

PLAQUETTES DE BOIS DE QUALITÉ OPTIMALE



Résumé

La qualité des plaquettes de bois est d'une importance cruciale pour le bon fonctionnement des chauffages automatiques au bois à faibles émissions et nécessitant peu d'entretien. Un grand nombre de producteurs de plaquettes de bois, de propriétaires forestiers, de planificateurs et d'exploitants d'installations peuvent tirer profit du potentiel énorme offert par l'amélioration de la qualité des plaquettes pour une exploitation peu polluante et sans dysfonctionnement des installations.

En particulier pour les petits chauffages d'une puissance allant jusqu'à 200 kW («appareils de série»), une fraction fine élevée nuit à la qualité de la combustion, mais aussi au comportement du flux et, par conséquent, à l'efficacité d'extraction. De telles installations nécessitent des plaquettes appelées plaquettes de qualité.



Plaquettes de bois de qualité exemptes de matières fines

La qualité de la matière première est déterminante pour la quantité de matière fine. Les plaquettes de bois de qualité obtenues par déchiquetage ne doivent contenir ni feuilles ni d'aiguilles, et seulement une faible quantité d'écorces. Il est donc pertinent de diviser le bois deux catégories: le bois-énergie rond pour l'obtention de plaquettes de bonne qualité d'une part, et les résidus de coupe pour des plaquettes de faibles niveaux de qualité d'autre part. Les plaquettes de bois de qualité ne peuvent pas être produites à partir de matières premières de piètre qualité.

L'une des mesures les plus importantes pour garantir un fonctionnement à faibles émissions ainsi qu'un faible niveau d'entretien des installations et des équipements consiste à

diminuer la proportion de matériau fin par tamisage des plaquettes de bois. Pour ce faire, on utilise généralement des cribles vibrants, des tamis à tambour ou des cribles à étoiles. Dans l'idéal, les plaquettes de bois sont tamisées avant et après le séchage.

Le séchage des plaquettes de bois permet de réduire leur taux d'humidité et d'augmenter leur pouvoir calorifique. Avec une teneur en eau de plus de 30%, lors du séchage naturel, une perte considérable de substance dans la biomasse sèche se produit. Dans les stocks de plaquettes non couverts, les pertes de masse peuvent atteindre 30%. Plus la qualité d'origine des plaquettes stockées est faible, plus la perte de substance est importante. En cas de stockage des plaquettes de bois en plein air, il est recommandé d'utiliser une couverture en matériaux non-tissé perméable à la vapeur d'eau.

Des taux d'humidité inférieurs à 30% et des pertes de biomasse sèche d'environ 13% ont été mesurées sur des stocks de plaquettes entreposés dans des lieux de stockage sous toiture. Les facteurs importants sont une bonne aération de l'entrepôt et un espace suffisant entre les piles de plaquettes et la toiture de l'entrepôt. En outre, la durée de stockage doit être aussi courte que possible (3 à 6 mois max.). Plus la fraction fine est faible, plus l'air de séchage peut circuler facilement à travers les plaquettes de bois.

Le préséchage du bois-énergie non déchiqueté est une mesure simple, rentable et efficace pour améliorer la qualité des plaquettes de bois. Selon les essences, le taux d'humidité peut être ramené à moins de 35%. Dans des conditions optimales de chaleur atmosphérique et de ventilation, on a même relevé des valeurs de 25%.

La perte de substance du bois préséché à l'état non déchiqueté atteint environ 6% en l'espace de six mois, un taux nettement inférieur à celui observé sur les stocks de plaquettes séchées.

Le choix du bon emplacement est crucial pour un préséchage efficace du bois non déchiqueté. Idéalement, on choisira des mamelons exposés au vent et ensoleillés et des sols bien perméables, avec un dégagement au sol suffisant aménagé avec des traverses de bois en guise d'appuis. Le terrain sous la pile de bois-énergie doit être sec – un critère crucial pour le préséchage.

Impressum

Rédaction: Energie-bois Suisse; septembre 2017

Sources photos: Energie-bois Suisse ou selon la source mentionnée

Sources: Page 26

Ce projet a été réalisé avec le soutien de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) dans le cadre du plan d'action Bois. Nous le remercions de son soutien.



Préséchage d'une pile de bois-énergie.

Une autre variante pour améliorer la qualité des plaquettes de bois est le séchage technique par apport de chaleur active. Le temps de séchage est ainsi considérablement raccourci par rapport au séchage naturel des plaquettes et la perte de matière est sensiblement réduite. L'accent est mis sur les séchoirs à bande, les séchoirs à tambour et les conteneurs de séchage. Les facteurs décisifs pour le séchage technique des plaquettes de bois sont, d'une part, une source de chaleur abordable et, d'autre part, la possibilité de stocker les plaquettes de bois sous toiture à l'issue du séchage, ou de les utiliser dans les installations de chauffage.

L'exemple du «Holzkreislauf Liechtenstein» («Cycle du bois du Liechtenstein») montre comment l'amélioration de la qualité des plaquettes de bois commence avec la logistique du bois-énergie. Dès l'aménagement des piles de bois en forêt, une distinction est opérée entre le bois-énergie rond (grume) destiné aux installations anciennes ou de petites dimensions, et les résidus de coupe destinés aux foyers à grille d'avancement de grandes dimensions. Là aussi, l'énorme potentiel du préséchage du bois non déchiqueté est exploité de manière optimale.



SOMMAIRE

- 02 RÉSUMÉ**
- 04 CLASSIFICATION DES PLAQUETTES DE BOIS**
- 07 CRITÈRES D'EXIGENCE DES CHAUFFAGES À PLAQUETTES**
- 10 PRÉSÉCHAGE DU BOIS-ÉNERGIE**
- 12 TRANSFORMATION DU BOIS-ÉNERGIE EN PLAQUETTES**
- 14 PRINCIPES DE BASE DU STOCKAGE DES PLAQUETTES**
- 15 PERTE DE SUBSTANCE LORS DU SÉCHAGE NATUREL**
- 17 STOCKAGE DES PLAQUETTES DE BOIS EN PLEIN AIR**
- 18 STOCKAGE DES PLAQUETTES DE BOIS EN ENTREPÔT COUVERT**
- 19 TAMISAGE DES MATIÈRES FINES**
- 20 SÉCHAGE TECHNIQUE DES PLAQUETTES DE BOIS**
- 22 LOGISTIQUE RÉGIONALE DU BOIS-ÉNERGIE**
- 24 CONTRÔLE QUALITÉ**
- 26 SOURCES**
- 28 PROPOSITION DE CLASSIFICATION DES PLAQUETTES DE BOIS**



Energie-bois Suisse
Route de la Chocolatière
26 / CP 129
1026 Echandens
Tél. 021 706 50 24
www.energie-bois.ch



CLASSIFICATION DES PLAQUETTES DE BOIS

Les plaquettes de bois sont fabriquées à partir de différentes matières premières telles que le bois, les déchets de bois, le bois hors forêt ou le bois usagé, et peuvent donc présenter des qualités très différentes, selon qu'il s'agit de bois dur ou de bois tendre, selon que le bois-énergie est préséché ou fraîchement prélevé dans la forêt, et selon que les plaquettes de bois sont fabriquées à partir de résidus de bois ou issues de bois de récupération broyé:

À partir de la matière première mise en œuvre, les plaquettes de bois peuvent être classées en différentes catégories, selon les critères suivants:

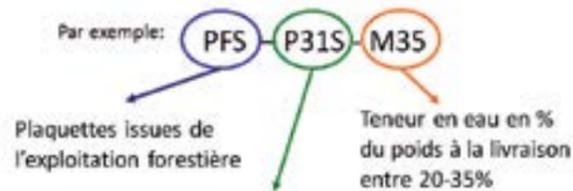
- Taux d'humidité
- Fraction fine
- Fraction grossière et surlongueurs
- Proportion d'aiguilles / de feuilles
- Proportion d'écorces
- Teneur en cendres
- Teneur en azote
- Teneur en matières étrangères

Matières premières et désignation abrégée des assortiments de plaquettes de bois

Origine des plaquettes	Abréviation
Plaquettes issues de l'exploitation forestière	PFS
Bois-énergie rond = grume (absence de sous-produits de la récolte du bois ou des soins sylvicoles, ébranché et écimé)	BE classe S
Rémanents d'éclaircies de résineux, feuillus et houppiers	REH pas de classe S
Résidus de bois de scieries / de l'industrie	RI
Sous-produits d'éclaircies (épineux et de feuillus) (diamètre < 8 cm) – Branches et bois de couronne	SPF
Bois issu de l'entretien des paysages (bois hors forêt), souvent broyé	BEP
Écorce déchiquetée, le plus souvent broyée	ED
Sous-produits du bois (bois de menuiserie et de charpenterie de 2 ^e transformation; absence de bois à l'état naturel, absence de résidus de bois de scieries)	SPT
Bois de récupération, broyé (p. ex. palettes, bois de démolition, déchets de construction, bois d'emballage, bois d'ameublement, etc. Absence de déchets de bois imprégnés sous pression et traités avec des produits de préservation du bois, pas de revêtements organiques halogénés.)	AH

ATTENTION: le bois de récupération n'est pas considéré comme du combustible bois et ne peut être brûlé que dans les chauffages autorisés à cet effet

Classification des plaquettes



Granulométrie en mm		
Fraction principale	min. 60%	3.15 – 31.5 mm
Fraction fine	max. 10%	< 3.15 mm
Surlongueur	max. 6%	> 45 mm
Longueur maximale		≤ 150 mm

Désignation

Les principales propriétés des plaquettes de bois de bois sont définies dans la norme EN ISO 17224-4. Elles servent à définir la qualité des plaquettes de bois dans le contrat d'approvisionnement en plaquettes de bois. Vous trouverez de plus amples informations sur la définition de la qualité des plaquettes de bois selon EN ISO 17225-4 dans la FAQ 36 de QM Chauffages au bois, ainsi que dans la fiche d'information n° 407 «Triage et classification du bois-énergie» d'Energie-bois Suisse.

Taux d'humidité

Le taux d'humidité est le rapport entre le poids de l'eau dans les plaquettes de bois et le poids des plaquettes de bois humides. Il est indiqué en pourcentage de masse (m-%) à l'état tel que livré. Le facteur le plus influent sur le contenu énergétique des plaquettes de bois est le taux d'humidité. Les plaquettes de bois sèchent moins bien s'ils contiennent une fraction fine élevée. Dans la mesure du possible, les plaquettes de bois ne doivent pas être réhumidifiées après séchage.

Effets possibles d'une humidité trop élevée

Système	Effet
Silo à plaquettes ou entrepôt couvert	Perte de substance accrue Développement de moisissure, pourriture
Installation d'extraction et de transport	Favorise la formation de ponts et de blocages de la matière transportée
Appareils de série: foyers à poussée inférieure et foyers à grille fixe jusqu'à 200 kW	Empêche l'inflammation Combustion de mauvaise qualité, temps de séchage du bois trop court Absence de post-combustion Chute de la puissance et du rendement Formation de fumées, émissions Dysfonctionnements pouvant aller jusqu'à l'arrêt du chauffage
Grands chauffages en mode de fonctionnement à charge partielle	Émissions accrue de CO et de poussières fines Combustion de piètre qualité

Effets possibles d'une humidité trop faible

Système	Effet
Chauffages réglés pour des plaquettes avec une humidité élevée	Surchauffe du foyer Raccourcissement de la durée de vie du chemisage et des barreaux de grille du foyer

Effets d'une fraction fine excessive

Système	Effet
Silo ou stockage	Problèmes de séchage Mauvaises propriétés de conservation
Grilles de protection antichutes	Refoulement lors du remplissage
Systèmes d'extraction et de transport	Blocage de l'extraction Formation de puits et de ponts
Chauffage	Zones avec excès ou manque d'air Mauvaise qualité de combustion Particules non brûlées Développement de fumées, émissions Chute de la puissance et du rendement Blocages et contamination Teneur élevée en cendres et en azote

Fraction fine

Sont considérées comme matières fines toutes les particules d'une granulométrie inférieure à 3.15 mm. La fraction fine est indiquée en pourcentage de masse (m-%) à l'état tel que livré. La fraction fine s'accroît lorsque l'on coupe du bois en décomposition. Les raisons peuvent être les suivantes: un stockage trop prolongé, un lieu de stockage inapproprié ou une réhumidification des plaquettes de bois. En présence d'une forte proportion d'écorces, de feuilles et d'aiguilles, la fraction fine est généralement élevée. Parmi les autres facteurs pouvant expliquer la présence d'une fraction fine élevée, citons les couteaux mal aiguisés, les déchiqueteuses inadaptées ou la taille du tamis.

Fraction grossière et surlongueurs

La fraction grossière est élevée et les surlongueurs de plaquettes de bois sont trop longues et trop épaisses par rapport à la qualité définie. Ces fractions réduisent la fluidité et peuvent conduire à la formation de ponts. Cela est particulièrement vrai pour les plaquettes de bois broyées qui ont tendance à se coincer en raison de leur forme souvent allongée et fine. Le déchiquetage au moyen de couteaux émoussés conduit à un résultat identique.

Effets d'une fraction grossière trop élevée et d'une trop grande proportion de surlongueurs

Système	Effet
Extraction avec bras à lames à ressort / noyau à ressort	Formation de puits (surtout pour les plaquettes broyées) Blocage de l'extraction
Vis centrale/conique/pendulaire	Formation de ponts
Transporteur à vis, sas à roue cellulaire	Blocage de l'extraction Consommation d'énergie accrue

Proportion d'aiguilles / de feuilles

La proportion d'aiguilles et de feuilles définit le poids des aiguilles et des feuilles par rapport au poids humide de l'échantillon de plaquettes. Les aiguilles et les feuilles ont une teneur en azote plus élevée que le bois écorcé (voir teneur en azote). Comme la fraction fine augmente avec la proportion d'aiguilles et de feuilles, les effets sont similaires (voir fraction fine). La teneur en nutriments sensiblement plus élevée de la biomasse composée d'aiguilles et de feuilles par rapport au bois entraîne une décomposition accrue pendant le stockage des plaquettes de bois riches en aiguilles ou en feuilles, et donc une perte de substance plus élevée. Par ailleurs, la teneur en cendres augmente en même temps que la proportion d'aiguilles et de feuilles, car ces dernières contiennent plus de résidus de combustion que le bois (voir teneur en cendres).

Proportion d'écorces

En raison de sa composition chimique, l'écorce contient davantage d'ingrédients critique pour la combustion comparé au bois. Une proportion plus élevée d'écorce augmente par conséquent la teneur en cendres (voir Teneur en cendres). Par ailleurs, l'écorce contient plus souvent des matières étrangères telles que des métaux, du sable, des pierres, des corps étrangers, etc. (voir Teneur en matières étrangères) car elle protège le tronc contre les influences extérieures.

Teneur en cendres

La teneur en cendres est la proportion du poids des cendres par unité de poids de plaquettes brûlées. Plus la proportion de feuilles, d'aiguilles et d'écorces dans les plaquettes de bois est élevée, plus la production de cendres augmente. Une combustion incomplète des plaquettes de bois dans le foyer est susceptible d'entraîner l'apparition d'une forte teneur en particules non brûlées avec, à la clé, une démultiplication de la teneur en cendres par rapport à une combustion complète. Une surchauffe dans le foyer peut entraîner une augmentation de la scorification.

Effets possibles de la présence de cendres

Système	Effet
Foyer	Formation de cendres accrue Particules non brûlées Scorification accrue lors de la surchauffe
Tubes de fumées	Multiplication des dépôts
Généralités	Frais de nettoyage accrus Hausse des frais d'élimination des cendres de bois

Teneur en azote

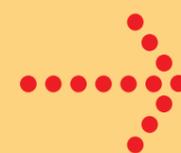
L'azote est présent essentiellement dans les feuilles, les aiguilles, l'écorce, les déchets verts et, du fait de la structure cellulaire particulière, en plus grande quantité dans le bois des feuillus. Les plaquettes provenant de rémanents de coupe, de bois d'aménagement paysager et de forêts à forte proportion de feuillus ont une teneur en azote plus élevée. Résultat: des émissions d'oxydes d'azote accrues lorsqu'elles sont utilisées dans les chauffages à plaquettes.

Matières étrangères

Les matières étrangères désignent les particules et contaminants non ligneux introduits dans les plaquettes de bois par des impuretés. Il peut s'agir de pierres, de terre, de sable, de matériau plastique, de compost ou de particules métalliques. Selon le matériau, la granulométrie et la composition, les matières étrangères peuvent considérablement perturber le fonctionnement des chauffages à plaquette de bois.

Effets possibles de la présence de matières étrangères

Système	Effet
Déchetuseuse	Endommagement des couteaux, perturbations
Installation d'extraction et de transport	Blocages, perturbations et détériorations Scorification Raccourcissement de la durée de vie du chemisage et des barreaux de grille du foyer
Dispositifs de décendrage	Blocages, perturbations et détériorations



CRITÈRES D'EXIGENCE DES CHAUFFAGES À PLAQUETTES

Chauffage

Les chauffages au bois requièrent pour assurer une bonne qualité de combustion, c'est à dire sans zones non-enflammées, une diffusion uniforme de l'air primaire de combustion dans un lit de combustible stable et de hauteur uniforme. Cela garantit une distribution d'air constante et régulière dans le combustible. La répartition inégale de la granulométrie liée à une fraction fine élevée et, dans une certaine mesure, à la présence de surlongueurs conduisent à la diffusion irrégulière de l'air primaire dans le lit de combustible. Cela génère des zones d'excédent d'air et des zones d'insuffisance d'air.



Occupation optimale des grilles sans surproduction d'oxygène (ardens GmbH, 2017).

L'**excédent d'air** dans le lit de combustion apparaît là où la circulation de l'air de combustion à travers le combustible est trop rapide. Les zones locales avec un excédent d'air conduisent à des températures trop élevées et à des «hot spots», lesquels produisent des particules incandescentes tourbillonnantes et la formation accrue d'aérosols sous forme de particules salines. Ce phénomène augmente l'encrassement de la chambre de combustion. Un excédent d'air trop élevé entraîne une augmentation des émissions de particules de poussière en raison de l'accélération du flux d'air dans le lit du combustible. Les températures localement élevées peuvent accélérer l'érosion du chemisage du foyer et la combustion des barres de la grille. Dans la périmètre de la grille, l'élévation de la température provoque la fusion des cendres et, ainsi, l'accélération de la scorification.



Excédent d'air avec hot spot (flèche) et scorification (ardens GmbH, 2017)

Le **manque d'air** se produit dans les zones avec une fraction fine élevée, ce qui limite la diffusion de l'air. Ces zones sont dépourvues d'interstices dans lesquels l'air primaire peut traverser. Cela conduit à un manque d'air de combustion, ce qui empêche la combustion totale des plaquettes de bois. Des particules non brûlées subsistent par conséquent. Le mélange de gaz non homogène au-dessus du lit de combustible entraîne une mauvaise qualité de combustion et des émissions de CO. Une fumée indésirable est susceptible de se développer et de provoquer des odeurs désagréables dans le voisinage. En outre, l'efficacité du système de combustion et les performances de combustion peuvent éventuellement diminuer.



Manque d'air avec développement de fumées (ardens GmbH, 2017).

Une fraction fine élevée peut entraîner une obstruction des sections d'injection d'air primaire, avec pour effet supplémentaire la détérioration de la distribution de l'air dans le lit de combustible. Les petits foyers à poussée inférieure et à grille fixe («appareils de série») jusqu'à 200 kW avec relativement peu de petites injections d'air primaire sur la grille et dans la petite cornue tolèrent particulièrement mal les matières fines, car ils s'obstruent plus rapidement et empêchent ainsi l'écoulement régulier de l'air primaire. Par conséquent, une très faible fraction fine – inférieure à 5% – est une condition préalable pour ce type de chauffage.

Dans les zones avec un excédent d'air, on observe à des hausses locales de la température avec, à la clé, un remplacement plus fréquent des éléments de la grille et des éléments du chemisage du foyer. Une fraction fine élevée peut donc entraîner des **coûts d'entretien sensiblement accrus**. Les frais de nettoyage augmentent par ailleurs du fait de la hausse de la fréquence de nettoyage des chaudières et du dépôt de particules incandescentes. L'augmentation des coûts liés à l'élimination des perturbations dans les installations de convoyage est une autre conséquence possible d'une fraction fine trop élevée.

Comportement des émissions

Dans le cadre d'un projet de recherche de la HEIG-VD commandé par Energie-bois Suisse, des essais ont été réalisés avec trois taux d'humidité différents M (15%, 30% et 45%) et trois taux de fines F différents (0%, 10% et 20%) dans le même système de chauffage à plaquettes – un foyer à poussée inférieure de 30 kW –, pour chacun desquels l'ensemble des poussières et les émissions de CO ont été mesurées. Les résultats de l'étude sont consultables dans le rapport de la HEIG-VD de Julien Ropp «Émissions de particules fines lors de la combustion de plaquettes forestières». Le projet de recherche montre qu'un taux d'humidité élevé des plaquettes (45 %) chez des petites chaudières à propulsion inférieure montre de l'émission excessive de CO et de poussières.

Au chapitre 8 du «Manuel pour la gestion de la qualité des plaquettes de bois déchiqueté» de l'Agence [allemande] des matières premières renouvelables (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) sont répertoriés les résultats des essais de combustion sur deux chauffages à plaquettes et avec deux lots de plaquettes de bois, l'un avant séchage et/ou tamisage, l'autre après. Un paramétrage optimisé de l'installation de chauffage a permis une réduction substantielle des émissions de CO et de poussières. L'amélioration de la qualité des plaquettes de bois a globalement conduit à une réduction des émissions de CO, mais pas dans tous les cas de figures. Il est important de s'assurer que le taux d'humidité maximal défini par le fabricant du chauffage ne soit pas dépassé si l'on veut respecter les émissions de CO.

Silo et entrepôt à plaquettes

Une fraction fine peu élevée est avantageuse pour le stockage, car les plaquettes s'écoulent mieux, sont mieux ventilées et sèchent mieux. Une fraction fine élevée entraîne une mauvaise fluidité des plaquettes de bois et un risque accru de formation de ponts dans le silo ou l'entrepôt. Le mélange de plaquettes de bois devient plus visqueux et se compacte beaucoup plus rapidement avec, comme conséquence, l'apparition de zones plus denses et plus résistantes à l'arrivée d'air, jusqu'à une obstruction quasi complète du flux d'air à travers les plaquettes. L'eau stagne plus longtemps dans le mélange et a du mal à s'évaporer. L'eau extérieure est absorbée plus rapidement («effet éponge») et stagne dans les plaquettes. L'eau de condensation s'évaporant des autres zones plus aérées du stock de plaquettes se condense là où la fraction fine est plus élevée, avant d'être absorbée. Dans ces conditions, il est donc impossible de sécher les plaquettes de bois. Pourriture et moisissures se développent et se propagent. Les conséquences sont une augmentation de l'émission d'odeurs et une contamination sanitaire accrue.



L'effet éponge se traduit par un mauvais séchage avec développement de moisissures (ardens GmbH, 2017).

Le transport des plaquettes de bois ou encore les niveaux de remplissage élevés du silo à plaquettes provoquent un compactage supplémentaire, voire à un durcissement des plaquettes. Une forte activité biologique dans les piles de plaquettes stockées peut conduire à un échauffement spontané élevé, voire à une combustion spontanée avec risque d'incendie. Le compactage entraîne la formation de ponts, de puits et/ou de parois, de sorte qu'à l'intérieur du silo, les plaquettes de bois ne peuvent s'écouler, provoquant ainsi le fonctionnement à vide des systèmes de convoyage. En hiver, du fait que les plaquettes gèlent plus rapidement et forment des blocs, la formation de ponts s'accélère et entraîne des rétentions de matériau contre les grilles de protection antichutes.

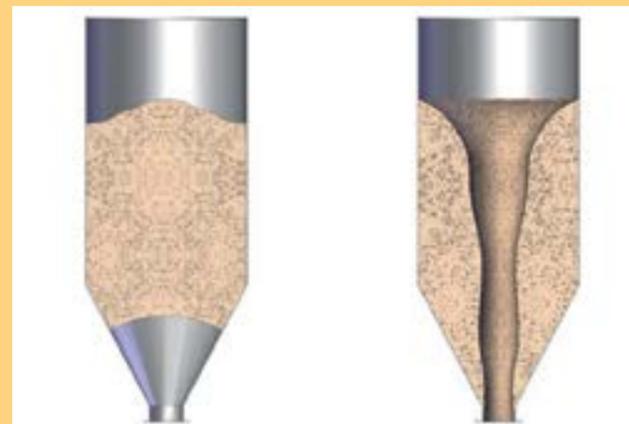
Systèmes d'extraction et de transport

Une fraction fine élevée augmente la résistance à la friction entre le combustible stocké et le fond du silo avec, à la clé, une charge accrue sur les **raclettes du fond mouvant**. La capacité de transport diminue ainsi progressivement, respectivement la pression de service de l'unité hydraulique augmente, jusqu'à ce que la force de frottement devienne trop élevée, ce qui peut entraîner une surcharge et une rupture des éléments ou du profilé longitudinal du fond mouvant. La surcharge est favorisée par le fait que les fonds mouvant sont écrasés par les chargeurs sur pneus (avec un compactage supplémentaire du matériau combustible) et que le poids du combustible pesant sur le fond mouvant est trop élevé.

Dans le cas de **systèmes d'extraction à bras articulé ou à noyau à ressort**, le combustible compact stocké sans pouvoir s'écouler forme une paroi verticale fixe et ne peut être extrait par l'extrémité du bras articulé ou du noyau à ressort. Ce problème dû à une fraction fine trop élevée s'aggrave lorsque le matériau combustible est encore humide ou a séché uniquement après ensilage.

Le rayon d'extraction maximal ne peut plus être atteint, car les bras articulés ne peuvent pas être dépliés. Seul le combustible présent sur une toute petite surface circulaire au centre peut être déchargé. La présence d'une fraction de fine élevée provoque au centre la formation d'un cylindre creux avec des parois latérales quasi verticales. Les plaquettes de bois ne s'écoulent plus depuis la paroi extérieure vers le centre. Sur les systèmes d'extraction avec noyau à ressort, le phénomène de surcharge peut entraîner l'arrêt complet du système.

Une fraction fine élevée, conjuguée à un taux d'humidité élevé, empêche les plaquettes de bois de s'écouler et peut conduire à la formation de ponts et de puits dans **les puits de chute et les zones de transition**, ainsi qu'à la formation de gel en hiver. Il en résulte une marche à vide ou une répartition inégale du taux d'occupation des systèmes de transport avec, à la clé, des perturbations d'exploitation.



Formation de ponts (à g.) et de puits (à d.) (Hinterreiter, 2010).

Les ponts peuvent également se former en raison de la présence d'une trop grande fraction grossière et/ou de surlongueurs en trop grand nombre dans le mélange de plaquettes de bois. Les surlongueurs se coincent les unes dans les autres, ce qui entraîne une mauvaise fluidité et empêche le retour des plaquettes.

Sur les **vis sans fin transversales**, la présence d'une fraction fine élevée associée à une géométrie défavorable de la vis sans fin est susceptible d'entraîner un compactage et une compression du matériau fin: par exemple avant de traverser la paroi du silo ou au point de transition entre la vis sans fin transversale et la vis élévatrice. Cela peut entraîner des perturbations dues à une surcharge.

Géométrie favorable vis sans fin

Pour éviter toute obstruction, le diamètre de l'auge doit correspondre au minimum à deux fois l'épaisseur maximale de la coupe transversale des particules. La distance entre deux pas de vis doit être supérieure d'au moins un tiers à la taille des plus grosses particules. Souvent, les blocages peuvent être éliminés en faisant tourner la vis dans le sens inverse pendant une courte durée.



Distance entre les spires Diamètre du noyau Lame hélico

PRÉSÉCHAGE DU BOIS-ÉNERGIE

Le séchage des plaquettes de bois par stockage est un processus lourd et coûteux. Il est donc d'autant plus surprenant que la plupart des rapports et documents disponibles ne se soient pas encore attardés sur la question du préséchage du bois-énergie non déchiqueté stocké en piles. Les résultats les plus pertinents du préséchage du bois d'énergie non déchiqueté en tant que bois-énergie rond (grume) nous proviennent des essais d'Urs Elber (Elber 2007) et peuvent être résumés comme suit.

Emplacement idéal des piles

- La position topographique de la pile est le critère le plus important pour un préséchage efficace du bois à l'état non déchiqueté. Les piles de grumes sont dressées de préférence sur les zones de crêtes et de mamelons exposées au vent. Les cuvettes, en revanche, sont extrêmement défavorables. L'exposition des piles de grumes au soleil offre toujours des conditions favorables.

- Un effet positif sur la qualité du séchage est obtenu lorsque les piles de bois ronds sont disposées hors forêt, car les effets du vent y sont généralement plus élevés.

- Les piles de grumes doivent être édifiées sur un sol sec, dans l'idéal caillouteux, sans eau stagnante et avec une bonne infiltration d'eau, et présenter un dégagement au sol suffisant. Les sols lourds sujets à l'engorgement de l'eau sont défavorables. Il est recommandé d'aménager des supports en bois massif sur les traverses.



Piles de grumes sur sols défavorables

- Il convient de ménager un espace suffisant pour les routes d'accès et les aires de manœuvre. Les piles de grumes doivent rester accessibles à tout moment. Par conséquent, le déneigement des voies d'accès doit être garanti à tout moment.

- La taille minimale de la pile de grumes doit être dimensionnée de telle sorte que son volume corresponde à un chargement entier de déchiqueteuse.

- Selon la législation cantonale en vigueur, les piles de grumes ne doivent pas être installées dans des zones de protection des eaux ou des eaux souterraines.

Transformation avant stockage

- Le séchage s'effectue principalement par les sections des grumes. Il est donc recommandé de stocker le bois rond en tronçons de longueur la plus courte possible. Plus le bois rond est fin, plus il sèche rapidement. Un écorçage complet ou partiel accélère le processus de séchage. La durée de stockage des grumes en pile ne doit pas dépasser un an. La présence de branches dans le stock n'apporte pratiquement aucun avantage. La présence de nœuds, de feuilles et d'aiguilles trop denses ralentissent le séchage.

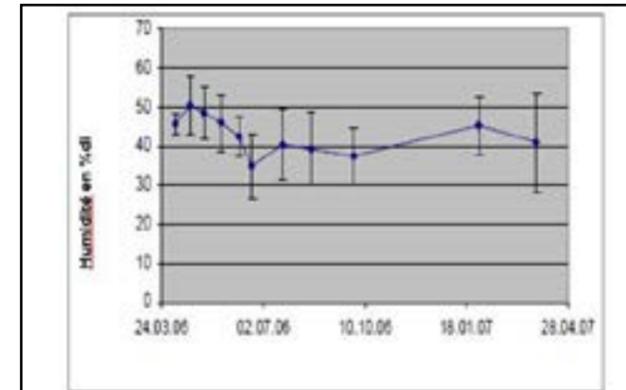
Il est recommandé d'installer des piles distinctes (bois-énergie rond et rémanents de coupe) lorsque celles-ci sont destinées à des types de chauffages différents, par exemple, des petits foyers à poussée inférieure d'une part, et des grands foyers à grille d'avancement d'autre part. Cette séparation simplifie la logistique et maximise la création de valeur en préservant les différentes qualités de plaquettes de bois.

- Les piles de grumes peuvent être installées toute l'année. Le séchage est plus efficace pendant la saison estivale.

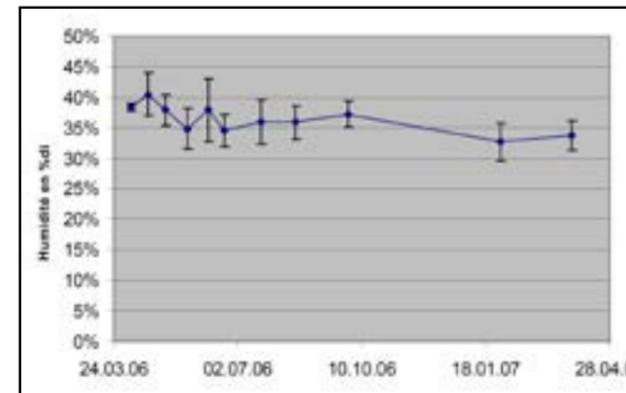
Séchage des résineux et des feuillus

- En ce qui concerne les résineux, la modification du taux d'humidité est fortement influencée par la quantité de pluie ou de neige («effet éponge»). Il est donc conseillé de commencer à empiler le bois de résineux seulement après une période de pluie. Le bois de résineux (épicéa) atteint son taux d'humidité minimal au bout de 3 à 5 mois de stockage seulement. Ensuite, la pile de bois doit être déchiquetée ou recouverte, faute de quoi le taux d'humidité serait de nouveau en hausse

- Le bois de feuillus (hêtre) présente un processus de séchage différent et atteint son taux d'humidité minimal au bout de 8 à 9 mois seulement, mais ce dernier reste ensuite plus ou moins constant. Dans le cas du bois rond de feuillus, la réhumidification est moins problématique que pour le bois de résineux. Une couverture n'est généralement pas nécessaire, à moins d'avoir une proportion élevée de couronnes et de branches. La durée de stockage du hêtre est étroitement liée à la question de la «nituration». Les points de vue des praticiens à cet égard divergent toutefois considérablement.



Processus de séchage du bois d'épicéa à l'état non déchiqueté (Elber, 2007).



Processus de séchage du bois de hêtre à l'état non déchiqueté (Elber, 2007).

Protection sous couverture du bois-énergie à l'état non déchiqueté

Le fait de recouvrir les piles de grumes de grandes dimensions à l'aide d'un film imperméable spécial à base de papier peut avoir un effet positif sur le séchage et empêcher la réhumidification du bois en le protégeant notamment contre la pluie et la neige. Il est important de déposer la protection suffisamment tôt dans la saison, c'est-à-dire avant la fin juin ou la fin juillet, selon la météo. Il convient en outre de veiller à ce que les piles de grumes soient bien ventilées et ensoleillées et qu'elles soient disposées sur une surface sèche et perméable.

La présence de nœuds, de feuilles et d'aiguilles trop denses ralentissent le séchage.

Le film protecteur est déroulé à l'aide d'une bride de grande taille fixée à la grue du véhicule de débardage. La longueur du film doit correspondre à peu près à la largeur de la pile et le film doit être lesté aux deux extrémités ainsi qu'au-dessus de la pile à l'aide de rondins ou de sacs de sable. Lors du déchiquetage, le film de papier peut être broyé sans souci, à condition de veiller à obtenir un bon mélange bois-papier. L'utilisation d'une feuille de papier est particulièrement judicieuse pour protéger les grumes contre la réhumidification en automne et en hiver en présence de qualités de bois-énergie mixtes avec une fraction élevée de résineux et des proportions moindres de branches, de parties de couronne et de coupes d'éclaircies, et ce jusqu'à la période de chauffage en cas de période de stockage prolongée.



Piles de grumes protégées par une couverture (Amstutz Holzenergie AG, Emmen).



TRANSFORMATION DU BOIS-ÉNERGIE EN PLAQUETTES DE BOIS

Prélèvement des substances nutritives

Les rémanents de coupe désignent les branches, les parties de couronne, les résidus d'écorce, les souches et les systèmes racinaires. L'utilisation des rémanents de coupe comme combustible bois prélève les éléments nutritifs de la forêt en évacuant la biomasse. Par rapport aux grumes, les rémanents de coupe contiennent beaucoup plus d'éléments nutritifs par kilo de matière sèche, notamment dans les aiguilles, les feuilles et l'écorce.

Il est recommandé de laisser une partie des rémanents de coupe dans le peuplement forestier en raison de l'apport d'éléments nutritifs, mais de l'adapter au processus de récolte (par exemple, grue à câble) et à l'état du sol (fertilisation azotée, acidification, etc.). La diminution du volume des rémanents de coupe déchetés entraîne l'amélioration de la qualité des plaquettes finales grâce à la diminution de la fraction de feuilles, d'aiguilles et d'écorce.

Facteurs mécaniques

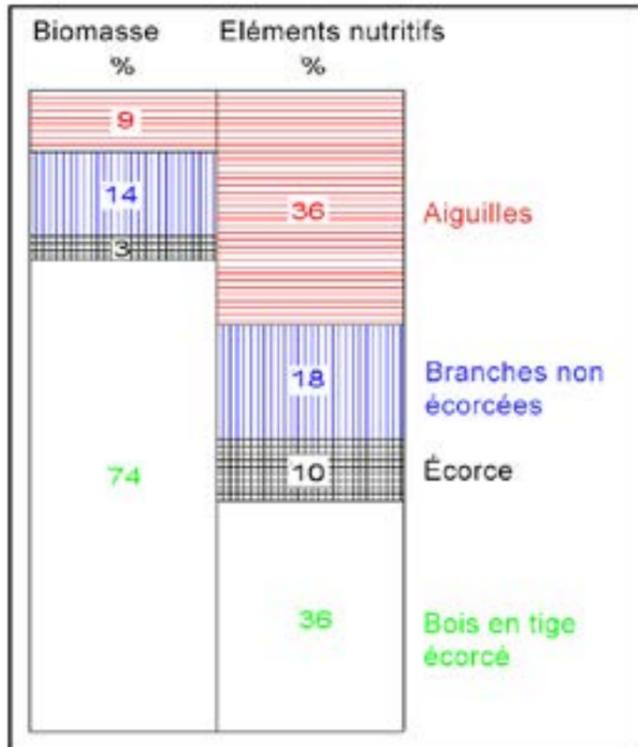
Les facteurs mécaniques des engins jouent un rôle majeur dans la transformation du bois-énergie en plaquettes. Le tableau ci-dessous rassemble les principaux paramètres et facteurs d'influence.

Autres facteurs

Le degré d'expérience de l'opérateur de la machine est un facteur important à ne pas sous-estimer lors de la production des plaquettes de bois. Un opérateur expérimenté connaît le réglage du broyeur et sait comment affiner ou sélectionner correctement les paramètres de qualité.

La coopération efficace de l'ensemble de la chaîne de production des plaquettes de bois est tout aussi cruciale pour obtenir des plaquettes de qualité optimale. Si les opérations de façonnage des piles de grumes en forêt et de déchetage et de transport des plaquettes de bois vers leur destination finale sont correctement exécutées, judicieusement coordonnées et concertées, alors la plupart des problèmes de qualité de plaquettes de bois disparaissent.

Vous trouverez de plus amples informations sur la transformation du bois-énergie en plaquettes de bois dans la fiche d'information n° 409 «Préparation rationnelle des plaquettes de bois pour exploitations forestières» d'Energie-bois Suisse.



Répartition de la biomasse (colonne de g.) et des éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg; colonne de d.) par rapport aux composantes de la partie aérienne des arbres. (Flury, 2013).

Facteurs mécaniques impactant la qualité des plaquettes de bois (TFZ, 2015)

Paramètres	Influence sur la qualité des plaquettes de bois
Type de machine utilisée	Les déchiqueteuses produisent des plaquettes à vives arêtes, tandis que les broyeurs produisent du bois broyé, fibreux et brisé.
Unités de coupe	Les déchiqueteuses à tambour, à disques et à vis font appel à différentes techniques de coupe.
Tranchant des couteaux	Les couteaux tranchants produisent des plaquettes à vives arêtes, tandis que les plaquettes obtenues à l'aide de couteaux émoussés affichent une fraction grossière plus élevée et des arêtes émoussées.
Nombre de tours	La hausse du nombre de tours de l'unité de coupe s'accompagne de l'augmentation du nombre de coupes par mètre de bois introduit.
Vitesse d'alimentation	La hausse de la vitesse d'alimentation s'accompagne de la baisse du nombre de coupes par mètre de bois introduit.
Ouverture du panier de tamis	Les tamis à impact sont utilisés pour le broyage secondaire des plaquettes et influencent la taille moyenne des plaquettes, ainsi que la fraction fine et fraction grossière.
Conception des tambours	Les unités de coupe (corps de tambour) peuvent être perméables aux plaquettes de bois. Dans les tambours ouverts, le broyage du matériau combustible se poursuit parfois en raison du broyage par impact à l'intérieur du tambour.
Disposition des couteaux	Les couteaux en ligne permettent d'obtenir des plaquettes de bois plus uniformes avec moins d'ébréchures qu'avec des couteaux étagés.
Longueur de coupe	L'agrandissement de l'ouverture entre le couteau et la contre-lame permet d'augmenter la taille des particules.
Système d'éjection	Les systèmes d'éjection avec des vitesses de transport élevées (par ex. ventilateurs de convoyeur avec pales de projection) augmentent la fraction fine grâce à une phase supplémentaire de concassage par impact des plaquettes de bois.



Production de plaquettes de bois à partir de rémanents de coupe de branches.

PRINCIPES DE BASE DU STOCKAGE DES PLAQUETTES DE BOIS

Raisons pour le stockage des plaquettes de bois:

• Raisons logistiques

Si l'accès aux forêts ou aux aires d'entreposage du bois rond est limité en hiver, les plaquettes de bois doivent être déchiquetées en amont de leur utilisation en chauffage.

• Raisons phytosanitaires

Pour éviter les calamités et les maladies au stock restant (bostryche, flétrissement du frêne, etc.), le déchiquetage rapide du bois-énergie est une nécessité.

• Raisons commerciales

Afin de tirer profit des avantages commerciaux de la baisse des prix de l'énergie lorsque l'offre est excédentaire, les plaquettes de bois sont transformées en amont des besoins.

• Raisons qualitatives

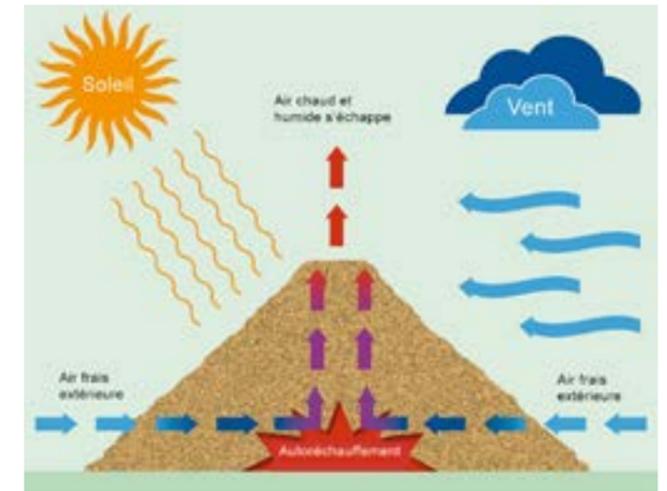
Les chauffages au bois existants nécessitent des plaquettes de bois avec un faible taux d'humidité.

Avec le stockage des plaquettes de bois, l'objectif est toujours de sécher le matériau et donc d'améliorer la qualité. Le séchage par convection naturelle fait appel uniquement à des sources d'énergie naturelles comme le soleil, le vent ou l'énergie issue de l'échauffement spontané des plaquettes de bois. Le principe est simple: l'air contenu dans la pile de plaquettes de bois se réchauffe, s'élève et évacue ainsi l'humidité contenue dans les plaquettes. La dépression qui en résulte provoque l'écoulement de l'air frais extérieur par le bas. Ce flux d'air naturel entraîne le séchage des plaquettes de bois en quelques mois. Les systèmes d'évacuation de l'air vicié peuvent accélérer le séchage.

Principaux problèmes, risques et mesures liés au stockage des plaquettes de bois (LWF, 2014)

Risques	Problèmes	Mesures
Risques de pertes	Perte de substance de 2 à 4% par mois pour les stocks de plaquettes de bois de fraîche coupe.	Utiliser du bois déchiqueté préséché Procéder à un séchage rapide des plaquettes de bois avec un taux d'humidité cible inf. à 30% (< W30) Veiller à limiter la fraction fine et la proportion de déchets verts
Risque sanitaire	Menace sanitaire due aux spores de moisissures	Utiliser du bois déchiqueté préséché Veiller à réduire la fraction fine Procéder à un séchage rapide des plaquettes de bois avec un taux d'humidité cible inf. à 30% (< W30)
Risque pour la qualité	Réhumidification des plaquettes de bois ou redistribution du taux d'humidité à la suite de précipitations (pluie) et/ou de la présence d'eau de condensation au sommet du tas de plaquettes	Veiller à réduire la fraction fine Entreposer les plaquettes de bois dans un lieu sec et aéré de préférence sous une toiture Protéger le matériau avec une couverture en non-tissé lorsqu'il est entreposé en plein air
Risque technique	Les plaquettes de bois se transforment en grumeaux sous l'effet du gel; présence de corps étrangers (par ex. pierres) Causes: gel de l'eau de condensation et contamination du bois	Limiter la présence d'impuretés au minimum
Risque d'incendie	Inflammation spontanée par échauffement du matériau en vrac en raison de l'activité de micro-organismes et de procédés chimico-physiques	Veiller à limiter la fraction fine et la proportion de déchets verts Stocker les plaquettes de bois les plus sèches possible Ne pas rouler avec des engins sur les tas de plaquettes de bois (la compression favorise l'échauffement) Hauteur maximale des tas: 4 m
Risque pour l'environnement	Mauvaises odeurs et fuites de lixiviats	Stockage à sec et aéré Lors du choix de l'emplacement, tenir compte de la direction principale du vent Ne pas entreposer les plaquettes de bois directement le long de plans d'eau ou de cours d'eau

Les plaquettes de bois peuvent être stockées soit en plein air, soit sous toiture ou sous une couverture en tissu non-tissé. Le stockage en plein air est particulièrement adapté aux plaquettes de bois grossiers. Les plaquettes en quantités limitées peuvent être empilées en tas coniques; toutefois, en présence de plus grandes quantités, la disposition en piles en forme de toit à pignon est préférable. Même si, normalement, l'eau de pluie ne pénètre pas de plus d'un demi-mètre dans les plaquettes de bois stockées en plein air, les précipitations régulières favorisent la formation d'une couche extérieure humide et le développement de moisissures avec, à la clé, un accroissement des pertes de substance au sommet de la pile de bois. Il est donc recommandé de recouvrir les plaquettes de bois en plein air à l'aide d'un matériau non-tissé perméable à la vapeur d'eau. Il est important de maintenir un angle d'inclinaison suffisant. Dans les régions à forte pluviométrie, il est déconseillé de stocker les plaquettes de bois à l'extérieur.



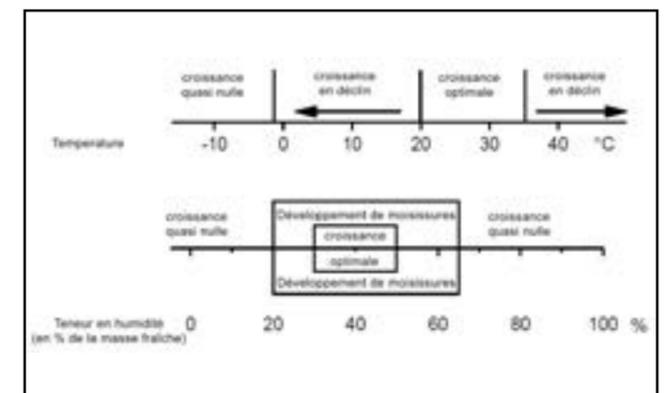
Principe du séchage par convection naturelle (LWF, 2014).

PERTE DE SUBSTANCE LORS DU SÉCHAGE NATUREL

Le séchage naturel des plaquettes de bois permet de réduire le taux d'humidité du bois – comme souhaité –, mais provoque également une perte de substance. La cause de cette perte de substance et, par conséquent, d'énergie réside dans des processus de dégradation physiques, chimiques et, surtout, (micro)biologiques qui se déroulent dans une certaine plage de taux d'humidité. Les plaquettes de bois humides sont colonisées par des champignons et des bactéries lignivores. Des proportions élevées de matières fines, d'écorce et de déchets verts accélèrent le développement de ces derniers [15, 17]. Diverses études ont permis de constater des pertes de substance de 2 à 4% par mois sur des stocks de plaquettes de fraîche coupe. Pour parer à cette situation, il est préconisé d'accélérer au maximum le processus de séchage afin d'atteindre un taux d'humidité inférieur à 30% et de limiter la fraction fine et la proportion de déchets verts propices à la dégradation de la substance. Pour des raisons économiques, on évitera le stockage de plaquettes de bois dont la qualité pose problème sur des périodes supérieures à 3 mois. L'activité des champignons et bactéries lignivores la plus forte est observée dans une plage de taux d'humidité de 30 à 50% et dans une plage de températures de 20 à 35°C.

Les processus de dégradation microbienne sont stoppés lorsque le taux d'humidité descend en dessous de 25%. Ce n'est qu'alors que les plaquettes de bois peuvent être stockées sans perte de substance sur des périodes plus longues.

Le stockage du bois déchiqueté engendre une plus forte perte de substance que le stockage du bois non déchiqueté. En effet, plus la section d'entrée est grande, plus les champignons et les microorganismes lignivores peuvent se fixer dessus. Dans le cas des plaquettes de bois de fraîche coupe de haute densité et faiblement espacées, la perte de substance est considérablement plus élevée que pour les plaquettes préséchées. Le stockage des plaquettes de bois sous toiture contribue dans une large mesure à diminuer la perte de substance. Au lieu de 20 à 30% par an (plaquettes de bois non recouvertes), les plaquettes de bois recouvertes ne perdent que 3 à 5% de leur substance. Ces chiffres montrent clairement qu'il est recommandé de présécher les plaquettes de bois avant leur stockage et d'éliminer les matières fines.



Plages de températures et de taux d'humidité les plus propices au développement des champignons lignivores (Ahrens, 2012).

En se fondant sur l'hypothèse d'une perte de substance linéaire, la comparaison de différentes qualités de plaquettes avec différents taux de perte mensuelle permet de dégager la conclusion suivante:

- Bien que le pouvoir calorifique par unité de poids augmente considérablement à la suite du séchage, le poids total des plaquettes de bois séchées est d'autant plus réduit du fait de la perte de substance, de sorte qu'à l'issue du séchage, le pouvoir calorifique de la quantité totale initiale est à peine ou pas du tout supérieure à celle d'avant le séchage.

- En se fondant sur l'hypothèse d'une faible perte de substance (1,5% par mois) et d'une période de stockage de trois mois, l'augmentation du pouvoir calorifique est quasi nulle sur l'ensemble des stocks de plaquettes de bois de bonne qualité.

- En présence de plaquettes de bois de mauvaise qualité, comme c'est souvent le cas dans la pratique, le stockage accompagné d'une perte de substance entraîne même, au final, une baisse significative du pouvoir calorifique.

- Le stockage des plaquettes de bois et le processus de séchage associé améliorent avant tout la sécurité d'approvisionnement et la qualité du combustible. De plus, le poids de transport peut être sensiblement réduit.

Pertes de substance selon les différents modes de stockage des plaquettes de bois tendre et des arbres entiers (Bärwolff & Hering, 2011)

Matériau, mode de stockage	Perte [en % de masse sèche par an]
Plaquettes forestières fines, fraîches, stockées en plein air dans un lieu ouvert	20 à 30
Plaquettes forestières fines, séchées, couvertes	2 à 4
Plaquettes forestières grossières, fraîches, couvertes	3 à 5
Arbres entiers de fraîche coupe stockés en plein air dans un lieu ouvert	6 à 15
Plaquettes de bois issues de plantations à courte rotation (TCR), stockées sous toiture	13,3
Plaquettes de bois issues de TCR, sous couverture en non-tissé	6,4
Plaquettes de bois issues de TCR, stockées sous chapiteau	15,4
Arbres entiers issus de TCR, stockés en plein air	5,8

Changement du contenu énergétique par stockage et séchage naturel – exemples de calcul (G. Lutz & A. Keel, 2015).

Description	Unité	Plaquettes de bonne qualité	Plaquettes de qualité moyenne	Plaquettes de mauvaise qualité
Poids humide	[kg]	10 000	10 000	10 000
Poids après séchage	[kg]	7640	7150	5714
Perte de substance spécifique	[en% par mois]	1,5	3	4
Durée de stockage	[en mois]	3	3	5
Perte de substance totale	[%]	4,5	9	20
Proportion de bois dur	[%]	80	70	30
Proportion de bois tendre	[%]	20	30	7
Taux d'humidité avant séchage	[%]	40	45	50
Taux d'humidité après séchage	[%]	25	30	30
Pouvoir calorifique avant séchage	[kWh]	27 880	25 183	22 975
Pouvoir calorifique après séchage	[kWh]	27 924	24 242	19 934
Évolution du pouvoir calorifique	[%]	+0,16	-3,74	-13,24



STOCKAGE DE PLAQUETTES DE BOIS EN PLEIN AIR

- L'endroit idéal pour entreposer les plaquettes de bois est un lieu plat, ensoleillé, exposé au vent et sec. Lors du stockage des plaquettes de bois en plein air, il est crucial d'éviter la formation de creux, car l'eau s'y accumulerait et ne pourrait pas s'écouler à la surface. Les aires de stockage des plaquettes de bois doivent être séparées des zones de travail et d'habitation en raison de la contamination possible par les moisissures.

- Le fond doit être préparé correctement en prévision des opérations de chargement ultérieures. La couche de surface doit être tassée au rouleau et doit resté exempte de gros cailloux. Les emplacements anciennement destinées à des activités commerciales ou militaires sont particulièrement adaptés. Lors du transport des plaquettes de bois hors du site, il convient de laisser une fine couche de plaquettes sur le sol. Cela permet d'éviter que du gravier ou des impuretés ne s'invitent dans le chargement.

- Les tas de plaquettes de bois doivent avoir la forme d'un toit. La forme idéale est une construction allongée et en pente. La hauteur des tas ne doit pas dépasser cinq mètres, ce afin de minimiser le risque d'inflammation spontanée et de pouvoir recouvrir ultérieurement les tas de plaquettes le cas échéant avec une couverture en non-tissé spécial.

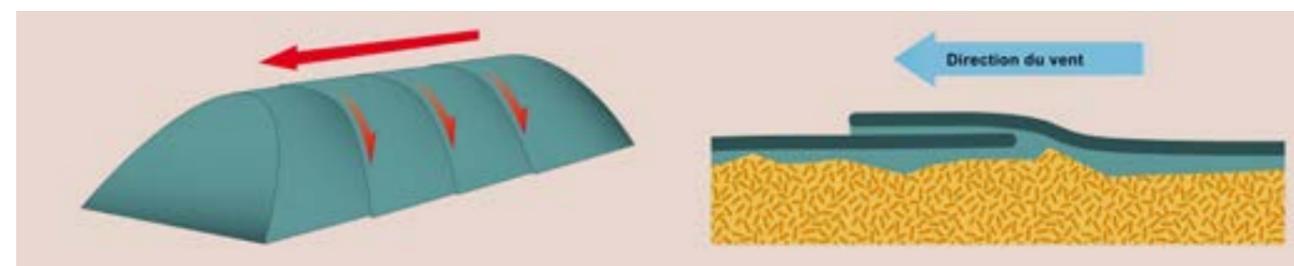
- Dans l'idéal, les piles longitudinales aménagées en plein air doivent être entièrement couvertes. Les principaux matériaux utilisés sont des non-tissés spéciaux à membrane réutilisable, hydrofuges, imperméables à l'eau mais perméables à la vapeur d'eau. Les couvertures en non-tissé doivent être étirées pour éviter la formation de creux dans lesquels l'eau pourrait s'accumuler, et lestées avec des rondins ou des sacs de sable. Les sacs de sable se sont avérés la meilleure option, car ils préservent au mieux les non-tissés contre toute forme de



Installations de stockage idéales en plein air

dégradation. Les couvertures en non-tissé doivent être superposées dans le sens du vent (voir illustration). La durabilité des non-tissés est d'environ cinq ans.

- Dans la mesure du possible, les installations de stockage à ciel ouvert seront aménagées au printemps avec des plaquettes de bois de fraîche coupe présentant une faible fraction fine et le matériau stocké devra pouvoir être prélevé en grandes quantités successives.



Couvertures en non-tissé et direction du vent (source: Forêts domaniales de Bavière).



STOCKAGE DES PLAQUETTES DE BOIS EN ENTREPÔT COUVERT

Emplacement

• La construction d'un entrepôt à plaquettes de bois est un choix judicieux si l'on veut approvisionner de nombreux petits chauffages à plaquettes répondant à des exigences élevées en matière de qualité.

• Les entrepôts doivent disposer d'une bonne ventilation passive et être situés dans des zones géographique peu sujets au brouillard. Les crêtes et les mamelons constamment exposés au vent sont les mieux adaptés. Il est également possible d'utiliser des installations de stockage existantes (p. ex. granges anciennes, entrepôts, ponts d'autoroutes, etc.).

• Un entrepôt à plaquettes doit posséder une aire de manœuvre plane pour les camions (y c. pour les semi-remorques dans la mesure du possible) ou être situé en bordure de rocade.

• En raison de la nécessité de déneigement en hiver, la distance par rapport au réseau routier public doit être aussi courte que possible. Les entrepôts doivent être accessibles en toutes circonstances, y compris pendant les hivers extrêmes. Les voies d'accès doivent être déneigées.

• Pollution sonore: l'entrepôt doit disposer d'engins de déchiquetage. L'éloignement minimal des lotissements habités et autres zones sensibles doit être d'environ 500 m, voire plus en fonction de la direction du vent.

• Selon la législation cantonale en vigueur, les entrepôts de plaquettes ne doivent pas être construits dans des zones de protection des eaux ou des eaux souterraines.

Type de bâti

• Le bâtiment idéal doit consister en une construction de base avec structure métallique à colonnes et toit incliné. Ce type de bâti prévient l'accumulation de masses d'air.

• Idéalement, les entrepôts doivent être ouverts sur le côté longitudinal protégé du vent et doivent être aérés et hauts et avoir des murs perméables.

• Il est important de respecter une distance verticale d'au moins deux mètres entre les tas de plaquettes et le toit. C'est la seule façon de permettre à l'humidité de s'évacuer sans former de zones de condensation.

• Il est judicieux de diviser les entrepôts en box individuels afin de séparer les plaquettes en fonction de leur qualité et du temps de stockage. Un espace suffisant doit être ménagé devant l'entrepôt pour faciliter la manutention.

Stockage

• Dans les entrepôts, l'ordre de stockage des plaquettes doit être respecté également lors des prélèvements ultérieurs, à savoir que les stocks les plus anciens doivent être consommés en premier. La durée de stockage doit être aussi courte que possible (max. 3 à 6 mois). Les entrepôts de plaquettes de bois doivent être aménagées de manière à ce que les couches de plaquettes n'aient pas besoin d'être déplacées. Les stocks correctement aménagés et comportant une faible fraction fine contrôlent leur climat interne de façon autonome.

• La période idéale pour stocker les plaquettes de bois en entrepôt est le début de l'été, en mai et juin. En cette saison, les tas de plaquettes se réchauffent rapidement, mais pendant une courte période seulement (environ 3 semaines). Pour cette raison, le bois déchiqueté doit être frais, c'est-à-dire avoir été coupé en hiver, et l'humidité doit pouvoir être évacuée par un flux d'air maximal.

• En cas de stockage plus tardif dans l'année, il est important de s'assurer du bon préséchage des plaquettes avant déchiquetage. Les plaquettes de bois issus de piles de grumes humides et stockés plus tard dans l'année ne présentent plus de conditions de séchage idéales. D'une part, les souches sont déjà plus fortement contaminées par les microbes et les champignons et, d'autre part, l'échauffement exempt d'activité microbienne est stoppé. Dans un tel cas, il est difficile d'atteindre un taux d'humidité inférieure à 30% et des investissements plus importants sont nécessaires en matière de constructions. Les stocks de bois de fraîche coupe aménagés plus tard dans l'année présentent l'inconvénient d'avoir une proportion élevée de feuilles et d'aiguilles avec, pour conséquence inévitable, une forte concentration de champignons et de microbes. C'est pourquoi le bois d'aménagement paysager doit pouvoir reposer quelques semaines avant d'être déchiqueté.



TAMISAGE DES MATIÈRES FINES

Différents systèmes de criblage sont utilisés pour tamiser les matières fines et les surlongueurs.

Crible à étoiles

Le crible à étoiles est un instrument particulièrement adapté au tamisage des plaquettes de bois; il permet de tamiser différents diamètres et différentes longueurs. La machine est constituée de roues en caoutchouc ou en plastique montées sur des arbres à rotation rapide. La forme spéciale des étoiles permet à la matière fine de passer à travers le tamis et de tomber sur un tapis roulant ou un monticule de matériau. Les gros morceaux de matériau restent au-dessus des étoiles et tombent à l'extrémité du tamis. Cette technique se caractérise par une performance élevée et un haut débit par unité de temps.

Tamis à tambour

Les tamis à tambour sont très souvent utilisés pour tamiser les matières du sol dans les usines de compostage. Le matériau à tamiser passe par un cylindre de tamis rotatif. Le matériau plus fin que le maillage du tamis passe à travers. Le matériau plus grossier traverse le cylindre et retombe à l'autre extrémité après que le passage complet du cylindre.

Tamis vibrant

Le tamis vibrant utilise des grilles de différentes largeurs de mailles. Selon la largeur, il est possible de tamiser des matériaux plus ou moins grossiers ou plus ou moins fins. En fonction du nombre de tamis sélectionnés traversés successivement par le matériau, du plus grossier au plus fin, le tamis vibrant permet un nombre illimité de fractions de tamisage.



Tamis vibrant de Verora GmbH/NEAG à Wies, Neuheim (ZG).

Le bon moment pour un tamisage efficace

Le tamisage de la matière fine peut s'effectuer avant ou après le séchage. Idéalement, le tamisage des plaquettes de bois s'effectue deux fois: avant puis après le séchage.

Tamisage avant ou après séchage	Avantages	Inconvénients
Avant le séchage	<ul style="list-style-type: none"> Moins de matière à traiter Séchage plus rapide Débit accru de plaquettes de qualité commercialisables Réduction de la formation de poussières Meilleur contrôle du processus de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> Les matières fines adhèrent aux plaquettes de bois
Après le séchage	<ul style="list-style-type: none"> Les matières fines se détachent plus facilement des plaquettes de bois Le tamisage des matières fines est plus efficace 	<ul style="list-style-type: none"> La présence de matières fines sèches provoque davantage de poussières Davantage de matière à traiter Temps de séchage accru Résultats de séchage moins bons en raison de la fraction fine élevée
Avant et après le séchage	<ul style="list-style-type: none"> Plaquettes de bois de qualité optimale Tamisage optimal des matières fines 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts accrus



PROCÉDÉ TECHNIQUE POUR LE SÉCHAGE DES PLAQUETTES

Pour obtenir un taux d'humidité de 30%, un temps de séchage allant jusqu'à 6 mois est nécessaire pour les stocks sous toiture. Compte tenu de cette longue durée et de l'encombrement important des stocks, le séchage «technique» des plaquettes de bois par des sources d'énergie externes s'impose comme une évidence.

En principe, le séchage du bois consiste à acheminer de la chaleur dans le bois et d'évacuer l'humidité du bois. Le réchauffement accélère l'évaporation, car l'air chaud peut évacuer de plus grandes quantités d'eau. L'eau évaporée est absorbée par l'air ambiant. L'efficacité du séchage est d'autant plus grande que la vitesse et la température du flux d'air circulant dans le local sont élevées et que l'humidité relative de l'air ambiant est faible.

Pour un séchage technique – mais aussi naturel – optimal des plaquettes de bois, la présence d'une faible fraction fine est un critère essentiel, en particulier pour les tas de grande taille. Faut de quoi, des «poches d'humidité» liées à une forte fraction fine dans le tas de plaquettes sont susceptibles de freiner, voire d'empêcher complètement l'effet de séchage.

Parmi la vaste gamme de systèmes et de technologies de séchage de plaquettes de bois disponibles, les produits principaux suivants font ici l'objet d'une description détaillée:

Conteneurs de séchage

Le principe du conteneur de séchage réside dans le fait que le matériau à traiter repose dans un conteneur et est traversé par de l'air chaud remontant par le bas. Les conteneurs de séchage conviennent pour le séchage par lots d'une grande variété de produits avec des temps de séchage longs. La température des conteneurs de séchage peut être adaptée pendant toute la durée de séchage grâce à des courbes de température ou de temps variables. L'alimentation du séchoir est manuelle ou entièrement automatique. Les séchoirs à conteneurs sont universels et sont utilisés dans un grand nombre de secteurs de l'industrie. En raison de la hauteur élevée des tas de matériau, il est important de limiter la fraction fine lorsqu'on opte pour le séchage en conteneur. Les séchoirs de type «caisson de séchage» ont fait leurs preuves pour le séchage des plaquettes de bois. Ces derniers sont disponibles en deux versions.

Dans le caisson de séchage **stationnaire**, les plaquettes de bois sont déversées et séchées dans un caisson en bois ventilé par le bas. Une fois le processus de séchage terminé, un autre caisson est rempli puis ventilé, et ainsi de suite. Entre-temps, le caisson contenant le matériau déjà séché peut être vidé.

Dans les séchoirs à caisson **mobile**, les plaquettes de bois sont stockées dans des conteneurs métalliques à double fond, ce qui permet à l'air de circuler. Selon la version, il est possible de raccorder et de sécher plusieurs conteneurs au système à air chaud simultanément.



Séchage en conteneur mobile avec chaleur résiduelle d'une installation de biogaz. (Moser, 2015).

Séchoirs à bande

Le séchoir à bande basse température est une méthode efficace pour le séchage de la sciure de bois, des plaquettes de bois, des écorces, des copeaux et autres biomasses, à une chaleur de 60 à 90 °C. En raison de la faible hauteur de tas de plaquettes de bois sur la bande de séchage, même les plaquettes de bois avec une fraction fine élevée sèchent efficacement.

Le matériau humide à traiter est convoyé en continu dans le séchoir. Les vis du convoyeur répartissent et nivellent le matériau humide uniformément sur toute la largeur de la bande. La hauteur appropriée des tas de plaquettes est modulable et réglable. Après la distribution, l'alimentation du produit dans la zone de séchage s'effectue par l'avancement de la bande. L'air chaud générée circule à travers le matériau en vrac à l'intérieur du tunnel de séchage.

L'air chaud est évacué par un échangeur de chaleur à partir du fluide caloporteur disponible. Pendant que l'air chaud traverse la couche de matériau, l'humidité est séchée par convection et acheminée dans le flux d'air. Celui-ci se refroidit grâce à l'absorption de l'humidité.

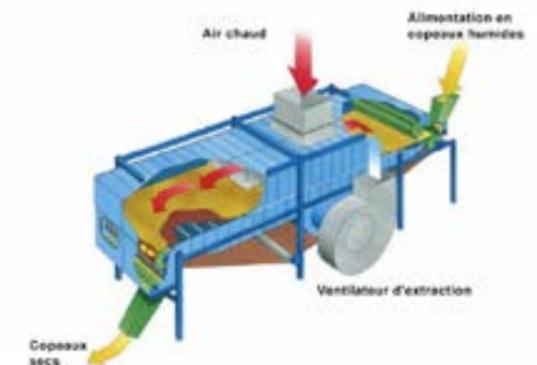
Le nettoyage de la bande de séchage est d'abord effectué par nettoyage à sec en continu, puis par nettoyage humide discontinu. Le nettoyage à sec est effectué par soufflage de bande, ce qui élimine les fines particules de poussière de la bande de séchage perforée côté évacuation. Les résidus de nettoyage sont déversés dans le matériau évacué. Pour le nettoyage ultérieur de la bande, on utilise un système de nettoyage humide à haute pression.

Séchoir à tambour

Les séchoirs à tambour se prêtent au séchage de matériau nécessitant un temps de séjour prolongé dans l'installation de séchage en raison de leur taux d'humidité et de leur structure. Ainsi, par exemple, les pulpes de betterave et la sciure de bois sont généralement séchées dans des séchoirs à tambour. Les séchoirs à tambour sont constitués d'un tambour rotatif dans lequel circule de l'air très chaud. Le matériau de séchage circule à travers le tambour dans le même flux que le gaz chaud. Le matériau traverse le tambour par un système de convoyage mécano-pneumatique combiné. La matière sèche est séparée après le séchage au moyen d'un corps de déchargement ou de cyclones. Les séchoirs à tambour peuvent être chauffés directement avec du gaz chaud et affichent des températures comprise dans une vaste plage allant 150 à 1000 °C. Un des inconvénients de la méthode est la forte formation de poussière lors du séchage. Lors du brassage du matériau à sécher, l'abrasion mécanique accroît la formation de matières fines et, ainsi, une perte de matière. Le matériau très fin (poussières ou fraction très fine) est ensuite évacué vers l'extérieur par le flux d'air, ce qui peut entraîner des émissions importantes de poussières fines en l'absence de filtre adapté. En outre, des problèmes apparaissent souvent lors de la filtration en raison de l'adhérence des poussières de filtration due au taux d'humidité élevé et à la forte présence de poussières.

Les séchoirs à tambour sont donc particulièrement adaptés au séchage des plaquettes de bois qui ont déjà été criblées avant le séchage.

Après le séchage, il est important de stocker les plaquettes de bois séchées dans un entrepôt avec toiture. Ce mode stockage peut également convenir pour obtenir de l'air chaud supplémentaire. Un lambrissage est inséré sous le toit afin de créer un espace creux. En traversant le toit, le soleil réchauffe l'air présent dans cette cavité, et cet air peut ensuite être aspiré et utilisé pour un séchage ultérieur. Cette méthode permet généralement d'atteindre le taux d'humidité désiré. Les facteurs temps, température de l'air, hauteur du tas du matériau stocké et vitesse d'écoulement jouent un rôle décisif à cet égard.



Principe du séchoir à bande (W. Kunz dryTec AG. 2005).

LOGISTIQUE DU BOIS-ÉNERGIE RÉGIONALE

La coopération de petits producteurs de plaquettes réunis en collectivités d'exploitants permet de professionnaliser la logistique des plaquettes de bois et d'accroître son efficacité. Les coûts d'investissement dans les machines coûteuses sont partagés, les taux d'utilisation des machines sont meilleurs et les immobilisations et les temps d'attente sont supprimés et/ou raccourcis. Le regroupement de petites quantités de bois-énergie en unités plus grandes ainsi que la planification minutieuse de la logistique des plaquettes de bois peuvent également avoir une influence positive sur la qualité du produit final. Les producteurs de plaquettes apportent ainsi une précieuse contribution à l'exploitation des usines à faibles émissions et à maintenance réduite.

Expériences positives au Liechtenstein

Dans la Principauté de Liechtenstein, le «Holzkreislauf Liechtenstein» illustre de manière exemplaire les effets positifs d'une logistique du bois-énergie bien pensée sur la qualité des plaquettes de bois et donc, également, sur celle des installations elles-mêmes (Kofler, 2015). Le «Holzkreislauf Liechtenstein» a été créé il y a une dizaine d'années pour fournir 16 chauffages automatiques au bois de petite taille et de la centrale de chauffage au bois (CCB) de Balzers inaugurée en 2014, dans le but de trouver une solution interentreprises pour fournir à ces installations le combustible adéquat. La quantité annuelle totale de combustible est d'environ 35 000 mètres cubes en vrac et se répartit à 50/50 entre la CCB de Balzers et les 16 autres installations. Le «Circuit du bois du Liechtenstein» s'occupe de la logistique du bois-énergie, du hachage, du transport, l'administration et de l'organisation. Les forestiers de triage fournissent les piles de grumes en hiver et au printemps.

Étêtage et empilage séparé

Le bois-énergie rond et les parties de couronne sont empilés séparément et séchés à l'état brut, non décheté. Sur la couronne, les branches de moins de 10 cm sont détachées avec l'écorce, les aiguilles et les feuilles et laissées sur place dans la forêt pour favoriser l'équilibre nutritif du sol forestier. Parallèlement, cela permet de maintenir les coûts de façonnage à un niveau inférieur à ceux de la fourniture d'une grande quantité de branches. Les parties de couronne sont donc relativement de bonne qualité. On veillera à disposer de grandes piles de grumes en quantité suffisantes dans les zones de stockage d'accès facile pour les transporteurs.

Déchetage des plaquettes: en altitude à l'automne et au printemps, en vallée pendant l'hiver

Les grumes en piles sont séchées pendant tout l'été et déchetées progressivement pendant la période de chauffage. Le «Holzkreislauf» fait venir une déchetuse au début de la période de chauffage, d'abord en altitude. Progressivement, le déchetage est effectué sur les dépôts de bois de plus en plus bas pour arriver au cœur de l'hiver à ce qu'il ne reste plus que les dépôts de bois-énergie situés dans la vallée. Cette organisation interentreprise permet d'optimiser l'utilisation des dépôts d'altitude et d'intégrer de manière optimale les exploitations forestières concernées. Chaque fois qu'une déchetuse est utilisée, certains conteneurs sont remplis de plaquettes de bois et utilisés comme réserve tampon en cas de hausse inattendue de la demande.

Organisation des opérations de déchetage

La mutualisation des opérations de déchetage permet d'obtenir de meilleurs prix auprès de l'entreprise de déchetage et de mieux utiliser les ressources de cette dernière. Il est fait appel à une seule et unique société de la Principauté. Étant donné que l'entreprise de déchetage reçoit chaque semaine ou toutes les deux semaines une grosse commande pour le déchetage de piles de grumes de grandes tailles et a peu de petites commandes à traiter, il est possible de mettre en place une coordination simple des opérations de déchetage.



La qualité détermine la destination du produit final

Les meilleures qualités de bois-énergie issues de grumes sont destinées aux chauffages au bois de petite taille. Après la période de séchage de l'été, ces grumes affichent un taux d'humidité d'environ 30 à 35% et peuvent être utilisés pour alimenter des chauffages à plaquettes de bois sèches. Lors du déchetage au moyen d'une déchetuse à tambour de grande dimension, l'entreprise utilise des tamis de maillages différents, ce qui évite les problèmes de surlongueurs. Avec les branches de couronnes, en revanche, un nombre important de surlongueurs passent à travers les tamis, de sorte que ce matériau compromet le bon fonctionnement des petits chauffages.

Les parties de couronne stockées sur des piles séparées sont utilisées pour les grands chauffages, notamment pour la CCB de Balzers. La subdivision en bois rond énergétique et en parties de couronne, relativement facile à organiser et désormais très efficace après quelques problèmes de coordination initiaux, permet de maximiser la valeur ajoutée du bois-énergie. Les forestiers obtiennent de meilleurs prix pour les plaquettes de bois-énergie rond et sont donc motivés à les trier en conséquence.

Si ce système de séparation en deux assortiments, le bois-énergie rond d'une part, le matériau de la couronne et les rémanents de coupe d'autre part, fonctionne si bien, c'est uniquement parce que la demande de plaquettes de moindre qualité pour la CCB de Balzers est suffisamment forte à ce jour. Pour le tri en deux qualités de bois-énergie différentes, l'existence de débouchés suffisants est primordiale pour les produits de moindre qualité.

L'évaluation des piles de grumes motive les forestiers

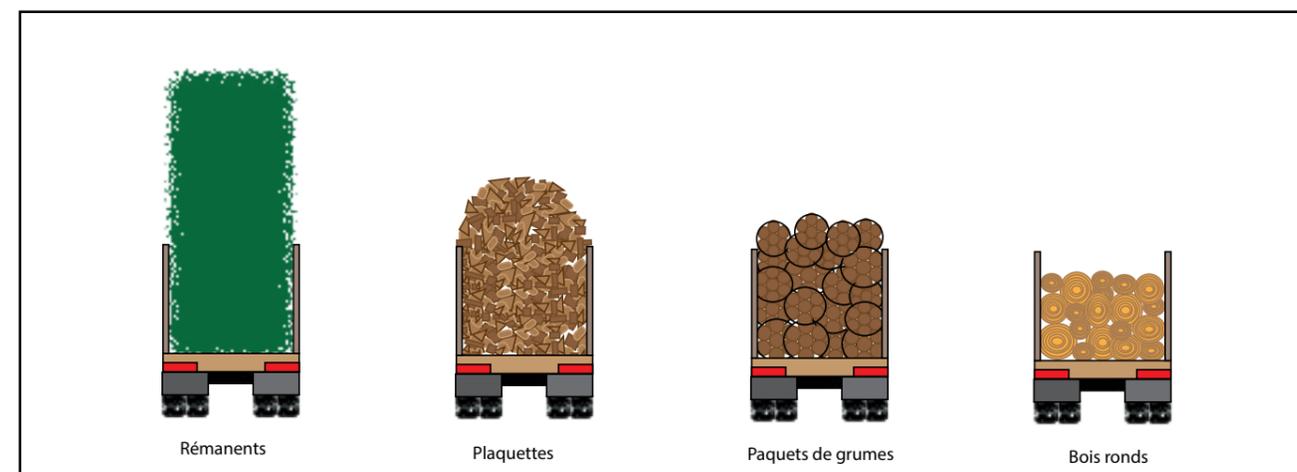
Au cours de la période de juin à août, le directeur du «Holzkreislauf Liechtenstein», en collaboration avec les forestiers de triage, inspecte toutes les piles de bois-énergie, les évalue et les enregistre dans le logiciel de gestion des piles de grumes. Cette méthode garantit un tri en bonne et due forme du bois dans les catégories: bois-énergie rond et parties de couronne.

Chaque pile de grume est subdivisée en:

- bois-énergie rond d'une part, et parties de couronne d'autre part
- Proportion de feuillus et de résineux (par tranche de 10%)
- Volume de la pile

Dans certains cas, au début du processus, il a fallu déclasser des piles individuelles de bois-énergie contenant une trop forte proportion de parties de couronne. La perte de valeur incite l'exploitant forestier à optimiser le processus. Cette chaîne et cette organisation logistiques permettent d'économiser sur le stockage des plaquettes de bois et les entrepôts nécessaires, à l'exception des conteneurs. Les meilleures qualités de bois-énergie, comme les grumes de hêtre, continuent d'être utilisées pour la production de bûches et sont vendues comme bois-énergie, soit à l'état brut (grumes), soit à l'état transformé.

Au-delà de la période de «rodage», la coordination du cycle du bois est une procédure relativement peu lourde. De plus, les exploitations forestières et les entreprises de déchetage sont délestées d'une grande partie du fardeau organisationnel et administratif (Kofler, 2015).



Comparaison du volume de transport nécessaire des différentes formes de bois-énergie pour un même pouvoir calorifique.

CONTRÔLE QUALITÉ

L'évaluation de la qualité des plaquettes de bois sans instruments de laboratoire exige une grande expérience. Il existe toutefois des outils et des astuces qui permettent d'estimer grossièrement la qualité des plaquettes de bois à moindres frais.

Une méthode détaillée d'autosurveillance de la qualité des plaquettes de bois est décrite dans le «Manuel pour la gestion de la qualité des plaquettes de bois décheté» [Handbuch zum Qualitätsmanagement von Holzhackschnitzeln] (FNR et BBE, 2017).

Mesure du taux d'humidité

Une large panoplie d'instruments de mesure sont disponibles sur le marché pour un calcul rapide du taux d'humidité.

Pour une mesure précise du taux d'humidité, il est recommandé de procéder au séchage au four.

Séchage au four à 102 °C

1. Mesurer le poids humide de l'échantillon de plaquettes de bois, si possible au gramme près
2. Chauffer le four et placer l'échantillon de bois dans le four en assurant une répartition homogène.
3. Après environ 3 heures, retirer l'échantillon de plaquettes de bois et mesurer son poids
4. Répéter les mesures environ toutes les heures jusqu'à la stabilisation du poids
5. Mesurer le poids stabilisé (absolument sec = atro)
6. Détermination du taux d'humidité M de l'échantillon de plaquettes de bois: $M [\%] = (\text{poids humide} - \text{poids atro}) / \text{poids humide} \times 100$

Test d'inflammabilité

Le test d'inflammabilité est une méthode parmi d'autre pour déterminer le taux d'humidité: tenir une plaquette de bois d'environ 45 mm de long au cœur d'une flamme (briquet ou bougie) Si le bois noircit, mais ne brûle pas, le taux d'humidité est supérieur à 40%. Si la plaquette de bois s'enflamme et continue à brûler d'elle-même pendant une courte période, le taux d'humidité est inférieur à 35%.

Mesure de granulométrie

Un tamis d'analyse avec des trous d'une taille inférieure à 3,15 mm (matière fine selon EN ISO 17225-4) peut être utilisé pour calculer la fraction fine. Les plaquettes de bois sont secouées pendant quelques minutes sur le tamis jusqu'à ce que la matière fine soit filtrée et que le gros du matériau («fraction principale») restent dans le tamis.

Procédé grossier d'estimation de la fraction fine

Secouer les plaquettes de bois dans un récipient transparent (p. ex. sac en plastique ou gobelet gradué) jusqu'à ce que la matière fine se dépose au fond. Estimer la fraction fine par rapport à l'échantillon total.

Les surlongueurs peuvent être triées et mesurées à l'aide d'une règle. Il convient de choisir le morceau de plaquette de bois le plus long (longueur max.). Il est possible de peser la matière fine, la fraction principale et les surlongueurs, et de déterminer leurs pourcentages respectifs par rapport à l'échantillon total.



Séchage au four.

Taux d'humidité

Taux d'humidité élevé (M > 40%)

- Test d'inflammabilité négatif
- Les matières fines adhèrent bien à la main
- Odeur de moisi, d'humidité de moisissure
- Condensation dans le sac en plastique

Taux d'humidité faible (M < 30%)

- Test d'inflammabilité positif
- Circulation de poussières de matière fine
- Odeur neutre
- La matière fine adhère au sac en plastique par attraction électrostatique

Matières étrangères

Inspection des matières étrangères contenues dans l'échantillon de plaquettes

Signes de moisissure

- Couches de moisissures blanchâtres
- Odeur moisie et putride dans le tas de plaquettes
- Formation de couches denses et friables de mycélium fongique
- Lignes de transition noires sur les plaquettes de bois
- Zones brun foncé avec formation d'humus et décomposition
- Développement de myxomycètes: masse visqueuse, brune ou translucide

Forme des particules

Plaquettes à vives arêtes (arêtes nettes et droites)

Déchetage efficace avec couteaux tranchants

Plaquettes déchirées ou effilochées, brisures de bois avec arêtes non nettes / sans arêtes visibles

Déchetage inapproprié avec couteaux émoussés ou une déchiqueteuse mal aiguisée



Les différents composants d'un échantillon de plaquettes.



Résumé

Elber U. (Vision Engineering GmbH): Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald. Rapport final. OFEN, Berne. 2007.

Lutz G. & Keel A. (Energie & Holz GmbH): Avant-projet «Amélioration de la qualité des plaquettes de bois». Rapport final. OFEN, Berne. 2015.

Classification des plaquettes de bois

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) et Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE): Handbuch zum Qualitätsmanagement von Holzhackschnitzeln. Gülzow-Prüzen et Bonn. 2017.

Energie-Bois Suisse: Classification du bois-énergie. Fiche d'information n° 407. État: avril 2015.

Lutz G. (Energie-Bois Suisse): Schnitzelqualität als Erfolgsfaktor. Présentation lors du séminaire spécialisé IPE 2014, Egnach. 2014.

Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Straubing et Freising-Weihenstephan. 2015.

Critères d'exigence des chauffages à plaquettes

Hinterreiter S.: Bestimmung und Einflussgrößen der Brückenbildung bei der Lagerentnahme von biogenen Festbrennstoffen. Thèse de doctorat, Université technique de Munich, 2010.

Lutz G. (Energie-Bois Suisse): Amélioration de la qualité des plaquettes. Première partie: Rapport intermédiaire «Erarbeitung der noch fehlenden Grundlagen». Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. 2017.

Lutz G. & Keel A. (Energie & Holz GmbH): Avant-projet «Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln». Rapport final. OFEN, Berne. 2015.

Ropp J. Émissions de particules fines lors de la combustion de plaquettes forestières. Étude de l'influence des taux d'humidité et de fines pour Énergie Bois Suisse. Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-Bains. 2017.

Préséchage à l'état non déchiqueté

Elber U. (Vision Engineering GmbH): Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald. Rapport final. OFEN, Berne. 2007.

Energie-Bois Suisse: bulletin n° 55 – octobre 2014. Qualité des combustibles bois. Zurich, 2014

Transformation du bois-énergie en plaquettes de bois

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF (Agence régionale bavaroise pour la forêt et la sylviculture): Préparation de Waldhackschnitzeln. Notice n° 10, LWF, Freising. 2012.

Flury S.: Anfall und Verwendung von Schlagabraum in der Schweiz. Rapport. OFEV, Ittigen. 2013.

Energie-Bois Suisse: Préparation rationnelle des plaquettes de bois pour exploitations forestières. Fiche d'information n° 409 – 2013/11 – 2000. 2013.

Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Straubing et Freising-Weihenstephan. 2015.

Principes de base du stockage des plaquettes de bois

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Hackschnitzel richtig lagern! Notice n° 11, LWF, Freising. 2014.

Biomasseverband Oberösterreich: Fiche d'information: Hackgutrocknung. Non datée.

Stockage des plaquettes de bois en plein air

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Hackschnitzel richtig lagern! Notice n° 11, LWF, Freising. 2014.

Bayerische Staatsforsten AöR: Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschnitzeln. Ratisbonne. Non daté.

Burger F.: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft / Firma Polyfelt AG. Hackschnitzel-Trocknungsversuch Wadlhausen. 2004.

C.A.R.M.E.N: Richtiges Lagern von Holzhackschnitzeln für Heizwerke: Vermeidung von Bränden durch Selbstentzündung. Notice 01/07. C.A.R.M.E.N e.V., Straubing, 2007.

Stockage des plaquettes de bois en entrepôt couvert

Lutz G. & Keel A. (Energie & Holz GmbH): Avant-projet «Amélioration de la qualité des plaquettes de bois». Rapport final. OFEN, Berne. 2015.

Lutz G. (Energie-Bois Suisse): Abklärungen für einen möglichen Holzumschlagplatz in der Gemeinde Bauma. Rapport final. Pro Zürcher Berggebiet (PZB), Bauma. 2017.

Ritter A.: Verbesserung des Heizwertes durch Optimierung der Bereitstellung von Holzschnitzeln. Mémoire de semestre. Haute école zurichoise des sciences appliquées, Wädenswil. 2009.

Séchage des plaquettes par procédé technique

C.A.R.M.E.N: Trocknung von Energieholz und Getreide mit Biogas-Wärme. C.A.R.M.E.N e.V., Straubing, 2014.

Moser B. (ZM-Technik für Holz AG): Schnitzelaufbereitung und Trocknung: Beispiele aus Sägereien und Biogasanlagen. in: Actes du 8^e du colloque Bois-énergie de Bienne. 2015.

Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Straubing et Freising-Weihenstephan. 2015.

Tamisage des matières fines

Lutz G. & Keel A. (Energie & Holz GmbH): Avant-projet «Amélioration de la qualité des plaquettes de bois». Rapport final. OFEN, Berne. 2015.

Perte de substance lors du séchage naturel

Ahrens F.: Qualitätssicherung bei der Hackschnitzeltrocknung. Présentation, 3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012.

Bärwolff M. & Hering T.: Fremdenergiefreie Trocknungsvarianten für Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 2011.

Lutz G. & Keel A. (Energie & Holz GmbH): Avant-projet «Amélioration de la qualité des plaquettes de bois». Rapport final. OFEN, Berne. 2015.

Logistique régionale du bois-énergie

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Préparation de Waldhackschnitzeln. Notice n° 10, LWF, Freising. 2012.

Energie-Bois Suisse: Préparation rationnelle des plaquettes de

bois pour exploitations forestières. Fiche d'information n° 409 – 2013/11 – 2000. 2013.

Höner G., Hackschnitzel: Harte Hölzer heizen besser. In: top agrar 7/2006, Münster. 2006.

Kofler S., forestiers de la communauté forestière de Gamprin-Ruggell-Schellenberg et coordinateur Bois-énergie auprès de Holzkreislauf Liechtenstein: communiqué oral à l'occasion de la visite du site de Gamprin-Bendern. 2015.

Contrôle qualité

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) et Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE): Handbuch zum Qualitätsmanagement von Holzhackschnitzeln. Gülzow-Prüzen et Bonn. 2017.

Krämer G. (Institut für Brennholztechnik IBT-Krämer): Directive IBT «Définie Hackschnitzel». Spécification, Prufung und Deklaration von Hackschnitzeln für stoffliche und energetische Zwecke. 2015.

Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Straubing et Freising-Weihenstephan. 2015.

Proposition de classification des plaquettes de bois

Sur la base de QM Chauffages au bois la classification suivante pour les plaquettes de bois est proposé pour une fonctionnement à faibles émissions et à maintenance réduite :

	Plaquettes de bois de qualité	Plaquettes de bois sèches	Plaquettes forstières préséchées 100% BE	Plaquettes forstières / Mélange de fraîche coupe 50 % BE 50% plaquettes issues de l'exploitation forestières	Plaquettes forstières 100 % plaquettes issues de l'exploitation forestières	Plaquettes de bois issue de Bois d'entretien des paysages	Plaquettes d'écorce
Description	issues de bois-énergie rond, séchées et tamisées	issues de bois-énergie rond et d'une faible proportion de matériau issu de l'exploitation forestière	issues de bois-énergie rond, préséchées et non déchiquetées	issues de bois-énergie rond et de l'exploitation forestière, non ou à peine préséchées	issues de l'exploitation forestière, non préséchées	Résidu de coupe d'arbustes et de branches, proportion élevée d'aiguilles et de feuilles	Écorce broyée ou déchiquetée
Taux d'humidité	M20, 15 à 20%	M30, 15 à 30%	M50, 30 à 50%	M50, 30 à 50%	M55+, 30 à 60%	M55+, 30 à 60%	M65+, 30 à 65+%
Désignation	séché	sec	humide	humide	mouillé	mouillé	mouillé
Aptitude au stockage	très bonne	très bonne	limitée	limitée	médiocre	médiocre	médiocre
Granulométrie	P16S: Plaquettes de qualité, fines P31S: Plaquettes de qualité, grossières	P31S	P31S	P31, P45	P31, P45, P63	P45, P63	P45, P63
Fraction fine (< 3, 15 mm) * Teneurs en aiguilles et en feuilles incluses	tamisé F05; < 5% F10; < 10%	tamisé F05; < 5% ou F10; < 10%	F10; < 10%	F25*; < 25%	F25*; < 25%	F25*; < 25%	F5; < 5%
Teneur en cendres avec % de matières étrangères	< 1%	< 3%	< 3%	< 5%	< 10%	< 10%	< 10%
Pouvoir calorifique [kWh/m³ en vrac]	BD: 950 à 1100 BT: 650 à 750	BD: 900 à 1050 BT: 600 à 700	BD: 800 à 1000 BT: 500 à 700	BD: 700 à 900 BT: 450 à 600	BD: 600 à 800 BT: 400 à 550	BD: 600 à 800 BT: 400 à 550	350 à 600
Chauffages	Foyers de petites dimensions, appareils de série, foyers à poussée inférieure et foyers à grille fixe	Foyers à poussée inférieure et foyers à grille d'avancement	Foyers à poussée inférieure et foyers à grille d'avancement	Foyers à grille d'avancement	Foyers à grille d'avancement	Foyers à grille d'avancement	Foyers à grille d'avancement
Plage de puissances	20 à 200 kW	> 200 kW	> 200 kW	> 200 kW pour P31 > 1000 kW pour P45	> 200 kW pour P31 > 1000 kW pour P45 > 3000 kW pour P63	> 1000 kW pour P45 > 3000 kW pour P63	> 1000 kW pour P45 > 3000 kW pour P63

sDéfinition

BE = Bois-énergie rond Assortiment composé exclusivement de grumes ébranchés et écimés, et exempts de sous-produits de la récolte du bois ou des soins sylvicoles

Plaquettes issues de l'exploitation forestière Couronnes, arbres entiers avec diamètre à hauteur de poitrine à partir de 7 cm, rémanents de coupe, branches

BD = bois dur – BT = bois tendre