

# Consommation d'énergie et rejet d'entropie dans la biosphère

Guy Deutscher (guyde@post.tau.ac.il)

School of Physics and Astronomy, Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Ramat Aviv, Israël

On a longtemps soutenu que les réserves limitées en combustibles fossiles représentaient un problème majeur, qui se manifesterait bientôt sous la forme de pics de production, suivis d'un déclin inéluctable.

Cette crainte d'une crise imminente de l'énergie nous paraît exagérée. Ce qui nous menace dans le court terme c'est plutôt la pollution de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que les changements climatiques induits par une montée spectaculaire de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Ces phénomènes dangereux pour la vie sont tous des manifestations d'une rupture d'équilibre, l'énergie solaire reçue n'étant plus suffisante pour compenser l'augmentation d'entropie générée par les activités humaines.

Traduction de l'anglais par Michel Belakhovsky.

Si l'énergie est une notion vue par tous comme familière, l'entropie est souvent considérée comme un concept plus difficile à comprendre. L'énergie fait partie de l'enseignement général dans les écoles primaire et secondaire pour tous les élèves, mais seuls les étudiants en sciences dures étudient l'entropie. Ce manque d'éducation à un concept scientifique fondamental, au prétexte qu'il est trop ardu pour des étudiants non spécialisés, rend aujourd'hui très difficile d'expliquer la nature exacte d'un des problèmes majeurs auquel fait face l'humanité.

Nous montrerons ici qu'il s'agit d'une crise de l'entropie plutôt que de l'énergie, et essaierons de tirer les conséquences de ce nécessaire changement de vision.

Au plan pédagogique, les notions d'énergie et d'entropie devraient en fait être introduites simultanément, et non séparément, dans le cursus d'études. Introduire d'abord l'énergie a pour l'essentiel une origine historique, alors qu'il est indispensable d'associer les deux concepts pour analyser l'impact de l'activité humaine sur la biosphère.

Il est bien connu que, pour maintenir la vie aux niveaux individuel et sociétal, un apport en énergie est nécessaire. Cet apport compense l'inévitable accroissement d'entropie – le désordre – dans des systèmes fermés. L'ordre dans notre corps comme dans la société est conservé grâce à cet apport, et l'entropie rejetée vers le monde extérieur. Comme nous le verrons, les sociétés complexes consomment l'énergie bien au-delà des besoins fondamentaux (alimentation, chauffage, etc.) de chaque individu.

Le rejet de l'entropie, à tous niveaux, n'est pas une question purement académique. Il prend des formes très concrètes et parfois

menaçantes pour la vie. La façon dont la pollution de l'air se produit est une illustration d'une loi physique établie par Boltzmann, qui montre que l'entropie croît (logarithmiquement) avec le nombre de positions que les particules peuvent occuper. Lorsque les molécules émises par le pot d'échappement d'une voiture se répandent dans l'atmosphère, un nombre énorme de positions leur est offert. Par une suite de collisions avec les molécules atmosphériques, les particules polluantes vont explorer tous les sites disponibles du fait que la croissance de l'entropie abaisse une forme d'énergie (l'énergie libre) de la biosphère. Les molécules de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) vont finalement se répartir uniformément dans l'atmosphère, comme prédit par Boltzmann. Cette répartition uniforme est irréversible.

## Rejet d'entropie, un phénomène dangereux, non local et dépendant du temps

On peut s'étonner qu'il ait fallu autant de temps pour que le problème de la pollution de l'air devienne l'objet d'une grande attention. Peut-être est-ce dû au fait que la pollution, comme toutes les formes de rejet d'entropie, est un phénomène non local et dépendant du temps, dont les effets ne sont souvent pas immédiatement visibles à grande échelle. *A contrario*, la consommation d'énergie est locale et immédiate : lorsque nous brûlons de l'essence dans la voiture, nous savons aussitôt ce qui a été perdu. Quand nous faisons le plein, le prix de l'essence est un souci immédiat. Mais l'effet de la pollution n'est pas ressenti, ni payé sur le champ. Les oxydes de carbone et d'azote, comme les particules émises à l'arrière du véhicule, ne

>>>



nous perturbent pas dans notre conduite. Mais une fois émis, ils se répandent progressivement sans que rien ne puisse les arrêter. Comme de nombreuses voitures participent au trafic, les particules qui finissent dans nos poumons ne sont probablement pas celles que nous avons émises. Du coup, qui faut-il blâmer ? Qui devrait payer pour les dommages causés à notre santé, et à celles des autres ? Et que dire de l'effet sur le climat des gaz à effet de serre rejetés ? Combien de futures générations souffriront des conséquences du désordre climatique ? Et que dire de la pollution des rivières et des réserves d'eau souterraines, inévitable en raison de la même loi de Boltzmann, une fois que des produits chimiques dangereux y ont été introduits ?

## Comparaison de différentes centrales électriques sous l'angle de l'entropie

Le rejet d'entropie est un outil utile pour comparer différents moyens de produire de l'énergie. L'accroissement d'entropie dû à la combustion de combustibles fossiles est bien supérieur à celui provenant des combustibles nucléaires, et donc beaucoup plus dangereux. Dans une étude récemment publiée par l'Organisation Mondiale de la Santé, il est estimé qu'en 2012 sept millions de personnes sont mortes prématurément en raison de la pollution de l'air. Ce nombre est supérieur par des ordres de grandeur à celui des morts causées par la production d'électricité nucléaire sur une période bien plus grande. C'est même bien au-delà du nombre de morts à Hiroshima et Nagasaki. Cette différence frappante résulte directement de la loi de Boltzmann. Alors que la diffusion dans l'atmosphère du  $\text{CO}_2$  et des autres gaz de combustion ne peut être stoppée et est irréversible, le combustible nucléaire peut être contenu car il est sous forme solide ou liquide. Il en résulte que l'entropie rejetée par les centrales nucléaires de puissance est négligeable. Des fuites sont possibles, mais restent l'exception tandis qu'elles sont la règle absolue avec les gaz conventionnels. Brûler des combustibles fossiles produit une électricité d'une façon infiniment plus dommageable à notre santé que celle produite par les centrales nucléaires.

Il faut noter que toutes les centrales, nucléaires et conventionnelles, rejettent aussi de l'entropie sous la forme de chaleur

de basse température. Mais ce rejet n'a que peu d'effet sur le climat, comparé à celui du  $\text{CO}_2$  et autres gaz à effet de serre.

Les sources renouvelables d'énergie ne sont pas exemptes de rejet d'entropie. Pour délivrer une énergie constante en dépit de leur intermittence, elles doivent être adossées à des centrales électriques conventionnelles s'il a été décidé de bannir l'électricité nucléaire. La fermeture d'installations nucléaires au bénéfice de l'éolien et du solaire adossés à des installations conventionnelles conduira *in fine* à plus de rejet d'entropie et plus de dommages sanitaires.

## La soi-disant crise de l'énergie

L'expression « crise de l'énergie » est née à mon avis en 1973, lors de l'embargo pétrolier suite à la guerre du Yom Kippur. À cette époque, le pétrole était le combustible de l'avenir. Il était moins cher que le charbon, et ses réserves abondantes. Les centrales électriques substituèrent le pétrole au charbon. Ce fut aussi le cas pour le chauffage. L'énergie nucléaire avait quelque succès, sans toutefois être compétitive avec le pétrole bon marché. Le développement de la circulation automobile requérait des quantités croissantes de pétrole. Son soudain embargo était une perspective terrifiante pour le monde occidental.

Cependant, ce n'était pas réellement une crise fondamentale de l'énergie, mais seulement une crise pétrolière temporaire. Si en 1975 le rejet de  $\text{CO}_2$  provenait bien davantage de la combustion de pétrole que de charbon, c'est l'inverse aujourd'hui. La consommation de pétrole est stabilisée, tandis que celle du charbon augmente rapidement. Le charbon est bon marché et abondant. Ses réserves mondiales sont bien mieux réparties que celles de pétrole, de gaz naturel, ainsi que de gaz et de pétrole de schiste. Pour nombre d'années, il n'y a aucun risque de manquer d'alimentation en énergie, sans même prendre en compte les énergies renouvelables et nucléaire. Il n'y a jamais eu de crise de l'énergie, et il n'y en aura pas davantage dans un avenir prévisible.

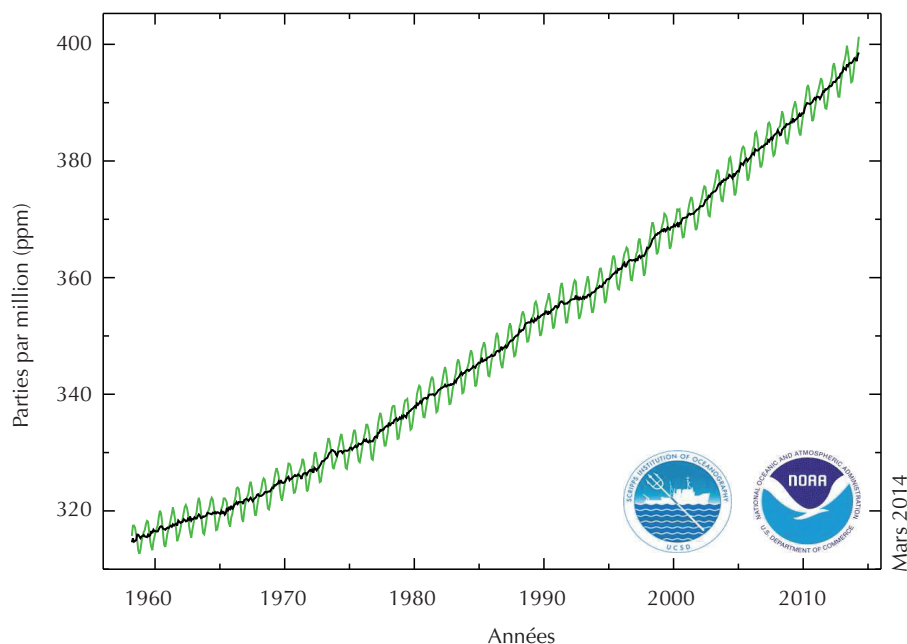
Comme je l'ai montré en détail ailleurs [1], la vraie menace à laquelle nous sommes confrontés est la crise de l'entropie. Jetons un coup d'œil rapide à l'histoire de la biosphère en termes d'énergie et d'entropie.

## Évolution de l'entropie dans la biosphère

Il y a 500 millions d'années, la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère était 25 fois plus élevée qu'aujourd'hui, les températures d'environ 10 degrés supérieures, et il n'y avait aucune végétation sur terre. L'apparition d'une couche d'ozone permit la propagation de végétation sur la terre sèche. L'atmosphère s'appauvrit alors en  $\text{CO}_2$  et, en raison d'un effet de serre réduit, les températures diminuèrent. Une partie du bois produit se transforma en dépôt de charbon. Des dépôts de pétrole et de gaz se formèrent également par accumulation de matière organique, peut-être d'organismes marins. Durant plusieurs centaines de millions d'années l'expansion de la vie et la réduction d'entropie se produisirent simultanément dans la biosphère, le rejet d'entropie par les organismes vivants et d'autres transformations telles que celles résultant de l'érosion étant plus que compensé par l'apport d'énergie solaire.

L'exploitation massive de combustibles fossiles inverse aujourd'hui cette tendance. Trop d'entropie est rejetée dans la biosphère pour être compensée par la photosynthèse. Une mesure de ce renversement est donnée par l'accroissement de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, qui est suivi très précisément depuis 1958 à l'observatoire Mauna Loa d'Hawaï (fig. 1). Au cours des 500 000 dernières années, il a oscillé entre 180 ppm et 280 ppm. Les enregistrements Mauna Loa ont commencé à 315 ppm, pour atteindre à présent 400 ppm. L'origine de cette extraordinaire augmentation abrupte est la combustion de combustibles fossiles d'origine anthropique. Extrapoler la tendance actuelle conduit à une concentration voisine de 600 ppm en 2100. Dans un siècle et demi, on retrouverait des valeurs d'il y a 100 millions d'années.

L'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  nous entraîne vers un territoire inconnu. L'humanité a bénéficié pendant les derniers 10 000 ans d'une période de stabilité climatique exceptionnelle, qui a permis l'épanouissement de la civilisation. Personne ne peut prédire les conséquences possibles d'une croissance aussi forte et rapide. Le réchauffement global n'est que l'une d'entre elles, peut-être pas la plus importante. Plus grave pourrait être l'instabilité du climat. Il est donc prudent – certains diraient impératif – de réduire le rejet d'entropie, pour revenir à des conditions



1. Variation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, de 1958 à 2013, mesurée à l'Observatoire Mauna Loa d'Hawaï. (Source : Scripps Institution of Oceanography, NOAA Earth System Research Laboratory)

Tableau 1. Besoins journaliers d'énergie pour une famille de quatre personnes (en kWh) en zone euro.

|   |            |
|---|------------|
| <p><b>Énergie alimentaire</b><br/>Basée sur une puissance moyenne consommée de 150 W, compte-tenu d'une activité physique modérée</p>   | <b>10</b>  |
| <p><b>Appareils électriques</b><br/>Incluant réfrigérateurs, machine à laver, télévision, ordinateur personnel, lumière, etc.</p>   | <b>10</b>  |
| <p><b>Eau chaude</b><br/>Pour usage sanitaire</p>   | <b>10</b>  |
| <p><b>Chauffage domestique</b><br/>Pour une maison bien isolée de 160 m<sup>2</sup> pour une famille, où l'équivalent de 1000 litres de fuel est consommé par an</p>                    | <b>30</b>  |
| <p><b>Transport</b><br/>Correspondant à 15 000 km par an d'une voiture consommant 10 litres de pétrole aux 100 km<br/>Il y a 10 kWh d'énergie chimique stockée par litre de pétrole</p> | <b>45</b>  |
| <b>Total (kWh)</b>  | <b>110</b> |

dans lesquelles il est compensé par le rayonnement solaire incident. Cela requerrait de réduire le niveau global d'émission carbonée à celui d'il y a 50 ans, quand la concentration de CO<sub>2</sub> était encore proche du haut de ses fluctuations normales, soit 280 ppm (fig. 1).

Le rejet d'entropie est lié à la quantité d'énergie que nous consommons, et à l'efficacité des transformations impliquées. Les deux aspects doivent être considérés.

## De combien d'énergie avons-nous besoin ?

En excluant la nourriture, la quantité de puissance dépensée *per capita* au Nigeria est seulement de 43 W. Or, dans les sociétés développées, elle est typiquement de 5 kW, soit cent fois plus élevée. D'où provient cette énorme différence ?

Le tableau 1 ventile les besoins journaliers d'énergie pour un ménage de quatre personnes dans un pays typique de la zone euro. Hors alimentation, c'est 100 kWh, ce qui correspond à une puissance d'environ 1 kW *per capita*, soit 20 fois plus grande qu'au Nigeria. Cet écart est facile à comprendre : la plupart des gens au Nigeria n'ont pas d'appareils électriques, pas d'eau chaude sanitaire, les conditions climatiques ne requièrent pas le chauffage domestique, l'air conditionné n'est en général pas utilisé et il n'y a pas d'automobiles privées pour le transport.

Mais le tableau 1 comporte une surprise majeure : la puissance utilisée *per capita* pour un ménage dans un pays développé, soit 1 kW, est à peu près cinq fois plus petite que la puissance totale dépensée par personne au niveau sociétal. Ce facteur cinq est le problème.

L'humanité peut se permettre de dépenser 1 kW *per capita*, car c'était la puissance dépensée il y a 50 ans dans les pays développés, avant que la quantité de CO<sub>2</sub> commence à dévier du modèle historique. Mais elle ne peut se permettre cinq fois plus. Non pas parce que l'énergie requise n'est pas disponible, mais parce que sous l'effet du rejet d'entropie le monde étoufferait par manque d'air respirable et d'eau potable. L'environnement de basse entropie naturelle (« environnement propre »), dont nous avons bénéficié jusque récemment, est en voie de disparition rapide.





## Réorganiser la société

La société doit être réorganisée pour réduire l'insupportable « surcoût d'entropie » rejetée à ce niveau. Pourquoi dire aux gens qu'ils doivent réduire la quantité d'énergie qu'ils consomment, ou dans notre langage la quantité d'entropie qu'ils rejettent – tout en ignorant que la plus grande partie de l'entropie est rejetée hors de leur contrôle ? Il faut comprendre en détail comment cela se produit.

Par exemple, le modèle de la société urbaine doit être analysé en termes de rejet d'entropie, comparé à d'autres sociétés plus dispersées. D'un côté les gens, la nourriture et l'énergie doivent être transportés sur de grandes distances vers les centres urbains. La pollution de l'air résultante affecte un grand nombre de personnes. D'un autre côté, il y a des économies d'échelle. Les bâtiments peuvent être isolés thermiquement de façon plus efficace que des maisons individuelles. Le transport urbain de masse rejette moins d'entropie que le transport individuel. Le rejet d'entropie dans les mégacités incluant de grandes aires suburbaines doit aussi être considéré. Elles peuvent combiner les inconvénients des sociétés urbaines et rurales, avec seulement peu de leurs avantages.

Le rôle du gouvernement doit aussi être analysé. À quel rejet d'entropie contribue-t-il, par l'opération de son administration, par les bâtiments publics, le transport des personnels publics, le fonctionnement des forces de police et de défense, les services publics tels que les écoles et les hôpitaux, l'entretien des routes ?

Le décompte du rejet d'entropie devrait être une pratique utile pour une bonne gouvernance.

## La technologie peut aider, moyennant un coût

Une technologie améliorée peut réduire la quantité d'entropie rejetée par unité d'énergie produite ou dépensée, mais cette réduction a un coût.

- L'électricité la moins chère est produite aujourd'hui en brûlant du charbon. Mais cela conduit aussi au plus grand rejet d'entropie par kWh produit.
- Les voitures diesel sont moins chères à l'achat que les voitures hybrides, mais rejettent davantage d'entropie par émission de gaz à effet de serre et de micro-particules.
- Des bâtiments mal isolés sont moins chers à construire que des bâtiments mieux isolés.

- Brûler du bois est le moyen le moins cher pour la cuisson et le chauffage. Cela produit aussi la plus forte pollution de l'air, tant intérieure qu'extérieure.

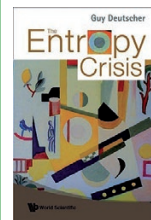
Il apparaît donc clairement que les pays en développement, comme la Chine, continueront d'être les plus pollués (et polluants). Mais les bas coûts de production sont attractifs pour tous. Les États-Unis et l'Allemagne produisent la moitié de leur électricité en brûlant du charbon. ■

*Je voudrais remercier chaleureusement Roger Maynard pour ses encouragements et l'intérêt constant qu'il a porté à ces réflexions.*

### ► L'auteur

Guy Deutscher est professeur de physique à l'Université de Tel Aviv. Spécialiste de la supraconductivité, et en particulier des matériaux granulaires, il a préparé sa thèse dans le groupe de Pierre-Gilles de Gennes à la faculté des sciences d'Orsay.

À l'Université de Tel Aviv, il dirige le laboratoire de la supraconductivité. Plus récemment, il s'est intéressé à la crise de l'énergie, pour laquelle il a développé une réflexion originale [1].



1 • G. Deutscher, *The entropy crisis*, World Scientific (2008)