

QUE PEUT-ON ESPÉRER DE LA PHOTOSYNTHÈSE DES VÉGÉTAUX ?

WHAT CAN BE EXPECTED FROM PLANT PHOTOSYNTHESIS ?

par Guy Paillotin¹

RÉSUMÉ

Les informations quantitatives sur la photosynthèse des végétaux sont souvent difficiles à rassembler et encore plus à comparer et à mettre en perspective. L'objet de cette note est de pallier cet inconvénient. Elle fournit, à partir de la littérature, diverses données : le volume des ressources alimentaires, la consommation d'énergie, l'intensité du rayonnement solaire à la surface de la terre, le rendement de la photosynthèse et, *in fine*, l'énergie disponible en pratique grâce à la photosynthèse. En conclusion, une brève analyse de ces données est proposée. Sur le plan mondial, l'efficacité de la photosynthèse n'est pas le facteur limitant de la production agricole, mais elle l'est assurément plus pour la production d'énergie issue de la biomasse. Tout ceci doit cependant être analysé plus finement au niveau de chaque région du monde, tant varie, de l'une à l'autre, le potentiel de la photosynthèse.

Summary :

It is rather difficult to gather and compare the numerous data relative to plant photosynthesis. The purpose of this paper is to get over this difficulty. Several parameters are obtained from various published data : food supply, energy consumption, solar irradiance, theoretical yield of photosynthesis and finally the actual efficiency of photosynthesis. In conclusion, a brief analysis of these data is propounded. At the world level the photosynthesis efficiency is not a limiting factor for food supply, but it seems to be the case for energy supply. Nevertheless these global conclusions must be analysed at a more local level.

1- INTRODUCTION

Revisiter en 2005, ce que peut apporter la photosynthèse chlorophyllienne, aussi bien sur le plan alimentaire qu'énergétique, peut paraître surprenant. Le sujet n'a certes pas perdu de son intérêt, mais à bien des égards il serait légitime de penser qu'il a déjà été abondamment traité. On songe immédiatement aux synthèses qui ont été écrites il y a vingt ans après le premier choc pétrolier (1, 3).

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, président du Conseil général de l'Institut national agronomique Paris-Grignon, président de l'Agence française de Sécurité sanitaire environnementale, INRA, 147, rue de l'Université, 75338 Paris cedex 07.

Cependant, pour l'avoir très souvent expérimenté, il reste très difficile de mettre cette question en perspective devant un auditoire pluridisciplinaire ou de la poser en termes mondiaux.

Il y a cela deux raisons assez surprenantes. La première est que chaque communauté scientifique utilise ses propres unités de mesure de l'énergie : le Joule (J) pour les physiciens, les kilocalories (kcal) pour les biochimistes, la tonne équivalent pétrole (tep) pour les énergéticiens. Il en résulte une grande difficulté de comparaison des diverses données et bien souvent des erreurs de conversion diffusées sans précaution dans la littérature. La seconde est que les scientifiques n'ont généralement pas accès dans leur laboratoire aux données mondiales concernant les ressources naturelles, la démographie, les besoins alimentaires et énergétiques... Celles-ci sont cependant produites par des agences internationales sérieuses et il est possible d'y accéder par Internet sur un certains nombres de sites comme celui du *World Resources Institute* (4).

Dans la suite de cet article, nous tenterons de mettre en cohérence toutes ces données et d'en tirer quelques éléments de réflexion. Pour conclure cette introduction, il me semble utile d'indiquer les règles les plus utiles de conversion d'unités :

$$1 \text{ tep} = 42.10^9 \text{ J} = 1,17.10^4 \text{ kwh} = 10^7 \text{ kcal} = 10^4 \text{ thermies}$$

2- Ressources énergétiques alimentaires

C'est un sujet qui a été remarquablement traité par A. Rérat (2). Je ne fournirai ici que quelques données globales valables pour la période 2000-2001. Elles ont été produites par le Programme des Nations-Unies pour le développement (PNUD) (4).

Ressources énergétiques alimentaires en kcal/jour/habitant

Monde	2 782
Pays développés	3 300
Pays en développement	2 400
Ethiopie	1 600
France	3 500

Une première remarque de pure forme : la plupart des nutritionnistes utilisent comme unité la « grande calorie » qui vaut en fait une kilocalorie. Sur le fond maintenant, le seuil de la suffisance alimentaire, même s'il est encore discuté, a été fixé par le PNUD à 2 700 kcal/jour/habitant. Les pays en développement n'atteignent pas ce seuil. Nous avons mentionné le cas de l'Éthiopie dans le tableau pour souligner la grande diversité des situations, car ce cas n'est pas isolé, des pays en développement.

3- Consommation d'énergie autre qu'alimentaire

Les données résumées dans le tableau suivant (année 2004) proviennent de l'*International Energy Agency* (4)

Consommation annuelle d'énergie par habitant en tep

Monde	1,6
USA	8,0
France	4,4
Yémen	0,2

Notons tout d'abord qu'une tep/an équivaut à $27,4 \cdot 10^3$ kcal/jour soit environ dix fois le seuil de suffisance alimentaire. Les besoins en énergie sont donc d'un ordre de grandeur plus grands que les besoins alimentaires. Nous avons mentionné le cas du Yémen pour illustrer une fois encore l'extrême diversité des situations dans les pays en développement.

4- Disponibilité de l'énergie solaire

La valeur moyenne du rayonnement solaire à la surface de la terre est égale à 160 Wm^{-2} soit $14 \text{ MJm}^{-2}/\text{jour}$ soit encore 1 215 tep/hectare/an. Ainsi un hectare reçoit par an 750 fois la consommation annuelle d'énergie par habitant. C'est ce chiffre qui a fait naître beaucoup d'espoir dans l'énergie solaire. Nous verrons qu'il faudra le relativiser.

Cette valeur moyenne varie d'une région à l'autre. Ainsi atteint-elle 300 Wm^{-2} au niveau de la Mer rouge, 200 Wm^{-2} au Brésil ou en Australie, 185 Wm^{-2} aux États-Unis et 130 Wm^{-2} en France (3).

Le principal handicap de l'énergie solaire est d'être en quelque sorte « diluée » sur la surface terrestre. Voici les caractéristiques de cette surface pour le monde et pour la France (données PNUD 2000-2001 (4)).

Surfaces disponibles

	Surface totale	Forêts	Prairies	Terres arables	Fraction de terre utilisable
Monde	15 Gha	4,1 Gha	3,1 Gha	1,6 Gha	58%
France	55 Mha	15 Mha	10,4 Mha	18,3 Mha	80%

(1 Gha = 10^9 hectares, 1 Mha = 10^6 hectares)

Sachant que la population du monde est de 6,5 milliards d'habitants dont 4,9 milliards dans les pays en développement et celle de la France de 60 millions d'habitants, on peut en déduire, à partir de la valeur moyenne du rayonnement solaire, l'énergie disponible par an et par habitant :

Énergie solaire disponible par an et par habitant en tep

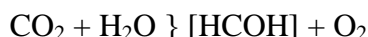
	Surface totale	Terres utilisables	Terres arables
Monde	2 700	1 570	288 (soit 7,9 Mkal/jour)
France	900	720	299 (soit 8 Mkal/jour)

(1 Mkal = 10^6 kcal)

Ainsi, en se référant à la consommation énergétique européenne, les seules terres arables reçoivent en énergie solaire de quoi satisfaire 70 fois les besoins annuels. Mais il faudrait pour cela convertir l'énergie solaire avec un rendement égal à un, ce qui n'est pas possible.

5- Rendement de la photosynthèse

La réaction de base de la photosynthèse chlorophyllienne s'écrit de la façon suivante :



Elle requiert un apport d'énergie de 120 kcal/mole.

Pour la valeur moyenne du rayonnement solaire et si le rendement de la photosynthèse était égal à un, la matière sèche produite serait de 3 000 tonnes/ha/an et la masse de carbone de 1 225 tonnes/ha/an (Une tep solaire fixerait une tonne de carbone).

Mais plusieurs facteurs viennent réduire le rendement de la photosynthèse dans ses phases les plus primaires :

- la limitation du spectre des longueurs d'onde absorbées (50% de pertes),
- le défaut d'absorption de la lumière (perte de 20%),
- la limite intrinsèque du rendement quantique de la photosynthèse (perte de 77%).

Tout ceci conduit à un rendement maximum de 9%. Il faut y rajouter l'effet de la photorespiration qui peut conduire, quand elle se produit, à une perte supplémentaire de 40%. Le rendement maximum est donc compris entre 5,5 et 9%.

Mais les rendements réels sont encore plus faibles :

Dans des conditions idéales de culture, ceux-ci sont compris entre 2 et 5%. Ramenés à la productivité annuelle, ils sont alors compris entre 0,5% et 2%. S'agissant enfin du blé, le rendement en grains est en France au maximum de l'ordre de 5%.

Dès lors, s'agissant des cultures sur terres arables, il est réaliste de postuler un rendement optimum moyen de 2,5% et pour les forêts et prairies de 1%.

Nous pouvons maintenant dresser le tableau donnant l'énergie disponible par an et par habitant, avec les hypothèses réalistes de rendement de la photosynthèse.

Énergie réellement disponible par an et par habitant en tep

	Forêts et prairies	Terres arables
Monde	1,3	0,72 (soit $8 \cdot 10^4$ kcal/jour)
France	0,4	0,75 (soit $8,3 \cdot 10^4$ kcal/jour)
Filière éthanol		
Monde	0,5	0,26
France	0,14	0,27

Nous avons ajouté à ce tableau, l'énergie que fournirait la filière « éthanol » dans l'hypothèse d'un rendement de conversion optimum.

6- CONCLUSION

Nous nous contenterons dans cette note de commenter le tableau précédent. A sa lecture on peut avoir deux réactions immédiates : l'une optimiste pour l'alimentation puisque les terres arables ont, sur le plan de la photosynthèse, un potentiel de production près de trente fois supérieur au seuil de suffisance, l'autre plus pessimiste pour l'énergie issue de la biomasse puisqu'au total celle-ci correspond à 2 tep/habitant soit la moitié de la consommation européenne. Il convient cependant de nuancer ces deux conclusions.

S'agissant de l'alimentation tout d'abord : ce qu'on peut en réalité affirmer c'est qu'au niveau mondial, la photosynthèse n'est pas limitante pour la satisfaction des besoins alimentaires. D'autres paramètres doivent être pris en considération : disponibilité de l'eau, potentiel des sols, sans oublier les éléments économiques et sociaux qui jouent souvent un rôle prépondérant dans la survenue de la disette.

Ces remarques ne concernent pourtant pas vraiment des pays comme la France. Comment expliquer alors ce facteur 30 que nous venons d'évoquer ? En premier lieu, nos chiffres sont optimistes car ils correspondent en réalité aux seules grandes cultures et il faut également tenir compte de nos exportations. Tout ceci peut rendre compte d'un facteur 2 mais guère plus. Ce qui se passe en fait, c'est qu'entre la production végétale primaire et le consommateur, il y a beaucoup de pertes en énergie, la première, bien analysée par A. Rérat (2) étant due aux productions animales (alimentation, gestion des carcasses, ...). Enfin le consommateur produit des déchets en quantité non négligeable.

Misère d'un côté, abondance de l'autre, ...

S'agissant enfin de l'énergie non-alimentaire, il faut analyser les choses plus finement car il faudra bien dans l'avenir utiliser toutes les sources énergétiques possibles.

En ce qui concerne la France, il faut bien constater que le volume total de notre production agricole et forestière ne correspond qu'à 10% de notre consommation en énergie. Toutefois, 0,27 tep (énergie fournie par les terres arables) est une quantité comparable à nos besoins actuels en essence pour les automobiles (source : *International Energy Agency* (4)). Dès lors 10% de notre production peut couvrir 10% de notre consommation en essence. Il reste bien sûr à réunir les conditions économiques d'un tel usage de la biomasse.

Même si cela ne modifie pas les bilans mondiaux, il faut surtout noter que les surfaces utilisables par habitant comme la valeur moyenne du rayonnement solaire, varient sensiblement d'un pays à l'autre. Ainsi si on prend pour unité le potentiel français de production d'énergie par habitant des seules terres arables soit 0,75 tep, on peut calculer que le potentiel mondial est du même ordre de grandeur, celui du Brésil une fois et demi plus grand, celui des États-Unis près de trois fois supérieur et celui de l'Australie dix fois plus grand.

Enfin pour l'ensemble du monde, ce qui peut être tiré des forêts n'est pas négligeable, d'autant qu'il est possible, là où les conditions environnementales sont favorables, d'exploiter des taillis à courte rotation avec un rendement supérieur à 1 \exists . C'est déjà une stratégie développée par certains groupes industriels pour des contrées qui n'ont pas un accès facile à d'autres sources d'énergie.

On le voit, l'avenir n'est ni gris, ni rose. Le potentiel de la photosynthèse est vaste, encore faut-il savoir l'exploiter convenablement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) MÉRIAUX S., 1985 – Combustibles fluides de remplacement, Rapport de l'Académie des Sciences, Gauthier-Villars, Paris, 21-62
- (2) RÉRAT A., 1994 – Production alimentaire mondiale et environnement, Lavoisier, Paris, 101 pages
- (3) UK Section of the International Solar Energy Society (1976) – Solar Energy a UK assessment, UK-ISES, London, 263-294
- (4) World Ressources Institute – www.wri.org