

Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces forestières méditerranéennes

Jacqueline DOAT et J.Ch. VALETTE *

avec la collaboration technique de D. ASKRI, L. CAUMARTIN, M. BETTACHINI *, M. MORO *

*C.T.F.T., Division Cellulose-Chimie,
45 bis, avenue de la Belle-Gabrielle, F 94130 Nogent-sur-Marne*

** I.N.R.A., Station de Sylviculture méditerranéenne,
avenue A.-Vivaldi, F 84000 Avignon*

Résumé

Le pouvoir calorifique supérieur (P.C.S.) est le maximum d'énergie que peut dégager une combustion. Il conduit au bilan énergétique d'un incendie de forêt.

Rapporté au poids de matière sèche ou au poids de la seule matière organique, le P.C.S. permet de hiérarchiser les végétaux selon leur caractère énergétique. Bien que les P.C.S. croissent avec la lignification des tissus, ils conduisent au classement par ordre décroissant :

- feuilles de bruyère arborescente,
- feuilles de pin d'Alep,
- feuilles d'arbousier et pousses terminales d'ajonc épineux,
- feuilles de chêne vert et de chêne kermès.

Les P.C.S. de ces espèces méditerranéennes sont supérieurs ou au moins égaux à ceux d'espèces de régions plus tempérées.

1. - Introduction

Chaque année en région méditerranéenne française — dans les six départements de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, les cinq départements de la région Languedoc-Roussillon, les deux départements de la région Corse et l'Ardèche — près de 40 000 ha de formations forestières, plus ou moins dégradées, sont la proie des flammes. Une meilleure connaissance des facteurs ayant une influence sur l'éclosion et sur la propagation de l'incendie devrait conduire à une meilleure prévention et à une économie sur les moyens de lutte.

En particulier, la connaissance de l'énergie dégagée lors d'un incendie et celle présente, à l'état potentiel, dans la formation forestière est indispensable. La mesure de la phytomasse aérienne du combustible et celle de la quantité de chaleur dégagée par unité de masse lors de la combustion constituent une approche satisfaisante de cette connaissance.

Si des mesures classiques permettent de répondre à la première préoccupation, seul le « débit calorifique », contribution d'un échantillon à un dégagement énergétique global, donne la quantité de chaleur dégagée en fonction du degré de destruction du végétal. La méthode décrite par E.E. SMITH (1972) pour l'étude des matériaux de construction est pour l'instant la seule utilisable malgré ses imperfections. Une méthode adaptée aux végétaux est en cours d'élaboration à la station de sylviculture méditerranéenne.

La mesure du pouvoir calorifique supérieur — P.C.S. — reste donc actuellement la seule voie pour quantifier cette énergie potentielle car, ainsi que l'écrit W.A. HOUGH (1969) « bien qu'une combustion complète n'ait jamais lieu au cours d'un incendie de forêt, la mesure du P.C.S. fournit une donnée de base pour déterminer le débit calorifique potentiel dans de tels incendies ».

Le pouvoir calorifique d'un corps est la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de poids de ce corps. Il est dit « supérieur » lorsque la combustion est effectuée à volume constant et que l'eau formée au cours de la combustion est condensée. Il est dit « inférieur » lorsque la combustion est effectuée à pression constante — la plupart du temps à la pression atmosphérique — et qu'ainsi l'eau se vaporise librement. Les combustibles sont habituellement caractérisés par leurs P.C.S. :

- la mesure est normalisée par l'AFNOR ;
- les valeurs sont les maxima des énergies disponibles et satisfont aux critères de reproductibilité ;
- les mesures directes du P.C.I. sont plus aléatoires.

Comme l'indique G. HEIM (1974), les P.C.S. d'espèces végétales ont été mesurés, aussi bien en France qu'à l'étranger, surtout par des écologistes « pour le calcul du rendement énergétique et la production primaire ainsi que pour l'étude des chaînes trophiques ».

En 1969, F.B. GOLLEY conclut que les espèces de la mangrove ont généralement des P.C.S. plus élevés que les autres espèces tropicales, que ces dernières ont des P.C.S. plus faibles que ceux des espèces des régions tempérées ou alpines, alors qu'en 1977 J. DOAT prouve que les P.C.S. des bois des espèces tropicales sont, en général, plus élevés que ceux des bois des feuillus européens.

Toujours en 1969, W.A. HOUGH publie une étude portant sur toute une série d'espèces forestières du Sud et de l'Est des U.S.A. Il propose une classification des combustibles forestiers en quatre catégories :

- P.C.S. inférieur à 4 000 cal/g (16,7 kJ/g).
- P.C.S. compris entre 4 000 et 4 500 cal/g (16,7 et 18,8 kJ/g).
- P.C.S. compris entre 4 500 et 5 000 cal/g (18,8 et 20,9 kJ/g).
- P.C.S. supérieur à 5 000 cal/g (20,9 kJ/g).

D.A. BOAG & J.W. KICENIUK (1968) montrent qu'à une faible teneur protéinique des aiguilles du pin de Murray correspond un P.C.S. élevé. W. LARCHER (1973) et son équipe mettent en relation une importante accumulation de lipides dans les feuilles âgées et les tiges de *Loiseleuria procumbens* (L.) Desv. avec un P.C.S. élevé.

Enfin, G. HEIM (1974) fournit les P.C.S. de 37 espèces autochtones de la région de Montpellier, prélevées surtout au printemps ; il met en parallèle « les fluctuations des valeurs énergétiques et la composition chimique des tissus et des organes ».

La présente étude est le fruit d'une active coopération :

— de la division cellulose-chimie du C.T.F.T. qui a effectué les mesures de P.C.S. ;

— de la station de sylviculture méditerranéenne de l'I.N.R.A. qui a effectué les prélèvements d'échantillons et l'analyse des résultats.

Elle présente les P.C.S. des principales espèces forestières méditerranéennes, met en évidence les différences spécifiques, fait apparaître les variations saisonnières, permet enfin le calcul de la « puissance du front de feu » par application de la formule de BYRAM.

2. - Méthodes et matériels

2.1. - Définitions

Le P.C.S. est mesuré dans un calorimètre adiabatique et s'exprime classiquement en calories (*) par gramme de matière sèche. Dans le système d'unités international, la chaleur étant exprimée en Joules, le P.C.S. s'exprime en J/g ou en kJ/g.

Le pouvoir calorifique inférieur P.C.I. se déduit du P.C.S. par application d'une formule conventionnelle mentionnée dans la norme AF M03-005 qui revient, pour les combustibles végétaux dont la teneur en hydrogène est de l'ordre de 6 p. 100, à déduire 320 cal/g (1 340 J/g) du P.C.S.

Cette valeur est très proche de celle retenue par W.A. HOUGH (1969) qui cite les travaux de BYRAM.

Le P.C.S. comme le P.C.I. peuvent être rapportés à la matière verte par la formule que propose NIERAT, cité par J. DOAT (1977).

$$Pe = Po \times \frac{100 - E}{100} - 6E$$

E : teneur en eau, en pourcentage de la matière verte.

Pe : pouvoir calorifique de la matière à une teneur en eau E.

Po : pouvoir calorifique de la matière sèche.

(*) Une calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température d'un corps dont la chaleur massique est égale à celle de l'eau à 15 °C sous la pression atmosphérique normale. 1 calorie = 4,1855 joules.

Enfin, les pouvoirs calorifiques peuvent être rapportés au poids de la seule matière organique par application de la formule suivante :

$$\text{Porg.} = \frac{100 \text{ Ptot.}}{100 - \text{Ce}}$$

Porg. : pouvoir calorifique de la matière organique.

Ptot. : pouvoir calorifique de la matière organique et des éléments minéraux.

Ce : teneur en cendres, en pourcentage de la matière sèche.

2.2. - Méthodologie

Après passage à l'étuve durant 18 h à 105 °C, la mesure est faite sur environ 1,8 g de matière sèche broyée puis comprimée en une pastille à l'aide d'une presse à main. Lorsqu'il s'agit de tiges dures lignifiées ou de bois, on utilise également le matériau sec fractionné en portions de la taille d'une demi-allumette.

La pression d'oxygène de la bombe calorimétrique est portée à 30 bars après introduction de l'échantillon : combustion en atmosphère sur-oxygénée, donc complète. La bombe est alors placée dans le calorimètre adiabatique de Gallempkamp. En fin de combustion, déclenchée électriquement, une fois l'équilibre thermique établi la température de l'eau du calorimètre est mesurée au 5 millièmes de degré Celsius. Une mesure préliminaire, à l'aide d'acide benzoïque rigoureusement pur de P.C.S. égal à 6 319 cal/g (26 448 J/g) permet de calculer la « valeur en eau » du calorimètre.

La précision des mesures du P.C.S. est de l'ordre de 1 p. 100 au seuil de probabilité de 95 p. 100. Pour une même espèce, deux mesures sont systématiquement effectuées, une troisième étant réalisée en cas d'écart supérieur à la précision entre les deux premières.

Malgré la rapidité de la manipulation et les précautions prises, les échantillons se rechargent légèrement en eau entre la sortie de l'étuve et la mise à feu de la bombe. Le biais serait de l'ordre de la précision de la mesure.

2.3. - Les végétaux

L'étude de l'année 1979 a porté sur des espèces arborées et arbustives de Provence calcaire et de Provence cristalline.

Le tableau n° 1 comporte aussi l'indication de la partie du végétal systématiquement étudiée.

La végétation est collectée à la fin de chaque mois et le stade phénologique des végétaux est systématiquement noté. Les rameaux feuillés sont prélevés, autant que faire se peut, sur les mêmes individus pour limiter au maximum les sources d'hétérogénéité de l'échantillonnage.

TABLEAU 1

*Matériel végétal utilisé**Studied vegetation*

Espèces étudiées	Provence		Formation		Partie du végétal
	Calcaire	Cristall.	Arborée	Arbustive	
<i>Erica arborea</i> L. Bruyère arborescente		×		×	Feuilles
<i>Pinus halepensis</i> Mill. Pin d'Alep	×		×		Aiguilles
<i>Ulex parviflorus</i> Pourret Ajonc épineux	×			×	Sommités *
<i>Arbutus unedo</i> L. Arbousier		×		×	Feuilles
<i>Quercus ilex</i> L. Chêne vert	×		×		Feuilles
<i>Quercus coccifera</i> L. Chêne kermès	×			×	Feuilles

* Sommités : extrémités des rameaux latéraux et terminaux.

Des lots sont ensuite constitués en veillant :

- à ne conserver que les feuilles de chênes, de la bruyère et de l'arbousier ;
- à enlever la gaine des aiguilles de pin ;
- à broyer le matériel végétal après un premier passage à l'étuve, opération indispensable pour homogénéiser les échantillons d'ajonc épineux.

3. - Résultats et discussion

L'examen du tableau n° 2 montre que, bien que le P.C.S. évolue au cours de l'année, il atteint des valeurs caractéristiques pour chacune des six espèces.

3.1. - Evolution du pouvoir calorifique supérieur

Le tableau n° 2 fournit pour chacun des douze mois de l'année 1979, les deux mesures retenues pour chaque espèce du tableau n° 1. La figure 1 matérialise cette évolution.

TABLEAU 2

Evolution du P.C.S. au cours de l'année (cal/g)
Annual variation of the high calorific value (cal/g)

Espèce Mois	Bruyère arborescente	Pin d'Alep	Ajonc épineux	Arbousier	Chêne vert	Chêne kermès
01	5 819 5 821	5 404 5 419	5 093 5 072	5 040 5 017	4 849 4 868	4 759 4 761
02	5 845 5 875	5 530 5 510	4 960 4 965	4 924 4 945	4 810 4 770	4 691 4 685
03	5 690 5 695	5 310 5 295	4 950 4 985	4 930 4 935	4 810 4 810	4 540 4 575
04	5 624 5 610	5 439 5 464	5 011 5 018	5 044 5 052	4 806 4 801	4 888 4 854
05	5 588 5 614	5 393 5 393	4 926 5 028	5 016 5 028	4 830 4 793	4 720 4 728
06	5 637 5 649	5 139 5 129	4 991 5 020	4 848 4 880	4 686 4 737	4 723 4 721
07	5 670 5 625	5 116 5 115	5 002 4 952	4 917 4 916	4 878 4 875	4 753 4 751
08	5 867 5 894	5 195 5 185	4 980 4 973	4 944 4 954	4 858 4 854	5 020 4 970
09	5 709 5 699	5 223 5 198	4 936 4 930	4 986 *	4 845 *	4 785 4 826
10	5 762 5 796	5 481 5 510	4 995 4 974	5 045 5 058	4 937 4 979	4 866 4 847
11	5 757 5 758	5 307 *	4 979 5 000	5 042 5 045	4 869 4 850	4 863 4 871
12	5 963 5 981	5 147 5 162	5 067 5 059	5 041 5 075	4 970 4 952	4 719 4 706

* Valeurs absentes ou aberrantes, remplacées par la moyenne des 11 couples de P.C.S.



FIG. 1

Comparison des P.C.S.

Comparison of high calorific values

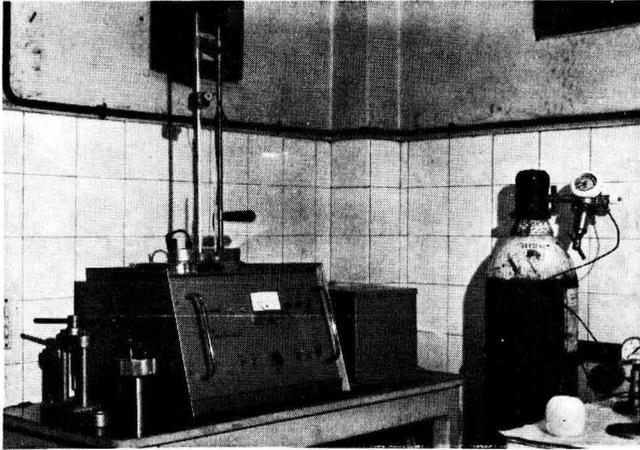


PHOTO 1

*Le calorimètre adiabatique (et la bombe)
utilisés pour les mesures des pouvoirs calorifiques supérieurs
Adiabatic calorimeter for calorific value measurements*

Au cours des quatre premiers mois, les échantillons sont prélevés sur des pousses d'un an, apparues en 1978. A partir du mois de mai 1979, les nouvelles pousses sont suffisamment développées pour constituer les échantillons : les P.C.S., du printemps à l'août, sont donc mesurés sur des « pousses de l'année ». Puis, de septembre à décembre, les pousses 1979, aoûtées, sont considérées comme étant âgées d'une saison de végétation : elles se comportent déjà comme celles de début d'année.

Au cours de l'année, l'évolution du P.C.S. est régulière. Les toutes jeunes feuilles ou aiguilles, aux tissus alors très riches en cellulose et pauvres en lignine, présentent des P.C.S. de valeurs inférieures à ceux des feuilles âgées dont les tissus se sont enrichis en lignine par épaissement des parois cellulaires. L'augmentation des valeurs du P.C.S. et sa vitesse de variation caractérisent les espèces.

3.11. Feuilles de sommités de bruyère arborescente

Les P.C.S. évoluent entre 5 588 cal/g en mai et 5 981 cal/g en décembre (23,4 à 25 kJ/g), soit une amplitude de 393 cal/g.

Deux ensembles se distinguent nettement :

— les valeurs hivernales élevées liées à la période d'arrêt de l'élongation des tissus ;

— les valeurs printanières et estivales, plus faibles, qui accompagnent la formation puis l'allongement des pousses de l'année 1979.

Un pic d'août, inexpliqué, précède de peu le passage d'un ensemble à l'autre.

3.12. *Aiguilles terminales du pin d'Alep*

Les P.C.S. évoluent de 5 115 cal/g en juillet à 5 530 cal/g en février (de 21,4 à 23,1 kJ/g), soit une amplitude de 415 cal/g.

Deux populations se distinguent :

— celle qui correspond aux P.C.S. des aiguilles « adultes » qui évoluent entre 5 295 et 5 530 cal/g ;

— et celle, de juin à octobre, qui regroupe les P.C.S. des aiguilles de l'année 1979, passant de 5 115 à 5 510 cal/g.

En novembre et décembre, le site habituel étant inaccessible, les aiguilles ont été prélevées sur d'autres individus, ce qui explique vraisemblablement une certaine discontinuité dans les résultats, le P.C.S. d'une espèce variant parfois d'un sujet à l'autre.

3.13. *Sommités d'ajonc épineux*

Les P.C.S. varient très peu autour de 4 994 cal/g (20,9 kJ/g). Le minimum est atteint en mai — 4 926 cal/g — durant la période d'active élongation des tissus. Le maximum a lieu en hiver — décembre et janvier : 5 093 cal/g — lors de l'arrêt de l'élongation et pendant la floraison.

La stabilité des résultats peut provenir de l'échantillonnage : l'absence de dimorphisme foliaire décelable à l'œil et la constance dans les formes architecturales conduisent à des lots apparemment homogènes d'un bout de l'année à l'autre.

3.14. *Feuilles de sommités d'arbousier*

Leurs P.C.S. évoluent entre 4 848 cal/g et 5 075 cal/g (20,3 et 21,2 kJ/g) soit une amplitude de 227 cal/g.

L'écart entre les P.C.S. de la période d'arrêt d'élongation et ceux de la période d'allongement est important malgré les valeurs de février et mars qui se détachent des valeurs hivernales pour des raisons inexplicées. A noter que les P.C.S. d'avril et de mai ont été mesurés sur des feuilles de pousses de l'année 1978.

Les valeurs atteintes en septembre — 5 354 et 5 137 cal/g — sont probablement erronées car leur différence de 217 cal/g, quatre fois supérieure à la précision, aurait dû entraîner la réalisation d'une troisième mesure qui n'a pu être effectuée.

3.15. *Feuilles de sommités de chêne vert*

Leurs P.C.S. se situent aux alentours de 4 840 cal/g (20,3 kJ/g) et deux pics se dessinent :

— en juin, période d'allongement des tissus, P.C.S. minimum de 4 686 cal/g ;

— en octobre, période d'arrêt de l'élongation, P.C.S. maximum de 4 979 cal/g.

En mai, le chêne vert porte à la fois des sommités de l'année 1978 et des sommités développées en 1979. La comparaison des P.C.S. des tissus anciens lignifiés — 4 830 et 4 793 cal/g — avec ceux des jeunes tissus très celluloseux — 4 648 et 4 660 cal/g — est très instructive.

L'espèce n'a pu être étudiée en septembre.

3.16. Feuilles de sommités de chêne kermès

Leurs P.C.S. évoluent autour de 4 770 cal/g (20 kJ/g). Deux pics existent ici aussi, en mars et en août, difficiles à mettre en relation avec le stade phénologique.

Comme le chêne vert, le chêne kermès a la particularité de présenter en mai des sommités de l'année 1978 et de l'année 1979. Les P.C.S. des jeunes feuilles sont de 4 485 et 4 486 cal/g tandis que ceux des feuilles de l'année précédente sont de 4 720 et 4 728 cal/g ; l'écart est donc très important.

3.2. - Spécificité du pouvoir calorifique supérieur

Les variations des P.C.S. sont influencées par les stades phénologiques. Toutefois, l'amplitude de ces variations reste comprise entre 5 et 10 p. 100 des différentes moyennes arithmétiques. Au sein du tableau 3 ont été regroupés :

— la moyenne arithmétique des 22 ou 24 mesures effectuées

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

— l'estimation de l'écart-type : σ

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

— le coefficient de variation

$$cv = \sigma/\bar{x}$$

— les P.C.S. minimum, médian et maximum.

Un test de Newman et Keuls effectué à partir des données mensuelles permet d'établir au seuil de probabilité de 95 p. 100 le classement fourni au sein du tableau 3 : une même lettre regroupe les espèces dont les P.C.S. moyens ne sont pas statistiquement différents.

Le P.C.S. très élevé de la bruyère arborescente est remarquable : il est supérieur aux valeurs trouvées tant par W.A. HOUGH que par G. HEIM. Il est même supérieur aux P.C.S. d'espèces signalées par W. LARCHER comme très énergétiques.

TABLEAU 3

Spécificité du pouvoir calorifique supérieur
High calorific value of different species

Espèces étudiées	<i>Erica arborea</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Ulex parviflorus</i>	<i>Arbutus unedo</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus coccifera</i>
	Bruyère arborescente	Pin d'Alep	Ajonc épineux	Arbousier	Chêne vert	Chêne kermès
Nombre de mesures	24	22	24	22	22	24
Moyenne des P.C.S.						
cal/g	5 748	5 307	4 994	4 986	4 845	4 776
J/g	24 058	22 212	20 902	20 869	20 279	19 990
Estimation de l'écart-type						
cal/g	115	149	45	67	72	110
J/g	481	624	188	280	301	460
Coefficient de variation ...	2,01	2,81	0,91	1,35	1,49	2,31
Médiane						
cal/g	5 733	5 302	4 988	5 016	4 849	4 756
J/g	23 995	22 192	20 877	20 994	20 595	19 906
Maximum						
cal/g	5 981	5 530	5 093	5 075	4 979	5 020
J/g	25 033	23 146	21 317	21 141	20 840	21 011
Minimum						
cal/g	5 588	5 115	4 926	4 848	4 686	4 540
J/g	23 386	21 409	20 618	20 291	19 613	19 002
Amplitude						
cal/g	393	415	167	227	293	480
J/g	1 645	1 737	699	950	1 226	2 009
Significativité classement ..	a	b	c	c	d	e

Celui du pin d'Alep est du même ordre que celui mesuré par G. HEIM — au printemps, 5 393 contre 5 377 cal/g —, mais il est supérieur aux valeurs fournies par W.A. HOUGH, pour des pins américains il est vrai.

Le P.C.S. de l'ajonc épineux ou de l'arbousier — environ 5 000 cal/g (20,9 kJ/g) — est comparable à celui de la lavande ou du pistachier lentisque donné par G. HEIM.

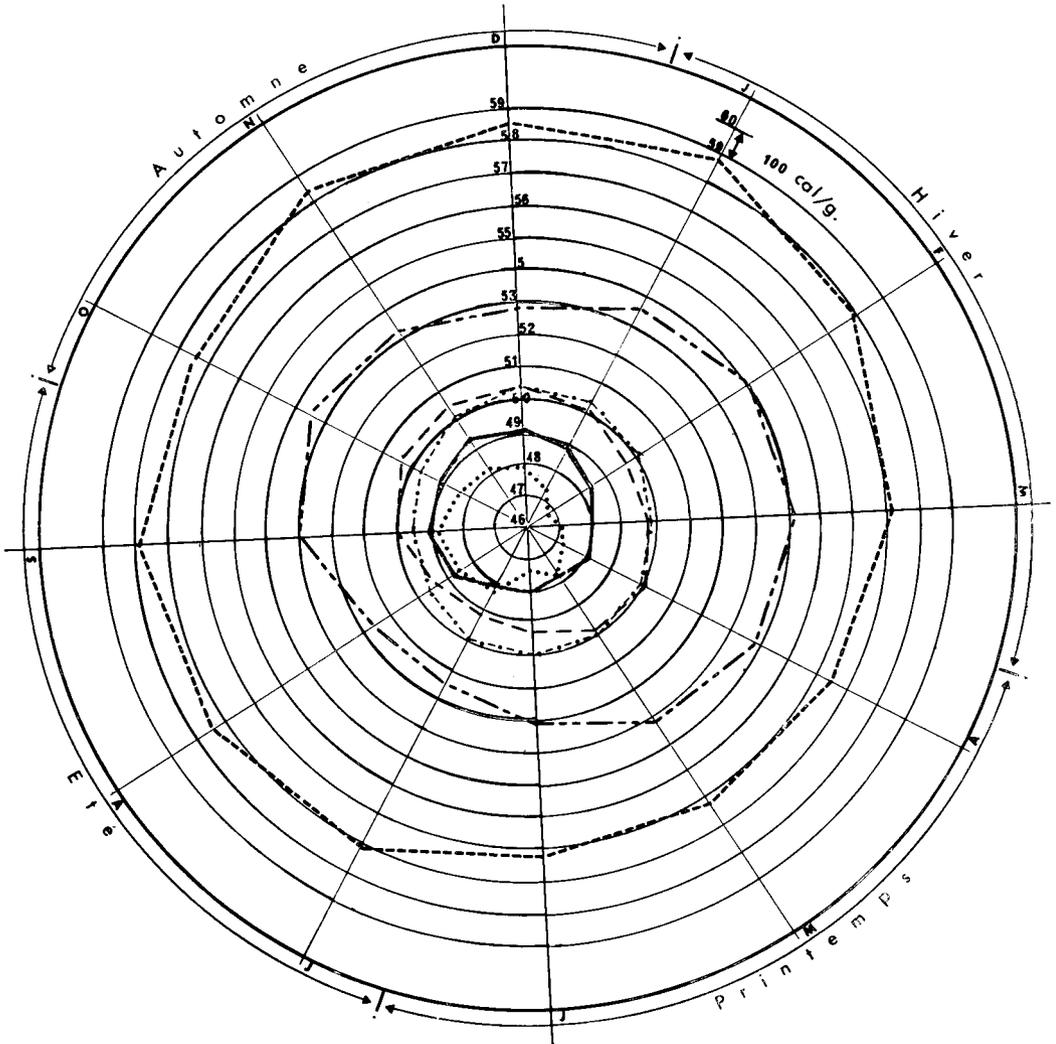


FIG. 2

Pouvoir calorifique supérieur
Calorific values « moving average »

Moyenne lissée, pas de : 3

- Bruyère arborescente - - - - -
- Pin d'Alep - - - - -
- Ajonc épineux
- Arbousier - - - - -
- Chêne vert - - - - -
- Chêne kermès

Quant aux chênes, leurs P.C.S. sont très voisins aussi bien des valeurs trouvées par G. HEIM que de celles fournies par W.A. HOUGH pour les chênes du Sud et de l'Est des U.S.A.

Tous ces P.C.S. sont indiqués dans le tableau en annexe.

La figure n° 2 obtenue par lissage des données de la figure n° 1 met bien en évidence la spécificité des variations du P.C.S. Le vecteur porté sur l'axe « février », par exemple, est d'un module égal à la moyenne arithmétique des P.C.S. des mois de janvier, février et mars.

Les pouvoirs calorifiques supérieurs

— de la bruyère arborescente :

- diminuent de la fin de la floraison (février-mars) à l'arrêt de l'élongation (juin-juillet),
- se stabilisent durant le repos estival,
- augmentent durant la floraison (novembre à janvier) ;

— du pin d'Alep :

- diminuent de mai à septembre (feuillaison et repos estival),
- se stabilisent en automne,
- augmentent en hiver jusqu'au débourrement ;

— de l'ajonc épineux :

- sont très stables toute l'année,
- diminuent légèrement lors de la reprise automnale de la croissance,
- augmentent légèrement lors de la floraison (janvier-février) ;

— de l'arbousier :

- diminuent durant la phase active de la croissance printanière,
- atteignent leurs maxima lors de la floraison et de la fructification (novembre-janvier) ;

— du chêne vert :

- diminuent durant la croissance printanière,
- atteignent leurs maxima durant le repos hivernal après le second aoûtement ;

— du chêne kermès :

- sont à leur maxima avant la reprise automnale de la végétation,
- conservent des valeurs relativement basses durant l'élongation.

3.3. - Influence de la composition des tissus sur le P.C.S.

3.31. La matière organique

A plusieurs reprises, les écarts importants entre les P.C.S. des pousses en formation riches en cellulose et ceux des pousses âgées d'une saison de végétation riches en lignine ont été signalés. Les mesures étant effectuées sur de la matière sèche, ainsi

qu'indiqué au § 2.2., les teneurs en eau, au demeurant fort différentes, n'expliquent en rien les écarts.

Par contre, et de nombreux auteurs l'ont déjà signalé, les potentiels énergétiques de la lignine — 6 100 cal/g (25,5 kJ/g) — et des celluloses — de l'ordre de 4 000 cal/g (16,7 kJ/g) — suffisent à l'explication.

3.32. Les cendres totales

La teneur a été mesurée par passage à l'étuve à 105 °C suivi d'une minéralisation au four à mouffle à 450 °C ; elle s'exprime en pourcentage de la matière sèche.

Des teneurs spécifiques peuvent être déterminées ; elles permettent de calculer, par application de la formule donnée au § 2.1 ce que W.A. HOUGH (1969) dénomme « ash-free calorific value » (le P.C.S. de la partie sans cendres, de la partie non minérale).

TABLEAU 4

Teneurs en cendres, P.C.S. et P.C.S. de la matière organique spécifiques
Ash content, high calorific () value and ash-free calorific value*

Espèces	Teneur en cendres (%)	P.C.S.		P.C.S. org.	
		Cal/g	J/g	Cal/g	J/g
Bruyère arborescente	2,42	5 748	24 058	5 841	24 657
Pin d'Alep	3,20	5 307	22 212	5 482	22 945
Ajonc épineux	2,34	4 994	20 902	5 114	21 405
Arbousier	4,15	4 986	20 969	5 202	21 773
Chêne vert	4,05	4 845	20 279	5 050	21 137
Chêne kermès	4,20	4 776	19 990	4 991	21 890

(*) Longtemps les spécialistes anglo-saxons ont parlé de calorific value ; il semblerait qu'ils utilisent maintenant le terme de calorific value (CF norme expérimentale AFNOR x 65-020 de décembre 1978).

3.4. - Liaison entre le P.C.S. et l'inflammabilité

La présente étude confirme les résultats des travaux des chercheurs du C.S.T.B. (*). Le P.C.S. est une propriété fondamentale du combustible en relation directe avec sa composition tandis que l'inflammabilité est essentiellement liée aux caractéristiques de surface du combustible.

Comme pour les bois tropicaux (J. DOAT & J.Ch. VALETTE, 1980) ces deux paramètres sont indépendants.

(*) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Champs-sur-Marne.

Deux exemples : la bruyère arborescente et le pin d'Alep sont deux espèces très inflammables et aux P.C.S. élevés quoique statistiquement différents. Le chêne vert est autant si ce n'est plus inflammable que le pin d'Alep, son P.C.S. est très nettement plus faible.

4. - Conclusion

Cette étude a permis de déterminer les valeurs spécifiques du P.C.S. sur une année. Elle autorise donc le calcul, dans les conditions expérimentales du « banc d'essais thermique » de Valabre ou dans les conditions réelles d'un incendie, de la puissance du front de feu, quantité d'énergie dégagée par unité de temps et de longueur du front de feu.

Toutefois, l'incendie de forêt ne consomme pas seulement les sommets des végétaux : ramilles, branches et parfois les troncs participent au phénomène. Il serait intéressant de poursuivre ces études afin de mettre en évidence les différences susceptibles d'exister entre les P.C.S. des sommets, des ramilles, des branches et des troncs. Ces connaissances conduiraient à la détermination, pour un végétal ligneux donné, d'un P.C.S. moyen pondéré.

Les valeurs relativement élevées du P.C.S. rendent envisageable l'utilisation d'au moins quelques espèces comme source d'énergie. Les difficultés de la récolte ne sont pas pour autant résolues : 25 à 30 tonnes de matières sèches au mieux récupérables à l'hectare, dans des terrains généralement difficiles d'accès. Aux problèmes d'exploitation et de débusquage, s'ajoutent les conditions de séchage avant transport ou son conditionnement sur place de façon à économiser de l'énergie.

Il y a souvent loin de la théorie à la pratique : la récupération de l'énergie, potentiellement présente, d'une phytomasse constituée de broussailles et d'arbustes en est un bel exemple.

Reçu pour publication en décembre 1980.

Summary

High calorific value of some mediterranean forest species

High calorific value (P.C.S.) represents the maximum of energy released by combustion. It allows the computation of the forest fire heat release.

On a dry matter basis or on an ash-free basis datas group the species in classes :

- leaves of *Erica arborea* L.,
- needles of *Pinus halepensis* Mill.,
- leaves of *Arbutus unedo* L. and top-end sprouts of *Ulex parviflorus* Pourret,
- leaves of *Quercus ilex* L. and *Quercus coccifera* L.

High calorific values rise with the lignification.

High calorific values of these mediterranean species are higher than these of more temperate species, or at least equal to these.

Références bibliographiques

- BOAG D.A., KICENIUK J.W., 1968. Protein and caloric content of lodge pole pine needles. *For. Chron.*, **44** (4), 28-31.
- BLISS L.C., 1962. Caloric and lipid content in alpine tundra plants. *Ecology*, **43** (4), 753-757.
- DAGNELIE P., 1978. *Théorie et méthodes statistiques*. 2 tomes. 3^e édition. Presses agronomiques de Gembloux, 378 et 463 p.
- DOAT J., 1977. Le pouvoir calorifique supérieur des bois tropicaux. *Bois For. Trop.* (Nogent-sur-Marne), **172**, 33-55.
- DOAT J., VALETTE J.Ch., 1980. L'inflammabilité de quelques bois tropicaux. *Bois. For. Trop.* (Nogent-sur-Marne), **193**.
- GOLLEY F.B., 1969. Caloric value of wet tropical forest vegetation. *Ecology*, **50** (3), 517-519.
- GORHAM E., SANGER J., 1967. Caloric value of organic matter in woodland, swamp and lake soils. *Ecology*, **48** (3), 492-494.
- HEIM G., 1974. L'utilité du concept de valeur énergétique en écologie : une étude basée sur des mesures effectuées sur des plantes méditerranéennes. *Oecol. Plant.*, **9** (3), 281-286.
- HOUGH W.A., 1969. Caloric value of some forest fuels of Southern United States. U.S.D.A. Forest Service Research, Note SE-120, Southern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, 5 p.
- LARCHER W., SCHMIDT L., TSCHARGER A., 1973. Starke Fettspeicherung und hoher Kaloriengehalt bei *Loiseleuria procumbens* (L.) Desv. *Oecol. Plant.*, **8** (4), 377-383.
- OVINGTON J.D., HEITKAMP D., 1960. The accumulation of energy in forest plantations in Britain. *Ecology*, **41**, 639-646.
- SMITH E.E., 1972. Heat release rate of building materials, *Ignition. Heat Release and Noncombustibility of Materials*, A.S.T.M. S.T.P. 502, 119-134.
- VALETTE J.Ch., 1980. Composition minérale d'espèces méditerranéennes (Document à paraître).
- VALETTE J.Ch., CLÉMENT A., DELABRAZE P., 1979. Inflammabilité d'espèces méditerranéennes. Tests rapides, campagne été 1978. Document interne 79-3 de la Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 39 p. + annexes.
- VERDUIN J., 1972. Caloric content and available energy in plant matter. *Ecology*, **53** (5).

ANNEXE

Quelques valeurs de P.C.S. tirées de la littérature

Matériels étudiés	P.C.S.		Auteurs
	cal/g	kJ/g	
<i>Combustibles fossiles</i>			
Tourbe	5 000	20,9	DOAT
Lignite	6 250	26,2	DOAT
Anthracite	7 250	30,3	DOAT
Pétrole	11 000	46,0	DOAT
<i>Éléments chimiques</i>			
Carbone	8 100	33,9	DOAT
Hydrogène	34 000	142,3	DOAT
<i>Matières organiques</i>			
Celluloses	3 700	15,5	VERDUIN
Celluloses	4 070	17,0	DOAT
Protéines	5 700	23,9	VERDUIN
Carbohydrates	5 100	21,3	VERDUIN
Lignine	6 100	25,5	DOAT
Lipides	9 300	38,9	VERDUIN
<i>Végétaux</i>			
Chêne (bois)	4 670	19,5	DOAT
Hêtre (bois)	4 680	19,6	DOAT
Epicéa (bois)	4 770	20,0	DOAT
Pin maritime (bois)	4 820	20,2	DOAT
<i>Espèces arborées nord-américaines</i>			
Quercus virginiana Mill. (feuilles)	4 708	19,7	HOUGH
Quercus obtusiloba Michx. (feuilles)	4 882	20,4	HOUGH
Quercus laevis (feuilles)	4 893	20,5	HOUGH
Populus tremuloïdes Michx. (ramilles)	4 864	20,4	HOUGH
Populus tremuloïdes Michx. (feuilles)	5 053	21,1	HOUGH
Larix decidua Miller (aiguilles)	4 608	19,3	HOUGH
Larix laricina K. Koch (aiguilles)	4 637	19,4	HOUGH
Picea glauca Voss. (aiguilles)	4 700	19,7	HOUGH
Picea glauca Voss. (ramilles)	5 070	21,2	HOUGH
Picea mariana B.S.P. (aiguilles)	4 926	20,6	HOUGH
Picea mariana B.S.P. (ramilles)	5 125	21,5	HOUGH
Abies balsamea Mill. (aiguilles)	5 060	21,2	HOUGH
Abies balsamea Mill. (ramilles)	5 040	21,1	HOUGH
Pinus clausa Vasey jeun. (aiguilles)	4 865	20,4	HOUGH
Pinus clausa Vasey viei. (aiguilles)	5 443	22,8	HOUGH
Pinus clausa Vasey (ramilles)	5 293	22,3	HOUGH
Pinus banksiana Lamb. (aiguilles)	5 102	21,4	HOUGH
Pinus banksiana Lamb. (ramilles)	5 176	21,7	HOUGH
Pinus elliotii Engel. (aiguilles)	5 206	21,8	HOUGH
Pinus concorta Dougl. (aiguilles)	5 120	21,4	BOAG & KICENIUK
Pinus cembroïdes edulis (aiguilles)	5 000	20,9	BOAG & KICENIUK

Matériels étudiés	P.C.S.		Auteurs
	cal/g	kJ/g	
<i>Espèces alpines et de la toundra</i>			
Loiseleuria procumbens (L.) Desv.			
Jeunes feuilles	5 570	23,3	LARCHER <i>et al.</i>
Vieilles feuilles	5 650	23,6	LARCHER <i>et al.</i>
Empetrum hermaphroditum (feuilles)	5 560	23,3	BLISS & HADLEY
Diapensia lapponica (feuilles)	5 640	23,6	BLISS & HADLEY
Ledum groenlandicum (feuilles)	5 650	23,6	BLISS & HADLEY
<i>Espèces méditerranéennes</i>			
Acer monspessulanum L.			
Pousses nouvelles	4 708	19,7	HEIM
Tiges lignifiées	4 541	19,0	HEIM
Cistus monspelliensis L.			
Pousses nouvelles	5 425	22,7	HEIM
Feuilles	4 756	19,9	HEIM
Juniperus oxycedrus L. (pousses nouvelles) ..	5 138	21,5	HEIM
Lavandula stoechas L. (pousses nouvelles) ...	5 019	21,0	HEIM
Morus alba L. (feuilles)	4 493	18,8	HEIM
Phyllyrea angustifolia L. (pousses nouvelles) ..	5 186	21,7	HEIM
Pinus halepensis Mill.			
Pousses nouvelles	5 234	21,9	HEIM
Aiguilles	5 377	22,5	HEIM
Tiges lignifiées	5 138	21,5	HEIM
Pistacia lentiscus L. (feuilles)	4 911	20,6	HEIM
Pistacia terebinthus L. (pousses nouvelles)	4 684	19,6	HEIM
Quercus coccifera L.			
Pousses nouvelles	4 469	18,7	HEIM
Feuilles	4 744	19,9	HEIM
Quercus ilex L.			
Pousses nouvelles	4 851	20,3	HEIM
Feuilles	4 815	20,2	HEIM
Rosmarinus officinalis L.			
Pousses nouvelles	5 473	22,9	HEIM
Feuilles	5 449	22,8	HEIM