



**HAL**  
open science

## Qualification of wood energy: calorific value

Nicolas Bilot, Laurent Saint-André, Yann Rogaume, Christine Deleuze

► **To cite this version:**

Nicolas Bilot, Laurent Saint-André, Yann Rogaume, Christine Deleuze. Qualification of wood energy: calorific value. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2014, 44, pp.73-81. hal-02629585

**HAL Id: hal-02629585**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02629585v1>**

Submitted on 27 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Qualification du bois énergie : peut-on aller jusqu'au pouvoir calorifique ?

Dernier aspect à estimer dans l'optique bois énergie : le pouvoir calorifique « supérieur » (PCS), qui traduit le potentiel énergétique de la biomasse, sachant que l'énergie réellement dispensée dépendra fortement de l'humidité, du conditionnement et des conditions de combustion. L'idée est de modéliser le PCS à partir de la biomasse et de la composition minérale car, selon la littérature, le PCS est lié au taux de cendres, donc aux minéraux. Une démarche plus complexe que prévu pour un résultat assez simple, encore provisoire mais très prometteur.

L'ensemble du projet EMERGE a permis de rassembler des outils pour « quantifier » le bois énergie, ou plus généralement l'ensemble du bois, indépendamment de ses utilisations : volume total ou volume de tige à différentes découpes, biomasses correspondantes et minéralomasses associées. Mais il convient, pour aller au bout de la logique du projet, de se pencher aussi sur la qualification énergétique de ce matériau : même si l'on peut faire feu de tout bois, tous les bois ne sont pas équivalents.

La qualité des biocombustibles solides, dont le bois, est régie par la série des normes NF EN 14961 (AFNOR, 2010). L'appréciation repose sur des critères de masse volumique, taux d'humidité, pouvoir calorifique, taux de cendres, teneurs en éléments majeurs et granulométrie. Le premier déterminant de la qualité énergétique est cependant le pouvoir calorifique et c'est ce que nous avons voulu explorer plus avant. La teneur en cendres y étant étroitement associée, nous l'avons étudiée en même temps. En revanche d'autres aspects importants ne sont pas abordés ici, soit parce qu'ils ont fait l'objet d'une étude à part entière dans le cadre du projet, comme la masse volumique, soit parce qu'ils

dépendent en grande partie de la méthode d'exploitation, comme l'humidité et la granulométrie. Il nous importait prioritairement de comprendre les différences inter et intra arbre, indépendamment des conditions d'exploitation et d'utilisation.

Dans une approche prospective visant à estimer la qualité énergétique d'une ressource bois, nous avons cherché à modéliser le pouvoir calorifique à partir de la biomasse et de la composition minérale, étudiées par ailleurs dans le projet. Une analyse bibliographique dans le domaine des énergéticiens sert de base à la construction d'un modèle en fonction de la composition minérale du bois.

Cependant les données dont nous disposons sont les compositions minérales établies par les biogéochimistes, selon des méthodes et pour des objectifs différents de ceux des énergéticiens : le rapprochement des deux domaines a donc exigé un travail préalable de transposition des méthodologies de mesures et de quantification de variables manquantes, comme le taux de cendres.

Nous présentons ici l'ensemble de cette démarche ; elle aboutit à un modèle encore très exploratoire,

et qu'il faut donc confirmer sur un échantillon plus large, mais qui permet d'étudier plus finement comment varie le pouvoir calorifique et le taux de cendres entre différentes essences et, pour une même essence, entre les différentes parties de l'arbre. L'exercice est illustré sur le cas du hêtre, dont les compositions minérales par compartiment sont bien documentées par les biogéochimistes de l'INRA-BEF.

### Mesures de la qualité du combustible : pouvoir calorifique et taux de cendres

Le pouvoir calorifique dit supérieur (PCS) indique le potentiel énergétique de la biomasse. L'énergie réellement exploitée à partir de la combustion, traduite par le pouvoir calorifique inférieur (PCI), dépendra ensuite des conditions de combustion : humidité, conditionnement (et granulométrie pour des plaquettes), température et alimentation en oxygène de la chaudière (voir encadré).

La mesure standardisée du pouvoir calorifique supérieur permet de comparer les combustibles solides entre eux (toutes choses égales par ailleurs) et, pour la biomasse, d'étudier les différences entre essences et types de biomasse.

### Le pouvoir calorifique : définitions et mesure

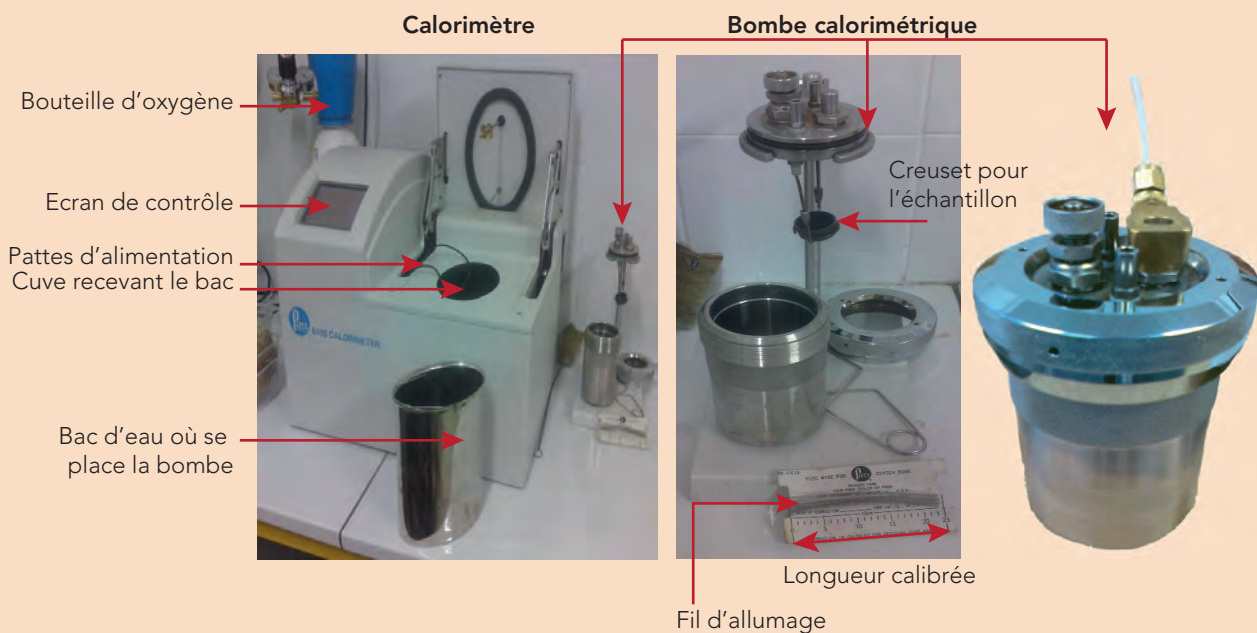
Le pouvoir calorifique représente la quantité de chaleur « contenue » dans une unité de masse du combustible ; c'est la chaleur que dégage sa combustion. L'unité utilisée dans les normes est le kJ/kg, mais on trouve dans la littérature des kCal/kg et pour du bois énergie les forestiers et les industriels utilisent plus souvent des kWh/tonne (pour mémoire, 1 kJ/kg = 0,24 kCal/kg = 0,278 kWh/Tonne).

Le pouvoir calorifique dit « supérieur » (PCS) est une valeur expérimentale qui quantifie en kJ/kg l'énergie dégagée par la combustion complète (en excès d'oxygène) d'une masse de combustible parfaitement sec, après condensation de toute la vapeur d'eau produite par l'oxydation de l'hydrogène du combustible. C'est le maximum de l'énergie de combustion.

Le pouvoir calorifique dit « inférieur » (PCI) représente la chaleur dégagée par la combustion, sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau (chaleur nécessaire à la vaporisation de l'humidité du combustible et de l'eau correspondant à l'oxydation de l'hydrogène). On le déduit du PCS à partir de l'eau récupérée à la fin de la combustion. En condition standardisée décrite ci-dessus, l'écart entre les deux dépend uniquement de la quantité d'hydrogène contenue dans la biomasse. Pour du charbon par exemple cet écart est compris entre 2 et 4 % tandis qu'il est plutôt de l'ordre de 7-9 % pour du bois (5 à 7 % d'hydrogène dans la matière sèche).

La qualification des combustibles commerciaux se réfère généralement au PCI car il est représentatif de l'énergie théoriquement récupérable (combustion parfaite) dans la plupart des chaudières. Cependant les chaudières à condensation permettent de récupérer une partie de l'énergie perdue par vaporisation de l'eau et donc de mieux valoriser le combustible. Les rendements des appareils étant calculés sur PCI en condition standardisée, certaines peuvent même revendiquer des rendements « supérieurs à 100 % ».

**La mesure du PCS** se fait selon la norme EN 14918 (AFNOR, 2010) pour des biomasses solides, au moyen d'une bombe calorifique de Mahler au sein d'un calorimètre (voir figure) : une masse précisément pesée de combustible séché à 103 °C pendant 24 heures est placée dans cette bombe, en présence d'une atmosphère concentrée à 20 bars de dioxygène, afin d'assurer la combustion complète de l'échantillon (on a même explosion). La bombe calorifique est placée dans une masse d'eau précisément pesée, et le tout est placé dans une enceinte adiabatique (parfaitement isolée). L'eau est brassée et sa température est mesurée tout au long de la manipulation, la variation observée de la température de la masse d'eau permet de déduire la quantité d'énergie libérée (en kJ) par la combustion de la masse de combustible (kg) : le PCS en kJ/kg.



Matériel de mesure du pouvoir calorifique

À droite, la bombe calorimétrique dans laquelle est placé un échantillon standardisé de poudre de bois séché à 103 °C ; à gauche : un calorimètre dans lequel est placée la bombe afin de mesurer la différence de température de l'eau, et donc l'énergie libérée par la combustion totale de l'échantillon.

Le taux de cendres, c'est-à-dire la matière sèche solide résiduelle après combustion, est la deuxième information importante pour le combustible bois. Selon le procédé de combustion, en effet, les cendres peuvent devenir fusibles et poser des problèmes d'encrassement des chaudières; et c'est dans tous les cas un résidu que l'on cherche à réduire au maximum. La mesure du taux de cendres est elle aussi standardisée, sur échantillon séché à 103 °C (norme EN 14775, AFNOR 2010).

### Les sources de variation du pouvoir calorifique du bois, d'après la littérature

#### L'humidité du bois

D'après les différentes études sur le sujet, le pouvoir calorifique du bois dépend essentiellement de son degré d'humidité (à l'entrée de la chaudière). En effet la mesure standardisée du pouvoir calorifique se fait sur des échantillons séchés à 103 °C mais, en présence d'humidité, une partie de l'énergie est perdue dans la production de vapeur d'eau. Il existe une relation linéaire entre le PCI et le pourcentage d'humidité (voir ADEME, 2002; figure 1) : on gagne près de 20 % de PCI en passant de 40 à 30 % d'humidité, et encore 17 % de PCI si l'humidité baisse jusqu'à 20 %. Sachant que le séchage du bois en bord de route est assez rapide juste après la coupe et qu'il ralentit ensuite (la courbe du taux d'humidité en fonction du temps a une forme exponentielle décroissante : Deleuze et al., 2001), les premières semaines de séchage ont un effet particulièrement spectaculaire sur le pouvoir calorifique.

Par ailleurs une forte humidité empêche souvent la combustion complète du bois dans la chaudière; outre la baisse du PCI, elle réduit de ce fait le rendement thermique et peut également conduire à un encrassement et à des rejets accrus dans l'atmosphère.

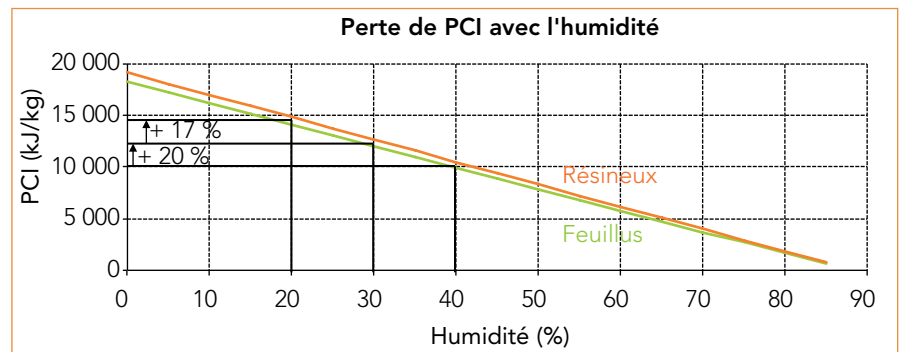


Fig. 1 : variations du pouvoir calorifique inférieur en fonction de l'humidité du bois, en moyenne pour des résineux ou pour des feuillus (figure tirée du rapport ADEME 2002)

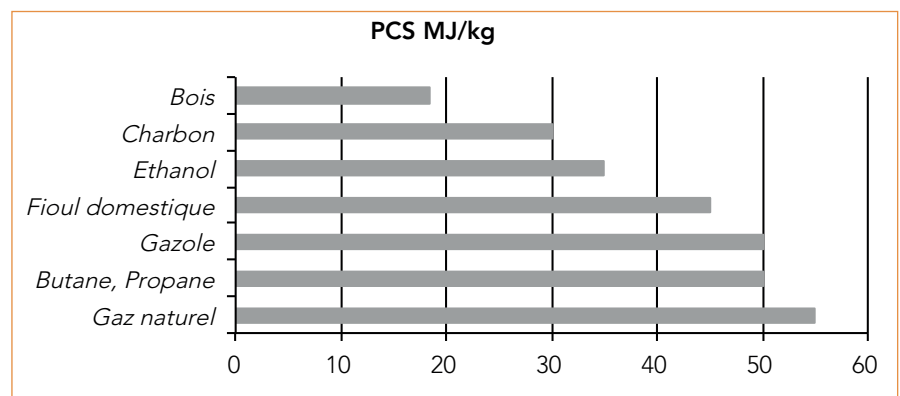


Fig. 2 : ordres de grandeurs de pouvoirs calorifiques supérieurs de différents combustibles

#### L'essence et les compartiments de l'arbre

Le deuxième facteur de variation du pouvoir calorifique auquel on s'intéresse est souvent l'essence, mais le type de compartiment dans l'arbre a également une influence (bois vs écorce, tronc vs menus bois...).

La différence entre essences est du second ordre : c'est d'abord une différence entre feuillus et résineux, de 5 à 10 %. Toutes choses égales par ailleurs (en particulier l'humidité), les résineux ont un meilleur pouvoir calorifique que les feuillus, notamment du fait des résines, qui améliorent le PCS. Cependant la valorisation de ce combustible, plus riche en énergie, dans des chaudières non adaptées peut là encore être source d'encrassement et de rejets indésirables dans l'atmosphère : la combustion, accélérée notamment par le fort PCS (et la densité moindre

du bois résineux), n'est alors pas assez alimentée en oxygène et les imbrûlés forment les suies qui partent dans les fumées.

Il y a peu d'information disponible sur des variations plus fines entre essences au sein des feuillus ou des résineux, mais elles semblent faibles entre résineux (de l'ordre de 1 % : ADEME 2001) tandis qu'entre feuillus, la différence s'observe surtout entre bois durs et bois tendres (ADEME 2008).

Enfin la littérature disponible ne dit rien sur les différences de pouvoir calorifique entre compartiments mais il y a eu des travaux sur la quantité de cendres produites : pour la combustion de bois « nu », par exemple, les cendres représentent environ 0,2 à 2 % de la masse sèche initiale, tandis que pour des écorces c'est plutôt de l'ordre de 5 % (voir RDVT n° 35).

## L'approche des énergéticiens : pouvoir calorifique et composition minérale

Quand on s'intéresse au bois énergie, à son pouvoir calorifique, on se réfère nécessairement aux travaux des énergéticiens qui, depuis longtemps, ont cherché à expliquer, et à modéliser, les différences de pouvoir calorifique supérieures observées entre divers combustibles (figure 2). Dans la suite du travail, on ne parlera que du pouvoir calorifique intrinsèque, indépendamment de l'humidité du bois, c'est-à-dire du PCS.

### Des modèles de pouvoir calorifique fondés sur la composition minérale du combustible

La plupart des modèles historiques concernent les combustibles fossiles. Les études focalisées sur la biomasse, et le bois en particulier, sont relativement récentes (la toute première à la fin des années 70).

La démarche des énergéticiens est de construire des modèles de pouvoir calorifique basés sur la composition dans les principaux éléments qui interagissent pendant la combustion. Les premiers sont évidemment le carbone, principal combustible (pour le bois, c'est 46 à 51 % de la masse sèche), l'hydrogène (5 à 7 %) et l'oxygène (42 à 46 %), mais aussi l'azote et le soufre (moins de 1 % chacun); souvent c'est le taux de cendres (0,2 à 5 %) qui rend compte indirectement de l'influence des autres éléments minéraux. En conséquence leurs modèles reposent principalement, voire uniquement (surtout pour les carburants fossiles), sur le taux de carbone et font intervenir ensuite l'hydrogène, puis l'oxygène et enfin parfois le soufre. Les modèles qui concernent le bois ou charbon de bois introduisent le taux d'azote et parfois le taux résiduel de cendres (en effets négatifs).

### Appliquer cette démarche aux variations du pouvoir calorifique du bois ?

Nous avons vu, (Saint André et al., dans ce dossier) que la composition minérale du bois varie non seulement selon l'essence de l'arbre et son environnement, mais aussi dans l'arbre, entre les différents compartiments (bois vs. écorce, taille du compartiment ou diamètre extérieur). L'approche des énergéticiens nous a incités à rechercher, de manière analogue, dans quelle mesure ces variations de composition pourraient influencer le pouvoir calorifique. L'enjeu est de pouvoir confronter, pour divers scénarios imaginables d'exploitation de bois énergie, le gain de pouvoir calorifique à la perte en éléments minéraux pour le milieu forestier.

### Problème : la composition minérale du bois est affaire de point de vue et méthode

Les données dont nous disposons pour cette recherche viennent des biogéochimistes, qui s'intéressent essentiellement aux cycles des éléments minéraux dans l'écosystème. Ils analysent en priorité des macro-éléments comme le carbone et l'azote, mais aussi des micro-éléments : calcium, potassium, manganèse, magnésium, phosphore, soufre, aluminium ou sodium. Il n'est pas d'usage de mesurer les taux d'oxygène ou d'hydrogène, qui sont volatilisés pendant ces cycles et interagissent peu. À l'inverse les énergéticiens s'intéressent particulièrement à l'oxygène et l'hydrogène, en plus du carbone et du taux de cendres.

Autrement dit, les éléments analysés ne sont pas les mêmes entre les deux domaines. De plus, les normes de mesure ne sont pas non plus les mêmes. Pour les énergéticiens, les échantillons de combustibles sont, sauf exception, séchés à 103 °C alors que les biogéochimistes veillent à ne pas dépasser 65 °C, température au-delà de laquelle l'azote commence à se volatiliser. Il y a évidemment, entre le séchage à 65 °C et le séchage à

103 °C, une perte d'eau résiduelle, ainsi que des pertes de carbone en plus de l'azote. Il en résulte une perte globale de poids qui fait mathématiquement augmenter la concentration des autres éléments (par diminution du dénominateur « masse totale »).

### Adapter l'approche des énergéticiens aux données bois : notre méthode

L'objectif est de prédire le pouvoir calorifique d'après la composition en minéraux du bois. Il s'agit de construire des modèles (plus ou moins détaillés) de pouvoir calorifique en fonction des compositions minérales telles qu'elles sont analysées par les biogéochimistes. Le cheminement est synthétisé en figure 3.

### La démarche de modélisation

Plutôt que de partir sur des modèles empiriques liant statistiquement le pouvoir calorifique mesuré aux compositions minérales, nous nous sommes inspirés de l'approche des énergéticiens et de leurs types de modèles. Il nous a donc fallu trouver des variables cohérentes avec ces types de modèles, en intégrant à nos données de composition minérale les éléments nécessaires qui n'y figuraient pas, mais aussi en analysant les différences de concentrations entre les normes de séchage à 65 °C et à 103 °C. Cette exigence de compatibilité entre l'approche des énergéticiens et les variables mesurées par les biogéochimistes a nécessité une série de mesures, directes ou indirectes. Alors seulement des relations statistiques ont été cherchées entre le pouvoir calorifique et les concentrations disponibles, issues de la xylothèque INRA-BEF et des échantillons spécifiquement analysés dans le cadre du projet EMERGE.

### Les échantillons choisis : un jeu de calibration, deux jeux de validation

La xylothèque INRA-BEF, riche de quelques 6 000 échantillons (plus de 1 300 arbres) dont on connaît la com-

position minérale (au sens des biogéochimistes), représente potentiellement une gamme énorme d'information pour l'établissement d'un modèle de pouvoir calorifique : distinction feuillus/résineux, distinctions plus fines pour un assez grand nombre d'essences, influence des conditions de croissance des arbres (sylviculture, station), de la taille des arbres, du compartiment dans l'arbre, etc.

Cependant le supplément de mesures (longues et laborieuses) dont nous avons besoin ne pouvait se faire, dans le cadre contraint de notre étude prospective, que sur un nombre restreint d'échantillons.

Nous avons donc réalisé une analyse statistique de l'ensemble des données disponibles (analyse en composantes principales) pour en tirer une sélection d'échantillons aussi pertinente que possible du point de vue des facteurs susceptibles d'influencer le pouvoir calorifique. Nous avons ainsi sélectionné 37 échantillons, explorant la plus grande variabilité de composition minérale et qui constituent notre jeu de calibration.

Par ailleurs une collaboration avec le CEA a permis de tester les modèles obtenus, et de les confronter aux modèles existants d'énergéticiens, sur des données indépendantes : 85 échantillons de bois, feuillus et résineux, mesurés avec le protocole classique des énergéticiens. Enfin une compilation bibliographique a permis de rassembler environ 70 séries supplémentaires de valeurs moyennes (concentrations d'éléments, taux de cendres et PCS) établies par des énergéticiens pour des échantillons de bois du monde entier.

### Les mesures particulières pour faire un pont entre énergéticiens et biogéochimistes

Nous avons tout d'abord mesuré le pouvoir calorifique (PCS) des 37 échantillons de notre jeu de calibration selon le protocole normalisé (cf. encadré).

Nous avons alors fait un pont avec l'approche des énergéticiens en mesurant sur ces échantillons les variables manquantes : l'hydrogène, l'oxygène (qui n'est jamais mesuré directement mais se déduit de la composition en tous les autres éléments) ainsi que le taux de cendres. Cela consistait aussi à mesurer leur masse ainsi que leur composition en N et C, à 65 °C et à 103 °C pour évaluer les pertes entre les deux standards de séchage : perte de masse totale et perte en N et C par volatilisation.

L'ensemble de ces mesures a permis de construire des équations de passage pour les concentrations des différents éléments entre 65 °C et 103 °C. Pour le carbone et l'azote les équations tiennent compte de la volatilisation ; pour l'oxygène et l'hydrogène, elles tiennent compte

de la perte de masse attribuée à l'eau, et répartissent ces pertes au prorata de leur masse atomique. Pour les autres éléments, il s'agit d'une simple augmentation de concentration due à la perte de masse totale.

### Exprimer le taux de cendres à partir de la somme des micro-éléments

Restait à faire un deuxième pont concernant l'expression du taux de cendres. C'est une variable importante de l'approche des énergéticiens, mais qui en soi ne concerne pas les biogéochimistes et dont la mesure n'est pas facilement accessible. Or on sait que les cendres sont fortement liées à la concentration minérale en éléments non utilisés directement dans la combustion, ni volatilisés aux températures correspondantes. Pour que notre modèle de pouvoir calorifique du bois puisse

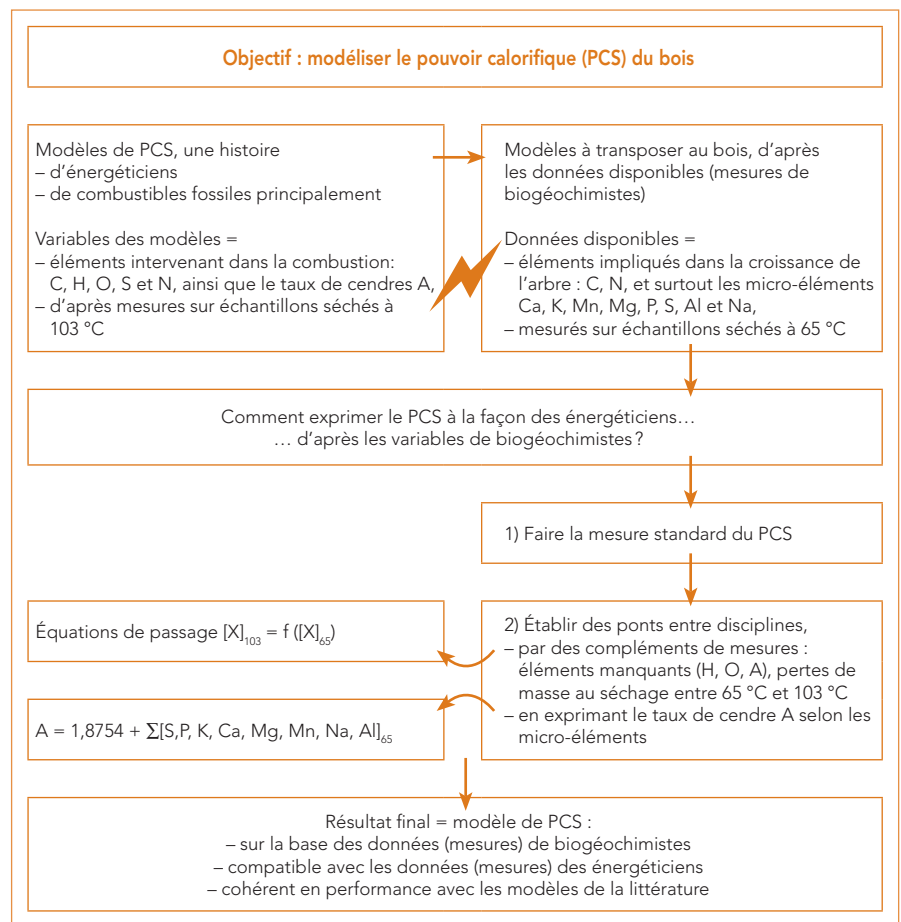


Fig. 3 : synthèse du cheminement suivi pour la modélisation du pouvoir calorifique du bois

être largement utilisé, nous avons donc cherché une formule liant le taux de cendres à l'information disponible pour ces éléments dans les données des biogéochimistes, à savoir la somme des concentrations en S, P, K, Ca, Mg, Mn, Na et Al (déterminées sur une matière séchée à 65 °C). Cette démarche est cohérente avec le fait que la répartition de ces minéraux dans l'arbre correspond aux constatations faites sur le taux de cendres : plus fort dans l'écorce,

dans les feuilles et les plus petites branches. La relation obtenue ( $R^2 = 0,98$ ) est fort simple, le taux de cendres étant noté A (pour *ashes*, cendres en anglais) :

$$A = 1.8754 * \sum ([S]_{65}, [P]_{65}, [K]_{65}, [Ca]_{65}, [Mg]_{65}, [Mn]_{65}, [Na]_{65}, [Al]_{65})$$

Le facteur multiplicatif de près de 2 indique bien qu'il n'y a pas que ces seuls éléments dans les cendres. Il y a aussi des minéraux que les

biogéochimistes n'ont pas mesurés, notamment la silice (Si). D'autre part, les éléments se trouvent dans les cendres sous forme oxydée (par exemple : CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO<sub>2</sub>) et le degré d'oxydation dépend des conditions de combustion. Cette relation directe entre concentration initiale et taux de cendres est donc complètement dépendante des conditions de combustion, ici données par la norme de mesure du taux de cendres.

Modèles EMERGE selon les concentrations mesurées à 65 °C ou convertis pour les concentrations à 103 °C		Données	R <sup>2</sup>	Erreur (%)	Biais
<b>C</b> $PCS = 41.01 * [C]_{65} + 299.39$ ou $PCS = 41.01 * [C]_{103} + 299.39$	Calibration	0.93	1.21	2	
	CEA	0.32	4.74	-767	
	Biblio	0.65	4.19	-618	
<b>CNA</b> $PCS = 22.45 * [C]_{65} - 743.32 * [N]_{65} - 86.85 * A + 1.58 * [C]_{65} * [N]_{65} + 0.16 * [C]_{65} * A + 8969.69$ ou $PCS = 26.34 * [C]_{103} - 872.08 * [N]_{103} - 86.85 * A + 1.82 * [C]_{103} * [N]_{103} + 0.19 * [C]_{103} * A + 692214$ <small>termes d'effet direct                      termes d'interaction</small>	Calibration	0.97	0.79	10	
	CEA	0.32	3.02	-360	
	Biblio	0.57	3.18	-333	
Modèles de la littérature selon des concentrations mesurées avec la norme de séchage à 103 °C		Données	R <sup>2</sup>	Erreur (%)	Biais
<b>Boucher a</b> $PCS = 32.76 * [C] + 60 * ([H] - \frac{[O]}{8}) + 9.25 * [S]$	Calibration	0.79	14.78	2908	
	CEA	0.31	16.16	3171	
	Biblio	0.69	16.52	3236	
<b>Boucher b</b> $PCS = 38.88 * [C]$	Calibration	0.93	5.57	1072	
	CEA	0.32	3.34	437	
	Biblio	0.65	3.7	542	
<b>Boucher c</b> $PCS = 37.98 * [C] - 230.4$	Calibration	0.93	8.85	1740	
	CEA	0.32	6.15	1117	
	Biblio	0.65	6.63	1218	
<b>Channiwala</b> $PCS = 39.91 * [C] + 117.83 * [H] + 10.05 * [S] - 10.34 * [O] - 1.81 * [N] - 2.11 * A$	Calibration	0.67	7.36	-1121	
	CEA	0.28	3.01	-52	
	Biblio	0.7	2.83	-4	
<b>Friedl</b> $PCS = 0.0355 * [C] - 23.2 * [C] - 223 * [H] + 0.512 * [C] * [H] + 13.1 * [N] + 20600$	Calibration	0.92	1.88	220	
	CEA	0.3	2.71	42	
	Biblio	0.68	2.57	112	
<b>Sheng</b> $PCS = 1367.5 + 31.37 * [C] + 70.09 * [H] + 3.18 * [O]$	Calibration	0.7	3.73	-543	
	CEA	0.28	2.58	102	
	Biblio	0.68	2.4	106	
<b>Tillman a</b> $PCS = 41.01 * [C] - 306$	Calibration	0.93	5.06	-978	
	CEA	0.32	8.87	-1683	
	Biblio	0.65	8.28	-1555	
<b>Tillman b</b> $PCS = 35.33 * [C]$	Calibration	0.93	14.11	2797	
	CEA	0.32	11.4	2213	
	Biblio	0.65	11.87	2301	
<b>Yin</b> $PCS = 29.49 * [C] + 82.50 * [H]$	Calibration	0.66	3.85	-507	
	CEA	0.28	2.97	301	
	Biblio	0.69	2.76	301	

Tab. 1 : comparaison des modèles de pouvoir calorifique (« C » et « CNA ») élaborés dans le cadre de l'étude EMERGE avec ceux de la littérature, sur les 3 jeux de données de l'étude

Le jeu « calibration » correspond aux 37 échantillons utilisés pour calibrer les modèles EMERGE, puis utilisées en tests sur les modèles de la littérature; les données « CEA » sont celles d'une étude sur des échantillons de bois mise à disposition par Capucine Dupont pour EMERGE (85 échantillons); les données « Biblio » sont des données issues de différentes publications et concernant des biomasses forestières (71 échantillons). Les couleurs vert, jaune et brun correspondent classiquement à un résultat satisfaisant, mitigé ou insuffisant.

## Le modèle de pouvoir calorifique

### Construction du modèle sur les données de calibration

Différents modèles de la littérature énergétique ont été testés sur les concentrations considérées à 103 °C de notre jeu de calibration (tableau 1). Cela donne une idée de leur validité et des éléments qui semblent les plus informatifs. Nous avons alors construit des modèles directement sur les concentrations à 65 °C des biogéochimistes, en choisissant d'après ces premiers tests les variables pertinentes pour le pouvoir calorifique.

La première de ces variables est le carbone (C), que l'on retrouve dans tous les modèles de la littérature et qui explique à lui seul la plus grande part de variabilité ( $R^2 = 0,93$  sur les données de calibration); vient ensuite l'hydrogène (H) avec, selon les cas, l'oxygène (O) ou l'azote (N). L'oxygène est un élément important dans la combustion mais dont on détermine la concentration à partir de tous les autres, par soustraction. Le bois étant composé en grande partie de C, H, O et N, l'information simultanée de C, H et N permet d'en déduire grossièrement O. Enfin quelques modèles font intervenir le soufre (S) et le taux de cendres.

Les concentrations de H et O n'étant habituellement pas disponibles dans les données des biogéochimistes, nous avons cherché à construire des modèles basés plutôt sur C, N et le taux de cendres A. La prise en compte de N et A apporte une nette amélioration par rapport au modèle ne reposant que sur C (on obtient  $R^2 = 0,97$  sur les données de calibration). N et A interviennent de manière négative sur le pouvoir calorifique : des taux importants de cendres ou d'azote ont pour premier effet de diminuer le pouvoir calorifique. Cependant une interaction significative avec le carbone (que reflètent respectivement les termes

[N] \* [C] et A \* [C] du modèle) balance un peu cet effet négatif.

### Tests des différents modèles sur les 3 jeux de données

À l'issue de ce travail de construction, nous avons retenu deux modèles : le modèle « C » qui ne dépend que du carbone et le modèle « CNA », plus complexe, en fonction de C, N et le taux de cendres prédit comme combinaison des micro-éléments. Nous les avons testés sur les deux jeux de données indépendantes, « CEA » et « biblio », et confrontés aux résultats des 9 modèles de la littérature énergétique (tableau 1).

Le modèle « C » est le mieux classé, sur les 3 jeux de données, des 5 modèles simples; mais ces modèles simples (basés seulement sur [C]) sont globalement moins précis que les modèles plus complexes.

Il faut surtout retenir que les deux modèles que nous avons construits donnent des résultats voisins de ceux de la littérature des énergéticiens. C'est en soi un résultat remarquable car ils permettent de prédire un pouvoir calorifique directement sur des données provenant des travaux de physiologie, malgré les manques et les biais par rapport aux données habituelles des sciences de l'énergie.

### Finalement, comment varie le pouvoir calorifique ?

Quel que soit le modèle, le carbone est l'élément explicatif principal du pouvoir calorifique. Ce qui n'est pas surprenant puisqu'il représente grosso modo la moitié de la composition du bois, proportion relativement stable d'une essence à l'autre (légèrement supérieure pour les résineux). Les seuls autres éléments qui soient apparus significatifs sont l'azote et le taux de cendres, donné par les micro-éléments comme indiqué précédemment.

À titre exploratoire nous avons appliqué notre modèle de pouvoir calorifique « CNA » aux données de

minéralomasse par compartiment disponibles pour le hêtre (et décrites par Saint André et al., ce dossier). Ce travail prédit en fait deux grandeurs : le pouvoir calorifique et le taux de cendres, lequel, outre son statut de variable intermédiaire du PCS, est aussi en soi un critère de qualité du combustible. Les estimations moyennes obtenues par tissu et compartiment (tableau 2) sont très cohérentes avec la littérature en ce qui concerne le taux de cendres : beaucoup plus fort dans les écorces que dans le bois, intermédiaire dans les feuilles.

Pour le pouvoir calorifique, les variations obtenues sont un peu plus difficiles à analyser, du fait des interactions prises en compte dans le modèle. D'après les termes d'effet direct (pour [C], [IN] et A, voir tableau 1), on s'attend à voir diminuer le pouvoir calorifique quand la teneur en éléments minéraux ([N] et A) augmente, soit *a priori* plutôt dans les plus petites branches, les feuilles et les écorces. Cependant ceci ne se vérifie grossièrement qu'au sein d'un même tissu : pour l'écorce en particulier (figure 4), une augmentation du taux de cendres entraîne bien une diminution du PCS. En revanche, la comparaison entre les tissus et parties de l'arbre montre que le PCS est maximal pour les feuilles, malgré un taux de cendres de près de 4 %. Selon notre modèle, leur concentration légèrement plus forte en azote et carbone « booste » le PCS car le terme d'interaction positif entre [C] et [N] est assez fort pour compenser les effets directs négatifs de [IN] et A.

L'idée préconçue que le pouvoir calorifique serait négativement lié au taux de cendres est donc ici infirmée : le pouvoir calorifique et le taux de cendres sont deux mesures complémentaires de la qualité du combustible.

Les petites branches et menus bois (avec leur écorce) sont intermédiaires entre les deux extrêmes que repré-



sentent les feuilles et les écorces : ils ont un pouvoir calorifique assez proche de celui du bois (sans écorce) de la tige, de l'ordre de 19 500 kJ/kg, malgré des taux de cendres supérieurs. Notons enfin que l'écorce seule des plus grosses branches et de la tige a les plus forts taux de cendres et les plus faibles pouvoirs calorifiques.

Les relations entre éléments minéraux et pouvoir calorifique ne sont pas directes du fait de leur agencement moléculaire différent selon les essences, compartiments (tronc, branches, diamètres) et tissus (bois, écorce, feuilles) dans l'arbre. Notre modèle basé sur la chimie minérale parvient à saisir des variations qui s'expliquent par la chimie moléculaire de la biomasse, en particulier par l'interaction entre C et N.

### Conclusion, limites et perspectives

La prédiction du pouvoir calorifique en fonction de grandeurs disponibles dans le projet Emerge, notamment les concentrations en éléments minéraux aura été une aventure bien plus mouvementée que nous ne l'avions imaginé pour une analyse prospective. Il ne suffisait pas de réaliser une mesure supplémentaire (le PCS) sur quelques échantillons afin d'en tirer un modèle prédictif. Il a fallu saisir les différences fondamentales entre l'approche des énergéticiens et celle des biogéochimistes, détecter les écarts de normes et de calculs, et élucider le tout pour construire des ponts entre les deux domaines et leurs variables de prédilection.

Finalement nous obtenons un modèle de pouvoir calorifique relativement simple, cohérent avec ceux des énergéticiens mais utilisable sur les données de biogéochimistes. Cela permettra donc *in fine* de traduire en terme énergétique, différentes hypothèses de récoltes, que les gestionnaires pourront analyser de leur côté en terme d'exportation minérale.

Tissu	Compartiment	Nombre d'échantillons	PCS (kJ/kg)	Taux de cendres (%)
Bois	Branches 0 à 4 cm	47	19 350	0.82
	Branches 4 à 7 cm	33	19 435	0.71
	Branches >7 cm	35	19 265	0.88
	Tronc >7 cm	144	19 417	0.82
Ecorce	Branches 0 à 4 cm	47	20 294	2.15
	Branches 4 à 7 cm	33	20 066	2.34
	Branches >7 cm	42	18 041	5.53
	Tronc >7 cm	100	18 941	4.93
B+E	Branches 0 à 4 cm	293	19 503	1.25
	Branches 4 à 7 cm	263	19 438	1.19
	Branches >7 cm	46	19 585	1.00
	Tronc >7 cm	219	19 714	1.40
Feuilles		78	20 479	3.82

Tab. 2 : simulation de taux de cendres et de pouvoir calorifique supérieur à partir de données de minéralomasse INRA-BEF pour le hêtre; valeurs moyennes. (B+E = Bois et écorce)

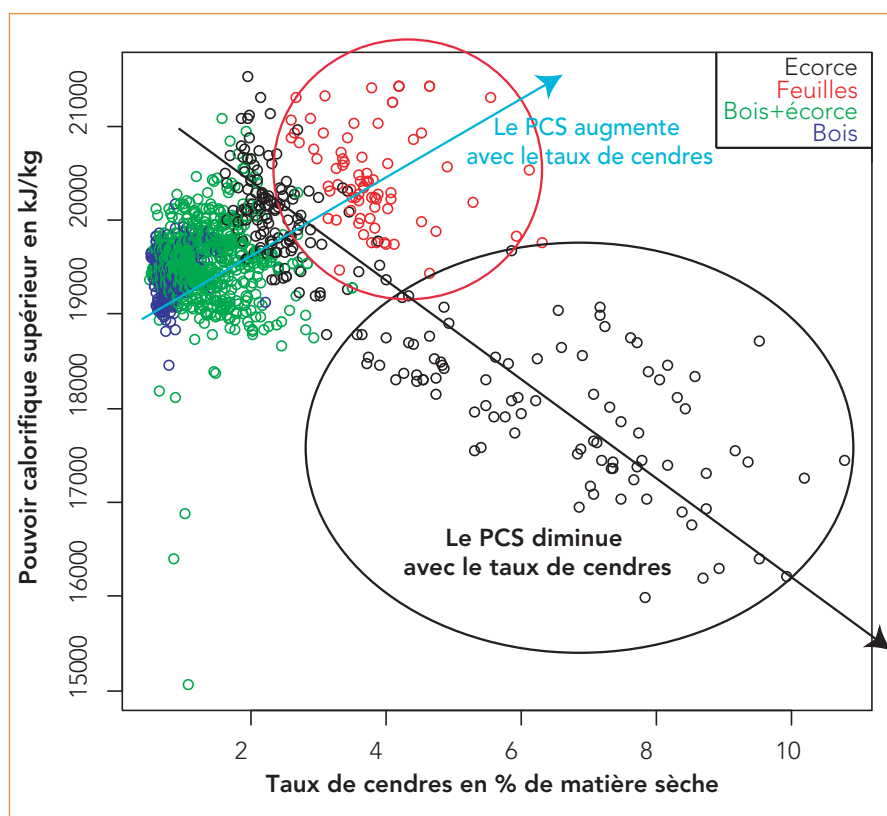


Fig. 4 : variations du pouvoir calorifique supérieur en fonction du taux de cendres, pour le hêtre (données minéralomasse de la base INRA-BEF)

Le PCS est calculé avec le modèle « CNA », le taux de cendres avec la formule combinant les éléments minéraux (S, P, K, Ca, Mg, Mn, Na). Le cercle noir présente la tendance générale connue d'une diminution du pouvoir calorifique quand le taux de cendres augmente. Le cercle rouge signale cependant le fort pouvoir calorifique des échantillons de feuilles malgré leur taux de cendres important. La flèche turquoise souligne que, dans la comparaison entre tissus, le PCS peut augmenter avec le taux de cendres du fait des interactions liées à des compositions différentes.

Le taux de cendres n'a été étudié ici que comme une variable intermédiaire pour prédire le pouvoir calorifique, mais la formulation trouvée en fonction de la somme des micro-éléments est en soi un résultat digne d'intérêt. Cela permet d'affiner, d'après la distribution des minéraux dans l'arbre, des constats déjà connus : on sait par exemple que les écorces ont un taux de cendres plus fort que le bois, mais on peut maintenant prédire que ce taux augmente quand la taille du compartiment ou de la branche diminue (diamètre extérieur).

En outre il se confirme que le taux de cendres est bien une information complémentaire du pouvoir calorifique pour la qualification énergétique la biomasse. L'application de notre modèle au cas du hêtre l'a bien montré, le taux de cendres (donc la teneur en minéraux) n'a pas toujours de lien négatif direct avec le pouvoir calorifique : on peut observer des pouvoirs calorifiques élevés malgré des taux de cendres importants, comme dans les feuilles et les menus bois ! Cela vient de ce que des interactions entre certains éléments, bien prises en compte dans notre modèle « CNA », peuvent compenser les effets négatifs.

Cependant la portée de ces premiers résultats reste limitée du fait de la taille de l'échantillon. La méthode ayant été bien décrite, les protocoles de mesure discutés et adaptés, une nouvelle série de mesures permettra de les valider et de confirmer notamment les effets d'interaction observés.

Les modèles de concentrations en éléments minéraux, qui sont en cours de publication pour le hêtre et de finalisation pour les autres essences, permettront une prédiction plus directe du taux de cendres et

du pouvoir calorifique en fonction de l'essence, du compartiment de l'arbre et de sa taille. Cela nécessitera d'ajouter le carbone dans les éléments considérés, puisque c'est l'élément central du modèle de pouvoir calorifique. L'étape suivante sera de combiner ces différents modèles dans les outils de simulation de la croissance, afin d'analyser les gains en pouvoir calorifique par rapport aux pertes en éléments minéraux selon différents itinéraires sylvicoles et différentes hypothèses d'exploitation. Ce travail fait précisément l'objet de la thèse de Nicolas Bilot en cours à l'INRA.

**Nicolas BILOT**  
**Laurent SAINT-ANDRÉ**  
INRA, UMR 1138-BEF  
54280 Champenoux  
prenom.nom@nancy.inra.fr

**Yann ROGAUME**  
ENSTIB, LERMAB  
Épinal

**Christine DELEUZE**  
ONF, département R&D

### Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants à Jean-Michel Leban, pour le démarrage du sujet avec Yann Rogaume et Laurent Saint-André, à Capucine Dupont et Yves-Marie Gardette pour les données utilisées en validation, à Claude Brechet pour les mesures de H, à Laurent Augusto et Guillaume Bodineau pour les échantillons supplémentaires.

Le BEF bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

### Bibliographie

Un article scientifique est en cours de soumission :

Bilot N., Saint André L., Rogaume Y., Brechet C., Augusto L., Dupont C., Bodineau G., Deleuze C., Predicting wood higher heating value from forest biomass nutrient content.

ADEME (anonyme), 2001. Mesure des caractéristiques des combustibles bois. Critt Bois – Fibois – CTBA, 34 p.

ADEME (Boucher B., Lourdais F., Willmann B.), 2002. Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés. Critt Bois – Fibois, 62 p.

ADEME (Le Net E., coord.), 2008. Référentiels combustibles bois énergie – définition et exigences. FCBA, 124 p.

Deleuze C., Laurier J.P., Fauchon T., 2001. Apport de la modélisation pour suivre et gérer l'évolution de la masse volumique de billons de bois d'industrie. Fiche Informations Forêt, n° 636, 6 p.