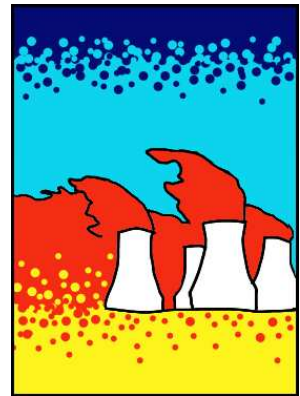


L'énergie durable — Pas que du vent !

Première partie

Des chiffres, pas des adjectifs



6 Solaire

Notre but, pour le moment, c'est d'équilibrer notre consommation par une production d'énergie durable. Au cours des trois derniers chapitres, nous sommes arrivés à la conclusion que toute l'énergie que pourrait apporter le potentiel éolien terrestre au Royaume-Uni ne suffisait pas pour faire rouler nos voitures et voler nos avions. L'énergie solaire permettra-t-elle à la pile « production » de reprendre la tête ?

La densité du rayonnement solaire brut reçu à midi un jour sans nuages est de $1\,000\text{ W}$ par mètre carré. Il s'agit de $1\,000\text{ W}$ par m^2 de surface orientée vers le soleil, et non pas par m^2 de territoire. Pour obtenir la puissance par m^2 de *territoire* en Grande-Bretagne, il faut faire quelques **corrections** à cette mesure. Il faut compenser l'inclinaison des rayons du soleil par rapport à la verticale, ce qui réduit l'intensité du soleil à midi à environ **60 %** de sa valeur à l'équateur (figure 6.1). Nous perdons de l'intensité car il n'est pas midi tout le temps. Durant un jour sans nuages en mars ou septembre, le ratio entre intensité *moyenne* et intensité à midi est d'environ **32 %**. Enfin, on perd de la puissance à cause de la couverture nuageuse. Typiquement, au Royaume-Uni, le soleil brille seulement **34 %** de la journée.

L'effet combiné de ces trois facteurs et, pour compliquer le tout, de l'alternance des saisons, fait qu'en Grande-Bretagne, la puissance brute moyenne de rayonnement solaire par mètre carré a une puissance d'environ $110\text{ W}/\text{m}^2$ sur un toit orienté au sud, et d'environ $100\text{ W}/\text{m}^2$ sur un sol horizontal.

On peut transformer cette puissance brute en puissance utile de quatre manières :

1. Le solaire thermique : en utilisant le soleil pour chauffer directement des bâtiments ou de l'eau.
2. Le photovoltaïque : en produisant de l'électricité.
3. La biomasse solaire : en utilisant les arbres, les bactéries, les algues, le maïs, le soja ou le colza pour produire des carburants, des produits chimiques, ou des matériaux de construction.
4. La nourriture : les mêmes produits que la biomasse solaire, mais pour alimenter les hommes ou les animaux.

(Dans un chapitre ultérieur, nous verrons quelques autres techniques utilisables pour transformer l'énergie solaire dans les déserts.)

Faisons quelques estimations rapides des puissances maximales théoriques que chacune de ces manières pourrait fournir. Nous allons négliger leurs coûts économiques, et les coûts énergétiques pour construire et maintenir ces installations.

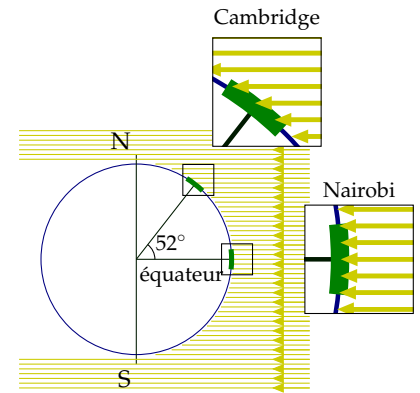


FIGURE 6.1. La lumière du soleil atteignant le sol à midi, un jour de printemps ou d'automne. La densité de lumière solaire par unité de surface à Cambridge (latitude 52°) est environ 60 % de celle à l'équateur.

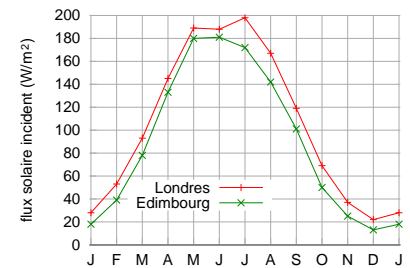


FIGURE 6.2. Intensité solaire moyenne à Londres et à Edimbourg selon la période de l'année. L'intensité moyenne, par unité de surface, est de $100\text{ W}/\text{m}^2$.

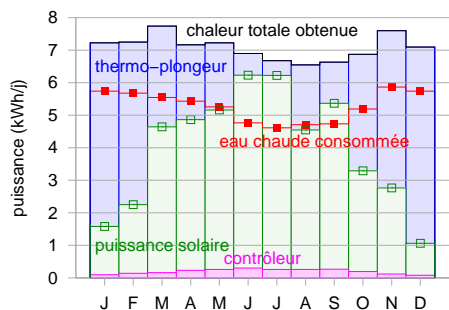


FIGURE 6.3. L'énergie solaire générée par un panneau thermique de 3 m² (en vert), et la chaleur supplémentaire nécessaire (en bleu) pour produire l'eau chaude dans la maison-test de Viridian Solar. (La photo montre une maison avec le même modèle de panneau sur le toit). La puissance solaire moyenne obtenue à partir de 3 m² a été de 3,8 kWh/j. L'expérience simulait la consommation d'eau chaude d'un ménage européen moyen — 100 litres d'eau chaude (à 60 °C) par jour. L'écart de 1,5 à 2 kWh/j entre la quantité de chaleur totale produite (ligne noire, en haut) et l'eau chaude consommée (ligne rouge) est due aux pertes de chaleur. La ligne violette indique la puissance électrique requise pour faire fonctionner le système solaire. La puissance moyenne par unité de surface de ces panneaux solaires est de 53 W/m².

Le solaire thermique

La technologie solaire la plus simple qui soit est un panneau qui produit de l'eau chaude. Imaginons de couvrir *tous* les toits orientés vers le sud par des panneaux solaires thermiques — ce qui ferait environ 10 m² de panneaux par personne — avec un rendement de 50 %, pour transformer les 110 W/m² de lumière solaire en eau chaude (figure 6.3). Si l'on fait la multiplication :

$$50 \% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

on trouve que le chauffage solaire pourrait fournir :

13 kWh par jour et par personne.

Dans la figure 6.4, j'ai coloré en blanc ce rectangle de production pour indiquer qu'il décrit la production d'énergie de faible qualité — l'eau chaude n'est pas aussi précieuse que l'énergie électrique, produite par exemple par les éoliennes. On ne peut pas envoyer la chaleur dans le réseau électrique. Si l'on n'a pas besoin de la chaleur quand elle est disponible, alors elle est perdue. Il faut aussi garder à l'esprit que l'essentiel de cette chaleur capturée ne l'est pas au bon endroit : dans les villes, là où les gens vivent, l'habitat résidentiel possède moins de surface de toit que la moyenne nationale. De plus, cette puissance est fournie de façon non uniforme au cours de l'année : plus en été et moins en hiver.

Photovoltaïque

Des panneaux photovoltaïques (PV) convertissent la lumière solaire en électricité. Ces panneaux ont typiquement un rendement d'environ 10 % ; les plus chers atteignent 20 %. (Il y a des lois physiques fondamentales qui limitent le rendement des systèmes photovoltaïques à au mieux 60 % avec des miroirs ou des lentilles de concentration qui soient parfaits, et à 45 % sans concentration. Un dispositif produit en masse qui aurait un rendement supérieur à 30 % constituerait déjà une performance remarquable.)

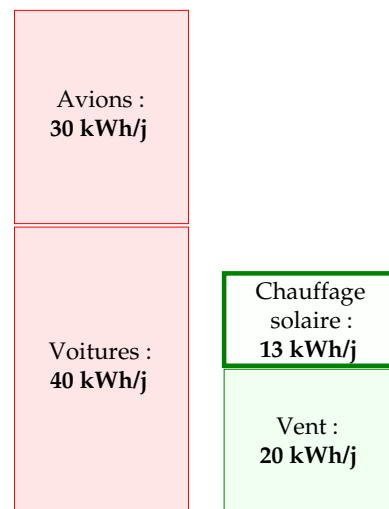


FIGURE 6.4. Le solaire thermique : 10 m² de panneaux thermiques peuvent fournir (en moyenne) environ 13 kWh par jour d'énergie thermique.

La puissance moyenne fournie en Grande-Bretagne par des panneaux photovoltaïques avec un rendement de 20 % et orientés au sud serait de :

$$20 \% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2.$$

La figure 6.5 nous montre des données qui confirment ce chiffre. Si l'on donnait à tout le monde 10 m^2 de panneaux solaires chers (avec un rendement de 20 %) et que l'on en recouvrait tous les toits orientés au sud, ces panneaux fourniraient :

5 kWh par jour et par personne.

Puisque la surface totale des toits orientés au sud est de 10 m^2 par personne, il n'y a certainement pas assez de place sur nos toits pour mettre ces panneaux photovoltaïques en plus des panneaux thermiques de la section précédente. Nous devons donc choisir entre les deux : contribution photovoltaïque ou en eau chaude. Mais je vais quand même les mettre tous les deux sur notre pile de production durable. Soit dit en passant, aujourd'hui, le coût d'installation de ces panneaux photovoltaïques est d'environ quatre fois celui des panneaux solaires thermiques, alors même qu'ils fournissent deux fois moins d'énergie, fût-elle de haute qualité (électricité). Si je devais donner un conseil à quelqu'un qui souhaite investir dans le solaire, je lui conseillerais donc d'étudier en premier l'option thermique. La solution la plus astucieuse, au moins dans les pays jouissant de beaucoup de soleil, ce sont les systèmes combinés capables de fournir à la fois de l'électricité et de l'eau chaude à partir d'une seule installation. C'est l'approche dont la société Heliodynamics a été à l'avant-garde : elle a réussi à réduire le coût global de ses systèmes en plaçant toute une série de miroirs plats se déplaçant lentement autour de petites unités photovoltaïques en arséniure de gallium de haute qualité ; ces miroirs concentrent la lumière sur les unités photovoltaïques, qui fournissent à la fois de l'électricité et de l'eau chaude ; l'eau chaude est produite en pompant de l'eau derrière les unités photovoltaïques.

Voici la conclusion que nous pouvons tirer pour l'instant : recouvrir de panneaux photovoltaïques la partie orientée au sud du toit de votre maison pourrait fournir juste assez de jus pour couvrir une bonne partie de votre consommation d'électricité personnelle moyenne, mais tous les toits du pays ne suffisent pas à faire une brèche sérieuse dans notre consommation totale d'énergie. Pour obtenir plus du photovoltaïque, il faut redescendre jusqu'à la terre ferme. Les guerriers du solaire de la figure 6.6 nous montrent la direction à suivre.

Rêvons un peu : les fermes solaires

Si l'on faisait une découverte capitale dans la technologie du solaire au point de suffisamment faire baisser le coût du photovoltaïque et de

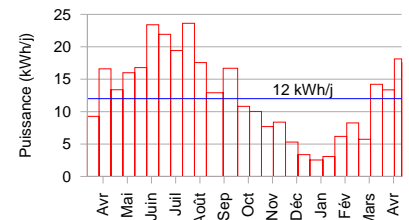


FIGURE 6.5. Le solaire photovoltaïque : les données proviennent d'un ensemble de 25 m^2 de panneaux installés dans le Cambridgeshire en 2006. La puissance-crête fournie par cet ensemble est d'environ 4 kW. La puissance moyenne sur l'ensemble de l'année est de 12 kWh par jour. Ce qui fait 20 W par mètre carré de panneau.



FIGURE 6.6. Deux guerriers du solaire jouissant de leur système photovoltaïque, qui alimente leurs voitures électriques et leur maison. L'ensemble des 120 panneaux (chacun fournissant 300 W et couvrant 2,2 m²) couvre une surface de 268 m², et délivre en sortie une puissance-crête de 30,5 kW (en tenant compte des pertes dues à la conversion du courant continu en courant alternatif) et une production moyenne — en Californie, près de Santa Cruz — de 5 kW (19 W/m²). Photo aimablement fournie par Kenneth Adelman. www.solarwarrior.com

permettre de couvrir les campagnes de panneaux solaires, quelle serait la production maximum théoriquement atteignable ? Eh bien, si l'on couvrait 5 % du territoire du Royaume-Uni avec des panneaux qui ont un rendement de 10 %, on pourrait obtenir :

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ par personne} \\ \simeq 50 \text{ kWh/jour/personne.}$$

Soit dit en passant, j'ai fait l'hypothèse que les panneaux n'avaient qu'un rendement de 10 %, parce que je n'imagine pas que des panneaux solaires puissent être produits en masse à une telle échelle à moins d'être très peu chers à produire à l'unité, et seuls les panneaux qui ont le plus faible rendement seront bon marché au début. La densité de puissance (c'est-à-dire la puissance par unité de surface) d'une telle ferme photovoltaïque serait alors de :

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2.$$

Il s'agit d'une densité de puissance deux fois plus grande que celle de la centrale du Solarpark en Bavière (figure 6.7).

Est-ce qu'une telle marée de panneaux solaires pourrait coexister avec l'armée de moulins à vent que nous avons imaginée au chapitre 4 ? Oui, sans aucun problème : les éoliennes ne font que très peu d'ombre, et des panneaux solaires au niveau du sol ont un effet négligeable sur le vent. Audacieux, ce plan l'est sans doute, mais jusqu'à quel point ? Pour produire ces 50 kWh par jour et par personne au Royaume-Uni, la capacité de production d'énergie solaire qu'il faudrait est plus que 100 fois ce que



FIGURE 6.7. Une ferme solaire photovoltaïque : le Solarpark de 6,3 MW (en crête) à Mühlhausen, en Bavière. On s'attend à ce que sa puissance moyenne par unité de surface soit d'environ 5 W/m². Photographie fournie par SunPower.

le monde entier produit aujourd’hui à partir du photovoltaïque. Du coup, est-ce que je peux vraiment inclure ma ferme solaire dans ma pile de production durable ? J’hésite un peu. Au début de ce livre, je disais vouloir explorer ce que les lois de la physique disent au sujet des limites à l’énergie durable, en supposant que l’argent n’est pas un problème. Avec une hypothèse pareille, je devrais le faire, sans aucun doute : industrialiser la campagne, et placer les fermes photovoltaïques sur ma pile de production. Mais en même temps, je cherche aussi à vous aider à comprendre ce qu’il va falloir faire entre *maintenant* et 2050. Et maintenant, l’électricité produite par des fermes photovoltaïques serait quatre fois plus chère que le prix du marché. Inclure cette estimation dans la pile de production durable de la figure 6.9 me semble donc un peu irresponsable — il y a tellement de raisons pour lesquelles recouvrir 5 % du Royaume-Uni par des panneaux solaires semble largement au-delà de toute crédibilité. Si l’on envisageait sérieusement de se lancer dans un tel projet, il serait sans doute préférable de mettre les panneaux dans un pays deux fois plus ensoleillé et de rapatrier une partie de l’énergie obtenue par des lignes électriques. Nous reviendrons sur cette idée dans le chapitre 25.

Légendes urbaines

Fabriquer un panneau solaire consomme plus d’énergie qu’il n’en produira jamais.

C’est faux. Le *ratio énergétique* (pour un système donné, le rapport entre la quantité d’énergie qu’il fournit sur l’ensemble de sa durée de vie, et la quantité d’énergie consommée pour le fabriquer) d’un système solaire installé sur un toit et raccordé au réseau dans le centre de l’Europe du Nord est de 4, pour un système d’une durée de vie de 20 ans (Richards et Watt, 2007) ; il est supérieur à 7 dans un lieu plus ensoleillé comme l’Australie. (Sur le plan énergétique, un ratio énergétique supérieur à 1 est ce que l’on appelle une bonne chose). A titre de comparaison, les éoliennes d’une durée de vie de 20 ans ont un ratio énergétique de 80.

Les panneaux photovoltaïques ne vont-ils pas devenir de plus en plus efficaces au fur et à mesure que l’on fera des progrès technologiques ?

Je ne doute pas que les panneaux photovoltaïques deviennent toujours *moins chers* ; je ne doute pas non plus qu’il faudra toujours de moins en moins d’énergie pour les *fabriquer*. Leur ratio énergétique ira donc croissant. Mais les estimations dans ce chapitre ne se fixaient pas de limite sur le coût économique des panneaux ou le coût énergétique de leur fabrication. Ce chapitre se focalisait sur la puissance maximale théorique qu’ils peuvent fournir. Avec un rendement de 20 %, les panneaux photovoltaïques sont déjà proches de leur limite théorique (voir les notes en fin de ce chapitre). Je serais extrêmement surpris si les estimations de ce

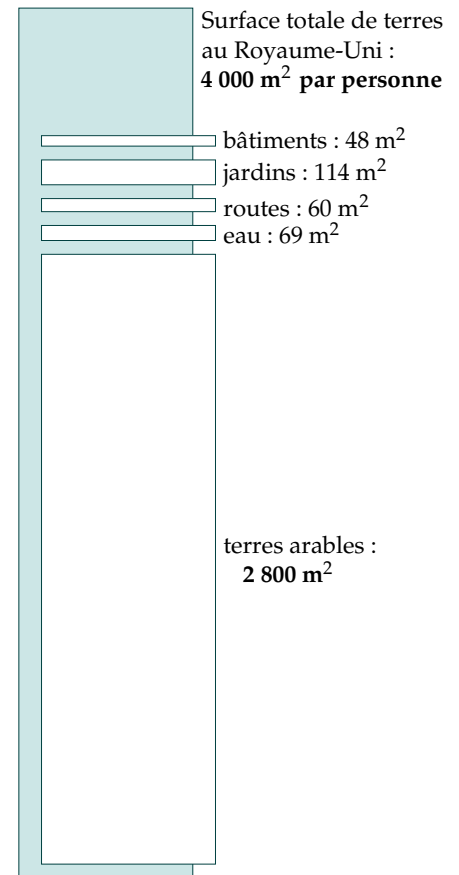


FIGURE 6.8. Répartition des surfaces de terres par type d’usage, par personne, en Grande-Bretagne.

chapitre concernant les cellules photovoltaïques en toiture devaient être révisées un jour.

La biomasse solaire

D'un seul coup, vous voyez, on pourrait se retrouver dans le business de l'énergie simplement parce qu'on fait pousser de l'herbe dans son ranch ! Et qu'on peut la couper et la convertir en énergie. C'est ce qui est sur le point d'arriver.

George W. Bush, février 2006

Dans toutes les solutions bioénergétiques disponibles, on commence par faire pousser de la verdure, pour en faire ensuite quelque chose. Combien d'énergie pourrait-on collecter grâce à elle ? En fait, il y a quatre grandes manières de tirer de l'énergie de systèmes biologiques alimentés par l'énergie solaire :

1. On peut faire pousser des plantes choisies spécialement et les brûler dans une centrale qui produit de l'électricité, ou de la chaleur, ou les deux. On appelle cela un « substitut au charbon ».
2. On peut faire pousser des plantes choisies spécialement (colza, canne à sucre, maïs ou soja, par exemple), pour en obtenir de l'éthanol ou du biogazole, que l'on utilise ensuite pour alimenter les voitures, les trains, les avions ou tout autre objet dans lequel ces produits chimiques sont utiles. On peut aussi cultiver des bactéries génétiquement modifiées, des cyanobactéries, ou des algues qui produiraient directement de l'hydrogène, de l'éthanol, du butanol ou même de l'électricité. On appelle toutes ces approches des « substituts au pétrole ».
3. On peut prendre des sous-produits d'autres activités agricoles et les brûler dans une centrale. Les sous-produits peuvent aller de la paille (un sous-produit des biscottes) aux fientes de poulet (un sous-produit des McNuggets). Brûler ainsi des sous-produits, c'est toujours un substitut au charbon, tant que l'on utilise des plantes ordinaires et non les meilleures plantes à haute valeur énergétique. Une centrale qui brûle des sous-produits agricoles ne fournira pas autant de puissance par unité de surface de terre agricole qu'une installation optimisée de production de biomasse, mais elle a l'avantage de ne pas monopoliser les terres. Brûler du méthane produit par les décharges d'ordures est une autre manière d'obtenir de l'énergie, mais elle n'est durable qu'à condition que la source de production des déchets à mettre en décharge soit elle-même durable. (L'essentiel du méthane issu des décharges provient de nourriture jetée ; les Britanniques jettent de l'ordre de 300 g de nourriture par jour et par personne.) Incinérer les déchets ménagers est encore une autre manière,

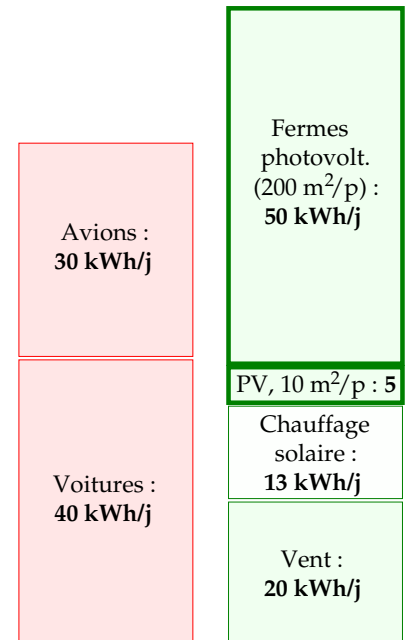


FIGURE 6.9. Le solaire photovoltaïque : 10 m² de panneaux photovoltaïques installés sur des toits orientés au sud, avec un rendement de 20 %, peuvent fournir environ 5 kWh par jour d'énergie électrique. Si 5 % du pays étaient recouverts de panneaux solaires avec un rendement de 10 % (200 m² de panneaux par personne), ils fourniraient 50 kWh/j par personne.

un peu moins détournée, d'obtenir de l'énergie à partir de biomasse solaire.

4. On peut faire pousser des plantes et les donner directement à manger aux hommes ou à d'autres animaux qui ont besoin d'énergie.

Pour l'ensemble de ces processus, la première escale de l'énergie est au sein d'une molécule chimique dans une plante verte, typiquement un glucide. On peut donc estimer la puissance pouvant être obtenue par tous ces processus en estimant le flux énergétique qui transite par cette première étape. Toutes les étapes ultérieures impliquant tracteurs, animaux, usines chimiques, décharges ou centrales électriques ne peuvent que perdre de l'énergie. Par conséquent, la puissance à la première escale constitue une limite supérieure à la puissance que peuvent fournir toutes les solutions énergétiques basées sur les plantes.

Essayons donc tout simplement d'estimer la puissance au début de la chaîne. (Dans le chapitre D, nous entrerons plus dans les détails dans l'estimation de la contribution maximale de chaque processus.) La puissance moyenne exploitable de la lumière du soleil en Grande-Bretagne est de 100 W/m^2 . Les plantes les plus efficaces en Europe ont un rendement d'environ 2 % pour transformer l'énergie solaire en glucides, ce qui pourrait suggérer que les plantes peuvent fournir 2 W/m^2 ; toutefois, leur rendement baisse fortement avec des luminosités plus élevées, et dans les faits, la meilleure performance que l'on puisse obtenir en Europe avec des cultures énergétiques est plus proche de $0,5 \text{ W/m}^2$. Si l'on couvre 75 % du pays avec de la verdure de qualité, cela représente $3\,000 \text{ m}^2$ par personne consacrés à la bio-énergie. C'est la surface actuellement consacrée à l'agriculture en Grande-Bretagne. La puissance maximale atteignable, en ignorant tous les coûts supplémentaires, pour faire pousser, récolter et traiter la verdure, est donc de :

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3\,000 \text{ m}^2 \text{ par personne} = 36 \text{ kWh/j par personne.}$$

Houlà ! Ça ne fait pas des masses, compte tenu des hypothèses outrageusement généreuses que nous venons de faire pour essayer d'obtenir un grand chiffre. Si en plus, vous voulez produire des agrocarburants pour les voitures ou les avions, toutes les autres étapes de la chaîne de production, de la ferme au piston, seront inévitablement peu efficaces. A mon avis, espérer que les pertes tout au long de la chaîne soient inférieures à 33 % serait plutôt optimiste. Même le fait de brûler du bois sec dans une bonne chaudière fait perdre 20 % de la chaleur, qui partent dans la cheminée. Donc à coup sûr, le véritable potentiel de puissance de la biomasse et des agrocarburants n'excédera pas **$24 \text{ kWh/j par personne}$** . Et n'oubliez pas qu'il nous faut quand même un peu de verdure pour produire des aliments pour nous nourrir et nourrir nos animaux.

Le génie génétique pourrait-il créer des plantes capables de convertir de manière plus efficace l'énergie solaire en substances chimiques ? En



FIGURE 6.10. L'herbacée *Miscanthus* profitant de la compagnie du Dr Emily Heaton, qui mesure 1,63 m. En Grande-Bretagne, le *Miscanthus* atteint une puissance par unité de surface de $0,75 \text{ W/m}^2$. Photographie fournie par l'université de l'Illinois.

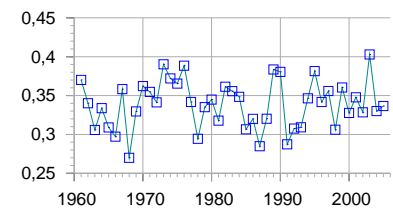


FIGURE 6.11. L'ensoleillement de Cambridge : le nombre d'heures ensoleillées par an, exprimé sous la forme d'une fraction du nombre total d'heures de jour dans l'année.

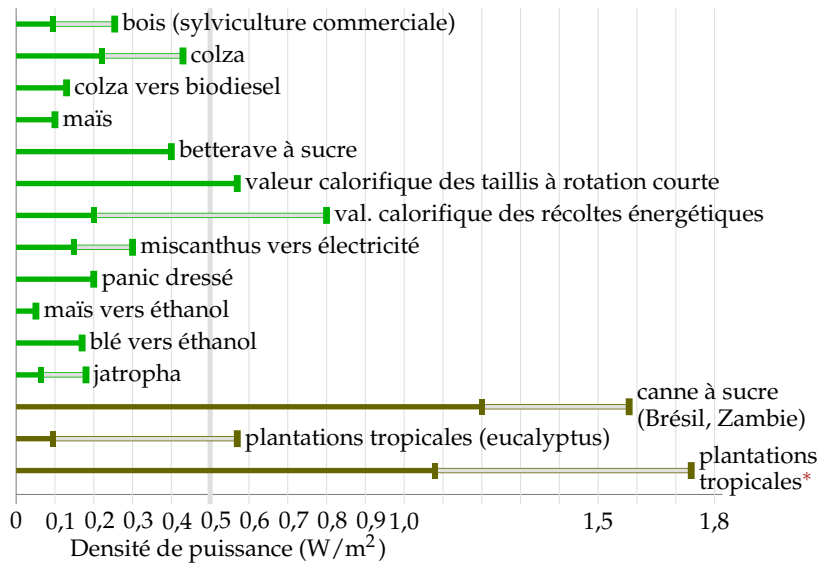


FIGURE 6.12. La production de puissance, par unité de surface, atteinte par diverses plantes. Pour les sources, se référer aux notes de fin de chapitre. Ces densités de puissance varient selon l'irrigation et la fertilisation. Des fourchettes sont précisées pour certaines cultures, par exemple la puissance obtenue avec le bois, qui va de 0,095 à 0,254 W/m². Les trois densités de puissance du bas concernent des plantes cultivées dans des régions tropicales. La dernière densité de puissance (plantations tropicales*) suppose le recours à des modifications génétiques, aux engrais et à l'irrigation. Dans le texte, j'utilise 0,5 W/m² comme valeur de synthèse des meilleures cultures énergétiques du nord-ouest de l'Europe.

théorie, ça devrait être possible, mais je n'ai trouvé aucune publication scientifique qui prédise que les plantes en Europe pourraient atteindre une production énergétique nette dépassant 1 W/m².

Je vais ajouter 24 kWh/j par personne sur notre pile verte, en insistant sur le fait qu'à mon sens, ce chiffre est surévalué — la véritable puissance maximale que l'on puisse espérer tirer de la biomasse sera moindre en raison des pertes dans les processus agricoles et agroalimentaires qui s'en suivent.

Il me semble que la conclusion est claire : *avec les biocarburants, le compte n'est pas bon* — du moins, pas dans des pays comme la Grande-Bretagne, et pas pour remplacer tous les carburants destinés au transport. Même en laissant de côté les principaux défauts des biocarburants — le fait que leur production entre en concurrence avec la production de nourriture, et que les intrants supplémentaires qu'il faut utiliser pour les produire puis les transformer annulent souvent l'essentiel de l'énergie qu'ils fournissent (figure 6.14) — les agrocarburants, dans un pays européen comme la Grande-Bretagne, sont capables de fournir tellement peu de puissance qu'à mon avis, ce n'est même pas la peine d'en parler.

Notes et bibliographie

Page n°

- 45 ...compenser l'inclinaison des rayons du soleil par rapport à la verticale. La latitude de Cambridge est de $\theta = 52^\circ$; l'intensité du rayonnement solaire à midi est à multiplier par $\cos \theta \simeq 0,6$. Le facteur exact dépend de la période de l'année, et varie entre $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ et $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.

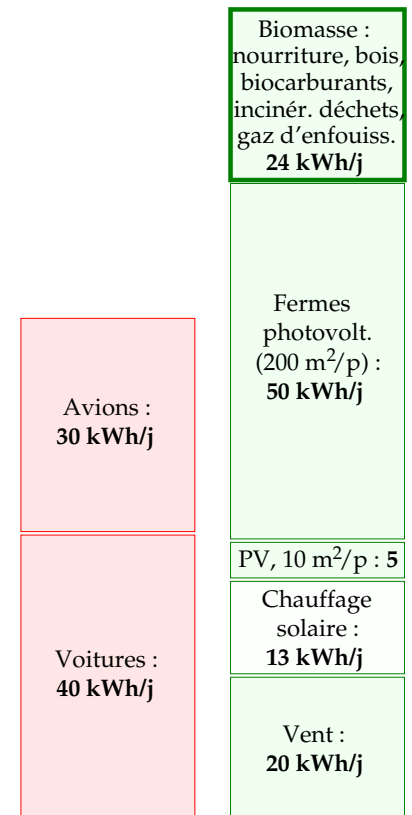


FIGURE 6.13. La biomasse solaire, y compris toutes les formes de bio/agrocarburants, l'incinération des déchets et l'alimentation : 24 kWh/j par personne.

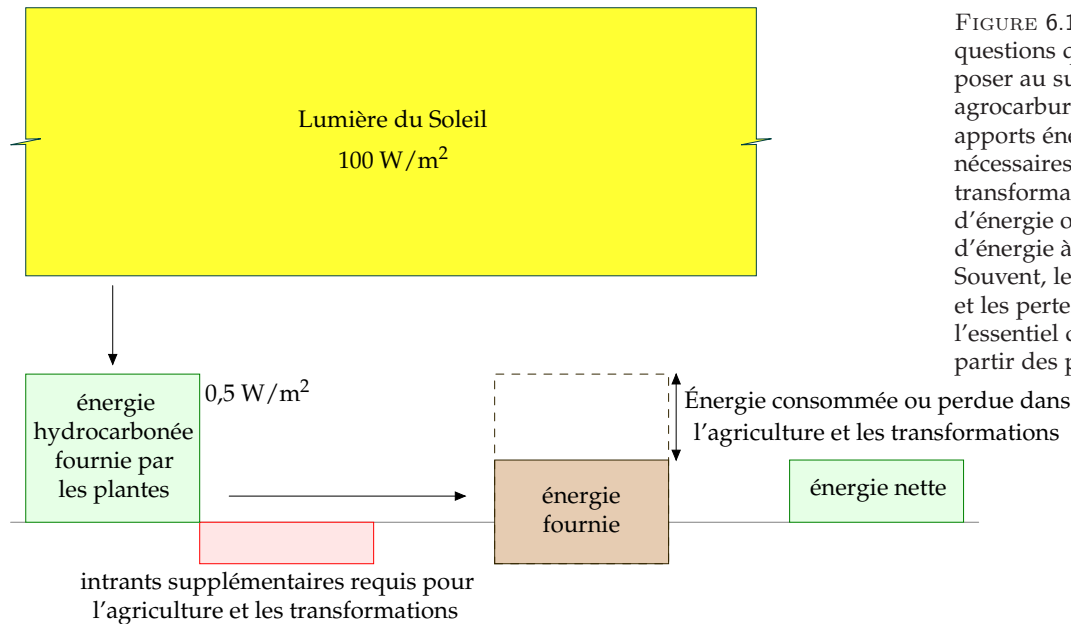


FIGURE 6.14. Cette figure illustre les questions quantitatives qu'il faut se poser au sujet de n'importe quel agrocarburant proposé. Quels sont les apports énergétiques supplémentaires nécessaires à la culture et à la transformation ? Quelle est la quantité d'énergie obtenue ? La quantité *nette* d'énergie à la fin du processus ? Souvent, les intrants supplémentaires et les pertes inévitables effacent l'essentiel de l'énergie obtenue à partir des plantes.

– Typiquement, au Royaume-Uni, le soleil brille seulement un tiers de la journée. Les Highlands reçoivent 1 100 h de soleil par an — un ensoleillement de 25 %. Les meilleurs sites en Écosse reçoivent 1 400 h par an — soit 32 %. Cambridge : $1\,500 \pm 130$ h par an — 34 %. Côte sud de l'Angleterre (la partie la plus ensoleillée du Royaume-Uni) : 1 700 h par an — 39 %. [2rq1oc] Les données de Cambridge proviennent de [2szckw]. Voir également la figure 6.16.

45 En Grande-Bretagne, la puissance brute moyenne de rayonnement solaire par mètre carré est d'environ 110 W/m^2 sur un toit orienté au sud, et d'environ 100 W/m^2 sur un sol horizontal. Source : NASA « Surface meteorology and Solar Energy » (en anglais) [5hrx1s]. Surpris qu'il y ait si peu de différence entre un toit penché orienté au sud et un toit horizontal ? Je l'ai été aussi. En fait, la différence n'est que de 10 % [6z9epq].

46 ... cela ferait environ 10 m^2 de panneaux par personne. J'ai estimé la surface de toits orientés au sud par personne en prenant la surface de territoire par personne qui est couverte par des bâtiments (48 m^2 en Angleterre — tableau I.6), en la multipliant par $\frac{1}{4}$ pour obtenir la fraction orientée au sud, et en la faisant grimper de 40 % pour tenir compte de l'orientation du toit qui en augmente la surface. Cela donne 16 m^2 par personne. Habituellement, les panneaux sont livrés sous forme de rectangles peu pratiques qui laissent une partie du toit découverte ; d'où les 10 m^2 de panneaux.

47 La puissance moyenne fournie par des panneaux photovoltaïques...

Il existe une idée reçue bien vivace selon laquelle les panneaux solaires produiraient presque autant de puissance sous les nuages que sous le soleil. C'est tout simplement faux. Durant une journée nuageuse bien que lumineuse, les panneaux ou les centrales photovoltaïques continuent de conver-

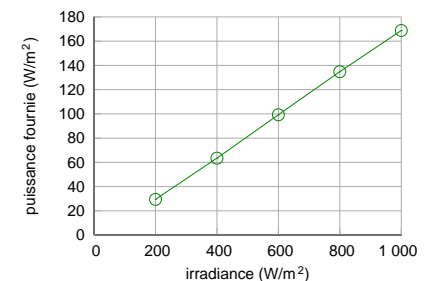


FIGURE 6.15. La puissance produite par le module Sanyo HIP-210NKHE1 en fonction de l'intensité lumineuse (à 25°C , en supposant une tension électrique de sortie de 40 V). Source : données techniques, www.sanyo-solar.eu.

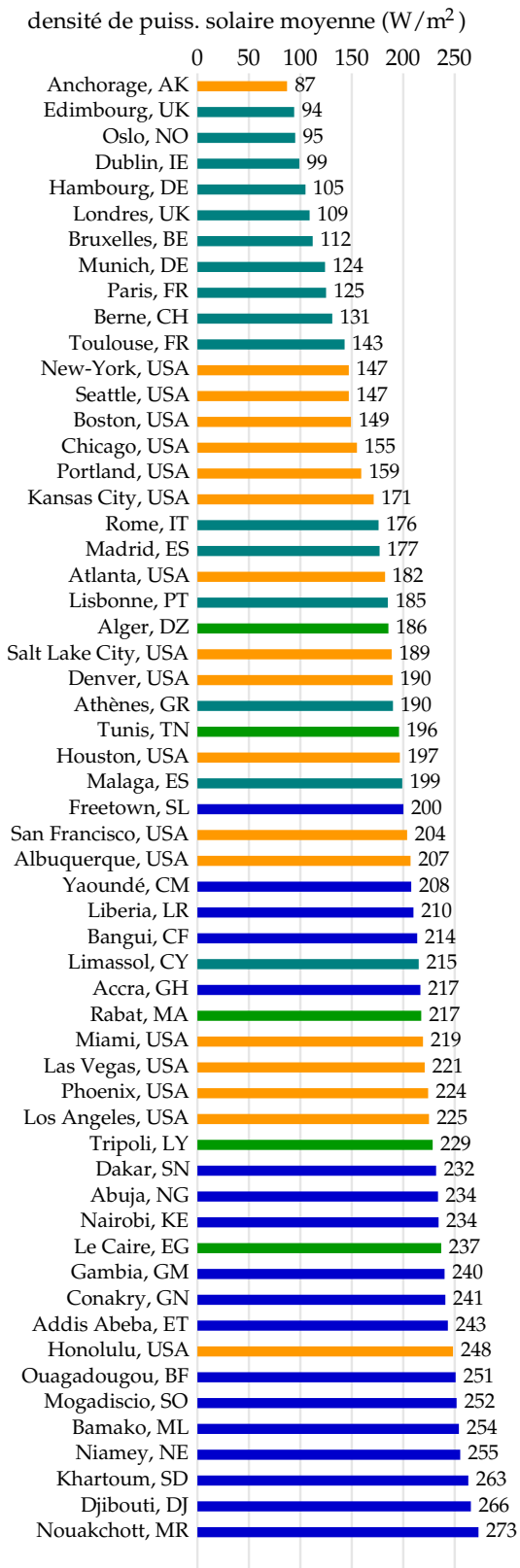
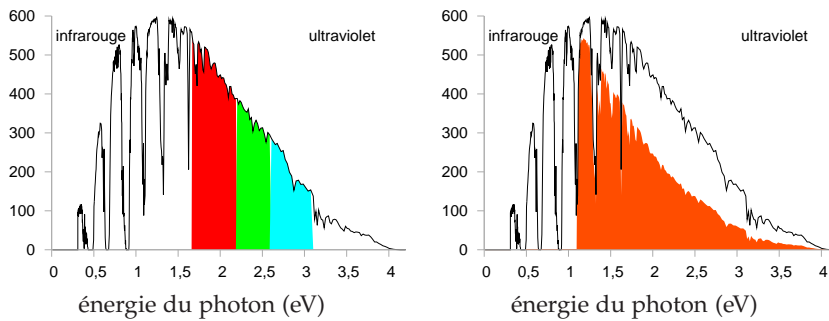


FIGURE 6.16. La puissance moyenne de la lumière solaire tombant sur une surface horizontale dans divers endroits en Europe, en Amérique du Nord et en Afrique.





tir de l'énergie, mais beaucoup moins : la production photovoltaïque est divisée par environ dix quand le soleil passe derrière des nuages (parce que l'intensité lumineuse en provenance du soleil est elle-même divisée par dix). Comme le montre la figure 6.15, la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est presque exactement proportionnelle à l'intensité de la lumière du soleil — du moins, lorsque les panneaux sont à 25 °C. Pour rendre les choses un peu plus compliquées, la puissance fournie dépend aussi de la température — des panneaux plus chauds voient leur production de puissance baisser (typiquement de 0,38 % par °C) — mais si vous vérifiez les données obtenues à partir de véritables panneaux, par exemple sur www.solarwarrior.com, vous aurez la confirmation de la principale constatation : la production d'un panneau est *beaucoup plus faible* sous les nuages que sous le soleil direct. Cette question est embrouillée par certains promoteurs du photovoltaïque qui essaient de débattre de la manière dont le « rendement » varie avec l'ensoleillement. « Les panneaux sont plus efficaces sous les nuages », disent-ils ; c'est peut-être vrai, mais il ne faut pas confondre rendement de conversion d'énergie d'une part, et puissance effectivement fournie d'autre part.

46 *Ces panneaux ont typiquement un rendement d'environ 10 % ; les plus chers atteignent 20 %.* Voir la figure 6.18. Sources : Turkenburg (2000), Sunpower www.sunpowercorp.com, Sanyo www.sanyo-solar.eu, Suntech.

- *Un dispositif produit en masse qui aurait un rendement supérieur à 30 % constituerait déjà une performance remarquable.* Il s'agit d'une citation tirée de Hopfield et Gollub (1978), au sujet des panneaux sans miroir ni lentille de concentration. La limite théorique pour un panneau photovoltaïque standard « à simple jonction » sans concentrateur, appelée limite de Shockley–Queisser, dit qu'au plus 31 % de l'énergie lumineuse peut être convertie en électricité (Shockley et Queisser, 1961). (La principale raison justifiant cette limite est qu'un matériau solaire standard possède une propriété baptisée le « gap », qui définit le niveau d'énergie d'un photon que ce matériau convertit avec la plus grande efficacité. La lumière solaire est constituée de photons avec des énergies très différentes ; les photons avec une énergie *plus faible* que celle du gap ne sont pas exploités ; les photons avec une énergie *plus grande* que celle du gap peuvent être capturés, mais toute la quantité d'énergie supplémentaire qu'ils transportent est perdue.) Des concentrateurs (lentilles ou miroirs) peuvent à la fois réduire le coût (par watt) des systèmes photovol-

FIGURE 6.17. Une partie de l'explication de Shockley et Queisser au sujet de la limite de 31 % de rendement d'un système photovoltaïque simple. A gauche : le spectre de la lumière du soleil de midi. L'axe vertical représente la densité de puissance en W/m² par électron-volt d'intervalle spectral. La partie visible du spectre est indiquée par la section colorée. A droite : la quantité d'énergie captée par un dispositif photovoltaïque avec un gap unique à 1,1 électron-volt est représentée par la zone en rouge. Les photons d'énergie inférieure au gap sont perdus. Une partie de l'énergie des photons au-dessus du gap est également perdue ; par exemple, la moitié de l'énergie de chaque photon de 2,2 électrons-volts est perdue. Des pertes supplémentaires ont lieu à cause du rayonnement inévitable des charges se recombinant dans le matériau photovoltaïque.

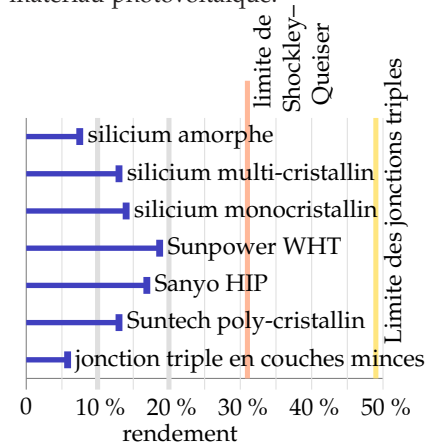


FIGURE 6.18. Le rendement des modules photovoltaïques en vente aujourd'hui. Dans le texte, je suppose que les panneaux photovoltaïques installés sur les toits ont un rendement de 20 %, et que ceux installés dans les campagnes ont un rendement de 10 %. Avec une densité de puissance moyenne de lumière solaire de 100 W/m², des panneaux avec un rendement de 20 % fournissent 20 W/m².

taïques, et augmenter leur rendement. La limite de Shockley–Queisser de rendement des panneaux solaires avec concentrateurs est de 41 %. La seule manière de dépasser la limite de Shockley–Queisser est de fabriquer des dispositifs photovoltaïques compliqués qui séparent la lumière selon ses différentes longueurs d'onde, traitant chaque intervalle de longueurs d'onde avec son propre gap. C'est ce que l'on appelle les cellules multi-jonctions. Des rendements autour de 40 % ont récemment été annoncés pour de tels systèmes équipés de concentrateurs optiques. [2t17t6], www.spectrolab.com. En juillet 2007, l'université du Delaware a annoncé avoir atteint un rendement de 42,8 % avec une concentration d'un facteur 20 [6hobq2], [21sx6t]. En août 2008, le NREL a annoncé un rendement de 40,8 % avec une concentration d'un facteur 326 [62ccou]. Curieusement, ces deux résultats furent qualifiés de records mondiaux de rendement. Mais aujourd'hui, concrètement, quels sont les dispositifs multi-jonctions disponibles sur le marché ? Uni-solar vend un panneau de 58 W (en crête) en couches minces et à triple jonction, d'une surface de 1 m². Ce qui signifie un rendement, en plein soleil, de seulement 5,8 %.

47 *Figure 6.5 : données sur le photovoltaïque.* Données et photographie aimablement fournies par Jonathan Kimmitt.

– *Heliodynamics* – www.hdsolar.com. Voir figure 6.19.

Un système semblable est fabriqué par Arontis www.arontis.se.

48 *Le Solarpark à Mühlhausen, en Bavière.* On s'attend à ce qu'en moyenne, cette ferme de 25 hectares fournisse 0,7 MW (soit 17 000 kWh par jour).

La station de métro Stillwell Avenue, à New York, a intégré des panneaux photovoltaïques en silicone amorphe en couches minces dans sa verrière, qui fournissent 4 W/m² (Fies et al., 2007).

La centrale solaire de Nellis, dans l'Etat du Nevada, dont la construction s'est achevée en décembre 2007, couvre environ 57 hectares, et on s'attend à ce qu'elle génère 30 GWh par an, soit 6 W/m² [5hzs5y].

La centrale solaire de Serpa, au Portugal, qualifiée de « centrale solaire la plus puissante au monde » [39z5m5] [2uk8q8], dispose de panneaux qui suivent la course du Soleil dans le ciel et qui occupent 60 hectares, soit 600 000 m² ou 0,6 km² (environ 84 terrains de football). On s'attend à ce qu'elle produise 20 GWh par an, soit 2,3 MW en moyenne. Ce qui fait une puissance par unité de surface de 3,8 W/m².

49 *Pour produire les 50 kWh/j par Britannique, la capacité de production d'énergie à partir du soleil qu'il faudrait est plus de 100 fois ce que le monde entier produit aujourd'hui à partir du photovoltaïque.* Pour produire 50 kWh/j par personne en Grande-Bretagne, il faudrait produire une puissance moyenne de 125 GW, ce qui requiert 1 250 GW de capacité de production. Fin 2007, l'intégralité du parc photovoltaïque installé dans le monde atteignait une puissance-crête de 10 GW, augmentant en gros à un rythme de 2 GW par an.

– ... *recouvrir 5 % du Royaume-Uni par des panneaux solaires semble largement au-delà de toute crédibilité.* La principale raison qui me pousse à penser que couvrir ainsi le territoire n'est pas crédible, c'est que les Britanniques préfèrent largement utiliser leurs campagnes pour l'agriculture et les loisirs plutôt que



FIGURE 6.19. Une unité de cogénération photovoltaïque (chaleur et électricité) fabriquée par Heliodynamics. Un réflecteur couvrant 32 m² (un peu plus grand que le côté d'un bus à deux étages) fournit jusqu'à 10 kW de chaleur et 1,5 kW de puissance électrique. Dans le sud des États-Unis, un de ces dispositifs d'une tonne pourrait fournir de l'ordre de 60 kWh/j de chaleur et de 9 kWh/j d'électricité. Ces puissances correspondent à des flux moyens de 80 W/m² de chaleur et 12 W/m² d'électricité (par mètre carré de surface photovoltaïque cogénératrice); ces flux sont similaires à ceux fournis par des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques standards, mais la conception de concentration de Heliodynamics fournit cette puissance à moindre coût, parce que l'essentiel du matériau utilisé est une vitre plate toute simple. A titre de comparaison, la consommation totale de puissance d'un Européen moyen est de 125 kWh/j.

pour y pratiquer l'élevage intensif de panneaux solaires. Un autre sujet d'inquiétude, c'est le coût. Ce livre n'est pas un livre d'économie, mais voici néanmoins quelques chiffres : au tarif de la ferme solaire bavaroise, fournir 50 kWh/j par personne coûterait 91 000 € par personne ; si cette centrale durait 20 ans sans nécessiter de dépense supplémentaire, le prix de gros de l'électricité qu'elle produirait reviendrait à 25 centimes d'euros par kWh, à comparer au tarif actuel de l'électricité en Europe, moitié moins cher. A lire pour en savoir plus : David Carlson, BP solar [2ahecp].

- 50 *Les Britanniques jettent de l'ordre de 300 g de nourriture par jour et par personne.* Source : Ventour (2008).
- 51 *Figure 6.10.* Aux États-Unis, du *Miscanthus* cultivé sans engrais azoté fournit environ 24 tonnes de matière sèche par hectare et par an. En Grande-Bretagne, des rendements annuels de 12 à 16 tonnes à l'hectare ont été annoncés. La valeur calorifique nette du *Miscanthus* sec est de 17 MJ/kg, donc les rendements britanniques correspondent à une densité de puissance de 0,75 W/m². Sources : Heaton et al. (2004) et [6kqq77]. Le rendement estimé n'est atteint qu'après trois ans de culture sans récolte.
- *Les plantes les plus efficaces ont un rendement d'environ 2 % [...] dans les faits, la meilleure performance que l'on puisse obtenir en Europe avec des cultures énergétiques est plus proche de 0,5 W/m². Dans des conditions de faible lumière, les meilleures plantes britanniques atteignent un rendement de 2,4 % si les champs sont bien fertilisés (Monteith, 1977), mais lorsque la lumière est plus forte, leur rendement de conversion s'effondre. Selon Turkenburg (2000) et Schiermeier et al. (2008), le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie de biomasse est inférieur à 1 %.*

Voici quelques sources pour étayer l'estimation que je donne de 0,5 W/m² de la densité de puissance végétale au Royaume-Uni. La Commission Royale sur la pollution environnementale a estimé la densité de puissance que pouvaient potentiellement fournir des cultures énergétiques en Grande-Bretagne à 0,2 W/m² (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). A la page 43 du document de la Royal Society sur les agrocarburants (Royal Society working group on biofuels, 2008), *Miscanthus* apparaît tout en haut de la liste, fournissant environ 0,8 W/m² de puissance chimique.

Dans le Rapport d'évaluation sur l'énergie du PNUD, Rogner (2000) écrit : « en supposant un rendement de conversion en électricité de 45 % et des rendements annuels de 15 tonnes de matière sèche par hectare, il faudrait 2 km² de plantation pour chaque mégawatt d'électricité de capacité installée fonctionnant 4 000 heures par an ». Cela fait une puissance par unité de surface de 0,23 W(e)/m². (1 W(e) signifie 1 watt de puissance électrique).

Energy for Sustainable Development Ltd (2003) estime que des taillis à rotation courte peuvent fournir plus de 10 tonnes de bois sec par hectare et par an, ce qui correspond à une densité de puissance de 0,57 W/m². (Le bois sec a une capacité calorifique de 5 kWh par kg.)

Selon Archer et Barber (2004), le rendement instantané d'une feuille en bonne santé et dans des conditions optimales peut approcher 5 %, mais l'efficacité de stockage de l'énergie à long terme des cultures modernes est plutôt de l'ordre de 0,5 à 1 %. Archer et Barber suggèrent que par modification génétique, il doit être possible d'améliorer le rendement de stockage des plantes,

en particulier des *plantes en C4*, que l'évolution a déjà naturellement dotées d'une photosynthèse plus efficace. Les plantes en C4 sont surtout présentes sous les tropiques et se plaisent dans les climats chauds ; elles ne peuvent pas pousser en-dessous de 10 °C. Parmi les plantes en C4, on trouve la canne à sucre, le maïs, le sorgho, le mil rouge et le panic érigé. Zhu et al. (2008) ont calculé que la limite théorique du rendement de conversion de l'énergie solaire en biomasse était de 4,6 % pour la photosynthèse en C3 avec une température de 30 °C et la concentration actuelle de CO₂ dans l'atmosphère (380 ppm), et de 6 % pour la photosynthèse en C4. Selon eux, les rendements de conversion de l'énergie solaire les plus élevés qui ont été observés pour des cultures de plantes en C3 et en C4 sont respectivement de 2,4 % et 3,7 % ; et, citant Boyer (1982), que les rendements moyens de conversion des principales cultures aux États-Unis sont 3 ou 4 fois plus faibles que ces rendements records (autrement dit, elles ont des rendements de l'ordre de 1 %). Une des raisons pour lesquelles les plantes n'atteignent pas la limite théorique provient de leur incapacité à utiliser l'intégralité du rayonnement provenant d'un plein soleil. Ces deux papiers (Zhu et al., 2008; Boyer, 1982) débattent des perspectives de génie génétique pour rendre ces plantes plus efficaces.

- 52 *Figure 6.12.* Les chiffres dans cette figure proviennent de Rogner (2000) (rendements énergétiques nets du bois, du colza, de la canne à sucre et d'autres plantations tropicales); Bayer Crop Science (2003) (colza vers biodiesel); Francis et al. (2005) et Asselbergs et al. (2006) (jatropha); Mabee et al. (2006) (canne à sucre, Brésil); Schmer et al. (2008) (panic érigé, une culture marginale aux États-Unis); Shapouri et al. (1995) (maïs vers éthanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer et Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
- 51 *Même le fait de brûler du bois bien sec dans une bonne chaudière fait perdre 20 % de chaleur qui part dans la cheminée.* Sources : Royal Society working group on biofuels (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).