

# La notion de niveaux d'énergie et son intérêt en sylviculture

par Louis ROUSSEL

(Les chiffres placés entre parenthèses dans le texte renvoient à la bibliographie.)

## I - GENERALITES SUR LE ROLE DE L'ENERGIE NATURELLE DANS LA PRODUCTION LIGNEUSE

On a beaucoup écrit, ces dernières années, sur " l'usine forêt " et sur l' " arbre machine " qui, grâce au gaz carbonique de l'air, à l'eau et aux matières minérales du sol, fabriquent, d'une façon plus ou moins continue, des substances ligneuses diverses (en très grosse majorité du type " polyholosides "), en utilisant l'énergie naturelle fournie par le soleil. D'une production **théorique** de 3000 tonnes de matières sèches par hectare et par an (si l'on admet que la totalité des  $10^{13}$  petites calories reçues, chaque année, par un hectare de surfaces boisées, dans la partie Nord-Est de notre pays, pourraient être utilisées à la production ligneuse), on tombe, pratiquement, à 5 ou 6 tonnes seulement de matières sèches, extraites annuellement, souvent moins, rarement davantage. Le rendement énergétique brut de " l'usine forêt " ressort donc à 0,2 % environ (1). En agriculture, le même type de raisonnement conduit à un chiffre analogue, soit 0,2 % (2).

Mais, on peut se borner à considérer l'énergie incidente pendant la période de végétation la plus active (en gros, d'avril à septembre ou octobre), ou même la seule énergie réellement absorbée, pendant cette période, par les appareils foliacés (déduction faite de ce qui est renvoyé vers le ciel, ou albédo, de ce qui est retenu par les branchages et par les troncs, et de ce qui est transmis au sol). Dans ce dernier cas, et en évaluant non la masse ligneuse extraite par les récoltes annuelles, mais la totalité de la " biomasse " produite (bois du tronc et des branches, feuillages, racines), A. Galoux obtient des chiffres très supérieurs de rendement énergétique, et qui se rapprochent de 6 % (3). En 1968, du reste, cet auteur a avancé des données encore plus favorables,

Le lecteur aura facilement compris qu'il n'y a aucune discordance profonde entre ces divers éléments. Seule change la façon de présenter le problème.

De toutes façons, on ne doute plus guère actuellement, sauf chez quelques partisans attardés des théories de l'humus, que cette façon d'envisager la production forestière sous son aspect énergétique, ne soit tout à fait justifiée, et que les considérations théoriques qu'elle suscite ne puissent ouvrir des perspectives nouvelles, et des plus intéressantes pour les sylviculteurs. Le problème est, cependant, des plus vastes et des plus complexes, et l'on se bornera, dans les lignes qui vont suivre, à ne mettre en relief que certaines des idées de base les mieux établies, et, aussi, à signaler les lacunes ou les incertitudes qui freinent encore les progrès des chercheurs.

## II - REPARTITION VERTICALE DU RAYONNEMENT NATUREL

### Cas des peuplements homogènes

En photométrie, le flux énergétique ou lumineux reçu à un niveau quelconque (I) d'un milieu bien homogène, s'exprime par la relation classique :

$$F(I) = F(o) \cdot e^{-aI}$$

Dans cette formule, **F(I)** représente, comme il est dit, le flux reçu au niveau (I). **F(o)** est le flux incident, à son entrée dans le milieu homogène, **e** est la base de logarithmes népériens, et **a** le coefficient d'extinction, englobant l'ensemble des coefficients de diffusion, de réflexion et d'absorption. Ch. Perrin de Brichambaut, dans un récent et important ouvrage (4), indique la façon dont cette relation est établie. L'exposant **aI** en particulier, est relié à la densité optique **d**, notion classique également, par l'égalité **d = 0,434 aI**.

Dans une formation végétale bien homogène, on adopte, en général un type de relation voisin, aussi bien dans les cultures (5) que dans les forêts (6).

$$E(f) = E(o) \cdot e^{-Kf}$$

**E(f)** = énergie (ou plus exactement " flux énergétique ") reçue par unité de surface au niveau (f).

**E(o)** = énergie incidente (flux énergétique) reçue par unité de surface horizontale, au sommet de la végétation (déduction faite de l'albédo, c'est-à-dire de la proportion d'énergie renvoyée vers le ciel, par les cimes).

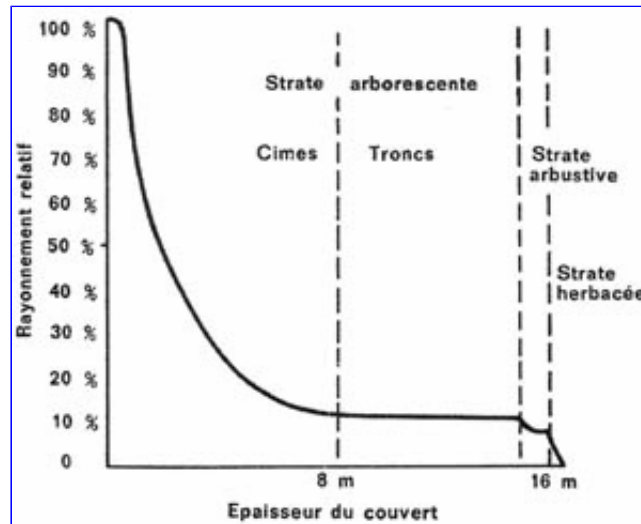
**e** = base des logarithmes népériens.

**K** = coefficient d'extinction des radiations.

**f** = indice foliaire partiel : surface des feuilles comprises entre le niveau **f** et le sommet de la formation végétale, par unité de surface du sol.

On remarquera que cette dernière formule diffère de la première sur certains points (introduction de l'albédo et de l'indice foliaire, remplaçant l'épaisseur du milieu homogène), mais, que d'une façon générale, il existe une grande similitude entre les deux. Par ailleurs, il

est très probable que, dans la seconde formule, le coefficient d'extinction **K** varie avec le type de temps (plus élevé par temps ensoleillé, plus faible par temps couvert). La figure 1 représente l'allure de la courbe théorique reliant le flux énergétique à l'épaisseur du couvert, telle qu'elle a été établie par J. Grulois dans un travail récent (6).



**Figure 1.**

- Répartition verticale théorique du rayonnement relatif dans un peuplement feuillu (d'après GRULOIS - 1967)

**Expérimentalement**, on constate que le milieu forestier se comporte, sous un type de temps déterminé, d'une façon assez conforme à la théorie. Les figures 2 et 3, présentées d'une façon un peu différente de celle adoptée pour la figure 1, résultent de mesures de rayonnement effectuées, en continu, ces dernières années, pendant des périodes variables, dans une jeune plantation résineuse dense, et dans une chênaie-hêtraie à charme, d'un type " taillis-sous-futaie vieilli ", et assez homogène. Le niveau d'énergie  $N(0)$  est fixé, pour éviter tout ombragement latéral de certaines cimes, d'une hauteur parfois irrégulière, à quelques mètres au-dessus de la surface des peuplements, sans déduction cette fois de l'albédo. Les niveaux  $N(1)$ ,  $N(2)$ ,  $N(3)$  représentent, respectivement 50 %, 25 %, 12,5 %... de l'énergie reçue au niveau  $N(0)$ . Pour fixer les idées, on indiquera qu'au niveau  $N(0)$ , et dans la région Nord-Est de l'Europe occidentale, l'éclairement énergétique est, pour une année complète, voisin de :

274 langley (ly), soit 274 petites calories par centimètre carré de surface horizontale par jour moyen ou 2637 Kilowatts (kW) par hectare (\*), en ne comptant que les heures de jour.

Pendant les six mois de végétation la plus active (d'avril à septembre), les chiffres ci-dessus deviennent :

400 langley par jour moyen ou 3850 kW / hectare (\*), en ne comptant que les heures de jour.

La correspondance entre les éclairagements, énergétiques et lumineux, est assez difficile à établir. L'énergie solaire, en effet, comprend des rayons de longueurs d'onde variées (de 0,3 à 2,5 ou 3  $\mu$ ), alors que la lumière, partie visible du rayonnement, ne s'étend que de 0,4 à 0,7  $\mu$  environ. MAURAIN, en 1937, se basant sur les travaux classiques de KIMBALL retient la correspondance suivante : 1 langley par minute = 72000 lux. DOGNIAUX (1960) en Belgique, à la suite d'observations de longue durée, admet un chiffre très voisin : soit 1 langley par minutes = 70000 lux. En Autriche, TRANQUILLINI (1960) donne des éléments un peu supérieurs : 1 langley par minute = 75000 lux, mais, dans les hautes régions des Alpes centrales, TURNER (1958) arrive à 1 langley par minute = 96000 lux. Au contraire, très récemment, GRULOIS et VYNCKE (1969), dans les Ardennes belges, trouvent que 1 langley par minute équivaut seulement à 53 500 lux environ, en plein découvert, beaucoup moins dans les sous-bois feuillus, en raison de l'émission, dans ce milieu, d'une forte quantité de rayons infrarouges par la face inférieure des feuilles. Cependant, en s'en tenant aux données moyennes (MAURAIN, KIMBALL, DOGNIAUX, TRANQUILLINI), on peut calculer que l'éclairement moyen annuel, en plein découvert, est de l'ordre de 27 000 lux, et, pendant la période de végétation la plus active, de l'ordre de 34 000 lux, avec, évidemment, de fortes variations de part et d'autre de ces chiffres.

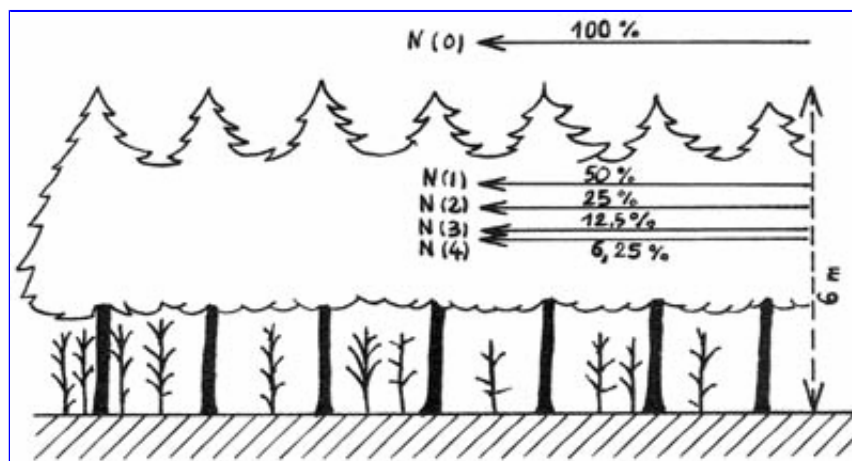


Figure 2. - Situation approximative des niveaux d'énergie ans une jeune plantation d'épicéa (d'après BAUMGARTNER -1956)

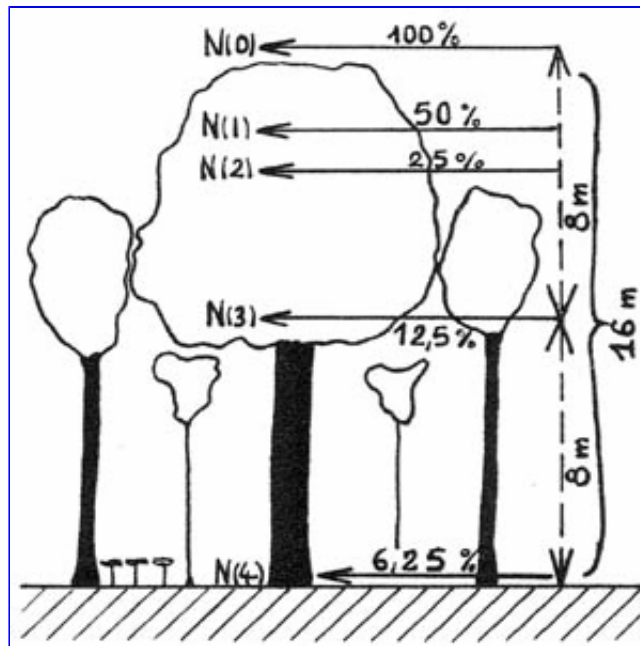


Figure 3. - Situation approximative des niveaux d'énergie dans une chênaie-hêtraie à charme (d'après GALOUX - 1968 et GRULOIS - 1967).

### Cas des ouvertures de formes diverses

La relation reproduite plus haut ne s'applique évidemment pas quand le peuplement devient discontinu, donc très hétérogène. Dans ce cas, et à défaut de données expérimentales assez nombreuses qui font encore défaut, on peut utiliser la méthode graphique dite du " cercle d'illumination totale " (7).

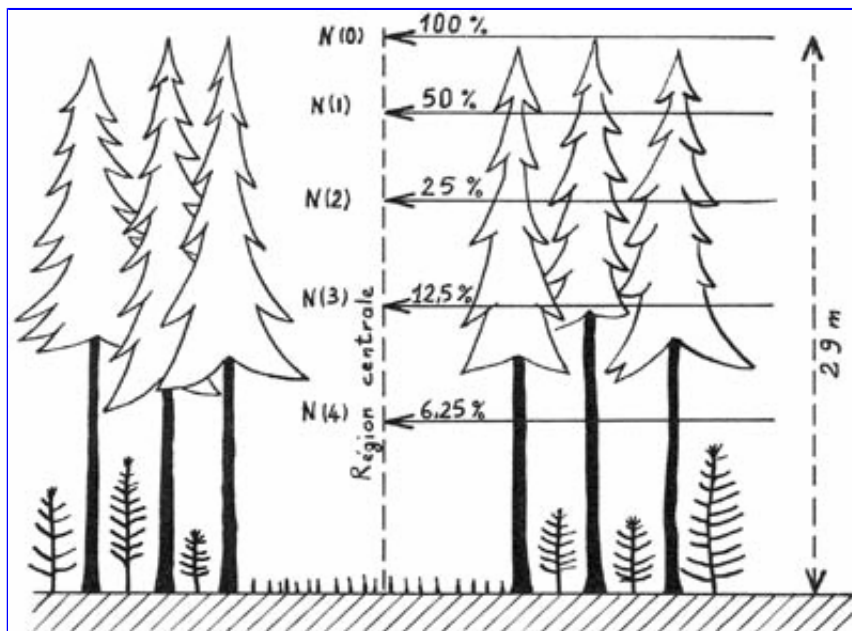


Figure 4. - Situation approximative des niveaux d'énergie dans la région centrale d'une petite trouée (Méthode théorique ROUSSEL 1962).

La figure 4 indique comment l'énergie naturelle se répartirait verticalement, dans la région centrale d'une " petite " trouée circulaire, (dont le diamètre est égal à la moitié de la hauteur des arbres du peuplement voisin, supposé par ailleurs très dense), mais, cette fois, **pendant toute l'année**, à une latitude nord voisine de 45-50°. Sous cette dernière réserve, les niveaux d'énergie sont choisis de la façon indiquée au paragraphe précédent, et les valeurs absolues mentionnées sont définies de la même façon.

### III - CONSIDERATIONS GENERALES SUR L'UTILISATION DES NIVEAUX D'ENERGIE EN SYLVICULTURE

Les figures 1, 2, 3 et 4 montrent, avec évidence, qu'il existe des niveaux d'énergie différents dans le milieu forestier. Le sylviculteur peut, par son action, intervenir, afin, surtout, de **déplacer vers le bas** chacun de ces niveaux (en diminuant la densité des peuplements homogènes, ou en élargissant les ouvertures). D'une façon très simple, par exemple, on peut relever un tel genre de modification dans le cas des coupes de régénération en futaie régulière : pendant la majeure partie de la durée de la révolution, la zone de forte absorption d'énergie sera maintenue dans la partie supérieure des peuplements principaux ; puis, elle sera abaissée progressivement (au cours des coupes successives) jusqu'au voisinage du niveau du sol pour y assurer le développement des jeunes éléments, naturels ou artificiels, destinés aux récoltes futures.

À l'inverse, mais bien plus lentement, le sylviculteur peut faire remonter la zone de forte absorption du rayonnement, en laissant croître des peuplements de forte densité.

Si chaque variété de chaque espèce ligneuse avait un " coefficient d'utilisation de l'énergie naturelle " absolument constant, quel que soit son âge, le niveau d'énergie dans lequel elle se développe, et l'intensité de l'éclairement qui règne au voisinage de ses aiguilles ou de ses feuilles, les choses seraient relativement simples. C'est du reste cette hypothèse qui a servi, et qui sert encore, assez fréquemment, pour des études théoriques concernant les rapports entre l'énergie naturelle et la production ligneuse. On pourrait ainsi facilement montrer :

- que la nature même du traitement (par exemple en futaie régulière ou en futaie jardinée), n'a, pratiquement, aucune influence sur la production globale. Pour une quantité déterminée d'énergie absorbée par les cimes (par exemple, dans une sapinière, avec un éclairement énergétique incident estimé sur une année complète à 2 637 kW / ha (\*), diminué d'un albédo de 10 % et d'une transmission au sol de 5 %, il résulterait une absorption par les cimes de 2 242 kW / ha (\*\*)), la production d'une espèce donnée serait toujours la même, dans un type de sol déterminé, suffisamment approvisionné en eau et en matières minérales dissoutes.

- que la production ligneuse varie en fonction de la densité des cimes (donc de celle des peuplements), d'une façon analogue à celle qui est établie expérimentalement (tables de production allemandes, par exemple), et ce d'une façon des plus logiques (1).

- que certaines exigences spéciales, relatives à la proportion idéale entre les divers types de peuplements, et imposées par les aménagistes (en vue d'assurer une production régulière dans le temps), déterminent, pour des espèces données, le mode de traitement lui-même. Par exemple, une forêt mélangée de sapins et d'épicéas, dans le Jura ou dans les Vosges, doit fournir des bois exploitables à 140 ans. Sa surface étant, par hypothèse de 140 hectares, on devrait régénérer, chaque année 1 hectare.

Pour que les renaissances naturelles puissent se développer d'une façon assez rapide pour pouvoir s'insérer dans la suite des peuplements, il est nécessaire que les jeunes sujets, pendant leurs quinze ou vingt premières années, reçoivent approximativement, de 900 à 1300 kW / ha (\*). Cette exigence résulte de nombreuses observations photobiologiques (1).

On peut envisager de recruter, chaque année, cet hectare de régénérations, sous forme de " petites trouées " (d'un diamètre égal à la moitié de la hauteur des grands arbres sur pied). Avec des arbres de 30 mètres de hauteur totale, ceci conduirait à 50 trouées de 2 ares, ne donnant, au total, aux régénérations installées, que 80 à 100 kW / ha (\*).

Si l'on pratique des " trouées normales ", l'apport de rayonnement atteindra 250 kW / ha (\*) et sera encore insuffisant. Avec de " grandes trouées ", d'un diamètre égal à deux fois la hauteur des grands arbres sur pied, on se rapprochera de l'optimum, avec 800 kW / ha (\*). Mais ce n'est qu'avec de " très grandes trouées " (d'un diamètre égal à quatre fois la hauteur des grands arbres sur pied) que l'on sera assuré d'un développement convenable des régénérations. Or, avec des arbres de 30 mètres de hauteur, la " très grande trouée ", représente un hectare. On est donc, dans le cas envisagé, orienté vers la coupe à blanc, chaque année, d'un hectare de peuplement ; ceci n'est plus exactement du jardinage, mais plutôt de la futaie régulière.

Bien entendu, il n'est nullement impossible de retenir, même avec l'épicéa pur, un traitement en futaie jardinée, en pratiquant des " trouées normales ". Mais la croissance des jeunes sujets sera ainsi ralentie, et leur incorporation dans la suite des peuplements rendue plus difficile. Il faudra abandonner certaines des données initiales : rapport soutenu, ou bien âge d'exploitation. Car ces diverses considérations constituent un système " contraignant " auquel il est difficile de se soustraire - les aménagistes le savent bien.

Dans le cadre de la conception initiale (chaque variété de chaque espèce a un coefficient d'utilisation de l'énergie constant quelque soit son âge, le niveau dans lequel elle se développe et l'intensité de l'éclairement qu'elle reçoit), on peut imaginer des types de futaies étagées (produisant surtout du bois de râperie par exemple) à utilisation optimale des radiations naturelles : entre les niveaux 0 et 1 seraient situées les cimes de pin (à bois pou coloré), entre les niveaux 1 et 2, celles d'épicéa, et entre les niveaux 2 et 3 celles de sapin. Cette notion a, du reste, été largement utilisée déjà par les sylviculteurs, mais sans références de base bien précises.

On le répète : ce type de raisonnement paraît logique, il a été adopté par divers théoriciens à titre de première approximation, et l'auteur de ces lignes s'y est, parfois, lui-même conformé.

#### **IV - COMPORTEMENT REEL DES ESPECES LIGNEUSES**

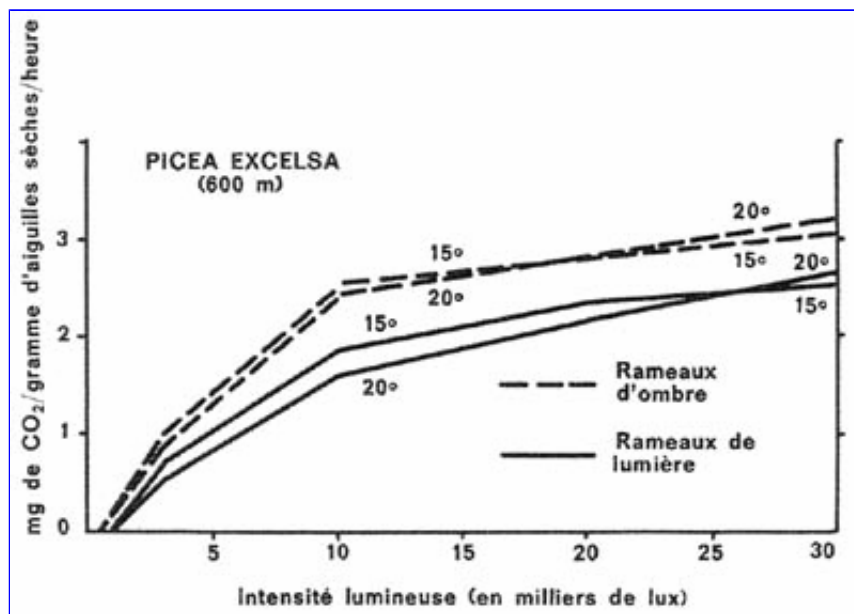
Malheureusement pour les amateurs de notions simples, les réactions des diverses espèces ligneuses paraissent un peu plus nuancées. Il faut reconnaître, du reste, qu'elles sont encore assez mal déterminées dans tous leurs multiples détails. Toutefois, dans certains cas, des études très poussées ont déjà été effectuées (grâce surtout aux appareils à absorption de rayons infrarouges : URAS ou IRGA), notamment par les chercheurs de l'Ecole d'Innsbruck (8 et 9). Le hêtre et l'épicéa, en particulier, commencent à être assez bien connus en ce qui concerne le rythme de leur photosynthèse en fonction de la lumière et de la température, de l'âge des sujets, et de la position des appareils foliacés dans les cimes. On peut calculer, dans divers cas, un " coefficient d'utilisation de la lumière ", caractéristique de l'activité photosynthétique des aiguilles et des feuilles, dont la prise en considération semble intéressante. Le calcul repose en effet sur des données expérimentales très précises : la quantité de CO<sub>2</sub>, effectivement assimilée, dans chaque cas, par unité de temps (une heure en général). Si l'on prend comme base de référence **1** le " coefficient d'utilisation " de l'appareil foliacé de pleine lumière, sous 10000 lux, par unité de poids sec et dans la région de la température optimale, on obtient ce qui suit :

		Picea excelsa	Coefficient d'utilisation
Rameaux de lumière	{	sous 10000 lux	1
		sous 20000 lux	0,72
		sous 30000 lux	0,54
Rameaux d'ombre	{	sous 10000 lux	1,43
		sous 20000 lux	0,88
		sous 30000 lux	0,62

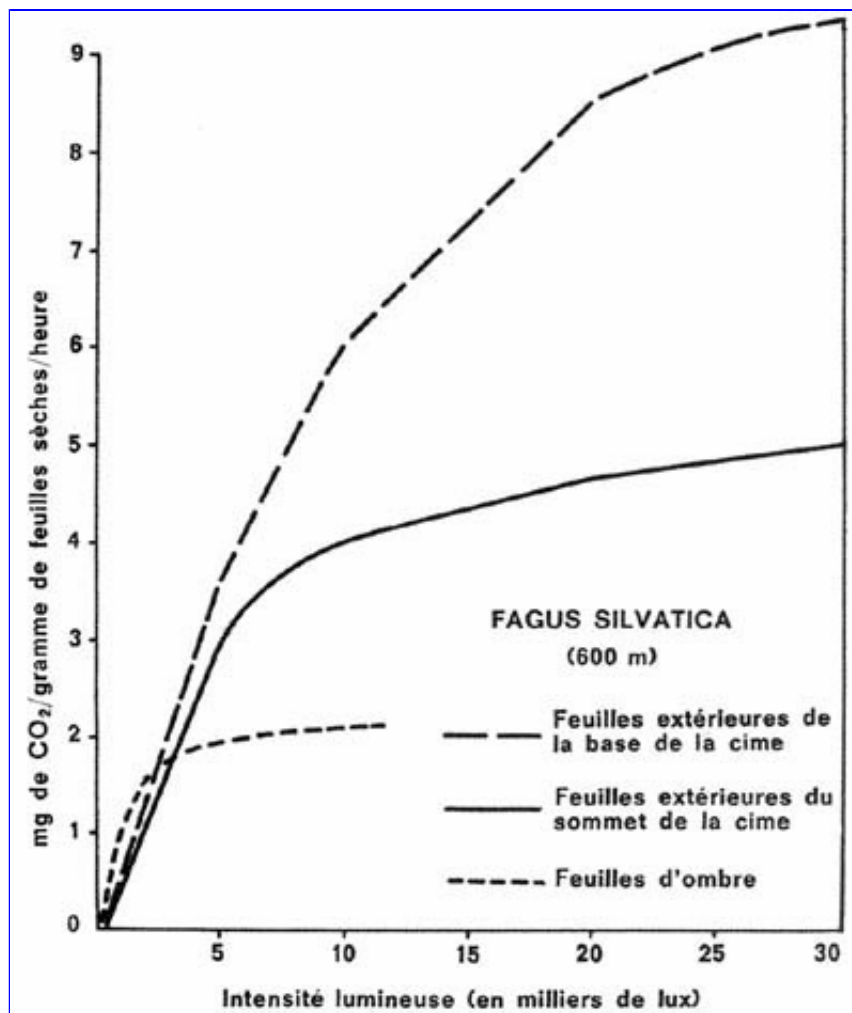
Ce qui signifie que le rameau de lumière absorbera deux fois plus de CO<sub>2</sub>, pour une quantité de lumière déterminée, sous 10000 lux que sous 30000 lux (figure 5).

		Fagus silvatica	Coefficient d'utilisation
Feuilles extérieures (sommet des cimes)	{	sous 10000 lux	1
		sous 20000 lux	0,60
		sous 30000 lux	0,43
Feuilles extérieures (base des cimes)	{	sous 10000 lux	1,5
		sous 20 000 lux	1,1
		sous 30000 lux	0,8
Feuilles intérieures	{	sous 1000 lux	de 2 à 2,5
		sous 10000 lux	0,5

Des relations analogues ont été trouvées en 1965 par RETTER, mais les valeurs absolues sont un peu différentes, en raison d'un perfectionnement apporté à la méthode de travail (figure 6).



**Figure 5.** - Assimilation nette du gaz carbonique de l'air, en fonction de la lumière, des aiguilles d'épicéa (intérieures et extérieures des cimes), aux températures de 15° C et de 20° C (d'après PISEK et WINKLER-1959).



**Figure 6.** - Assimilation nette du gaz carbonique de l'air, en fonction de la seule lumière, des feuilles de hêtre extérieures des cimes (base et sommet) (d'après PISEK & TRANQUILLINI - 1954) et des feuilles d'ombre typiques (d'après BOYSEN-JENSEN 1932).

En somme, on peut relever, pour l'épicéa et pour le hêtre :

- la supériorité, en ce qui concerne l'utilisation de la lumière, des appareils foliacés développés dans une lumière réduite, par rapport à ceux situés en permanence dans la région la mieux éclairée des cimes. Cette supériorité se maintient, pour l'épicéa, aux éclaircissements élevés, mais s'atténue et disparaît rapidement, dans le cas du hêtre.

- la " saturation " **progressive**, dans tous les cas, des parenchymes chlorophylliens, lors de la majoration de l'éclaircissement (par exemple, à partir de 10000 lux dans le cas du hêtre). Ceci ne signifie nullement, du reste, que la feuille du hêtre ou l'aiguille d'épicéa, développée dans une position déterminée dans les cimes, n'assimile pas davantage, d'une façon absolue, sous 30 000 lux que sous 20 000 lux - mais que le **rapport** entre l'énergie effectivement utilisée à assimiler le gaz carbonique de l'air, et l'énergie incidente, diminue avec l'intensité de l'éclaircissement.

On remarquera, à ce propos, que les chiffres reproduits ci-dessus ne font mention que de l'éclaircissement " lumineux " (on l'a vu plus haut, il existe également un éclaircissement " énergétique ") : ceci pour respecter intégralement les données expérimentales publiées par les chercheurs. Il y a cependant, on le sait, une correspondance entre ces deux éclaircissements, mais les relations semblent complexes. Cependant, à titre de large approximation, on pourrait retenir que l'éclaircissement de 10000 lux, pris comme base dans le calcul du " coefficient d'utilisation de la lumière ", correspond à un peu moins de 30 % de l'éclaircissement reçu en plein découvert. Celui de 20000 lux correspond à 60 %, et celui de 30000 lux, à 90 % environ du même plein découvert. Ceci en considérant la valeur moyenne enregistrée pendant les 5 à 6 mois de végétation la plus active.

Le sylviculteur qui cherchera à étendre ces notions rencontrera des difficultés sérieuses à trouver des données aussi précises, pour toutes les espèces ligneuses dont il envisage l'emploi. Certains éléments existent, d'une façon éparsée, dans de très nombreuses études publiées récemment un peu partout dans le monde (les chercheurs japonais ont, notamment, fait un gros effort dans cette direction). Aussi convient-il de signaler un travail de synthèse important (quoique d'un volume réduit), réalisé en 1969 par W. LARCHER (10), l'un des bons spécialistes de ce genre de problème. Plus de 100 espèces d'arbres, situées dans les régions les plus variées, sont ainsi sommairement analysées.

Voici quelques conclusions qui ressortent de l'examen des multiples chiffres recueillis dans cette synthèse :

- de nombreux arbres résineux : *Picea excelsa*, *Picea glauca*, *Pinus cembra*, *Pinus resinosa*, *Abies balsamea*, notamment, ont non seulement un " coefficient d'utilisation de la lumière " plus élevé pour leurs rameaux d'ombre que pour ceux de lumière, mais la photosynthèse maximale nette des premiers, en lumière de saturation spécifique, est voisine, et parfois supérieure, à celle des rameaux de lumière, dans leur lumière de saturation spécifique également. Les jeunes semis (et ceci est intéressant au sujet de la conduite des opérations de régénération), sont souvent plus actifs, du point de vue de leur nutrition carbonée, quand ils se développent dans une lumière

modérée, que dans une lumière trop vive.

- par contre, de nombreux arbres feuillus (et l'énumération va des espèces européennes comme *Fagus sylvatica* et *Quercus pedunculata*, aux espèces tropicales comme *Mangletia glauca* et *Erythrophleum fordii*, en passant par celles du Pacifique ou de l'Australie) se comportent un peu à la façon de *Fagus sylvatica* : leurs feuilles d'ombre sont caractérisées par une photosynthèse modérée sous leur lumière de saturation spécifique, et leur activité photosynthétique se stabilise sensiblement par la suite. Mais leurs feuilles de lumière continuent à accroître leur activité jusqu'à des éclaircissements de saturation bien plus élevés.

En se plaçant du point de vue de la nutrition carbonée, on enregistre donc une nette différence de comportement, vis-à-vis de la lumière entre la majorité des arbres feuillus, et un certain nombre de résineux.

Il est à noter du reste que, quelque soit la position des appareils foliacés dans les cimes et le microclimat lumineux qui y règne, on n'enregistre pratiquement pas de " photosynthèse négative ", c'est-à-dire une perte de substances hydrocarbonées, par la respiration, supérieure à la synthèse de ces mêmes substances, réalisée par la photosynthèse. Tous les organes chlorophylliens concourent donc, d'une façon très différente évidemment, mais la plupart du temps positive à la nutrition carbonée de l'arbre qui les supporte. Ceci sauf de nuit, bien entendu.

## CONCLUSION

En somme, dans un certain nombre de cas (arbres résineux notamment), les considérations qui précèdent atténuent un peu l'importance que l'on pensait, au début, pouvoir attacher à la considération des niveaux d'énergie dans les peuplements forestiers. On retrouve, et l'on retrouvera sans doute de plus en plus, au fur et à mesure que les études se développeront et se préciseront, **que l'arbre n'est pas uniquement une machine**, aux réactions impérativement dictées par les conditions physiques, mais également un être vivant, qui, de lui-même, s'efforce de tirer le meilleur parti du microclimat dans lequel il est établi.

Ses possibilités d'adaptation sont cependant assez strictement limitées : une régénération de chêne pédonculé, dont les feuillages ne reçoivent qu'un éclaircissement énergétique de 150 à 200 kW / ha (\*) est destinée à disparaître rapidement - une plantation d'épicéa maintenue sous un éclaircissement énergétique de 300 à 400 kW / ha (\*) ne se développera que d'une façon très lente, etc.

On peut donc, à titre de première approximation, continuer à élaborer les grands traits d'une analyse systématique de l'utilisation de l'énergie dans les peuplements forestiers, selon, par exemple, les types de raisonnement exposés aux paragraphes ci-dessus (et selon beaucoup d'autres, évidemment...). Mais il conviendra de ne jamais considérer ces positions comme définitives, et, au fur et à mesure que des relations plus précises (du genre de celles exposées au paragraphe IV ci-dessus) seront mises en évidence, il importera de corriger les données obtenues, de les nuancer, afin de se rapprocher, peu à peu, d'un mode de raisonnement plus conforme à la très complexe réalité.

(\*) puissance moyenne ramenée à une durée d'ensoleillement de 12 heures par jour — en multipliant cette valeur par 12, on obtient une quantité d'énergie par hectare exprimée en kWh.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) ROUSSEL (L.). - Les radiations naturelles et la forêt. Bulletin trimestriel de la Société forestière de Franche-Comté, n° 2 et n° 4, 1966 ; n° 8, 1967.
- (2) GESLIN (H.), BOUCHET (R.J.). - Climat et production végétale : la bioclimatologie. In : L'Institut National de la Recherche Agronomique. Edition du 20° anniversaire 1946-1966, 1966, pp. 35-58 (Regards sur la France n° 32, sept. 1966).
- (3) GALOUX (A.). - Approche énergétique et cybernétique de la hêtraie. Lejeunia, no 23, 1963.
- (4) PERRIN de BRICHAMBAUT (Ch.). - Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. - Paris, Gauthier-Villars, 1963.
- (5) CHARTIER (Ch.). - Lumière, eau et production de matière sèche du couvert végétal. Annales agronomiques, vol. 18, n° 3, 1967, pp. 301-331.
- (6) GRU LOIS (J.). - Extinction du rayonnement global, tropismes et paramètres foliaires. Bulletin de la Société royale de botanique de Belgique, vol. 100, fasc. 2, 1967, pp. 315-334.
- (7) ROUSSEL (L.). - Étude théorique élémentaire de la trouée et de la bande. Bulletin trimestriel de la Société forestière de Franche-Comté, n° 2, juin 1962, pp. 552-560.
- (8) PISEK (A.), TRANQUILLINI (W.). - Assimilation und Kohlenstoffhaushalt in der Krone von Fichten und Rotbuchenbäumen. Allgemeine Botanische Zeitung, Band 141, 1954.
- (9) PISEK (A.), WINKLER (E.). - Licht und Temperaturabhängigkeit der CO<sub>2</sub>. Assimilation von Fichte, Zirbe und Sonnenblume. Planta, n° 53, 1959.
- (10) LARCHER (W.). - The effect of environmental and physiological variables on the carbon dioxide gas exchange of trees. Photosynthetica, vol. 3, n° 2 1969.