinement thermique et Temps de séjour

Il y a une grande dissymétrie des temps de séjour de la chaleur dans la serre selon qu'elle est véhiculée par rayonnement ou par convection. Les transferts thermiques par rayonnement s'effectuent à la vitesse de la lumière. Cela ne dépasse pas une dizaine de nanosecondes pour notre serre, tandis que la dissipation de chaleur par les courants convectifs demandera plusieurs milliers de secondes.

L'on retrouve ici ce qui fait le transitoire thermique, que nous avons vu plus haut. Une fois ce délai passé, les flux entrant et sortant s'équilibrent, mais la différence de temps de séjour entre les deux modes de transferts thermiques demeure. C'est donc le délai mis par les transferts convectifs qui donnent à la serre une température interne supérieure à celle de l'extérieur.

—

Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de l'énergie thermique retenue au sein d'une serre, considérons que la température à l'intérieur de la serre soit 5 °C supérieurs à celui de l'extérieur.

Tous calculs faits^(b), la chaleur confinée dans la serre représente alors 15 kJ/m².

Cela est à rapporter à la chaleur reçue par la serre de 30 MJ/m², soit un ratio de 0,05 %. C'est-à-dire que l'on a 0,05 % de l'énergie qui reste confinée à l'intérieur de la serre, durant le transitoire thermique, pour 99,95 % du rayonnement solaire restitué à l'extérieur de celle-ci.

Hélas ! Aucun appareil de mesure n'est capable d'une telle précision. Il est alors tentant de considérer que toute la chaleur reçue du Soleil est intégralement restituée et d'attribuer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre à un surplus radiatif.

Au contraire, il faut une approche phénoménologique pour discerner le déséquilibre du bilan thermique théorique

(a) – Soit la Constante solaire sur une journée :

$$347 \text{ W/m}^2 \times 24 \text{ heures} = 8,33 \text{ kWh/m}^2 \text{ (ou } 29,98 \text{ MJ/m}^2\text{)}$$

(b) –Le différentiel de chaleur dans la serre est le produit de la masse de la colonne d'air, de la capacité thermique à pression constante et du différentiel de température :

$$2,5 \text{ m} \times 1,22 \text{ kg/m}^3 \times 1,004 \text{ kJ/}^\circ\text{C/kg} \times 5 \text{ }^\circ\text{C} \approx 15 \text{ kJ/m}^2$$

N. B. La notion de temps de séjour thermique est très importante. Si les transferts de chaleur par convection étaient aussi rapides que ceux par rayonnement, il n'y aurait pas de différence de temps de séjour, il n'y aurait donc ni transitoire thermique ni accumulation de chaleur dans la serre.

La chaleur qui caractérise la serre est marginale par rapport au flux thermique qu'elle reçoit et ne change en rien le bilan thermique une fois les températures stabilisées. Vues de l'extérieur, rien ne différencie une serre d'une autre ni même du sol nu.

Seules les phases transitoires pourraient laisser apparaître un déphasage entre les flux entrants et les flux sortants. Encore faudrait-il avoir les moyens de mesurer d'aussi infimes différences.

De nombreuses serres, d'acclimatation ou de cultures, sont chauffées artificiellement pour atteindre une température plus élevée. À la différence du rayonnement solaire, ce n'est pas le sol qui est chauffé, mais l'air de la serre. Il n'y a donc pas ou peu de rayonnement infrarouge. La chaleur endogène ajoutée emprunte la voie lente, séjournant longtemps dans la serre avant de se dissiper.

Si la serre comporte un bassin, l'eau de celui-ci se comportera d'une façon similaire à l'air de la serre. La différence viendra de la capacité thermique propre du bassin et de son inertie. Les variations thermiques de l'air auront une amplitude diminuée et un déphasage augmenté (comme des capacités en série dans une modélisation électrique). L'hygrométrie de l'air ambiant va changer avec sa température (capacité variable) et renforcer l'aspect de lissage dû à l'inertie thermique de l'ensemble.

La présence de l'eau et de son interaction avec l'air rend palpable le déséquilibre instantané entre l'apport de la chaleur du Soleil et la température au sein de la serre.

2-2 À l'origine de la notion d'effet de serre

Depuis plus de trente ans, *l'effet de serre* est entré dans le langage courant comme synonyme de réchauffement climatique. Du point de vue astronomique, le terme *effet de serre* distingue les planètes possédant une atmosphère de celles qui en sont dépourvues. Il tombe sous le sens que l'on ne peut parler de climat qu'en présence d'une atmosphère. C'est donc naturellement que l'on a associé la notion de climat à celle d'atmosphère et celle-ci à la désignation *effet de serre*.

Le mathématicien J-B Fourier est considéré par certains comme le précurseur de la théorie de l'effet de serre. Dans son *mémoire sur la Température du globe terrestre et des espaces planétaires* (1827), il écrit :

« Il est difficile de connaître jusqu'à quel point l'atmosphère influe sur la température moyenne du globe, et l'on cesse d'être guidé dans cet examen par une théorie mathématique régulière. On doit au célèbre voyageur M. de Saussure une expérience qui paraît très propre à éclairer cette question. Elle consiste à exposer aux rayons du Soleil un vase couvert d'une ou plusieurs lames de verre bien transparent, placées à quelques distances les unes des autres. L'intérieur du vase est garni d'une enveloppe épaisse de liège noirci, propre à recevoir et à conserver la chaleur. L'air échauffé est contenu de toutes parts, soit dans l'intérieur de la boîte, soit dans chaque intervalle compris entre deux plaques. Des thermomètres placés dans ce vase et dans les intervalles supérieurs marquent le degré de chaleur acquise dans chacune de ces capacités. Cet instrument a été exposé au Soleil vers l'heure de midi, et l'on a vu, dans diverses expériences le thermomètre du vase s'élever à 70°, 80°, 100°, 110° et au-delà (division octogésimale). Les thermomètres placés dans les intervalles ont acquis des degrés de chaleur beaucoup moindres, et qui décroissaient depuis le fond de la boîte jusqu'à l'intervalle supérieur.

L'effet de la chaleur solaire sur l'air contenu par des enveloppes transparentes avait été depuis longtemps observé. L'appareil que nous venons de décrire a pour objet de porter la chaleur acquise à son maximum, et surtout de comparer l'effet solaire sur une montagne élevée à celui qui avait lieu dans une plaine inférieure. Cette observation est principalement remarquable par les conséquences justes et étendues que l'inventeur en a tirées : elle a été répétée plusieurs fois à Paris et à Édimbourg, et a donné des résultats analogues.

La théorie de cet instrument est facile à concevoir. Il suffit de remarquer :

1° que la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est point dissipée immédiatement par le renouvellement de l'air ;

2° que la chaleur émanée du Soleil a des propriétés différentes de celles de la chaleur obscure. Les rayons de cet astre se transmettent en assez grande partie au delà des verres dans toutes les capacités et jusqu'au fond de la boîte. Ils échauffent l'air et les parois qui le contiennent : alors leur chaleur ainsi communiquée cesse d'être lumineuse ; elle ne conserve que les propriétés communes de la chaleur rayonnante obscure. Dans cet état, elle ne peut traverser librement les plans de verre qui couvrent le vase ; elle s'accumule de plus en plus dans une capacité enveloppée d'une matière très peu conductrice, et la température s'élève jusqu'à ce que la chaleur affluente soit exactement compensée par celle qui se dissipe. On vérifierait cette explication, et l'on en rendrait les conséquences plus sensibles, si l'on variait les conditions, en employant des verres colorés ou noircis, et si les capacités qui contiennent les thermomètres étaient vides d'air. Lorsqu'on examine cet effet par le calcul, on trouve des résultats entièrement conformes à ceux que les observations ont donnés. Il est nécessaire de considérer attentivement cet ordre de faits et les résultats du calcul lorsqu'on veut connaître l'influence de l'atmosphère et des eaux sur l'état thermométrique du globe terrestre. En effet, si toutes les couches d'air dont l'atmosphère est formée conservaient leur densité avec leur transparence, et perdaient seulement la mobilité qui leur est propre, cette masse d'air ainsi devenue solide, étant exposée aux rayons du Soleil, produirait un effet du même genre que celui que l'on vient de décrire. La chaleur, arrivant à l'état de lumière jusqu'à la terre solide, perdrait tout à coup et presque entièrement la faculté qu'elle avait de traverser les solides diaphanes ; elle s'accumulerait dans les couches inférieures de l'atmosphère, qui

acquerraient ainsi des températures élevées. On observerait en même temps une diminution du degré de chaleur acquise, à partir de la surface de la Terre. La mobilité de l'air, qui se déplace rapidement dans tous les sens et qui s'élève lorsqu'il est chauffé, le rayonnement de la chaleur obscure dans l'air diminue l'intensité des effets qui auraient lieu sous une atmosphère transparente et solide, mais ne dénature point entièrement ces effets. Le décroissement de la chaleur dans les régions élevées de l'air ne cesse d'avoir lieu ; c'est ainsi que la température est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacles pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure. »

Ce passage, assez court dans l'œuvre de Fourier, renferme une réflexion extrêmement riche et puissante, mais inachevée, car trop précoce. Il faudra attendre un demi-siècle pour voir les travaux de Stéphan et Boltzmann sur le rayonnement thermique.

En 1988, le rapport Hansen, de la NASA, a alerté le monde scientifique de la menace que représente l'augmentation croissante de CO₂ dans l'atmosphère sur le climat, invoquant son comportement dans l'infrarouge lointain (la lumière obscure) réémis par la Terre.

C'est ce que Fourier avait écrit dans son mémoire au sujet d'une atmosphère « solide ». C'est-à-dire une atmosphère dans laquelle les molécules de l'air seraient immobiles, afin qu'il n'y ait pas de transports de chaleur des régions chaudes vers les régions froides ni d'élévation de l'air chauffé au contact du sol, au bénéfice d'un air plus dense. Ces conditions ne sont évidemment pas remplies par la troposphère, la couche la plus basse et la plus dense de l'atmosphère. Mais, c'est peu ou prou ce que l'on rencontre dans les couches supérieures, aux confins de l'espace. Là, il est possible d'appliquer la loi de Stefan-Boltzmann, en respectant les conditions dictées par Fourier.

R. W. Wood mena une expérience comparative en variant la transparence du « verre », comme le suggérait Fourier, et concluait, en 1909, que le comportement d'une serre était essentiellement dû au confinement de l'air et que le rayonnement ne jouait qu'un rôle marginal⁶.

2-3 Un modèle abstrait

La théorie de l'effet de serre repose sur 4 hypothèses fondatrices : sans atmosphère, la Terre se comporterait comme un corps noir ; la Terre est en équilibre thermique avec le Soleil ; le CO₂ est un gaz à effet de serre ; les activités humaines produisent du CO₂.

Corps noir

Un corps noir placé à la même distance du Soleil que la Terre aurait une température d'équilibre de 255 Kelvin, soit - 18 °C. À cette température, le rayonnement thermique s'effectue dans les infrarouges lointains suivant la relation de Wien⁷, soit autour de 11 µm, alors que le spectre visible s'étend de 380 à 780 nm. Ce rayonnement est donc invisible à l'œil.

Le corps noir est une abstraction mathématique, tout comme le corps blanc ou même le corps gris⁸, dont l'émissivité serait uniforme quelle que soit la longueur d'onde de rayonnement et comprise entre 0 (corps blanc) et 1 (corps noir). En réalité, la valeur du coefficient d'émission varie suivant sa température.

Le corps noir est le corps qui rayonne le plus à température donnée (un corps blanc ne rayonne pas du tout). *A contrario*, pour un flux thermique donné, le corps noir est celui qui a la plus basse température. Considérer la Terre (dépourvue d'atmosphère) comme un corps noir donne une température d'équilibre abusivement basse. La planète bleue n'est pas un corps noir. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder la Lune. Elle est dépourvue d'atmosphère et se trouve à la même distance du Soleil que la Terre. Or, sa face éclairée par le Soleil nous renvoie une lumière « blanche », suffisante pour y voir les nuits de pleine Lune.

Avec un coefficient de 0,7, la température de référence de la Terre, sans atmosphère, serait de 279 K, soit + 6 °C, au lieu de - 18 °C. On voit donc que l'hypothèse du corps noir fausse le rôle joué par l'atmosphère, tant dans son ampleur que dans sa nature.

Équilibre thermique

La notion d'équilibre thermique prête à discussion. Nous l'avons vu plus haut, avec le corps noir, la température de référence est établie avec une hypothèse implicite d'uniformité. Le flux solaire est considéré dans sa globalité et la température d'équilibre du corps noir correspond à celle d'un corps thermiquement homogène. Or, l'effet du rayonnement solaire est fortement dissymétrique. Il est maximal à l'équateur et diminue avec la latitude pour être pratiquement nul aux pôles.

Cette dissymétrie se retrouve également suivant la longitude. Le flux solaire est maximal à midi et nul toute la durée de la nuit. Il est également saisonnier. L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur l'écliptique procure une troisième dissymétrie, d'autant plus sensible que l'on s'écarte de l'équateur.

À cela s'ajoute l'inertie thermique des corps. La face éclairée de la Terre s'échauffe progressivement le jour et se refroidit de même la nuit, la durée de ce cycle variant en chaque latitude tout au long de l'année.

Et la Terre n'est pas un corps inerte et homogène, mais une planète vivante. L'eau et la végétation modifient son comportement thermique

Le rayonnement solaire provoque ainsi un déséquilibre thermique partout à la surface du globe.

CO₂ et effet de serre

Lors de la *Convention Citoyenne pour le Climat*, en 2019, l'effet de serre était présenté comme une diminution du passage des rayonnements infrarouges de notre atmosphère vers l'espace, piégeant la chaleur⁹.

Le site *Planet-Terre*, pour sa part, fait l'analogie de l'effet de serre avec un écran opaque au rayonnement infrarouge¹⁰.

Dans une note de bas de page¹¹, le GIEC précise : « *Le FR (Forçage Radiatif) est un changement de flux énergétique... calculé à la tropopause ou au-dessus de l'atmosphère.* »

Cela appelle plusieurs commentaires.

La notion de forçage radiatif naît d'une lecture purement mathématique du rayonnement que donne l'équation de Stefan-Boltzmann entre deux plaques. Il y a confusion entre le flux thermique et la différence de potentiel thermique des deux surfaces (équation permettant de calculer les températures d'équilibre). Même si l'écriture mathématique peut laisser le croire, l'idée d'un apport d'énergie n'a pas de sens physique. Cela serait en contradiction avec le principe fondamental de la conservation de l'énergie (voir annexe C).

L'air et les gaz sont des isolants thermiques. – Ce qui fait la qualité du duvet d'oie, c'est sa capacité à enfermer de l'air dans un important maillage, par exemple. C'est également la raison des doubles et triples vitrages. – L'image de frein à la déperdition de la chaleur de la Terre de laquelle se rapproche la présentation donnée lors de la *Convention Citoyenne pour le Climat* est la plus juste.

L'on peut adapter l'analogie de l'écran du site *Planet-Terre* à celle d'une grille laissant passer librement une partie du rayonnement terrestre et s'interposant à l'autre, proportionnellement à la surface d'obstruction (taux d'opacité). L'augmentation de la température au sol en fonction du taux d'opacité de la grille (Sg/S) répond à une relation simple :

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \left(\frac{2}{2 - \frac{Sg}{S}} \right)^{\frac{1}{4}} - 1$$

T_0 étant la température de surface, sans grille-écran,
et ΔT est l'augmentation de la température de surface due à la présence de celle-ci.

Si Sg occupait 10 % de la surface, on aurait $\Delta T/T_0 \approx 0,013$; soit $\Delta T \approx 3,7$ °C.

Avec $Sg/S = 1$ %, on n'a plus qu'un ratio $\Delta T/T_0 \approx 0,001$; soit $\Delta T \approx 0,36$ °C.

Or, la concentration actuelle du CO₂ est de l'ordre de 400 ppmⁱ (0,04 %). On est donc très éloigné de l'image de l'écran opaque total et même d'une grille. Il s'agirait plutôt d'un filet à larges maillesⁱⁱ. Sans compter que l'espace intermoléculaire augmente avec l'altitude (diminution de la densité).

ⁱ partie par million (1 ppm = 0,0001 %)

ⁱⁱ Cela équivaudrait à une maille de 5 m pour un fil de 1 mm de diamètre.

S'il y a, en toute rigueur, une augmentation du gradient thermique, en pratique, celle-ci est marginale et très insuffisante pour expliquer le réchauffement climatique constaté.

La dernière observation tient à la nature des gaz, difficilement assimilable à une surface solide isolée. Au contraire, l'atmosphère présente un continuum du sol jusqu'à l'espace suivant un gradient de pression décroissant. Comme le remarque l'article du site *Planet-Terre*, l'écran est une analogie mathématique. Ce n'est qu'une commodité de calculs, faisant abstraction du comportement isotrope des gaz.

Contrairement à un écran solide, les molécules de gaz sont libres. Elles sont soumises à des mouvements browniens, dont l'énergie se diffuse lors de collisions avec des molécules voisines ou par rayonnement.

La température est en lien avec les déplacements moléculaires (au zéro absolu, les molécules seraient immobiles).

La pression résulte des chocs intermoléculaires. Plus ils sont nombreux et plus la pression est élevée.

Il en résulte que la part du rayonnement thermique est faible aux pressions élevées et prendra progressivement de l'importance à mesure que la pression sera plus faible et que les distances intermoléculaires seront plus grandes.

De nombreuses illustrations sur l'effet de serre représentent un rétro-rayonnement prenant sa source en altitude et traversant librement les couches denses de la troposphère jusqu'au sol, donnant l'impression d'une brusque discontinuité, à la façon d'un écran solide.

Or, le rayonnement des gaz est isotrope. Celui-ci s'échappera plus facilement vers l'espace, à travers les couches atmosphériques de très faible densité, que vers le sol, à travers un air à la densité de cent à mille fois supérieure.



Les activités humaines produisent du CO₂

La maîtrise du feu est sans doute l'étape la plus déterminante de l'évolution de l'Homme, pour devenir indissociable des activités humaines, pour se chauffer, cuire ses aliments et fabriquer ses outils.

L'invention de la machine à vapeur a donné naissance à une nouvelle utilisation du feu, en transformant une partie de la chaleur en énergie motrice. Elle a aussi entraîné l'exploitation des énergies fossiles. Le charbon et le pétrole sont issus d'une longue transformation de matières organiques, libérant en quelques décennies dans l'atmosphère ce qui a mis des dizaines de millions d'années à se former.

Le CO₂ est un corps stable et facile à mesurer. Il est suffisamment rare pour que son évolution soit sensible. C'est un témoin précieux pour l'étude du climat passé de la Terre, comme il l'est des activités humaines de l'ère industrielle. Toutefois, il ne se forme pas spontanément. Il provient d'une réaction chimique exothermique. C'est d'ailleurs pour la chaleur produite par cette combustion que l'on exploite les ressources fossiles. De même qu'il n'y a pas de fumée sans feu, il n'y a pas de CO₂ sans chaleur. L'on peut même dire que pour chaque PPM de CO₂ supplémentaire dans l'atmosphère correspond environ vingt-cinq millions de gigawatt.heures (25 10⁶ GWh)ⁱ de chaleur dissipée dans l'atmosphère.

Où passe cette chaleur ? Elle n'apparaît pas dans le bilan thermique de la Terre établi par le GIEC. Si elle n'est pas évacuée vers l'espace, elle reste à la surface du globe et réchauffe son atmosphère. Ce silence est d'autant plus curieux, que le sujet traite précisément du réchauffement climatique.

2-4 Liens avec les phénomènes météorologiques

Quelle que soit l'importance de l'effet de serre, il est nécessaire de faire le lien avec les phénomènes météorologiques à la surface du globe. Or, jusque-là, le réchauffement climatique est envisagé suivant un modèle mathématique théorique, fixé *a priori*, sans appréhender la spécificité de la troposphère.

La surface du globe terrestre et la troposphère sont très hétérogènes : des océans et des terres émergées, des forêts foisonnantes et des déserts arides, des glaces et des nuages dont l'étendue varie constamment. Il est donc nécessaire de compléter le modèle « effet de serre », pour lequel l'air est immobile (« solide », selon Fourier) pour simuler l'impact sur les phénomènes météorologiques et faire le lien avec les dérives constatées.

Au rétro-rayonnement, les climatologues associent des rétroactions positives et négatives, mettant en scène l'eau dans tous ses états : les glaciers, les eaux de surface et les nuages. Comment circulent-ils ? Quel est l'impact du réchauffement sur la vapeur d'eau et les phénomènes météorologiques extrêmes ?

C'est l'ambition du *modèle de circulation générale*. Il offre une vision pragmatique du climat, ce qui touche notre environnement immédiat, et se rapproche fortement de la description d'une machine thermiqueⁱⁱ ou, plus exactement, d'un maillage de machines thermiques, avec une multitude de sources chaudes et de sources froides locales.

Faut-il nécessairement que l'apport d'énergie anthropique vienne des couches supérieures de l'atmosphère ? La combustion des ressources fossiles libère sa chaleur au sein même du modèle de circulation générale, bien avant que le CO₂ issu de cette combustion ait atteint la tropopause.

ⁱ Pour établir cette estimation, nous avons pris comme hypothèse la répartition des énergies fossiles entre charbon, gaz naturel et pétrole de 2008.

ⁱⁱ voir plus loin, au § 3.5

2-5 Limites de l'effet de serre

Pour que l'effet de serre soit dominant, il faudrait rassembler trois conditions :

La première est que l'atmosphère soit figée en une sorte de gélatine. Que l'air ne soit pas brassé par des courants de convection, due à la différence de densité de l'air chauffé au contact du sol et de l'air froid situé en altitude, ni par advection entre les régions chaudes et les régions froides.

La seconde condition est qu'il n'y ait alors pas de transferts thermiques par conduction, comme cela est le cas dans les solides où l'agitation thermique des molécules se transmet de proche en proche par l'intermédiaire des forces de liaison intermoléculaires, ni transports d'énergie lors des collisions entre molécules voisines.

La pression atmosphérique résultant de la fréquence de ces collisions, il s'en suit que plus la pression est élevée et plus les molécules vont transmettre leur énergie à leurs voisines au cours de leurs collisions. Il faut donc atteindre des altitudes très élevées, et des pressions très faibles, pour que les collisions intermoléculaires soient suffisamment peu nombreuses pour que les cessions d'énergie thermiques s'exercent essentiellement par rayonnement.

Cela ne concerne qu'une fraction infime de l'atmosphère, bien moins de 1 %. Celle pour laquelle les molécules sont indépendantes les unes des autresⁱ.

Dans la troposphère et dans les couches intermédiaires de l'atmosphère, les collisions intermoléculaires sont trop nombreuses pour que le rayonnement soit dominant. Une molécule de CO₂ a plus de chance d'être excitée à la suite d'une collisionⁱⁱ que par un photon infrarouge.

La troisième condition est que la température soit uniformément répartie, comme cela est le cas à l'échelle de l'héliothermomètre de *de Saussure* ou d'une serre. Mais, cela peut-il l'être à l'échelle de la Terre ?

Cette condition ne pourrait être réalisée qu'à la condition que la Terre soit plate. Alors, le rayonnement solaire serait uniforme sur toute sa surface et l'analogie avec l'héliothermomètre de *de Saussure* serait en partie possible.

Mais, la Terre n'est pas plate, elle est sphérique, et cela change tout. L'angle d'incidence du rayonnement solaire et la température varient en chaque point de sa surface. Il s'en suit des phénomènes d'advection importants entre les régions chaudes et les régions froides, que ce soit entre l'équateur et les pôles, mais aussi entre les méridiens au zénith et ceux à l'aube ou au crépuscule.

Aucune des trois conditions n'est remplie. Cela ne veut pas dire pour autant que l'effet de serre n'existe pas, mais simplement qu'il n'est pas la caractéristique principale du

ⁱ Écoulement moléculaire, en opposition aux écoulements visqueux propres aux couches denses, dont la troposphère, qui représente 80 % de la masse de l'atmosphère et la totalité de la vapeur d'eau qu'elle contient.

ⁱⁱ La concentration de CO₂ dans l'atmosphère étant de l'ordre de 400 ppm, cela veut dire qu'une molécule de CO₂ est entourée par 2 500 molécules d'azote ou d'oxygène.

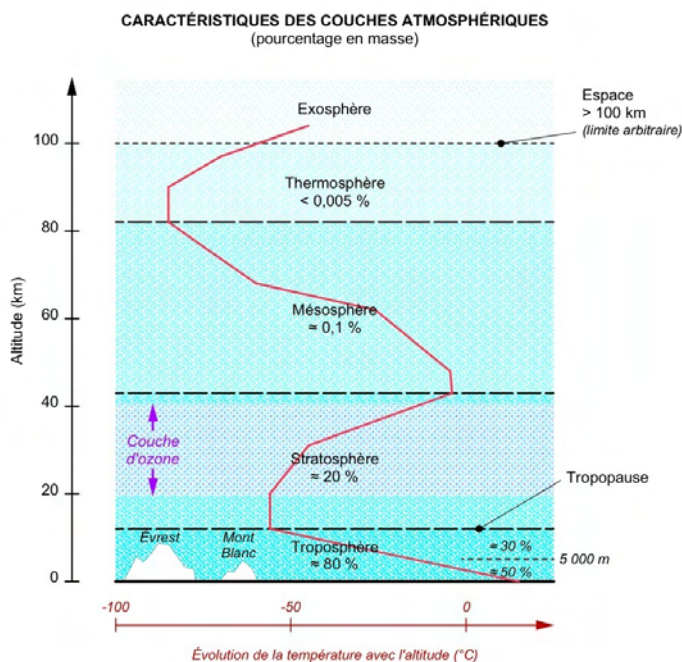
climat. Celui-ci est beaucoup plus conditionné par l'hétérogénéité du rayonnement solaire à la surface du globe terrestre et la mise en circulation de masses fluides (océans et atmosphère) que cela entraîne à sa surface.

3 – Approche thermodynamique de l'atmosphère terrestre

Dans la note de bas de page citée plus hautⁱ, le GIEC ajoute : « Selon le concept de FR (Forçage Radiatif) utilisé habituellement dans les précédents rapports du GIEC, toutes les conditions à la surface et dans la troposphère sont fixes. »¹²

C'est là un *a priori* regrettable, car il n'y a rien de fixe à la surface du globe et dans la troposphère. Les phénomènes météorologiques sont là pour en attester. Fourier indiquait lui-même que les mouvements de l'air jouent un rôle prédominant : « La présence de l'atmosphère et des eaux a pour effet de rendre la distribution de la chaleur plus uniforme ». Il n'avait pas le recul nécessaire pour intégrer les travaux de Carnot à son mémoire sur la température du globe terrestre et compléter son analyse. Si nous vivons dans un climat tempéré, c'est justement grâce à ces mouvements de l'air au sein de la troposphère et au caractère irrégulier des conditions qui y règnent.

3-1 Caractéristiques de la troposphère



L'atmosphère est composée de plusieurs strates, correspondant à des renversements du gradient thermique avec l'altitude.

La troposphère, la strate la plus proche du sol, est la plus dense et celle dont le gradient thermique est le plus régulier.

Les nuages ne pouvant pas s'élever au-delà de la tropopause, la vapeur d'eau reste confinée dans la troposphère.

La composante radiale des courants convectifs est très limitée, les masses d'air se déplacent essentiellement parallèlement à la surface du globe, suivant la composante tangentielle.

Lien avec l'image originelle perdu.

La troposphère est la couche atmosphérique la plus mince de l'atmosphère, mais représente 80 % de sa masse et contient pratiquement toute la vapeur d'eau. C'est là qu'opèrent les courants convectifs et se manifestent les phénomènes météorologiques.

ⁱ Voir § 2.3, page 17

L'image de la serre évoque spontanément une température homogène et douce, mais absolument pas la pluie ni le vent. Elle est mal choisie pour qualifier la troposphère. Les températures y sont très inégales, les vents puissants et les pluies abondantes.

La stratosphère constitue une barrière à l'élévation de l'air chaud, un peu à la manière du plafond d'une serre. L'analogie avec une serre s'arrête là.

3-2 Importance des variations et des déséquilibres

On ne peut limiter la crise climatique au seul paramètre de la température moyenne. C'est une composante statistique très réductrice. Il peut exister différentes amplitudes autour d'une même moyenne. Ainsi, la température moyenne de ce mois de juillet 2021, en France, un jour chaud, un jour froid, un jour à chercher l'ombre, et à se rafraîchir, et le lendemain à enfiler un pull, pour de nouveau passer la journée suivante devant le ventilateur... reste dans les normes. Ce n'est pourtant pas la même chose à vivre au quotidien qu'une température régulière. Ce n'est pas seulement inconfortable, cela met les organismes à rude épreuve. Les plus faibles en pâtiront les premiers, ce qui entraînera des conséquences sur toute la chaîne alimentaire. On ne peut donc pas se suffire d'une appréciation moyenne.

Si l'évolution thermique du climat est lente (quelques centièmes de degrés par an), les phénomènes météorologiques extrêmes sont de plus en plus fréquents et importants : ouragans et typhons, sécheresses ou inondations dramatiques...

Le climat c'est aussi (surtout) la pluie et le vent...

Là encore, les appréciations moyennes ne rendent pas compte de la situation climatique. Sécheresses et inondations ne modifient pas la masse totale de l'eau. C'est sa répartition dans l'espace et dans le temps qui conditionne les biotopes locaux. Idem pour le vent.

3-3 Advection / Convection

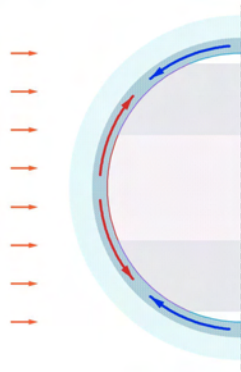
La vapeur d'eau et les courants convectifs retiennent d'importantes quantités de chaleur, qui tournent autour de la Terre pour former les alizés ou les tempêtes tropicales...

À la différence d'une serre, il n'y a pas de parois pour limiter les déplacements d'air et maintenir une température quasi uniforme à l'intérieur. Au contraire, il y a de fortes différences de températures entre l'équateur et les pôles.

Si l'air chaud ne s'élève pas au-delà de la Tropopause, il est libre de faire le tour du globe, formant des courants convectifsⁱ très importants. C'est donc tout l'inverse de ce que l'on peut observer dans une serre !

ⁱ Pour être puriste, on devrait parler de courants « advectifs », car la composante horizontale est mille fois supérieure à la composante verticale. Le terme de convection est employé dans son sens large.

La Terre est-elle une serre ou une machine thermique ?



*L'atmosphère est représentée en bleu.
Par convention, son épaisseur est fixée à
100 km. Au-delà, c'est l'espace.*

*La troposphère, en bleu foncé, est la couche
atmosphérique la plus fine (un peu plus
de 10 km), mais représente 80 % de la masse
de l'atmosphère.*

*La différence de températures entre
l'équateur et les pôles y crée de très impor-
tants courants « advectifs ».*

Vue de la Terre suivant le plan écliptique

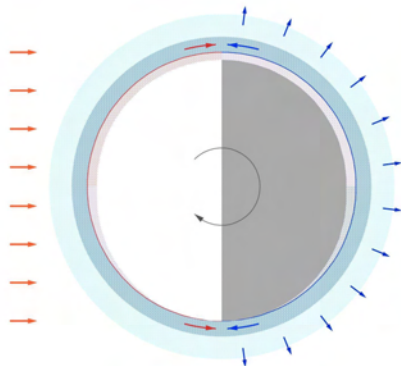
L'épaisseur de la troposphère sur ces illustrations (en bleu plus soutenu) est volontairement très dilatée, de façon à représenter les courants convectifs.

À l'échelle du dessin, l'épaisseur du trait serait trop grossière pour représenter celle de la troposphère.

Elle serait de l'épaisseur d'une feuille de papier autour d'un ballon de hand-ball.

C'est dire l'importance de la composante tangentielle des courants thermiques, à la surface de la planète, par rapport à la composante radiale.

La rotation de la Terre sur elle-même induit une autre source de dissymétrie thermique due à l'inertie des sols. Ceux-ci sont chauffés par le rayonnement solaire tout au long de la journée, pour se refroidir la nuit.



*Le sol se réchauffe le jour et se
refroidit la nuit plus vite que
l'atmosphère, ce qui entretient le
déséquilibre thermique des masses
d'air.*

Vue de la Terre dans l'axe perpendiculaire à l'écliptique

Il n'y a donc jamais d'équilibre thermique à la surface du globe. Ces différences de distribution de la chaleur engendrent la mise en mouvement des couches basses de l'atmosphère comme des océans. Le rayonnement solaire et la rotation de la Terre génèrent ainsi des courants convectifs tangentiels entre l'équateur et les pôles, mais également dans le plan perpendiculaire.

3-4 L'Anthropocène

Durant la préhistoire, les humains étaient un peuple de chasseurs-cueilleurs. Ce n'est qu'au Néolithique que sont apparues l'agriculture et les premières cités. Depuis cette

époque (environ 8 000 ans av. J.-C.), l'Homme n'a eu de cesse de façonner la nature à son profit. Il s'est servi du vent pour moulinier son blé et traverser les mers. Il a irrigué les terres pour les rendre fertiles. Jusque-là, la population était modérée et les activités humaines n'affectaient que les microclimats locaux : les champs ; les cités.

La révolution industrielle du XVIII^e siècle a introduit un changement majeur : l'exploitation du charbon pour faire tourner les premières machines à vapeur. Cela va entraîner des conséquences en cascades, avec une accélération de la démographie, l'intensification des cultures et, surtout, un apport thermique endogène (dont la production de CO₂ est la signature).

Le siècle suivant a été particulièrement riche en avancées scientifiques et industrielles, donnant naissance à de nombreuses inventions qui vont révolutionner les modes de vie. Les moteurs à combustion interne ont remplacé les machines à vapeur, grâce à l'exploitation du pétrole.

La reconstruction, à la suite de la Seconde Guerre mondiale, a été un formidable accélérateur des activités humaines, allant de pair avec une démographie exponentielle. La seconde moitié du XX^e siècle voit la mécanisation de l'agriculture, entraînant un exode rural, et une accélération constante de l'exploitation des ressources de la planète.

Depuis l'avènement de l'ère industrielle, les activités humaines alimentent les déséquilibres par l'exploitation d'énergies endogènes (venant des entrailles de la Terre) et la production d'importantes quantités de vapeur d'eau au sein même de notre biotope. Ces excès anthropiques s'ajoutent directement à la chaleur et à la vapeur d'eau transportées par les courants convectifs d'origine solaire...

La composante horizontale (tangentielle) des courants convectifs est bien plus importante que la composante verticale (radiale). Si les courants ascendants sont importants au sein d'une tempête tropicale, celle-ci parcourt de longues distances avant de diminuer d'intensité. On devrait plutôt parler de courants « advectifs ».

Contrairement au rayonnement solaire, les rejets de chaleur de nos activités ne réchauffent pas ou peu les sols. Cet apport d'énergie endogène n'est donc pas évacué immédiatement vers l'espace par rayonnement infrarouge, comme le flux thermique solaire. Au lieu de cela, il est injecté au sein des courants thermiques tangentiels, dans les airs ou les eaux de surface, et y séjourne longuement.

Cette chaleur finit par gagner l'espace, mais la source thermique continue d'alimenter les courants convectifs. La quantité de chaleur contenue (retenue) est renouvelée. Or, les activités humaines ne cessent de croître, alimentant toujours davantage les courants convectifs, en énergie (élévation directe de la température) et en vapeur d'eau (allongement du temps de séjour).

Il faut moins de 3 TW¹³ pour accroître la température de l'atmosphère au rythme de 2 °C par siècle. Or, l'exploitation des énergies endogènes représente actuellement environ 17 TW.

Ces notions de temps de séjour et de renouvellement sont essentielles pour comprendre les changements climatiques.

—

La vapeur d'eau renferme une grande quantité de chaleur. La chaleur latente de vaporisation est 600 fois élevée pour passer de l'état liquide à celui de vapeur, à la même température, qu'il n'en faut pour élever la température de l'eau liquide de 1 °C. Le simple changement d'état permet donc de stocker ou de libérer une importante quantité de chaleur, sans affecter la température de l'eau, liquide ou vapeur.

Cela se passe à toutes les températures. C'est l'humidité relative de l'air. Ce phénomène est à l'origine de la fraîcheur matinale, due à l'évaporation de la rosée.

Cette propriété est utilisée notamment dans les tours d'évaporation des centrales nucléaires pour les refroidir. La chaleur reste près du sol, sans modification notable de la température de la troposphère. Inversement, la condensation de cette vapeur d'eau va libérer sa chaleur et la communiquer à l'environnement. C'est à ce moment-là que la température va augmenter. C'est le principe des chaudières à condensation, où l'on récupère la chaleur de la vapeur d'eau pour réchauffer en partie nos logements.

La vapeur d'eau joue donc un rôle important dans le réchauffement climatique, en captant la chaleur et en la stockant dans les basses couches de l'atmosphère, en alimentant les masses nuageuses et les épisodes de pluies diluviennes.

3-5 La machine thermique terrestre

Pour *Wikipedia* :

*Une **machine thermique** est un mécanisme permettant d'effectuer un travail à l'aide de sources de chaleur de température différentes. La théorie des machines thermiques s'attache à la description et à l'étude physique de certains systèmes thermodynamiques qui permettent de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique, et vice versa. Fondée au milieu du XIXe siècle, elle s'appuie sur la thermodynamique, et en particulier sur ses deux premiers principes.*

Pour *Wiliversite* :

*Un **moteur** est une **machine thermique** qui **produit du travail** en utilisant la chaleur provenant de la source chaude, mais une partie de cette chaleur part vers la source froide.*

Le parallèle avec la Terre est saisissant. Nous avons une source chaude : l'équateur, et une source froide : les pôles, et nous avons une génération d'un mouvement mécanique entre les deux : les courants éoliens et marins.

La Terre est une machine thermique qui fonctionne avec deux caloporteurs : l'air et l'eau, deux systèmes parallèles qui interagissent.

Comme l'écrivait Fourier : « *Tous les effets terrestres de la chaleur du Soleil sont modifiés par l'interposition de l'atmosphère et par la présence des eaux. Les grands mouvements de ces fluides rendent la distribution plus uniforme.* »

Ces mouvements des eaux et de l'air sont une conséquence du rayonnement solaire différentiel sur la surface du globe. Ils ne sont pas seulement un effet de diffusion de la chaleur, une partie de cette chaleur est transformée en énergie mécanique.

Les vents sont la composante mécanique directe de l'énergie solaire, utilisée par l'Homme depuis l'Antiquité pour traverser les mers et moulinier le grain. Ils transportent surtout les nuages, qui sont d'importants réservoirs de chaleur latente, ce qui joue un rôle de modération des températures terrestres.

Les cours d'eau sont une composante mécanique indirecte de l'énergie solaire, nés de l'interaction entre les vents et les océans. Il s'agit du cycle de l'eau : de l'évaporation de la surface des océans, au transport de la vapeur d'eau par les vents au-dessus des reliefs, aux précipitations sur les sols, jusqu'aux moulins à aubes qui captent l'énergie mécanique des rivières...

La Terre est donc une machine thermique à plusieurs étages ou une superposition d'une infinité de machines thermiques locales.

Énergie thermique et énergie motrice, quelle différence ?

L'énergie thermique, la chaleur, se caractérise par une agitation désordonnée des molécules. Quand la température augmente, elles prennent plus de place, ce qui se traduit par la dilatation des solides et la perte de densité des fluides.

Pour qu'il y ait un mouvement macroscopique, il faut donner une orientation privilégiée à l'agitation moléculaire. C'est le rôle du piston dans nos moteurs thermiques. L'air chaud peut se dilater en le poussant, transformant une partie de l'énergie thermique en énergie motrice, utile pour réaliser un travail.

Toutefois, cette orientation privilégiée n'existe que tant qu'elle est entretenue. In fine, l'agitation moléculaire redeviendra désordonnée, pure chaleur.

L'on peut résumer cela en disant que l'énergie motrice (mécanique ou électrique) est une énergie noble, mais éphémère, et que la chaleur est la forme dégradée de toute énergie.

En considérant, dans un premier temps, uniquement le comportement de l'air, nous pouvons appliquer les lois de la thermodynamique pour décrire le fonctionnement de la machine thermique comme un moteur à air chaud (à l'instar du moteur Stirling). Celui-ci transforme une partie de l'énergie thermique en énergie motrice.

L'énergie motrice des courants convectifs se dissipera fatalement en chaleur (par frottements de toutes sortes) et finira tôt ou tard par gagner les hautes couches de l'atmosphère et l'espace. La chaleur cédée aux couches supérieures de l'atmosphère équilibre globalement celle arrachée au sol par convection, mais cela n'est ni instantané ni complet.

Au niveau du bilan thermique de la Terre, la composante tangentielle n'intervient pas. Les courants convectifs peuvent être vus comme une zone tampon. En régime stabilisé, la chaleur qui y entre compense celle qui en sort (renouvellement). Cela est transparent vis-à-vis du bilan thermique de la Terre, mais uniquement dans l'hypothèse où rien ne change.

Le rapport Hansen, en 1988, a focalisé l'attention sur une relation directe entre le climat et le bilan thermique de la Terre, mais a ignoré ce qui se passe à l'intérieur de la zone tampon. Or, ce qui nous préoccupe, c'est justement l'impact des activités humaines. Celles-ci concernent précisément cette zone tampon, là où l'on vit, et ce qui s'y passe caractérise le climat.

Qu'advierait-il si le Gulf Stream s'arrêtait ou changeait de sens ? Cela ne modifierait pas le bilan thermique global de la Terre, mais les conditions climatiques de l'Europe en seraient bousculées !

4 – Cycle de l'eau

Les climats locaux et les biotopes sont les fruits de l'interaction entre l'atmosphère et les océans et plus particulièrement la vapeur d'eau. Non seulement celle-ci agit comme une super éponge à calories, mais elle arrose les terres émergées, y apportant la vie, qui, à son tour, façonne le climat.

Pour saisir l'importance de l'association de l'eau et des courants convectifs, il suffit peut-être d'imaginer ce que serait la Terre en l'absence de cette composante essentielle. Les nuages ne seraient pas portés par les vents pour en déverser l'eau sur les terres et permettre le développement de la végétation. Sans pluies, il n'y aurait pas de rivières ni de nappes phréatiques...

4-1 La pluie et le beau temps

Après que les courants aériens aient transporté la vapeur d'eau due à l'évaporation des océans vers les terres et que la pluie abreuve la végétation et lui apporte les sels minéraux nécessaires à son développement, celle-ci agit sur la composition de l'air, captant le CO₂ par photosynthèse et modifie la nature des sols (dont le spectre de rayonnement).

L'alternance du passage de masses d'air chaudes et froides favorise la diversification des écosystèmes et leur résistance. Les plantes ont besoin de périodes de pluies et de périodes chaudes pour se développer, comme de périodes froides pour se reposer. C'est cette alternance qui caractérise un climat.

Le climat méditerranéen n'est pas le même que le climat océanique ou le climat continental. Il y a une aussi grande variété de microclimats qu'il y a d'écosystèmes, avec des capacités de résilience différentes. Les couples « microclimat – écosystème » n'ont pas tous la même capacité d'évolution. Quand on parle de réchauffement climatique, on se livre à une globalisation, au risque de devenir caricatural. Les effets ne sont pas uniformes.

La Terre a déjà connu de profonds bouleversements de climat. Durant le Jurassique, la flore et la faune étaient très différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui. La Terre en elle-même s'est parfaitement adaptée à ces changements. On ne peut pas en dire autant des écosystèmes.

4-2 Importance du cycle de l'eau

Grâce à la chaleur latente de l'eau, les calottes polaires maintiennent la planète dans une fourchette de température d'une dizaine de degrés, durant les ères glaciaires, alors qu'elles étaient nettement supérieure durant le Jurassique, alors qu'il n'y avait pas de calottes glaciaires.

La végétation couvre le sol d'humus, qui participe à la retenue des eaux de ruissellement, lors des pluies. Elle favorise leur pénétration dans le sol pour alimenter les nappes phréatiques, essentielles à leur développement et leur résistance durant les périodes sèches...

C'est une dynamique vertueuse qui favorise la vie. C'est l'eau, transportée par les courants convectifs qui fait la météo et qui caractérise le climat et la vie terrestre. Toucher à l'un ou à l'autre, c'est mettre la vie en danger.

Février 2021, le robot *Perseverance* s'est posé sur le sol de Mars, dont la mission est de trouver des traces de vie ayant pu apparaître sur la planète rouge, lorsqu'il y avait de l'eau à sa surface.

Les premières photos montrent un sol minéral uniformément rouge.

Sur Terre, la dernière semaine de février est d'une douceur printanière sur la côte atlantique de la France, tandis que le Texas connaît une vague de froid historique...

Au début de l'été 2021, c'est l'inverse. L'ouest du Canada connaît un pic de chaleur, avec des températures qui avoisinent les 50 °C, alors qu'elles peinent à dépasser les 20 °C sur l'Europe.

Cela montre l'importance du déplacement des masses d'air chaud ou froid pour les écosystèmes, alors que cela affecte peu les concentrations locales de CO₂ dans l'atmosphère

4-3 Un double déséquilibre hydrique

La génération de vapeur d'eau va de pair avec la diminution des nappes phréatiques (jeu à somme nulle). Cela impacte directement notre biotope en modifiant les conditions de vie locales et ne peut aller que dans l'amplification des instabilités et le renforcement des phénomènes extrêmes.

L'appauvrissement des nappes phréatiques entraîne des sécheresses de plus en plus importantes, tandis que l'excès de vapeur d'eau dans l'atmosphère accroît l'ampleur des précipitations. Il y a ainsi un phénomène d'emballement climatique. Les importants incendies de forêt que nous connaissons depuis quelques années témoignent de ce dérèglement et y participent à leur tour, dans un effet boule de neige.

Un feu de forêt produit beaucoup de chaleur et beaucoup de vapeur d'eau. Ainsi, après avoir connu un gigantesque incendie de forêt, fin 2019, l'Australie a connu des inondations ravageuses quelques semaines après.

Il faut des décennies pour reconstituer une forêt. Or, l'on observe une accélération des phénomènes destructeurs, qui ne permet pas le renouvellement forestier (voir annexe E).

5 – Phénomènes en jeu dans le réchauffement climatique

5-1 La machine thermique terrestre naturelle

Une machine thermique a besoin d'une source chaude, d'une source froide et d'un caloporteur. La troposphère répond à ces exigences. Nous avons globalement une masse d'air chaud à l'équateur et une masse d'air froid à chacun des pôles, qui s'affrontent suivant un schéma relativement stable en fonction des saisons. Les vents forment la composante mécanique de ce système.

Voilà pour le schéma de principe. Toutefois, la réalité terrestre est plus complexe à mettre en équations. Contrairement aux moteurs à air chaud, dont les mécanismes sont bien délimités, la Terre est un milieu ouvert.

La première singularité vient de la répartition de la température autour du globe. Nous n'avons pas une machine thermique unique, mais une cascade de machines thermiques avec des sources chaudes et des sources froides locales, qui interagissent entre elles, et qui se déplacent constamment.

La seconde singularité vient que nous n'avons pas un, mais deux caloporteurs : l'air et l'eau des océans. Ces deux systèmes se superposent avec des inerties différentes et interagissent. Il n'y a jamais équilibre.

La troisième singularité est due à la présence de la vapeur d'eau. C'est un élément déterminant dans les interactions locales et la modération des variations climatiques. Cela est à l'origine des climats locaux qui favorisent la diversité des espèces végétales et animales.

La quatrième singularité et non la moindre tient au vivant. L'eau est à la source de la vie terrestre, qu'elle soit végétale ou animale et même minérale. Sans la vapeur d'eau, il n'y aurait pas d'érosion. Il n'y aurait pas formation d'alluvions pour fertiliser les sols.

La Terre est ainsi une machine thermique à condensation, transportant des masses de vapeur d'eau et animée par une multitude de sources thermiques, créant des courants convectifs en constante évolution...

La météorologie suit de près ces phénomènes et s'évertue à prédire le temps qu'il va faire, ce qui est important pour les cultures et les récoltes.

Mais, ce n'est pas tout. Il y a une autre source de chaleur qui régit la planète : la chaleur tellurique. Elle vient du noyau central de la Terre et de l'activité radioactive au sein du

manteau terrestre. Cette chaleur interne agit par en dessous. Comme elle se heurte à la barrière thermique des régions chaudes, elle s'évacue majoritairement par les régions froides : le fond des océans et les terres gelées (pergélisol et glaciers).

La fonte de la glace ne modifie pas la température atmosphérique, mais fait varier le niveau des océans et modifie le moment d'inertie de la Terre et l'inclinaison de son axe de rotation (par transport de masse). Cette action imperceptible explique la périodicité des périodes glaciaires et interglaciaires que la Terre a connu durant le Quaternaire.

Elle explique également les températures atteintes lors des ères interglaciaires, comme le Jurassique, dès lors que les calottes polaires ont fondues. La chaleur tellurique s'écoule directement dans l'atmosphère pour alimenter les courants convectifs.

C'est précisément ce que produisent les activités humaines sur le climat, en s'affranchissant du bouclier glaciaire.

5-2 Que se passe-t-il quand les activités humaines ajoutent de l'énergie endogène et de la vapeur d'eau à ce système ?

L'impact anthropique se concentre à la surface libre de la planète, là où se caractérise le climat et où l'on constate les effets de sa dérive.

Comme nous l'avons vu au chapitre 3-4, les énergies endogènes se déversent dans notre environnement immédiat : les basses couches de l'atmosphère et les eaux de surface. Elles alimentent durablement la circulation tangentielle des courants convectifs, en renforçant la composante mécanique et en augmentant la chaleur des masses de fluides déplacées.

L'action de l'Homme est également responsable du tassement et de l'imperméabilisation des sols, qui entraînent les eaux de ruissellement plus rapidement vers les océans. Les sols n'absorbant plus cette eau, le niveau des nappes phréatiques diminue. Celles-ci ne nourrissent plus la végétation de la même façon. Cela a un impact sur le type de végétation et sur la température des sols. Le surplus de vapeur d'eau va retenir davantage la chaleur au sein des courants convectifs.

Cela modifie le climat en profondeur. Il ne s'agit pas d'une simple augmentation globale de la température, des vents et de l'hygrométrie. Cela perturbe la danse des masses d'air polaire et équatoriale, la rendant plus instable, lui imprimant un rythme différent.

On ne peut donc pas isoler une cause d'impact climatique sans prendre en compte ses effets. Nous sommes dans un système chaotique. Les réactions ne sont pas (plus) proportionnelles aux perturbations qui les provoquent.

5-3 Effets en cascades

Dans leur affrontement, les masses d'air chaud et d'air froid se déchirent pour former des vortex (dépressions et anticyclones) dont la formation suit un rythme saisonnier.

L'excédent de vapeur d'eau et la chaleur endogène dus aux activités humaines viennent gonfler ces vortex, avec l'accentuation des phénomènes météorologiques : pics de chaleur et épisodes de fortes précipitations.

Des vortex géants peuvent alors se produire, comme l'évoque l'article du 8 avril 2021 de BFM.TV (voir annexe D).

Rien ne semblant enrayer cette tendance, l'on peut craindre que ces vortex soient de plus en plus importants et accentuent les oscillations des masses d'air tropicales et polaires, alternant des périodes froides et chaudes, sèches et pluvieuses au détriment de conditions tempérées.

Cette divergence climatique pèse également sur la fonte des glaces et son rôle de modération climatique. Sans ce bouclier climatique, c'est la chaîne des écosystèmes qui sera rompue. Or, nous sommes au bout de cette chaîne.

Influences du vivant sur le climat

J'ai dans ma bibliothèque un petit fascicule : *SAUVER LE BOCAGE*ⁱ, datant du milieu des années 1970. À l'époque, c'est le trou dans la couche d'ozone, nous protégeant du rayonnement ultraviolet, qui est la préoccupation émergente. L'on est encore très éloigné de la crise climatique.

SAUVER LE BOCAGE dépeint pourtant le rôle important joué par la structure bocagère sur les microclimats, jusqu'à influencer le climat de toute une région. L'on y mesure l'interaction forte entre le vivant et le climat. Il fait prendre conscience que c'est cette interaction qui est primordiale pour notre survie. L'essentiel se passe à la proximité immédiate de la surface du globe, à hauteur de haies. Il pointe l'importance du vent et de la régulation de l'eau pour qu'elle pénètre le sol, sans l'éroder, afin que celui-ci nourrisse les racines des végétaux.

Le bocage est une forêt linéaire où les parcelles sont des sortes de clairières. On est alors dans un compromis séculaire entre la nature et l'agriculture.

La mécanisation et la course au rendement ont motivé l'arasement des haies et l'annexion des chemins creux pour établir de grandes parcelles. La disparition du bocage entraîne des conséquences importantes de l'impact du vent sur les cultures et sur la faune, sur le cycle de l'eau et l'érosion des sols.

À propos de l'impact du vent

Lorsqu'aucune barrière naturelle ne s'interpose pour le contrer, le vent inflige des dommages parfois très graves aux cultures. En milieu ouvert, c'est-à-dire non protégé par un maillage (fermé)

ⁱ Ouvrage de compilation de Jean-Claude Marguerite, édité par le CRÉPAN (Comité Régional d'Étude pour la Protection et l'Aménagement de la Nature en Normandie), où il reste quelques exemplaires, sinon on peut en obtenir une copie à la BNF <https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb34710064k>

de haies, il nous est possible de constater les effets suivants : verse de récoltes (céréales) ; lacération des feuilles ; chute de fleurs avant fécondation ; ... ; assèchement plus rapide du sol...

La haie freine l'érosion éolienne qui peut être très importante sur les terres labourées, sur les sols ameublés par de multiples procédés de culture. Les orages de fin d'été permettent d'observer des entraînements du sol assez spectaculaires.

À propos de la régulation des eaux

En périodes pluvieuses, la haie limite les crues des cours d'eau en retenant une grande part de la pluie tombée. L'eau ainsi retenue s'écoule par la suite lentement, ce qui permet sa meilleure infiltration dans le sol et assure un débit plus régulier des cours d'eau. Les crues sont moins fréquentes, moins subites et moins dangereuses que dans les régions où la haie a été éliminée.

(Sinon) la couche superficielle du sol se trouve rapidement imbibée d'eau et vite à saturation ; il est nécessaire de ralentir le ruissellement de l'eau pour lui permettre de s'infiltrer au fur et à mesure des possibilités du sous-sol. D'autant qu'en s'écoulant, cette eau entraîne une érosion qui peut être très importante, surtout à la suite de violents orages ou de longues périodes de pluies.

L'alimentation des réserves phréatiques et la lutte contre l'érosion par eau de ruissellement sont donc deux problèmes intimement liés.

...

Dans ce rôle régulateur de la circulation des eaux, il ne faut pas oublier les zones humides.

Les petits marécages, les étangs, les marais, les ruisseaux et rivières, bordés d'arbres et de roseaux, ainsi que les prés humides qui les côtoient, assument une fonction écologique très importante qu'il convient de ne pas négliger.

Ces zones humides participent avec la haie à la retenue des masses d'eau qu'elles accueillent, évitant dans une large mesure les crues soudaines. Elles alimentent les rivières, les sources, les nappes phréatiques. Cet effet est d'autant plus précieux que la nature géologique du sol est peu propice à la constitution de réserves.

Elles maintiennent une certaine humidité dans l'air, ce qui est directement profitable aux cultures et atténue les écarts climatiques.

À propos de l'impact sur le climat

De par son action sur les vents, la structure bocagère entraîne des modifications climatiques importantes conduisant à la création d'un microclimat, voire d'un climat régional, favorable à la production agricole.

Pour que la croissance d'une plante soit convenable, il est nécessaire qu'elle puisse pomper dans le sol toute l'eau dont elle a besoin, l'air ambiant ne doit être ni trop chaud ni trop agité pour ne pas dessécher le végétal.

Lorsque paraît le soleil, l'humidité du sol s'évapore dans l'atmosphère, c'est l'évaporation, phénomène physique. La plante, elle, rejette par des millions de petits orifices microscopiques de ses feuilles (appelés stomates) de la vapeur d'eau, c'est la transpiration, phénomène biologique.

L'évapotranspiration représente le total d'eau perdue par la terre (évaporation) et par la plante qu'elle porte (transpiration).

Lorsque, du fait de l'absence de haies ou de bandes boisées, le soleil devient trop intense, l'agitation de l'air trop forte, la plante transpire une plus grande quantité d'eau qu'elle n'en puise dans le sol, lui-même soumis à l'évaporation. Pour diminuer la perte d'eau, les millions de stomates de la plante se ferment, plus ou moins complètement, afin de maintenir un maximum d'humidité pour retarder

la déshydratation. Or, comme la croissance de la plante est due à l'échange gazeux avec l'atmosphère opéré justement par les stomates par le processus de photosynthèse, ceux-ci fermés, la croissance s'en trouve d'autant ralentie et finit même par être stoppée.

...

Les arbres en transpirant rendent l'air plus humide ; il retient ensuite ainsi mieux les nuages qui arrivent sur les régions bocagères. Les gouttes de pluie ont moins tendance à s'évaporer pendant leur chute ; c'est ainsi que le niveau des précipitations se trouve augmenté de 1 à 2 % en général, selon Geïser. De plus, les nuages sont mieux alimentés par l'évapotranspiration du sol.

—

Le rayonnement solaire et la concentration de l'air en CO₂ sont pourtant les mêmes, que l'on soit sur une parcelle de bocage ou de la plaine dépourvue de haies. Ce qui fait la différence entre les deux surfaces, sur leur viabilité, leur résistance aux intempéries et aux maladies, c'est l'impact du vent et de l'eau sur le vivant. En retour, celui-ci influe sur le climat.

Quarante-cinq ans plus tard, nous pouvons observer des effets similaires de l'impact de l'Homme sur le climat, les eaux et les sols, mais cette fois à l'échelle de la planète et non plus à celle de la parcelle d'à peine un hectare.

Durant ce temps, l'Homme n'a eu de cesse d'alimenter la machine thermique terrestre, gonflant les vents et les pluies, tout en abaissant le niveau des nappes phréatiques et en artificialisant les sols. Se focaliser sur la décarbonisation des activités humaines nous éloigne de l'essentiel. Nous avons tout intérêt à vivre en harmonie, en intelligence, avec la nature.

En guise de conclusion partielle

La serre et la machine thermique donnent deux représentations très différentes du fonctionnement de l'atmosphère terrestre. Dans la première, l'atmosphère y est calme, presque immobile, « solide » comme le disait Fourier, et la température homogène. C'est tout l'inverse pour le second. Pourtant, ces deux visions sont justes et se superposent. La première s'intéresse à la propagation radiale, qui affecte le bilan thermique de la planète, tandis que les courants convectifs de la seconde tournent indéfiniment autour du globe. Tout dépend donc de l'altitude à laquelle on observe la Terre.

Au niveau du sol et de la troposphère, la Terre fonctionne essentiellement comme une machine thermique. Une partie de l'énergie thermique engendre les courants tangentiels qui retiennent et diffusent la chaleur autour du globe. C'est ce temps de séjour dans les basses couches de l'atmosphère qui conditionne la température de la Terre.

Les activités humaines baignent dans la machine thermique terrestre et l'alimentent par l'exploitation d'énergies endogènes. Cette chaleur ne vient pas du Soleil. Elle s'y ajoute, mais n'est pas de même nature. L'ajout au bilan thermique naturel de la Terre est marginal. En revanche, elle s'accumule significativement dans notre environnement immé-

diat : les eaux de surface et les couches basses de l'atmosphère, provoquant un réchauffement global progressif.

L'on n'a pas besoin de l'apport d'énergie spontanée d'un « forçage radiatif » pour emballer la machine thermique terrestre. Les productions anthropiques de chaleur et de vapeur d'eau suffisent à cela.

Les équipes qui développent les « modèles de circulation générale » semblent avoir les moyens d'y intégrer le maillage de ces sources locales de perturbation du climat. Espérons qu'elles ne tardent pas trop à franchir le pas.

—

Si l'on ne s'intéresse ni aux apports de chaleur endogènes ni aux perturbations du cycle de l'eau, toutes les actions entreprises pour enrayer la crise climatique sont vouées à l'échec et l'accroîtront au lieu de l'atténuer.

Se focaliser sur les énergies décarbonées est une erreur dramatique. Le nucléaire n'a rien à envier aux énergies fossiles. Les centrales nucléaires produisent de la chaleur et de la vapeur d'eau comme les centrales thermiques. La focalisation sur le CO₂, deux ans après Tchernobyl, a redoré opportunément l'image de cette industrie. Mais, le CO₂ n'est que la partie visible de l'iceberg. Il est la marque durablement perceptible d'une réaction chimique exothermique. Chaque ppm de CO₂ dans l'atmosphère, depuis l'ère industrielle, témoigne d'un apport de chaleur anthropiqueⁱ. Il est la marque de l'exploitation des ressources fossiles, mais d'autres sources de chaleur endogènes ne laissent pas de traces. Le nucléaire ou la géothermie profonde introduisent de la chaleur issue des entrailles de la Terre dans notre biotope, de façon invisible.

Nous faisons tourner nos usines à tour de bras pour convertir nos voitures et nos chaudières au tout électrique sans nous préoccuper, ou si peu, de la manière de produire le surplus d'électricité nécessaire.

Cela pose un problème de fond. Il n'y a que deux options à court terme pour répondre à une montée aussi rapide des besoins en électricité pour faire fonctionner nos voitures électriques et nos pompes à chaleur :

- soit, l'on rouvre des centrales thermiques ou l'on en construit de nouvelles. Et dans ce cas, la part du parc nucléaire français dans la production électrique sera réduite à 50 % (sans fermer de centrales) par l'augmentation de la demande¹⁴ ;
- soit, l'on construit de nouvelles centrales nucléaires, faisant fi de l'engagement à réduire le parc...

Dans les deux cas, l'on injecte de la chaleur et de la vapeur d'eau dans la machine thermique terrestre.

ⁱ voir dernier paragraphe du chapitre 2.3 – page 19

Seconde partie

Implications

6 – Enjeux climatiques et crise civilisationnelle

6-1 Une cause peut en cacher une autre

La dérive climatique concerne l'ensemble des paramètres du climat : les courants marins ; les vents qui transportent les nuages ; l'eau qui forme ces nuages, arrose les terres et alimente les nappes phréatiques.

Les phénomènes extrêmes se succèdent à un rythme inquiétant. Nous assistons encore cette année à des incendies gigantesques. La cause en est attribuée unanimement au réchauffement climatique.

Même si, en tout état de cause, le réchauffement climatique n'arrange pas la situation, est-ce vraiment là le fruit d'une analyse étayée ou est-ce une réponse réflexe, une réponse par défaut ?

Résoudre la question climatique, réglera-t-il *de facto* la question des incendies ? Ce n'est pas si sûr. Il y a une autre cause à cette situation. Une cause connue, mais insuffisamment considérée, celle de la gestion de l'eau. Les civilisations humaines se sont développées autour des ressources en eau, au bord des fleuves et rivières ou sur le littoral. L'Homme a exploité cette ressource à son profit pendant des millénaires, sans souffrir de sa gestion. Ce n'est plus le cas aujourd'hui.

L'eau est une ressource abondante – elle occupe 70 % de la surface de la Terre – et renouvelable. C'est sa distribution et sa disponibilité qui sont mises à mal par une utilisation sans retenue. Nous puisons sans cesse dans les nappes phréatiques, sans prendre soin de leur renouvellement. Au contraire, l'industrialisation des cultures, le tassement des sols, la suppression des haies et la déforestation, l'urbanisation imperméabilisent les sols. Les pluies ruissellent en surface, appauvrissant les terres. L'eau des fontaines, des piscines, des lacs collinaires ne nourrit pas les nappes phréatiques, n'abreuve pas la végétation. Le cycle naturel de l'eau est rompu. Partout, la sécheresse gagne du terrain, au point qu'un mégot de cigarette peut suffire à provoquer un incendie et ravager une forêt.

Plus la sécheresse s'installe et plus les incendies auront de l'ampleur. Or, un incendie de forêt génère beaucoup plus de vapeur d'eau qu'il ne dégage de CO₂. La chaleur et la vapeur d'eau alimentent les courants convectifs et amplifient leur impact sur le climat. Cela crée un important déséquilibre dans l'atmosphère. L'eau y est en excès. Cette masse colossale retombera fatalement un jour, avec un fort risque de pluies diluviennes. Les ravages au sol sont dévastateurs. La terre ne peut pas absorber cet afflux brutal. La recharge des nappes phréatiques est court-circuitée. La sécheresse n'est plus un phénomène épisodique, conjoncturel, mais devient un phénomène récurrent, structurel. Nous sommes dans un cercle vicieux. Et nous en sommes responsables.

Le déséquilibre hydrique agit autant sur le climat que l'exploitation des énergies endogènes. Nous avons dépassé les capacités de résilience de la nature par nos habitudes de consommation et par notre croissance démographique.

Tout cela est à prendre en compte dans l'évolution du climat. Jusqu'où la résilience de la nature s'exerce-t-elle ? À partir de quand entrons-nous dans un système divergent ? Nous sommes face à un système complexe, dans lequel les interactions sont nombreuses.

Cela se passe à la surface immédiate de la Terre, à la frontière de l'atmosphère avec le sol et les océans. Là où les activités humaines déversent leurs excès.

Le déséquilibre hydrique conduit à un double recul des terres exploitables, d'un côté, par des terres souffrant de sécheresse et, de l'autre, par des terres inondées. Dans le même temps la population mondiale continue de croître à un rythme soutenu, souvent dans les régions du monde les plus menacées par ces phénomènes climatiques¹.

La population humaine mondiale a été multipliée par 10 depuis la révolution industrielle, au XVIII^e siècle, et continue de croître.

Comment éviter que ces populations soient contraintes de migrer vers des terres plus fertiles, dans les régions voisines ? Ces régions étant également tendues, comment échapper à une migration générale vers les régions les moins touchées par la crise climatique ?

L'ampleur des migrations climatiques n'aura rien à voir avec celles des migrations que nous connaissons actuellement. Elle se comptera en centaines de millions de migrants, multipliant par dix, par vingt les afflux que nous connaissons actuellement et que nous ne savons pas intégrer.

Pourrons-nous accueillir ces populations de déracinés sans heurts ? La crise climatique va se traduire rapidement par une crise civilisationnelle générale. Les migrations massives engendreront des différences matérielles et culturelles trop importantes pour éviter les tensions et les conflits. Pourrons-nous préserver longtemps notre douceur de vivre à côté de camps de réfugiés démunis de tout ?

Ne nous y trompons pas, la crise climatique ne se résume pas à deux ou trois degrés de plus à la fin du siècle, elle engendrera un embrasement Nord-Sud généralisé. Si nous n'agissons pas maintenant, notre civilisation telle que nous la connaissons aura disparu d'ici là.

La réponse au « réchauffement » climatique ne peut pas être uniquement technologique. Notre modèle de développement fondé sur la croissance a atteint ses limites. Il faut penser le monde différemment, le penser en termes de responsabilité envers les générations futures et envers les ressources de la Terre. L'avenir doit se construire avec un

¹ Bien que le déséquilibre hydrique ait une cause originelle indépendante, il fait partie intégrante du changement climatique.

esprit de coopération à tous les niveaux, aussi bien étatiques qu'individuels.

6-2 Un monde rempli de bonnes intentions

Les thèses écologiques ont longtemps été l'œuvre de militants marginalisés par une société en recherche de croissance économique. Aujourd'hui, elles sont devenues des sujets centraux, que ce soit dans les discoursⁱ politiques ou dans les messages publicitaires. La question climatique a pris une place de choix et chacun est soucieux d'agir en ce sens, sinon par engagement personnel, au moins pour suivre le mouvement de fond ou pour profiter des mesures financières ou fiscales incitatives. Faire un geste pour la planète est devenu un leitmotiv universel.

Pourtant, la jeunesse manifeste contre l'immobilisme des gouvernements, à l'instar de Greta Thunberg. C'est qu'il y a un décalage entre les discours, les résolutions officielles et les marques concrètes du réchauffement climatique.

« *La maison brûle et on regarde ailleurs* », déclarait Jacques Chirac devant l'assemblée des Nations Unies, en 2002... Il y a vingt ans. La situation est pire aujourd'hui qu'à l'époque. Les rapports du GIEC abondent en ce sens. Ils se succèdent en donnant des perspectives toujours plus préoccupantes. Malgré la sensibilisation des États et les actions menées, le réchauffement s'accélère au lieu de ralentir un peu.

Faut-il en conclure que nous n'agissons pas sur la bonne cause du réchauffement climatique ? Suffit-il d'arrêter les énergies fossiles pour l'enrayer ?

7 – Pour un retour à l'état climatique naturel de la Terre

La bonne nouvelle est qu'il est encore possible d'inverser la dérive climatique. Même si le CO₂ a une durée de vie de plusieurs siècles, le réchauffement climatique n'est pas une fatalité. Si nous agissons en harmonie avec la machine thermique terrestre et le cycle de l'eau, nous pouvons non seulement éviter que la Terre se réchauffe de 2 °C d'ici la fin du siècle, mais nous pouvons revenir en arrière.

Dans la première partie, nous avons vu que la dérive climatique provient de deux causes indépendantes, mais dont les effets se conjuguent : la production énergétique (réchauffement direct) et l'appauvrissement des nappes phréatiques (tarissement des terres). Nous présentons ici des éléments utiles pour nous rapprocher du climat naturel de la Terre et d'éviter les déplacements induits de populations.

ⁱ On peut regretter que cela ne dépasse pas le stade du discours pour investir celui du débat. Mais les politiques sont-ils armés pour cela ? De quelles compétences disposent-ils au sein de leurs équipes pour se risquer sur ce thème ?

7-1 Production énergétique et bilan thermique de la Terre

Le précepte de l'équilibre thermique de la Terre conduit à ignorer les phénomènes d'inertie. Ceux-ci sont nombreux. Les murs chauffés par la Soleil restituent leur chaleur longtemps après qu'il ait disparu de l'horizon. Un ciel couvert est synonyme de nuits chaudes. La fonte des glaces au printemps efface lentement la rigueur de l'hiver...

Plutôt que d'équilibre, il conviendrait mieux de parler de bilan thermique et d'intégrer toutes les sources de chaleurⁱ (flux solaire, énergie tellurique et énergies endogènes).

Nous voyons alors que les énergies endogènes, tirées des entrailles de la Terre par les activités humaines, s'ajoutent au bilan thermique naturel. Si l'on augmente la chaleur à évacuer, la température d'équilibre suivra la même tendance. C'est une question de pure logique.

La première conclusion est simple : il faut impérativement cesser la production d'énergie endogène, qu'elle soit carbonée ou pas.

Il ne sert à rien d'arrêter les énergies fossiles, si c'est pour les remplacer par l'énergie nucléaire. Le fait qu'elle n'émette pas de CO₂ ne change rien au surplus d'énergie que la Terre doit évacuer pour équilibrer son bilan thermique.

Des projets de fusion nucléaire de par le monde, comme ITER à Cadarache (Drôme), ont l'ambition de proposer une énergie quasi infinie... C'est un rêve d'ingénieurs et de scientifiques du monde entier, justifié par la quête d'une énergie décarbonée.

Où est le gain climatique ? En quoi cette énergie endogène serait moins nocive que celle due au forçage radiatif invoquée par la théorie de l'effet de serre ?

Il vaudrait mieux consacrer ce budget ainsi que ces ressources de recherche et d'ingénierie à de nouvelles technologies de domestication de l'énergie solaire. C'est la seule condition possible pour préserver le bilan thermique global.

Adéquation des options énergétiques avec les besoins et contraintes

Que ce soit pour la recherche de solutions pérennes ou pour la phase de transition énergétique, il est important de cerner les besoins en énergies et leurs contraintes pour limiter les conséquences de la crise climatique et espérer inverser la tendance avant la fin du siècle.

L'orientation vers des énergies renouvelables est une nécessité absolue. Toutefois, si cette condition est nécessaire, elle n'est pas pour autant suffisante. Une énergie peut être renouvelable, mais préjudiciable au bilan thermique de la Terre. C'est le cas de la géothermie profonde. Elle peut être renouvelable, mais non renouvelée. Ce peut être le cas de la biomasse. Les effets des incendies de forêts ou des inondations peuvent créer des déficits importants de renouvellement de cette biomasse. Les énergies peuvent être renouvelables, mais nécessiter beaucoup (trop) d'énergie grise dans leur cycle de vie. Ce

ⁱ Comme le concevait Fourier (voir § 1.2, page 8).

peut être le cas du photovoltaïque. Bien que renouvelables, les technologies énergétiques peuvent ne pas correspondre aux besoins. Il faut donc avoir une approche circonstanciée de la production énergétique.

a) Chaines énergétiques

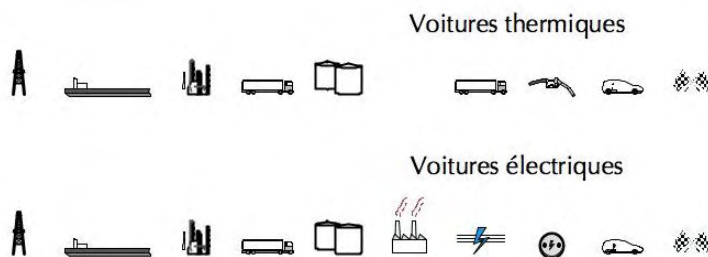
La gestion de la crise climatique (notamment les COP) nous invite à faire des économies d'énergie (le maillon final de la chaîne énergétique), il est tout aussi important d'optimiser les moyens mis en œuvre de production et d'acheminement.

L'énergie est une ressource éphémère, qui n'a pas d'autre utilité que de permettre d'effectuer un travail. – Énergie et travail ont d'ailleurs la même dimension physique, les mêmes unités. – On imagine qu'il y a plusieurs façons d'effectuer le même travail, d'arriver au même résultat en mettant en œuvre différentes ressources. Certaines seront plus efficaces que d'autres.

Une politique énergétique globale peut se définir comme une suite d'opérations et de dispositifs depuis la source d'énergie primaire jusqu'à son utilisation finale. Ce peut être, par exemple, l'exploitation des ressources fossiles, leur transport jusqu'à une raffinerie, leur transformation, leur stockage et leur distribution jusqu'aux utilisateurs finaux. On peut aller jusqu'à prendre en compte l'usage global qu'en font ceux-ci. Ce peut être utile dans le cas d'une rupture technologique, comme celui de la voiture électrique.

Ces opérations constituent les maillons d'une chaîne. Le maillon le plus faible caractérise sa résistance, tandis que son poids représente l'ensemble des moyens mis en œuvre. La chaîne la plus efficace sera celle qui aura le meilleur ratio : résistance / poids. Pour cela, il faut connaître le maillon faible – c'est le point critique – et faire la chasse aux maillons lourds ou inutiles.

Reprenons l'exemple de la voiture pour comparer les deux chaînes énergétiques des filières thermique et électrique.



Pour la première, nous avons en amont la chaîne d'exploitation des énergies fossiles à laquelle il faut ajouter le transfert dans le réservoir de la voiture thermique et les kilomètres parcourus.

Pour la filière électrique, l'on a plusieurs chaînes amont possibles : la chaîne fossile ; la chaîne nucléaire ; la chaîne éolienne et la chaîne photovoltaïque. Si l'on prend la chaîne fossile pour commencer, l'on remarque l'apparition des maillons « centrale thermique »

pour fabriquer l'électricité ; « réseau » pour la transporter ; « bornes de recharge » pour la distribuer aux utilisateurs.

À ce stade, on remarque un maillon supplémentaire, celui de la centrale thermique pour transformer le carburant fossile (énergie chimique) en électricité (énergie motrice). Cette opération est effectuée en amont de la distribution, qui utilise un réseau en flux tendu. Dans la voiture électrique, nous avons l'opération inverse. L'électricité est stockée sous forme électrochimique dans la batterie, qui alimente le moteur électrique.

Filière nucléaire



Si l'on regarde la filière nucléaire, on a un schéma amont assez similaire : extraction de minerais radioactif – transport – usine d'enrichissement – transport – centrale nucléaire. La mise sur le réseau et la suite jusqu'à l'utilisateur sont identiques. Ce qui change vraiment, c'est ce qui concerne le devenir du combustible nucléaire lorsqu'il n'est plus transformable en électricité : transport – retraitement des déchets – stockage en piscine – transport – enfouissement et surveillance.

Filière éolienne



La filière éolienne capte l'énergie mécanique du vent pour la transformer en électricité, pour la mettre immédiatement sur le réseau. La chaîne est plus courte (gain de poids), mais fait apparaître un nouveau point critique : l'absence de stockage et donc une dépendance aux variations locales des vents.

Filière photovoltaïque



La chaîne de la filière photovoltaïque est similaire à la précédente, mais les points critiques sont plus nombreux. Impossible de recharger les batteries des voitures électriques la nuit, ni tôt le matin, car la production n'est maximale que lorsque le soleil est au zénith (vers 13 ou 14 heures, suivant que l'on est en horaire d'hiver ou d'été). De surcroît, la production est plus faible l'hiver que l'été, parce que la durée du jour est plus courte et parce que le Soleil est plus bas sur l'horizon. Les maillons faibles du photovoltaïque sont liés structurellement à la course du Soleil.

b) Alternative flux tendu / stockage

Ces derniers exemples font ressortir l'importance de l'ajustement de la production aux besoins d'énergie. Lorsqu'il est midi à Tahiti le jour de Noël, 95 % de la population mondiale est dans le noir. Il n'y a donc pas de péréquation possible avec la filière photovoltaïque. La production est structurellement cyclique. Elle ne peut être en adéquation qu'avec des besoins présentant les mêmes cycles. Or, c'est rarement le cas. La grande majorité des applications nécessite un moyen de stockage. La plus familière est celle des spots lumineux pour le jardin, qui accumulent de l'énergie produite le jour pour assurer un éclairage la nuit. Leur intérêt principal réside dans l'autonomie de ces luminaires. Aucun branchement au réseau n'est nécessaire. La production d'énergie électrique, son stockage et sa fonction d'éclairage sont regroupés dans un objet que l'on place au gré des besoins ou des envies.

Deux philosophies s'opposent : le flux tendu et le stockage. Toutes les deux ont leurs avantages et leurs inconvénients. Il est utile d'en tracer les grandes lignes pour les utiliser à bon escient.

Flux tendu

La simplicité d'usage a motivé le développement de réseaux de distribution. C'est le cas de l'eau. Il est plus confortable de l'avoir au robinet que de devoir la puiser au puits. C'est aussi la *fée électricité* qui a apporté la lumière dans les maisons en actionnant un simple interrupteur.

La concentration des moyens de transformation des énergies primaires en électricité (énergie motrice) autorise de meilleurs rendements dans les centrales électriques que ceux pouvant être obtenus par les usagers finaux. (Toutefois, cet avantage est amputé des déperditions énergétiques au long des étapes aval, entre production et consommation.)

La principale contrainte des réseaux à flux tendus est l'obligation de l'ajustement de la production à la consommation. Cela conduit à deux options, suivant que l'énergie-source est stockable ou non :

- Dans le premier cas, les unités de production doivent être dimensionnées pour répondre aux pics de consommation prévisibles et les capacités de stockage en fonction de l'autonomie désirée. C'est le cas des usines thermoélectriques. Elles puisent le combustible dont elles ont besoin à chaque instant. Le stock amont est déterminé sur des critères stratégiques.
- Dans le second, il faut multiplier les unités de production de façon que le minimum de production puisse couvrir les pics de consommation. C'est le cas des éoliennes. Si globalement l'énergie motrice des vents est stable, elle est localement très irrégulière. Il faut donc multiplier les éoliennes et les répartir judicieusement pour assurer une production suffisante à chaque instant.

Cela pose éminemment la question des infrastructures nécessaires, qu'elles soient au niveau des moyens de production ou du réseau de diffusion, jusqu'à l'utilisation finale. Tout comme les moyens de productions doivent être dimensionnés pour répondre aux pics de consommation, les réseaux de distribution doivent supporter ces contraintes en chaque section locale et tolérer des surcharges accidentelles.

Si les pannes au niveau de la production peuvent être compensées par péréquation entre sites, les pannes de réseaux touchent directement les utilisateurs.

	Flux tendu	Stockage
Avantages	<p>Simplicité d'usage</p> <p>Centralisation de la production énergétique</p>	<p>Autonomie</p> <p>Découplage entre l'offre et la demande</p> <p>Lissage énergétique</p> <p>Minimisation des moyens de production</p>
Inconvénients	<p>Ajustement constant de l'offre et de la demande</p> <p>Développements structurels importants</p> <p>Risque de panne</p>	<p>Moyens de stockage</p> <p>Multiplication des points de transformation finale de l'énergie</p>

Stockage

Si la liaison filaire au réseau convient bien aux appareils fixes, comme les machines-outils dans l'industrie ou le gros électroménager dans les foyers. Le confort d'usage tend à nous en affranchir au nom de la mobilité. Cela a été le cas du « transistor » et autres baladeurs, au siècle dernier, avant de toucher les téléphones et les outils électroportatifs (comme la visseuse indispensable pour le montage des meubles en kit).

Le confort d'usage conduit ainsi à superposer les deux philosophies pour les avantages qu'elles offrent. Si ceux-ci se cumulent, il en est de même des contraintes.

Le stockage offre une grande liberté d'action vis-à-vis des infrastructures. Il affranchit notamment des besoins de proximité.

Les principaux avantages résident dans :

1. Le découplage de l'offre et de la demande
C'est l'inverse du flux tendu. Le stockage autorise le déphasage entre la production (stockée) et la consommation.
Cela dispense d'une infrastructure lourde (à construire et à gérer) et plus ou moins figée.

2. Le lissage de la production

La production peut être cyclique ou en opposition de phase avec les besoins. C'est le cas du rayonnement solaire, qui n'est utilisable que le jour (cycle quotidien), dont le maximum est en été, quand le pic de besoin est en hiver (cycle saisonnier).

3. Économie de moyens

Les moyens de production étant affranchis des pics de consommation, leur dimensionnement se limite aux besoins énergétiques moyens. Il n'est pas besoin de surdimensionner le parc de production d'énergie pour répondre aux pics de consommation.

Les deux philosophies ont leurs forces et leurs faiblesses. Il s'agit de les employer avec attention pour en tirer le meilleur.

Si le stockage sous forme électrochimique (piles et batteries) présente bien des avantages, dont la simplicité d'usage, il présente quelques problèmes sur le plan du développement durable : autonomie et durée de vie ; rendement énergétique ; cycle de vie (de l'extraction des matériaux à leur recyclage)

Le stockage sous forme d'hydrocarbures impose le recours à un moteur thermique pour chaque utilisation finale, dont le rendement est inférieur à ce qu'il est possible de faire dans une centrale thermique.

Le stockage de combustibles hydrocarbonés offre toutefois plusieurs avantages :

- une densité énergétique importante (plusieurs dizaines de fois celle des batteries au lithium), synonyme d'autonomie ou de puissance ;
- des moyens de stockage simples d'utilisation, faciles à fabriquer et à recycler ;
- durée de vie importante des moyens de stockage.

c) Énergie renouvelable et développement durable

L'appellation d'énergie renouvelable (EnR) est piégeuse. Cette notion est née en opposition au caractère épuisable des ressources fossiles, dont la première crise du pétrole, dans les années 1970, a été un signal fort. La crise climatique, combinée à la thèse écologique pour le développement durable ont sacralisé le terme.

Si le caractère renouvelable de l'énergie est une condition nécessaire pour s'inscrire dans un développement durable, est-ce une condition suffisante ?

Le « Renouvelable » est-il effectivement renouvelé ?

Suffit-il de recourir aux énergies renouvelables, pour éloigner le spectre climatique ?

La biomasse est une énergie renouvelable par excellence, mais est-elle nécessairement renouvelée ? Combien de temps faut-il pour reconstituer une forêt après qu'elle ait brûlé ? Le charbon est issu d'une biomasse accumulée durant des dizaines de millions d'années, avant d'être consommée aujourd'hui. C'est le bilan entre les rythmes de produc-

tion et de consommation qui est manifestement déséquilibré. Dans le cas des énergies fossiles, le rapport est de l'ordre du million. Mais, la question doit être posée lorsque l'on parle de gestion responsable des ressources renouvelables.

Pour que celles-ci soient préservées, il faut que la production soit égale ou supérieure à la consommation. Or, il n'y a pas de communication sur ce sujet. L'on se contente du label « renouvelable » de la ressource, sans vérifier qu'elle est véritablement renouvelée. L'on se satisfait d'une promesse. Ainsi, un projet de ferme photovoltaïque s'étendant sur mille hectares de forêt, dans les Landes, s'appuie sur la promesse de compenser cette coupe par la plantation d'une surface équivalente. Combien de dizaines d'années faudrait-il à cette plantation nouvelle pour égaler celle sacrifiée ?

Le « Renouvelable » est-il de facto sans impact sur le climat ?

Les énergies renouvelables ne sont pas une garantie d'innocuité sur le climat. La géothermie profonde est une énergie renouvelable, mais c'est une énergie endogène. Cela revient à ouvrir des brèches à l'énergie tellurique, pour nourrir la machine thermique terrestre et s'ajouter au bilan thermique de la Terre.

d) Énergie verte & Énergie grise

Il ne suffit pas qu'une énergie soit renouvelable pour produire de l'énergie verte. Cela peut même conduire à accroître le réchauffement climatique s'il s'agit d'une énergie endogène (elle s'ajoute alors au bilan thermique de la Terre, comme c'est le cas pour la géothermie profonde) ou par la dette énergétique qu'elle provoque si le rythme de développement est mal maîtrisé.

Quels que soient les moyens de production d'énergie : centrales thermiques ; panneaux photovoltaïques ; éoliennes, leur développement consomme d'abord de l'énergie pour la fabrication des éléments qui les composent, leur installation, leur entretien et leur fin de vie. C'est l'énergie grise.

Aussi vertueuse soit leur ambition, ces moyens de production contractent une dette énergétique qu'ils mettront un certain temps à rembourser. Ce n'est qu'alors qu'ils produiront réellement de l'énergie verte.

7-2 L'eau : essence du climat

Sans eau, point de vie. Sans eau, la Terre ne serait qu'un caillou aride. Sans eau, parler de climat n'aurait pas de sens.

Si la Terre était soumise aux conditions de l'effet de serre, telles celles de l'héliothermomètre de *de Saussure* (voir § 2,2), l'évaporation des océans ne viendrait pas se déverser en pluies sur les terres émergées pour alimenter les nappes phréatiques et transporter les sels minéraux dont se nourrit la végétation.

C'est parce que la Terre n'est pas une serre (avec une atmosphère figée), mais se comporte comme une machine thermique, que la vie a pu se développer à sa surface. Pour cela, il a fallu que la planète réunisse bien des conditions favorables, sans lesquelles nous ne serions pas là. Il est de notre responsabilité de préserver ces conditions particulières.

Histoire d'eau

L'eau accompagne les activités humaines depuis la nuit des temps. Elle apparaissait comme une ressource inépuisable. Les civilisations se sont bâties en domestiquant son usage : les bains romains ; les aqueducs ; les fontaines ; les eaux de Versailles...

L'eau courante, accessible à tous, est une évolution relativement récente. Puiser l'eau du puits était un geste quotidien de nos arrière-grands-parents, dans les pays développés, et l'est encore dans de nombreuses contrées du monde.

Les réseaux d'eau potable nous isolent de la source. Il suffit d'ouvrir le robinet pour que l'eau coule. Nous déléguons les servitudes à des spécialistes dans leur domaine de compétences. Avoir une conscience globale du cycle de l'eau n'est pas évident, tant les interventions humaines sont diversifiées.

a) Activités industrielles

L'eau est vecteur de dilution, de refroidissement, d'ingrédient, de nettoyage... Elle est fortement employée dans de nombreuses industries minières, notamment pour l'extraction de métaux et terres rares nécessaires aux produits *high-tech*.

Elle est abondamment utilisée comme source de refroidissement, dans les centrales thermiques ou nucléaires, mais aussi dans les industries de transformation des matières premières.

Elle entre dans des processus de fabrication de produits manufacturés ou de construction. C'est une composante du béton.

Elle est utilisée pour le nettoyage des produits, comme des installations et les sols.

b) Infrastructures

Les réseaux routiers imperméabilisent les sols, tandis que les fossés évacuent les eaux de pluie loin en aval. La construction de grands dévidoirs accélère le retour des eaux de ruissellement à la mer, court-circuitant ainsi la phase d'infiltration des eaux dans les sols, indispensable à l'alimentation des nappes phréatiques.

Les retenues d'eau, comme les barrages, les lacs artificiels, les piscines maintiennent l'eau en surface au détriment des nappes souterraines.

c) Urbanisme

Les concentrations urbaines amplifient l'imperméabilisation des sols. Elles s'accompagnent d'une concentration des eaux usées, plus ou moins bien traitées, avant d'être rejetées. Les sols en aval ne peuvent pas absorber cet apport ni ne peuvent compenser les puisages faits en amont.

d) Activités agricoles

Nous avons évoqué dans un encadré du chapitre 5-2 la problématique de la disparition des haies et talus des régions bocagères au profit de grandes parcelles, plus propices à la mécanisation des activités agricoles. Le tassement des sols s'ajoute au ruissellementⁱ pour freiner l'infiltration des eaux de pluie dans les sols.

L'insuffisance de remplissage des nappes phréatiques conduit à un besoin d'arrosage. Or, si l'on puise l'eau par pompage des nappes sans améliorer leur alimentation, on entre dans un cercle vicieux. La création de lacs collinaires n'améliore en rien la situation. Cela ne fait qu'appauvrir le retour de l'eau dans le sous-sol.

L'arrosage ne profite que partiellement aux cultures par l'évaporation directe de l'eau que cela provoque. Au point de vue du climat, celle-ci s'ajoute à celle des cultures. On a donc le cumul d'un déficit des eaux souterraines et d'un excès de vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui a une incidence directe sur les climats locaux et, de proche en proche, sur la dérive climatique.

e) Activités domestiques

Comme il suffit d'ouvrir le robinet pour avoir de l'eau, on ne regarde pas (ou peu) à sa consommation. On l'utilise pour la cuisine, y compris la vaisselle, pour la toilette, en usant de la douche ou du bain, pour laver le linge et faire le ménage, pour le jardinage, pour avoir une pelouse toujours verte, pour laver la voiture, pour les loisirs en profitant d'une piscine privée.

Tout cela nous a été présenté comme normal. C'était le privilège d'une certaine tranche de la population, qui semblait pouvoir être accessible à tous. Ce n'est malheureusement pas le cas. Nous ne pouvons pas consommer plus que ce que la nature peut nous donner. Or, nous sommes de plus en plus nombreux à vouloir bénéficier de ce niveau de confort, de par l'élévation des niveaux de vie et de par l'accroissement de la population mondiale. Il y a fatalement une limite ou plutôt des limites locales, car ni les ressources ni les populations ne sont réparties de façons homogènes. Il s'en suit de grandes inégalités.

7-3 Domestiquer l'énergie solaire

ⁱ Cela s'accompagne éventuellement d'un drainage, renforçant encore le court-circuitage des nappes phréatiques.

Nous n'avons pas d'autre choix que de mieux exploiter l'énergie solaire pour respecter le bilan thermique naturel de la Terre. C'est la première des conditions à remplir pour sortir de la crise climatique.

Hydrocarbures renouvelables

Les hydrocarbures souffrent d'une mauvaise image attachée à leur origine fossile : le caractère épuisable de cette ressource ; la pollution marine (échouage de tankers et dégazages en mer) et l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère (allant de pair avec la production de chaleur endogène).

À côté de cela, ils présentent des intérêts indéniables. Ils offrent une grande capacité de stockage de l'énergie et une grande simplicité de leur mise en œuvre. Ce sont deux qualités importantes pour l'ajustement entre production d'énergie et consommation.

L'on peut produire des hydrocarbures renouvelables à partir de la biomasse, de photosynthèse ou de cracking. Cela satisfait à la fois le bilan thermique de la Terre – là, les hydrocarbures sont un moyen de stockage d'énergie issue du Soleil – et du recyclage du CO₂.

Les hydrocarbures renouvelables (biomasse ou autre) permettent de pérenniser les installations existantes (moyennant d'éventuels travaux d'adaptation) et d'échapper à la contrainte de la production en flux tendu.

Cela permet d'ajuster facilement la production d'énergie à la demande et de minimiser la puissance nominale des moyens de production pour satisfaire aux pics de consommation.

La biomasse est délicate, dans le sens où elle présente un risque important de concurrence à la vocation agraire des sols. Il existe cependant des expérimentations de photosynthèse à partir de microalgues, qui peuvent diversifier les ressources pour produire des hydrocarbures renouvelables¹⁵¹⁶¹⁷.

Le cracking solaire peut être la solution d'avenir. Il s'agit d'exploiter la dissociation des molécules en ions lorsque celles-ci sont soumises à de très hautes températures (processus inverse d'une combustion) comme on peut les obtenir dans un four solaire à concentrateurs.

Le four solaire expérimental d'Odeihlo (Pyrénées orientales) a ainsi produit de l'hydrogène directement issu de l'exploitation du rayonnement solaire. Cette technologie n'a pas suscité l'intérêt des pouvoirs publics, à l'époque.

S'il est possible de cracker la molécule d'eau pour en extraire l'hydrogène, il est possible d'en faire autant avec le CO₂, qui demande moins d'énergie pour casser les liaisons atomiques et d'en isoler le carbone. Il est ensuite possible de recombinaison l'hydrogène et le carbone pour obtenir des hydrocarbures de synthèse.

8 – Quelle transition énergétique ?

8-1 Tableau de bord élémentaire

Lorsqu'un particulier demande un crédit, il doit monter un dossier pour montrer sa capacité à rembourser son prêt. Lorsqu'un porteur de projet cherche des partenaires, il doit fournir un *business plan* pour que ceux-ci évaluent ses chances de succès. Une entreprise aussi importante que la transition énergétique devrait avoir des outils d'évaluation de la viabilité des différentes options énergétiques.

Retour Énergétique

Le retour énergétique est le délai nécessaire à un parc de production d'énergie de restituer (rembourser) l'énergie grise consommée pour sa constructionⁱ. C'est l'équivalent du point mort comptable pour une entreprise (c'est-à-dire le moment à partir duquel l'entreprise gagne de l'argent). Ici, c'est le moment à partir duquel le parc sera une ressource énergétique.

Pour faire simple, le retour énergétique (REnr) du parc est le ratio entre l'énergie grise (EG) par sa production nette annuelle (Pna). Le résultat se mesure en années ou fraction d'année, en fonction des caractéristiques du parc.

$$REnr = \frac{EG}{Pna}$$

Le retour énergétique est donc un indicateur utile pour évaluer la performance d'un système de production.

Dans une phase de croissance, on imagine aisément l'importance de cet indicateur pour éviter un surendettement énergétique (cas d'une construction d'un second parc avant que le premier ait remboursé sa dette). Le retour énergétique est le temps minimum nécessaire pour le doublement du parc existant.

Cela conditionne directement le taux de croissance maximum d'une filière énergétique.

Taux de Croissance Critique

Dans une phase de croissance, le retour énergétique est le délai pendant lequel le système vit en autarcie. Toute l'énergie qu'il produit est utilisée pour sa croissance. Il ne consomme pas d'énergie externe et n'en fournit pas non plus à l'extérieur.

Il peut être plus pratique de parler de taux de croissance que de temps de doublement du parc existant.

On en tire un taux de croissance critique : $T_{CC} = 2^{\frac{1}{REnr}} - 1$

Cet indicateur est particulièrement important pour situer le taux de croissance réel :

ⁱ et plus largement, pour son cycle de vie : construction ; fonctionnement ; maintenance et démantèlement.

Si $T_{CR} > T_{CC}$: cela veut dire que la croissance du parc est déficitaire.

Si $T_{CR} = T_{CC}$: l'opération est blanche. La production du parc tourne pour elle-même.

Taux de Croissance Verte

Ce n'est que lorsque $T_{CR} < T_{CC}$, que le parc fournit une énergie verte utilisable.

Si l'on parle d'énergie verte, c'est-à-dire d'énergie neutre pour le climat, la part utile est celle comprise entre le taux de croissance critique et le taux réel : $T_{CV} = T_{CC} - T_{CR}$

Pour profiter d'une énergie verte, c'est-à-dire un taux de croissance utile significatif, il faut que le taux de croissance réel soit faible devant le taux de croissance critique.

Malheureusement, il y a encore très peu d'informations sur ce sujet. Un tableau de bord devrait contenir ces indicateurs essentiels pour évaluer l'impact des mesures prises dans le cadre d'une transition énergétique sur le climat.

Sans ces indicateurs, le développement désordonné des énergies renouvelables risque d'alourdir fortement la dette énergétique et d'aggraver l'impact sur le climat, ce qui est à l'opposé de l'objectif.

8-2 Mirage d'un monde décarboné

Quelles sont les alternatives décarbonées qui s'offrent à nous pour remplacer les énergies fossiles, qui représentent environ 80 % de la consommation mondiale ?

La suppression programmée des chaudières au fioul et des voitures thermiques pose la question de la production de l'électricité, pour faire face au surcroît massif de consommation d'une énergie non stockable.

Le photovoltaïque, dont les projets de fermes de plusieurs hectares se multiplient, peut-il subvenir aux besoins hivernaux des chaudières, alors que le Soleil est au plus bas ? Peut-il recharger les batteries des voitures électriques la nuit ?

Il ne reste donc que l'éolien qui soit une énergie renouvelable et qui permette une production électrique l'hiver comme l'été, la nuit comme le jour. Si l'énergie éolienne est globalement constante – c'est une composante mécanique de l'énergie solaire et de la machine thermique terrestre –, sa localisation dans le temps est variable. Il faut donc un maillage judicieux pour lisser la production du parc éolien. Cela ne peut pas être réalisé par des initiatives éparses.

L'avantage des centrales thermiques vient de leur souplesse d'adaptation, due à la transformation d'une énergie stockable (gaz, fioul, charbon) en énergie électrique, à la demande. Il suffit pour cela, de dimensionner les centrales pour les besoins critiques.

Remarquons au passage que les chaudières au fioul et les voitures thermiques s'acquittaient très bien de cette contrainte. Leur suppression reporte cette dernière sur le réseau électrique, qui fonctionne en flux tendu. Cette question d'adéquation structurelle n'est évoquée nulle part dans la PPE.

Les centrales nucléaires ont un temps de réponse plus lent que les centrales thermiques, mais opèrent la même transformation d'un combustible stockable (nucléaire) en électricité.

Chaque rapport du GIEC suscite la remise en question de la sortie du nucléaire pour en faire l'énergie décarbonée par excellence et faire fi de la pollution de ses déchets.

Le mouvement est en marche. Les centrales existantes ne fermeront pas. La réduction de la part de 50 % de nucléaire en France viendra de l'augmentation de la production électrique pour répondre aux besoins des pompes à chaleur et des voitures électriques.

Dans un monde décarboné, le tout électrique induit le tout nucléaire.

Reste que ces centrales utilisent une énergie endogène et produiront deux fois plus de vapeur d'eau pour se refroidir que d'électricité. Énergie éphémère, qui se dissipera tôt ou tard en chaleur (dans nos bouilloires ou par frottement de nos voitures dans l'air, par déformation des roues sur le bitume...) et alimentera la machine à vapeur terrestre.

Annexe A

DÉFINITIONS

Climat :

Larousse¹⁸ :

nom masculin (grec *klima*, -atos, inclinaison)

1. Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.
Synonymes : air - atmosphère
2. Ensemble des conditions de vie, des circonstances qui agissent sur quelqu'un ; milieu, ambiance, contexte : Le climat politique, social.
Synonymes : ambiance - atmosphère - milieu

Futura Planète¹⁹ :

Le climat correspond aux conditions météorologiques moyennes (températures, précipitations, ensoleillement, humidité de l'air, vitesse des vents, etc.) qui règnent sur une région donnée durant une longue période. Pour l'Organisation météorologique mondiale, elle doit être d'au minimum 30 ans.

Linternaute²⁰ :

clima t, *nom masculin*

1. Météorologie
Ensemble des conditions météorologiques d'une région, d'un lieu.
Synonyme : temps
Traduction anglais : climate
2. Figuré
Ambiance, circonstances d'un événement.
Exemple : Le climat chez les salariés est tendu depuis l'annonce des résultats de l'entreprise.
Synonyme : atmosphère, ambiance
Traduction anglais : climate

Wikipedia²¹ :

Le **climat** est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée. L'étude du climat est la climatologie. Elle se distingue de la météorologie qui désigne l'étude du temps à court terme et dans des zones ponctuelles.

La caractérisation du climat est effectuée à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, pression atmosphérique, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent. Sont également pris en compte leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels.

Ces analyses permettent de classer les climats des différentes régions du monde selon leurs caractéristiques principales.

Le climat a fortement varié au cours de l'histoire de la Terre sous l'influence d'une pluralité de phénomènes astronomiques, géologiques, etc., et plus récemment sous l'effet des activités humaines (réchauffement climatique).

Science, climat et énergie²² :

Le **climat** est la moyenne des conditions météorologiques (température, précipitations, vent, humidité, pression atmosphérique) à un **endroit donné** et sur une **longue période de temps, généralement de 30 ans**. Le climat dépend de la latitude, du terrain et de l'altitude. Le classement de Köppen est généralement utilisé pour classer les climats.

Le mot climat vient du grec *klima* qui signifie inclinaison ou pente. Cela a donné « clima » en latin. Actuellement, ce mot fait bien entendu référence à l'inclinaison de l'axe de la Terre et à celle des rayons solaires par rapport à l'horizon. Pour Aristote (384–322 av. JC) il y avait cinq « climats » : une zone torride au voisinage de l'équateur, deux zones glaciales au voisinage des pôles et deux zones tempérées intermédiaires. Une classification bien différente de la classification moderne de Köppen.

Remarquons ici que c'est Pythéas, un navigateur et astronome marseillais qui vivait aux alentours de 300 av. JC, qui fut l'un des premiers à mesurer l'obliquité de l'écliptique, c'est-à-dire l'angle entre le plan de l'orbite terrestre et le plan de l'équateur.

Par contre, la **météo** sont les conditions atmosphériques à un endroit donné sur une courte période de temps (quelques jours).

Actu Environnement .com²³ :

Le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans (défini par l'Organisation Météorologique Mondiale). Il est donc caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes. A l'échelle de la planète, le climat représente une machinerie complexe qui est le produit, dans l'espace et dans le temps, de toute une série d'interactions entre les éléments qui composent les différents compartiments :

- l'atmosphère ;
- la lithosphère (la croûte terrestre) ;
- l'hydrosphère (l'ensemble des mers, des océans, des lacs et des cours d'eau de la planète) ;
- la cryosphère (les glaces du monde entier) ;
- la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation).

© Tous droits réservés Actu-Environnement Reproduction interdite sauf accord de l'Éditeur.

Serre :

Larousse²⁴ :

1. Construction légère à parois translucides permettant de créer pour les plantes de meilleures conditions de végétation que les conditions naturelles.
2. Endroit très chaud, clos et protecteur, milieu où l'on est à l'abri de tout risque :
Enfant élevé en serre.

linternaute²⁵ :

Botanique

Construction aux murs transparents qui sert à faire pousser des végétaux en les protégeant du froid.

Synonyme : abri, jardin

Traduction anglais : greenhouse, glass-hous

Wikipedia²⁶ ; Techno-Science.net²⁷ :

Une **serre** est une structure close ou semi-ouverte translucide, en verre ou en plastique, soutenue par une structure métallique ou en bois, destinée en général à la production agricole. Elle vise à protéger les cultures vivrières ou de loisir des éléments climatiques, afin d'améliorer la production des plantes, d'en accélérer la croissance et de les produire indépendamment des saisons grâce à un gain de température par blocage de la convection (et non par effet de serre) sous la structure.

La culture sous serre s'appelle la serriculture.

Une serre peut également être un édifice architectural d'agrément, soit privé de petite taille à l'intérieur d'une maison, soit ouverte au public et de grande taille, qui satisfait l'esthétique par sa forme architecturale et par la richesse des collections de plantes qu'elle abrite.

Dicocitation²⁸ :

Galerie close de vitrages dans une exposition chaude, où l'on serre pendant l'hiver les plantes qui craignent la gelée. On admet trois espèces de serres : les serres chaudes, où le degré de chaleur doit être maintenu depuis quinze degrés jusqu'à trente ; la serre tempérée, où le thermomètre ne doit pas descendre en hiver au-dessous de six degrés, ni monter au delà de quinze ; et la serre froide, où le thermomètre ne doit pas descendre au delà du terme de la congélation, ni monter au-dessus de huit ou dix degrés.

Machine thermique :

Wikipzdia²⁹ ; Sansagent³⁰ :

Une **machine thermique** est un mécanisme permettant d'effectuer un travail à l'aide de sources de chaleur de température différentes. La théorie des machines thermiques s'attache à la description et à l'étude physique de certains systèmes thermodynamiques qui permettent de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique, et vice versa. Fondée au milieu du XIXe siècle, elle s'appuie sur la thermodynamique, et en particulier sur ses deux premiers principes.

...

Wiliversité³¹ :

Un **moteur** est une **machine thermique** qui **produit du travail** en utilisant la chaleur provenant de la source chaude, mais une partie de cette chaleur part vers la source froide.

...

Cours de physique en ligne³² :

Une machine thermique :

Une machine thermique est un dispositif dans lequel un fluide (gaz ou liquide) passe d'un état initial à un état final identique à l'état initial.

Au cours de cette transformation cyclique fermée, le fluide échange du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur.

Une telle machine thermique est appelée moteur thermique.

Un moteur thermique :

Un moteur thermique est un convertisseur d'énergie qui transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit en travail mécanique.

Thermal Engineering³³ :

Qu'est-ce qu'un moteur thermique – Définition

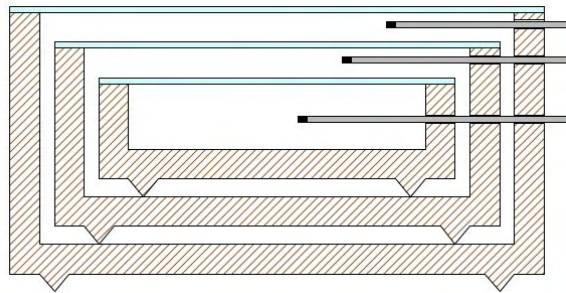
2019-10-17 par Nick Connor

En général, un moteur thermique est un dispositif qui convertit l'énergie chimique en chaleur ou en énergie thermique, puis en énergie mécanique ou en énergie électrique. De nombreux moteurs thermiques fonctionnent de manière cyclique. Génie thermique

Annexe B

FONCTIONNEMENT D'UNE SERRE

Suivant la thèse de l'effet de serre, l'atmosphère agirait à la façon d'une vitre de verre qui bloquerait les infrarouges lointains, comme l'avait émis succinctement le mathématicien Joseph Fourier, en 1824, en s'appuyant sur l'hélio-thermomètre inventé par le physicien suisse *de Saussure*, en 1774.



Principe de l'hélio-thermomètre de *de Saussure*.

En 1909, le physicien américain Robert-Williams Wood infirma cette théorie en comparant l'évolution de température entre deux enceintes hermétiques, l'une fermée en sa partie supérieure par une vitre en verre, et l'autre par une plaque en halite, transparente aux infrarouges lointains, pour conclure que l'élévation de la température dans la serre était due à la convection de l'air.

Dans le premier cas, l'atmosphère est vue comme un corps inerte, à l'instar d'une vitre en verre, ne considérant que les échanges thermiques par rayonnement.

Dans le second, ce sont les courants convectifs au sein de l'air confiné à l'intérieur de la serre qui seraient prédominants pour expliquer le réchauffement de celle-ci.

Nous souhaitons ici explorer plus en détail ces deux visions de la serre.

1 Visions comparées du fonctionnement d'une serre

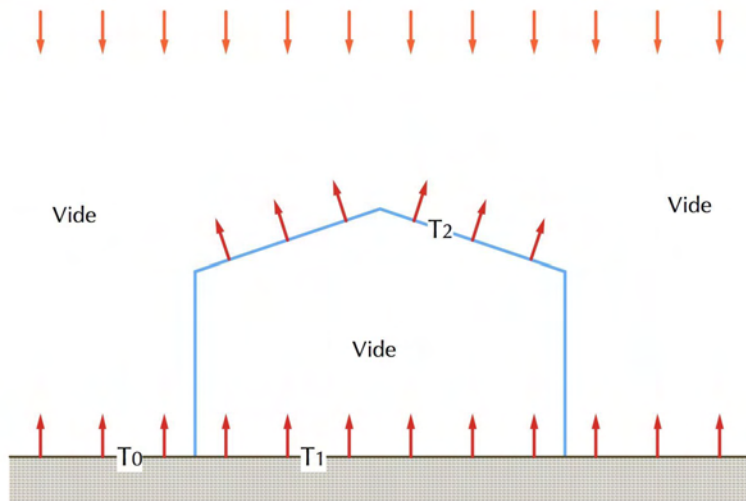
Vision externe (depuis l'espace)

C'est celle du rapport Hansen de la Nasa, qui a inspiré le GIEC.

Elle repose sur plusieurs idées :

- le rayonnement est le seul mode d'échange thermique fonctionnant dans l'espace
- le Soleil est la seule source d'apport de chaleur à la Terre
- le CO₂ a un comportement similaire à celui du verre vis-à-vis des rayonnements infrarouges lointains...

La Terre est-elle une serre ou une machine thermique ?



*Prenons l'exemple d'une serre installée sur la Lune, en absence d'atmosphère...
Le toit de la serre s'interpose entre le sol et l'espace. La loi de la conservation de l'énergie dicte que le flux thermique émis par le sol à l'intérieur de la serre est identique à celui émis par le toit de celle-ci vers l'espace.
Les températures du sol (T_1) et du toit en verre (T_2) vont alors s'ajuster en fonction de leur émissivité propre dans l'infrarouge.*

Le principe fondamental de la conservation de l'énergie permet de calculer les températures d'équilibre du sol et du toit en verre, tel que le flux thermique entre le sol et le toit soit identique à celui du toit vers l'espace et soit égal au flux reçu.

$$\Phi_0 = \sigma (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4) = \sigma (\varepsilon_2 T_2^4 - \varepsilon_\infty T_\infty^4)$$

Si l'expression mathématique est simple, elle est porteuse d'ambiguïté.

En outre, les coefficients d'émissivité ε varient d'un corps à l'autre et avec la longueur d'onde du rayonnement.

Sa détermination empirique se présente sous la forme d'une carte d'identité propre à chaque corps. En absence d'informations concrètes sur celle-ci, il est tentant d'escamoter ce coefficient en lui attribuant la valeur 1 (corps noir). Cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la température attendue, faute de mieux.

C'est une facilité, une erreur admise en première approximation.

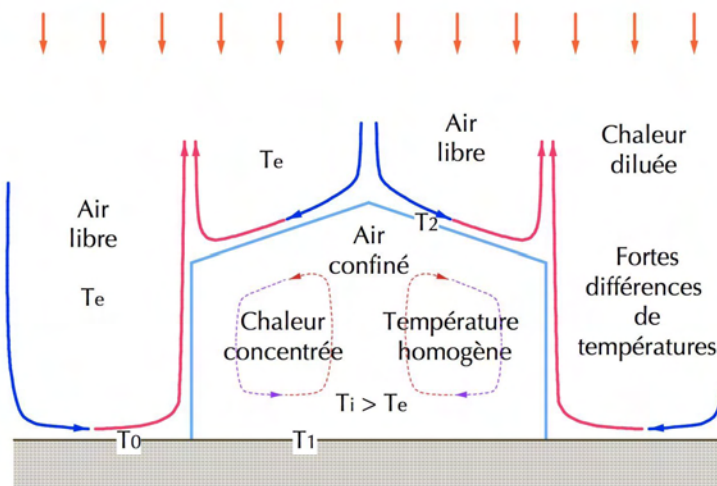
C'est en comparant la température mesurée avec celle calculée du corps noir que l'on définit de coefficient d'émissivité du corps. Il est abusif d'attribuer à l'effet de serre la différence entre la température théorique du corps noir avec celle mesurée.

Vision in situ

Elle se distingue de la vision spatiale par :

- la serre est placée dans une ambiance atmosphérique
- les transferts thermiques sont partagés entre rayonnement et convection
- l'air chaud est confiné dans un volume restreint
- en outre, de nombreuses serres sont munies d'une source de chaleur interne

La Terre est-elle une serre ou une machine thermique ?



Voyons comment se comporte la même serre sur Terre, en présence d'atmosphère...

Le confinement de l'air à l'intérieur de la serre est ce qui caractérise celle-ci.

Le sol chauffé par le rayonnement solaire réchauffe l'air à son contact. L'air chaud, moins dense, s'élève au plafond peu élevé. La température est donc très homogène et les courants convectifs internes très peu marqués.

À l'extérieur de la serre, la colonne d'air chaud s'élève de plusieurs centaines de fois la hauteur de la serre. La chaleur du sol est diluée d'autant, les températures ont un fort gradient et l'air est agité...

À l'intérieur de la serre, l'air chauffé par le sol ne peut s'élever que de quelques mètres, bloqué par les parois de la serre. L'air y cède une partie de sa chaleur par convection et redescend vers le sol. Ce circuit court élève progressivement la température moyenne au sein de la serre, jusqu'à ce que la chaleur cédée par convection avec les parois de la serre compense la chaleur prise au sol par convection.

Il se passe un phénomène similaire dans nos logements, lorsque le chauffage est allumé. L'air ambiant se réchauffe au contact des convecteurs, s'élève, remplacé par de l'air plus froid, et forme un courant convectif pour porter la chaleur dans toute la pièce, se refroidissant au contact des parois...

L'on peut mettre le phénomène de convection en évidence en plaçant une feuille de papier au-dessus d'un convecteur.

Si l'on ouvre portes et fenêtres, l'air ambiant est remplacé par l'air extérieur et la température ambiante chute...

L'on peut faire l'expérience inverse. Si on laisse ouverte la porte du congélateur trop longtemps, la température interne va s'élever et l'on risque de perdre son contenu...

Il nous est donc facile de vérifier que le confinement est une condition nécessaire au maintien de la chaleur dans une serre, comme dans nos logements.

Le confinement et l'absence de perturbations sont ce qui caractérise le fonctionnement interne d'une serre.

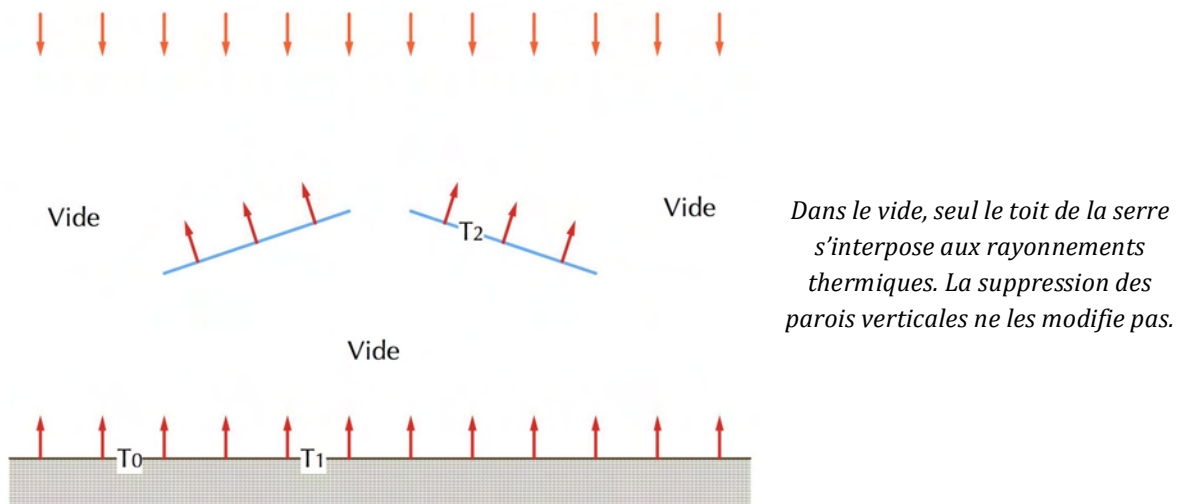
Il n'existe pas d'expression simple et universelle des transferts thermiques par convection. On ne trouve dans la littérature scientifique que des formules empiriques, variables en fonction de nombreux facteurs (géométriques, thermiques, aérodynamiques...) et dans des domaines de validité limités.

Il n'est donc pas possible de définir un modèle mathématique du comportement thermique d'une serre, et encore moins de la troposphère. L'on peut alors comprendre la décision d'exclure la troposphère des modélisations faites par les climatologues, en prenant l'hypothèse que la Terre est constamment en équilibre thermique.

Mais, c'est là une erreur d'analyse. Comme nous allons le voir au chapitre suivant, la Terre n'est jamais en équilibre thermique. Et les déséquilibres se produisent précisément au niveau de la troposphère...

2 – Que se passe-t-il si l'on supprime les parois verticales qui délimitent la serre ?

Vision externe (depuis l'espace)



Dans le vide, il n'y a pas de différence du bilan thermique entre une serre et une pergola. Seul le toit constitue un obstacle au flux thermique, dont la résistance est fonction de son coefficient d'émissivité ϵ^i ...

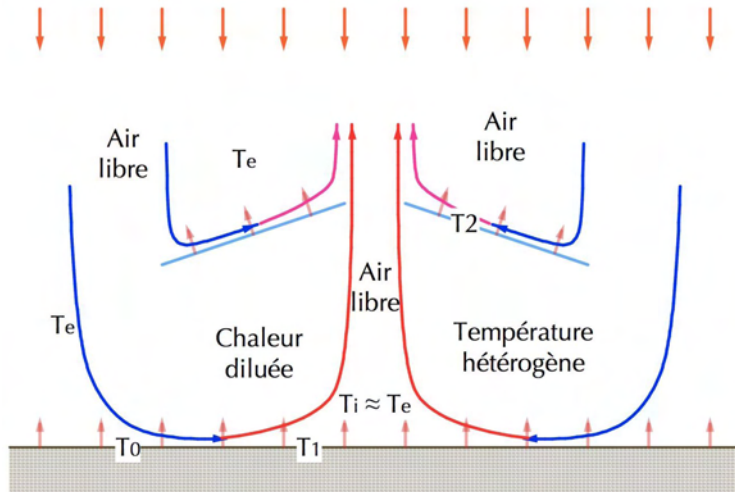
Malheureusement, en ce qui concerne la Terre, les instruments scientifiques en notre possession sont insuffisamment sensibles pour mesurer les variations de flux thermique dues au réchauffement climatique, tout repose sur des simulations mathématiques.

Vision in situ

Voyons maintenant ce que donne la même transformation de la serre en présence d'atmosphère...

ⁱ On ne peut appréhender l'émissivité d'un corps que de façon empirique. Cela dépendant de la précision des mesures.

L'air chauffé par le sol s'élève jusqu'au toit, comme précédemment. Mais il est remplacé par l'air extérieur, plus dense. Comme la « pergola » ne constitue pas une enceinte fermée, l'air contourne l'obstacle du toit et s'élève de la même façon que l'air extérieur. L'air étant continuellement renouvelé, la température sous la pergola n'est pas différente de celle de l'air extérieur...



En absence d'un volume fermé, l'air est libre de circuler. Le toit en verre est contourné par les courants convectifs et la température sous celui-ci (serre ouverte) n'est pas différente de celle de l'air extérieur.

L'on voit que le comportement thermique d'une « pergola ouverte » est beaucoup plus proche de ce qui se passe à l'air libre que dans une serre.

L'on peut encore une fois aisément vérifier cela chez soi en ouvrant portes et fenêtres l'hiver ou en plein été pour constater l'effet du confinement de l'air à l'intérieur de nos logements, comme il peut l'être dans une serre.

C'est le confinement de l'air dans un volume restreint, l'isolant de l'influence de l'atmosphère extérieure, qui caractérisent une serre.

En guise de conclusion

Il ne suffit pas de regarder une serre de l'extérieur pour en déduire sa température interne.

Parler d'effet de serre pour caractériser le comportement thermique de l'atmosphère est pour le moins un abus de langage. Une serre se caractérise par le confinement de l'air dans une enceinte restreinte et son isolement vis-à-vis des vents extérieurs.

La température interne augmente par la formation de courants convectifs naturels, de faibles intensités. Ce qui n'est pas le cas de l'atmosphère terrestre, où l'on peut recenser de nombreux vents violents, fruits des déséquilibres thermiques qui régissent la planète.

C'est le renforcement de ces déséquilibres qu'il convient d'appréhender.

Annexe C

RAYONNEMENT, FORÇAGE RADIATIF ET CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

Fourier a publié son mémoire sur la température du globe terrestre un demi-siècle avant que Stefan et Boltzmann éditent la loi, qui porte leurs noms, établissant la relation entre le transfert de chaleur et la température de rayonnement : $\phi = \epsilon \sigma S T^4$ où σ est la constante de Boltzmann.

Si l'on connaît le flux thermique, on en déduit la valeur de la température par la relation :

$$T = \sqrt[4]{\frac{\phi}{\epsilon \sigma S}}$$

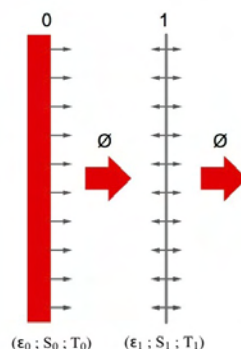
Celle-ci dépend de l'énergie thermique ϕ et de deux paramètres : la surface d'émissions S et le coefficient d'émission ϵ , dont la valeur est comprise entre 0 (corps blanc) et 1 (corps noir).

Le corps blanc n'émet aucun rayonnement, quelle que soit sa température, tandis que le corps noir est celui qui en émet le plus. Pour un rayonnement donné, il aura la température la plus basse.

Il est à noter que ces limites sont des valeurs abstraites, que l'on ne rencontre pas dans la nature.

Source thermique et écrans

Une source thermique se caractérise par un flux constant dans le temps et au travers des écrans interposés. Les températures s'adaptent pour maintenir l'équilibre thermique du système.



Le flux thermique entre la source et l'écran étant fixe, la différence des potentiels thermiques s'écrit :

$$\phi = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4$$

C'est assimilable à la différence de hauteur d'eau entre deux bassins d'une écluse, par exemple. Mais ici, la différence de potentiels n'est pas linéaire et ne peut pas s'exprimer par un simple ΔT .

La lecture purement mathématique de cette relation présente le risque d'une interprétation de l'existence d'un rétro-rayonnement, ce qui serait en contradiction avec le principe de conservation de l'énergie.

À l'équilibre, le flux sortant est égal au flux entrant :

$$(1) \text{ flux sortant : } \quad \phi = \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4$$

$$(2) \text{ flux entrant : } \quad \phi = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4$$

La température T_1 de l'écran est donnée par l'expression :

$$(1) \Rightarrow T_1 = \sqrt[4]{\frac{\phi}{\epsilon_1 \sigma S_1}}$$

L'interposition de l'écran conduit à une élévation du potentiel de la source et donc de sa température, que l'on déduit en éliminant les termes propres à l'écran :

$$(1) + (2) \quad \phi = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 - \phi$$

$$\Rightarrow \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 = 2 \phi.$$

Ce qui donne :

$$\Rightarrow T_0 = \sqrt[4]{\frac{2 \phi}{\epsilon_0 \sigma S_0}}$$

Soit :

$$\Rightarrow \frac{T_0}{T} = \sqrt[4]{2}$$

Cas d'écrans multiples

Si l'on ajoute un second écran, on aura :

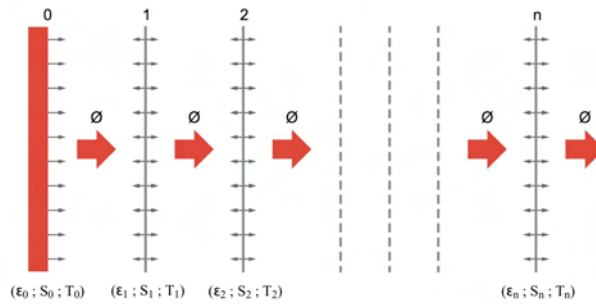
$$\phi = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 = \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 - \epsilon_2 \sigma S_2 T_2^4 = \epsilon_2 \sigma S_2 T_2^4$$

On élimine les paramètres dépendants des écrans en faisant la sommation des différents termes :

$$3 \phi = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 + \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 - \epsilon_2 \sigma S_2 T_2^4 + \epsilon_2 \sigma S_2 T_2^4 = \epsilon_0 \sigma S_0 T_0^4$$

$$\Rightarrow T_0 = \sqrt[4]{\frac{3 \phi}{\epsilon_0 \sigma S_0}}$$

La Terre est-elle une serre ou une machine thermique ?



Et pour n écrans on aura :

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{(n+1)\phi}{\epsilon_0 \sigma S_0}} \Rightarrow \frac{T_0}{T} = \sqrt[4]{(n+1)}$$

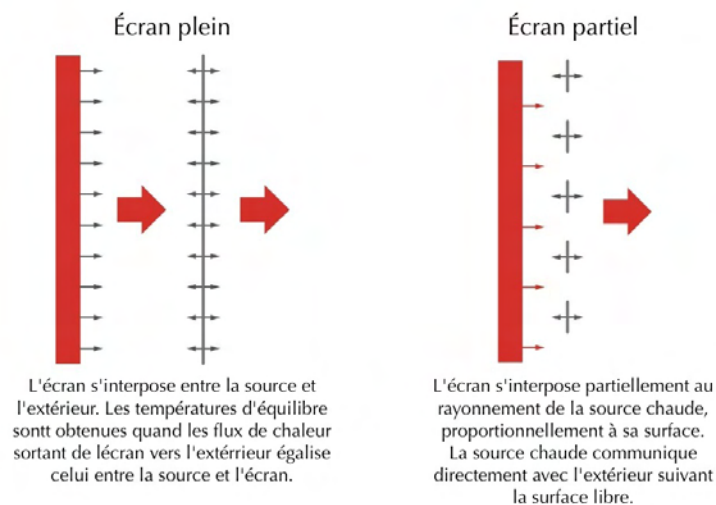
Les écrans représentent des obstacles qui freinent le flux thermique par rayonnement, comme le fait l'isolation des parois d'une habitation. Plus on freine le rayonnement, plus la température de la source sera élevée pour conserver le flux énergétique.

Que ce soit par rétro-rayonnement ou par ralentissement, le résultat des calculs des températures est le même. La différence est subtile, mais lourde de conséquence pour l'appréhension des phénomènes en jeu.

Un modèle mathématique n'est qu'une représentation imparfaite des phénomènes physiques que l'on étudie. Il ne prend pas spontanément en compte les limitations du monde physique. Il faut les introduire, avec la part de subjectivité que cela comporte. Le risque est de se focaliser sur le modèle, au détriment de l'observation critique des phénomènes.

Cas d'un écran partiel

Les relations établies plus haut concernent un écran s'imposant à la totalité du flux thermique de la source chaude. Voyons ce qu'il en est dans le cas d'un écran s'opposant qu'à une fraction à son rayonnement.



La Terre est-elle une serre ou une machine thermique ?

Le flux thermique est alors la somme de deux partitions :

$$\phi = \phi_{libre} + \phi_{écran}$$

Avec

$$\phi_{libre} = \epsilon_0 \sigma (S_0 - S_1) T_0^4$$

$$\phi_{écran} = \epsilon_0 \sigma S_1 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 = \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4$$

$$\phi = \epsilon_0 \sigma (S_0 - S_1) T_0^4 + \epsilon_0 \sigma S_1 T_0^4 - \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4 = \epsilon_0 \sigma (S_0 - S_1) T_0^4 + \epsilon_1 \sigma S_1 T_1^4$$

En faisant la somme des deux membres, on obtient :

$$2 \phi = 2 \epsilon_0 \sigma (S_0 - S_1) T_0^4 + \epsilon_0 \sigma S_1 T_0^4$$

Ce qui donne :

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{2 \phi}{\epsilon_0 \sigma (2 S_0 + S_1)}}$$

En posant :

$$\text{le coefficient d'opacité de la grille } \tau = \frac{S_1}{S_0}$$

et l'accroissement de la température d'émission $\Delta T = T_0 - T$

On obtient une expression simple de l'élévation de la température due à l'interposition d'une grille :

$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt[4]{\frac{2}{2 - \tau}} - 1$$

Si l'on superpose plusieurs grilles, la relation s'écrit alors :

$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt[4]{\frac{n + 1}{2 - \tau}} - 1$$

L'élévation de la température varie suivant la puissance quatrième du nombre de grilles. Il faut 10 000 grilles pour que le ΔT soit multiplié par 10.

La comparaison du CO₂ à un écran est difficilement tenable pour expliquer le réchauffement climatique, avec une concentration de 0,04 % qui se place complètement à droite des graphiques.

Principe physique fondamental de la conservation de l'énergie

(source Wikipedia)³⁴

L'énergie ne peut ni se créer ni se détruire, mais uniquement se transformer d'une forme à une autre ou être échangée d'un système à un autre (principe de Carnot). C'est le principe de conservation de l'énergie : l'énergie est une quantité qui se conserve. Cette quantité est composée d'éléments divers (énergie cinétique, énergie thermique, énergie potentielle, énergie de masse, etc.), qui s'échangent dans un jeu à somme nulle.

Ce principe empirique a été validé en 1915, bien après sa découverte, par le théorème de Noether. La loi de la conservation de l'énergie découle de l'invariance dans le temps des lois de la physique³⁵.

Ce principe est tellement fort en physique qu'à chaque fois qu'il a semblé ne pas être vérifié cela a conduit à des découvertes importantes. Chaque fois qu'il a semblé que l'énergie n'était pas conservée, il s'agissait en fait de sa transformation en une nouvelle forme. Par exemple, la radioactivité a un temps été interprétée comme la ré-émission de quelque chose qui était reçu de l'extérieur et l'explication est venue de l'équivalence masse-énergie.

Annexe D

FLORILÈGE DE COMMENTAIRES MÉTÉO D'AVRIL 2021

Les bulletins météo quotidiens sont des instantanés qui focalisent l'attention sur les minima et maxima de températures de la journée ou de la semaine sur le territoire. Il n'est pas rare (et c'est facilement vérifiable) que les écarts entre le matin et l'après-midi dépassent 10 °C, soit la même amplitude enregistrée entre les périodes glaciaires et interglaciaires durant le Quaternaire...

Il a été enregistré une amplitude de près de 32 °C à Beauvais (Somme) entre le 31 mars et le 6 avril 2021 (soit une seule semaine)³⁵. C'est vingt fois l'amplitude de la dérive climatique que se sont fixés les accords de Paris sur le climat pour la fin du siècle (soit 1,5 °C en un peu plus de 5 000 semaines)... Cela fait un rapport de 1 pour 100 000.

En termes pratiques, si la température était uniforme sur toute la Terre, nous devrions être capables de percevoir des variations de 0,0003 °C/semaine. C'est très inférieur à la sensibilité des meilleures sondes de température existantes. Il faut donc plusieurs centaines de semaines, soit plusieurs années de recul, pour quantifier le réchauffement climatique et lisser les aléas météo.

Ce sont en fait les aléas météo qui sont intéressants d'observer. Le réchauffement climatique n'est pas uniforme et se traduit par l'augmentation de phénomènes extrêmes. Ce qui est remarquable, c'est la croissance des amplitudes. Le mois d'avril 2021 illustre ce phénomène. On y a enregistré des records de froid et de chaleur, comme en témoignent les journaux.

—

6 avril 2021

Huffingtonpost³⁶ : Météo France: des records de froid battus pour un mois d'avril
Ce mardi 6 avril, 8 stations de Météo France ont enregistré des minimales records pour cette période de l'année.

Le journal résume un Tweet entre météorologues : « En cause, un phénomène météorologique appelé "l'invasion arctique". La masse d'air chaude au-dessus de l'Hexagone la semaine dernière a été chassée par un vent froid, en provenance de l'Arctique, qui touche surtout le nord, le centre et l'est du pays. »

« La masse d'air froide actuelle provient du nord du Groenland, aux environs de l'île d'Ellesmere, territoire canadien. »

« Si une invasion de ce type reste un phénomène courant, certains météorologues, comme François Jobard à Météo France, soulignent l'intensité, particulièrement forte, de l'épisode actuel. »

8 avril 2021

BFM TV³⁷ : Jusqu'à -11,4°C... De nouveaux records de froid pour un mois d'avril enregistrés ce jeudi

Dans de nombreuses villes, cet épisode a battu des records datant de plus de 50 ans.

« Cet épisode de froid est dû [à un décrochage du vortex polaire](#) qui a créé une bulle d'air froid qui s'est abattue sur l'Europe. »

10 avril 2021

France TV Info³⁸ : **Gel : les agriculteurs déplorent des pertes historiques**

Les arboriculteurs et viticulteurs ont vu leurs récoltes détruites par l'épisode de gel de la semaine du 5 avril. Un coup de chaud en mars avait déjà fait bourgeonner les arbres et les vignes.

Qu'ils soient producteurs de pommes près de Bordeaux (Gironde), viticulteurs dans le Jura, arboriculteurs près de Montpellier (Hérault), de nombreux agriculteurs pleurent la perte d'une grande partie de leur récolte [à cause du gel](#). Cet événement a été particulièrement dévastateur car partout, des bourgeons étaient déjà sortis, à cause d'un pic de chaleur en plein mois de mars. "Le réchauffement climatique va accentuer globalement le risque de gelée, parce qu'on a gagné quasiment 15 jours d'avance sur les vendanges, les récoltes de fruits, etc. Et ce n'est pas forcément une bonne chose, parce que la période de gelée est toujours d'une intensité importante", explique David Sève, président de la FDSEA du Gard.

11 avril 2021

BFM TV³⁹ : **Des centaines de records de chaleur et de froid battus en France ces derniers jours**

298 records de chaleur établis fin mars

131 records de froid établis début avril

Certaines communes concernées par les deux cas

Des variations de température aux conséquences terribles pour certaines cultures

14 avril 2021

SWEET FM Loir-et-Cher⁴⁰ : **Les espoirs de belles récoltes... gelés en Loir-et-Cher**

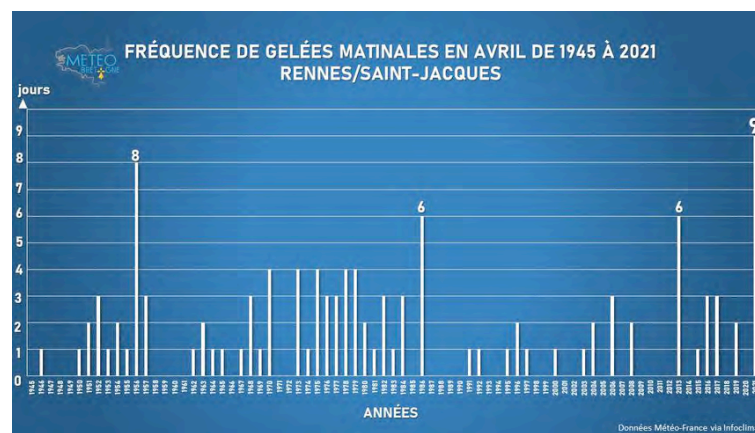
Un début avril estival suivi par un froid nocturne quasi polaire : un enchaînement climatique tragique pour les viticulteurs et arboriculteurs du Loir-et-Cher... qui attendent encore d'évaluer l'étendue exacte de la catastrophe.

C'est une importante masse d'air froid venu du Pôle Nord qui s'est abattue sur la France la semaine dernière, succédant à une vague de chaleur inhabituelle début avril qui a tiré les bourgeons de leur torpeur hivernale... pour mieux les anéantir ! Le côté exceptionnel de cet événement climatique, c'est ce froid mordant relevé aussi bien au sol que dans l'atmosphère...

*... Ainsi, ce sont **380 vignerons qui sont certains de déplorer des pertes de récolte, "mais il faudra attendre la mi-mai pour les évaluer, car la vigne est pleine de ressources"**.*

18 avril 2021

France Bleu Armorique⁴¹ : Rennes : neuvième gelée en avril, un record depuis 1945.



Cartes recensant les gelées matinales depuis 1945.

19 avril 2021

France3-région Auvergne-Rhône-Alpes⁴² : **Ardèche : les aides de l'Etat aux agriculteurs après l'épisode de gel seront-elles suffisantes?**

Il y a 10 jours un intense épisode de gel mettait à mal nombre de cultures. Les dégâts sont tels que le 17 avril Jean Castex a annoncé le déblocage d'une enveloppe d'1 milliard d'euros pour compenser les pertes de récoltes. Ce plan d'urgence sera-t-il suffisant pour aider les agriculteurs?

Les récoltes des fruits d'été ne sont pas les seules concernées. Ainsi, à Saint-Julien-du-Serre, Cédric Mathon ne récoltera rien de sa production de kiwis bio à l'automne.

19 avril 2021

La Chaîne Météo⁴³ : **Avril 2021 : froid durable, gel record et déficit de pluie important**

A quelques jours du mois de mai, le bilan des deux premières décades du mois d'avril 2021 montre que les températures sont déficitaires de plus de 2 degrés par rapport à la normale 1981-2010 avec un déficit pluviométrique de l'ordre de 60%. Du point

de vue des températures, ce mois d'avril 2021 contraste avec avril 2020 qui se situait au 3ème rang des mois d'avril les plus chauds.



20 avril 2021

Ouest-France⁴⁴ : Le mois d'avril bat des records de chaleur

Rarement un mois d'avril a été aussi chaud. Le thermomètre a battu quelques records de chaleur dans certaines villes dans la moitié nord du pays. D'autres records sont à attendre d'ici la fin du week-end.

Records battus à Perros-Guirec, Lannion et Saint-Brieuc

Certains records de chaleur pour un mois d'avril avaient d'ailleurs été battus dès mercredi à Perros-Guirec (26,9 °C), Lannion (25,8 °C) ou Saint-Brieuc (25,3 °C).

22 avril 2021

20 minutes⁴⁵ : **Le mois d'avril bat des records de chaleur dans toute la France**

« Une séquence estivale précoce remarquable »

L'après-midi du 19 avril se classe parmi les quatre plus chaudes depuis l'après-guerre

Comme on peut le voir dans ces témoignages, ce sont les courants chauds et les courants froids qui font le climat. La concentration en CO₂ n'a pas varié entre les mois de mars et d'avril, mais les cultures ont été doublement impactées, par l'épisode chaud du mois de mars, qui a provoqué un bourgeonnement précoce de la végétation, d'abord, puis par le courant polaire, début avril, qui a anéanti de nombreuses cultures.

Le bouleversement climatique n'est pas dû à l'effet de serre, comme le pensent les climatologues, mais aux courants tangentiels qui déplacent les masses d'air chaud et d'air froid, des masses d'air plus chaudes et plus froides, d'année en année.

Il faut bien comprendre que l'atmosphère n'est pas un milieu homogène. Il y a un ballet incessant entre les masses d'air froid, venant des pôles, et d'air chaud, venant de l'équateur. Ces masses d'air ne se mélangent pas. Elles s'affrontent. Elles se morcellent en des sortes de bulles d'air froid et d'air chaud, qui rythment la croissance de la végétation, qui a besoin de l'hiver pour se reposer et de l'alternance de pluies et de chaleur pour se développer.

Annexe E

SÉCHERESSES, INCENDIES & INONDATIONS

Nous avons beaucoup trop longtemps écarté le cycle de l'eau de la question du réchauffement climatique. Les incendies ravageurs que nous avons connus, que nous connaissons et connaîtront encore, en Australie, en Californie, en Europe, partout dans le monde montrent combien la sécheresse ruine le monde vivant.

Les articles de journaux ne manquent pas de faire la relation avec le réchauffement climatique pour chacun de ces événements, sans toutefois en préciser les mécanismes. Il existe pourtant des liens entre ces manifestations du réchauffement climatiques qui pointent une causalité contre-intuitive.

La sécheresse associée à des températures élevées est une condition dramatiquement favorable à l'apparition d'incendies.

[BFMTV – 9/01/20] ⁴⁶

« 2019 a été l'année la plus chaude et la moins pluvieuse de l'histoire australienne. Des conditions favorables au développement des feux qui sévissent dans le pays.

Depuis septembre 2019, l'Australie est confrontée à des incendies d'une ampleur exceptionnelle... »

« Selon les données de la Nasa, plus de 80.000 feux ont été recensés en décembre 2019 contre à peine 30.000 à la même période en 2017 et 2018. En 2014, 2015 et 2016, ce chiffre était encore moins élevé et tournait plutôt autour de 10.000. »

[Australia – 25/01/20]⁴⁷

« l'année 2019 a été marquée par une période de longue et intense sécheresse frappant tout le pays. »

« Tout commence en septembre 2019, dans le Queensland et au sud du New South Wales. C'est la saison tant redoutée des feux de brousse, celle qui suit généralement les longues et importantes périodes de sécheresse. Cette fois cependant, la situation est bien pire que d'habitude et personne ne se doute que les feux en question ne s'arrêteront pas, mais gagneront chaque jour toujours plus de terrain, ravageant des pans entiers de côtes australiennes. »

« Jusqu'à présent, on estime que plus de 8 millions d'hectares (soit 80 000 km²) ont été détruits dans les flammes des incendies en Australie. À titre de comparaison, 2,5 millions d'hectares ont brûlés en Amazonie l'année dernière, et 800 000 hectares durant les incendies de forêts qui ont touché la Californie en 2018. »

La relation entre les incendies d'ampleurs inédites et les inondations dramatiques que nous connaissons depuis quelques années est peut-être moins évidente. Or, outre la chaleur, les incendies de forêts génèrent également une grande quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cette masse finit par se condenser et retombe massivement sur

terre, sous forme tout aussi massive de pluies diluviennes. Les sols ne pouvant pas absorber de telles quantités d'eau, il s'en suit des risques élevés d'inondation.

[Independant – 18/01/20]⁴⁸

« Des tempêtes ont balayé ce samedi certaines zones de la côte Est de l'Australie, ravagée depuis septembre dernier par des feux de forêt, provoquant des inondations et la fermeture d'axes routiers, mais une centaine d'incendies étaient toujours actifs à travers le pays où la sécheresse prédomine. »

[Euronews – 18/01/20]⁴⁹

« Après une sécheresse record, des précipitations records. L'Australie n'est pas épargnée par les éléments ces dernières semaines. Des trombes d'eau se sont abattues sur les États de Nouvelle-Galles, de Queensland et de Victoria, les trois territoires les plus touchés par les incendies des derniers mois. Les fortes pluies si attendues ont provoqué des inondations, des coupures de courant, plusieurs axes routiers majeurs ont également dû être fermés. »

La faute au réchauffement climatique ?

C'est un *a priori* commun, comme en témoignent ces articles :

[Sciencepost – 12/11/19]⁵⁰

« Un temps anormalement chaud et sec

Si l'Australie est naturellement affectée par des feux de brousse, la saison connaît **un départ historique**. En particulier au vu du caractère atypique des secteurs touchés – comme la partie tropicale du Queensland. Cet épisode se place dans un contexte de réchauffement global favorisant toujours plus fortement les sécheresses et les incendies. « *Nous sommes dans des conditions de poudrière sur quasiment tout l'État. Il suffit d'une étincelle pour lancer un incendie qui peut brûler pendant des jours* », relate le chef des pompiers. »

[Australia – 25/01/20]

« Forcement, la question du réchauffement climatique se pose, s'impose même !

À plusieurs reprises par le passé, les scientifiques ont déclaré que cette augmentation anormale des températures ne ferait qu'amplifier les incendies en Australie et les rendre plus fréquents. Ainsi, il est clair que les conditions météorologiques extrêmes, la saison des feux de brousse plus longue et la hausse des températures ne font qu'accroître les risques de feux de brousse et leur permettent de se proposer plus rapidement sur des zones plus étendues.

Le réchauffement climatique n'est donc pas une cause directe de ces incendies mais, soyons réalistes, il y contribue largement. »

[Forbes – 24/03/21]⁵¹

« C'est la seconde catastrophe naturelle qui touche l'Australie en deux ans. L'année dernière, des incendies de forêt avaient dévasté une grande partie du pays. Ces différents événements ravivent les craintes concernant le changement climatique, mais le gouvernement se refuse toujours à le reconnaître. »

La relation avec l'effet de serre n'est pas évidente à établir, mais cet enchaînement d'évènements est parfaitement cohérent avec le mécanisme de la machine thermique terrestre. Ici, la source de chaleur ne provient pas du Soleil, mais des incendies eux-mêmes. Une partie de cette chaleur est captée par la vapeur d'eau générée, issue de la sève et de la combustion des cellules de cellulose et de lignine, riches en atomes d'hydrogène.

Cette vapeur d'eau allonge notablement le temps de séjour de la chaleur à la surface du globe.

Or, les forêts qui se consomment massivement ne seront pas compensées avant longtemps. Cela crée un déséquilibre durable qui contribue au réchauffement climatique. Celui-ci favorise les départs de feux et des incendies qui amplifient le réchauffement climatique. On est dans un cercle vicieux.

Nous avons un schéma général :

1. une période de sécheresse et de températures élevées ;
2. des incendies d'ampleurs inédites ;
3. des épisodes de plus en plus nombreux de pluies diluviennes donnant lieu à des inondations dramatiques.

La condition première est l'association de la sécheresse et d'une température élevée.

Sans déficit du renouvellement des nappes phréatiques, les départs de feux seraient moins nombreux et leur ampleur serait moins destructive.

Une bonne hydratation des plantes permet à l'évapotranspiration des sols végétalisés de jouer pleinement leur rôle de régulation de la température, ce qui inhibe les deux facteurs responsables des incendies et, en cascade, les pluies diluviennes.

L'on a deux causes différentes conduisant au réchauffement climatique : le déficit de renouvellement des nappes phréatiques et les sources de chaleur endogène.

Annexe F

INTÉRÊTS ET LIMITES DES RÉOLUTIONS CLIMATIQUES

Accords de Paris

Intérêts

Les accords de Paris ont été un succès diplomatique indéniable.

Ils font référence au niveau international.

Limites

Sur la forme

Le consensus a été privilégié aux dépens de l'ambition. Il en découle des résolutions molles sur la base du volontariat, portant sur des intentions éparses.

Sur le fond

Ils conduisent à une politique de petits pas, sans plan structuré.

Ils affichent une résignation à laisser filer le réchauffement climatique, se contentant d'émettre des souhaits pour ne pas l'accélérer.

Ils focalisent l'attention sur la thèse de l'effet de serre et la décarbonisation, suivant la thèse martelée par l'ONU depuis 1988.

Discussion

Le manque de regard critique se retrouve dans les déclinaisons opérationnelles. Ainsi, en France, pays organisateur de la COP21 et instigateur de ces accords, la Programmation Pluriannuelle pour l'Énergie et le climat⁵² (PPE), qui traduit l'engagement de la France en actions concrètes à l'horizon de 2028, exonère de son bilan carbone le CO₂ qu'elle génère hors de ses frontières.

On peut lire au chapitre 1.3.3 :

« En 2050 : neutralité carbone (la France émet sur son territoire autant de gaz à effet de serre qu'elle en absorbe) en divisant les émissions de gaz à effet de serre par un facteur supérieur à six entre 1990 et 2050. »

Ainsi, l'on encourage l'implantation de fermes photovoltaïques pour nous vanter de produire une énergie propre, alors que les pays qui fabriquent ces panneaux doivent comptabiliser chez eux le CO₂ généré pour les produire. Il en est de même de toute la production que nous délocalisons dans les pays à bas coûts ou de nos importations de

produits manufacturés. Nous consommons ces produits, mais nous laissons l'ardoise du CO₂ aux pays producteursⁱ.

En quoi le bon bilan carbone de la France permet-il de limiter le réchauffement climatique mondial ? Ce manque de rigueur comptable nuit terriblement à la gestion de la crise climatique.

Comment pouvons-nous espérer atteindre nos objectifs avec des outils de pilotage ainsi faussés ?

En outre, cette programmation pluriannuelle compte sur les techniques énergétiques anciennes, développées alors que la question climatique n'était pas encore posée, pour faire face à la menace qui pèse sur les générations à venir.

On peut lire au chapitre 1.3.4 :

« L'enjeu de la PPE est de donner les bonnes incitations pour orienter le système dans cette direction à l'horizon qui est le sien : 2028. Le gouvernement ne parie pas sur un développement massif de technologies non existantes aujourd'hui pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Le progrès technologique va jouer un rôle et il est important de le stimuler, mais le système actuel doit s'orienter vers des actions ambitieuses et réalistes sans attendre. »

L'attitude pragmatique est honorable. Il est sain de s'appuyer sur ce qui est disponible en attendant que l'on développe des solutions adaptées à la problématique climatique. Mais là, aucune recherche ciblée n'est lancée.

La PPE ne ferme pas la porte à un éventuel « progrès technologique », mais d'où viendrait-il, si l'État ne le promeut pas ?

Les dispositions les plus intéressantes des accords de Paris concernent l'amélioration des connaissances scientifiques sur le climat et la création d'un réseau d'alertes précoces (articles 7 et 8).

NB : L'objectif de cet exposé est d'apporter une réflexion sur des mécanismes du réchauffement climatique d'origine anthropique laissés dans l'ombre.

La biomasse

Intérêts

C'est la ressource naturelle par excellence. Elle est exploitée par l'Homme depuis la conquête du feu et a été sa seule source de chaleur jusqu'à l'ère industrielle.

C'est une source renouvelable, qui suit un cycle du carbone, essentiel à la croissance des plantes. On le matérialise aisément avec le charbon de bois qui alimente nos barbecues. Sa combustion produit du CO₂, qui est capté par le feuillage des plantes. La photosynthèse casse la molécule pour séparer le carbone, qui nourrit la plante, et relâche

ⁱ Le CO₂ est le marqueur de l'exploitation d'énergies endogènes fossiles (principalement du charbon, en Chine), et celles-ci alimentent la machine thermique terrestre.

l'oxygène dans l'atmosphère. Cela se produit sur terre avec les végétaux, mais également dans les océans avec les algues et le phytoplancton.

C'est un puits carbone naturel.

Limites

Les limites sont de deux ordres.

La première est quantitative. Si la ressource est renouvelable, elle n'est pas illimitée. Pour qu'une ressource soit durable, il faut qu'elle soit non seulement renouvelable, mais que la consommation que l'on en fait ne dépasse pas son renouvellement. Or, les incendies et le recul de la forêt amazonienne, par exemple, entament ce capital.

La seconde est qualitative. La vocation ancestrale de l'agriculture est agraire. Le bois de chauffage était un sous-produit. La croissance des besoins énergétiques menace cette vocation. La méthanisation des résidus agricoles oriente le choix des cultures et des élevages⁵³ en fonction des marchés les plus rentables⁵⁴. L'exploitation agricole tend à devenir de type industriel⁵⁵.

Discussion

La population mondiale a décuplé⁵⁶ depuis le milieu du XVIII^e siècle et devrait encore augmenter de moitié en 2100⁵⁷. La vocation agraire doit rester la priorité de l'agriculture. La biomasse doit se développer dans le respect de cette priorité.

L'exploitation des microalgues peut être une voie à suivre^{58 59}.

La voiture électrique

Intérêts

La voiture électrique est présentée comme une voiture propre et silencieuse

D'un point de vue technique, son avantage est celui d'offrir un couple constant, ce qui la rend très souple à conduire, surtout en ville.

Limites

Est-elle aussi vertueuse qu'on nous la vend ?

L'électricité n'est pas une énergie primaire et ne se stocke pasⁱ. La question qui nous intéresse n'est pas de savoir comment on consomme l'électricité, mais comment on la produit. Or, l'argument écologiquement correct autour de la voiture électrique fait res-

ⁱ Mis à part l'électricité statique, qui donnent lieu à de puissants orages et que l'on utilise dans les condensateurs électriques. Le stockage qu'ils permettent est assez marginal. Les batteries électriques ne stockent pas l'électricité, mais la convertissent par un processus électrochimique.

sortir uniquement l'absence d'émission de CO₂...

Cela n'est vrai que si l'électricité nécessaire pour la faire marcher ne produit pas de CO₂. Le discours des pouvoirs publics maintient un silence assourdissant sur ce point.

En réalité, la recharge nocturne des voitures électriques permet d'écouler la surproduction des centrales nucléaires la nuit... C'est une façon de pérenniser le parc nucléaire français, sans lequel il sera impossible de rouler à l'électrique.

Si les centrales nucléaires n'émettent pas de CO₂, proprement dit, elles sont tout aussi nocives pour le climat que leurs homologues thermiques par la chaleur et la vapeur d'eau qu'elles déversent dans notre biotope.

Discussion

La voiture électrique ne fait qu'occulter le problème en le déplaçant en amont (la production d'électricité). D'un point de vue purement énergétique, l'opération est blanche.

C'est alors beaucoup d'énergie et de ressources qui auraient pu être utilisées plus utilement, comme le développement d'un carburant de synthèse, recyclant le CO₂⁶⁰.

Les batteries sont un point noir. Elles représentent un poids mort d'autant plus important que l'on augmente l'autonomie des modèles, l'équivalent de plusieurs passagers fantômes. Or, l'excédent de poids induit une surconsommation énergétique dans les phases de démarrage (circulation urbaine) ou en montée. C'est aussi un vecteur d'usure des composants du véhicule (freins, pneumatiques, suspensions) et de la voirie. Mais, c'est surtout leur cycle de vie, de la fabrication à leur recyclage, qui présente une gageure environnementale.

Cela vaut-il la mutation du parc automobile et des infrastructures qui vont avec ?

D'un point de vue écologique, la voiture électrique est loin d'être aussi propre qu'annoncée⁶¹⁶².

La fin des chaudières au fioul

Intérêts

D'un point de vue écologique, cela va dans le sens de la suppression des énergies fossiles et de la pollution qu'elles entraînent.

D'un point de vue économique, cela fait marcher le commerce et tourner les usines pour produire des installations nouvelles.

Limites

Du point de vue du développement durableⁱ, est-il pertinent de jeter le parc de chaudières au profit de pompes à chaleur ?

Du point de vue climatique, le gain climatique est-il à la hauteur des annonces ?

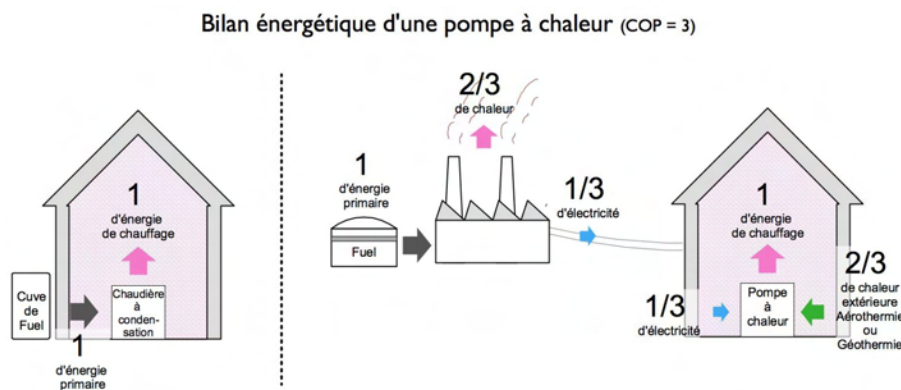
Dans une centrale (thermique ou nucléaire), un tiers de la chaleur est convertie en électricité, qui servira à alimenter notre pompe à chaleur, dont le COP est autour de 3...

En gros, l'énergie récupérée par la pompe à chaleur compense l'énergie perdue dans les centrales électriques. Nous sommes dans un jeu à somme quasi nulle.

Le COP est une valeur instantanée. Il peut être supérieur à 3, quand les conditions sont favorables : en intersaison, lorsque la température est clémente et que l'humidité n'est pas trop élevée. Mais, il peut descendre en dessous de 3, lorsque les températures sont négatives.

Quand bien même le COP moyen serait un peu supérieur à celui de notre exemple, les pompes à chaleur ne révolutionneront pas le bilan énergétique du chauffage au fioul.

Le gain marginal compense-t-il la dépense énergétique engagée par cette mutation ?



Une pompe à chaleur d'un COP de 3 fournit 3 fois plus de chaleur qu'elle ne consomme d'électricité (facturée).

Les deux tiers de la chaleur étant puisés dans l'environnement extérieur (parts gratuites),

l'utilisateur fait des économies. Mais ceci est l'aspect monétaire.

Du point de vue énergétique global (ce qui intéresse le climat), il faut tenir compte de la production de l'électricité. Or, pour une part d'énergie primaire, deux tiers sont dissipés dans l'environnement extérieur et seulement un tiers est transformé en électricité.

Finalement, une part d'énergie primaire donne une part de chaleur utile.

C'est ce que l'on obtient avec une chaudière à condensation...

Discussion

Éthiquement, il est difficile de s'opposer à cette mesure, tant le fioul est attaché à une pollution visible et incarne aujourd'hui le réchauffement climatique.

Toutefois, cela pose la question de la cible. Qu'est-il visé, le fioul ou la chaudière ?

ⁱ Les Accords de Paris citent 12 fois la mention développement durable dans ses 10 premiers articles.

Le fioul, hydrocarbure d'origine fossile ? À ce titre, c'est une énergie endogène, qui booste la machine thermique terrestre. Mais, il en est de même du gaz ou du nucléaire.

C'est moins la façon de consommer qui importe, que celle de produire. On devrait plutôt remplacer le fioul d'origine fossile par des alternatives renouvelables, issues de la biomasse, de façon raisonnée, ou d'hydrocarbures de synthèse...

Depuis la crise pétrolière de 1973 et la ratification du protocole de Kyoto, en 1997, nous avons le temps (et le devoir) de chercher des alternatives à l'origine fossile des hydrocarbures. Cela reste le moyen le plus simple et le plus performant de stockage de l'énergie : plus de 40 MJ/kg (ce qui équivaldrait à une batterie de 12 V d'une capacité de 1000 Ah/kg).

La chaudière, moyen décentralisé de production de chaleur ? Est-il pertinent de faire transiter ce flux saisonnier par un réseau fonctionnant à flux tendu ? Cela impose des contraintes de dimensionnement des infrastructures qui pourraient être évitées. Cela a un coût, budgétaire, écologique, humain, que l'on pourrait investir plus utilement dans de nouvelles formes de domestication de l'énergie solaire.

Le photovoltaïque

Intérêts

C'est une énergie potentiellementⁱ renouvelable.

C'est une excellente ressource dans l'espace, où les panneaux peuvent être constamment orientés vers le Soleil pour avoir le meilleur rendement et ne souffrent que de courtes périodes d'occultation, ne nécessitant qu'un modeste moyen de stockage.

C'est également un bon choix sur Terre pour répondre à des besoins isolés ou marginaux.

Limites

Le photovoltaïque est une énergie à flux tendu soumise à un double fonctionnement cyclique, quotidien et saisonnier.

Elle n'est pas pilotable. La production est tributaire de la course locale du Soleil. Elle est maximum à son zénith et nulle toute la nuit.

Aucune péréquation n'est possible (il fait constamment nuit sur une moitié du globe).

Cette mesure ne répond pas aux besoins de lumière la nuit et de chauffage l'hiver, par exemple. Cela nécessite donc une autre source d'énergie, plus adaptée, plus disponible.

Elle présente une dette énergétique importante⁶³ (énergie grise) pour la fabrication des panneaux, l'équivalent de trois ans de production d'un panneau solaire, dans des condi-

ⁱ C'est le bilan entre l'énergie produite et de l'énergie absorbée par le développement du parc, qui permet de vérifier si cette source est réellement renouvelée.

tions optimales d'ensoleillementⁱ.

Discussion

Le photovoltaïque a une image d'énergie verte. Pour que cela soit vrai, il faudrait réunir deux conditions :

1- Que cette énergie soit neutre vis-à-vis du bilan thermique de la Terre. Ce qui n'est pas le cas, loin de là.

Le retour énergétique des cellules à base de silicium cristallin (celles employées pour les satellites pour leur meilleur rendement) est de l'ordre de cinq ans. Pour les cellules des panneaux « terrestres », moins performantes, mais moins chères à produire et moins énergivores, ce délai est annoncé être de trois ans. Toutefois, cette donnée-construteur est à prendre avec quelques précautions. Il s'agit de chiffres pour des conditions d'exposition optimales, ce qui est rarement le cas dans les conditions réelles d'utilisation.

Si l'on prend un REnr de 4 ans, le taux de croissance critique est de 19 % par an. Cela veut dire que l'on doit se restreindre à un taux de croissance effectif nettement inférieur pour assurer une part de production verte. Or, le développement de fermes photovoltaïques de plus en plus grandes se fait à un rythme inconsidéré. C'est alors le réseau qui doit fournir de l'énergie pour fabriquer les cellules photovoltaïques. L'on est alors dans une croissance parasite. *In fine*, ce sont les énergies endogènes qui compensent le déficit d'énergie grise, principalement du charbon, puisque la Chine est le leader de la production photovoltaïque.

Plus les élus locaux autorisent l'implantation de fermes photovoltaïques sur leurs territoires, pensant s'inscrire dans une démarche écoresponsable vis-à-vis du climat et des générations futures, plus ils participent en fait à l'aggravation du réchauffement climatiqueⁱⁱ.

À leur décharge, de quelles ressources disposent-ils pour décrypter les arguments des sociétés qui les démarchent ? De quelles compétences les états se dotent-ils ?

2- Que cette énergie soit autonome. Or, sa production cyclique, par nature, impose de la doubler par une autre source pour pallier ses déficiences. Le photovoltaïque fait alors doublon.

L'adossement à des unités de stockage est souvent vu comme une alternative, mais doit être réservé à des utilisations marginales. Lorsque la nuit est deux fois plus longue que le jour, il faut deux unités consacrées au stockage pour une unité en flux tendu. Cela triple donc le délai de retour énergétique (sans compter l'énergie grise des moyens de stockage eux-mêmes).

ⁱ Ce dont les implantations réelles sont assez éloignées.

ⁱⁱ Par accumulation de l'énergie grise due à une croissance trop rapide par rapport au délai de retour énergétique de cette technologie.

Le bilan énergétique est encore plus défavorable si l'on veut dimensionner les unités de production pour couvrir les besoins critiques hivernaux.

Ces deux conditions ne sont pas remplies. Le photovoltaïque n'a pas vocation à assurer une production de masse autonome. C'est une énergie d'appoint, qui doit être réservée à des installations isolées, en dehors d'autres solutions plus adéquates. Ce doit être l'exception.

L'éolien

Intérêts

Pendant des millénaires, le vent a permis le trafic maritime et a fait tourner les moulins. C'est une énergie infiniment renouvelable et neutre sur le bilan thermique terrestre.

Contrairement à certaines idées reçues, c'est une énergie constante, disponible de jour comme de nuit, été comme hiver.

Limites

Localement, les vents ne soufflent pas de façon régulière. Les bateaux et les avions peuvent adapter leur route pour profiter des meilleures conditions. Ce n'est pas le cas des installations fixes. En outre, comme l'électricité, le vent ne se stocke pas. C'est une énergie à flux tendu. Le taux de production effective est de l'ordre de 25 à 30 % de la capacité nominale des éoliennes.

Discussion

Un maillage réfléchi des implantations permet de lisser la production. Cela demande une programmation et une coordination dans le temps et dans l'espace, avec un objectif purement énergétique, climatique et écologique de développement durable.

Cela n'est pas compatible avec les obligations comptables à court terme d'entreprises privées ni même entre les États. Les accords de Paris prévoient un enregistrement des initiatives, mais ni coordination ni pilotage...

Rouler à l'hydrogène...

Intérêts

Sur le papier, l'hydrogène présente bien des attraits. Sa combustion ne produit pas de CO₂, seulement de l'eau, et son pouvoir calorifique est 3 fois plus élevé que celui des hydrocarbures (hors méthane)...

Ce dernier point est contrebalancé par sa très faible densité. À volume égal, l'on a 3 fois moins d'énergie dans un réservoir d'hydrogène, à très haute pression (700 bars), qu'avec les hydrocarbures...

Limites

L'hydrogène est le combustible des étoiles, celle du Soleil. Sur Terre, on le trouve essentiellement associé à l'oxygène pour former l'eau, ou associé au carbone pour former les hydrocarbures, dont le méthane est le plus riche (4 atomes d'hydrogène pour 1 atome de carbone).

Il n'existe pas à l'état natif, sinon quelques traces dans l'air. Il peut être issu de réactions chimiques, ou fabriqué spécifiquement par électrolyse de l'eau. Là, indépendamment de l'origine de l'électricité, c'est un contresens énergétique.

L'électricité est une énergie motrice, une énergie noble, utilisable pour produire du travail, avec des rendements qui peuvent aller jusqu'à 90 % et plus.

L'hydrogène est une énergie de stockage. Que ce soit par combustion dans un moteur thermique ou dans une pile à combustible, on obtiendra au mieux 30 à 35 % d'énergie motrice. À cela, il faut déduire les pertes d'énergies dues à l'électrolyse et à la compression du gaz pour le stocker dans un volume raisonnable⁶⁴.

Discussion

Il faut avoir un besoin spécifique de l'hydrogène, pour justifier de telles pertes. Ce qui peut être accepté pour propulser les fusées comme Ariane 5 (quelques vols par an) doit être considéré avec une toute autre attention, quand il s'agit d'une utilisation à grande échelle, suivant une démarche de production énergétique raisonnée.

En conclusion

On peut mieux employer ce qui existe déjà : l'éolien ; le solaire thermique et le photovoltaïque, mais l'on doit développer d'autres voies comme la photosynthèse ou le cracking.

Annexe G

*Les uns savent qu'ils croient,
les autres croient qu'ils savent.*

SCIENCE, CROYANCES ET SAVOIRS. LA PLACE DU DOUTE.

On peut opposer la science à la religion, au sens où la science repose sur la démonstration, alors que la religion repose sur la foi, l'admission d'une vérité que l'on ne peut pas prouver. Dans la religion, la Vérité est absolue et n'admet aucune critique. En science, la vérité évolue grâce aux critiques. Elle fait foi, tant qu'une théorie supérieure ne vienne s'imposer. La vérité scientifique est donc une vérité relative. À partir de là, le débat est possible.

La connaissance scientifique est un paradoxe. Elle s'appuie sur une théorie à la fois vérifiable et limitée, incertaine. La connaissance est circonscrite à un domaine fini. Au-delà, elle est mise à défaut. Ces aberrations conduisent à chercher une théorie plus vaste, qui englobe le tout. Parfois des théories parfaitement reconnues viennent à s'opposer, comme la relativité généralisée et la mécanique quantique. Elles se vérifient chacune pleinement dans leurs domaines respectifs, mais se contredisent si elles les quittent. Les recherches actuelles tentent de trouver une théorie plus vaste qui les englobe.

L'idéal scientifique veut que les résultats se vérifient à l'identique, quel que soit le lieu, le moment et l'expérimentateur, mais seules les mathématiques remplissent ces conditions. Là, la démonstration n'a pas besoin de support matériel. Ce n'est pas le cas de la physique. Cette discipline est guidée par l'observation. La science s'assimile alors davantage à un art. Il n'est pas question d'inventer, mais de comprendre, de reproduire ou de prédire. Cela a amené à créer des outils mathématiques pour formaliser une théorie à partir des observations réalisées, comme le fut l'œuvre de Fourier.

En ce qui concerne le climat terrestre, les observations varient avec le temps. Nous ne sommes pas maître des conditions de celles-ci. Nous ne pouvons revenir aux conditions de la formation de la Terre, par exemple. Nous ne pouvons que faire des observations indirectes. Tout est alors dans notre capacité à interpréter les indices que nous trouvons. Cette interprétation est forcément subjective et partielle. Il faut avoir conscience de notre perception limitée de la vérité et laisser la place au doute.

Le doute... Cela est une notion toute philosophique, bien éloignée des formations scientifiques, pour lesquelles la place donnée aux mathématiques tend à sélectionner des esprits tournés vers l'abstraction (et un certain élitisme), peu compatibles avec l'humilité nécessaire à l'observation critique. Il est alors facile de s'enfermer dans des certitudes,

basées sur des *a priori*, et des conclusions hâtives. L'histoire des chevaux du lac Ladoga et l'interprétation qui en est faite en sont un exemple.

Les chevaux du lac Ladoga

Dans son roman *Kaputt* (1943), l'écrivain italien Curzio Malaparte relate l'anecdote suivante, que l'on présume survenue en 1942, lors du siège de Leningrad :

« Le troisième jour un énorme incendie se déclara dans la forêt de Raikkola. Hommes, chevaux et arbres emprisonnés dans le cercle de feu criaient d'une manière affreuse. (...) Fous de terreur, les chevaux de l'artillerie soviétique — il y en avait près de mille — se lancèrent dans la fournaise et échappèrent aux flammes et aux mitrailleuses. Beaucoup périrent dans les flammes, mais la plupart parvinrent à atteindre la rive du lac et se jetèrent dans l'eau. (...) »

Le vent du Nord survint pendant la nuit (...) Le froid devint terrible. Soudainement, avec la sonorité particulière du verre se brisant, l'eau gela (...)

Le jour suivant, lorsque les premières patrouilles, les cheveux roussis, atteignirent la rive, un spectacle horrible et surprenant se présenta à eux. Le lac ressemblait à une vaste surface de marbre blanc sur laquelle auraient été déposées les têtes de centaines de chevaux. »

— Curzio Malaparte, *Kaputt*, 1943

(source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Lac_Ladoga)

Kaputt est un récit écrit à la première personne, où l'auteur relate ses pérégrinations de diplomate. Lorsqu'il se trouve au bord du lac Ladoga, il rapporte les conversations qu'il a, assis sur les têtes émergées des chevaux de glace. Les deux pages consacrées à l'épisode dramatique des chevaux fuyant l'incendie pour se faire piéger dans le lac est écrit à la troisième personne... C'est une histoire rapportée, dont *Malaparte* n'a pas été le témoin. Personne n'en a été un témoin direct. Le scénario qu'il décrit est une reconstitution.

Lorsque dans son livre *L'heure de s'enivrer*, le vulgarisateur scientifique *Hubert Reeves* cite l'exemple de ces chevaux pour illustrer la notion de surfusion de l'eau – c'est à dire sa capacité à rester à un état liquide alors qu'elle se trouve à une température négative et qu'elle se change brusquement en glace au moindre choc –, les lecteurs pensent implicitement qu'il accrédite le fait que le lac était en surfusion et qu'il gela brusquement, emprisonnant près d'un millier de chevaux. L'on ne compte pas les sites qui abondent en ce sens, y compris des sites scientifiques. Un seul émet un doute sur cette interprétation, sans aller plus loin dans l'analyse.

Cette lecture au premier degré est une pure fiction épique, qui ne tient pas à une analyse critique. Le lac Ladoga est le plus grand d'Europe. Il est difficile de concevoir l'énergie nécessaire pour amener une telle quantité d'eau en surfusion. En outre, la surfusion est un état instable, qui ne peut être obtenu qu'avec mille pré-

cautions. Or, un lac est un milieu habité par toute une faune. De plus, le lac Ladoga était une voie de navigation importante. L'on est loin des conditions nécessaires à l'état de surfusion de ses eaux. Même en admettant que ce soit le cas, comment expliquer que des centaines de chevaux se soient mis à l'eau avant que le lac gèle soudainement ?

Non. Ce scénario tient de la légende, pas d'une analyse scientifique. Il s'agit pourtant bien d'un cas de surfusion comme l'indiquait Hubert Reeves, non du lac lui-même, mais plus banalement d'une pluie verglaçante. Nous en avons tous les ingrédients :

- « un énorme incendie se déclara dans la forêt de Raikkola » ;
- « la plupart (des chevaux) parvinrent à atteindre la rive du lac et se jetèrent dans l'eau » ;
- « Le vent du Nord survint pendant la nuit (...) Le froid devint terrible »
- « une vaste surface de marbre blanc sur laquelle auraient été déposées les têtes de centaines de chevaux »

Un incendie dégage une grande quantité de vapeur d'eau. Tandis que les chevaux sont dans le lac, la vapeur d'eau se refroidit brusquement au contact du vent glacial venu du Nord et entre en surfusion, pour s'abattre en pluie verglaçante sur les chevaux, dont la tête dépasse des flots.

Dit comme cela, le mythe perd de son mystère.

La cause du réchauffement climatique attribuée à l'effet de serre présente bien des similitudes avec l'interprétation grossière de la surfusion du lac Ladoga.

Si l'argument est percutant et à même de sensibiliser les États au danger de la dérive climatique, engendrée par les activités humaines, il occulte les causes les plus importantes.

L'on peut se demander alors, pourquoi tant de scientifiques se focalisent sur l'effet de serre au détriment des causes qui touchent directement la surface du globe, là où l'on enregistre les effets du réchauffement climatique.

Cette question est importante. La thèse de l'effet de serre est tellement ancrée qu'il est difficile de s'en détacher. Il en va d'une remise en question de la confiance que l'on a accordée aux experts du climat et, plus globalement, aux scientifiques. La question sous-tendue est de savoir quel crédit apporter à la thèse de la machine thermique terrestre. Pourquoi son auteur aurait-il raison contre tous ?

J'avoue que je me suis posé la même question. Il n'est pas évident de nager à contre-courant. Je me suis souvent demandé s'il n'y avait pas quelque chose qui m'aurait échappé. C'est la question de l'autocensure. C'est celle qui nous empêche de lever le doigt pour poser une question par peur des regards que l'on va attirer sur soi. On craint de se couvrir de ridicule...

Cette inhibition nous amène à accepter pour vrai ce que les autres semblent trouver évident. Les scientifiques n'échappent pas à ce réflexe. Ils sont d'autant plus prudents que les critiques envers la théorie officielle classent leurs auteurs comme climato-septiques... On est plus dans une question de croyances que du débat scientifique.

La volonté de l'ONU a été de sensibiliser les nations de la menace d'un réchauffement climatique, alors que cette question était bien éloignée des préoccupations de l'époque. Il fallait convaincre. La volonté n'était pas au débat...

Il est d'autant plus difficile à un scientifique de se distinguer, qu'il joue dès lors sa carrière.

Voyons les principales causes d'inhibition critique :

L'isolement

Par définition, les scientifiques se spécialisent dans un domaine donné. Plus ils sont pointus dans leur domaine, plus la sphère de leurs interlocuteurs compétents se réduit. Le dialogue inter-spécialités est difficile. L'on est amené à faire confiance à ce que disent les autres, tout comme l'on souhaite qu'ils fassent confiance à notre compétence dans notre spécialité. Dès lors, il est mal venu de sortir de sa spécialité pour émettre un avis critique dans un domaine qui n'est pas le sien.

La question climatique est éminemment interdisciplinaire. Dès lors, chacun intervient sur son domaine d'expertise sans remettre en question ce qui n'est pas de son ressort.

Le financement

Pour des raisons d'équilibre budgétaire, l'État s'est désengagé de la recherche et contraint les laboratoires à chercher des partenariats privés. Il s'en trouve que les sujets d'étude sont conditionnés à leur financement. La recherche n'est pas indépendante. Elle est soumise aux centres d'intérêts de leurs commissionnaires, qu'ils soient privés ou étatiques.

Les études scientifiques sont-elles alors à l'abri de conflits d'intérêts ?

La carrière

Les futurs chercheurs doivent soutenir une thèse devant un jury. Les sujets en vue attirent plus de vocation. Ce n'est pas le moment le plus judicieux pour faire des vagues.

Il n'y a pas de carrière scientifique hors des laboratoires. Les sujets d'études ne doivent pas desservir la réputation de ceux-ci...

Les chercheurs sont cotés en fonction de leurs publications. Là encore, il y a des sujets plus porteurs que d'autres. La recherche de reconnaissance par leurs pairs oriente alors les travaux...

La recherche fondamentale

Elle conduit à isoler l'objet étudié des sources de perturbations, ce qui peut conduire à déformer la réalité...

Alors que je réalisais mon mémoire d'ingénieur sur le refroidissement des moteurs-fusées, pour ce qui allait devenir le moteur Vulcain d'Ariane 5, je me suis heurté à une thèse sur les couches limites des écoulements supersoniques tridimensionnels, *sans* échange de chaleur...

Cela donne de belles équations, mais peut manquer de réalisme.

Cela ne veut pas dire qu'il ne faille pas poser des hypothèses théoriques, quitte à devoir transposer les résultats à des cas concrets – c'est l'art de l'ingénieur –, mais qu'il faille garder à l'esprit l'écart qu'il y a entre la théorie et la pratique.

La formation

Les études universitaires demandent de citer des sources. Chacun amenant sa pierre à l'édifice commun. Citer, ne signifie pas vérifier la pertinence de ce qui est écrit. C'est le travail des revues à comité de lecture, mais ce ne sont pas les seules sources admises.

Cela conduit à favoriser les domaines richement documentés et pénalise les travaux originaux.

Ainsi, il semble n'exister aucune étude d'impact climatique comparative entre l'effet de serre et la production de chaleur endogène.

La place du doute

Les filières scientifiques privilégient les maths. Si elles sous-entendent une certaine logique, elles laissent peu de place au doute. Ce serait plutôt le domaine de la philosophie. Or, passé le bac, cette discipline n'est plus au programme.

Il ne suffit pas d'avoir un doctorat es Sciences pour être un Pythagore, un Newton ou un Einstein. Nombre de savants illustres étaient à la fois scientifiques et philosophes. Si les formations supérieures sont accessibles à un nombre croissant d'étudiants, les grands esprits restent rares.

À ces causes inhibitrices s'ajoute un effet de martèlement. Cela fait plus de trente ans que les esprits sont formatés par la théorie de l'effet de serre. C'est autant de promotions de doctorants-enseignants. Il est alors très difficile de prendre le recul nécessaire pour remettre en question ce qui est présenté comme une évidence.

Je n'appartiens pas à ce moule. Je suis de la génération d'avant. J'ai une formation généraliste et un parcours transversal. Une grande partie de mon activité a été consacrée à traquer les causes de dysfonctionnement. Enfin, ma carrière étant derrière moi, j'échappe à la pression de l'autocensure.

Annexe H

À PROPOS DE L'AUTEUR

Pour financer mes études d'ingénieur en énergétique au CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers), j'ai d'abord travaillé au département *Environnement* de la DDE, comme dessinateur, avant d'être intégré comme calculateur dans la division de recherche appliquée de la SNECMA (constructeur français de moteurs d'avions).

C'est à ce titre que j'ai participé au programme COVOS, dont l'objectif était de fixer des normes d'émission des oxydes d'azote des vols commerciaux supersoniques (Concorde et projets de SST américains), afin d'en limiter l'impact sur la couche d'ozone, qui nous protège du rayonnement ultraviolet.

Dans mon cursus d'ingénieur, je me suis spécialisé dans la combustion et, plus particulièrement, la réduction des oxydes d'azote. Par mes compétences en dessin (issues d'un bac Maths et Techniques), j'ai conçu une forme originale de chambre de combustion, destinée à ce qui aurait dû être le *Super Concorde*, produisant quatorze fois moins d'oxyde d'azote que les chambres classiques, ce qui m'a valu d'être coauteur du brevet d'invention déposé par la SNECMA.

J'ai ensuite intégré la SEP (constructeur français des propulseurs de la fusée Ariane). J'ai assuré le suivi d'intégration et les réglages des moteurs du troisième étage à hydrogène et oxygène liquides des premiers vols commerciaux. Puis, je me suis intéressé à l'industrialisation de ces processus : passage de la phase expérimentale à la production opérationnelle.

J'ai créé mon cabinet de consultant en conduite de projets innovants et complété ma formation par un DESS en management, avant de faire un DEA en sciences de la décision.

Intérêt pour le climat

J'ai longtemps fait confiance aux experts pour maîtriser la question climatique, comme pour le trou dans la couche d'ozone, jusqu'à ce que ma fille fasse son mémoire de Master sur le développement du parc éolien en France. Là, j'ai constaté de nombreux écarts entre les déclarations d'intention et les dispositions pratiques et réglementaires.

En tant que consultant indépendant, j'intervenais souvent sur des projets en dérive, quand tout ce qui avait été tenté en interne avait échoué. La force du consultant extérieur est d'avoir un regard différent et de poser des questions qui sont occultées par la culture de l'entreprise : des non-dits, des détails négligés, des approximations, des impasses ou de mauvaises interprétations...

Dans pratiquement tous les cas, les dysfonctionnements proviennent d'un biais dans l'analyse initiale du projet. La question climatique n'échappe pas à cette règle.

-
- 1 Œuvres de Fourier – <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k33707/f1.item>
 - 2 https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ice_Age_Temperature.png
 - 3 <https://www.laradioactivite.com/site/pages/ChaleurTerre.htm>
 - 4 <https://reporterre.net/Le-changement-climatique-a-modifie-l-axe-de-rotation-de-la-Terre>
 - 5 <https://www.unep.org/resources/keeping-track-our-changing-environment>
 - 6 <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/effet-de-serre-wood.xml>
 - 7 https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Wien
 - 8 https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir
 - 9 <https://www.conventioncitoyennepourleclimat.fr/2019/12/04/quest-ce-que-leffet-de-serre/>
 - 10 <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/explication-effet-de-serre.xml>
 - 11 WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH (note 14, page 13).
 - 12 Ibid
 - 13 <https://www.climatetavenir.fr/2019/01/30/agir-pour-un-retour-a-letat-naturel-du-climat/>
 - 14 <https://www.climatetavenir.fr/2018/12/02/transition-energetique-vers-le-tout-electrique/>
 - 15 <https://abcmoteur.fr/actualites/carburant-bio-petrole-artificiel-a-partir-algues/>
 - 16 https://fr.abcdef.wiki/wiki/Algae_fuel
 - 17 <https://www.bioenergie-promotion.fr/52784/des-microalgues-produisent-du-petrole-renouvelable-grace-a-une-photoenzyme/>
 - 18 <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/climat/16534>
 - 19 <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-climat-13771/>
 - 20 <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/climat/>
 - 21 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat>
 - 22 <https://www.science-climat-energie.be/climat/definition-du-climat/>
 - 23 https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/climat.php4
 - 24 <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/serre/72352>
 - 25 <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/serre/>
 - 26 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Serre>
 - 27 <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Serre.html>
 - 28 https://www.dicocitations.com/definition_littre/26841/Serre.php?id_variante=88581
 - 29 https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_thermique
 - 30 <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Machine%20thermique/fr-fr/>
 - 31 https://fr.wikiversity.org/wiki/Machines_thermiques/%C3%89tude_de_quelques_machines
 - 32 <https://guy-chaumeton.pagesperso-orange.fr/site2004/1sch10phys.htm>
 - 33 <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quun-moteur-thermique-definition/>
 - 34 [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_\(physique\)#Loi_de_conservation](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_(physique)#Loi_de_conservation)
- Article détaillé : [conservation de l'énergie](#)
- 35 <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/temperatures-un-debut-de-printemps-tres-contraste>
 - 36 https://www.huffingtonpost.fr/entry/meteo-france-des-records-de-froid-battus-dans-le-nord-pour-un-debut-avril_fr_606c40c9c5b6c55118b7c497
 - 37 https://www.bfmtv.com/meteo/jusqu-a-11-1deg-c-des-records-de-froid-enregistres-pour-un-mois-d-avril-ce-jeudi_AN-202104080042.html
 - 38 https://www.francetvinfo.fr/economie/emploi/metiers/agriculture/gel-les-agriculteurs-deplorent-des-pertes-historiques_4367281.html
 - 39 https://www.bfmtv.com/environnement/carte-des-centaines-de-records-de-chaleur-et-de-froid-battus-en-france-ces-derniers-jours_AN-202104110091.html
 - 40 <https://www.sweetfm.fr/news/les-espoirs-de-belles-recoltes-geles-en-loir-et-cher-31085>
 - 41 <https://www.francebleu.fr/infos/meteo/rennes-9eme-gelee-en-avril-un-record-depuis-1945-1618736176>
 - 42 <https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/ardeche/ardeche-les-aides-de-l-etat-aux-agriculteurs-apres-l-episode-de-gel-seront-elles-suffisantes-2050987.html>
 - 43 <https://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2021-04-20/avril-2021-froid-durable-gel-record-et-deficit-de-pluie-important-59105>
 - 44 <https://www.ouest-france.fr/meteo/meteo-le-mois-d-avril-bat-des-records-de-chaleur-5710908>
 - 45 <https://www.20minutes.fr/societe/2259375-20180422-mois-avril-bat-records-chaleur-toute-france>

-
- ⁴⁶ https://www.bfmtv.com/international/incendies-en-australie-trois-graphiques-qui-montrent-a-quel-point-la-situation-est-exceptionnelle_AN-202001090033.html
- ⁴⁷ <https://www.australia-australie.com/articles/incendies-en-australie/>
- ⁴⁸ <https://www.lindependant.fr/2020/01/18/australie-apres-les-incendies-des-inondations-frappent-le-pays.8670185.php>
- ⁴⁹ <https://fr.euronews.com/2020/01/18/australie-apres-la-secheresse-et-les-flammes-les-pluies-et-les-inondations>
- ⁵⁰ <https://sciencepost.fr/laustralie-est-en-proie-a-des-incendies-historiques/>
- ⁵¹ <https://www.forbes.fr/societe/inondations-en-australie-evacuation-de-18-000-personnes-mais-le-bilan-pourrait-encore-salourdir/>
- ⁵² <https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>
- ⁵³ <https://reporterre.net/Methanisation-la-fuite-en-avant-de-l-agro-industrie>
- ⁵⁴ https://lemans.maville.com/actu/actudet_-sarthe-methanisation-un-risque-de-derive-_dep-4953715_actu.Htm
- ⁵⁵ https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/07/03/huile-de-palme-total-demarre-la-raffinerie-controversee-de-la-mede_5484938_3234.html
- ⁵⁶ <https://www.planetoscope.com/natalite/5-croissance-de-la-population-mondiale-naissances---deces-.html>
- ⁵⁷ <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/population/index.html>
- ⁵⁸ <http://energies-des-mers-tpe.e-monsite.com/pages/page-bis/c.html>
- ⁵⁹ https://lexpansion.lexpress.fr/actualites/1/actualite-economique/en-espagne-des-micro-algues-gourmandes-de-co2-pour-produire-du-biopetrole_977786.html
https://www.maxisciences.com/biocarburant/des-micro-algues-pour-fabriquer-du-biopetrole_art13564.htm
- ⁶⁰ <https://www.automobile-propre.com> (carburants-de-synthese-alternative-petrole)
- ⁶¹ La guerre des métaux rares – Guillaume Pitron – Les Liens qui Libèrent
- ⁶² L’arnaque de la voiture propre – Nicolas Meunier – Hugo Doc
- ⁶³ <https://www.climatetavenir.fr/2020/12/31/attention-aux-fausses-bonnes-resolutions-climatiques/>
- ⁶⁴ <https://www.climatetavenir.fr/2018/04/21/lhydrogene-energie-de-tous-les-fantasmes/>