

TRAITÉ DE GESTION DE L'ENVIRONNEMENT TROPICAL

Pr Michel Maldague

TOME I

DÉVELOPPEMENT INTÉGRÉ DES RÉGIONS TROPICALES

Approche systémique - Notions - Concepts - Méthodes

Fascicule I - 17

Diversité des énergies renouvelables et développement durable

Place du fascicule

Alors que le fascicule I - 16 portait, dans une large mesure, sur la problématique énergétique, la situation de l'énergie dans le monde et les perspectives énergétiques, le fascicule I - 17 met l'accent sur les énergies renouvelables, appelées à un grand essor dans les années à venir. Ces formes d'énergie, par leur diversité et leurs spécificités offrent aux pays en développement une vaste gamme de possibilités pour accroître leur utilisation d'énergie non traditionnelle, qu'il s'agisse de l'énergie éolienne, photovoltaïque, hydraulique, etc. Nous passons également en revue tout le domaine des biocarburants,

La place que nous réservons à l'énergie est non seulement justifiée par son importance et la nécessité de combler le retard dans l'utilisation des énergies non traditionnelles, en Afrique, mais aussi parce l'utilisation appropriée de ces différentes formes énergétiques devrait permettre non seulement de mieux satisfaire les besoins essentiels des populations (fascicule I - 1), mais encore de freiner la destruction des forêts et ses graves conséquences. Une utilisation judicieuse de l'énergie est importante, en effet, pour le maintien de la qualité de l'environnement biophysique, condition *sine qua non* du développement (cf. Fig. I - 1). Les énergies renouvelables ont l'avantage de se prêter particulièrement bien aux utilisations décentralisées et à une gestion communautaire.

Les végétations en friche pourraient alimenter des installations de production de biocarburants. Des boisements énergétiques pourraient réduire la pression sur les forêts. Il est indispensable que le volet énergétique soit intégré à tout plan de développement rural, car les campagnes sont ici très défavorisées par rapport aux villes.

Enfin, le rôle social de l'énergie décentralisée est important, car elle peut grandement contribuer à améliorer les conditions de vie, ce qui est un objectif de la lutte contre la pauvreté dont il sera question dans le dernier fascicule (I - 18) du tome I de ce *Traité*.

Table des matières

Introduction, 17 - 3

I. ÉNERGIES RENOUVELABLES, 17 - 3

- I.1 Types d'énergies renouvelables, 17 - 3
- I.2 Diversité de produits et vecteurs énergétiques, 17 - 4
- I.3 Systèmes de conversion, 17 - 4
- I.4 Problèmes de stockage, 17 - 4
- I.5 Impacts limités, 17 - 4
- I.6 Utilisation intégrée et décentralisée, 17 - 5

II. TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, 17 - 5

- II.1 Différents types de techniques, 17 - 5
- II.2 Conditions d'exploitation des énergies renouvelables, 17 - 6
- II.3 Conditions de développement d'une filière énergétique, 17 - 6

III. BIOMASSE ET BIOÉNERGIE, 17 - 6

- III.1 Définitions, 17 - 6
- III.2 Importance et avantages des bioénergies, 17 - 7
- III.3 Combustibles provenant de la biomasse, 17 - 7
- III.4 Biomasse, bioénergie et développement durable, 17 - 8

IV. EXAMEN DE DIFFÉRENTES FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES, 17 - 9

- IV.1 Valorisation énergétique du bois, 17 - 9
- IV.2 Valorisation des résidus, 17 - 9
- IV.3 Dendro-énergie, 17 - 10
 - IV.3.1 Valeur calorifique, 17 - 10
 - IV.3.2 Dendro-énergie et crise énergétique, 17 - 10

V. SOLUTIONS DE REMPLACEMENT : CARBURANTS OU BIOCARBURANTS, 17 - 11

- V.1 Intérêt des biocarburants, 17 - 11
- V.2 Bioélectricité : génératrice à biomasse de petite puissance, 17 - 12
- V.3 Production de biocarburants, 17 - 13
- V.4 Quelques biocarburants, 17 - 14

VI. AUTRES SOLUTIONS NON BIOLOGIQUES, 17 - 15

- VI.1 Architecture à base de terre, 17 - 15
- VI.2 Équipement solaire, 17 - 16
 - VI.2.1 Éclairage en région rurale, 17 - 16
 - VI.2.2 Lanternes solaires, 17 - 17

VII. CONCLUSIONS, 17 - 18

ANNEXE : Unités et transformations, 17 - 19 •

Fascicule 17

DIVERSITÉ DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

Introduction

1. Comme nous l'avons mentionné au fascicule précédent, un recours plus important aux énergies renouvelables est une des conditions nécessaires pour accéder à un développement durable ; elles offrent, en effet, des avantages pour résoudre les problèmes d'énergie, d'environnement et de développement économique et social.
2. Dans le cadre d'une politique énergétique intégrée, des efforts cohérents doivent être déployés pour doter les campagnes rurales d'Afrique d'un réseau décentralisé de petites centrales électriques photovoltaïques, de microbarrages au fil de l'eau ou d'éoliennes, le choix dépendant des conditions locales.
3. Le recours aux énergies nouvelles, diversifiées, permet d'y avoir recours de manière continue ou complémentaire, permettant ainsi de répondre à tous les besoins et d'exploiter les sources énergétiques locales.
4. La disponibilité accrue de l'énergie contribuera, d'une part, à la satisfaction des besoins de la population, et, d'autre part, à l'augmentation de la production et de la productivité et à la valorisation de la production.

I. ÉNERGIES RENOUVELABLES

I.1 Types d'énergies renouvelables

5. Avec l'énergie renouvelable, on quitte le domaine du « *stock* » (stock de combustibles fossiles, comme le charbon, le pétrole, le gaz, non renouvelables et épuisables), pour entrer dans le domaine du « *flux* ». Les énergies renouvelables sont basées sur l'exploitation de flux naturels d'énergie. On peut citer :
 - le rayonnement solaire (énergie solaire) ; thermique solaire avec les capteurs plans ; microcentrales avec l'électricité photovoltaïque ;
 - le cycle de l'eau (énergie hydraulique) ; microcentrales hydroélectriques ; « hydrauliennes » ;
 - le cycle des vents (énergie éolienne) ; aérogénérateurs ;
 - le cycle du carbone dans la biosphère (énergie de la biomasse) ; biogaz, source d'énergies thermique et électrique ;
 - le flux de la chaleur interne de la Terre (énergie tellurique ou géothermique) ;
 - l'effet des attractions lunaire et solaire sur les océans (énergie marémotrice).
6. Exploitant des flux naturels, ce sont donc des énergies inépuisables — et souvent gratuites —, à l'inverse des énergies fossiles ou minières (charbon, pétrole, gaz naturel, uranium).

1.2 Diversité de produits et de vecteurs énergétiques

7. Les énergies renouvelables permettent de produire une grande diversité de produits et de vecteurs énergétiques : énergie thermique ; combustibles solides, liquides et gazeux ; électricité. Elles peuvent ainsi pénétrer le marché des produits et des services énergétiques de tous les secteurs économiques : agriculture, industrie, habitat et tertiaire, transport.

Électricité

8. L'électricité mérite sans doute une attention spéciale du fait qu'elle peut servir à l'éclairage, à la force motrice, à la réfrigération ainsi qu'au traitement et à la transmission de l'information pour l'éducation, la formation, la culture, les loisirs et les activités professionnelles.

1.3 Systèmes de conversion

9. Les systèmes de conversion disponibles fournissent :

- de la chaleur (cas des capteurs plans), à basse température (40 à 80 °C), pour le séchage des récoltes, la cuisson, le dessalement des eaux saumâtres, la production de froid ou d'eau chaude ;
- de l'énergie mécanique, utilisable pour le pompage de l'eau, la mouture de grains, le transport de produits ;
- de l'énergie électrique pour l'éclairage, le pompage, la réfrigération ; le fonctionnement de matériel électrique, les communications (radio, télévision, téléphone, ordinateurs, etc.).

10. Les digesteurs méthaniques permettent de transformer la biomasse — p.ex., les résidus de l'élevage et de l'agriculture — en biogaz, combustible, et en fertilisant (boues résiduaires : résidu digéré dépollué).

1.4 Problèmes de stockage

11. Il faut distinguer, ici, les énergies-flux et les énergies-matière. Les énergies-flux (comme la chaleur ou l'électricité) sont difficiles à stocker, par opposition aux énergies-matières (gaz, pétrole, charbon).

12. La biomasse est un exemple de stockage naturel de l'énergie solaire. On peut aussi la transformer en biocarburants (biogaz, éthanol, diester, etc.) ou en hydrogène (par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité photovoltaïque).

13. L'électricité photovoltaïque est traditionnellement stockée dans des accumulateurs (batteries).

1.5 Impacts limités

14. Les énergies renouvelables n'émettent pas de gaz à effet de serre, même dans le cas de l'exploitation de la biomasse. Si cette exploitation se poursuit de façon rationnelle, le rapport émission/fixation de carbone peut être quasiment équilibré. Leur impact sur l'environnement local est réduit, jamais irréversible et toujours limité à la période d'exploitation.

1.6 Utilisation intégrée et décentralisée

15. La diversité des énergies renouvelables est associée à la complémentarité des gisements — soleil, vent, eau, biomasse. La bonne répartition géographique de ces énergies permet leur *utilisation décentralisée*, à la fois spatialement et à l'échelle des décideurs : familles, villages, cités, régions et pays.

16. Cette utilisation décentralisée des énergies renouvelables permet aussi et surtout d'apporter un minimum de services énergétiques « modernes » aux endroits où les réseaux conventionnels de distribution d'énergie ne pénètrent pas souvent, comme les régions enclavées, isolées, difficiles d'accès, etc. On mesure ainsi tout l'intérêt de ce type d'énergie pour le monde rural des pays en développement.

II. TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

II.1 Différents types de techniques

17. Les techniques sont nombreuses et comprennent :

1° Les techniques traditionnelles (le bois de feu, le charbon de bois) ; il faut se rappeler cependant qu'au deuxième Congrès mondial de la nature, organisé par l'UICN (Amman, 2000), cette forme d'utilisation de la biomasse a été condamnée par suite de ses impacts négatifs sur l'environnement. On sait, en effet, que la dendro-énergie est une des causes majeures — en fait, la deuxième, en Afrique — de la destruction des forêts tropicales.

2° Les turbines hydro-électriques (« hydrauliques ») ; depuis les barrages jusqu'aux petites centrales au fil de l'eau.

3° Les éoliennes ou aérogénérateurs ; techniques de plus en plus exploitées, dans les pays industriels comme le Danemark, l'Allemagne, les Pays-Bas.

Travail développé par les aérogénérateurs.

On peut calculer approximativement les pressions et le travail du vent dans les ailes des aérogénérateurs (1). La pression exercée par le vent sur une surface normale à sa direction est donnée par :

$P = 0,14 S V^2$; où P : pression en kg par m² ; V : vitesse du vent en m/sec ; S : surface en m² sur laquelle le vent agit.

Si la surface est inclinée d'un angle a sur la direction du vent : $P = 0,14 S V^2 \sin^2 a$

Le travail en CV (chevaux vapeur) résultant de cette pression est exprimé par la formule :

$$T = 0,004 S V^3$$

Ces formules montrent l'énorme influence exercée par le diamètre des ailes, car les surfaces sont entre elles comme les carrés de ces diamètres ($S = \frac{1}{4} r^2$; $d = 2 r$). Supposons deux éoliennes, l'une de 2 m de diamètre ($r = 1$ m), l'autre de 4 m ($r = 2$ m). Dans le premier cas : $S = \frac{1}{4} 1^2 = 3,14 \times 1$; dans le second : $S = \frac{1}{4} 2^2 = 3,14 \times 4$, soit une pression quadruple.

Par ailleurs, la puissance développée par une même éolienne croît comme les cubes des vitesses du

(1) E. Leplae, *Élévation ou pompage des eaux d'irrigation*, BACB, p. 107.

vent (V^3). Exemple : un vent V_1 de 8 m/sec et un vent V_2 de 4 m/sec sont dans le rapport de :
 $V_1^3 = 8^3 = 64$; et $V_2^3 = 4^3 = 64$.

4° Les capteurs solaires (solaire thermique) ; utilisés pour le séchage des produits agricoles et pour la production d'eau chaude ; p.ex., à Antalya (Turquie), des chauffe-eau solaires se trouvent sur les toits de pratiquement toutes les habitations.

5° Les biocombustibles et biocarburants.

6° Les cellules photoélectriques et les modules photovoltaïques, particulièrement appropriés dans le cas d'habitats dispersés.

II.2 Conditions d'exploitation des énergies renouvelables

18. Pour être exploitées, ces énergies nécessitent des ressources en capital, en matières premières et en espace.

19. L'utilisation de ces énergies a avantage à se faire en cherchant la meilleure efficacité énergétique ; p.ex., en utilisant des lampes (tubes) à fluorescence qui consomment cinq fois moins d'énergie que les lampes à incandescence.

On peut également, en cas de sources d'éclairage d'appoint, utiliser des systèmes d'éclairage de basse intensité (p.ex., des lampes de 15 W au lieu de 25 ou 40 W).

II.3 Conditions de développement d'une filière énergétique

20. Pour qu'une filière énergétique puisse se développer à grande échelle, des conditions techniques, réglementaires, législatives et tarifaires sont indispensables. Ces conditions doivent permettre l'accès aux réseaux, formés de filières d'énergies renouvelables, décentralisées de petite et moyenne puissance.

21. Le développement de ces filières implique l'information, la motivation et la formation des usagers potentiels.

III. BIOMASSE ET BIOÉNERGIE

III.1 Définitions

22. Les bioénergies constituent une ressource énergétique importante, et même vitale, pour plus de la moitié des habitants de la planète.

23. Le terme *biomasse* désigne toutes les matières organiques végétales, issues de la photosynthèse, c'est-à-dire de la transformation de la lumière en énergie utilisable (néguentropie, avec $\gamma G > 0$).

- La biomasse, constituée de matière ligneuse, comme le bois, peut être directement brûlée.
- Certains résidus organiques, comme la bagasse de la canne à sucre et les excréments du bétail, peuvent être séchés et durcis au soleil avant d'être utilisés comme carburant, et même liquéfiés ou gazéifiés pour en

tirer plus d'énergie.

On observera cependant que ces excréments ont une fonction de fertilisation des sols et que leur utilisation comme combustible peut affecter la fertilité des sols.

- Le méthane, dégagé lors de la décomposition de la biomasse, peut servir au chauffage d'édifices publics et résidentiels.

24. On qualifie généralement tous les types d'énergie, dérivés de la biomasse, de *bioénergie*. On appelle aussi « *dendro-énergie* », la bioénergie, tirée du bois ; et celle, tirée de la forêt, « *sylvo-énergie* ».

25. Les bioénergies constituent une ressource énergétique importante, et même vitale, pour plus de la moitié des habitants de la planète.

III.2 Importance et avantages des bioénergies

26. Bien que difficile à comptabiliser avec précision, on peut estimer que, dans les années 1980, la bioénergie s'élevait à 14 % de la consommation d'énergie de la planète et à 38 % des consommations d'énergie des pays en développement (2). Si cette consommation de biomasse n'était pas maintenue, mais remplacée par le recours à des combustibles fossiles, le niveau des émissions de gaz carbonique, provenant de la consommation d'énergie, augmenterait d'autant et, conséquemment, l'effet de serre.

27. Cependant, cette importante utilisation des bioénergies, issues directement de la forêt (dendro-énergie), dans les pays pauvres, ne peut pas être assimilée à l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable, car elle se fait, le plus souvent, en Afrique, par la destruction de la forêt, à laquelle succèdent souvent érosion et destruction des sols, autant de dégradations irréversibles. En d'autres termes, il ne s'agit pas nécessairement, dans ce cas, d'une utilisation rationnelle et durable.

III.3 Combustibles provenant de la biomasse

28. La biomasse produit des combustibles, faciles d'utilisation :

- le bois des plantes ligneuses (*i.e.*, le bois de chauffage ou dendro-énergie) ;
- les excréments (crottin) du bétail (bouses) ;
- les déchets (rejets) organiques, domestiques et industriels ;
- la végétation marine ;
- des huiles et les résines arboricoles.

29. Produits tirés de la biomasse :

- le charbon de bois est un produit solide, fabriqué à partir de la biomasse ;
- le méthane (biogaz), le gaz naturel synthétique et le gaz des forêts sont des produits gazeux, tirés de la biomasse ;
- l'éthanol, le méthanol sont obtenus par liquéfaction de la biomasse.

(2) Woods, J. et D.O. Hall, Bioenergy for Development : Technical and Environmental Dimensions. FAO, Environment and Energy Paper 13, Rome, 1994.

III.4 Biomasse, bioénergie et développement durable

30. La biomasse participe de trois manières (3) à l'abaissement des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère :

- 1° la substitution des énergies fossiles par la biomasse — utilisée rationnellement — ne contribue pas au renforcement de l'effet de serre ;
- 2° il y a réduction des gaz à effet de serre ;
- 3° le rôle potentiel des progrès technologiques peut contribuer à l'efficacité énergétique et, par là, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Émissions de gaz à effet de serre

31. En 1980, la contribution des émissions de gaz à effet de serre était de 46 % pour l'énergie ; 18 % pour les forêts (résultant principalement de la déforestation) ; 9 % pour l'agriculture ; 24 % pour les halo-carbures (4).

• En 2025, la contribution de ces derniers devrait descendre à 3 %, et celle des forêts à 15 %, tandis que celle de l'énergie pourrait monter à 65 %, et celle de l'agriculture, à 14 % (5).

• En 1990, les émissions de gaz à effet de serre s'élevaient à près de 7 Gt de carbone (GtC) par an, dont $5,5 \pm 0,5$ GtC provenaient des énergies fossiles, et $1,6 \pm 1,0$ GtC, des changements d'affectation des terres (6).

32. C'est l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère qui serait la cause principale de l'accroissement du forçage radiatif (7) ($1,56 \text{ W/m}^2$). Les émissions cumulées, entre 1860 et 1990, sont estimées à 215 GtC pour les énergies fossiles. Cela représente, à titre de comparaison, environ 38 % du carbone de la biomasse terrestre actuelle, estimée à 560 GtC, ou 10 % du carbone de la biomasse et des sols, estimés à plus de 2.000 GtC (8) (ou 2 TtC).

Pendant la même période, l'accroissement du méthane aurait eu un forçage radiatif d'environ $0,5 \text{ W/m}^2$; celui des oxydes nitreux, de $0,1 \text{ W/m}^2$; et celui des halo-carbures, de $0,3 \text{ W/m}^2$.

33. Les émissions de gaz carbonique, causées par les changements d'affectation des terres — c'est-à-dire par la déforestation —, sans être négligeables, sont nettement plus faibles que celles résultant de la combustion d'énergie fossile.

Gestion des écosystèmes et incidences sur l'effet de serre

34. Suivant la manière dont les écosystèmes sont gérés, ils constituent des *puits* ou des *sources* de gaz carbonique et des sources d'autres gaz à effet de serre : peroxyde d'azote et autres oxydes d'azote (NO_x) ; méthane et monoxyde de carbone, émis notamment lors des combustions *in situ* des feux de savanes ou de forêts.

35. Le danger des gaz à effet de serre peut s'exprimer par leur *potentiel de réchauffement global* (PGR) à l'horizon de 100 ans (9) (PRG 100 ans), par rapport au CO_2 :

(3) Arthur Riedacker. Les biomasses et les bioénergies dans les changements climatiques et le développement durable. *Liaison Énergie-Francophonie*, n° 37, 4e trimestre 1997, pp. 4-13.

(4) Halo-carbure : CFC (chloro-fluoro-carbone) et autres produits de ce type.

(5) GIEC. Premier rapport du GIEC, Sundsvall., 1990. - GIEC, Groupe intergouvernemental sur l'évolution des climats.

(6) IPCC, PNUE, OMM. Résumés destinés aux décideurs. Rapport spécial du GIEC, 1994, 48 p.

(7) Le forçage radiatif désigne le réchauffement constaté depuis l'époque préindustrielle.

(8) A. Riedacker, *op. cit.*, p. 6.

- peroxyde d'azote : PRG 100 ans = 320 ;
- méthane : PRG 100 ans = 24,5.

Feux de forêts et de savanes

36. Le bois de feu ne représente que 16 % des biomasses brûlées, alors que les feux *in situ*, sans valorisation, et polluants, représentent 84 % de celles-ci, soit près de 5 Gt de biomasses sèches. Il y a là un immense gisement. Les feux de savanes représentent plus de 40 % des biomasses brûlées annuellement dans le monde, dont 66 % en Afrique.

IV. EXAMEN DE DIFFÉRENTES FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES

IV.1 Valorisation énergétique du bois

« biomasse ligno-cellulosique »

37. La valorisation énergétique du bois implique, en amont, la transformation du bois en charbon de bois, selon des techniques performantes : recherche de la moindre perte possible au moment de la carbonisation ; utilisation d'essences à croissance rapide, propices à la sylviculture ; recours aux résidus de coupe ; etc.

En aval, il convient de veiller à l'emploi de technologies énergétiques performantes, comme des appareils de combustion, économes en carburant, c'est-à-dire des foyers améliorés.

38. Cette valorisation de la biomasse répond à des objectifs à la fois économiques, environnementaux et énergétiques :

- protection du couvert végétal, en particulier forestier ;
- protection de l'environnement, grâce à la diminution des gaz à effet de serre ;
- amélioration de l'efficacité énergétique (diminution de la quantité de charbon nécessaire pour obtenir une puissance calorifique égale).

IV.2 Valorisation des résidus

39. Si l'on veut accroître la contribution des végétaux à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, c'est au moment de l'exploitation, de la transformation et de l'utilisation finale des produits ligneux qu'il faut agir.

40. Dans une exploitation classique, le volume des sciages obtenus représente en général la moitié seulement du volume des grumes entrantes ; le reste part en sciures, écorces, dosses et délignages, et en bois de rebut, impropres à la valorisation dans les industries d'aval, hormis en chaufferie.

Il convient donc de veiller à ne pas laisser pourrir ces déchets ou sous-produits qui, sinon, se transformeraient de nouveau en gaz carbonique et en eau, sans aucun bénéfice énergétique ou atmosphérique (10).

(9) A. Riedacker, *op. cit.*, p. 8.

(10) *Ibid*, p. 11.

41. Il en est de même des herbes de savanes, des pailles et autres résidus de l'activité agricole, qui se décomposent également en l'absence de valorisation énergétique ; cette valorisation est donc à privilégier.

IV.3 Dendro-énergie

IV.3.1 Valeur calorifique

42. Le bois est le biocarburant le plus ancien et le plus populaire. La valeur calorifique du bois varie selon les essences. La composition chimique du bois et son contenu en eau déterminent son potentiel énergétique. En général, on obtient entre 3.500 et 5.000 calories (ou petites calories) par gramme de matière sèche (g/MS). La vitesse de combustion dépend du contenu en matières volatiles.

IV.3.2 Dendroénergie et crise énergétique

Bois

43. Des milliards de personnes dépendent toujours, dans le monde, du bois de feu, du crottin ou, au mieux, du charbon de bois domestique pour satisfaire leurs besoins énergétiques : cuire leurs aliments ; bouillir l'eau ; chauffer leur logement.

Aujourd'hui encore, près de 80 % de la population rurale du monde en développement dépendent pour leur survie des biocarburants, se contentant souvent d'allumer, à ciel ouvert, des feux peu performants.

La combustion de combustibles traditionnels en pourcentage du total de l'énergie consommée (11) était, en 2001, de :

- 96,4 en RD Congo
- 96,6 au Burundi
- 92,8 au Rwanda
- 91,7 au Burkina Faso
- 90,6 en Guinée
- 88,3 au Mali
- 87,8 au Tchad
- 87,5 en République Centrafricaine
- 84,4 à Madagascar
- 77,3 au Niger
- 75,1 en Côte d'Ivoire

44. Ainsi, chaque année dans le monde, quelque 4 millions de m³ de bois sont utilisés pour produire de l'énergie. Comme près de deux milliards d'utilisateurs dépendent des biocarburants pour leurs besoins énergétiques, cette forme d'énergie renouvelable subit une forte pression.

45. D'autres activités exigent la combustion d'énormes quantités de bois, comme p.ex., la fabrication artisanale du verre et de la poterie, la préparation de breuvages traditionnels, les grillades de restaurants, les boulangeries, les briqueteries, le séchage du tabac, la torréfaction du café et la transformation du calcaire en chaux.

(11) Cf. Tabl. 21, *Énergie et environnement*. Rapport mondial sur le développement humain, PNUD, 2004.

46. Les difficultés économiques et la croissance démographique, en régions rurales, augmentent la pression sur les ressources biologiques d'énergie. On épuise le stock des espèces végétales les plus populaires avant de s'attaquer à celles qui offrent un rendement moins élevé et, enfin, aux plus jeunes plants. Des écosystèmes entiers sont décimés.

47. Les coupes excessives ont aggravé les problèmes d'érosion, la perte des sols, la pauvreté et la sécurité alimentaire des villageois les plus pauvres. Le manque d'énergie est une des principales causes de la déforestation, de la désertification et de l'extinction de plusieurs essences à rendement calorifique élevé, dans plusieurs régions arides et tropicales du monde en développement.

La collecte de bois de feu est une tâche pénible. Par ailleurs, ceux qui ne prélèvent pas le bois doivent consacrer une grande part (de l'ordre de 35 %) de leurs revenus domestiques à l'achat de bois de feu.

Charbon de bois

48. Au cours de la dernière décennie, la consommation mondiale de charbon de bois a augmenté de 30 %. Les grands consommateurs sont le Danemark, l'Espagne, l'Allemagne, les États-Unis et la Grande-Bretagne.

49. Hormis la cuisson, le charbon de bois est destiné à une foule d'usages : pharmacie ; purification de l'air ; traitement des eaux usées ; préparation d'aliments et de breuvages ; réfrigération.

50. Le Mexique est l'un des principaux exportateurs de charbon de bois de qualité. Pour le produire, on utilise des fourneaux, peu performants (notamment dans l'État de Sonora). Cette production de charbon détruit la forêt et affecte aussi l'avifaune, la pollinisation, la dispersion des graines et le contrôle biologique des insectes parasites.

V. SOLUTIONS DE REMPLACEMENT : CARBURANTS VERTS OU BIOCARBURANTS

V.1 Intérêt des biocarburants

51. La bioénergie est une solution permettant de remplacer l'utilisation du bois (dendroénergie) dont les impacts sur les forêts sont tels qu'il y a lieu d'y mettre un terme. En revanche, les plantations d'essences, vouées principalement à la production d'énergie, amplifient le processus photosynthétique.

52. Les bioénergies sont plus propres que les énergies fossiles, et sont recyclables. Elles sont plus économiques, moins dangereuses et plus acceptables au plan culturel. La bioénergie s'appuie sur des ressources renouvelables.

53. Exemples :

- chaufferies à biomasse avec ou sans cogénération d'électricité ;
- récupération de méthane dans les décharges pour la production d'électricité ;
- production massive de bioélectricité.

V.2 Bioélectricité : génératrices à biomasse de petite puissance

54. Outre le secteur du chauffage et de la cuisson, la bioénergie permettra sans doute de produire de la bioélectricité. Les dernières générations de centrales électriques à bois ont des rendements de l'ordre de 40 %. Une centrale de 10 MW demanderait environ 35.000 tonnes de bois sec par an, ce qui peut être produit, p.ex., dans l'est du Cameroun, dans un rayon d'une dizaine de km autour d'une ville, sur seulement 10 % de ce territoire (12).

Vérification des chiffres

$35.000 \text{ t (MS)} = 35 \times 10^9 \text{ g}$; $q = 3.500 \text{ cal/g} = 3,5 \text{ kcal/g}$,
 où q est le pouvoir calorifique, soit la quantité de chaleur dégagée par l'unité de poids de ce corps ; q est exprimée en cal/g ou en joules/g ($1 \text{ cal} = 4,185 \text{ J}$)
 $35 \times 10^9 \text{ g} \times 3,5 \text{ kcal/g} = 122,50 \times 10^9 \text{ kcal}$

Sachant que $860 \text{ kcal} = 1 \text{ kWh}$
 $122,50 \times 10^9 \text{ kcal} : 860 \text{ kcal/h} = 0,1424418 \times 10^9 \text{ kWh} = 1,42 \times 10^8 \text{ kWh}$
 $= 142 \times 10^6 \text{ kWh}$;

Considérant que le rendement de la centrale est de 40% :
 $142 \times 10^6 \text{ kWh} \times 0,40 = 56,8 \times 10^6 \text{ kWh} = 56,8 \times 10^9 \text{ Wh} = 56,8 \text{ MWh}$.

À raison de 6h d'utilisation/jour, une centrale de 56,8 MWh : $6 = 9,46 \text{ MWh}$, soit 10 MW suffit.

Superficie : $S = \frac{1}{4} r^2 = 3,1416 \times (10)^2 = 314 \text{ km}^2 = 31.400 \text{ ha}$
 occupation de 10%, soit $31.400 \times 0,1 = 3.140 \text{ ha}$

À raison de $35 \text{ m}^3/\text{ha}$, on a $3.140 \text{ ha} \times 35 \text{ m}^3/\text{ha} = 109.900 \text{ m}^3$.
 Si 300 kg/m^3 (poids sec), on obtient : $300 \text{ kg/m}^3 \times 109.900 \text{ m}^3 = 32.970.000 \text{ kg} = 32.970 \text{ t}$.

Les chiffres de A. Riedacker sont plausibles.

55. De telles génératrices seraient complémentaires des systèmes photovoltaïques qui seraient réservés aux consommations unitaires de quelques dizaines de watts.

- Ces génératrices seraient utilisées pour la motorisation villageoise — irrigation, mouture, extraction des huiles, autres travaux — qui ne pourrait être réalisée, à des coûts acceptables, à l'aide de systèmes photovoltaïques.
- Cette motorisation pourrait également produire du courant électrique qui pourrait être distribué ou être utilisé pour charger des batteries à charge rapide.
- Ces génératrices à biomasse de petite puissance devraient recevoir, de la part des organismes de financement une attention particulière.

(12) Riedacker et N'Gnikam. Integrated Management of Biomass in Eastern Cameroon and in the Urban-Rural System of Yaoundé : A preliminary Approach for a More Sustainable Development in Cameroon. *Conférence internationale sur l'agriculture pour l'alimentation et l'énergie dans le développement durable*, Braunschweig, juin, 1997. Elsevier.

V.3 Production de biocarburant

56. La production de biocarburant est une autre voie qui permettra de valoriser les biomasses. La conversion des productions traditionnelles de l'agriculture en biocarburants liquides, en méthanol de canne, de betterave, de maïs ou de blé et en ester de colza a déjà commencé.

57. Dess *et al.* ont estimé les ressources potentielles accessibles en biomasse, au niveau planétaire, pour les années 1990 :

- à 1.710 Mtep/an pour les produits issus de la forêt ;
- à 38 Mtep/an pour les déchets urbains ;
- à 466 Mtep/an pour les cultures énergétiques sur 30 millions d'hectares.

58. Le potentiel de stockage et surtout de substitution des combustibles fossiles est théoriquement considérable. Dans de nombreux pays, la biomasse est l'une des principales sources d'énergie. Elle demande, actuellement, moins d'investissements par kWe (kW électrique) installé que, p.ex., la filière photovoltaïque. Les technologies, associées à l'utilisation de la biomasse, sont d'intérêt planétaire. (13)

V.4 Quelques biocarburants

V.4.1 Huiles industrielles

59. Les huiles industrielles, tirées du jojoba du désert (*Simmondsis chinensis*) et du « candelilla » (*Euphorbia antisiphilitica*), peuvent remplacer les lubrifiants dérivés du pétrole. Les fibres de certains cultivars du candelilla peuvent contenir 10 % d'huile. Lorsqu'ils sont plantés dans des sols humides, on arrive à en tirer 20 barils d'huile par hectare, chaque année (14).

V.4.2 Alcool

60. Certains végétaux peuvent aussi produire de l'éthanol, alcool utilisable dans les moteurs automobiles. On fabrique l'éthanol en ajoutant des levures au maïs, à la canne à sucre, au blé, au colza et à d'autres céréales. C'est un carburant biologique, propre, du fait que les moteurs à alcool sont plus performants parce qu'ils brûlent presque tout le carburant utilisé.

Il est plus rentable d'utiliser un mélange à 90 % d'essence et à 10 % d'éthanol (c'est le gazohol).

V.4.3 Carburant diesel biologique

61. Il est produit, au Brésil, notamment par l'estérification de différentes huiles végétales, telles que les huiles de tournesol, de soja, d'arachide, de colza, de palme, de coco, etc.

(13) A. Riedacker, La bioénergie une composante essentielle du développement durable. *Cahiers de Global Chance*, n° 4, pp. 41-55.

(14) *Ibid.*

V.4.4 Méthane

62. La biodégradation des déchets organiques et des excréments de la ferme peut produire du méthane pour l'usage domestique. Le méthane est le plus léger des gaz et celui qui offre le meilleur rendement énergétique. Il peut remplacer le charbon et le pétrole. Sa combustion ne rejette que du CO₂ et des vapeurs d'eau.

V.5 Reboisement à des fins énergétiques

V.5.1 Réserves forestières énergétiques

63. Plusieurs sylviculteurs estiment que la crise de l'énergie et ses problèmes environnementaux peuvent être résolus en établissant des *réserves forestières énergétiques* » (15) de bois de feu et en encourageant l'usage de fours à bois.

De telles récoltes biologiques ont un énorme potentiel dans les pays tropicaux, pour les raisons suivantes :

- taux élevés de radiation solaire toute l'année ;
- croissance rapide des essences indigènes (p.ex., *Leucaena*) ;
- espace disponible. *Calliandra calothyrsus* peut être exploité, deux ans seulement après avoir été planté.

64. Les Légumineuses, comme le *Leucaena leucocephala* et l'*Albizia falcataria* produisent, chaque année, environ 35 m³ de bois de feu par hectare ; ces essences peuvent aussi servir à des fins pharmaceutiques, au fourrage des animaux et à la fixation de l'azote dans le sol.

65. On se limite, dans certains cas, à des programmes communaux de reboisement et à l'introduction de poêles à bois plus performants.

Des projets plus ambitieux — en Uruguay, p.ex. — impliquent le développement de fourneaux industriels, alimentés au bois de feu, lui-même extrait de forêts aménagées à cette fin.

V.5.2 Impacts des monocultures et choix des essences

66. Dans tous les cas de plantation d'essences à croissance rapide, il y a lieu de faire des études d'impacts. L'implantation de l'eucalyptus dans des régions semi-arides et semi-tropicales du Mexique a conduit à l'assèchement des sols et à l'abaissement des nappes phréatiques de plusieurs mètres.

67. Les essences — de préférence indigènes (meilleure résistance aux feux de forêts, aux sécheresses et au pâturage du bétail) — doivent satisfaire aux caractéristiques suivantes :

- compatibilité avec les écosystèmes locaux (p.ex., avec la faune) ;
- haut rendement calorifique par g de matière sèche ;
- croissance rapide et reproduction facile ;
- bonne tolérance à l'émondage ;

(15) Alejandro Sanchez-Velez, Les bioénergies sont-elles compétitives ? *Écodécision*, n° 25, automne 1997, pp. 16-20.

- capacité de charge élevée par unité de surface ;
- possibilité d'en tirer d'autres avantages : fruits comestibles ; propriétés médicinales ; fourrage nutritif ; fixation d'azote ;
- capacité à se mélanger aux peuplements d'autres essences afin de simuler la forêt d'origine (*i.e.*, éviter les monocultures).

VI. AUTRES SOLUTIONS NON BIOLOGIQUES

VI.1 Architecture à base de terre

Avantages

68. Construire avec de la terre, non cuite, présente des avantages sur de nombreux plans : économie ; énergie ; écologie ; culture.

69. En effet, la terre naturelle, non cuite, est un matériau de construction qui présente de nombreux avantages sur d'autres technologies concurrentes ;

- elle peut être utilisée telle quelle après extraction ; la terre naturelle ne nécessite pas de cuisson à haute température ;
- elle élimine le recours à des procédés, parfois très polluants ou grands consommateurs d'énergie, comme la cuisson (le plus souvent avec des combustibles au carbone) ;
- la construction avec de la terre non cuite favorise également la préservation de l'équilibre écologique, en réduisant la pression sur la végétation, les ressources en eau et les granulats — sable ou gravier — tirés des carrières ou du lit des rivières ;
- elle génère des économies d'énergie ;
- la technologie est facilement adaptable par les communautés locales et elle leur permet de se construire un environnement qui leur soit propre ; tel est le cas des Hautes Terres de Madagascar ;
- la fabrication de matériaux de construction en terre peut être largement décentralisée, ce qui permet l'utilisation de ressources locales ;
- les constructions en terre requièrent moins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement ; dans les régions aux hivers rigoureux, les économies de chauffage peuvent aller jusqu'à 20 ou 30 %.

Économie d'énergie et réduction de la déforestation.

70. L'utilisation de la terre pour la construction réduit la pollution atmosphérique et permet de sauvegarder la forêt qui autrement aurait été détruite pour obtenir le combustible. Au Malawi, on a calculé (16) qu'il fallait 60 tonnes de bois pour cuire 100.000 briques.

71. L'utilisation de foyers améliorés, en terre, a pour effet de brûler le bois et le charbon plus efficacement, permettant des économies d'énergie de plus de 50 % ; il en résulte une amélioration de la qualité de l'air.

Économie du bois de charpente

72. L'architecture à base de terre permet de se passer de bois de construction. L'utilisation d'éléments structurels — arches, voûtes, coupoles —, rend possible la construction d'édifices sans bois. Ce procédé

(16) Hugo Houben, Pour une architecture nouvelle à base de terre. *Écodécision*, n° 25, automne 1997, pp. 27-28.

évite la déforestation et réduit le transport de bois d'œuvre, de ciment et d'acier.

73. L'utilisation de la terre pour la construction ne nécessite plus l'extraction du sable des rivières, pour la préparation du mortier.

Consommation d'énergie pour la fabrication de matériaux (17)

74. Il faut :

- 1 kWh pour produire 1 kg de ciment ;
- 7 kWh pour 1 kg d'acier ;
- 70 kWh pour 1 kg d'aluminium.

75. La production d'un m³ de béton requiert entre 400 et 800 kWh. Pour la même quantité de briques alvéolées ordinaires, on compte 590 kWh ; l'on passe à 1.140 kWh pour des briques pleines.

76. En revanche, les matériaux de construction naturels, comme la terre, ne requièrent que 5 à 10 kWh par m³. Cela signifie que la production d'une quantité donnée de béton consomme 100 fois plus d'énergie que celle d'une même quantité de terre. Dans le cas du béton, il faut encore de l'énergie pour pulvériser, emballer et transporter le ciment ainsi produit. En revanche, la production de briques ou la construction de murs de terre battue n'exige pas d'énergie (sauf l'énergie humaine) et il en faut très peu pour le transport et la manipulation sur le site.

VI.2 Equipement solaire

VI.2.1 Eclairage en région rurale

77. Pour satisfaire leurs besoins d'éclairage, les familles rurales utilisent généralement des :

- des lampes à pétrole à mèche, souvent faites avec des boîtes de conserve de tomates dans lesquelles on insère une mèche en coton ; à Madagascar, on utilise des boîtes de lait évaporé ; elles sont munies d'une tubulure qui reçoit la mèche et d'un orifice latéral permettant de la remplir de pétrole ; elles n'émettent pas plus de 10 à 15 lumens ;
- des lampes-tempêtes ; 40 à 50 lumens pour les lampes importées ;
- des bougies.

78. Dans la pratique, la plupart des familles n'utilisent pas plus d'un point lumineux par pièce au même moment : doubler le nombre de lumières fait doubler les coûts, mais augmente à peine le niveau d'éclairage. L'éclairage sert surtout aux gens pour voir les contours et éviter de se cogner.

79. Le coût combiné des bougies, du pétrole et des piles atteint un montant substantiel ; dépense mensuelle (18) :

- 5,6 \$US pour le pétrole (au Kenya) ;
- 5,0 \$US pour les piles (au Kenya) ; soit un total de 10,6 \$US ;
- 7,70 \$US pour le pétrole et les piles, au Niger.

(17) H. Houben, *op. cit.*, p. 28.

(18) Robert J. Van der Plas. Les lanternes solaires. *Liaison Énergie-Francophonie*, n° 37, 4e trimestre 1997, pp. 14-19.

VI.2.2 Lanternes solaires

80. En comparaison avec les types d'éclairage traditionnels, les lanternes solaires peuvent fournir bien plus de lumière ; dans bien des cas, dix fois plus que ce dont les gens disposent actuellement en Afrique.

Le marché des lanternes solaires est souvent perçu comme trop réduit et peu rentable par les compagnies qui s'intéressent au solaire. Dans les boutiques des capitales africaines, ces lanternes sont rares et en quantités limitées. Elles sont généralement conçues pour être utilisées durant les activités récréatives dans les pays industrialisés (19).

81. C'est dans le cadre du *Programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique* (ESMAP) (20), que des lanternes ont été mises en vente. Les spécifications techniques étaient les suivantes :

- éclairage produit : 150 à 200 lumens ;
- deux années de durée de vie ;
- 3 h d'éclairage chaque jour de la semaine ;
- prix de détail de 50 \$US pour la vente en grandes quantités.

Avantages et points faibles

82. Les modèles existants apportent un changement sensible dans les conditions de vie et se rentabilisent relativement vite. Des centaines de lanternes (ou lampes) solaires ont été mises en vente dans les boutiques rurales au Kenya et au Niger. Par suite de leur conception, la plupart de ces lanternes ne peuvent pas fournir quatre heures d'éclairage ou plus, durant les sept jours de la semaine, ce qui est généralement nécessaire en Afrique. En outre, ces lanternes restent chères (80 à 350 \$US pour un ensemble complet).

Description technique

83. L'ensemble comprend : le module photovoltaïque (de 1,75 W à 6 W [6 V]), connecté à la lanterne par un fil électrique ; la batterie (étanche, au gel acide-plomb de 6 V, 4 Ah) ; le régulateur ; un interrupteur ; la lampe et le boîtier ; un ballast/inverseur dans le cas des lampes fluorescentes.

Suivant les modèles, les lampes comprennent : des tubes fluorescents de 4 et 6 W ; une ampoule fluorescente compacte de 5 W ; une ampoule krypton à incandescence de 3 W ; un éclairage par diodes lumineuses (LED) de 1,4 W émettant une lumière ambre ; et un autre émettant une lumière arc-en-ciel.

84. Un total de 320 lanternes (de six modèles différents, suivant les fabricants) ont été placées dans des boutiques au Kenya et au Niger.

En général, plus la lampe pouvait émettre de lumière, plus l'utilisateur l'appréciait.

Quand la batterie était complètement chargée, les lampes pouvaient fonctionner de 2,5 à 40 h en continu (en moyenne, 12,1 h). En pratique, les utilisateurs utilisaient les lampes environ :

- 3,6 h/j, au Kenya (de 2,5 à 4,3 h/j) ; énergie solaire : 5 kWh/m², jour ;
- 3,8 h/j, au Niger ; énergie solaire : 6,4 kWh/m², jour.

85. Quelques conclusions du projet :

- 1° la plupart des lanternes étaient inacceptables d'un point de vue purement technique (21) ;
- 2° une fois les usagers familiarisés avec ce type d'éclairage, ils en ont réclamé d'autres, de plus forte

(19) Robert J. Van der Plas, *op. cit.*, p. 14.

(20) C'est un programme PNUD/Banque mondiale. ESMAP conseille les gouvernements sur le développement énergétique durable.

(21) Robert J. Van der Plas, *op. cit.*, p. 17.

intensité.

VII. CONCLUSIONS

86. La carte mondiale de gisement solaire montre que 47 % de la surface du continent africain bénéficie d'un ensoleillement annuel supérieur à 2.100 kWh/m² ; 27 % entre 1.900 et 2.100 ; et les 26 % restants, entre 1.500 et 1.900. Les valeurs les plus élevées de l'ensoleillement correspondent aux parties les plus denses du peuplement, à l'exception des déserts du Sahara et du Kalahari. Ainsi, tous les paramètres géographiques sont favorables à une large utilisation de l'énergie solaire (22).

87. En dépit de ces conjonctions géographiques et des besoins pressants de la population, l'utilisation de l'énergie solaire reste encore marginale en Afrique. Il existe actuellement plusieurs modes d'utilisation de cette forme d'énergie ; les plus utilisés sont :

- l'électricité solaire photovoltaïque, pour le pompage de l'eau, l'éclairage, la réfrigération, la télécommunication ; etc. ;
- les centrales thermiques, utilisant des concentrations cylindro-paraboliques, sont actuellement le mode le plus compétitif de l'énergie solaire en réseau ;
- le séchage des produits agro-alimentaires ;
- le chauffage solaire sous forme de chauffe-eau, de chauffage d'habitation ; etc. ;
- la cuisson solaire, pour laquelle il existe plusieurs variantes d'appareils ; la technologie la plus prometteuse est celle de la concentration parabolique (23).

88. En ce qui concerne l'énergie éolienne, on observe que dans 50 % des régions côtières, l'utilisation à grande échelle de cette énergie est possible. Par rapport à l'énergie solaire, l'énergie éolienne offre plus de possibilités — à moindre coût — de production d'énergie électrique à grande échelle, en réseau connecté ou isolé.

Là où les conditions sont moins favorables, l'énergie éolienne se prête aussi à des utilisations à petite échelle pour le pompage de l'eau ou l'électrification de petits villages.

89. La biomasse est actuellement la première source d'énergie en Afrique. À l'exception de zones fragiles, comme le Sahel, le continent africain dispose d'un capital appréciable de biomasse, Mais ces ressources ne sont pas inépuisables et le poids démographique du continent est en train d'amenuiser leurs capacités de régénération. Dans beaucoup de pays, le taux de prélèvement est de loin plus élevé que celui de la régénération.

Il est donc impératif de prendre des mesures appropriées pour conserver le caractère renouvelable de cette source d'énergie.

90. Il conviendrait que les autorités gouvernementales s'impliquent davantage dans des projets de développement nationaux et régionaux — agriculture, santé, éducation —, axés sur la mise en œuvre des énergies nouvelles et renouvelables. •

(22) Jacques-Césaire Mbanze, Vers une utilisation à grande échelle des énergies renouvelables en Afrique. *Liaison Énergie-Francophonie*, n° 46, 2000, pp. 14-19.

(23) *Ibid.*, p. 18.

ANNEXE I

UNITÉS et TRANSFORMATIONS

Calorie

- calorie ou calorie-gramme ou petite calorie (cal ou calg) : énergie thermique nécessaire pour élever de 1° C la température de 1 g (1 cm³) d'eau, de 14,5 à 15,5 ° C.
- kilocalorie ou kilogramme calorie (kcal) ; 1 kcal = 1.000 cal. Dans le langage courant, notamment en nutrition,, on utilise souvent le mot « calorie » pour désigner la kcal.
- L'équivalent mécanique de la chaleur est 4,185, c'est-à-dire que :
 - 1 cal = 4,185 J ; ou
 - 1.000 cal = 1 kcal = 4.185 J = 4,185 kJ (on utilise, de façon courante 4,18 kJ) ;
 - 1 kJ = 1/4,18 kcal = 0,23923 kcal ;
 - p.ex., 251 cal = 241 x 4,180 = 1.007,38 cal
- 1 cal/g = 1,8 BTU/lb
- 1 BTU/lb = 1 : 1,8 = 0,5556 cal/g

Poids, longueur et pression

- 1000 g = 10³ g = 1 kg
- k, kilo, 10³ ; 1 kilowatt (kW) = 1.000 ou 10³ W
- M, mega, 10⁶ ; 1 mégawatt (MW) = 1.000.000 ou 10⁶ W
- G, giga, 10⁹ ; 1 gigawatt (GW) = 10⁹ W (ou 1 milliard de W)
- T, téra, 10¹² ; 1 térawatt (TW) = 10¹² W (ou 1000 milliards de W)
(ou 1 milliard de kW)
- 1 milligramme, 1 mg = 10⁻³ g
- 1 microgramme, 1µg (ou gamma) = 10⁻⁶ g
- 1 picogramme = 10⁻¹² g
- 1 cm³ = 0,061 po³
ex., 596,11 cm³ x 0,061 = 36,36 po³

Livre et pouce

- 1 lb = 0,454 kg = 453,59 g
ex. 60 lb = 60 x 0,454 kg = 27,24 kg
- 1 kg = 1 / 0,454 lb = 2,2 lb

- 1 po = 2,54 cm
- 1 pi = 30,48 cm
- 1 pi² = 0,092903 m²

- ¼ = 3,1416

Énergie et travail

- Newton (N) ; 1 N : intensité de la force qui, appliquée à une masse de 1 kg, lui confère une accélération de 1 m/s (1 mètre par seconde).

- joule (J) ; 1 J = N.m ; travail d'une force de 1 N dont le point d'application se déplace de 1 m dans la direction de la force ; 1 J = 1/4,18 cal ; 1 cal = 4,186 J (équivalent mécanique de la chaleur) ; on utilise, couramment : 1 cal = 4,18 J

Puissance : rythme auquel un travail est accompli ou l'énergie utilisée (travail par sec)

- watt (W). Puissance de 1 joule par seconde ; 1 W = 1 J/s ;

- kilowatt (kW) ; 1 kW = 1.000 W.

- MWé : mégawatt électrique
- MWt : mégawatt thermique

Le rendement de la transformation du MWt en MWé est de 25 % ;

p.x., 92,3 MWt donnent 92,3 x 0,25 = 23,1 MWé.

* Énergie

- watt.heure (Wh) ;
- kilowatt.heure (kWh) ; c'est l'énergie fournie par un appareil de 1 kW qui a fonctionné pendant 1 h ;
 - 1 Wh = 860 cal ;
 - 1 kWh = 860 kcal ; c'est une quantité d'énergie importante, capable, p.ex., d'élever la température de 20 litres d'eau de 43 °C ;
 - 1 Wh = 860 cal ; sachant que 1 cal = 4,186 J ; on a :
1 Wh = 860 x 4,186 = 3.599,96 J = 3.600 J ;
 - 1 kWh = 3.600.000 J

Exemple

- un radiateur électrique de 1 kW (puissance) consomme de l'énergie par an au rythme de 1 kWh ou, par jour : 1 kW x 24 h = 24 kWh/j ;
ou, par an : 24 kWh/j x 365 j = 8.760 kWh/an

• Pression

- 1 kilogramme-force par m² (kgf/m²) : pression exercée par une force de 1 kgf (ou poids de 1 kg) sur une surface de 1 m² ;
- 1 kilogramme-force par cm² (kgf/cm²) : pression exercée par une force de 1 kgf (ou

poids de 1 kg) sur une surface de 1 cm² ; 1 kgf/cm² = 10.000 kgf/m²

- 1 kg/cm² = 14,3299 lb/po²
- 10 lb/pi² = (10 x 0,454 kg) / 0,092903 m² = 4,54 kg / 0,092903 m² = 48,87 kg/m²
- 1 lb/pi² = 4,88 kg/m²
ex. : 50 lb/pi² = 50 x 4,88 kg/m² = 244 kg/m²

Quantité d'énergie électrique

- Coulomb (C) ; 1 coulomb = 1 ampère x 1 seconde (quantité d'énergie électrique qui circule avec un courant d'un ampère pendant une seconde).

Courant électrique

- Ampère (A)
- 1 ampère = 1 C/s

Tension

- Tension ou différence de potentiel, exprimée en volts (V).

Résistance électrique

- Résistance, exprimée en ohms (Ω).

Charbon et pétrole

Le charbon et le pétrole se mesurent habituellement en tonnes.

- Énergie contenue dans une tonne de charbon brut : 8.139 kWh

Calculs - Charbon

Charbon, 1 t = 10⁶ g ; 1 g charbon = 7.000 cal = 7 kcal
1 kg charbon = 7.000 kcal ; 1 t charbon = 7.000.000 kcal
860 kcal = 1 kWh
7.000.000 kcal / 860 kcal = 8.139 kWh

- Énergie contenue dans une tonne de pétrole : 11.964 kWh

Calculs - Pétrole

Pétrole, 1 g pétrole = 10.289 cal = 10,289 kcal ; 1 kg pétrole = 10.289 kcal
1 t pétrole = 10.289.000 kcal
10.289.000 kcal / 860 kcal = 11.963,9 = 11.964 kWh (in : Zoran : 11.964)

12.000 kWh = 1 tep (tonne équivalent pétrole).

Utilisation d'énergie électrique dans le monde 1981 - 2000 - 2050

En 1981

- 4,5 milliards de personnes, $4,5 \times 10^9$;

Puissance totale utilisée :

- 10.000.000.000.000 W d'énergie, 10×10^{12} W = 10 TW
rappel : 10^{12} W = 1 TW

Puissance utilisée par personne :

$$10 \times 10^{12} \text{ W} / 4,5 \times 10^9 \text{ p} = 10 \times 10^9 \text{ kW} / 4,5 \times 10^9 \text{ p} = 10 / 4,5 = 2,2 \text{ kW/p}$$

Énergie utilisée par personne (p) :

- par jour : 2,2 kW ; soit $2,2 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 52,8 \text{ kWh/j}$
- par an : $52,8 \text{ kWh/j} \times 365 \text{ j} = 19.272 \text{ kWh/par an}$

Prévision de Zoran Zaric, en 1981, pour 2000

An 2000 : $6,7 \times 10^9$ p ; consommation électrique par p = 3,06 kW
Soit, au total : $6,7 \times 10^9 \text{ p} \times 3,06 \text{ kW/p} = 20,502 \text{ kW/p} \times 10^9 \text{ p} = 20,5 \times 10^9 \text{ kW} =$
 $20,5 \times 10^{12} \text{ W} = 20,5 \text{ TW},$
soit un peu plus du double qu'en 1981 (10 TW, cf. plus haut).

Prévision pour 2050

An 2050 : $10,5 \times 10^9$ p ; consommation électrique par p = 5,28 kW
Soit : $10,5 \times 10^9 \text{ p} \times 5,28 \text{ kW/p} = 55,44 \times 10^9 \text{ kW} = 55,44 \times 10^{12} \text{ W} = 55,44 \text{ TW} \bullet$