

Rapport

Caractérisation des effets du séchage de piles de bois couvertes avec des bâches en papier



Richard Golay

22 janvier 2019

Remerciements :

Au Service de l'énergie (SdE) de l'Etat de Fribourg pour le financement du projet.

A Jean-Maurice Chappalley, garde forestier du triage forestier de Jogne-Javroz, qui a participé intensivement à la collecte des échantillons et a transmis à l'auteur son importante expérience dans la production de plaquettes forestières.

A Gregor Lutz, chef de projet chez Energie-bois Suisse (Zurich), pour les mesures de teneur en eau et la qualité de son travail.

A MM. Bertrand Zamofing (dir.) et Jean-Paul Borne, gardes forestiers à la Corporation forestière Forêts-Sarine, M. David Vuillemez, garde forestier à La Sagne et responsable de l'exploitation du chauffage à distance communal, et Pascal Morel, Responsable technique chez Romande Energie SA, pour les discussions à propos de cette étude.

Table des matières

1.	Introduction	3
1.1.	Les plaquettes forestières	3
1.2.	Préséchage du bois-énergie stocké en piles	3
1.3.	Expérience dans la couverture des piles de bois en Suisse romande et à l'étranger	5
2.	Description	7
2.1.	Méthode de prélèvement	8
2.2.	Méthode de mesure de la teneur en eau	10
3.	Résultats et discussions	11
3.1.	Quantification du séchage	11
3.2.	Estimation du résultat financier du bâchage	13
4.	Conclusion	14
5.	Annexe 1 : tableau de données	15
6.	Annexe 2 : données de référence sur le pouvoir calorifique inférieur	16

1. Introduction

1.1. Les plaquettes forestières

La production de plaquettes forestières a permis depuis plus de vingt ans le développement important de l'usage du bois dans le domaine énergétique. Renouvelable et neutre en CO₂, le bois-énergie constitue la deuxième source d'énergie renouvelable en Suisse après la force hydraulique. Dans le domaine de la chaleur, il occupe la première place des énergies renouvelables avec une part de plus de 10% en constante progression. Les plaquettes forestières représentent plus du tiers de la consommation de bois-énergie.

Consommées très largement dans les installations de chauffage à distance, les plaquettes forestières ont comme avantage de permettre une importante automatisation dans sa production et son usage assurant un prix très compétitif face aux autres sources de chaleur.

La difficulté principale rencontrée avec ce combustible naturel est liée à sa teneur en eau relativement élevée et variable durant l'année. Suivant le mode de production, on obtient des plaquettes plus ou moins humides avec un impact direct sur le pouvoir calorifique et le prix. La figure 1 présente les teneurs en eau des différentes catégories de plaquettes forestières suivant leur mode de production. Les plaquettes forestières les plus humides sont utilisées dans de grandes chaudières capables de bien sécher le combustible juste avant sa combustion. Pour les chaudières inférieures à 200 kW, l'assurance qualité QM Chauffage au bois® (www.qmbois.ch) recommande les plaquettes séchées artificiellement et tamisées appelées « Plaquettes de qualité ».

Type de plaquettes	Description	Teneur en eau %
Plaquettes de qualité	Séchées à l'air chaud	15-20 (M20)
Sèches (ou fermentées)	Stockées sous couvert	25-35 (M35)
Ressuyées (ou vertes)	Grumes stockées en pile	30-50 (M50)
Fraîches (ou vertes)	Filière directe	40-55+ (M55+)

Figure 1 : les différentes catégories de plaquettes sont principalement fonction de leur teneur en eau qui a une impacte directe sur leur pouvoir calorifique et sur leur coût de production.

1.2. Préséchage du bois-énergie stocké en piles

Dans une brochure éditée fin 2017 et intitulée « Plaquettes de bois de qualité optimale » (figure 2), Energie-bois Suisse aborde la question du préséchage du bois-énergie non-décheté stocké en piles. Il est souligné le peu d'études relatives à ce sujet. Un ensemble de recommandations est présenté :

- Critère cité comme le plus important : la localisation des piles est préférable sur les crêtes et les mamelons hors forêt pour privilégier l'exposition au vent.
- Le sol doit être sec et il faut prévoir un dégagement au sol suffisant de la pile (support en bois massif).

- L'accessibilité de la pile doit être garanti à tout moment (dénéigement des voies d'accès).
- la durée de stockage ne devrait pas excéder une année.

Pour les résineux (épicéa), le bois atteignant sa teneur en eau minimal au bout de 3 à 5 mois de stockage, il est recommandé de déchiqeter la pile passé cette durée ou de la recouvrir, faute de quoi la teneur en eau serait de nouveau en hausse.

Le bois de feuillus (hêtre) présente un processus de séchage différent et atteint sa teneur en eau minimale au bout de 8 à 9 mois, mais ce dernier reste ensuite plus ou moins constant. Une couverture n'est pas jugée nécessaire.



Figure 2 : Energie-bois Suisse a publié fin 2017 une brochure contenant des recommandations pour assurer la qualité optimale des plaquettes forestières. La question de la couverture des piles de grumes est abordée. La brochure est téléchargeable sur le site www.energie-bois.ch (rubrique « shop » et « bois-énergie »)

La couverture du bois-énergie à l'état non déchiqeté avec des rouleaux en papier renforcé est abordée. Le document souligne l'importance de déposer la protection suffisamment tôt dans la saison, c'est-à-dire avant la fin juin ou la fin juillet, selon les conditions météorologiques.

Cette technique s'est répandue depuis une dizaine d'année en provenance du nord de l'Europe. Il existe à notre connaissance qu'un seul fournisseur de ce genre de produit : la société finlandaise Walki et son produit Walki@Biomass Cover (figure 3). Une description détaillée est consultable sur le site www.bionenergie-promotion.fr, titre : « Couvrir les tas de biomasse en forêt pour améliorer leur qualité énergétique ». Le fournisseur souligne l'intérêt de protéger le futur combustible « de la pluie, de la neige et de la formation de blocs de glace ». Outre un contenu énergétique amélioré grâce au séchage (5% à 15% annoncé), il est mentionné comme avantage une réduction des frais de transport grâce à la réduction du poids des grumes.



Figure 3 : l'entreprise finlandaise Walki commercialise des rouleaux de papier renforcé pour couvrir les piles de bois-énergie. (Source : Walki)

1.3. Expérience dans la couverture des piles de bois en Suisse romande et à l'étranger

Jean-Maurice Chappalley, garde forestier du triage de Jogne-Javroz à Charmey a acquis une longue expérience dans la préparation de piles de bois-énergie en alimentant la centrale de chauffage à distance de Charmey. Celle-ci distribue sa chaleur écologique et renouvelable entre autres au centre thermique Les Bains de la Gruyère. Historiquement, c'est à l'occasion du renouvellement de la chaudière à mazout de la piscine en 1995 qu'a germé le projet d'une production de chaleur pour les bâtiments alentours également. 4 ans plus tard, la mise en service du chauffage à plaquettes a eu lieu et c'est aujourd'hui environ 13'500 m³ de plaquettes (m³v) qui sont consommés annuellement. Une extension du chauffage à distance est prévue ces prochaines années pour atteindre approximativement une consommation doublée en plaquettes.

A Charmey, les piles de grumes qui restent de longs mois voir plus d'une année en forêt sont systématiquement couvertes. Le séchage obtenu, mais jamais mesuré systématiquement, a permis d'observer une plus grande facilité dans le réglage des chaudières à plaquettes et un meilleur respect de la consigne en puissance. Le séchage par couverture a en particulier permis de solutionner une source importante de pannes : auparavant, l'humidité élevée du bois avait pour conséquence que les poussières humides se déposaient et encrassaient très régulièrement les cellules photoélectriques de mesure du niveau du stock de combustible. Cela entraînait, passé un certain temps, l'arrêt des chaudières. A relever qu'en plus du séchage, la couverture papier permet d'empêcher l'infiltration d'eau provenant de la couche de neige recouvrant la pile. Sans la couverture, il y a un risque important que le gel entraîne la formation d'un ensemble de grumes soudés rendant plus difficile l'usage du grappin du camion déchiqueteur. D'une manière plus générale, la couverture permet de conserver plus longtemps les piles en forêt et minimise la perte en substance au cours du stockage. Le gain de l'opération n'est donc pas seulement énergétique mais offre une amélioration sensible à la fois dans l'exploitation en forêt et dans la gestion de l'installation de chauffage.

Ailleurs dans le Canton de Fribourg, la Corporation forestière Forêts-Sarine, située en plaine, a réalisé plusieurs essais mais a jugé les avantages d'une couverture peu concluants. La Corporation alimente 13 centrales de chauffage à distance pour un total d'environ 20'000 m³v par an. La différence d'altitude, la plus grande proportion de feuillus et

les chutes de neige moins importantes qu'à Charmey peuvent expliquer ce constat. L'abondance de la ressource énergétique et la mobilisation nécessaire en ressource humaine pour effectuer l'opération ont également influé sur la décision.

David Vuillemez, garde forestier de la Sagne (NE), est aussi responsable de la centrale de chauffage à plaquettes alimentant en chaleur une bonne partie du village. Cette Commune a la particularité d'avoir de grandes surfaces de pâturages boisés. Son entretien entraîne la production d'un volume important de cimes et de grosses branches. David Vuillemez a observé que l'usage des bâches en papier renforcé permet d'éviter, du fait du séchage, la transformation en compost des grosses branches qui rendrait impraticable leur combustion. Le contenu énergétique du combustible séché obtenu représente un gain appréciable pour la production de chaleur sans entraîner une augmentation significative des frais d'exploitation et de maintenance.

Au Québec, l'entreprise Partenariat Innovation forêt a réalisé une des rares études évaluant la conséquence du bâchage des piles (voir sous www.partenariat.qc.ca). Réalisée de janvier 2012 à mars 2013, elle ne concernait que des bois résineux. Il ressort de cette étude que durant la phase de séchage de mai à septembre, il n'y a pas de gain avec la bâche mais que de septembre à mars un gain de 10% a été mesuré. L'étude arrive à la conclusion que le recouvrement peut être justifié économiquement à partir d'une diminution du taux d'humidité de 5% (figure 4).

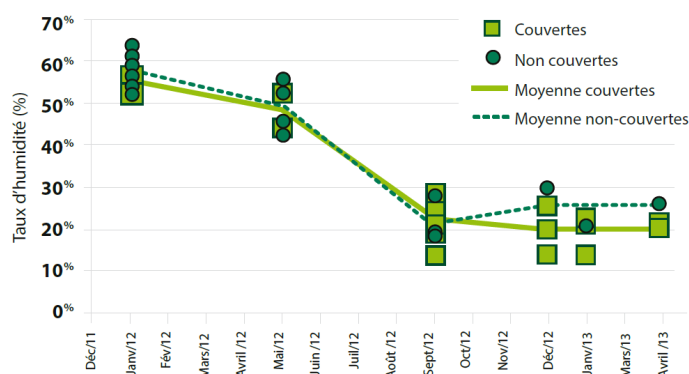


Figure 4 : graphique tiré de l'étude du Partenariat Innovation Forêt montrant la courbe de séchage naturel pour les piles couvertes et non-couvertes.

Des tests de bâchage ont été réalisés en France dans le cadre du projet MOQAPRO (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-12-BIME-0007>) par le consortium UCFF/ONF/FCBA/Walki. Huit chantiers ont été suivis en 2014/2015 avec des produits assez variés (bois durs/tendres, feuillus/résineux, avec/sans feuilles). Deux largeurs de bobines de bâche ont été utilisées (4m et 6m). Les durées de bâchage ont varié de 3 à 15 mois avec pour certains chantiers des mesures répétées à 3, 6 et 10 mois. Sur l'ensemble des mesures, l'opération de bâchage est bénéficiaire pour une diminution de teneur en eau d'environ 5 points de pourcentage en moyenne. Il est toutefois observé une grande variabilité entre les chantiers.

2. Description

L'étude a porté sur la récolte d'échantillons de plaquettes forestières à partir de 16 piles de grumes alimentant la centrale de chauffage à distance de Charmey (figure 5). L'altitude des piles se situait entre 850 m et 1400 m. Les piles ont été déchiquetées au cours de 14 campagnes qui se sont déroulées du 10 octobre 2017 et le 15 mai 2018 (figure 6) pour un volume total d'environ 13'500 m³v. Le volume en m³ plein (m³p) des piles oscillait entre environ 600 et 3'000 (1 m³p ≈ 2,5 m³v). La composition en essence des piles est approximativement de 60% résineux (épicéa 60% et sapin 40%) et 40% feuillus (hêtre 90% et frêne 10%).

40 échantillons de plaquettes forestières ont été prélevés en forêt, identifiés (code), emballés hermétiquement, envoyés par poste le jour même et analysés dans les jours qui suivent pour connaître leur teneur en eau. Sur quelques échantillons une analyse granulométrique a été effectuée pour tester la variabilité.

16 échantillons proviennent de piles couvertes plus d'un an auparavant et 24 échantillons de piles non-couvertes ou découvertes une année plus tôt. Les piles ont été édifiées entre avril 2015 et avril 2018. Les piles non couvertes sont composées de coupes très récentes ou de piles ayant été découvertes lors d'opération de déchiquetage dans les mois ou l'année qui précède.

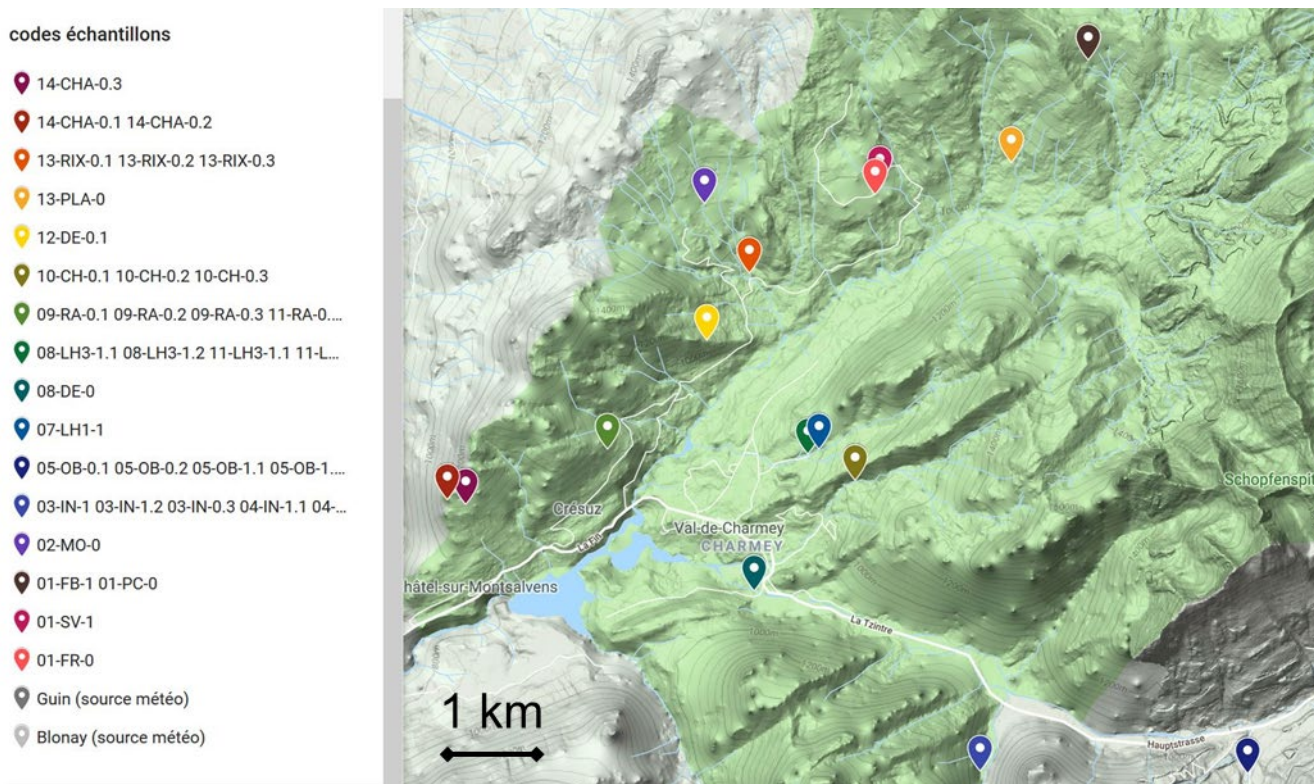


Figure 5 : localisation des piles bois autour du village de Charmey (image réalisée avec Google Maps).



Figure 6 : production de plaquettes forestières dans la région de Charmey à partir d'une pile de grumes recouverte de papier.

2.1. Méthode de prélèvement

Un échantillon est obtenu à partir de six prélèvements pour assurer une bonne représentativité. Les six prélèvements proviennent d'un ou deux containers et sont prélevés en surface, une fois que le container est rempli.

La figure 7 représente schématiquement le container rempli en plusieurs étapes de déchiquetage. La prise d'échantillons en surface assure, dans une certaine mesure, la représentativité de l'ensemble des plaquettes du container.

Pour effectuer ce choix sur le nombre de prélèvement, l'étude s'est inspirée du Projet OPTI-SCREEN (optimisation de l'échantillonnage à la livraison) réalisé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). A noter que la différence majeure dans cette étude est que les prélèvements s'effectuent après remplissage du container pour s'assurer de la provenance exacte des prélèvements et non pas au moment du déversement dans le silo de la centrale de chauffage. La raison est que plusieurs piles de bois couvertes ou non couvertes pouvaient être déchiquetées le même jour.

En cas d'études futures, il serait souhaitable d'organiser le prélèvement à la livraison au silo pour profiter du mélange qui s'opère naturellement lors du déchargement du container et améliorer ainsi la représentativité de l'échantillonnage. Après analyse, cette remarque s'applique en particulier pour les piles non-couvertes, montrant de plus fortes variations en eau.

Les prélèvements sont ensuite mélangés et une petite partie seulement représentant moins de 1 kg est mise dans un sachet d'une contenance de 3 litres muni d'une fermeture assurant une parfaite étanchéité (figure 8).

Pour chaque échantillon, un code d'identification est établi permettant d'indiquer de quelle campagne de déchiquetage il s'agit, du lieu de la pile de bois, si la pile était

couverte ou non et du numéro de l'échantillon provenant de la même pile quand il y en avait plusieurs. Ce code est inscrit sur le sachet plastique contenant l'échantillon et il est indiqué dans le rapport de mesure. Un rapport de mesure est effectué pour chaque campagne de mesure.

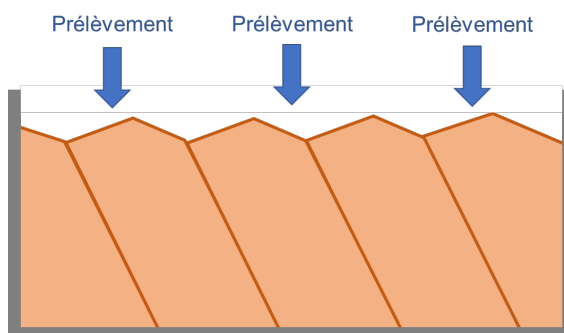


Figure 7 : représentation schématique du prélèvement de plaquettes forestières dans le container. Les différentes couches représentent chaque étape de prise des grumes par le grappin du camion-déchetage et leur déchetage. La prise d'échantillon en surface permet de prélever des échantillons provenant de grumes localisées différemment dans la pile de bois pour assurer au mieux la représentativité.



Figure 8 : exemple de collecte et de mise en sachet d'un échantillon de plaquettes forestières. Six prélèvements sont mélangés et une partie est ensachée. L'échantillon est envoyé le jour-même pour que l'analyse de la teneur en eau puisse être effectuée dans les jours suivants. La contenance du sachet est de 3 litres et le poids en plaquettes est inférieur à 1kg.

Pour chaque pile de grumes sont enregistrés :

- la localisation exacte de la pile
- la date de l'édification de la pile de bois (mise à port de camion)
- la date de la couverture papier de la pile (si c'est le cas)
- la notification avec ou sans la couverture papier au moment du déchetage

Le tableau dans l'annexe 1 rassemble toutes les informations relatives aux 40 échantillons analysés.

2.2. Méthode de mesure de la teneur en eau

Les plaquettes sont analysées suivant les critères développés par le QM Chauffage au bois et la norme EN ISO 17225-4. La teneur en eau est mesurée avec une balance de précision avant et après le séchage. 3 échantillons sur les 40 ont fait l'objet d'une analyse pour contrôler la granulométrie.

La teneur en eau ne doit pas être confondue avec l'humidité. La teneur en eau du bois est définie comme le poids de l'eau contenue dans l'échantillon divisé par le poids de l'échantillon humide. L'humidité du bois est définie comme le poids de l'eau contenue dans l'échantillon divisé par le poids de l'échantillon complètement sec. La figure 9 donne la correspondance générale entre la teneur en eau et l'humidité.

Teneur en eau [%]	Humidité [%]
0	0
20	25
25	33
33	50
40	67
50	100
60	150

Figure 9 : conversion de la teneur en eau du bois (sur brut) en humidité (sur sec). Tous les résultats de cette étude sont exprimés en teneur en eau.

Les plaquettes ont été séchées dans un four à une température de 102 (± 2) °C. C'est par la mesure périodique du poids que l'on peut savoir quand l'échantillon de plaquettes est complètement sec : le poids mesuré successivement ne varie plus. Le poids est mesuré directement après la sortie du four pour éviter la reprise d'humidité.

Le rapport comprend une appréciation visuelle de l'échantillon ainsi qu'une remarque sur son odeur (figure 10).



Figure 10 : préparation de l'échantillon en vue de son séchage au four.

3. Résultats et discussions

3.1. Quantification du séchage

La figure 11 présente les résultats des mesures de teneur en eau des échantillons en fonction de leur date de prélèvement. Les 3 mesures pour contrôler la granulométrie ont montré que celle-ci était régulière et correspondait à la classe P45S.

Les échantillons provenant de piles couvertes sont significativement plus secs. On note également une plus faible dispersion des mesures. Elle s'explique logiquement par le fait que, pour les piles non-couvertes, les grumes placées au cœur de la pile sont protégées par celles en surfaces. La différence entre la valeur moyenne des échantillons provenant de piles non-couvertes avec la valeur moyennes de ceux des piles couvertes (sans la série du 5.12.17 ; voir explication ci-après) est de 5,7 points de pourcentage.

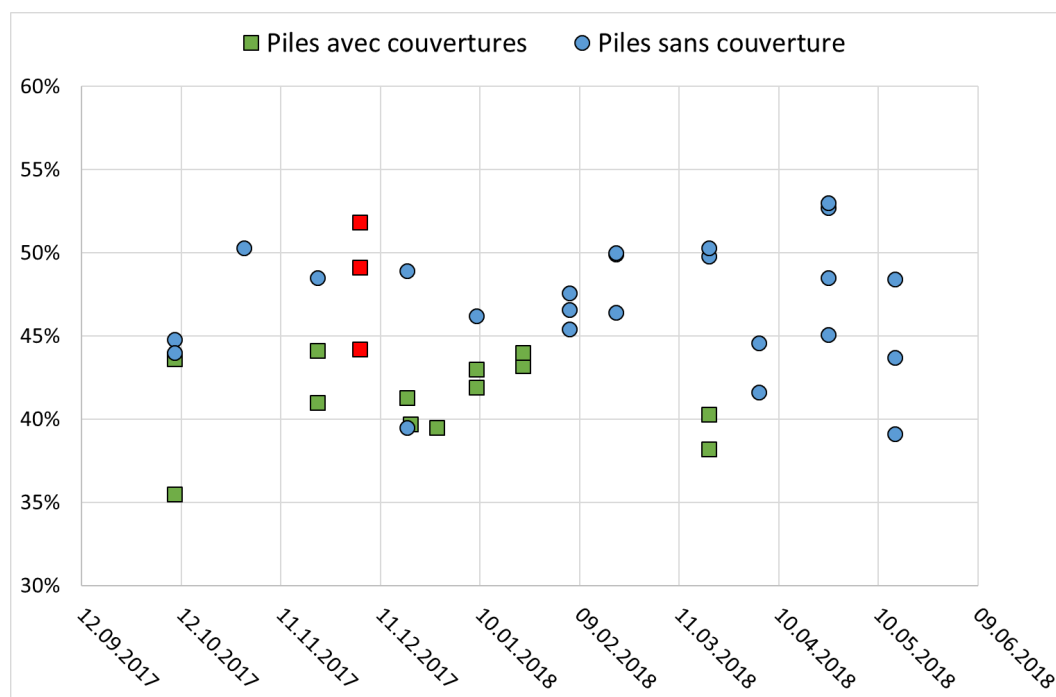


Figure 11 : graphique montrant la teneur en eau des échantillons de plaquettes prélevés à partir de piles avec ou sans couverture papier à partir de l'automne 2017 jusqu'au printemps 2018. La série d'échantillons du 5.12.17 (carrés rouges) est discutée dans le texte.

Une analyse plus fine des résultats en vue d'estimer aussi précisément que possible l'influence du bâchage nécessite de comparer des piles dont les paramètres principaux sont proches. Ceux-ci sont essentiellement la date de mise à port de camion (correspondant à peu près à la date d'abattage), la localisation, la date de prélèvement (déchiquetage) et la date de bâchage pour les piles couvertes.

Pour les campagnes à partir de février 2018 (partie droite de la figure 11), la plupart des piles de bois non-couvertes étaient composées de bois fraîchement abattus. On observe une forte dispersion des mesures et dénote la difficulté à obtenir une mesure représentative avec un seul échantillon pour les piles de bois non-couvertes. La forte dispersion peut s'expliquer par la localisation des bois dans la pile, mais également suivant les

essences déchiquetées, la porosité des bois résineux étant largement supérieure à celle des feuillus durs.

Les campagnes retenues pour les calculs sont les campagnes numéros 1, 3, 5 et 7. La campagne 4 du 5.12.17 avec les carrés rouges a la particularité suivante : les échantillons proviennent de la pile qui avait été découverte et partiellement déchiquetée lors de la précédente campagne du 22.11.17. Entre-temps, de fortes précipitations neigeuses ont eu lieu. On observe ainsi que les conditions météorologiques sur une période de 2 semaines ont suffi à annuler le gain de séchage dû à la couverture. Le calcul donne 5.8 points de pourcentage de différence entre les 2 prises d'échantillons. Pour la campagne n°1, l'échantillon présentant une teneur en eau de 35.5% n'a pas été retenu car la mise à port de camion et le bâchage ont été réalisés un an avant les 3 autres échantillons.

Pour les campagnes 1, 3, 5 et 7, la différence entre les valeurs moyennes des piles couvertes et de la ou des piles non-couvertes est de 0.8, 7.5, 3.7 et 4.3 respectivement. Ce qui donne une valeur moyenne de 3.7 points de pourcentage. Même si les incertitudes sur les mesures sont élevées pour les piles non-couvertes, un gain d'environ 4 points de pourcentage dû à la présence de la couverture semble une valeur réaliste compte tenu des observations dans la pratique.

Dans le but d'essayer de connaître l'influence des conditions météorologiques dans les jours qui précèdent sur la teneur en eau des échantillons prélevés, des données ont été enregistrées pour chaque campagne de déchiquetage. Celles-ci proviennent du site internet de la Confédération www.agrometeo.ch. Les données ont été récoltées pour les deux semaines qui précèdent la campagne de déchiquetage. Les données enregistrées concernaient le rayonnement (Wh/m²), les précipitations (mm), l'humidité et la température. Vu l'absence d'une station de mesure proche de Charmey, les données des stations de Blonay et de Guin ont été sélectionnées. Il n'a pas été possible d'avoir accès à des données concernant la vitesse des vents.

La figure 12 montre 5 échantillons provenant de piles couvertes d'une même localisation déchiquetées lors de 3 campagnes différentes (n°7, n°8 et n°11). Le cumul des précipitations sur deux semaines est 3 fois supérieur pour les campagnes 7 et 8 par rapport à la campagne 11 si l'on compare les données récoltées par la station de Blonay (VD). Les deux échantillons de droite (campagne n°11) présentent une teneur en eau inférieure ce qui semble cohérent avec les fortes différences de précipitations. Il n'a pas été possible de mettre en évidence l'influence d'autres paramètres, comme la localisation des piles par exemple.

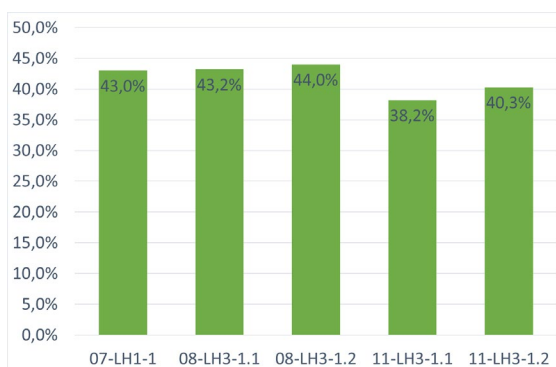


Figure 12 : échantillons provenant de la même pile couverte déchiquetés lors de 3 campagnes différentes. Les précipitations ont été très supérieures pour les 3 valeurs de gauche.

3.2. Estimation du résultat financier du bâchage

Les données fournies par le garde forestier permettent de connaître le coût moyen de la couverture des piles depuis 2015. Au total, le coût pour couvrir 15'810 m3p a été de 34'375 CHF, soit 2.26 CHF/m3p.

Sur la base du résultat d'un gain en séchage d'environ 4 points de pourcentage est du prix d'achat de la chaleur en ct/kWh sortie chaudière, on peut estimer le gain en CHF/m3p à port de camion et le comparer au coût du bâchage pour connaître le résultat financier de l'opération.

Basé sur les résultats des campagnes 1, 3, 5 et 7, on estime la teneur en eau moyenne des piles non-couvertes à 45% et la teneur en eau moyenne des piles couvertes à 41%. Le pouvoir calorifique est calculé à partir du tableau 12.3 du Manuel de planification QM Chauffage au bois® (annexe 2) sur la base d'un mélange 60% résineux (données pour l'épicéa) et 40% feuillu dur (données pour le hêtre).

Connaissant le prix d'achat sortie chaudière (5.5 ct/kWh), les coûts pour le déchiquetage (9.6 CHF/m3v) et le transport (3.8 CHF/m3v), il est possible de traduire le gain en pouvoir calorifique par un gain en CHF/m3p pour les grumes mis à port de camion.

Le résultat du calcul donne un gain d'environ 1.7 CHF/m3p.

En ce qui concerne l'exploitation des chaudières, il a été mentionné l'observation d'une diminution significative du nombre de panne et d'une plus grande facilité dans le réglage des chaudières depuis la couverture d'une bonne partie des piles.

De ce qui précède, on peut faire l'hypothèse d'un gain en rendement annuel des chaudières de l'ordre de 2 points de pourcentage (87% avec la couverture et 85% sans). Le même calcul donne alors un gain de 4.1 CHF/m3p sur les grumes à port de camion.

Ces résultats montrent que le coût pour la couverture est probablement compensé par le gain en pouvoir calorifique voir même légèrement bénéficiaire grâce à une amélioration du rendement annuel. Le gain en termes de diminution de frais de maintenance pour l'exploitant du réseau ne peut être que positif mais est difficilement estimable.

4. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence, pour la situation décrite, un gain en séchage d'environ 4 points de pourcentage grâce à la présence d'une couverture en papier renforcé sur les piles de bois.

Une comparaison entre le gain énergétique dû au séchage et le coût de l'opération de bâchage des piles montre une probable opération légèrement bénéficiaire compte-tenu de la diminution notable du nombre de pannes se traduisant par un meilleur rendement annuel de l'installation.

Par sa localisation dans les Préalpes, la région de Charmey présente deux particularités qui justifient la couverture des piles : un enneigement relativement important durant l'hiver, comme le montre la photographie en couverture de ce rapport, et une proportion importante de résineux prompts à reprendre de l'humidité après séchage pendant l'été.

Cette étude à elle seule ne permet pas de répondre s'il y a intérêt à couvrir les piles de bois dans une région moins soumise aux intempéries que Charmey et avec des forêts plus riches en proportion de feuillus (plaine). Seul une étude de ce genre et avec une attention particulière sur les conséquences dans l'exploitation de la centrale de chauffage permettrait d'y répondre.

5. Annexe 1 : tableau de données

Date	Opérateur	Mise à port de camion	Bâchage	Emplacement	Couverture	code échantillon	Teneur en eau	Remarque
10.10.2017	rg	été 2016		Frassy	0 (non)	01-FR-0	44,8%	
10.10.2017	rg	déc.16	26.04.2017	Sainte-Verge	1 (oui)	01-SV-1	43,6%	
10.10.2017	rg	nov.16		PC	0	01-PC-0	44,0%	
10.10.2017	rg	nov.15	29.12.2015	Fréd. Bussard	1	01-FB-1	35,5%	
31.10.2017	rg	oct.14		Mollard	0	02-MO-0	50,3%	
22.11.2017	rg	avr.15	28.09.2015	Invuettes	1	03-IN-1	41,0%	
22.11.2017	rg	mai.15	28.09.2015	Invuettes	1	03-IN-1.2	44,1%	
22.11.2017	rg	mai.15	(13.05.2015)	Invuettes	0	03-IN-0.3	48,5%	partie découverte un an auparavant
05.12.2017	jmc	juin.15	28.09.2015	Invuettes	(1)	04-IN-1.1	44,2%	partie découverte jusqu'au 22.11.2017 + neige
05.12.2017	jmc	juin.16	06.07.2016	Invuettes	(1)	04-IN-1.2	49,1%	partie découverte jusqu'au 22.11.2017 + neige
05.12.2017	jmc	juin.16	06.07.2016	Invuettes	(1)	04-IN-1.3	51,8%	partie découverte jusqu'au 22.11.2017 + neige
19.12.2017	jmc	avr.15-déc.15	(29.12.2015)	Oberrugg	0	05-OB-0.1	48,9%	partie découverte un an auparavant
19.12.2017	jmc	avr.15-déc.15	(30.12.2015)	Oberrugg	0	05-OB-0.2	39,5%	partie découverte un an auparavant
19.12.2017	jmc	avr.15-déc.15	31.12.2015	Oberrugg	1	05-OB-1.1	41,3%	voir photos dans onglets 19.12.2017
20.12.2017	jmc	avr.15-déc.15	29.12.2015	Oberrugg	1	05-OB-1.2	39,7%	voir photos dans onglets 19.12.2017
28.12.2017	jmc	avr.15-déc.15	29.12.2015	Oberrugg	1	06-OB-2.1	39,5%	
09.01.2018	jmc	avr.15-déc.15	(29.12.2015)	Oberrugg	0	07-OB-3-0	46,2%	partie découverte un an auparavant
09.01.2018	jmc	avr.15-déc.15	29.12.2015	Oberrugg	1	07-OB-3-1	41,9%	
09.01.2018	jmc	sept.15	07.10.2015	Uderrrey hélico.	1	07-LH1-1	43,0%	
23.01.2018	jmc	avr.16	06.07.2016	Uderrrey hélico.	1	08-LH3-1.1	43,2%	
23.01.2018	jmc	avr.16	06.07.2016	Uderrrey hélico.	1	08-LH3-1.2	44,0%	
06.02.2018	rg	déc.17-janv.18		Les Râpes	0	09-RA-0.1	46,6%	jeune coupe
06.02.2018	rg	déc.17-janv.18		Les Râpes	0	09-RA-0.2	45,4%	
06.02.2018	rg	déc.17-janv.18		Les Râpes	0	09-RA-0.3	47,6%	
20.02.2018	jmc	oct.17		Chaudalla	0	10-CH-0.1	49,9%	
20.02.2018	jmc	oct.17		Chaudalla	0	10-CH-0.2	50,0%	
20.03.2018	jmc	avr.16	06.07.2016	Uderrrey hélico.	1	11-LH3-1.1	38,2%	
20.03.2018	jmc	avr.16	06.07.2016	Uderrrey hélico.	1	11-LH3-1.2	40,3%	
20.03.2018	jmc	févr.18		Les Râpes	0	11-RA-0.1	49,8%	bois frais - février 2018
20.03.2018	jmc	févr.18		Les Râpes	0	11-RA-0.2	50,3%	bois frais - février 2018
04.04.2018	jmc	févr.18		Les Râpes	0	12-RA-0.1	44,6%	bois frais - février 2018
04.04.2018	jmc	juin.17		Devin	0	12-DE-0.1	41,6%	plein sud, intersection bise et vent d'ouest
25.04.2018	jmc	janv.18		PLA	0	13-PLA-0	52,7%	bois frais - janvier 2018
25.04.2018	jmc	mars.18		RIX	0	13-RIX-0.1	48,5%	bois frais - mars 2018
25.04.2018	jmc	mars.18		RIX	0	13-RIX-0.2	53,0%	bois frais - mars 2018
15.05.2018	jmc	févr.17		Châtel	0	14-CHA-0.1	39,1%	bois frais - mars 2018
15.05.2018	jmc	avr.18		Châtel	0	14-CHA-0.2	43,7%	point haut, en bord de falaise
15.05.2018	jmc	févr.16		Châtel	0	14-CHA-0.3	48,4%	Attention, site localisé à 500m de s'éch. 1 et 2

6. Annexe 2 : données de référence sur le pouvoir calorifique inférieur.

Tableau 12.3: Pouvoir calorifique inférieur et contenu énergétique en fonction de la teneur en eau pour différentes essences et unités de mesure [75] (pouvoir calorifique inférieur en kWh par kg de matière sèche: 5,2 pour le bois tendre et 5,0 pour le bois dur).
¹⁾ Valeurs en kg de matière sèche par MCS sans retrait de séchage (densité volumique) d'après Kollmann 1982 [50].

Essence/densité ¹⁾	Unité de mesure	Pouvoir calorifique en kWh/kg et contenu énergétique en kWh/MCS, en kWh/stère et en kWh/m ³ Pl												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Epicéa 379 kg _{sec} /MCS ¹⁾	KWh/kg	5,20	4,91	4,61	4,32	4,02	3,73	3,44	3,14	2,85	2,55	2,26	1,97	1,67
	KWh/MCS	1971	1957	1942	1925	1906	1885	1860	1832	1799	1760	1713	1656	1584
Pin	KWh/stère	1380	1370	1360	1348	1334	1319	1302	1282	1259	1232	1199	1159	1109
	KWh/m ³ Pl	788	783	777	770	763	754	744	733	720	704	685	662	634
431 kg _{sec} /MCS ¹⁾	KWh/kg	5,20	4,91	4,61	4,32	4,02	3,73	3,44	3,14	2,85	2,55	2,26	1,97	1,67
	KWh/MCS	2241	2226	2209	2189	2168	2144	2116	2083	2046	2001	1948	1883	1802
Hêtre	KWh/stère	1569	1558	1546	1533	1518	1500	1481	1458	1432	1401	1364	1318	1261
	KWh/m ³ Pl	896	890	883	876	867	857	846	833	818	801	779	753	721
558 kg _{sec} /MCS ¹⁾	KWh/kg	5,00	4,72	4,43	4,15	3,86	3,58	3,30	3,01	2,73	2,44	2,16	1,88	1,59
	KWh/MCS	2790	2770	2748	2723	2695	2664	2627	2586	2537	2480	2411	2326	2221
Chêne	KWh/stère	1953	1939	1923	1906	1887	1864	1839	1810	1776	1736	1687	1628	1555
	KWh/m ³ Pl	1116	1108	1099	1089	1078	1065	1051	1034	1015	992	964	930	888
571 kg _{sec} /MCS ¹⁾	KWh/kg	5,00	4,72	4,43	4,15	3,86	3,58	3,30	3,01	2,73	2,44	2,16	1,88	1,59
	KWh/MCS	2855	2835	2812	2786	2758	2726	2689	2646	2596	2537	2467	2380	2273
Peuplier	KWh/stère	1999	1984	1968	1951	1931	1908	1882	1852	1817	1776	1727	1666	1591
	KWh/m ³ Pl	1142	1134	1125	1115	1103	1090	1075	1058	1038	1015	987	952	909
353 kg _{sec} /MCS ¹⁾	KWh/kg	5,00	4,72	4,43	4,15	3,86	3,58	3,30	3,01	2,73	2,44	2,16	1,88	1,59
	KWh/MCS	1765	1752	1738	1723	1705	1685	1662	1636	1605	1569	1525	1472	1405
	KWh/stère	1236	1227	1217	1206	1193	1179	1163	1145	1123	1098	1067	1030	983
	KWh/m ³ Pl	706	701	695	689	682	674	665	654	642	627	610	589	562