

Bois flottants à Verbois: déchets ou ressource?

Caractérisation physico-chimique et valorisation énergétique

Pierre-Alain VIQUERAT¹, Bernard LACHAL¹,
Johanna BECK¹, Eric PAMPALONI¹, Florian SELLA¹

Ms. reçu le 16 juin 2006, accepté le 17 juillet 2006

Abstract

Floating wood trapped in «Verbois dam»: wastes or resource? - At present big quantities of large woody debris are trapped in the reservoir of «Verbois dam» on the river Rhône. The median weight, which accumulates is about 500 ton_{dry}/year, depends of seasonal flood of the river Arve. In 2005, the quantity of extracted wood is about 1000 m³, or 180 ton_{dry}. These large woody debris, composed with more than 95% of natural wood (5% maximum of anthropogenic wastes) leads to a decrease of income and management over costs for the dam owner.

These large woody debris have to be processed, except some conditions; the dam owner has to build required installations to extract and collect these floating wastes.

Sampling were conducted right after the spring flood of March 2005 and the autumn flood of September 2005: collection of 40 wood slides and several wood chips volumes right after their crushing. The most representative species belongs to willow gender, alder and poplar. Despite a high humidity, large woody debris have a real energy potential: higher heating values \approx 17.5-20 MJ/kg_{dry}. A contamination risk exists, if appropriate processing are not settled during their extraction-transformation. Addition of sediments, which are trace metals rich, highly modify the chemical quality of large woody debris: in addition to wood, the extraction method has added a big quantity of sediment during the spring flood (about 15% ash level after wood chips combustion). The second extraction method of autumn flood, taking only floating woods on water surface, produces only 3% ash level. This fact is also reinforced by the levels of trace metals in large woody debris, which are 10-20 times higher for spring flood samples than for autumn flood samples. Levels of trace metals in wood chips extracted and crushed in autumn entirely satisfy the SN 166 000 standard (pellets made of compressed wood); this is not the case for spring wood chips.

The «Site de Châtillon» (centre for biomass wastes), which is located at 2 km from Verbois dam, products 1760 ton_{dry}/year of «wood-waste» (coarse compost and stump), non-exploitable as fertilizer, but which could be used to energy production. If large woody debris are added to these «wood-wastes», the annual potential of «energy-wood» is 2260 ton_{dry}/year, which could also be completed by Geneva district and regional forests production. With unused heat surplus existing in the region (incineration plant «Les Cheneviers» and compost plant «Site de Châtillon») and transport infrastructures, all conditions of an «écosite» implementation are gathered, in which manufacturing of a modern «wood-combustible» from natural wood and wood-waste could be feasible. It could ensure and promote an ideal regional management of wood resources.

Keywords: Biomass, energy-wood, large woody debris, extraction method, wood chips, energy valorization, heating value, trace metals, ash level, sediment.

¹ Université de Genève, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, 7 route de Drize, CH-1227 Carouge, tél. 022 379 06 51 - pierre-Alain.Viquerat@cuepe.unige.ch

Résumé

Actuellement, de grandes quantités de bois flottants s'accumulent sur le Rhône genevois, en amont du barrage de Verbois. La masse de matériel accumulé est dépendante des crues saisonnières de l'Arve. Sa valeur moyenne est de 500 tonnes_{sec}/an. En 2005, la quantité de bois extraite est d'environ 1000 m³, soit 180 tonnes_{sec}. Ces détritus flottants, composés à plus de 95% par du bois flottant d'origine naturelle (au maximum 5% de déchets anthropiques), induisent des pertes de revenus et des coûts supplémentaires d'exploitation pour les exploitants du barrage.

Légalement, ces «débris flottants» doivent être traités: l'exploitant a l'interdiction de rejeter en aval les détritus flottants recueillis en amont, sauf exceptions; l'exploitant est tenu de construire les ouvrages nécessaires à la collecte des détritus flottants.

Après les crues de mars et septembre 2005, un échantillonnage des bois flottants est effectué: collecte de 40 rondelles de bois et de plusieurs volumes représentatifs de plaquettes récupérées après leur broyage. Les espèces les plus représentées sont les salicacées, aulnes et peupliers. Malgré une forte humidité, les bois flottants ont un réel potentiel énergétique: pouvoirs calorifiques supérieurs $\approx 17.5\text{--}20\text{ MJ/kg}_{sec}$ (moyenne). Il existe un risque de contamination de la ressource si des mesures opérationnelles adéquates lors de leur extraction-transformation ne sont pas mises en œuvre. L'adjonction de sédiments (riches en métaux traces) par exemple, influence fortement la qualité chimique des bois flottants. Lors de la crue printanière, le mode d'extraction pratiqué a conjointement soutiré une importante quantité de sédiments (taux de cendres proche de 15% après combustion des plaquettes). L'extraction pratiquée lors de la crue automnale, ne soutirant que les bois flottants en surface, ne délivre que 3% de cendres après combustion. Cela se traduit également par des teneurs en métaux traces 10-20 x supérieures pour les échantillons de la crue printanière. Par contre, les teneurs en éléments traces des plaquettes extraites et broyées en automne satisfont pleinement la norme SN166 000 (pellettes de bois-combustible).

Trois filières énergétiques ont été explorées: l'incinération à l'UIOM des Cheneviers (cogénération avec CADION); l'alimentation des chaufferies à bois collectives locales; le développement d'un écosite «biomasse-énergie» sur le site de traitement des déchets verts de Châtillon (ce site regroupe les deux premières filières énoncées ainsi que d'autres qui s'y grefferont). Le site de traitement des déchets verts de Châtillon, situé à 2 km du barrage de Verbois, produit 1760 tonnes_{sec}/an de déchets-bois (composts grossiers et souches) non exploitables en tant qu'amendement agricole, qui pourraient être valorisés énergétiquement. En ajoutant les bois flottants, on disposera de plus de 2000 tonnes_{sec}/an de bois-combustible sur le périmètre, qui pourraient être complétées par des plaquettes issues des forêts cantonales ou régionales (Haute-Savoie, Ain). Avec la chaleur non utilisée existante sur le périmètre (UIOM des Cheneviers, cogénération du biogaz du site de Châtillon) et les diverses infrastructures de transport, les éléments pour réaliser un écosite pour la fabrication d'un combustible bois moderne (pellettes) à partir de bois naturel et de déchets-bois sont réunis, permettant une gestion assez idéale de la ressource bois genevoise et transfrontalière.

Mots clefs: Biomasse, bois-énergie, bois flottants, extraction des bois flottants, plaquettes, valorisation énergétique, pouvoir calorifique, métaux traces, teneur en cendres, sédiments.

Abréviations

CAD: chauffage à distance

CADION: chauffage à distance par l'incinération des ordures ménagères

ICP-MS: Spectroscopie de masse avec plasma par couplage inductif

PCI: Pouvoir calorifique inférieur

PCS: Pouvoir calorifique supérieur

UIOM: Usine d'incinération des ordures ménagères

XRF: fluorescence par rayons X

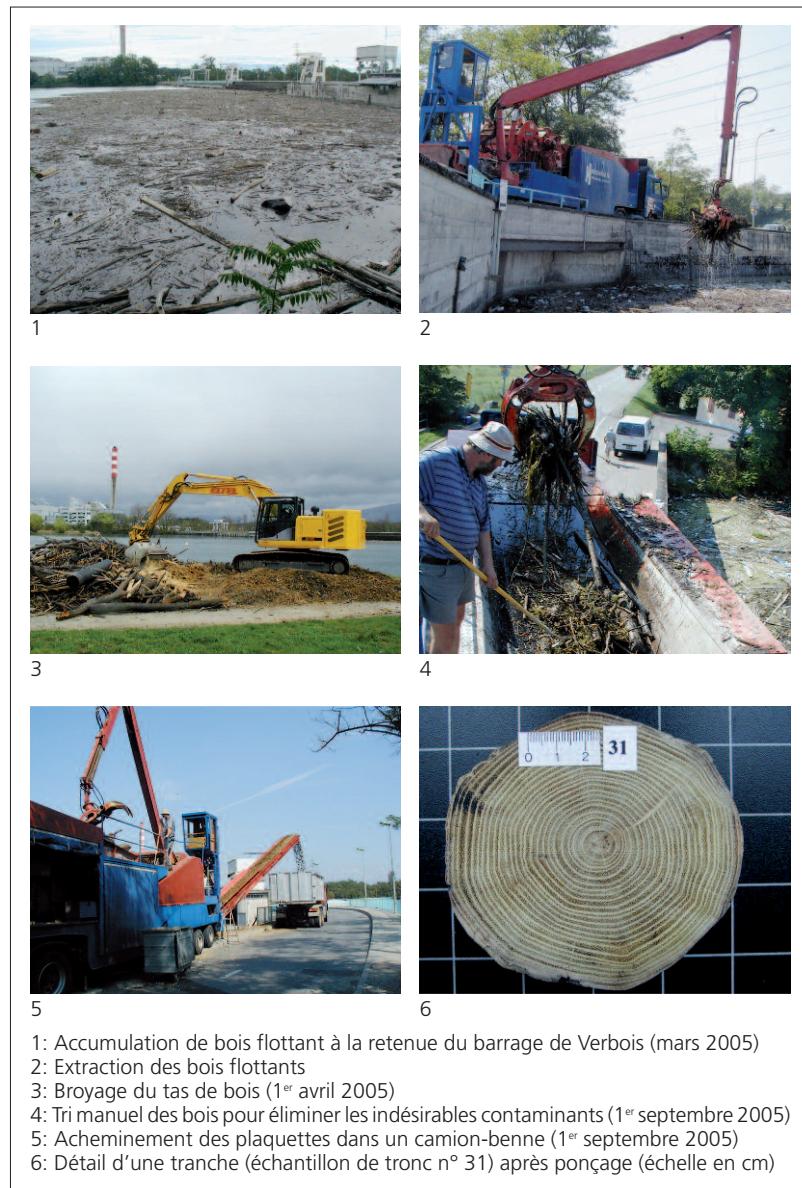
Introduction

Les bois flottants accumulés en amont du barrage hydroélectrique de Verbois (situé sur le Rhône genevois, 10 km en aval de Genève, d'une puissance de 100 MW et produisant annuellement 466 GWh) appartiennent pour la plupart à la classe de bois à l'état naturel. En effet, le bois flottant provient des forêts riveraines de l'Arve et du Rhône. Il peut s'agir d'arbres naturels ou de bois de coupe emmenés par les eaux lors de crues.

D'autres types de déchets flottants s'accumulent avec le bois flottant: déchets de bois (résidus de bois et bois usagé) ainsi que divers types d'indésirables (plastics, drains agricoles, roues, animaux morts, em-

ballages plastiques, polystyrène expansé - sagex[®], bouteilles en PET, ...). La proportion de ces déchets «contaminant» le bois flottant représente environ 2 à 4% du volume total selon les saisons. Chaque type de déchet bois ne peut être brûlé de manière optimale que dans des chaudières spécifiques, adaptées à leur degré de contamination:

- **Bois à l'état naturel:** chaudières, poêles et cheminées privées ($< 40\text{ [kW]}$),
- **Résidus de bois:** chaudières industrielles soumises à des contrôles obligatoires ($> 40\text{ [kW]}$),
- **Bois usagé:** installations spécialisées (fours d'UIOM et chaudières de fabriques de ciments),
- **Bois à problème:** exclusivement dans une UIOM ou dans une chaudière spécialisée.



Il est délicat de classer les bois flottants accumulés au barrage de Verbois de manière stricte dans l'une de ces 4 catégories de bois: 2 à 4% de matières indésirables (plastiques, bouteilles PET, sagex, pneus, etc.) réduisent cette ressource potentielle à un déchet dont l'impact contaminant est difficile à estimer. En Suisse, aucune norme qualificative n'existe sur la qualité d'un combustible solide (biomasse); seules les valeurs d'émissions fixées par l'Opair sont contraignantes: la norme SN166 000 relative aux pellettes de chauffage sera utilisée comme point de repère, car ces pellettes ne sont composées que de «bois naturel».

■ Matériel et méthode

La 1^{re} extraction des bois flottants accumulés au barrage est pratiquée durant la deuxième quinzaine de mars 2005: les bois flottants sont sortis de l'eau à

Fig. 1: Etapes de l'extraction et de la valorisation des bois flottants accumulés dans le bassin du barrage de Verbois.

l'aide d'un grappin télescopique. Ils sont ensuite entreposés, puis broyés au temps T_0 (1^{er} avril 2005), sans tri, à l'aide d'une broyeuse à marteaux (Fig. 1, photos 1, 2 et 3).

La 2^e extraction est pratiquée 5 mois plus tard ($T_1 = 1^{\text{er}} \text{ septembre 2005}$): les bois flottants sont sortis de l'eau à l'aide d'un grappin télescopique. Ne sont récupérés que les bois flottant en surface du bassin d'accumulation. Ils sont ensuite triés manuellement sur le rouleau mécanique du camion (Fig. 1, photo 4), puis acheminés vers le broyeur à marteaux, à la sortie duquel les plaquettes sont récupérées dans un camion-benne (Fig. 1, photo 5).

Quarante tranches d'environ 5-15 cm d'épaisseur sont prélevées au temps T_0 (1^{er} avril 2005) dans le tas de bois sur des troncs de diamètre $> 8 \text{ cm}$, à 1,3 m de la base du tronc; les tranches sont ensuite poncées (Fig. 1, photo 6). Le diamètre et la longueur du tronc sont mesurées, le genre déterminé et le type de tronc (naturel ou transformé) selon la méthode proposée par Moulin B. et Piégay H. (2004). La tranche est ensuite coupée en

deux parties: une tranche de référence et une tranche d'analyse. Cette dernière est séchée (105°C), pesée et son volume déterminé. Elle est broyée en 3 fractions granulométriques ($< 500 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m} < X < 1000 \mu\text{m}$, $> 1000 \mu\text{m}$). Ensuite, des analyses par bombe calorimétrique sont effectuées: le PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) est déterminé sur un échantillon d'environ 1 g anhydre, constitué de $\frac{1}{3}$ (en masse) de chaque fraction granulométrique: la précision obtenue est meilleure que 3%. Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) anhydre est calculé à partir du PCS anhydre, duquel l'énergie de vaporisation liée au contenu en hydrogène intrinsèque ($H_{\text{moy}} = 6.23\%$, ce qui correspond à 1.37 [MJ/kg]) est déduite. Le PCI humide est calculé à partir du PCI anhydre, duquel l'énergie de vaporisation liée au contenu en eau est également déduite. Enfin, les éléments majeurs tels que le chlore, l'azote et le soufre et, ainsi que les métaux traces (ar-

Tableau 1: Genres et/ou espèces des troncs échantillonnés lors de la crue printanière (avril 2006),

Espèces	Abondance [%]
Salicacées	25
Aulne	17.5
Peuplier	10
Conifère	7.5
Robinier	7.5
Charme	5
Fruitiers	5
Frêne	5
Hêtre	2.5
Bouleau	2.5
Noisetier	2.5
Orme	2.5
Chêne	2.5
Indéterminés	5

senic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb et zinc) sont dosés par XRF (Fluorescence par Rayons-X).

Deux échantillons de plaquettes de 2 kg sont prélevés dans deux endroits bien distincts du tas de bois au temps T_0 (8 avril 2005). Deux autres échantillons sont prélevés au temps T_1 (1^{er} septembre 2005). Chaque échantillon est tamisé (<5.6 mm, 5.6 mm <X <16 mm, >16 mm), séché (105°C), pesé; la teneur en cendres est déterminée (560°C) sur une partie de l'échantillon; l'autre partie est broyée en 3 fractions. Les analyses par bombe calorimétrique sont effectuées de la même manière que sur les échantillons de troncs (*cf. ci-dessus*), et le dosage des éléments majeurs et métaux traces est effectué cette fois-ci par ICP-MS (Spectroscopie de Masse avec Plasma par Couplage Inductif).

Résultats

Espèces

Les espèces les plus abondantes appartiennent à la végétation typique de la ripisylve: les salicacées, l'aulne et le peuplier composent à eux seuls plus de 50% des troncs échantillonnés (Tableau 1). Les conifères

sont également bien représentés (7.5%), car on les trouve en abondance au bord de l'Arve, tout comme le Robinier, espèce abondante et endémique. De manière générale, les essences de «bois durs» sont moins abondantes que les espèces riveraines typiques.

Humidité et densité des bois flottants

Après 12 jours de séchage naturel, l'humidité de tous les échantillons reste très élevée. La plupart d'entre eux possèdent une humidité sur masse sèche comprise entre 30 et 60% (Fig. 2). Seul l'échantillon de chêne (éch. n°12) possède encore une humidité bien plus élevée (93%). Les deux échantillons de plaquettes issues de la crue de septembre 2005 ont une humidité moyenne de 49%, dépassant la valeur limite fixée dans la norme SN166000 (<12%).

Les densités anhydres mesurées sont globalement bien plus faibles que les valeurs données par la littérature (Fig. 3) (Jurgen et Kropf 1990). Cela peut s'expliquer par une altération des bois dans la période comprise entre leur déracinement ou abattage et la détermination de la densité (2 mai 2005). En effet, les troncs passent un certain temps à terre et/ou dans le lit de la rivière, ce qui souvent altère leur structure en surface.

Cendres

La répartition du bois dans les trois fractions granulométrique est quasiment la même entre les deux campagnes. En revanche, les teneurs en cendres sont significativement différentes (Fig. 4 et tableau 2): 14.7 pour les échantillons du printemps 2005 et seulement 3.5% pour ceux d'automne 2005. Par contre, ces deux valeurs sont supérieures à la valeur indicative pour la combustion des pellettes (*teneur* <1.5%, norme SN166 000).

Fig. 2: Humidité sur masse sèche des troncs échantillonnés lors de la crue printanière (avril 2006).

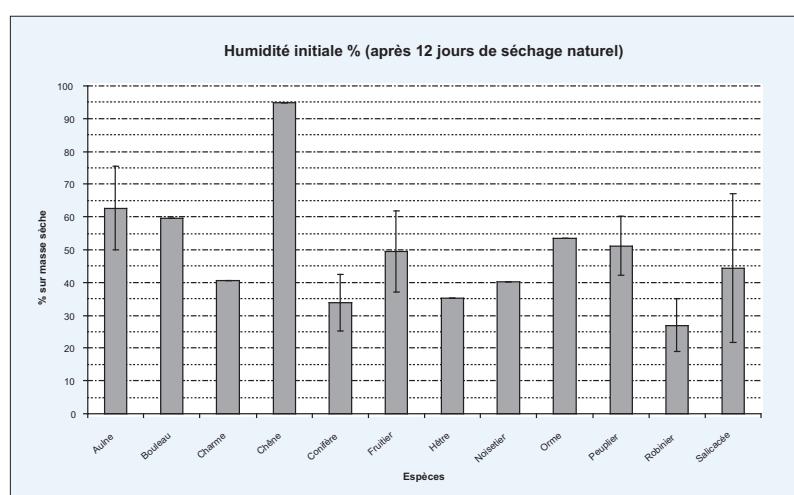


Fig. 3: Densités anhydres des troncs échantillonnés lors de la crue printanière (avril 2005).

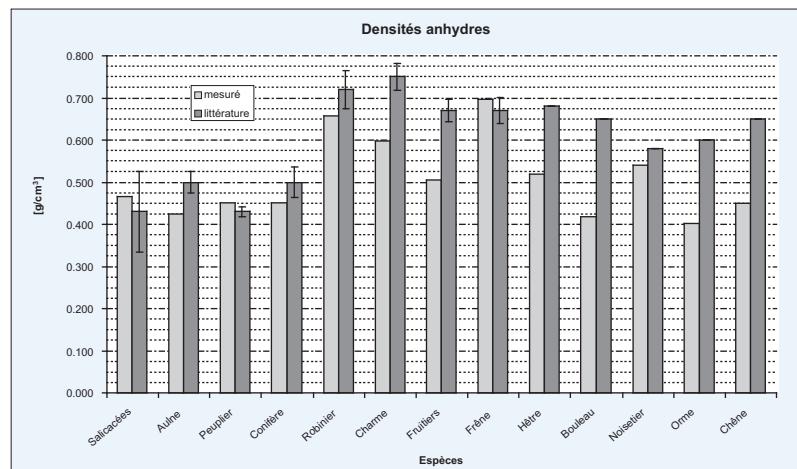
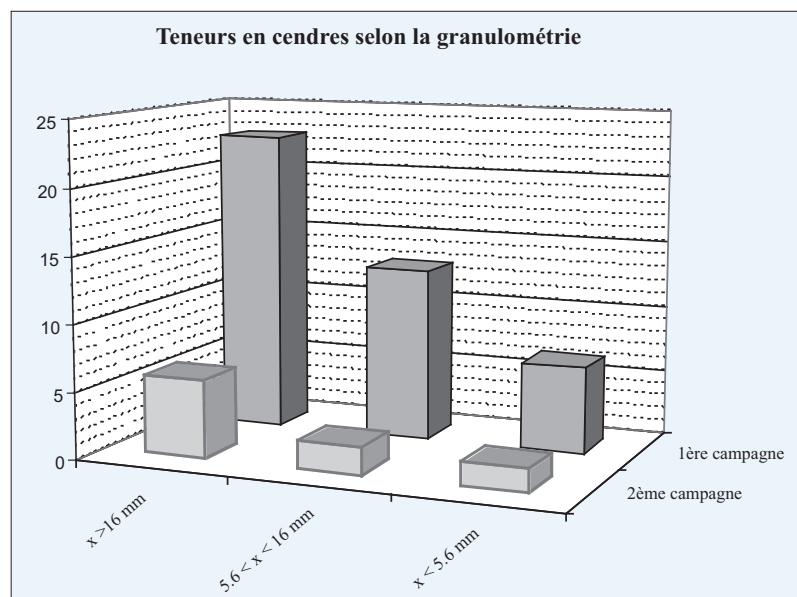


Fig. 4: Teneurs en cendres des plaquettes issues des crues printanière (campagne 1) et automnale (campagne 2).



Pour les deux campagnes, la plus forte contribution en cendres provient de la fraction de plaquettes fines (<5.6 [mm]): celle-ci est constituée de fortes quantités de matériaux de type sédimentaire (vase, sédiments, sables) qui se retrouvent isolés dans la fraction fine après l'opération de tamisage. Cette matière minérale ne pouvant pas s'oxyder lors de la combustion, de grandes teneurs en matière minérale sont obtenues à la fin de cette seconde opération.

Toutefois, la teneur en cendres est bien plus faible pour la campagne 2 (3.5% contre 14.7% pour la campagne 1) (Beck 2006; Sella 2006). Cela s'explique par les modes d'extraction pratiqués: lors de la deuxième campagne, les bois flottant ont été extrait de l'eau par un autre procédé que pour la première campagne d'échantillonnage, ce qui évite probablement de «gratter» le fond du bassin de retenue du barrage lors de l'extraction, empêchant ainsi de ramener de grandes quantités de matériaux minéraux.

Éléments majeurs

Les teneurs en éléments majeurs (Cl, N et S) sont largement en dessous des valeurs limites (Tableau 3), ce qui montre que du point de vue de leur valorisation énergétique, ces bois ne devraient pas poser de problème, par exemple en termes d'émission de SO_x (oxydes de soufre) et composés chlorés.

La teneur moyenne mesurée en hydrogène est de 6.23% (Tableau 3).

Métaux traces

De manière générale, les plaquettes issues de la crue printanière indiquent des teneurs en métaux bien plus importantes que celles issues de la crue automnale: les valeurs d'arsenic, de chrome, de cuivre et de plomb sont largement en dessus des valeurs limites fixées (norme SN166 000) pour les plaquettes de la

Tableau 2: Teneurs en cendres des plaquettes issues des crues printanière (campagne 1) et automnale (campagne 2).

	Masse de bois [g]	Parts de bois [%]	Masse de cendres [g]	Parts de cendres [%]	Teneurs en cendres [%]
Campagne 1					
Grossière	785.25	35.5	51.77	15.9	6.5
Moyenne	523.59	24	69.63	21.4	13
Fine	894.24	40.5	203.60	62.7	22.7
Total	2203.08		325.00		14.7
Campagne 2					
Grossière		35		1.7	
Moyenne		24		2	
Fine		41		5.8	
Total			3.5		

Tableau 3: Synoptique des teneurs en éléments majeurs et métaux traces des plaquettes issues des crues printanière (campagne 1) et automnale (campagne 2); *mesuré sur un échantillon de tronc de salicacée n°19, (Sella F, 2006).

Eléments	Plaquettes printemps 05; (par XRF)	Plaquettes automne 05; (par ICP-MS)	Norme SN166'000 (pellettes)
C [%]	48.29 ± 0.80*	nd.	nd.
H [%]	6.23 ± 0.078*	nd.	nd.
N [%]	0.125 ± 0.078*	nd.	< 0.3
S [mg/kg]	191	nd.	< 400
Cl [mg/kg]	23	nd.	< 300
As [mg/kg]	1.3	0.34 ± 0.08	< 0.8
Cd [mg/kg]	nd.	0.15 ± 0.01	< 0.5
Cr [mg/kg]	26	1.7 ± 0.1	< 8
Cu [mg/kg]	25	2.7 ± 0.1	< 5
Hg [mg/kg]	nd.	0.027 ± 0.01	< 0.05
Pb [mg/kg]	12	0.7 ± 0.08	< 10
Zn [mg/kg]	48	22 ± 1.3	< 100

campagne 1 (Tableau 3): L'arsenic dépasse d'environ 4x la norme, le cuivre de 5x, le chrome de 3x et le plomb que de très peu (Beck, 2006). En comparaison, les plaquettes issues de la campagne 2 ont des teneurs bien inférieures aux valeurs limites fixées (norme SN166 000).

Cette différence s'explique par le type d'extraction pratiqué. Les sédiments se trouvent en effet accrochés à la surface des troncs ainsi que dans leurs interstices. Fortement enrichis en métaux traces (Tableau 4), ces sédiments (baie de Verbois) se retrouvent, incorporés «à la ressource». Cette forte teneur en sédiments est également représentée par la teneur importante en cendres de la fraction granulométrique fine des plaquettes de la crue printanière (Fig. 4).

Les teneurs en métaux sont plus importantes dans la partie externe des échantillons de troncs (écorce et aubier) que dans la partie interne (duramen),

corroborant le rôle contaminant du sédiment incrusté (Fig. 5). Les teneurs élevées en métaux traces sont bien plus importantes dans la fraction fine de plaquettes (< 5.6 mm) que dans les deux autres fractions (moyenne et grossière). Cela s'explique encore par la présence majoritaire de sédiment contaminant dans la fraction < 5.6 mm. Etant donnée la plus grande surface spécifique des plaquettes de granulométrie fine, les sédiments s'y retrouvent en quantité bien plus importante que dans les deux autres fractions granulométriques de plaquettes (Fig 6).

La qualité de l'eau qui arrive au barrage de Verbois dépend de celles du Rhône et de l'Arve. Si les apports par le Rhône émissaire du Léman sont, en masse, les plus importants, les variations de composition des eaux du Rhône, en aval de la jonction Arve-Rhône, sont fortement influencées par les eaux de l'Arve (Fig. 7) (Nirel et Revaclier 2001).

	Sédiments bas Verbois		Sédiment haut Verbois	Valeur indicative OSol (teneurs naturelles du Léman)	Sédiments (Koukal, 1999; Perroud, 2000)
	(Koukal, 1999)	(Perroud, 2000)	[mg/kg]		
Cd	1.3	2.0	0.8	0.2	
Cr	41.9	nd.	50	nd.	
Cu	33.5	44.1	40	30	
Hg	nd.	0.4	0.5	0.03	
Pb	32.6	45.9	50	30	
Zn	152.3	111.2	150	60	

Tableau 4: Teneurs en métaux traces des sédiments de la retenue de Verbois; valeurs indicatives OSol (Ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols); teneurs naturelles des sédiments du lac Léman.

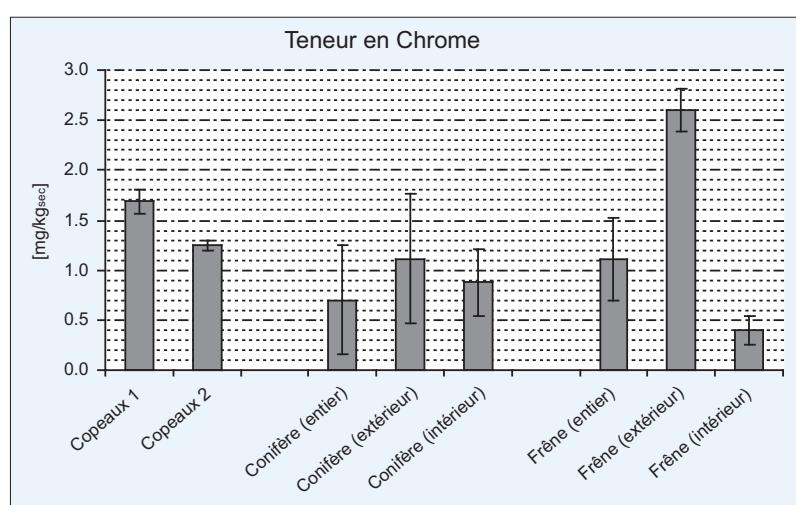


Fig. 5: Teneurs en chrome dans les plaquettes et différentes parties de troncs (échantillons de conifère et de frêne).

La «qualité» de l'eau se reporte sur la qualité du sédiment, par adsorption des cations en solution puis par sédimentation. Les sédiments de la retenue de Verbois sont constitués principalement par les produits de l'érosion du bassin versant de l'Arve (Perroud 2000), le Rhône ne transporte quasiment plus de sédiments depuis sa sortie du lac Léman; la qualité de l'eau de l'Arve, fortement influencée par les rejets liés aux nombreuses industries, péjore donc la qualité du sédiment de l'Arve (Koukal 1999).

Calorimétrie

Pour les 40 échantillons, le PCS_{anhydre} est compris dans un intervalle approximatif de 17.5-20 MJ/kg_{sec} (Fig

8), hormis les 3 échantillons suivants qui sont soit situés bien en dessous de cet intervalle (éch. 36 = 16 MJ/kg_{sec} et éch. 40 = 15.8 MJ/kg_{sec}), ou en dessus de cet intervalle (éch. 35 = 23 MJ/kg_{sec}). Dans l'ensemble, les échantillons analysés possèdent un pouvoir calorifique (17.5-20 MJ/kg_{sec}) satisfaisant la norme relative au bois de chauffage (SN 166 000: PCS > 18 MJ/kg_{sec}).

Les échantillons mesurés étant anhydres, le PCI_{anhydre} est calculé sur la base du PCS_{anhydre} mesuré, duquel l'énergie de vaporisation liée au contenu en hydrogène intrinsèque des échantillons de bois est déduite (H_{moy} mesuré = 6.23%) (Fig. 9). Si l'humidité par rapport à la masse sèche est d'environ 50% (après 12 jours de séchage naturel en laboratoire), la diminution du crédit énergétique est de 8% par rapport au PCI_{anhydre}, et de 16% par rapport au PCS_{anhydre}.

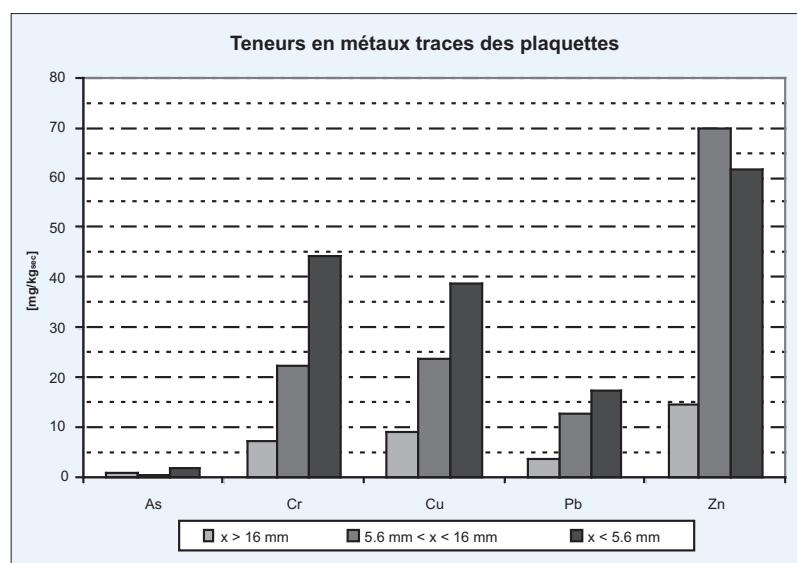


Fig. 6: Teneurs en métaux dans les trois fractions granulométriques des plaquettes.

Fig. 7: Concentrations en métaux traces des eaux de l'Arve (Ste-Clotilde), du Rhône-amont (Pâquis) et du Rhône-aval (R+A, Chancy) (Nirel 2004).

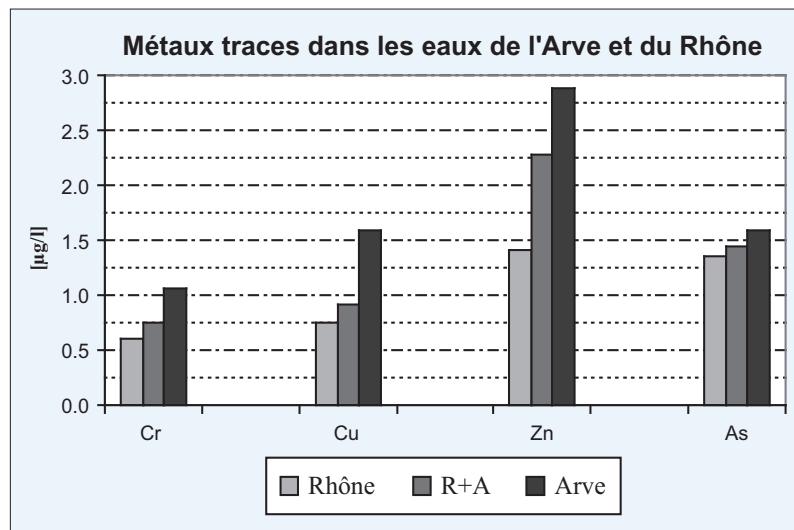
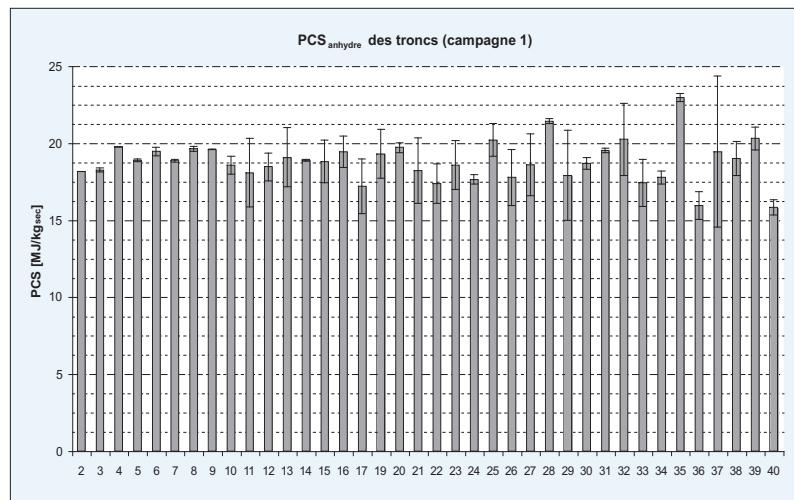


Fig. 8: Pouvoir calorifique supérieur (PCS_{anhydre}) des échantillons de tronc issus de la crue printanière (campagne 1); les barres d'erreur correspondent à la fluctuation entre les différents sous-échantillons analysés.



Troncs

Les espèces les plus représentatives (saules, aulnes et peupliers qui constituent environ 35% du nombre d'échantillons récoltés) possèdent un PCI_{anhydre} de l'ordre de 17.5 MJ/kg_{sec}, satisfaisant ainsi aisément au critère correspondant fixé par la norme SN166 000 (PCI_{anhydre} > 16.7 MJ/kg_{sec}). Il en est de même pour le PCI_{anhydre} des autres espèces, allant de 16.8 MJ/kg_{sec} (hêtre) à 18 MJ/kg_{sec} (conifères). Les valeurs sont donc très homogènes, avec une valeur moyenne de 17.4 ± 0.6 MJ/kg_{sec} (Fig. 9).

Les PCI_{anhydre} intra-espèces varient dans une fourchette comprise entre 3 et 6%. Cette différence peut être expliquée par le fait que certains échantillons n'appartiennent pas à l'espèce à laquelle ils ont été attribués, ou encore parce qu'il y a une certaine hétérogénéité à l'intérieur de chacun des groupes d'espèce considéré (variation du degré de pourrissement et/ou de densité), ce qui influence leur pouvoir calorifique.

A l'exception du robinier, les PCI_{anhydre} mesurés sont tous inférieurs aux PCI_{anhydre} de la littérature déterminés sur des bois de coupe (Reisinger et al. 1992) (Fig. 9). En effet, les PCI_{anhydre} des échantillons de bois flottant sont inférieurs de 16% au maximum à ceux des bois de coupe (Reisinger et al. 1992), sauf pour le robinier (le PCI_{anhydre} mesuré est supérieur de seulement 2%).

Plaquettes

Les plaquettes échantillonées lors de la deuxième campagne (seuls les bois flottants à la surface du plan d'eau sont extraits) (Fig. 9) montrent une valeur de PCI_{anhydre} de 16.8 ± 0.6 MJ/kg_{sec}, satisfaisant ainsi au critère correspondant fixé par la norme SN166 000 (PCI_{anhydre} > 16.7 MJ/kg_{sec}), mais de manière bien moins évidente que les troncs pris par espèces individuellement. Cela s'explique par le fait que les plaquettes sont constituées d'un mélange de tous les types de bois flottant possibles (troncs, grosses et petites branches, brindilles, feuilles plus ou moins dé-

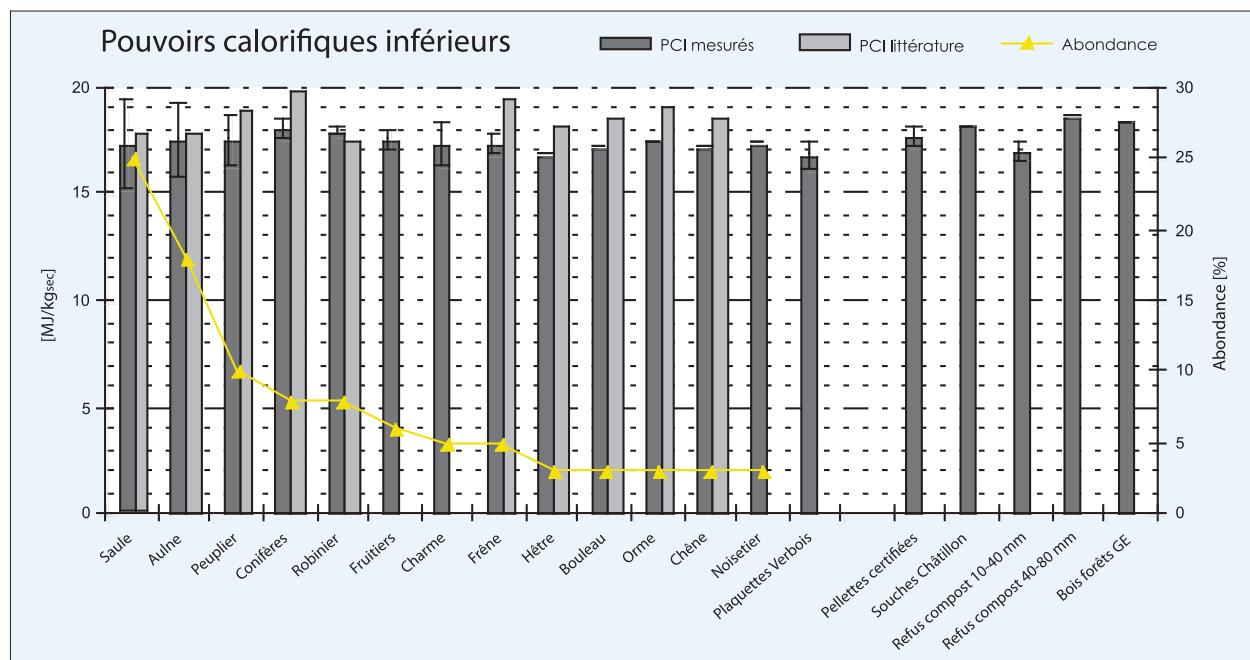


Fig. 9: PCI_{anhydre} moyen (mesurés et littérature) des différentes espèces et abondances relatives; PCI_{anhydre} de différentes sources de «bois-énergie» locales (Reisinger et al. 1992); les barres d'erreur correspondent à la fluctuation entre les différents sous-échantillons analysés.

composées, algues, etc.). L'altération et le pourrissement de matériaux plus fins (rapport surface/volume supérieur à des troncs) abaissent en effet de manière significative le pouvoir calorifique des plaquettes (Viquerat et al. 2006).

En comparaison avec des pellettes certifiées achetées sur le marché (PCI_{anhydre} mesuré = 17.67 MJ/kg_{sec}), les plaquettes échantillonnées ont un pouvoir calorifique environ 5% inférieur (Fig. 9). Cette baisse de pouvoir calorifique est significative mais tout à fait acceptable: les plaquettes satisfont encore à la norme SN 166 000, mais possèdent également les avantages de constituer une ressource potentielle jusqu'alors inexploitée.

La comparaison avec d'autres types de «déchets-bois» géographiquement très proches, à savoir les souches récupérées au Site de Châtillon et les refus de compost 4-10 mm issus du processus de compostage (Viquerat et al. 2006), montre que les plaquettes de Verbois ont un PCI_{anhydre} intermédiaire: le PCI_{anhydre} des souches est de 18.19 MJ/kg_{sec} (EMPA 2005), celui des plaquettes issues du bois de coupe de la forêt genevoise est de 18.4 MJ/kg_{sec} (Xylon SA 2002), celui des refus de compost 40-80 mm de 16.96 MJ/kg_{sec} (EMPA 2005), et celui des refus de compost 10-40 mm de 17.3 MJ/kg_{sec} (Viquerat et al. 2006) (Fig. 9). Il y a donc un réel potentiel de production énergétique à valoriser à partir de la biomasse locale.

Fluctuation inter-annuelle de la quantité de bois flottants

La quantité de bois flottant accumulée derrière un barrage reste difficile à estimer de manière univoque. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour essayer de quantifier cet apport (Tableau 5): une première méthode consiste à faire une pesée des plaquettes après l'extraction de bois flottants (SIG années 80), une seconde est liée à l'hydrologie de l'Arve (la relation avec la quantité de bois n'est pas évidente: si deux fortes crues se succèdent, la deuxième n'apportera par forcément beaucoup de troncs d'arbres ou de branches) (Moulin et Piégay 2004) et une troisième basée sur la mesure de la surface de bois accumulé dans la retenue du barrage (SIG, années 80). En couplant ces méthodes, la quantité de référence peut être estimée à 500 tonne_{anhydre}/an (valeur médiane) environ, avec un minimum de 120 tonne_{anhydre}/an et un maximum de 800 tonne_{anhydre}/an (Viquerat et al., 2006). Compte tenu de l'humidité initiale de la ressource, il est envisageable de l'exploiter après un séchage adéquat: le potentiel énergétique (médian) de référence est donc de 2220 MWh (pour une masse médiane annuelle de 650 tonne_{humide} à 30% d'humidité sur masse sèche, soit 500 tonne_{sec}/an) (Tableau 5) (Viquerat et al. 2006).

Rappelons que le bois flottant arrive au barrage de manière massive deux fois par an, au printemps et en automne.

Tableau 5: Comparaison des quantités annuelles de bois accumulé au barrage de Verbois en fonction de la méthode utilisée et estimation de la quantité de référence.

	Pesée (méthode 1)	Calculée en fct. des débits de pointe (méthode 2)	Surface mesurée minimum sur 5 ans (méthode 3)	Surface mesurée maximum sur 5 ans (méthode 3)	Référence Cuepe
Surface estimée [m ²]	8975	-	3850	22 100	-
Volume estimé [m ³]	1000	-	770	4420	-
Masse [tonne _{humide}]	360	1100	270	1545	250-1600
Masse [tonne _{anhydre}]	180	550	135	770	120-800

I Filières envisageables

Plusieurs filières de valorisation «énergie» sont envisageables, en tenant compte de deux paramètres majeurs déterminants: d'une part la proximité des sites de production et de consommation, d'autre part l'utilisation d'installations de production déjà existantes. Les trois filières principales sont l'usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) des Cheneviers (réseau de chauffage à distance CADIOM), l'alimentation de chaufferies à bois collectives locales et le développement d'un écosite «biomasse-énergie» (filière 1 + filière 2 + autres). Les deux premières filières ne sont pas détaillées. Essentiellement en raison de l'évolution de l'UIOM des Cheneviers (politique de gestion cantonale des déchets) et des difficultés de stockage de la ressource, cette première filière n'est pas retenue. De même, l'alimentation de chaufferies à bois collectives locales n'est pas traitée, notamment pour des raisons de qualité de la ressource (Ordonnance pour la protection de l'air: OFEFP 2004) et d'acceptabilité de la ressource par les usagers potentiels.

Développement d'un écosite «bois-énergie»

Il ne s'agit pas *stricte sensu* d'une filière, mais plutôt d'un tissu local de filières liées à la biomasse qui peuvent s'interconnecter les unes aux autres. Il s'agit d'une vision bien plus large de l'ensemble des filières-bois potentielles dans la région genevoise (écologie industrielle) (Erkman 2000).

Concentration d'infrastructures

La présence du Rhône est très structurante: présence de nombreux axes de transport (fleuve, route, chemin de fer), installations de production énergétique (barrage de Verbois et Chancy-Pougny, UIOM des Cheneviers et Site de Châtillon) et installation de traitement de déchets (UIOM des Cheneviers et Site de Châtillon).

Des ressources «bois» ou apparentées en qualité

Le site de Châtillon, principal centre de récupération des déchets verts du canton, est situé à 2 km du barrage de Verbois. Il reçoit des branchages et des sou-

ches (déchets-bois) dont le traitement engendre une quantité importante de matériaux ligneux secondaires (Faessler 2001; Faessler communications personnelles). En y ajoutant le bois flottant accumulé à Verbois, on disposera ainsi d'une quantité importante de «bois-combustible» sur le périmètre (Tableau 6).

En tenant compte de l'ensemble de ces ressources, l'énergie potentielle est d'environ 11 GWh (Tableau 6). En partant du fait que les plaquettes sont utilisables avec une humidité d'environ 30%, l'énergie potentielle n'est plus que d'environ 10.4 GWh. Il faut toutefois relever que la quantité annuelle de ces ressources potentielles peut varier considérablement. De plus, la qualité de ces ressources potentielles n'est peut-être pas suffisante pour leur valorisation en tant que «bois-énergie». En plus de ces ressources, d'autres types de sous-produits de même type, provenant du bassin genevois, pourraient tout à fait être collectés dans la région et facilement acheminés jusqu'à l'écosite, afin d'y être traités et valorisés. Une meilleure exploitation des forêts cantonales, dont une partie pourrait être entièrement dévolue à la production de bois-énergie (plaquettes forestières) (Steinmann communications personnelles).

Critères de faisabilité d'un «écosite» de valorisation du bois-déchet cantonal

Trois critères conditionnent l'implantation et la viabilité d'un centre production de combustible «bois-énergie» (Keel 2006): une surface productive de forêt de 5000 [ha] ou une quantité produite équivalente, la production de 12 000 tonne/an de pellettes (cas d'une usine de pellettes forestières), ainsi que la présence de chaleur excédentaire (installations générant de la chaleur d'échappement issue de processus industriels). Ces trois critères sont réunis dans la région du barrage de Verbois: premièrement, une meilleure exploitation des forêts cantonales couplée à la valorisation de «déchets-bois» (ou ressources apparentées) pourraient garantir un apport quantitatif suffisant; deuxièmement, la demande genevoise en pellette ne cessant de croître, l'écoulement de la production devrait être assuré. Troisièmement, la chaleur excédentaire produite sur le Site de Châtillon, mais surtout par

Tableau 6: Potentiel quantitatif et énergétique annuel des ressources locales de «déchets-biomasse» (humidité sur masse sèche refus de compost 10-40 [mm] = 80%, humidité sur masse sèche refus de compost 40-80 [mm] = 70%, # supposé pratiquement sec); (*Cuepe, en cours, **EMPA 2005).

Ressource potentielle	Provenance	Quantité [tonne _{anhydre}]	PCI [MJ/kg _{anhydre}]	Energie [MWh]
Bois flottant	Verbois	500	#16.8	2340
Souches	Châtillon	260	18.2	1300
Refus de compost 10-40 [mm]		780	*17.0	3750
Refus de compost 40-80 [mm]		720	**18.6	3720
TOTAL		2260		11 110

l'UIOM des Cheneviers, pourrait être aisément valorisée en l'utilisant pour le nécessaire séchage du bois (halle de séchage).

A ce titre, plusieurs installations de ce type sont sur le point de se créer à travers la Suisse. A cet effet, le programme «Vision forêt», soutenu par différentes organisations telles que Energie-Bois Suisse, l'Office fédéral de l'énergie, différents Services forestiers cantonaux ainsi que des Bourgeoisies, offre aux collectivités intéressées un soutien dans la planification, la réalisation et l'exploitation de fabriques de granulés forestiers (Keel, 2006). Les flux de matières et d'énergie pourraient donc être optimisés à l'échelle locale, afin de faire jouer les synergies en présence (avantages économiques et durabilité de la gestion des ressources-déchets).

Conclusions

L'accumulation d'une grande quantité de bois flottants au barrage de Verbois cause une diminution de la production électrique et de coûts liés à son évacuation. Tenant compte des contraintes légales d'extraction-traitement liées à ce matériel (art. 41 LEaux), une caractérisation qualitative et quantitative des bois flottants est amorcée ici, afin de déterminer le plus exhaustivement possible les possibilités de valorisation de cette ressource énergétique potentielle. A partir d'une étude effectuée sur 40 échantillons de troncs prélevés le 1^{er} avril 2005, et de plaquettes échantillonées le 1^{er} avril 2005 et le 1^{er} septembre 2005, les conclusions et recommandations suivantes peuvent être dégagées.

Bois naturel au sens de la norme SN166 000

Les bois flottants accumulés au barrage de Verbois peuvent être associés à la catégorie «bois naturel» et être valorisés dans une filière bois-énergie. Les résultats des mesures de physico-chimie effectuées seront donc confrontés et discutés par rapport aux normes relatives aux pellettes «bois de chauffage» (norme suisse SN166 000, représentative de la catégorie «bois naturel», en absence d'une autre norme spécifique).

Genre et espèces

Les espèces les plus abondantes appartiennent toutes à la végétation typique des cours d'eau (ripi-sylve), à savoir les salicacées, l'aulne et le peuplier. Les conifères et l'ensemble des espèces de bois durs sont donc minoritairement représentés, tout comme les bois d'origine anthropique.

Humidité et densité

L'humidité mesurée après 10 jours de séchage naturel reste très élevée, de l'ordre de 50% par rapport à la masse sèche. Il faut donc prévoir le séchage de ce bois avant sa valorisation thermique.

Teneur en cendres

Une partie de la teneur en minéraux provient des sédiments incorporés à la surface des bois flottants. Pour minimiser cet apport contaminant (métaux traces), l'extraction des bois flottants uniquement à la surface de l'eau doit donc être privilégiée (campagne de septembre 2005): le taux de cendres obtenu n'est que de 3.5%, contre environ 14.5% pour la campagne d'avril 2005, pour laquelle des bois fortement pollués par le sédiment de la retenue sont conjointement extraits.

Éléments majeurs

Les teneurs en azote, soufre et chlore sont faibles et ne devraient poser aucun problème, en terme d'émission (les normes OPair devraient donc être respectées), pour la valorisation thermique des bois flottants.

Métaux traces

Le mode d'extraction pratiqué conditionne la teneur en métaux traces des bois flottants. Les teneurs en métaux traces ne sont acceptables qu'à la condition que seuls les bois flottants en surface de l'eau soient extraits (campagne de septembre 2005). En revanche, si l'extraction emmène une quantité importante de sédiments (campagne d'avril 2005), les concentrations de chrome, de cuivre et d'arsenic sont trop élevées pour envisager une valorisation énergétique de la ressource.

Dans l'optique d'une valorisation énergétique de la ressource, il faudrait s'assurer que les teneurs en PCP et PCB ne soient pas trop élevées.

PCS

Les valeurs mesurées sur les échantillons de troncs sont comprises dans l'intervalle 17.5 – 20 MJ/kg_{sec}, ce qui est tout à fait valable en terme de potentiel calorifique (la valeur de référence est fixée à 18 MJ/kg_{sec}).

PCI

Le PCI moyen des plaquettes est de 16.8 ± 0.6 MJ/kg_{sec}, ce qui est acceptable en terme de potentiel calorifique (la valeur de référence est fixée à 16.7 MJ/kg_{sec}). Toutefois, si l'humidité des bois flottants reste élevée (30%), la diminution du crédit énergétique est d'environ 8% par rapport au PCI_{anhydre}. Il faut donc au moins prévoir un séchage naturel de la ressource avant sa valorisation.

Quantité

La quantité de bois flottant estimée est de 500 tonne_{sec}/an (valeur médiane) et peut varier considérablement d'une année à l'autre (entre 120 et 800 tonne_{sec}/an); en 2005, l'apport est de 180 [tonne_{sec}].

Filières

La valorisation «bois-énergie» semble la plus adéquate. Parmi les filières envisagées (Chauffages à distance régionaux, CADIOM, et écosite régional), l'écosite semble être une solution globale pertinente: elle permettrait de valoriser au mieux, des points de vue économiques et environnementaux, les multiples ressources locales en «bois-énergie» et les rejets de chaleur industriel (séchage du bois). Avec une gestion locale des flux de biomasse et d'énergie, l'implantation d'un centre de production de combustible «bois-énergie» semble envisageable dans la région.

Références

- **BECK J.** 2006. Valorisation des bois flottants s'accumulant derrière les retenues, cas du barrage de Verbois (GE): caractérisation et étude des filières. Diplôme MESNE, Université de Genève.
- **EMPA.** 2005. Analyses calorimétriques du bois du Site de Châtillon. Intertek Caleb Brett AG, Dübendorf.
- **ERKMAN S.** 2000. Vers une écologie industrielle. Ed. Charles Léopold Mayer.
- **FAESSLER J.** 2001. Gestion des déchets verts dans le canton de Genève: choix technologiques, aspects énergétiques et impacts environnementaux. Diplôme DESSNE n°68, Université de Genève.
- **JÜRGEN S, KROPF F.** 1990. Propriétés et caractéristiques des essences de bois. Ed. Lignum, Le Mont, Suisse.
- **KEEL A.** 2006. «Vision forêt»: le boom des granulés se poursuit grâce à la forêt; à partir de bois récolté en forêt. Energies renouvelables, pp. 16-17, 2/2006.
- **KOUKAL B.** 1999. Caractérisation des sédiments de la retenue du Rhône à Verbois. Diplôme Postgrade en Sciences de l'Environnement, EPFL, Lausanne.
- **MOULIN B, PIÉGAY H.** 2004. Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the river Rhône: Implication for river basin management. River research and applications, 20, 79-97.
- **NIREL P, REVACLIER R.** 2001. Mise en évidence des facteurs affectant la composition du Rhône à sa sortie du territoire genevois – étude préliminaire 1994-2000. DIAE, Genève.
- **OFEFP.** 2004. OPair - Ordonnance pour la protection de l'air. <http://www.admin.ch>
- **PERRAUD A.** 2000. Etude sédimentologique et géochimique des sédiments de la retenue de Verbois (Genève). Diplôme DESSNE n°49, Genève.
- **REISINGER K, HASLINGER C, HERGER M, HOFBAUER H.** 1992. B I O B I B - A DATABASE FOR BIOFUEL SK. Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology, University of Technology Vienna, <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/search.html>
- **SELLA F.** 2006. Valorisation énergétique des bois flottants du barrage de Verbois: caractérisation physico-chimique de la ressource. Diplôme MESNE, Université de Genève.
- **SIG.** 1982. Rapport interne sur les apports de bois flottant au barrage de Verbois. Service Industriels de Genève.
- **SN166000.** 2001. Testing of solid fuels-compressed untreated wood, requirements and testing. Schweizerische Normen-Vereinigung Winterthur, Switzerland.
- **VIQUERAT PA, LACHAL B, BECK J, PAMPALONI E, SELL A.** 2006. Valorisation énergétique des bois flottants de Verbois: caractérisation physico-chimique de la ressource et étude des filières. Expertise pour les SIG, CUEPE, Université de Genève.
- **VIQUERAT PA, LACHAL B, BECK J, PAMPALONI E.** 2006. Valorisation énergétique du compost 10-40 mm du Site de Châtillon: caractérisation physico-chimique de la ressource. Expertise pour le DT, Etat de Genève, CUEPE, Université de Genève.
- **XYLON SA.** 2002. L'énergie du bois dans notre région. Programme Interreg II «Energie du Bois», Suisse.