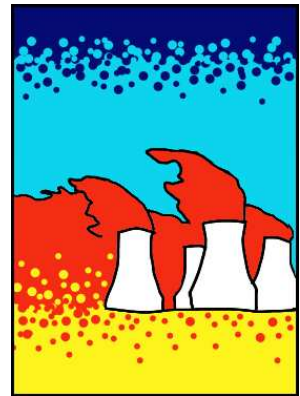


L'énergie durable — Pas que du vent !

*Première partie*

Des chiffres, pas des adjectifs



## 2 Le bilan

*La nature ne peut pas être dupée.*

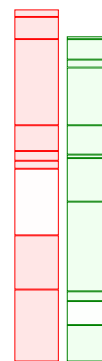
Richard Feynman

Parlons de la consommation et de la production d'énergie. Aujourd'hui, l'essentiel de l'énergie consommée par les pays développés est produite à partir de combustibles fossiles, ce qui ne pourra pas durer éternellement. La question de savoir combien de temps exactement nous pourrions vivre avec les combustibles fossiles serait intéressante, mais ce n'est pas celle que nous allons aborder dans ce livre. Ce que je veux savoir, c'est *comment peut-on vivre sans combustibles fossiles ?*

Pour cela, nous allons créer deux piles. A gauche, la pile rouge, où nous allons comptabiliser notre consommation d'énergie ; et à droite, la pile verte, où nous comptabiliserons la production d'énergie durable. Nous bâtirons ces deux piles progressivement, en y ajoutant des éléments un par un au fur et à mesure que nous en discuterons.

La question posée dans ce livre est « est-il *théoriquement possible* de vivre de façon durable ? » Pour ce faire, nous allons répertorier toutes les sources *théoriques* d'énergie durable et les mettre dans la pile verte de droite.

Dans la pile rouge de gauche, nous allons estimer la consommation d'une « personne-type moyennement riche ». Je vous encourage à estimer votre *propre* consommation, et créer votre propre pile personnalisée à gauche. Plus tard, nous aborderons la consommation d'énergie *moyenne* des Européens et des Américains.



CONSOMMATION PRODUCTION

Parmi les formes-clés de consommation de la pile rouge à gauche, on trouve :

- les transports
  - les voitures, les avions, le fret
- le chauffage et le refroidissement
- l'éclairage
- les appareils électroniques et autres gadgets électriques
- la nourriture
- la fabrication de biens manufacturés

Dans la pile verte de production durable à droite, nos principales catégories vont être :

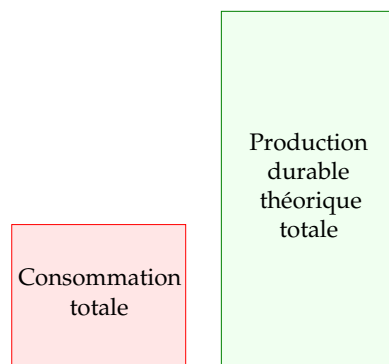
- l'éolien
- le solaire
  - le photovoltaïque, le solaire thermique, la biomasse
- l'hydroélectricité
- l'énergie des vagues
- le marémoteur
- la géothermie
- le nucléaire ? (avec un point d'interrogation, car il n'est pas sûr que le nucléaire puisse vraiment être considéré comme « durable »)

Comme nous faisons une estimation de notre consommation d'énergie pour le chauffage, le transport, l'industrie, ... notre objectif n'est pas seulement de déterminer les chiffres de la pile de gauche de notre bilan, mais aussi de comprendre de quoi chaque chiffre dépend, et dans quelle mesure on peut le modifier.

Dans la pile verte de droite, nous allons comptabiliser les estimations de la production d'énergie durable au Royaume-Uni. Cela nous permettra de répondre à la question : « le Royaume-Uni peut-il théoriquement vivre en se reposant uniquement sur ses propres énergies renouvelables ? »

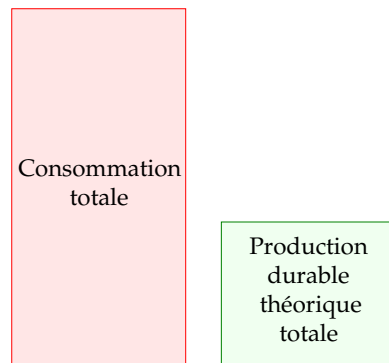
Savoir si les sources d'énergie durable de la pile de droite sont *économiquement* viables est une question importante, mais nous allons la laisser de côté pour l'instant : occupons-nous tout d'abord de chiffrer les deux piles. Parfois, les gens se focalisent tellement sur la faisabilité économique qu'ils en oublient d'avoir une vue d'ensemble de la question. Par exemple, certains s'interrogent « le vent est-il moins cher que le nucléaire ? » et oublient de se demander « *combien* y a-t-il de vent ? » ou « combien reste-t-il d'uranium ? »

Il est possible qu'après avoir tout compilé, le résultat ressemble à ceci :



Si nous trouvons que la consommation est beaucoup plus faible que la production d'énergie durable théorique, alors nous pourrions nous dire « bien, *peut-être* nous est-il possible de vivre de manière durable. Regardons attentivement les coûts économiques, sociaux et environnementaux des alternatives durables, et trouvons lesquelles d'entre elles nécessitent le plus de recherche et développement ; et si nous travaillons bien, *peut-être* n'y aura-t-il pas de crise énergétique. »

Si, par contre, le résultat de nos calculs devait ressembler à ceci :



— ce serait une image beaucoup plus sombre. Un tel schéma signifierait que « puisqu’il n’y a *pas suffisamment* d’énergie durable pour soutenir notre mode de vie actuel, les aspects économiques de l’énergie durable n’ont aucune importance : un changement radical est inévitable. »

## Énergie et puissance

La plupart des discussions sur la consommation et la production d’énergie sont confuses parce que l’on utilise de nombreuses *unités* différentes pour exprimer l’énergie et la puissance, de « tonnes équivalent-pétrole » (tep) à « térawatts-heures » (TWh) et « exajoules » (EJ). Personne, excepté un spécialiste, ne peut se représenter ce que « un baril de pétrole » ou « un million de BTU » signifient pour un être humain. Dans ce livre, nous allons utiliser un ensemble d’unités compréhensibles par tout le monde.

L’unité d’énergie que j’ai choisie est le kilowatt-heure (kWh). Cette quantité est appelée « une unité » sur les factures d’électricité, et en 2010, elle coûte à un usager environ 8 centimes d’euro en France (11 au Royaume-Uni). Comme nous le verrons, la plupart de nos préoccupations quotidiennes se rapportent à des quantités d’énergie égales à un faible nombre de kilowatts-heures.

Lorsque nous parlerons de **puissance** (le rythme auquel nous consommons ou nous produisons de l’énergie), l’unité principale sera le kilowatt-heure par jour (kWh/j). Occasionnellement, nous utiliserons également le watt ( $40 \text{ W} \simeq 1 \text{ kWh/j}$ ) et le kilowatt ( $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W} = 24 \text{ kWh/j}$ ), comme je l’expliquerai ci-après. Le kilowatt-heure par jour est une bonne unité à échelle humaine : la plupart des activités individuelles qui « bouffent » de l’énergie le font au rythme d’un faible nombre de kilowatts-heures par jour.

Par exemple, une ampoule de 40 W qui reste tout le temps allumée consomme **un** kilowatt-heure par jour. Certaines compagnies d’électricité incluent dans leurs factures d’électricité des graphiques indiquant la consommation d’énergie en kilowatts-heures par jour. J’utiliserai la même unité pour toutes les formes d’énergie, et pas seulement pour l’électricité.



FIGURE 2.1. Distinguer énergie et puissance. Toutes ces ampoules de 60 W ont une *puissance* de 60 W lorsqu’elles sont allumées ; elles n’ont pas une « énergie » de 60 W. Une ampoule consomme 60 W de *puissance* électrique quand elle est allumée ; elle émet 60 W de *puissance* sous forme de lumière et de chaleur (en l’occurrence, surtout de chaleur).

Pour la consommation d'essence, de gaz, de charbon aussi, j'exprimerai *toujours* ces puissances en kilowatts-heures par jour. Permettez-moi d'être bien clair sur ce point : pour certains, le mot « puissance » ne se rapporte qu'à la consommation d'énergie *électrique*. Mais ce livre concerne *toutes* les formes de consommation et de production d'énergie, et j'utiliserai le mot « puissance » pour chacune d'elles.

Un kilowatt-heure par jour, c'est à peu près la puissance que vous pourriez obtenir d'un domestique. Le nombre de kilowatts-heures par jour que vous consommez équivaut donc au nombre de personnes qui travailleraient pour vous.

Dans le langage courant, on utilise indifféremment les deux termes énergie et puissance. Mais dans ce livre, nous respecterons rigoureusement leurs définitions scientifiques. *La puissance est la vitesse à laquelle quelque chose utilise de l'énergie.*

Une bonne façon d'expliquer la notion d'énergie et de puissance est de procéder par analogie avec l'eau et le débit des robinets. Si vous voulez boire de l'eau, vous en voudrez un certain volume — un litre, peut-être (si vous avez très soif). Lorsque vous ouvrez le robinet, vous créez un courant d'eau avec un certain débit — disons, un litre par minute si on laisse couler un petit filet d'eau, ou 10 litres par minute si le robinet est ouvert en grand. Vous pouvez obtenir le même volume (un litre) en une minute avec un filet d'eau, ou en un dixième de minute avec un robinet grand ouvert. Le volume délivré dans une période de temps donnée est égal au débit multiplié par le temps :

$$\text{volume} = \text{débit} \times \text{temps}.$$

On dit que le débit est la vitesse avec laquelle le volume est délivré. Si vous connaissez le volume délivré en un certain temps, vous obtenez le débit en divisant le volume par le temps :

$$\text{débit} = \frac{\text{volume}}{\text{temps}}.$$

Faisons le lien avec l'énergie et la puissance. L'énergie, c'est comme le volume d'eau, et la puissance comme le débit de l'eau. Par exemple, dès que l'on allume un grille-pain, il commence à consommer de l'électricité avec une puissance d'un kilowatt. Il continuera à consommer un kilowatt jusqu'à ce qu'on l'éteigne. En d'autres termes, le grille-pain (s'il reste allumé en permanence) consomme un kilowatt-heure (kWh) d'énergie par heure, soit 24 kilowatts-heures par jour. Plus le grille-pain sera allumé longtemps, plus il consommera d'énergie. Vous pouvez calculer l'énergie utilisée par une activité particulière en multipliant la puissance par la durée :

$$\text{énergie} = \text{puissance} \times \text{temps}.$$

L'unité internationale standard utilisée pour exprimer l'énergie, c'est le joule. Malheureusement, dans notre cas, le joule est une unité trop pe-

le volume  
s'exprime en  
litres

le débit  
s'exprime en  
litres par minute

l'énergie  
s'exprime en  
kWh

la puissance  
s'exprime en  
kWh par jour

l'énergie  
s'exprime en  
kWh  
ou  
MJ

la puissance  
s'exprime en  
kWh par jour  
ou  
kW  
ou  
W (watts)  
ou  
MW (mégawatts)  
ou  
GW (gigawatts)  
ou  
TW (térawatts)

tite pour que l'on puisse vraiment l'utiliser. Le kilowatt-heure est égal à 3,6 millions de joules (3,6 mégajoules).

Les puissances sont quelque chose de si utile et si important qu'elles possèdent quelque chose que les débits d'eau n'ont pas : elles ont leur propre unité. Lorsque l'on parle de débit, on peut le mesurer en « litres par minute », en « gallons par heure » ou en « mètres cube par seconde » ; la dénomination de ces unités rend explicite le fait que le débit est « un volume par unité de temps ». Une puissance d'*un joule par seconde* est appelée *un watt*. 1 000 joules par seconde correspondent à un kilowatt. Soyons bien clair sur la terminologie : le grille-pain consomme un kilowatt. Il ne consomme pas « un kilowatt par seconde ». Car le « par seconde » est déjà intégré dans la définition du kilowatt : un kilowatt correspond à « un kilojoule par seconde ». De même, nous dirons que « une centrale nucléaire produit un gigawatt ». A ce propos, un gigawatt, c'est un milliard de watts, un million de kilowatts ou encore 1 000 mégawatts. Donc, un gigawatt, cela correspond à un million de grille-pains. L'abréviation de gigawatt s'écrit tout en majuscules « GW », en reprenant le « g » et le « w » de « gigawatt ».

Je vous en prie, ne dites jamais, jamais « un kilowatt par seconde », « un kilowatt par heure » ou « un kilowatt par jour » ; aucune de ces dénominations ne correspond à une unité de mesure de puissance. Le besoin que les gens ont à exprimer « par quelque chose » lorsqu'ils parlent de la consommation de leur grille-pain est l'une des raisons pour lesquelles j'ai décidé d'utiliser le « kilowatt-heure par jour » comme unité de puissance. Je suis désolé si c'est un peu lourd à dire et à écrire.

Une dernière précision : si je dis que « l'on a consommé un gigawatt-heure d'énergie », je parle simplement de *la quantité* d'énergie que l'on a consommée, et non pas *du rythme* auquel on l'a consommée. Quand on parle d'un gigawatt-heure, cela *ne signifie pas* que l'énergie a été consommée *en une heure*. Vous pouvez consommer un gigawatt-heure d'énergie en faisant fonctionner un million de grille-pains pendant une heure, ou en utilisant 1 000 grille-pains pendant 1 000 heures.

Comme je l'ai dit précédemment, je vais indiquer les puissances en kWh/j *par personne*. L'une des raisons pour lesquelles je préfère utiliser cette unité toute personnelle est que grâce à cela, comparer le Royaume-Uni à d'autres pays ou d'autres régions devient beaucoup plus facile. Imaginons par exemple que l'on parle de l'incinération des déchets, et que l'on apprenne que l'incinération des déchets produit au Royaume-Uni une puissance de 7 TWh par an, et au Danemark, 10 TWh par an. Peut-on en déduire que le Danemark incinère « plus » de déchets que le Royaume-Uni ? Même si la puissance totale produite dans chaque pays à partir des déchets est sans doute une information digne d'intérêt, je pense que ce qui est vraiment intéressant, c'est la puissance produite *par personne*. (En l'occurrence : pour le Danemark, cela fait 5,5 kWh/j par personne, et pour le Royaume-Uni, 0,3 kWh/j par personne. Donc les Danois incinèrent environ 13 fois plus de déchets que les Britanniques.) Pour économiser de

1 TWh (un térawatt-heure) est égal à un milliard de kWh.

l'encre, je remplacerai parfois « par personne » par « /pers ». En exprimant dès le départ chaque chose par personne, nous nous retrouverons avec un livre plus facile à transporter, et qui, je l'espère, sera utile pour discuter de l'énergie durable du monde entier.

## Détails complexes

*L'énergie ne se conserve-t-elle pas? Nous parlons de « consommer » de l'énergie, mais une des lois de la nature ne dit-elle pas que l'énergie ne peut être créée ou détruite?*

Oui, je deviens imprécis. En fait, ce dont parle vraiment ce livre, c'est d'*entropie* – une chose bien plus délicate à expliquer. Quand on « consomme la totalité » d'un kilojoule d'énergie, ce que l'on fait en réalité, c'est prendre un kilojoule d'énergie sous une forme de *faible entropie* (par exemple, de l'électricité), et le *convertir* en une quantité exactement égale d'énergie sous une autre forme, possédant généralement une entropie beaucoup plus élevée (l'air chaud ou l'eau chaude par exemple). Une fois que l'on a « consommé » cette énergie, il en reste encore, mais ce qu'il reste ne peut pas normalement être « utilisé » et « réutilisé », car seule de l'énergie de *faible entropie* nous est « utile ». Parfois, on distingue les différentes qualités d'énergie par l'ajout d'une mention aux unités : un kWh(e), c'est un kilowatt-heure d'énergie électrique — l'énergie de qualité la plus haute. Un kWh(th), c'est un kilowatt-heure d'énergie thermique — par exemple, l'énergie dans dix litres d'eau bouillante. L'énergie des choses à haute température est plus utile (entropie plus faible) que l'énergie des choses tièdes. L'énergie chimique constitue une troisième forme d'énergie ; tout comme l'électricité, elle est de haute qualité.

Même s'il est approximatif, parler d'énergie plutôt que d'entropie est un raccourci bien pratique. C'est pour cela que, la plupart du temps dans ce livre, nous l'adopterons. Néanmoins, ici ou là, il nous faudra nous resaisir et être plus précis, par exemple lorsque nous parlerons de la réfrigération, des centrales électriques, des pompes à chaleur ou de l'énergie géothermique.

*Les différentes formes d'énergie, comme l'énergie chimique qui alimente les voitures à moteur à essence ou l'électricité que produisent les éoliennes, sont-elles vraiment comparables? Ne seriez-vous pas plutôt en train de mélanger des torchons et des serviettes?*

Quand je compare l'énergie consommée avec l'énergie que l'on peut théoriquement produire, je ne veux pas dire que toutes les formes d'énergie se valent ou qu'elles sont interchangeables. L'énergie électrique produite par une éolienne n'est d'aucune utilité pour un moteur à essence, et l'essence ne sert à rien pour faire fonctionner une télévision. En principe, l'énergie peut être convertie d'une forme en une autre, même si, en pratique,



la conversion de l'une à l'autre entraîne toujours des pertes. Par exemple, les centrales brûlant des combustibles fossiles, gourmandes en *énergie chimique*, produisent de l'*électricité* (avec un rendement d'environ 40 %). Et les usines d'aluminium, gourmandes en *énergie électrique*, créent un produit à haute teneur en *énergie chimique* — l'aluminium (avec un rendement d'environ 30 %).

Dans un certain nombre de documents qui parlent de production et de consommation d'énergie, les différentes formes d'énergie sont indiquées dans la même unité, mais des facteurs multiplicatifs sont introduits pour indiquer, par exemple, que l'énergie électrique produite par l'hydroélectricité est 2,5 fois plus importante que l'énergie chimique contenue dans le pétrole. Cette surcote de l'énergie électrique peut être justifiée en disant : « 1 kWh d'électricité équivaut à 2,5 kWh de pétrole, parce que si nous alimentons en pétrole une centrale électrique standard, celle-ci ne fournira que 40 % des 2,5 kWh, soit 1 kWh d'électricité. »

Toutefois, dans ce livre, j'utiliserai souvent un taux de conversion de 1 pour 1 pour comparer les différentes formes d'énergie. Car 2,5 kWh de pétrole ne sont *pas toujours* inéluctablement équivalents à 1 kWh d'électricité : cette relation d'équivalence entre les énergies est juste révélatrice d'un monde où l'on utilise le pétrole pour produire de l'électricité. Certes, la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique se fait effectivement avec ce rendement particulièrement inefficace. Mais on peut aussi convertir l'énergie électrique en énergie chimique. Et dans un monde alternatif (peut-être pas si éloigné) qui disposerait d'une électricité relativement abondante et de peu de pétrole, on pourrait utiliser l'électricité pour fabriquer des carburants liquides. Dans ce monde-là, on n'utiliserait certainement pas le même taux de conversion — chaque kWh d'essence pourrait alors nous coûter quelque chose comme 3 kWh d'électricité ! Je pense donc que la manière intemporelle et scientifique de résumer et de comparer les énergies est de retenir que 1 kWh d'énergie chimique est équivalent à 1 kWh d'électricité. Mon choix d'utiliser ce taux de conversion de 1 pour 1 signifie que certains de mes calculs seront un peu différents des calculs faits par d'autres personnes. (Par exemple, dans le *Statistical Review of World Energy* de BP, 1 kWh d'électricité équivaut à  $100/38 \simeq 2,6$  kWh de pétrole ; de son côté, le *Digest of UK Energy Statistics* utilise le même taux de conversion de 1 pour 1 que moi). Et j'insiste encore une fois : par ce choix, je ne suggère pas que l'on peut convertir l'énergie directement d'une forme à l'autre. On perd toujours une partie de l'énergie en transformant de l'énergie chimique en énergie électrique (et inversement).

## Physique et équations

Mon but tout au long de ce livre n'est pas seulement de travailler sur des chiffres qui indiquent notre consommation actuelle d'énergie et la production d'énergie durable théoriquement possible ; il est aussi de préciser

de quoi ces chiffres dépendent. Comprendre de quoi ces chiffres dépendent est essentiel si l'on veut pouvoir choisir des politiques judicieuses qui modifieront n'importe lequel d'entre eux. C'est à la condition expresse de comprendre la physique qui se trouve derrière la consommation et la production d'énergie que nous pourrions commenter sans dire de bêtises des affirmations comme « les voitures gaspillent 99 % de l'énergie qu'elles consomment ; on pourrait revoir leur conception pour qu'elles consomment 100 fois moins ». Cette affirmation est-elle exacte ? Pour expliquer la réponse à cette question, il va me falloir utiliser des équations comme celle-ci :

$$\text{énergie cinétique} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Je reconnais toutefois que pour de nombreux lecteurs, ces formules ressemblent à du chinois. Donc, je vous promets que *je vais mettre de côté toutes ces expressions qui semblent abscones et compliquées, et je vais les réserver aux chapitres techniques à la fin du livre*. Tout lecteur ayant fait des études secondaires de mathématiques, de physique ou de chimie, pourra profiter de la lecture de ces chapitres techniques. Le fil conducteur de ce livre (de la page 2 à la page 296) est destiné à être accessible à tous ceux qui savent faire des additions, des multiplications et des divisions. Il est particulièrement destiné à nos chers représentants élus et non élus et à nos parlementaires.

Un dernier point, avant de commencer : je ne connais pas tout sur l'énergie. Je n'ai pas toutes les réponses, et la discussion est ouverte sur les chiffres que je propose ; ils peuvent être revus et corrigés. (Et je m'attends d'ailleurs à des corrections, que je publierai sur le site Web du livre.) La seule chose dont je sois *absolument* sûr, c'est que les réponses à nos questions sur l'énergie durable impliqueront des *chiffres* ; toute discussion saine sur l'énergie durable exige des chiffres. Ce livre les contient, et il montre comment travailler avec. J'espère que cela vous plaira !

## Notes et bibliographie

Page n°

- 29 *Le « par seconde » est déjà intégré à la définition du kilowatt*. Il n'y a pas que le watt qui inclue le « par unité de temps » dans sa définition. D'autres unités l'incluent aussi, comme par exemple : le nœud — « la vitesse de notre bateau est de dix nœuds ! » (un nœud est un mille nautique *par* heure) ; le hertz — « je peux entendre un bourdonnement de 50 hertz » (un hertz est une fréquence d'un cycle *par* seconde) ; l'ampère — « le fusible fond lorsque le courant est supérieur à 13 ampères » (*pas* 13 ampères par seconde) ; la puissance — « ce moteur puant délivre 50 chevaux » (*pas* 50 chevaux par seconde, ni 50 chevaux par heure, ni 50 chevaux par jour : juste 50 chevaux).
- *Je vous en prie, ne dites jamais, jamais « un kilowatt par seconde »*. Il y a quelques rares exceptions à cette règle. Si l'on parle d'une croissance de la demande d'énergie, nous pourrions dire « la demande britannique croît d'un gigawatt par an ». Dans le chapitre 26, lorsque je parle des fluctuations de la production d'énergie éolienne, je dis « un matin, la puissance délivrée par les éoliennes irlandaises a diminué au rythme de 84 MW par heure ». Prenez garde ! Juste une syllabe accidentelle peut apporter la confusion : par exemple, votre compteur électrique indique des kilowatts-heures (kWh) », et *non* des « kilowatts par heure ».

J'ai inclus à la page 429 un tableau pour vous aider à traduire en kWh par jour et par personne les autres principales unités de puissance dont nous parlerons dans le reste de ce livre.