

LES BÂTIMENTS & L'ENTROPIE

Guide théorique
et pratique
de l'habitat à basse
exergie

Philippe Courtin



1 Préambule

1.1 Discussion sur l'énergie

Le vocable *énergie* est apparu il y a environ deux cents ans, ce qui est peu à l'échelle de temps humain. Il s'est peu à peu répandu dans l'inconscient collectif pour devenir un concept dont le sens physique est somme toute très peu compris.

L'énergie prend une place toujours plus importante au fil de la transformation de notre société ; une place qui reste fondamentale pour l'espèce humaine. Les hommes ont appris à dompter l'énergie et l'utilisent à leurs fins pour toutes sortes de choses. Canalisée, l'énergie est l'alliée de la puissance. Depuis l'avènement du capitalisme elle est de surcroît l'alliée de la croissance économique. Ainsi, celles et ceux qui ont accès à l'énergie vivent plus confortablement que celles et ceux qui n'y ont pas accès. Ils sont plus puissants et peuvent vivre à un rythme plus élevé ; ils peuvent multiplier leurs activités dans un même laps de temps donné.

Si la plupart de gens ne savent pas ce qu'est physiquement l'énergie, ils en bénéficient toutefois grandement au quotidien ; à tel point que la seule idée d'en être dépourvu crée chez tous, implicitement, une terreur profonde : faudra-t-il à l'avenir se déplacer par ses propres moyens ou par la force animale ? faudra-t-il ne plus utiliser les réseaux informatiques vecteurs de communication et d'aide à la décision ? ne plus cuire ses aliments ou ne plus stocker par le froid les denrées périssables ?... Cependant, et en toute objectivité, une large et immense partie de la population mondiale est soumise à un régime de diète énergétique comme le furent en Europe les générations précédant la révolution industrielle. Certaines civilisations contemporaines s'en accommodent fort bien, d'autres non.

Par une sorte de raccourci intellectuel, en raison du concept abscons que l'énergie porte en elle, il est d'usage d'associer l'énergie et ce qui en est le pourvoyeur. Ainsi, pour la plupart des gens, le pétrole est de l'énergie, le bois aussi ; bref, tout ce qui permet de faire naître et exister la puissance énergétique nécessaire à notre mode vie est appelé *énergie*. En réalité le pétrole est une huile, le bois est un polymère et ils sont des *ressources énergétiques* sans être l'énergie elle-même, celle dont nous avons besoin ; il est possible de transformer ces ressources en énergie-chaleur via une combustion, d'où la confusion. Par exemple, si effectivement le pétrole est intrinsèquement de l'énergie, énergie qui l'a fait exister à l'état naturel où il se trouve avant toute combustion, il est à l'état naturel dans un état d'équilibre énergétique avec son environnement. Cette énergie intrinsèque de la matière à l'équilibre dans un environnement donné, ne nous est d'aucune valeur car elle ne véhicule aucune puissance. Ce constat traduit la manière dont nous observons l'énergie ; seule l'énergie qui produit de la puissance est recherchée. L'équilibre énergétique naturel n'offre pas d'usage et n'a pas de valeur selon ce point de vue ; vu autrement nous ne nous soucions pas de l'équilibre environnemental dès lors que nous voulons au contraire faire exister un déséquilibre qui crée la puissance dont nous avons besoin dans cet environnement. L'être humain a appris à créer ces déséquilibres qui sont d'une dimension bien supérieure à ce que sa propre nature énergétique lui permet.

Depuis quelques années la langue s'est adaptée à cette manière de concrétiser l'énergie et elle décline la notion même d'énergie en trois grandes catégories : l'énergie primaire, l'énergie finale et l'énergie utile. Sur le strict plan sémantique, seule l'énergie utile est de l'énergie. L'énergie primaire et l'énergie finale sont des *ressources énergétiques* qui au stade physique où elles se trouvent n'ont pas encore libéré l'énergie dont elles disposent pour réaliser une puissance. Aussi ces deux dernières expressions contribuent à renforcer l'ambiguïté sémantique entre énergie et ressource énergétique.

Energie primaire	Ressource énergétique naturelle capable de produire une forme énergétique exploitable par les machines.	Pétrole, gaz, bois, uranium, soleil, vent, etc.
Energie finale	Forme énergétique fournie par un distributeur à un usager pour son usage privé et qui alimente une machine afin de la faire fonctionner.	Electricité, pétrole raffiné et tous les dérivés, gaz naturel, bois coupé, granulés de bois, etc.
Energie utile	Energie satisfaisant un besoin physique humain associé à son confort.	Déplacement, éclairage, action d'une machine, chauffage, climatisation des locaux, etc.

L'intégration de l'énergie dans les sociétés modernes et marchandes a conduit, depuis le début du XX^e siècle, à des situations préoccupantes :

- d'une part, la chaîne des transformations mises en œuvre afin de faire exister l'énergie utile à partir des ressources énergétiques ne semble avoir pour l'heure qu'un seul objectif pratique : faire croître la richesse économique de manière exponentielle, c'est-à-dire de manière brutale et infinie,
- d'autre part, dire que l'énergie est assimilable aux ressources énergétiques conduit à laisser penser simultanément que l'énergie se consomme et que les ressources sont infinies. Ce sont deux erreurs fondamentales. En effet cette idée s'oppose aux principes de la physique qui précisent que l'énergie est permanente, constante dans l'univers et conservée lors de toute transformation de quoi que ce soit ; l'énergie ne peut être consommée ni détruite ; alors que les ressources énergétiques qui la font exister, pour leur part, sont effectivement destructibles, qu'elles soient *fossiles*, *fissiles* ou *renouvelables*.

L'économie mondiale, par son modèle capitaliste, est fondée sur une croissance exponentielle, infinie et brutale ; toutefois la richesse qu'elle produit et le pouvoir d'achat qu'elle procure sont parfaitement tributaires de la puissance énergétique que l'homme saura faire exister via l'exploitation des ressources énergétiques. La croissance économique est parfaitement corrélative de la puissance énergétique. Il est donc illusoire de penser qu'une économie basée sur une croissance exponentielle puisse se développer infiniment sans une puissance énergétique à son tour infinie. Comme par ailleurs les ressources énergétiques que l'on trouve dans la nature ne sont qu'un stock de matière sans possibilité d'un accroissement exponentiel infini, pour ce qui le concerne, la puissance énergétique du stock ne peut que diminuer à termes, en

même temps que le stock lui-même. Il ne faut donc pas compter sur les ressources énergétiques pour bâtir une société de plus en plus puissante économiquement, c'est-à-dire dotée d'une économie croissante à l'infini. Dire le contraire est une erreur.

Il est donc indispensable de distinguer clairement l'énergie, d'une part, et les ressources énergétiques d'autre part ; de distinguer la conservation de l'énergie lors de toute transformation, d'un côté, et la destruction irréversible des ressources qui la font exister sous forme de flux, de l'autre. Une science, la thermodynamique, permet de distinguer précisément l'énergie et la destruction des ressources énergétiques qui la font exister.

1.2 La thermodynamique

La thermodynamique est apparue durant le XIX^e siècle sous l'impulsion de grands savants visionnaires. Elle a accompagné la révolution industrielle et l'avènement de la machine à vapeur afin de donner un cadre théorique aux expérimentations pratiques réalisées par d'ingénieurs précurseurs. Ils découvraient qu'en maîtrisant la puissance du feu à l'aide de machines, l'on pouvait leur faire produire du travail dont la puissance était bien supérieure à ce que pouvaient faire des hommes ou des animaux ; l'on remplaçait ainsi la puissance intrinsèque du vivant par la puissance combinée du feu et de la matière inerte.

Lors de la révolution industrielle du XIX^e siècle, les moteurs sont apparus (à vapeur, à combustion interne, électriques, à combustion externe...) et les découvertes empiriques successives de l'époque ont été théorisées grâce à la thermodynamique. De nombreux savants ont participé à l'élaboration des modèles qui sont encore exploités à l'heure actuelle. En particulier, James Prescott Joule (1818-1889) et Julius Robert von Mayer (1814-1878) mirent en évidence l'équivalence énergétique entre deux formes de l'énergie connues à l'époque : la chaleur et le travail. Ils montraient alors que l'énergie pouvait avoir plusieurs formes et que le passage de l'une à l'autre n'altérerait pas la quantité d'énergie en transit.

L'énergie mécanique, et son effet que l'on appelle le travail, ou encore l'énergie-travail, avait l'avantage d'être décelable et identifiable à notre échelle d'observation, échelle que l'on appelle l'échelle macroscopique : un objet qui se déplace fait partie de notre environnement direct et sensible. Pour se déplacer, cet objet demande qu'on lui octroie de l'énergie sans quoi il reste immobile. La définition la plus simple de l'énergie-travail (W) est qu'elle est égale au produit d'une force (F) par son déplacement (d) dans le sens où elle s'exerce¹ :

$$W = F d$$

¹ Dans le cadre des systèmes en rotation, l'énergie-travail associée est égale au produit du couple qui crée la rotation par l'angle de rotation engendré.

Par exemple, soulever un objet ayant une masse (m) de 20 kg dans le champ de pesanteur terrestre ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) sur une hauteur de 5 mètres (h) nécessite de lui transférer une énergie de 981 joules² :

$$\begin{aligned} W &= F d \\ W &= m g h \\ W &= 20 \times 9,81 \times 5 \\ W &= 981 \text{ J} \end{aligned}$$

Selon les principes de la thermodynamique, cette énergie est positive pour l'objet de 20 kg car il la reçoit pour pouvoir se mouvoir. Inversement, si l'objet chute de la même hauteur, il libèrera l'énergie qu'il avait reçue préalablement pour s'élever à l'altitude de son départ avant la chute. Inévitablement l'énergie dont nous parlons ne peut être que le fruit d'un transfert avec autre chose qui, soit cède de l'énergie à la masse, soit en reçoit d'elle. C'est tout l'objet de la thermodynamique, et de l'étude de l'énergie, d'identifier les *systèmes* qui transfèrent de l'énergie entre eux.

En revanche, contrairement à l'énergie-travail, l'énergie-chaleur est une forme d'énergie dont les mécanismes physiques ne sont pas décelables à l'œil nu. En effet son moteur est d'ordre microscopique, c'est-à-dire à l'échelle atomique³. L'état des connaissances en physique et en chimie au XVIII^e siècle et au XIX^e siècle ne permit donc pas de la qualifier explicitement. Aussi, au XIX^e siècle, montrer l'équivalence entre l'énergie-travail et l'énergie-chaleur fut salvateur sur le plan théorique. Chaleur et travail pouvaient produire des effets similaires sur la matière, à savoir changer sa température. Plus largement, affirmer la conservation de l'énergie, malgré ses transformations de forme lors de tout type de transfert, permit de postuler que l'énergie dans l'Univers est constante, le passage d'une forme à une autre se faisant sans destruction de cette quantité, c'est-à-dire intégralement.

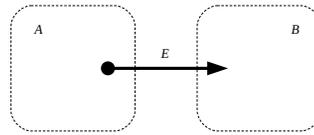
On pourrait imaginer les transferts d'énergie comme le transfert du savoir entre générations. Si l'on observe le monde vivant, à de faibles variations près, le contenu du savoir véhiculé ne se modifie pas. Toutefois, l'on constate immédiatement que si effectivement le message cognitif n'est pas modifié, le porteur du message, lui, l'est invariablement au fil du temps. Les générations se succèdent et transfèrent du savoir. Il existe le même phénomène pour ce qui concerne les transferts d'énergie. Des *générations de systèmes énergétiques*, en quelque sorte, se succèdent pour assurer les transferts d'énergie.

A ce stade de la réflexion, il vient alors une idée qu'il est impératif d'exprimer ici : un transfert d'énergie est *une forme de communication* entre deux milieux.

2 Le joule est l'unité d'énergie du Système International des Unités.

3 En toute rigueur l'échelle atomique est nanoscopique, mais il est d'usage depuis le XIX^e siècle d'appeler cette échelle l'échelle microscopique. Nous ne dérogerons pas à la règle dans cet ouvrage.

La figure suivante illustre une communication énergétique entre deux milieux A et B, de A vers B.



Pour que cette communication ait lieu il est nécessaire que deux conditions soient réunies :

- les deux milieux doivent avoir des potentiels de transfert énergétique déséquilibrés entre eux,
- il faut que les deux milieux puissent effectivement communiquer physiquement de l'énergie par un médium opérationnel (par contact, à distance, ou autres).

L'on observe que cette communication énergétique entre deux milieux est toujours sujette à l'épuisement d'un des deux à pouvoir communiquer avec l'autre. Ce qui a deux conséquences :

- les transferts d'énergie ont un début et une fin, c'est-à-dire un sens temporel,
- ils se réalisent naturellement dans un sens préférentiel et de manière irréversible.

L'irréversibilité naturelle des transferts d'énergie est traduite par le deuxième principe de la thermodynamique, le premier principe traduisant la conservation de l'énergie. Par exemple, le frottement de deux morceaux de bois l'un sur l'autre (de l'énergie sous forme mécanique apportée par celui qui met en frottement les morceaux de bois) produit de la chaleur que l'on distingue par l'échauffement du bois ; si on laisse le bois se refroidir, il ne rend jamais l'énergie sous la forme mécanique initiale en faisant se frotter les morceaux à l'inverse. Bien au contraire, les morceaux de bois finissent par se refroidir dans l'air ambiant, et là aussi, l'air ambiant ne rend jamais la chaleur aux morceaux de bois : l'énergie continue donc son chemin, en changeant de forme (travail et chaleur) sans jamais revenir en arrière.

Suite à l'invention du deuxième principe, découverte montrant qu'il est possible de théoriser les phénomènes irréversibles, un point singulier est apparu. Par exemple, on lit dans maintes revues techniques, comme de recherche et d'ingénierie, que les transferts d'énergie sous forme mécanique seraient plus *nobles* que les transferts d'énergie sous forme de chaleur. Cette approche particulièrement discutable, très partielle pour tout dire, résulte du fait qu'une partie des transferts d'énergie mécanique se transforment naturellement en chaleur lors des processus de ce type, essentiellement à cause des frottements des objets qui se déplacent avec ce qui les entourent, l'air, des

fluides plus globalement, des contacts avec d'autres pièces mécaniques, etc. Certes, la transformation naturelle de l'énergie mécanique en chaleur n'étant pas réversible, on peut donc considérer qu'une partie de l'énergie mécanique en jeu est perdue sous cette forme et ne peut jamais en retour être transformée en énergie mécanique. Toutefois, et c'est ici le paradoxe, il ne peut y avoir initialement de transfert d'énergie mécanique sans qu'en amont il n'y ait eu de transfert d'énergie-chaleur pour la faire exister. Ainsi, l'hypothétique noblesse de l'énergie mécanique est surtout tributaire de l'existence de la chaleur ; par ce point de vue l'énergie mécanique ne peut pas être plus *noble* que ce qui la fait exister.

La thermodynamique est fondée sur quatre principes essentiels. Mais certains sont complexes à comprendre et ceux qui sont les plus ardues sur ce plan ont été, au fil du temps, et sur le plan pratique, relégués au simple rang de faire-valoir de concepts plus accessibles ; je veux dire *qui nous paraissent plus accessibles*. Les notions qui nous semblent accessibles sont celles de température, d'équilibre thermique, d'énergie, de chaleur, de travail. Ces notions se sont imposées dans l'imaginaire collectif, mais aussi dans l'imaginaire technique, technologique et économique. Pourtant, le quidam sait-il ce qu'est une température ? ce qu'est la chaleur ? ce qu'est l'énergie ? ce qu'est le travail ? Si chacun de ces termes, je devrais dire chacun de ces concepts, élabore notre conception du monde et notre représentation de notre environnement, très peu d'entre nous savons en exprimer la signification scientifique. Si ces notions ont cette place privilégiée dans nos esprits c'est qu'elles sont accompagnées souvent d'un moyen concret de les caractériser : par exemple la température est lue à l'aide d'un thermomètre ; nous ressentons quelque chose à chaque occasion qui nous est donnée d'être en contact ou en relation avec autre chose de plus chaud ou de plus froid que notre peau. Sur le plan économique et financier, l'énergie est souvent traduite en coût parce qu'il faut acheter ce *quelque chose énergétique* qui nous permet d'être toujours plus puissant, toujours plus en situation de confort et toujours plus éloignés finalement de notre environnement naturel et de notre condition humaine fondamentale et naturelle. Inversement, tout ce qui n'est pas associé à une réalité physique pratique, voir mesurable, n'a pas de sens commun. Ainsi, d'autres pans de la thermodynamique n'ont pas imprégné nos connaissances, en particulier le deuxième principe. C'est regrettable car ce sont justement ces pans qui expliquent très clairement ce que nous vivons au quotidien, en particulier pour ce qui concerne l'impact environnemental de nos actions ; à vouloir les ignorer ou à les reléguer à un second plan, qui n'est pas leur place, à ne vouloir exploiter qu'une partie restrictive de cette science qu'est la thermodynamique par une approche exclusivement énergétique, nous réfléchissons et agissons probablement de guingois.

Le concept le plus étonnant et le plus délaissé est *l'entropie*. L'entropie est étonnante par sa nature, nous le verrons, mais il est surtout étonnant qu'elle ait été délaissée par l'inconscient collectif et par les ingénieurs. Il est étrange qu'il en soit ainsi car l'entropie fut très bien décrite par les savants du XIX^e siècle et du XX^e siècle ; bien mieux en l'occurrence que la chaleur que chacun croit posséder intellectuellement. Au fil du temps, le monde savant de la thermodynamique, sans doute pour réaffirmer le rôle essentiel et indiscutable de l'entropie dans notre environnement terrestre et

immédiat, a développé parallèlement la théorie de *l'exergie*, concept dont je présente les applications pratiques en bâtiment dans cet ouvrage.

L'entropie et l'exergie, qui est la dimension énergétique associée à l'entropie, offrent à elles-deux des outils qui permettent de distinguer clairement ce qui est de la conservation de l'énergie lors de ses transferts et ce qui est de la dispersion et de la destruction des ressources associées.

A ce jour, alors que l'entropie se manifeste sous nos yeux dans toutes les transformations thermodynamiques où siègent des transferts d'énergie, quels qu'ils soient, naturels ou artificiels, elle reste absente de nos réflexions sociétales quotidiennes, techniques, technologiques, économiques ; le terme est même ignoré de la plupart des gens, voire, pire, dévoyé de son sens conceptuel par beaucoup de penseurs qui ne possèdent pas les notions fondamentales de la physique et qui confondent les notions de désordre et de dispersion.

Pour achever l'état des lieux, la réglementation thermique française des bâtiments ne parle pas d'entropie à l'heure où j'écris ces lignes, ni le monde économique qui continue à penser que les facteurs de production, capital et travail, sont mobilisables par l'injection infinie d'énergie dans le système productif. A l'évidence, le monde économique et les réglementations de tous ordres devront évoluer très rapidement vers la mesure de l'impact environnemental des actions pour réaliser une transition énergétique et écologique digne de ce nom et digne d'intérêt ; seule l'approche entropique des transferts d'énergie permet de réaliser cela.

Mais revenons à l'histoire... Il y a quatre-cents ans, la température était un concept inconnu. Il y a deux-cent-cinquante ans, personne ne parlait d'énergie, vocable inexistant à l'époque. Aujourd'hui, la construction collective et mentale de la nature qui nous environne, notre environnement, est incomplète car il y manque de manière irréfutable la prise en compte de l'entropie et de son pendant terrestre, l'exergie. Dès que les intellects seront complets sur cette question, nul doute que nos sociétés seront amenées à se construire autrement. Le rapport à la nature changera, le rapport au travail humain changera, tout comme le rapport aux machines, à la puissance et à l'économie sera différent. L'attitude que nous entretenons vis-à-vis de la prédation des ressources, inexorablement, sera remise en question.

1.3 Lavoisier et le malentendu de la consommation d'énergie

On attribue à Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) cette maxime : « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* ». Que cela veut-il dire ?

Cela signifie que le transit de l'énergie entre deux milieux qui communiquent énergétiquement, et qui permet leur transformation, peut se faire sous plusieurs *formes* et nous apparaît sous différents aspects. Un transfert d'énergie peut revêtir une forme chimique, une forme mécanique, une forme physique, une forme thermique, une forme électrique, une forme magnétique... Mais quoi qu'il lui arrive et quelles que soient les transformations qu'elle subit ou qu'elle fait subir, l'énergie se *conserve* et ne se perd jamais. Ainsi la quantité d'énergie dans un système *isolé* ne varie pas. Le premier système *isolé* que nous connaissons est l'Univers : l'on postule donc que l'énergie contenue par l'Univers est constante.

Un système *isolé* est un système qui ne transfère ni énergie ni masse avec son extérieur. Comme nous ne savons pas si l'Univers a un extérieur, le postulat de la conservation de l'énergie peut lui être appliqué. Toutefois dans des cas d'étude plus concrets, à notre échelle et sur Terre, nous pouvons imaginer nombre de systèmes isolés tels que des échanges d'énergie puissent avoir lieu en leurs seins sans que cela ait de l'influence à l'extérieur. Nous verrons plusieurs exemples en bâtiment.

Aussi, lorsque nous affirmons que nous *consommons* de l'énergie, en réalité nous n'en consommons pas car cela est impossible ; l'énergie ne peut disparaître, comme elle ne peut pas non plus apparaître ex nihilo. Elle est là, elle peut se transférer, changer de forme, mais elle est conservée lors de tout processus énergétique, c'est-à-dire lors de toute transformation de quoi que ce soit en autre chose via des transferts d'énergie. L'énergie est, et reste, la grandeur de la transformation de la matière. Nous sommes ainsi face à un paradoxe sémantique, la « consommation d'énergie », qui est issu de la manière dont nous avons collectivement construit le concept d'énergie : un amalgame fait d'une confusion entre cause et effet.

En pratique, par notre intelligence et notre ingénierie, nous savons contrôler des transferts d'énergie entre différents milieux. Nous savons orchestrer la communication énergétique, c'est-à-dire les transferts. Les machines, aujourd'hui en nombre incalculable, forment l'aboutissement pratique de ce savoir. Nous sommes dorénavant très dépendants d'elles, si nous voulons toujours plus nous éloigner de notre condition naturelle, car elles nous offrent plus de puissance que ce que notre nature physique nous octroie. La chaîne des opérations à mener pour créer des transferts d'énergie maîtrisable est la suivante :

- exploiter un gisement d'une ressource énergétique naturelle, appelée, à tort comme nous l'avons dit, « énergie primaire »,
- transformer cette ressource énergétique naturelle en une autre ressource énergétique exploitable appelée « énergie finale », à tort également, excepté pour ce qui concerne l'électricité qui est de l'énergie à part entière,
- utiliser l'énergie finale pour produire de l'énergie utile via les machines.

L'énergie primaire est donc stricto sensu un potentiel énergétique en équilibre avec l'environnement dont nous savons tirer parti (pétrole, gaz, uranium, vent, chute d'eau, etc.) afin de produire un transfert d'énergie utile vers nous, via une machinerie et des systèmes techniques. Mais, et c'est une loi naturelle, en fin de compte l'énergie issue de la nature, une fois utilisée effectivement, finit toujours par y retourner mais sous une autre forme que celle du gisement potentiel initial ; il n'y a aucun espoir que les transformations successives des systèmes thermodynamiques en jeu et celles de l'énergie elle-même puissent être inversées pour ainsi recréer les formes initiales et primaires des ressources énergétiques. Par essence, l'énergie *n'est donc pas renouvelable* car une ressource énergétique ne se renouvelle jamais. Au contraire, la dernière et ultime transformation est toujours réalisée sous forme d'un transfert de chaleur et se traduit toujours par une variation d'énergie interne de l'environnement.