

CHRONIQUE

QUELQUES SUJETS D'ACTUALITÉ

S'il est un problème à l'ordre du jour, c'est bien celui des ressources énergétiques ; la plupart des nations industrielles cherchent fébrilement à multiplier les leurs, alors que les nations qui en détiennent la plus grande part, très souvent du reste sous forme de combustibles fossiles, cherchent très naturellement à en tirer le meilleur profit. C'est peut être l'une des raisons pour lesquelles le Jury du Prix Nobel a voulu, en 1977, honorer le Professeur I. PRIGOGINE, pour ses études sur la thermodynamique des processus irréversibles, en rappelant indirectement ainsi que les formations végétales, en particulier, contribuent très efficacement à fixer une part importante de l'énergie du rayonnement solaire. Les idées du Professeur PRIGOGINE ne sont pas absolument nouvelles : elles ont été exposées, notamment, dans un *Traité de Thermodynamique* édité à Liège en 1950 (I. PRIGOGINE a enseigné à l'Université libre de Bruxelles), puis développées dans divers mémoires, et reprises dans un petit ouvrage, très dense, paru en 1962 aux Etats-Unis, traduit ultérieurement en français sous le titre : « Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles » (1). Il existe du reste actuellement, à l'Université de Bruxelles, une option « thermodynamique » pour les études avancées d'agronomie, de sylviculture et d'écologie ; mais ces spéculations ont été longtemps réservées à un petit nombre d'initiés et restent assez ardues. Il ne peut être question, en quelques lignes, de tenter de les exposer en détails, — ce que ne pourrait faire, du reste, d'une façon tout à fait correcte, qu'un spécialiste confirmé des problèmes de la thermodynamique — mais, grâce à un essai d'application pratique de ces principes, effectué par le Professeur A. GALOUX (qui a dirigé notamment la Station de Recherches des Eaux et Forêts de Groeendaal, en Belgique), et concernant un écosystème terrestre bien déterminé : une forêt feuillue des Ardennes belges (2), il est possible d'approcher certaines de ces conceptions nouvelles.

Une forêt peut être considérée, du point de vue de la thermodynamique « prigoginienne » comme constituée par un premier système dit « ouvert » (c'est-à-dire pouvant échanger de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur), représenté par l'ensemble des arbres, limités par leurs cellules épidermiques plus ou moins poreuses (feuilles, branches, troncs et racines) ; ce premier système est inclus dans un second système, également « ouvert » dans la direction du premier, et constitué, cette fois, par le sol et l'air qui entourent la forêt, jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère. Ces deux systèmes, pris ensemble, constituent un nouveau système dit « fermé » (c'est-à-dire qui ne peut échanger que de l'énergie avec l'espace) ; il convient de noter qu'un système complètement clos, ne pouvant échanger ni matière, ni énergie avec l'extérieur, est appelé : « isolé ».

De jour, le système « fermé » reçoit en permanence une certaine quantité d'énergie solaire, sous forme de radiations de courte longueur d'onde, et dont la moitié sont visibles, mais, de jour et de nuit, il en renvoie une quantité à peu près égale, soit sous forme de radiations de courte longueur d'onde réfléchies par l'atmosphère et la formation boisée, soit sous forme de radiations de grande longueur d'onde réémises par cet ensemble, réchauffé par le soleil ; une très faible partie (moins de 1 %) du rayonnement incident total est fixée par la photosynthèse. On se trouve ainsi en présence d'un système dit « en état stationnaire de

non équilibre », dans lequel le flux entrant (ici, d'énergie) est à peu près égal au flux sortant.

D'autres définitions sont reprises par PRIGOGINE : celle des processus réversibles (un système réalisant approximativement ce processus peut être représenté par un gaz qui, comprimé, s'échauffe, puis qui, une fois la chaleur produite dissipée, et réchauffé à nouveau, redonne approximativement l'énergie fournie pour le comprimer) — et celle des processus irréversibles (dans un calorimètre de Joule, par exemple, un certain travail mécanique est transformé en chaleur, mais en fournissant de la chaleur au calorimètre refroidi, il est impossible d'obtenir le travail initial). Or, les systèmes vivants, les forêts en particulier, sont justiciables des lois de la thermodynamique des processus irréversibles.

L'entropie revêt aussi une grande importance dans la thermodynamique de PRIGOGINE ; on sait que le mot lui-même recouvre plusieurs notions :

1) initialement, selon CARNOT-CLAUSIUS, l'entropie qui est exprimée par le rapport entre une quantité de chaleur (ou d'énergie), et une température absolue, est un critère (inversé...) de qualité : l'énergie solaire directe, qui possède une entropie réduite, est « noble », celle réémise par les corps réchauffés par le soleil est plus élevée, elle est plus « roturière » (PONTE et BRAILLARD) ;

2) selon les conceptions de BOLTZMANN, l'entropie est reliée au log. de la probabilité d'un état thermodynamique déterminé de la matière ; on peut approcher cette idée en considérant que, dans un récipient renfermant un gaz quelconque, il existe une très forte probabilité pour que toutes ses molécules occupent, à un instant donné, la totalité du récipient, avec des vitesses et des directions quelconques — alors que la probabilité pour qu'elles soient toutes rassemblées dans un secteur réduit du même récipient, avec la même vitesse et la même direction, est infime. Dans le premier cas, l'entropie du système est positive et élevée — dans le second cas, elle est négative : c'est la « néguentropie » ;

3) les théories de l'information utilisent des conceptions voisines de celles indiquées au paragraphe précédent : l'acquisition d'une information réduite et vague est facile (entropie élevée) — celle d'une information détaillée et précise est beaucoup plus difficile, car son obtention par le seul hasard est extrêmement improbable (entropie très faible = néguentropie). Par exemple, l'information génétique, incluse dans la graine, et qui règle le développement de l'arbre est fortement néguentropique.

I. PRIGOGINE démontre que, dans un état stationnaire de non équilibre d'un système fermé, l'entropie produite à l'intérieur de ce système (signe +) est égale et de signe contraire à l'entropie fournie au milieu extérieur (signe —).

Pour appliquer ces principes, A. GALOUX ne peut, évidemment installer des capteurs à la limite supérieure de l'atmosphère ; mais il les place dans, et un peu au-dessus du niveau supérieur des cimes des plus grands arbres de la forêt ; il détermine d'abord l'apport de radiations de courte longueur d'onde pendant la période de végétation active (dans l'exemple envisagé, les dates retenues sont le 25 mai et le 25 octobre, dates auxquelles l'écosystème forestier revient à la même température) ; cet apport est de 57.000 cal/cm². Il étudie également l'apport des radiations

de grande longueur d'onde, mais on ne les évoquera pas ici puisqu'elles sont réémises sans changement de qualité. Sur les 57.000 cal. atteignant la surface supérieure du massif boisé, 10.000 sont renvoyées, sans modification notable de leur qualité (albedo), le surplus est absorbé par la formation forestière qui s'échauffe et évacue alors 21.000 cal. sous forme de radiations de grande longueur d'onde, et environ 26.000 par convection (air échauffé) et évapotranspiration. La photosynthèse proprement dite n'en absorbe que 5 à 600. Le bilan énergétique global est donc à peu près nul pour la période envisagée (il est légèrement excédentaire, au milieu de l'été, et légèrement déficitaire au milieu de l'hiver).

Puis A. GALOUX calcule la variation de l'entropie du système fermé (la forêt et son environnement naturel) pendant la période de végétation, et il trouve, naturellement, que, recevant de l'énergie « noble » (provenant du soleil) et renvoyant de l'énergie plus « roturière », le système **fournit** de l'entropie au milieu extérieur, ce qui selon PRIGOGINE, ne peut se faire que s'il **produit**, lui-même, une quantité égale d'entropie. Cette production peut être

* * *

Restant dans le domaine de la bioénergétique végétale, on signalera un excellent article de P. CHARTIER (3) qui insiste sur le fait que la biomasse végétale produite chaque année représente en énergie environ 10 fois la masse des combustibles fossiles consommée dans le monde actuellement. Bien entendu, on sait que la mobilisation intégrale de cette biomasse se heurterait à des difficultés gigantesques, mais son utilisation partielle n'est nullement utopique et l'étude des mécanismes de la photosynthèse peut conduire à des procédés biologiques, ou même industriels, de production d'hydrogène, par exemple, combustible de choix et non polluant.

Les recherches sur la photosynthèse, autrefois considérées comme une simple curiosité, ou même comme une vue de l'esprit, par certains tenants des théories de l'humus, semblent se développer d'une façon exponentielle dans notre pays : après le riche traité « Photosynthèse et production végétale » de C. COSTES (4) et de ses collaborateurs, c'est un nouvel ouvrage collectif « Les processus de la production végétale primaire » qui vient de voir le jour, sous une présentation de A. MOYSE (5). La Revue : « Bois et Forêts des Tropiques » en a déjà présenté une analyse rapide, et il ne peut être question de revenir sur chacune des études qui le constituent, ce qui entraînerait l'auteur de cette chronique à des développements d'une ampleur exagérée. Concernant tout spécialement les forestiers, on s'attachera à extraire d'un chapitre dont le rédacteur principal est F. E. ECKARDT quelques éléments intéressants, mais malheureusement extrêmement fragmentaires.

La forêt de chêne vert de la région de Montpellier dont il est question ici, est étudiée grâce à un appareillage très complexe qui permet de déceler, notamment, l'interception par la forêt du rayonnement solaire, les échanges gazeux et la transpiration, les facteurs hydriques, en général, ainsi que la croissance en volume et en poids. Dans cette station l'éclairement énergétique naturel a été, pour l'année d'observation, de $5.400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (soit environ $130 \text{ kcal/cm}^2/\text{an}$). L'amplitude des variations de l'intensité de ce rayonnement va de 1 (en hiver) à 5 (en été). Le rayonnement actif sur la photosynthèse ($\varnothing$ AP des auteurs soviétiques) représente environ 48 % de l'éclairement énergétique total — ce qui correspond assez bien à ce que l'on admet très généralement, en cette matière. La feuille de chêne vert absorbe davantage de radiations dans le bleu et dans le rouge, que dans le vert, mais d'une façon habituelle, plus quand le rayonnement frappe sa face supérieure, que quand il frappe sa face inférieure (tomenteuse, à fort pouvoir réfléchissant). Le peuplement de chêne vert a un facteur de réflexion diffuse (albedo) de 12 %, au milieu de la journée, mais, comme la quasi-totalité des peuplements feuillus,

chiffrée, au total, à + 3,55 calories par degré Kelvin, par centimètre carré, pendant la période de végétation active. La seule production nette de l'écosystème (PNE) intervient pour 2,09 calories..., ce qui, grâce à un calcul rapide aboutit à la synthèse d'un tonnage annuel de 16 t de matières sèches par hectare. Il est à noter que l'évaluation de cette production établie en utilisant des méthodes tout à fait différentes, et directes, donne un chiffre très voisin.

Par ailleurs, en utilisant la notion d'entropie au sens de BOLTZMANN, on peut mettre en évidence, à l'intérieur du premier système ouvert (les arbres limités par leurs membranes poreuses) une réduction d'entropie de 0,06 calorie par degré Kelvin, par centimètre carré, et pendant la période de végétation active, réduction qui correspond à l'organisation des substances végétales (amidon, cellulose, lignine, et autres) à partir de l'eau et du dioxyde de carbone, circulant auparavant librement, et en pleine « anarchie » dans l'environnement naturel des arbres de la forêt. C'est cette réduction d'entropie qui caractérise, d'une façon très générale, l'activité constructive de tous les êtres vivants.

d'avantage dans la région spectrale des infra-rouges que dans celle des radiations visibles. On retrouve la même différence pour la transmission de la lumière dans les sous-bois : les zones d'ombre sont plus riches en infra-rouges, par temps ensoleillé, que les taches ensoleillées, où la composition du rayonnement est peu modifiée.

De très nombreuses mesures sont effectuées sur la marche de la photosynthèse en conditions d'humidité normale du sol, et en période de dessèchement ; dans ce dernier cas, on constate une diminution notable de l'activité photosynthétique des feuilles, surtout l'après-midi où, à la période « de dépression vespérale » très généralement observée, s'ajoute l'élévation de la température des feuilles et la fermeture plus ou moins totale des stomates. Dans la forêt de chêne vert étudiée, la surface foliaire est de 4,4 ha par ha de peuplement, la densité maximale étant observée dans la partie supérieure des cimes des arbres, à une hauteur de 9 à 10 m. La biomasse aérienne (troncs, branches et feuilles) s'élève à 270 t. par ha, et l'accroissement annuel de cette biomasse atteint environ 6,5 t par ha (chiffre à comparer avec ceux observés dans les Ardennes belges, pour des peuplements à chêne, hêtre et charme, où la biomasse produite annuellement atteint 12 à 15 t par ha, mais en englobant les parties souterraines, les semences, etc...).

Comme toutes les formations végétales, la forêt de chêne vert absorbe du dioxyde de carbone pour sa photosynthèse, mais en rejette par sa respiration ; le bilan général annuel est naturellement positif (puisque la forêt s'accroît), mais, positif pendant les 1^{er}, 2^e et 4^e trimestres, ce bilan est nettement négatif pendant le 3^e trimestre (étés chauds et secs caractéristiques du climat méditerranéen).

Le bilan énergétique du rayonnement actif sur la photosynthèse (rapport entre l'énergie effectivement fixée dans l'accroissement annuel, et l'énergie incidente) a été trouvé, ici, voisin de 0,5 %. On peut rapprocher ce chiffre de ceux trouvés par une méthode voisine par ALEXEEV, pour différents types de forêts de l'U. R. S. S., en considérant les mêmes éléments : radiations actives sur la photosynthèse, et accroissement de la partie aérienne de la biomasse forestière, et qui oscillent, la plupart du temps, entre 0,6 et 0,7 %. Ce taux pourra probablement être majoré ; non seulement par des moyens classiques (amélioration de la qualité des stations), mais aussi sans doute par la recherche d'espèces et de races utilisant bien mieux l'énergie lumineuse naturelle ; ne vient-on pas de trouver que certains mélanges ont des cycles photosynthétiques intermédiaires entre ceux en C³ et ceux en C⁴, que l'on croyait très récemment encore, caractéristiques des seules graminées tropicales, et de leurs très rares compagnes ?

L. R.

BIBLIOGRAPHIE

1. PRIGOGINE (I.). — Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles-Paris-Dunod (1968 réimprimé 1974), 160 p.
2. GALOUX (A.). — L'écosystème, système thermodynamique à processus irréversibles, 1973, non publié en français, publié en anglais : Gottinger Bodenkundliche Berichte, n° 30, 1974, pp. 131-149.
3. CHARTIER (P.). — Comment cultiver l'énergie ? *Sciences et Avenir*, N° sp. 19, 1977, pp 28-37.
4. COSTES (C.) et divers. — Photosynthèse et production végétale, 1975, Paris, Gauthier-Villars, 283 p.
5. MOYSE (A.) et divers. — Les processus de la production végétale primaire, 1977, Paris, Gauthier-Villars, 265 p.

Divers

UNE USINE DE PÂTE À PAPIER FLOTTANTE

Récemment vient d'arriver sur le Jari, affluent de l'Amazone, une usine de pâte à papier flottante.

Aussi longue que deux terrains de foot-ball, aussi haute qu'un immeuble de 16 étages, cette usine, montée sur barge tractée par remorqueurs, vient d'effectuer en 93 jours un périple qui l'a conduite de son lieu de construction, le Japon, jusqu'à son lieu de fonctionnement, le Jari, terme d'un voyage de près de 28.000 km autour de la terre. Elle sera vraisemblablement échouée sur un dock prévu à cet effet.

L'énergie nécessaire à la marche de cette unité papetière sera produite par une usine séparée, d'une puissance de 55.000 kW, amenée sur les lieux par les mêmes moyens.

L'usine du Jari sera opérationnelle en 1979 et l'on en attend en 1981 une production journalière de l'ordre de 750 t de pâte kraft blanchie.

La matière première ligneuse sera fournie par les 200.000 ha de concession que possède sur place l'industriel réalisateur de cet audacieux projet. Près de 100.000 ha de forêt ont déjà été coupés à blanc et reboisés par la plantation de 81 millions de tiges de *Gmelina arborea*.

Les responsables de l'entreprise indiquent qu'ils ont choisi la solution du transport par mer plutôt que celle de la construction sur place car celle-ci aurait pris beaucoup plus de temps à réaliser en raison du manque d'infrastructure routière et d'aménagements portuaires.

A PROPOS DE L'ARTICLE « PYROLYSE DES BOIS TROPICAUX » (n° 177, p. 51)

Une erreur typographique s'étant glissée dans les résultats indiqués au tableau n° 2, « Caractéristiques physico-chimiques des bois », p. 55, nous prions nos lecteurs de bien vouloir noter qu'il fallait lire les chiffres suivants :

	F	G Gmelina	T 1 Mélange riche en lignine
<i>Caractéristiques physiques</i>			
<i>Caractéristiques chimiques (% bois sec)</i>			
Lignine		25,05 (au lieu de 35,00)	35,3 (au lieu de 25,3)
Lignine + Ext. A. B.	24,85 (au lieu de 27,05)	28,0 (au lieu de 27,6)	