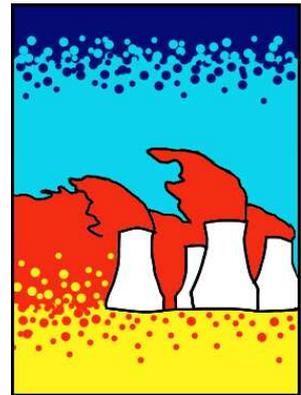


Troisième partie

Chapitres techniques



D Solaire II

En page 50, nous avons listé 4 possibilités de production de biomasse solaire :

1. « Substitution du charbon » ;
2. « Substitution du pétrole » ;
3. Aliments pour l'homme et les autres animaux ;
4. Incinération de sous-produits agricoles.

Nous allons maintenant étudier chacun de ces processus l'un après l'autre et estimer leur contribution maximum. En pratique, beaucoup de ces filières requièrent d'*injecter* tellement d'énergie qu'elles sont rarement contributrices nettes (figure 6.14). Mais dans ce qui suit, je vais volontairement mettre de côté les coûts associés à leur énergie incorporée.

Des cultures énergétiques comme substituts au charbon

Si, en Grande-Bretagne, on cultivait des cultures énergétiques comme le saule, le miscanthus ou le peuplier (qui ont une densité de puissance moyenne de $0,5 \text{ W}$ par mètre carré de terre cultivée), et si on les utilisait pour alimenter une centrale électrique au rendement de 40% , on se retrouverait alors au final avec une puissance par unité de surface de $0,2 \text{ W/m}^2$. Si l'on recouvrait de ces cultures un huitième de Grande-Bretagne (soit 500 m^2 par personne), la puissance obtenue serait de $2,5 \text{ kWh/j}$ par personne.

Substituts au pétrole

Il y a plusieurs façons de transformer des plantes en carburants liquides. J'exprimerai le potentiel de chacune de ces méthodes en termes de puissance par unité de surface (comme dans la figure 6.12).

La principale source de biodiesel en Grande-Bretagne, le colza

Habituellement, on plante le colza en septembre et on le récolte au mois d'août qui suit. Actuellement, $450\,000$ hectares de colza sont cultivés chaque année au Royaume-Uni (soit 2% de la superficie nationale). Les champs de colza produisent $1\,200$ litres de biodiesel par hectare et par an ; le biodiesel a une énergie de $9,8 \text{ kWh}$ par litre. Cela fait donc une puissance par unité de surface de $0,13 \text{ W/m}^2$.

Si l'on utilisait 25% de la superficie du pays pour la culture de colza, on obtiendrait alors du biodiesel avec un contenu énergétique de $3,1 \text{ kWh/j}$ par personne.



FIGURE D.1. Deux arbres.



FIGURE D.2. Champs de colza. Quand on l'utilise pour produire du biodiesel, la puissance par unité de surface du colza est de $0,13 \text{ W/m}^2$. Photo de Tim Dunne.

De la betterave à l'éthanol

Au Royaume-Uni, la culture de la betterave à sucre atteint un rendement remarquable de 53 tonnes par hectare et par an. Et 1 tonne de betterave permet d'obtenir 108 litres de bioéthanol, dont la densité énergétique est de 6 kWh par litre. Cette filière fournit donc une puissance par unité de surface de $0,4 \text{ W/m}^2$, sans compter les intrants énergétiques requis.

Bioéthanol à partir de canne à sucre

Là où la canne à sucre peut être produite (par exemple, au Brésil), la production est de 80 tonnes par hectare et par an, soit un rendement de 17 600 litres d'éthanol. Le bioéthanol a une densité énergétique de 6 kWh par litre. Sa production fournit donc une puissance par unité de surface de $1,2 \text{ W/m}^2$.

Bioéthanol à partir de maïs aux États-Unis

La puissance par unité de surface du bioéthanol produit à partir de maïs est incroyablement faible. Histoire de s'amuser un peu, commençons par exprimer ces chiffres dans des unités archaïques. 1 acre produit 122 boisseaux de maïs par an, ce qui fait $122 \times 2,6$ gallons d'éthanol, ce qui, avec 84 000 BTU d'énergie par gallon, offrent une puissance par unité de surface de $0,2 \text{ W/m}^2$ (7,67 tonnes de maïs par hectare et par an, qui donnent 1 200 litres d'éthanol par hectare et par an ; valeur calorifique de l'éthanol : 23,4 MJ/L).

Cependant, les intrants énergétiques requis pour transformer le maïs en éthanol ont une densité énergétique de 83 000 BTU par gallon. Ce qui signifie que 99 % de l'énergie produite est consommée par le processus de transformation, et que la puissance *nette* par unité de surface est d'environ $0,002 \text{ W/m}^2$. La seule manière d'obtenir une puissance nette significative du processus de transformation du maïs en éthanol est de s'assurer que tous les sous-produits sont exploités. Si l'on prend en compte l'énergie dans les sous-produits, la puissance nette par unité de surface est d'environ $0,05 \text{ W/m}^2$.

Éthanol cellulosique à partir de panic érigé

L'éthanol cellulosique — le biocarburant merveilleux de « prochaine génération » ? Schmer et al. (2008) ont trouvé que le rendement énergétique net du panic érigé cultivé pendant cinq ans sur les terres marginales de 10 fermes du Midwest américain était de 60 GJ par hectare et par an, ce qui fait une densité de puissance de $0,2 \text{ W/m}^2$. « Cette étude repose sur les connaissances génétiques et les techniques agronomiques disponibles pour la production de panic érigé en 2000 et 2001, au moment où les champs ont

	densité énergétique (kWh/kg)
bois de résineux	
– séché à l'air libre	4,4
– séché au four	5,5
bois de feuillus	
– séché à l'air libre	3,75
– séché au four	5,0
papier de bureau	4,0
papier glacé	4,1
papier journal	4,9
carton	4,5
charbon	8
paille	4,2
fientes de volailles	2,4
déchets industriels banals	4,4
déchets hospitaliers	3,9
déchets municipaux	2,6
déchets ménagers dérivés	5,1
pneumatiques	8,9

TABLEAU D.3. Pouvoirs calorifiques de bois et d'autres matières comparables. Sources : Yaros (1997); Ucuncu (1993); Digest of UK Energy Statistics 2005.



été semés. A l'avenir, il est possible que des progrès génétiques et agronomiques puissent améliorer le bilan énergétique du biocarburant produit à partir de panic érigé. »

Le jatropha présente lui aussi une faible densité de puissance

Le jatropha est un oléagineux qui croît plus facilement dans les zones tropicales sèches (300 à 1 000 mm de pluie par an). Il aime les températures comprises entre 20 et 28 °C. Le rendement attendu dans les pays chauds, sur de bonnes terres, est de 1 600 litres de biodiesel par hectare et par an. Ce qui fait une puissance par unité de surface de 0,18 W/m². Sur des terres incultes, son rendement tombe à 583 litres par hectare et par an. Soit une densité de puissance de 0,065 W/m².

Si l'on décidait d'utiliser 10 % du continent africain pour produire 0,065 W/m², et que l'on partageait cette énergie entre six milliards d'habitants, qu'est-ce que l'on obtiendrait ? 0,8 kWh/j par personne. A titre de comparaison, la consommation mondiale de pétrole est de 80 millions de barils par jour, qui, partagés entre 6 milliards de personnes, représentent 23 kWh/j par personne. Donc, même si toute l'Afrique était recouverte de champs de jatropha, la puissance produite représenterait à peine un tiers de la consommation mondiale de pétrole.

Qu'en est-il des algues ?

Les algues ne sont que des plantes, donc tout ce que j'ai dit jusqu'à présent s'applique aussi aux algues. Les micro-algues aquatiques ne sont pas plus efficaces pour la photosynthèse que leurs cousines terrestres. Mais il y a un point que je n'ai pas abordé, et qui est monnaie courante dans la communauté des biocarburants produits à partir d'algues : on fait pousser ces algues dans des eaux fortement enrichies en CO₂, qui peut provenir, dans certains cas, des gaz d'échappement des centrales électriques ou d'autres installations industrielles. Pour les plantes, il est nettement plus facile de faire de la photosynthèse lorsque quelqu'un a déjà concentré le dioxyde de carbone à leur place. Ainsi, dans un site ensoleillé des États-Unis, dans des bassins enrichis en CO₂ (avec une concentration de 10 %), Ron Putt de l'Université d'Auburn a annoncé que les algues pouvaient croître à un rythme de 30 g par mètre carré et par jour, produisant 0,01 litre de biodiesel par mètre carré et par jour. Cela correspond à une puissance par unité de surface du bassin de 4 W/m² — similaire aux rendements des fermes photovoltaïques bavaroises. Si vous vouliez conduire une voiture moyenne (qui consomme 8 litres aux 100 km) sur une distance de 50 km par jour, il ne vous faudrait alors pas moins de 420 mètres carrés de bassins à algues pour alimenter votre voiture ; à titre de comparaison, la superficie du Royaume-Uni est de 4 000 m² par personne, dont 69 m² est de l'eau (figure 6.8). Et n'oubliez pas qu'il est indispensable d'alimenter ces bassins

avec du dioxyde de carbone concentré. Une telle filière serait donc limitée à la fois par la superficie de terres — quelle superficie du Royaume-Uni pourrait-on convertir à la production d'algues en bassins ? — et par la disponibilité en CO_2 concentré, dont la capture a un coût énergétique (un sujet dont nous avons parlé dans les chapitres 23 et 31). Vérifions les limites imposées par le CO_2 concentré. Pour cultiver 30 g d'algues par m^2 et par jour, il faut au moins 60 g de CO_2 par m^2 et par jour (puisque, par atome de carbone qui s'y trouve, la masse de la molécule de CO_2 est plus grande que celle des molécules dans les algues). Si on capturait la totalité du CO_2 issu de l'ensemble des centrales électriques du Royaume-Uni (approximativement 2,5 tonnes par an et par personne), cela pourrait alimenter **230 mètres carrés** par personne de bassins d'algues similaires à ceux décrits ci-dessus — soit environ 6 % du pays. Cette superficie permettrait de produire du biodiesel avec une puissance de 24 kWh par jour et par personne, en supposant que les chiffres valables pour les zones ensoleillées des États-Unis s'y appliquent. Est-ce une vision plausible ? Peut-être sur un dixième de cette échelle ? Je vous laisse le soin d'en décider.

Quid de la culture d'algues en mer ?

Souvenez-vous de ce que je viens de dire : le biodiesel à base d'algues nécessite d'être alimenté en CO_2 concentré. Si l'on cultive à la surface de la mer, il est peu vraisemblable qu'on puisse pomper le CO_2 de la mer. Et sans CO_2 concentré, le rendement des algues est 100 fois moindre. Pour que la culture d'algues en mer fasse la différence, il faudrait les cultiver sur une superficie comparable à celle d'un pays entier.

Et les algues capables de produire de l'hydrogène ?

Essayer d'avoir une bactérie capable de produire de l'hydrogène à partir de la lumière du soleil est une bonne idée, parce que cela permet d'éviter toute une série d'étapes chimiques habituellement réalisées par les plantes qui produisent des glucides. Alors que chaque étape chimique réduit un peu le rendement, ici, l'hydrogène peut être produit directement par le système photosynthétique, dès la première étape. Une étude de recherche du *National Renewable Energy Laboratory* au Colorado a estimé qu'un réacteur rempli d'algues vertes génétiquement modifiées, couvrant une superficie de 11 hectares dans le désert de l'Arizona, pourrait produire 300 kg d'hydrogène par jour. L'hydrogène contient 39 kWh par kg, donc cette installation de production d'hydrogène par des algues fournirait une puissance par unité de surface de 4,4 W/m^2 . En tenant compte de la quantité d'électricité nécessaire au fonctionnement de l'unité de production, la densité de puissance nette fournie serait ramenée à 3,6 W/m^2 . Voilà qui ressemble fort à un chiffre plutôt prometteur — comparez-le donc à celui de la ferme photovoltaïque bavaroise, par exemple (5 W/m^2).

Nourriture pour l'homme ou d'autres animaux

Les graines de céréales telles que le blé, l'avoine, l'orge et le maïs ont une densité énergétique d'environ 4 kWh par kg. Au Royaume-Uni, des rendements de 7,7 tonnes de blé par hectare et par an sont classiques. Si le blé est mangé par un animal, la puissance par unité de surface de ce processus est de $0,34 \text{ W/m}^2$. Et si $2\,800 \text{ m}^2$ par personne au Royaume-Uni (soit la totalité des terres agricoles britanniques) étaient dédiés à ce type de cultures, la puissance produite sous forme chimique serait d'environ **24 kWh/j par personne**.

L'incinération de sous-produits agricoles

Nous avons trouvé précédemment que la puissance par unité de surface d'une centrale électrique alimentée à partir des meilleures cultures énergétiques était de $0,2 \text{ W/m}^2$. Si, au lieu de cela, on cultivait des céréales à des fins alimentaires, et que l'on utilisait seulement les sous-produits agricoles pour alimenter une centrale électrique — ou bien si l'on utilisait ces cultures pour nourrir des poulets et que l'on récupérerait leurs fientes pour alimenter une centrale électrique — quelle serait la puissance par unité de surface exploitée? Faisons d'abord une estimation à la louche, puis nous regarderons des données réelles d'un peu plus près. Pour l'estimation grossière, imaginons que les sous-produits soient récoltés sur la moitié de la surface agricole du pays ($2\,000 \text{ m}^2$ par personne) puis transportés vers les centrales, et que ces sous-produits génèrent, en moyenne, de l'ordre de 10 % de la puissance par unité de surface obtenue à partir des meilleures cultures énergétiques : $0,02 \text{ W/m}^2$. En multipliant ce chiffre par $2\,000 \text{ m}^2$, on obtient **1 kWh par jour et par personne**.

Mon estimation à la louche est-elle injuste envers les déchets agricoles? Nous pouvons faire un nouveau calcul de la production potentielle des sous-produits agricoles en extrapolant la production d'énergie par combustion de paille du prototype de centrale électrique d'Elean dans l'Est-Anglie (au sud-est de l'Angleterre). L'unité d'Elean a une puissance-crête de 36 MW, et elle brûle 200 000 tonnes de paille par an, ramassées dans un rayon de 80 kilomètres autour de l'unité de production. Si l'on suppose qu'une telle densité est généralisable à l'ensemble du pays, le modèle d'Elean permettrait la production d'énergie de $0,002 \text{ W/m}^2$. En comptant $4\,000 \text{ m}^2$ par personne, cela fait 8 W par personne, soit **0,2 kWh/j par personne**.

Calculons tout cela encore d'une autre façon. La production nationale de paille au Royaume-Uni est de 10 millions de tonnes par an, soit $0,46 \text{ kg}$ par jour et par personne. Avec ses $4,2 \text{ kWh}$ par kg, cette paille stocke une quantité d'énergie chimique équivalente à 2 kWh par jour et par personne. Si toute cette paille était brûlée dans des centrales au rendement de 30 % — une hypothèse qui ne plairait guère aux éleveurs, qui utilisent déjà la paille

à d'autres fins — l'électricité produite serait de **0,6 kWh/j par personne**.

Le gaz (méthane) issu de décharges

Actuellement, l'essentiel du méthane qui s'échappe des monticules de débris provient des matières biologiques, majoritairement des déchets alimentaires. Par conséquent, tant que nous jetterons des produits comme des aliments et des journaux, le gaz issu de décharges restera une source d'énergie renouvelable — sans compter que la combustion de ce méthane est plutôt une bonne idée du point de vue du changement climatique, puisque le méthane est un gaz à effet de serre plus important que le CO₂. Une décharge recevant 7,5 millions de tonnes de déchets ménagers par an peut produire 50 000 m³ par heure de méthane.

En 1994, les émissions de méthane des décharges étaient estimées à 0,05 m³ par personne et par jour, ce qui contient une énergie chimique de 0,5 kWh/j par personne, et qui permettrait de générer **0,2 kWh(e)/j par personne** si tout ce méthane était brûlé dans des centrales électriques avec un rendement de 40 %. A noter que depuis, des modifications de la législation ont provoqué une baisse des émissions annuelles de gaz issu des décharges, qui sont désormais environ moitié moindres.

Incinerer des déchets ménagers

SELCHP, le site de cogénération du sud-est de Londres (« *South East London Combined Heat and Power* », [www.selchp.com]) est une centrale de 35 MW que l'on paie pour brûler 420 000 tonnes par an de déchets ménagers issus des environs de Londres.

Les déchets sont incinérés tous ensemble, sans tri préalable. Après incinération, les métaux ferreux sont extraits pour être recyclés, les déchets dangereux sont filtrés et orientés vers un site de traitement spécifique, tandis que les cendres restantes sont valorisées dans des matériaux recyclés pour la construction de routes et de bâtiments. Le pouvoir calorifique des déchets est de 2,5 kWh/kg, et le rendement thermique de l'unité de cogénération est de 21 %, ce qui signifie que chaque kg de déchets brûlés permet de produire 0,5 kWh d'électricité. Les émissions de carbone sont d'environ 1 000 g de CO₂ par kWh. Sur les 35 MW produits, 4 MW environ sont autoconsommés par l'unité pour les processus de filtration et de production d'électricité.

Si l'on extrapolait ce projet en imaginant que toutes les villes sont équipées d'une unité comparable, et si l'on supposait que chacun rejette 1 kg de déchets par jour, on pourrait alors obtenir **0,5 kWh(e) par jour et par personne** de l'incinération des déchets.

Ce chiffre est proche de celui estimé précédemment pour la valorisation des gaz issus de décharges. Et rappelez-vous : on ne peut pas avoir les deux. Plus d'incinération de déchets, cela signifie moins de gaz issus de



FIGURE D.4. SELCHP — vos déchets, c'est leur affaire.

décharges. Voir la figure 27.2 (page 243) et la figure 27.3 (page 244) pour plus de détails sur l'incinération des déchets.

Notes et bibliographie

Page n°

333 *L'énergie par unité de surface pour la production d'électricité à partir de saule, de miscanthus, ou de peuplier est de 0,2 W/m².* Source : Select Committee on Science and Technology Minutes of Evidence – Memorandum from the Biotechnology & Biological Sciences Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/1d200304/1dselect/1dscitech/126/4032413.htm]. « En moyenne, il est possible de produire une culture durable de 10 tonnes sèches par hectare et par an de biomasse ligneuse dans le nord de l'Europe [...] Par conséquent, une surface de 1 km² produira 1 000 tonnes sèches par an — assez pour une capacité électrique de 150 kW(e) à faible taux de conversion ou de 300 kW(e) avec de hauts rendements. » Cela signifie une densité de puissance électrique comprise entre 0,15 et 0,3 W(e)/m².
Voir aussi Layzell et al. (2006), [3ap71c].

– *Colza.* Sources : Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk. En France, en 2008, plus de 1,42 millions d'hectares étaient cultivés en colza (soit 2,6 % de la surface métropolitaine), produisant 1,49 millions de tonnes d'huile de colza (source FAO), soit une moyenne de 1 150 litres par hectare, et une densité de puissance de 0,13 W/m². En supposant que l'on puisse conserver un tel rendement, dédier 20 % de la superficie française à la culture de colza permettrait d'obtenir du biodiesel avec un contenu énergétique de 5,3 kWh/j par personne.

334 *Betterave à sucre.* Source : statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp

– *Bioéthanol à partir de maïs.* Source : Shapouri et al. (1995).

335 *Bioéthanol cellulosique.* Voir aussi Mabee et al. (2006).

– *Jatropha.* Sources : Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006).

– *Aux États-Unis, les bassins enrichis en CO₂ concentré peuvent produire 30 g par m² et par jour d'algues, et 0,01 litre par m² et par jour de biodiesel.* Source : Putt (2007). Ce calcul ignorait les consommations d'énergie liées au fonctionnement des bassins et aux étapes de transformation des algues en biodiesel. Putt décrit le bilan énergétique d'un projet de ferme algale de 40 hectares, alimenté par du méthane issu d'un digesteur de lisier. La ferme en question produirait en réalité moins d'énergie que de méthane consommé. Ce projet d'exploitation de 40 hectares devait utiliser 2 600 kW de méthane, ce qui correspond à une densité énergétique de 6,4 W/m². Pour résumer, la densité de puissance de la production de cette ferme, sous forme de biodiesel, serait seulement de 4,2 W/m². Il faut ainsi rester vigilant et considérer toutes les propositions de production de biocarburants avec un œil critique !



- 336 *Une étude du Laboratoire National des Energies Renouvelables estime que des algues vertes génétiquement modifiées exploitées sur une surface de 11 hectares pourraient produire 300 kg d'hydrogène par jour.* Source : Amos (2004).
- 337 *La centrale électrique d'Elean.* Source : Government White Paper (2003). Elean Power Station (36 MW) — la première centrale électrique britannique brûlant de la paille. *Production de paille* : www.biomassenergycentre.org.uk.
- 338 *Gaz issu de décharges.* Sources : Matthew Chester, City University, London, communication personnelle ; Meadows (1996) ; Aitchison (1996) ; Alan Rosevear, représentant britannique du *Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee*, mai 2005, [4hamks].