



Auto-échauffement et dégradation des empilements de résidus de bois dans l'industrie des panneaux

Rapport de stage

Pascal Houde

Alain Cloutier, superviseur
Rosilei Garcia, superviseure

Mars 2024

Résumé

La montée en température dans les empilements de résidus de bois peut entraîner la dégradation de la matière première et la combustion spontanée, ce qui se traduit par des pertes économiques pour les entreprises en raison de la perte de matériaux ainsi que par des risques pour la sécurité des travailleuses et travailleurs des usines de panneaux. Ce rapport présente une revue de littérature sur les principaux facteurs qui influencent la montée en température dans les empilements de résidus de bois pour la fabrication de panneaux et pour la biomasse. L'impact des conditions et de la durée d'entreposage des résidus de bois en empilements pour la fabrication de panneaux est présenté. Une attention particulière est portée à un modèle mathématique permettant de prédire la montée en température dans les empilements de résidus de bois. Les facteurs qui influencent la montée en température dans les empilements sont la teneur en humidité des résidus, la température de l'air ambiant, la présence d'écorce, la granulométrie des résidus, la compaction de l'empilement, la présence de matières autres que le bois (feuilles, épines, poussière, métaux), les essences présentes dans l'empilement et l'origine des résidus de bois (racines, branches, tronc). Les propriétés physiques et mécaniques des panneaux composites à base de bois semblent diminuer avec le temps, sauf si l'empilement est de petite taille. Il est recommandé de réduire la hauteur des empilements pour limiter ces effets.

REMERCIEMENTS

Ce projet a bénéficié du soutien financier des partenaires suivants :


Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), Conseil de l'industrie forestière du Québec (CIFQ), ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF), FPIInnovations, SACOPAN Arbec - Division Panneaux OSB Shawinigan, Tafisa Canada, Uniboard Canada

COORDONNÉES DE L'AUTEUR

Pascal Houde
pascal.houde.4@ulaval.ca
+1 581 688-1826

NOUS JOINDRE

+1 418 656-2131, poste 417970
www.corepanbois.ffqg.ulaval.ca

Suivez-nous! 

Abstract

The heating-up in large piles of wood residues can lead to raw material degradation and spontaneous combustion, resulting in economic losses for the wood-based panel industry due to material loss, as well as safety risks for workers in panel plants. This report presents a literature review on the main factors influencing self-heating in large wood residue piles stored for panel manufacturing or biomass storage. The impact of conditions and the length of time wood residues are stored in piles for panel manufacture is presented. Particular attention is paid to a mathematical model for predicting temperature rise in wood residue piles. The main factors influencing the heating-up in piles are residue moisture content, ambient air temperature, presence of bark, residue granulometry, pile compaction, presence of non-wood materials (leaves, needles from evergreens, dust, metals), type of wood species in the pile, and origin of wood residues (roots, branches, stem). The physical and mechanical properties of wood-based panels seem to decrease over time unless the pile is small. Reduced pile heights are recommended to limit these effects.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	v
Introduction	1
Chapitre 1 Revue de littérature	2
1.1 Phénomène d'auto-échauffement	2
1.2 Dégradation de la matière première	5
1.3 Méthodes d'échantillonnage et mesure des paramètres.....	6
Technique des sacs échantillons.....	6
Mesure de la teneur en humidité	7
1.4 Effet du temps d'entreposage des résidus de bois sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux	8
1.5 Modèle mathématique	9
Essai de stockage à chaud	9
Essai respirométrique.....	11
Essai à grande échelle	11
Équations du modèle	11
Résultats du modèle mathématique	18
Conclusions	20
Bibliographie	21
Annexe A Valeurs des coefficients et paramètres utilisés par Ferrero et al. (2009) dans la modélisation de la montée en température pour les deux empilements	23

Liste des figures

Figure 1. Présence d'auto-échauffement dans un empilement de biomasse à de faibles températures (Tiré de Helmeste et al., 2021).....	2
Figure 2. Emplacement des échantillons dans l'empilement avec la technique des sacs-échantillons (Tiré de Jylhä et al., 2022).....	7
Figure 3. Empilement utilisé pour la fabrication de HDF (A) au début et (B) à la fin de l'étude (Tiré de Ergül et Ayırlımış, 2014).....	9
Figure 4. Courbes d'essais de stockage à chaud possibles (DIN EN 15188 :2021).....	10
Figure 5. (a) Relation entre la température d'auto-inflammation et le ratio V/A. (b) Extrapolation du temps d'introduction à l'auto-inflammation en fonction du ratio V/A du pin (Tiré de Ferrero et al., 2009).....	11
Figure 6. Montée en température prévue par le modèle et montée en température réelle pour deux empilements. (a) Empilement 1 : 6 m x 15 m x 20 m (hauteur x longueur x largeur); (b) Empilement 2 : 5 m x 20 m x 15 m (hauteur x longueur x largeur) (Adaptée de Ferrero et al., 2009).	18
Figure 7. Modélisation de la montée en température au sein d'un empilement (Tiré de Ferrero et al., 2009).	19

Introduction

L'entreposage de la matière première pour la fabrication de panneaux composites à base de bois entraîne des dégradations de la matière et éventuellement une réduction des propriétés physiques et mécaniques des panneaux. Les méthodes d'entreposage des résidus de bois en grands empilements font en sorte qu'un phénomène d'auto-échauffement des résidus de bois est courant dans la cour à bois des usines. La hausse de la demande en panneaux de bois et en biomasse fait également en sorte que les quantités de copeaux présents dans les cours à bois tendront à augmenter dans les prochaines années, ce qui peut représenter une augmentation des risques de combustion spontanée des empilements de résidus de bois destinés à la fabrication des panneaux. En effet, selon une revue de littérature du Centre canadien sur la fibre de bois (Helmeste et al., 2021), la tendance des incidents de combustion spontanée dans les empilements de copeaux pour la biomasse est en augmentation et continuera à augmenter dans les prochaines années.

Puisque les résidus de bois ont une surface de contact plus grande avec l'air ambiant, ils se dégradent plus rapidement que le bois entreposé sous forme de billes (Anerud et al., 2020; Jylhä et al., 2022). Ceci entraîne une perte rapide de masse et une réduction de la qualité de la matière première, ce qui peut avoir un impact négatif sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux.

Malheureusement, très peu d'études ont été menées sur l'effet du temps et des méthodes d'entreposage des résidus de bois sur les propriétés technologiques des panneaux composites à base de bois (Schäfer et Roffael, 1997; Ergül et Ayrilmis, 2014). Ce rapport présente une revue de littérature sur (1) le phénomène d'auto-échauffement dans les empilements de résidus de bois, (2) les principaux paramètres qui influencent la dégradation de ces résidus, (3) l'effet du temps et des conditions d'entreposage des empilements sur les propriétés des panneaux et (4) la méthodologie utilisée pour la modélisation mathématique de la montée en température dans les empilements.

Chapitre 1 Revue de littérature

1.1 Phénomène d'auto-échauffement

Bien que le comportement d'auto-échauffement est parfois imprévisible en raison des nombreux facteurs qui l'influencent et de l'interaction entre ces facteurs, il évolue souvent de la même façon : la montée en température initiale provient de la respiration des parenchymes du bois d'aubier et des cellules cambiales toujours vivantes, ce qui rend le milieu propice au développement de bactéries et de champignons (Ergül et Ayırmis, 2014). Les microorganismes se nourrissent des glucides présents dans le bois et produisent une grande quantité de chaleur qui s'accumule au sein de l'empilement. Cela peut faire augmenter la température en seulement quelques jours à plus de 60 °C. Si le taux de production de chaleur dans l'empilement est plus élevé que le taux de dissipation de la chaleur dans l'air ambiant, il y aura une montée en température et éventuellement une combustion spontanée. Une fois que les glucides ont été entièrement consommés, la température baisse et se stabilise puisque les microorganismes meurent (Ferrero et al., 2009). La température dans l'empilement augmentera quand la température ambiante de l'air augmente (Anerud et al., 2020) et à la suite de fortes précipitations (Anerud et Eriksson, 2021). Bien que la température baisse et se stabilise après quelques semaines, la perte de masse ainsi que les risques de combustion spontanée ne diminuent pas dans les vieux empilements et la température de l'empilement peut être élevée même si la température de l'air est faible (voir Figure 1) (Sampson et McBeath, 1987; Chaves et al., 2020; Helmeste et al., 2021).



Figure 1. Présence d'auto-échauffement dans un empilement de biomasse à de faibles températures (Tiré de Helmeste et al., 2021).

La température est variable selon la position dans l'empilement. Les températures maximales sont observées au haut des empilements qui n'ont pas subi de compactage alors qu'elles sont plutôt situées au centre des empilements compactés (Wästerlund et al., 2017). Des températures plus faibles sont aussi observables dans les parties externes des empilements, ce qui indique que la perte de chaleur a lieu à la surface des empilements. Le bois est un matériau qui a une faible conductivité thermique, ce qui explique qu'il y a auto-échauffement dans les empilements: la totalité de l'empilement produit de la chaleur mais celle-ci est seulement transférée à l'air par les parties externes de l'empilement (Ferrero et al., 2009).

Le phénomène d'auto-échauffement est donc affecté par la géométrie de l'empilement ainsi que ses dimensions. Si le volume de l'empilement est élevé par rapport à sa surface en contact avec l'air, la chaleur produite ne pourra pas être transférée à l'air et cette accumulation de chaleur fera augmenter la température interne de l'empilement, possiblement jusqu'à la combustion spontanée. De plus, plus le rapport entre le volume et la surface de contact de l'empilement avec l'air est grand, moins la température ambiante a besoin d'être élevée pour déclencher la combustion spontanée (Ferrero et al., 2009).

La circulation d'air dans l'empilement est un facteur important pour réduire l'auto-échauffement et les risques d'incendie par combustion spontanée. Une bonne circulation d'air dans l'empilement a pour effet d'extraire l'air chaud accumulé et de réduire la température interne. Celle-ci est fonction de la taille des particules et des empilements. Un empilement qui contient de grandes proportions de particules fines est plus compact et la circulation d'air y est plus faible (Jylhä et al., 2022). Les gros empilements sont aussi plus compacts. Les empilements hauts et compactés ont tendance à avoir une circulation d'air faible et à retenir la chaleur. Ils engendrent des températures au-dessus de 60 °C tandis que les empilements plus petits voient rarement leur température dépasser les 40 °C car la circulation d'air est suffisante pour dissiper la chaleur (Ergül et Ayırlımıs, 2014).

En effet, dans les empilements de grandes dimensions, la température maximale semble être plus élevée que dans les empilements de petites dimensions. Dans une publication du Centre canadien sur la fibre de bois (Helmešte et al., 2021), on rapporte une température de 64,9 °C dans un empilement de bois et 58,4 °C dans un empilement d'écorce. Dans l'étude de Ergül et Ayırlımıs (2014), de gros empilements dont les dimensions ne sont pas spécifiées dans l'article, ont atteint une température de 65 °C en 14 jours. Dans l'étude de Jylhä et al. (2022), les empilements de 3,5 m de hauteur ont atteint des températures maximales entre 29 °C et 35 °C en 4 à 7 jours. Dans l'étude de Chaves et al. (2020), les gros empilements de résidus de bois d'olivier d'une masse de plus de

800 tonnes ont atteint 80 °C alors que les petits empilements de moins de 800 tonnes n'ont pas dépassé 60 °C. Dans l'étude de Wästerlund et al. (2017), il a été observé qu'après une semaine, la température dans tous les empilements (empilements de 22-27 m de long, 9-12 m de large et 4,1-4,2 m de haut) avait atteint 65 °C. Dans l'étude de Anerud et Eriksson (2021), un empilement de copeaux de bois de 5,5 m de hauteur, 12 m de largeur et 45 m de longueur a atteint une température maximale de 145 °C dans les 30 premiers jours.

Les empilements qui ont de petites particules subissent une augmentation de température importante jusqu'à environ 70 °C alors que les empilements composés de particules plus grossières dépassent rarement 45 °C (Chaves et al., 2020). Dans l'étude d'Anerud et al. (2020), les empilements de 5 m de haut ont atteint des températures entre 40°C et 65°C, dépendant du type de biomasse entreposé. Les températures les moins élevées ont été mesurées dans les empilements de bois de tiges et les plus hautes dans les empilements de résidus forestiers et de branches.

Dans les empilements de résidus de bois, une température de 65 °C est suffisante pour que les groupements acétyles attachés à la cellulose soient séparés de la chaîne pour former des acides acétiques, qui contribuent à la dégradation du bois (Ergül et Ayrilmis, 2014). De plus, la fermentation et l'activité microbienne entraînent une montée en température qui accélère la vitesse des réactions responsables de la dégradation (Ferrero et al., 2009; Ergül et Ayrilmis, 2014).

Un autre facteur qui influence la montée en température des empilements de biomasse forestière et de résidus de bois est leur composition, ce qui explique en partie les différences de température dans les empilements des études mentionnées ci-haut. Une proportion de feuilles et d'épines élevée, la présence d'écorce et la présence de matières autres que les résidus de bois (poussières, métaux, adhésif, etc.) augmentent la production de chaleur dans l'empilement. Des différences dans la composition du bois de feuillus et du bois de résineux font aussi en sorte que les empilements de résidus de bois de feuillus pourraient atteindre des températures plus élevées que celles des empilements de bois de résineux. En effet, le bois de feuillu contient des concentrations d'acide acétique et de pentose plus élevées que le bois de résineux, ce qui est favorable à l'activité bactérienne. Les feuilles, les épines et l'écorce sont des matières qui contiennent des proportions élevées de glucides qui servent de ressource à la respiration des microorganismes, ce qui augmente la production de chaleur et la vitesse de dégradation du bois (Chaves et al., 2020).

Il y a en fait trois sources qui contribuent à la production de chaleur au sein des empilements de résidus de bois : la source physique qui dépend des processus de condensation/adsorption, la source chimique qui dépend du processus d'oxydation et la source biologique qui dépend de la respiration

cellulaire des microorganismes en milieu aérobie. Parmi ces sources de chaleur, l'activité microbienne est celle qui contribue le plus à la montée en température. Cette dernière est cependant dépendante de la quantité de sucre et de la teneur en humidité du bois. Lorsqu'il n'y a plus de sucre à consommer, les microorganismes meurent, ce qui entraîne une baisse de température (Ferrero et al., 2009).

La teneur en humidité est le facteur ayant le plus d'influence sur le développement des microorganismes au sein de l'empilement de résidus de bois. Une teneur en humidité supérieure à 20 % est propice au développement de bactéries et par le fait même à la production de chaleur dans l'empilement. Les particules de faibles dimensions et le compactage sont favorables à la rétention de l'humidité dans l'empilement (Chaves et al., 2020).

1.2 Dégradation de la matière première

Dans la littérature, plusieurs articles se penchent sur l'entreposage de biomasse car celle-ci est de plus en plus utilisée pour la production d'énergie en Europe et ailleurs dans le monde. Ces articles quantifient souvent la perte de masse anhydre « *dry matter loss* » en mesurant la masse anhydre au début et à la fin des études, la teneur en humidité des résidus dans l'empilement sur la période de l'étude, la granulométrie des résidus, la température dans l'empilement sur la période de l'étude, la proportion de cendres et parfois le pH des résidus dans l'empilement. Certains paramètres sont identifiés comme pouvant limiter ou provoquer la dégradation. La température ainsi que la teneur en humidité des résidus, la granulométrie des résidus, la fraction facilement biodégradable de l'empilement, la géométrie de l'empilement, le compactage, les espèces qui composent l'empilement et le temps d'entreposage sont des paramètres qui exercent une influence sur la vitesse et le niveau de dégradation des résidus de bois qui sont entreposés en empilements (Garstang et al., 2002; Chaves et al. 2020).

Même à des températures relativement basses, le bois se dégrade. La température de 65 °C est identifiée comme étant celle à laquelle le bois commence à se dégrader s'il est exposé à cette température pendant une très longue durée (3 ans) (Dietenberger et Hasburgh, 2016). Cependant, la durée d'exposition des empilements de résidus de bois à ces températures n'est pas aussi longue dans l'industrie québécoise. Dans les empilements de résidus forestiers ayant une température entre 60 °C et 75 °C, une réaction chimique a lieu lors de laquelle le lien entre le groupement acétylé de la cellulose est scindé (Fuller, 1985). Ceci produit de l'acide acétique et de la chaleur, ce qui contribue ensuite à accélérer la vitesse de la réaction.

Une température propice au développement des microorganismes peut très bien accélérer les processus de décomposition. Comme expliqué plus haut, la respiration des parenchymes des résidus de bois a comme effet de produire de la chaleur en quantité suffisante pour que les microorganismes puissent ensuite se développer et, à leur tour, produire de la chaleur par respiration qui est suffisante pour maintenir des températures propices à leur survie.

1.3 Méthodes d'échantillonnage et mesure des paramètres

Technique des sacs échantillons

Plusieurs études ont tenté d'évaluer l'impact du temps sur la dégradation des résidus de bois sous différentes conditions d'entreposage. Pour se faire, les chercheurs utilisent souvent la technique des sacs échantillons « *balance bags* » (Wästerlund et al. 2017; Anerud et al. 2020; Chaves et al. 2020; Jylhä et al. 2022). Celle-ci consiste en ce qui suit. Lors de la formation de l'empilement, des échantillons sont récoltés à plusieurs niveaux. Ces échantillons sont séparés en deux sous-échantillons. L'un des deux sous-échantillons est placé dans un sac étanche et congelé jusqu'à la fin de l'étude afin de servir de témoin et l'autre échantillon est placé dans un sac de plastique en toile avec de petites perforations et remis au même endroit dans l'empilement puis recouvert lors de la formation de l'empilement. À la fin de l'étude, les sacs échantillons sont retirés de l'empilement, certains paramètres sont mesurés (teneur en humidité, teneur en cendres, perte de masse, acidité, contenu énergétique) et les données sont comparées aux paramètres des sacs congelés qui étaient situés au même endroit dans l'empilement au début de l'étude.

La teneur en humidité moyenne des résidus de bois est mesurée en pesant les résidus avant et après séchage. Leur masse anhydre est comparée avec celle des échantillons qui ont été congelés pour déterminer la perte de matière et la teneur en cendre est mesurée (surtout dans le cas des empilements de biomasse). Bien que cette méthode semble intuitive, elle a fait l'objet de critiques en raison de la faible représentativité des échantillons. Le sac pourrait aussi avoir l'effet de créer un environnement anaérobie qui n'est pas propice au développement de microorganismes, une condition importante à la dégradation de la matière (Jylhä et al., 2022), alors que les conditions sont aérobies dans un empilement qui n'a pas été compacté. La Figure 2 permet de visualiser l'emplacement possible des sacs dans l'empilement.

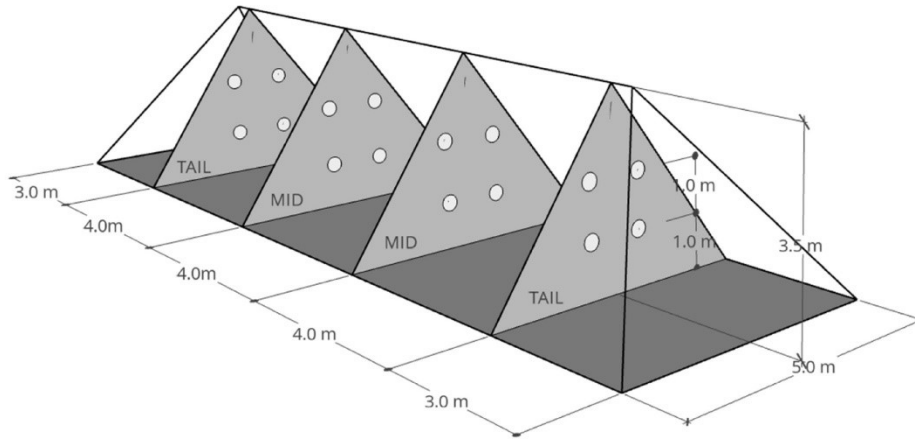


Figure 2. Emplacement des échantillons dans l'empilement avec la technique des sacs-échantillons (Tiré de Jylhä et al., 2022).

Mesure de la teneur en humidité

Puisque la teneur en humidité des résidus exerce une influence importante sur la production de chaleur au sein d'un empilement, il serait important de mesurer celle-ci à l'arrivée des résidus afin d'avoir une idée des risques d'auto-échauffement. Une teneur en humidité qui se situe au-dessus de 20-25 % et en-dessous de 60 % sur base humide (c'est-à-dire 25-33 % et 150% respectivement sur base anhydre) est propice à l'activité bactérienne (Chaves et al., 2020; Jylhä et al., 2022). Si la teneur en humidité se situe dans cet intervalle, il serait important d'effectuer un contrôle de la température jusqu'à ce que celle-ci diminue et se stabilise. Il serait aussi prudent de mesurer la température à la suite de précipitations car elles ont pour effet de mouiller les empilements et il est possible d'observer une montée en température à la suite de celles-ci (Anerud et Eriksson, 2021).

Il est possible de mesurer la teneur en humidité en prélevant des échantillons à différents endroits dans l'empilement et en les faisant sécher tout en prenant soin de mesurer la masse humide (M_H) et la masse sèche (M_0) des résidus de bois. En notant à quels endroits les échantillons sont récoltés, ceci permet également d'identifier les zones à risque d'auto-échauffement. Il est ensuite possible de calculer la teneur en humidité sur base anhydre (H) avec l'Équation 1.

$$H = \frac{M_H - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

Une autre façon de mesurer la teneur en humidité de façon plus générale, c'est-à-dire dans l'empilement plutôt que dans les résidus, est le capteur d'humidité du sol tel qu'utilisé dans l'étude de Sampson et McBeath (1987). Le fait de placer des capteurs à plusieurs endroits dans l'empilement

permet la surveillance de la teneur en humidité de l'empilement en temps réel. Cependant, cette méthode est moins précise et elle implique de devoir retirer les capteurs avant d'amener les résidus à la chaîne de production.

1.4 Effet du temps d'entreposage des résidus de bois sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux

Selon l'étude de Ergül et Ayırlım (2014), la durée de l'entreposage des résidus de bois a un impact négatif sur plusieurs propriétés physiques et mécaniques des panneaux de fibres à haute densité (HDF). La durée d'entreposage des résidus semble ne pas avoir d'impact sur la densité finale des panneaux, mais l'augmentation de la durée d'entreposage entraîne une diminution du pH des résidus de bois, une augmentation des émissions de formaldéhyde dans les panneaux, une augmentation du gonflement des panneaux, une augmentation de l'absorption de surface des panneaux, une augmentation de la teneur en humidité dans l'empilement jusqu'à 45 jours (suivi de sa diminution), ainsi que des réductions du module de rupture, du module d'élasticité et de la cohésion interne des panneaux de l'ordre de 18 à 39 % par rapport à des panneaux fabriqués avec du matériel frais. Cependant, une autre étude réalisée par Schäfer et Roffael (1997) sur l'effet du temps d'entreposage des résidus de bois sur les propriétés physiques et mécaniques de panneaux de particules et de panneaux de fibres à densité moyenne (MDF) produits à partir de bois de pin et d'épinette n'a pas montré de différences significatives entre les panneaux fabriqués à partir de résidus frais et de résidus entreposés pendant plus de six mois (129 jours). Leurs résultats ont démontré des augmentations de la cohésion interne et de la résistance à la flexion et une diminution du gonflement des panneaux de particules de pin collés avec de l'urée-formaldéhyde. Dans tous les traitements, les émissions de formaldéhyde n'ont pas varié et les émissions d'acides volatils ont diminué en fonction du temps (Schäfer et Roffael, 1997). Les différences de résultats entre ces deux études sont probablement dues au fait que dans la première (Ergül et Ayırlım, 2014), l'empilement de résidus de bois était de plus grande taille que dans la deuxième (Schäfer et Roffael, 1997) et son état de dégradation après la période d'entreposage était visible (Figure 3). En effet, l'empilement avait un volume de seulement 40 m³ dans la deuxième étude, ce qui a sans doute limité la dégradation des résidus de bois. Cela démontre l'importance de réduire les dimensions des empilements si le temps d'entreposage des résidus de bois destinés à la fabrication de panneaux de bois est long.



Figure 3. Empilement utilisé pour la fabrication de HDF (A) au début et (B) à la fin de l'étude (Tiré de Ergül et Ayırlımıs, 2014).

1.5 Modèle mathématique

Il a été démontré par Ferrero et al. (2009) qu'il est possible de modéliser numériquement la montée en température des empilements de résidus de bois. Pour se faire, trois sources de chaleur ont été prises en compte. Il s'agit des processus physiques de condensation/adsorption et d'évaporation/désorption, des processus chimiques d'oxydation/combustion et des processus biologiques, c'est-à-dire, les réactions exothermiques dues à la respiration des microorganismes. Ces derniers sont la source la plus importante de production de chaleur au sein des empilements de résidus de bois (Ferrero et al., 2009). Dans le modèle, en se basant sur l'article d'Ernstson et Rasmuson (1993), il a été assumé qu'un transfert de chaleur par conduction et un mécanisme de transport par diffusion ont lieu dans l'empilement. La partie expérimentale comporte trois essais : essai de stockage à chaud, essai respirométrique et essai à grande échelle.

Essai de stockage à chaud

L'essai de stockage à chaud suit la norme EN 15188 (2020). Cette norme permet de déterminer la température d'auto-inflammation de poussières combustibles et de matériaux granulaires en fonction du volume. Pour ce faire, il faut amener quatre échantillons de volumes différents à leur température d'auto-inflammation ou « *temperature of self ignition* » (T_{SI}), c'est-à-dire, la température limite à laquelle l'échantillon semble vouloir s'enflammer mais ne prend pas feu. Deux des échantillons devraient avoir des volumes faibles et deux échantillons devraient avoir des volumes plus élevés selon un ratio recommandé de 1 : 1,7 : 5 : 8. Les échantillons sont placés un à la fois dans un four qui comporte une entrée et une sortie d'air et dont la température est maintenue constante.

À partir des données de T_{Si} , il est possible de tracer une courbe qui permet d'extrapoler la température d'ignition à des volumes plus gros. Ce test permet également de déterminer le temps d'induction à l'auto-inflammation (t_i) à température plus élevée que T_{Si} . Pour ce faire, il faut amener quatre échantillons (dont les dimensions sont les mêmes que pour la détermination de T_{Si}) à température plus élevée que T_{Si} , ce qui provoquera la combustion des échantillons. Sur la courbe qui décrit la température de l'échantillon dans le temps (Figure 4), il faut ensuite identifier le point où l'échantillon atteint la température du four et le point d'inflexion qui survient avant l'inflammation. La différence entre ces deux valeurs de temps représente t_i . Un graphique de la relation entre la température d'auto-inflammation et le ratio volume/surface (V/A) ainsi qu'un graphique d'extrapolation du temps d'induction à l'auto-inflammation par rapport au ratio V/A sont présentés par Ferrero et al. (2009) (Figure 5).

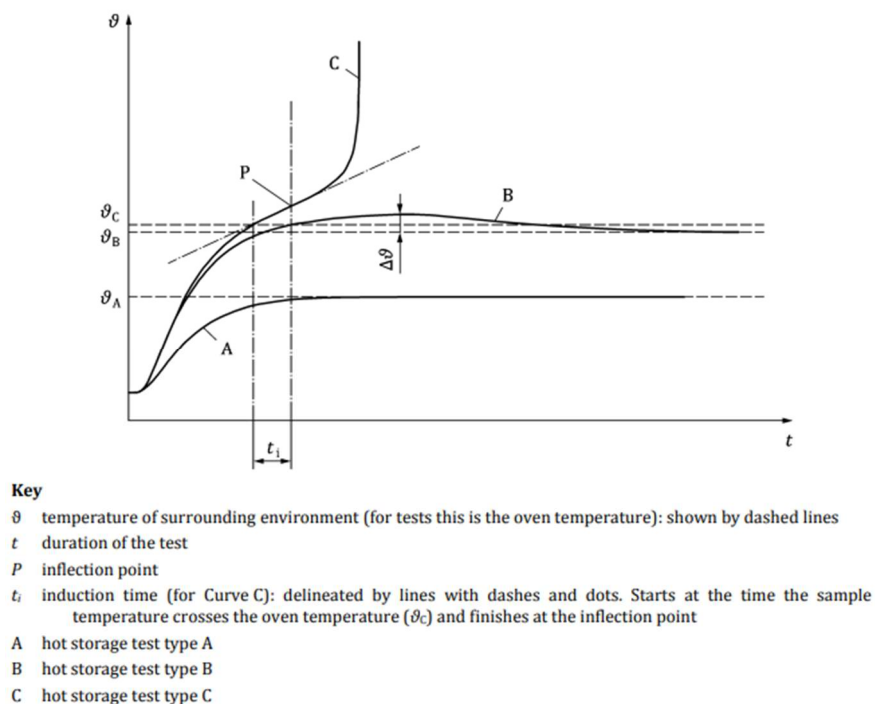


Figure 4. Courbes d'essais de stockage à chaud possibles (DIN EN 15188 :2021)

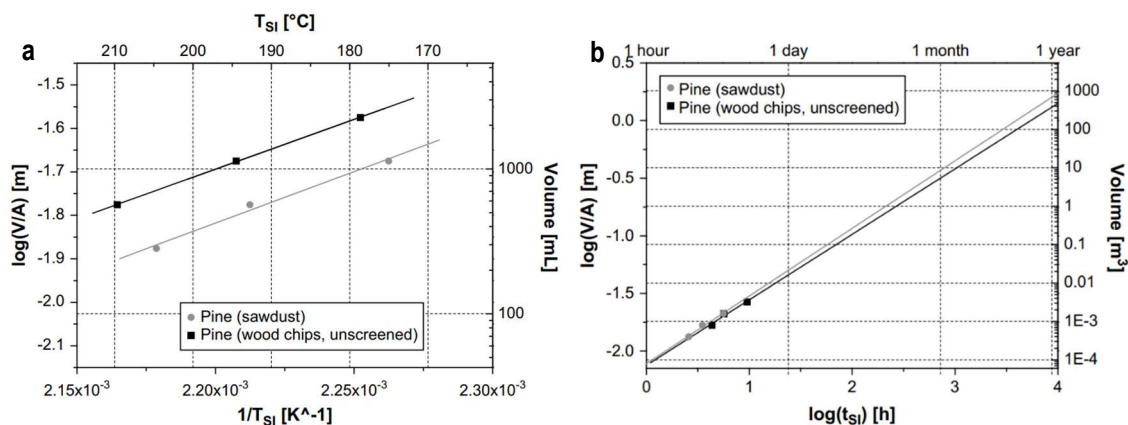


Figure 5. (a) Relation entre la température d'auto-inflammation et le ratio V/A. (b) Extrapolation du temps d'introduction à l'auto-inflammation en fonction du ratio V/A du pin (Tiré de Ferrero et al., 2009).

Essai respirométrique

L'essai respirométrique sert à estimer l'activité microbienne à échelle de laboratoire. Une modification du dispositif expérimental proposé par la norme ISO 14852 (1999) est faite afin de mesurer la quantité de gaz carbonique produit par les microorganismes qui décomposent le bois lors de la respiration. La quantité de gaz carbonique produit est liée à la consommation d'oxygène dans des conditions aérobiques. Différentes températures ont été testées afin de déterminer la relation entre la température et l'activité des microorganismes.

Essai à grande échelle

L'essai à grande échelle consiste à construire deux empilements et à mesurer la température à différents endroits pendant six mois afin de comparer les résultats du modèle aux résultats expérimentaux.

Équations du modèle

Les équations mathématiques suivantes sont tirées du modèle mathématique développé par Ferrero et al. (2009) pour prédire le comportement de la montée en température dans les empilements de résidus de bois. Certaines équations ont été adaptées dans ce rapport afin de maintenir une continuité dans les unités des taux de changement, ce qui n'avait pas toujours été fait dans l'article de Ferrero et al. (2009). Le modèle se base sur deux équations différentielles aux dérivées partielles (Équations 2 et 4) qui sont résolues par méthode numérique à l'aide du logiciel d'analyse par éléments finis COMSOL Multiphysics.

Transfert de chaleur

L'Équation 2, adaptée de Ferrero et al. (2009) (adaptée de Krause et al., 2005) permet de calculer le champ de température dans l'empilement.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T + S_T \quad (2)$$

Où ρ : masse volumique moyenne des résidus de bois (kg m^{-3})

c_p : capacité thermique massique du bois ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

λ : conductivité thermique du bois ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T : température dans l'empilement (K)

S_T : terme source de production de chaleur (W m^{-3})

Le terme S_T dépend des trois sources de chaleur considérées par Ferrero et al. (2009) (adaptée de Krause et al., 2005) : chimique, physique et microbiologique, comme le montre l'Équation 3. Toutes ces sources dépendent du temps.

$$S_T = S_{T_{\text{chem}}} + S_{T_{\text{phys}}} + S_{T_{\text{bio}}} \quad (3)$$

Où $S_{T_{\text{chem}}}$: chaleur produite par source chimique (W m^{-3})

$S_{T_{\text{phys}}}$: chaleur produite par source physique (W m^{-3})

$S_{T_{\text{bio}}}$: chaleur produite par source biologique (W m^{-3})

Transfert de masse

L'Équation 4 permet de calculer le champ de concentration des espèces chimiques gazeuses présentes au sein de l'empilement.

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = D_k \operatorname{div} \operatorname{grad} C_k + S_{C_k} \quad (4)$$

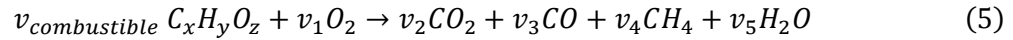
Où C_k : concentration du gaz k (kg m^{-3})

D_k : coefficient de diffusion du gaz k ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

S_{C_k} : taux de conversion du gaz k ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

k : combustible, oxygène, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, eau, vapeur d'eau, substrat facilement biodégradable, substrat difficilement biodégradable, biomasse

L'Équation 5 permet de calculer les coefficients stœchiométriques des réactifs et des produits de la combustion du bois (combustible ou comb). Elle est tirée de Ferrero et al. (2009) et adaptée de Schulze (2005). La méthode pour obtenir les coefficients stœchiométriques provient également de Schulze (2005) et n'est pas décrite dans Ferrero et al. (2009).



Où $v_{combustible}$ (-) : coefficient stœchiométrique du combustible
 v_1 (-) : coefficient stœchiométrique du dioxygène (O₂)
 v_2 (-) : coefficient stœchiométrique du dioxyde de carbone (CO₂)
 v_3 (-) : coefficient stœchiométrique du monoxyde de carbone (CO)
 v_4 (-) : coefficient stœchiométrique du méthane (CH₄)
 v_5 (-) : coefficient stœchiométrique de l'eau (H₂O)

Taux de production de chaleur par source chimique

L'Équation 6 permet de calculer le taux de chaleur de source chimique S_{Tchem} et est tirée de Ferrero et al. (2009).

$$S_{Tchem} = -\Delta H_R S_{Ccomb} \quad (6)$$

Où ΔH_R : pouvoir calorifique (J kg⁻¹)
 S_{Ccomb} : terme source de masse du combustible (kg m⁻³ s⁻¹)

Termes sources de masse (S_{ck})

L'Équation 7 est adaptée de Schulze (2005). Elle permet de calculer le terme source de masse du combustible S_{Ccomb} .

$$S_{Ccomb} = -C_{comb} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

Où C_{comb} : concentration du combustible (kg · m⁻³)
 k_0 : facteur pré-exponentiel (s⁻¹)
 E/R : énergie d'activation (K)
 T : température du combustible (K)

Les Équations 8 à 12 permettent de calculer les termes sources de masse S_{ck} à partir du terme source de masse du combustible et des coefficients stœchiométriques (Tirées de Ferrero et al., 2009 et adaptées de Schulze, 2005).

$$S_{CO_2} = \frac{v_{O_2}}{v_{comb}} \frac{M_{O_2}}{M_{comb}} S_{C_{comb}} \quad (8)$$

Où S_{CO_2} : terme source de masse d'oxygène ($kg\ m^{-3}$)

v_{O_2} : coefficient stœchiométrique d'oxygène (-)

v_{comb} : coefficient stœchiométrique de combustible (-)

M_{O_2} : masse molaire de l'oxygène ($kg\ mol^{-1}$)

M_{comb} : masse molaire de combustible ($kg\ mol^{-1}$)

$$S_{CO} = \frac{v_{CO}}{v_{comb}} \frac{M_{CO}}{M_{comb}} S_{C_{comb}} \quad (9)$$

Où S_{CO} : terme source de masse de monoxyde de carbone ($kg\ m^{-3}$)

v_{CO} : coefficient stœchiométrique de monoxyde de carbone (-)

M_{CO} : masse molaire de monoxyde de carbone ($kg\ mol^{-1}$)

$$S_{CO_2} = \frac{v_{CO_2}}{v_{comb}} \frac{M_{CO_2}}{M_{comb}} S_{C_{comb}} \quad (10)$$

Où S_{CO_2} : terme source de masse de dioxyde de carbone ($kg\ m^{-3}$)

v_{CO_2} : coefficient stœchiométrique de dioxyde de carbone (-)

M_{CO_2} : masse molaire du dioxyde de carbone ($kg\ mol^{-1}$)

$$S_{CH_4} = \frac{v_{CH_4}}{v_{comb}} \frac{M_{CH_4}}{M_{comb}} S_{C_{comb}} \quad (11)$$

Où S_{CH_4} : terme source de masse de méthane ($kg\ m^{-3}$)

v_{CH_4} : coefficient stœchiométrique de méthane (-)

M_{CH_4} : masse molaire de méthane ($kg\ mol^{-1}$)

$$S_{eau,vap} = \frac{v_{eau,vap}}{v_{comb}} \frac{M_{eau,vap}}{M_{comb}} S_{C_{comb}} \quad (12)$$

Où $S_{eau,vap}$: terme source de masse de la vapeur d'eau ($kg\ m^{-3}$)

$v_{eau,vap}$: coefficient stœchiométrique de la vapeur d'eau (-)

$M_{eau,vap}$: masse molaire de la vapeur d'eau (kg mol⁻¹)

Taux de production de chaleur par source physique

L'Équation 13 permet de calculer le taux de production de chaleur S_{Tphys} en combinant le taux d'évaporation de l'eau liquide S_w et l'enthalpie d'évaporation de l'eau ΔH_v (Tiré de Ferrero et al., 2009).

$$S_{Tphys} = S_w \Delta H_v \quad (13)$$

Où S_w : Taux d'évaporation de l'eau liquide (kg m³ s⁻¹)

ΔH_v : enthalpie d'évaporation de l'eau (J kg⁻¹)

Taux d'évaporation de l'eau liquide

L'Équation 14, adaptée de Ferrero et al. (2009) et adaptée de Lohrer et al. (2005), permet de calculer le taux d'évaporation de l'eau liquide dans l'empilement.

$$S_w = -EV C_w \exp\left(-\frac{\Delta H_v M_{H_2O,liq}}{RT}\right) + CD C_v \quad (14)$$

Où EV : facteur pré-exponentiel d'évaporation/désorption (s⁻¹)

C_w : concentration d'eau liquide dans l'empilement (kg m⁻³)

$M_{H_2O,liq}$: masse molaire de l'eau liquide dans l'empilement (g mol⁻¹)

CD : facteur pré-exponentiel de condensation/sorption (s⁻¹)

C_v : concentration de vapeur de l'eau (kg m⁻³)

Taux de condensation de la vapeur d'eau

L'Équation 15 permet de calculer le taux de condensation de la vapeur d'eau S_v (Tirée de Ferrero et al., 2009) à partir du taux d'évaporation de l'eau liquide S_w .

$$S_v = -S_w \quad (15)$$

Où S_v : Taux de condensation de la vapeur d'eau (kg m³ s⁻¹)

Terme de source biologique

Taux de production de chaleur par source microbiologique

L'Équation 16 permet de calculer le taux de production de chaleur par S_{MH} (Tirée de Ferrero et al., 2009 et adaptée de Tremier et al., 2005)

$$S_{Tbio} = S_{O_2} \cdot q_{O_2} \quad (16)$$

Où S_{O_2} : taux de consommation de l'oxygène par les microorganismes ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

q_{O_2} : énergie massique résultante de la consommation d'oxygène (-)

Taux de prolifération des microorganismes

L'Équation 17 permet de calculer le taux de prolifération des microorganismes dans l'empilement S_X (Tirée de Ferrero et al., 2009 et adaptée de Tremier et al., 2005).

$$S_X = \mu_m \left(\frac{MB}{K_b + MB} \right) X - b X \quad (17)$$

Où S_X : taux de prolifération des microorganismes ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

μ_m : constante de croissance des microorganismes (s^{-1})

MB : concentration de MB dans l'empilement (kg m^{-3})

X : concentration de bois dans l'empilement (kg m^{-3})

b : taux de mortalité des microorganismes (s^{-1})

K_b : constante de saturation du substrat pour MB (kg m^{-3})

Vitesse de réaction de la fraction facilement biodégradable

L'Équation 18 permet de calculer le taux de conversion de la fraction difficilement biodégradable S_{MH} (Tirée de Ferrero et al., 2009 et adaptée de Tremier et al., 2005).

$$S_{MH} = -K_h \left(\frac{\frac{MH}{X}}{K_{MH} + \frac{MH}{X}} \right) X \quad (18)$$

Où S_{MH} : taux de conversion de la fraction difficilement biodégradable ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

K_h : constante d'hydrolyse (s^{-1})

K_{MH} : constante de saturation du groupe MH/X (-)

MH : concentration de MH dans l'empilement (kg m^{-3})

Vitesse de réaction de la fraction difficilement biodégradable

L'Équation 19 permet de calculer le taux de conversion de la fraction facilement biodégradable S_{MB} (Tirée de Ferrero et al., 2009 et adaptée de Tremier et al., 2005).

$$S_{MB} = -\frac{1}{Y}\mu_m \left(\frac{MB}{K_b + MB} \right) X + K_h \left(\frac{\frac{MH}{X}}{K_{MH} + \frac{MH}{X}} \right) X \quad (19)$$

Où S_{MB} : taux de conversion de la fraction facilement biodégradable ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

Y : rendement de prolifération de microorganisme pour MB (-)

Taux de consommation d'oxygène

L'Équation 20 permet de calculer le taux de consommation de l'oxygène par les microorganismes S_{O_2} (Tirée de Ferrero et al., 2009 et adaptée de Tremier et al., 2005).

$$S_{O_2} = \frac{1-Y}{Y}\mu_m \left(\frac{MB}{K_b + MB} \right) X + b(1-f)X \quad (20)$$

Où f : fraction de microorganisme mort, transférée en masse inerte (-)

Taux de production de gaz carbonique

L'Équation 21 permet de calculer le taux de production de gaz carbonique par les microorganismes S_{CO_2} (Tirée de Ferrero et al., 2009 et adaptée de Tremier et al., 2005).

$$S_{CO_2} = Y_{CO_2} \mu_m \left(\frac{MB}{K_b + MB} \right) X \quad (21)$$

Où S_{CO_2} : taux de prolifération des microorganismes ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

Y_{CO_2} : rendement de CO_2 des microorganismes (-)

Les Équations 17, 18 et 19 font partie d'un système d'équation. Pour connaître la valeur de chacun (MB, MH et X) à un instant donné T, il faut résoudre les trois équations. Les valeurs MB_0 , MH_0 et X_0 sont mesurés à cet effet. Il est ainsi possible d'entrer ces valeurs initiales dans les équations pour obtenir le taux de production ou de consommation de chaque variable. Il suffit ensuite d'additionner ces taux à leur valeur initiale respective pour obtenir les valeurs pour MB_{0+T} , MH_{0+T} et X_{0+T} . Répéter ensuite ces étapes pour obtenir toutes les valeurs MB_n , MH_n et X_n , pour tous pas de n secondes.

Résultats du modèle mathématique

La Figure 6 présente le comportement prévu par le modèle mathématique et le comportement expérimental de la température en fonction du temps pour les deux empilements. L'empilement 1 a une hauteur de 6 m et une base de 15 m par 20 m. La taille moyenne des particules de l'empilement 1 est de 10 mm. L'empilement 2 a une hauteur de 5 m et une base de 15 m par 20 m. La taille moyenne des particules de l'empilement 2 est de 2 mm. La Figure 7 montre une modélisation d'un gros empilement de géométrie simple qui subit de l'auto-échauffement et s'enflamme selon les prévisions du modèle mathématique. La température maximale a été approximée avec succès lors des deux simulations. La simulation effectuée pour l'empilement de résidus de 2 mm de grosseur a suivi de plus près le comportement réel de l'empilement (Ferrero et al., 2009).

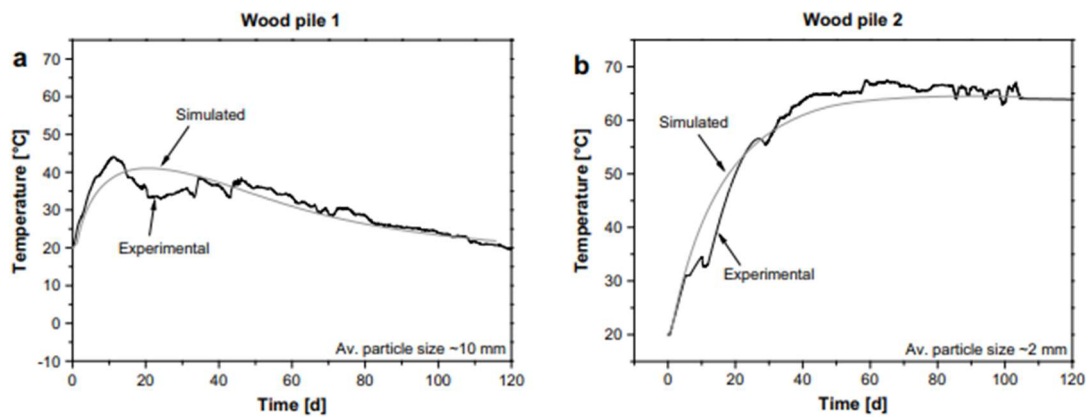


Figure 6. Montée en température prévue par le modèle et montée en température réelle pour deux empilements. (a) Empilement 1 : 6 m x 15 m x 20 m (hauteur x longueur x largeur); (b) Empilement 2 : 5 m x 20 m x 15 m (hauteur x longueur x largeur) (Adaptée de Ferrero et al., 2009).

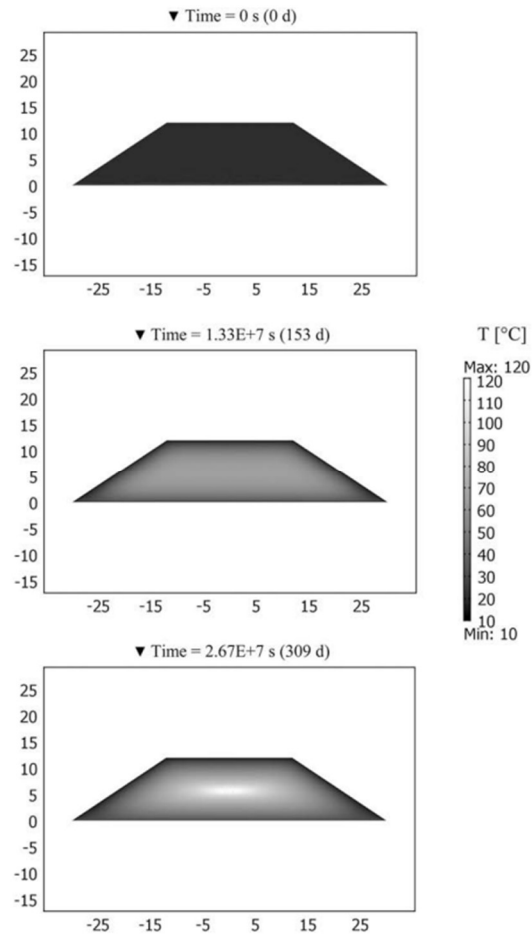


Figure 7. Modélisation de la montée en température au sein d'un empilement (Tiré de Ferrero et al., 2009).

Conclusions

Afin de réduire l'impact de la durée d'entreposage sur la dégradation des résidus de bois, il faut limiter la teneur en humidité et le compactage. Ainsi, l'activité microbienne, principale source de production de chaleur dans les empilements de copeaux de bois, serait limitée.

Une teneur en humidité sous 20 % serait donc idéale pour limiter le développement des microorganismes, mais ceci n'est pas envisageable puisque le matériel doit être humide pour faciliter le raffinage.

Il serait bien d'avoir des particules grossières dans les empilements avec le moins de particules fines possible afin de maximiser la circulation de l'air, ce qui aurait pour effet d'améliorer le transport de la chaleur et de la vapeur d'eau hors des empilements.

Les dimensions des empilements devraient être limitées afin de réduire le compactage et la dissipation de la chaleur devrait être favorisée en réduisant leur ratio V/A. Comme mentionné plus haut, un rapport élevé entre le volume d'un empilement et sa surface extérieure empêche la chaleur produite par l'empilement d'être dissipée efficacement par la surface en contact avec l'air. Afin de réduire les risques de combustion spontanée en limitant le compactage et en facilitant la circulation de l'air dans les empilements, la hauteur des empilements devrait être au plus de 15 m. Cependant, cette recommandation est faite sur la base d'études portant sur l'auto-échauffement des empilements de biomasse, qui contiennent une proportion élevée d'écorces, de feuilles et d'autres matières pouvant contribuer aux procédés de production de chaleur au sein d'un empilement de particules de bois. Cette recommandation est donc conservatrice. Il serait intéressant de recueillir des données en provenance de l'industrie des panneaux et de l'industrie des pâtes et papier, selon les dimensions et la géométrie des empilements de résidus de sciage, afin de faire une recommandation plus juste. Afin de limiter la dégradation des résidus de bois dans les empilements entreposés pendant une période plus grande qu'un mois, la hauteur des empilements devrait être au plus 7 m.

Il faudrait également prendre en compte la granulométrie des empilements puisque les usines québécoises ont tendance à séparer les types de résidus en empilements distincts. Afin de limiter la dégradation des résidus dans les empilements et de maintenir la qualité des panneaux composites à base de bois, le temps d'entreposage maximal devrait être de 1 mois.

Bibliographie

- Anerud, Erik et Anders Eriksson. « Evaluation of an Improved Design for Large-Scale Storage of Wood Chip and Bark. » *Biomass and Bioenergy* 154 (2021): 106255. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106255>
- Anerud, Erik; Gunnar Larsson et L. Eliasson. « Storage of Wood Chips. » *Croatian Journal of Forest Engineering* 41, no. 2 (2020): 277–86. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.663>.
- Chaves, Pedro; Julio Terrados Cepeda; Francisco Gallego Alvarez et Manuel J Hermoso Orzáez. « Influence of Moisture, Temperature and Microbial Activity in Biomass Sustainable Storage. Special Focus on Olive Biomasses. » *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources* 25, no. 3 (2020). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2020.25.556165>.
- Helmeste, Christopher; Caroline Gosselin et Anthony Bourgoïn. « Biomasse : Stockage et Sécurité. » Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre canadien sur la fibre de bois. *Faits sur la fibre*, no. n° 20 (2021).
- Dietenberger, Mark A. et Laura E. Hasburgh. « Wood Products: Thermal Degradation and Fire. » In *Elsevier EBooks*, (2016). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03338-5>.
- DIN (German institute for Standardization). « Determination of the spontaneous ignition behaviour of dust accumulations » EN 15188: 2020-Version en anglais. [PDF]
- Ergül, Emrah et Nadir Ayrilmiş. « Effect of Outdoor Storage Conditions of Wood Chip Pile on the Technological Properties of Wood-Based Panel. » *Biomass and Bioenergy* 61 (2014): 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.025>.
- Ferrero, Fabio; Christian Lohrer; Bernd Schmidt; Matthias Noll et Marcus Malow. « A Mathematical Model to Predict the Heating-up of Large-Scale Wood Piles. » *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22, no. 4 (2009): 439–48. <https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2009.02.009>.
- Fuller, William. « Chip Pile Storage - a Review of Practices to Avoid Deterioration and Economic Losses. » *ResearchGate*, 1985. <https://www.researchgate.net/publication/255091186>.
- Garstang, John; Alan Weekes, Poulter et David Bartlett. « Identification and Characterisation of Factors Affecting Losses in the Large-Scale, Non-Ventilated Bulk Storage Wood Chips and Development of Best Storage Practices. », (2002). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20350970>
- International Organization for Standardization. « Determination of the Ultimate Aerobic Biodegradability of Plastic Materials in an Aqueous Medium - Method by Analysis of Evolved Carbon Dioxide. » ISO 14852: 1999. [Version papier]
- Jylhä, Paula; Saleh Ahmadinia; Juha Hyvönen; Ari Laurén; Robert Prinz; Lauri Sikanen et Johanna Routa. « Self-Heating, Drying, and Dry Matter Losses of Stockpiled Stemwood Chips: The Effect of Ventilation. » *Energies* 15, no. 19 (2022): 7094. <https://doi.org/10.3390/en15197094>.
- Krause, Ulrich; Martin Schmidt et Christian Lohrer. « A Numerical Model to Simulate Smouldering Fires in Bulk Materials and Dust Deposits. » *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, no. 2–3 (2006): 218–26. <https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2005.03.005>.
- Lohrer, Christian; Martin Schmidt et Ulrich Krause. « A Study on the Influence of Liquid Water and Water Vapour on the Self-Ignition of Lignite Coal-Experiments and Numerical Simulations. » *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18, no. 3 (2005): 167–77. <https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2005.03.006>.

- Sampson, George et Jenifer Huang McBeath. « Temperature Changes in an Initially Frozen Wood Chip Pile. » (1987). <https://doi.org/10.2737/pnw-rn-454>.
- Schäfer, Martina et E. Roffael. « Einfluß Der Lagerung von Industrierestholz Der Klefer Und Fichte Auf Seine Eignung Für Die Herstellung von Spanplatten Und Mitteldichten Faserplatten (MDF). » *European Journal of Wood and Wood Products* 55, no. 2-4 (1997): 159-67. <https://doi.org/10.1007/bf02990537>.
- Schulze, A. 2005. « Experimentelle Bestimmung der Massenabnahme und der Brandgasung bei der Selbstentzündung von biogenen Brennstoffen. Final Project. » Technical University of Berlin, Allemagne. (En Allemand)
- Tremier, Anne; A. De Guardia; C. Massiani; Etienne Paul et Jean-Luc Martel. « A Respirometric Method for Characterising the Organic Composition and Biodegradation Kinetics and the Temperature Influence on the Biodegradation Kinetics, for a Mixture of Sludge and Bulking Agent to Be Co-Composted. » *Bioresource Technology* 96, no. 2 (2005): 169-80. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.005>.
- Wästerlund, Iwan; Peter Nilsson et Rolf Gref. « Influence of Storage on Properties of Wood Chip Material. » *Journal of Forest Science* 63, no. 4 (2017): 182-91. <https://doi.org/10.17221/46/2016-jfs>.

Annexe A Valeurs des coefficients et paramètres utilisés par Ferrero et al. (2009) dans la modélisation de la montée en température pour les deux empilements

Paramètre	Empilement 1	Empilement 2	Description	Unité
b	2,78E-05	2,78E-05	Taux de mortalité des microorganismes	[s ⁻¹]
C _{fuel}	136	225	Concentration initiale de carburant	[kg/m ³]
C _{O2}	0,252	0,252	Concentration initiale O2	[kg/m ³]
C _{CO2}	0	0	Concentration initiale CO2	[kg/m ³]
C _{CO}	0	0	Concentration initiale CO	[kg/m ³]
C _{CH4}	0	0	Concentration initiale CH4	[kg/m ³]
CD	0,000027	0,00004	Facteur pré-exponentiel condensation/sorption	[s ⁻¹]
c _p	1350	1500	Capacité thermique	[J/kg K]
CW	0,735	1,38	Concentration d'eau liquide	[kg/m ³]
Cv	0,000105624	8,5398E-05	Concentration de vapeur d'eau?	[kg/m ³]
D _k	8,00E-03	8,00E-03	Coefficient de diffusion de gaz de l'espèce	[m ² /s]
E/R	11667	12509	Énergie d'activation/R	[K]
EV	0,015	0,001	Facteur pré-exponentiel évaporation/désorption	[s ⁻¹]
f	0,2	0,2	Fraction de microorganisme mort transféré en inerte	[-]
k ₀	9,64E+04	8,15E+05	Facteur pré-exponentiel	[s ⁻¹]
K _b	0,009317	0,009317	Constante de saturation du substrat pour MB	[kg/m ³]
K _h	4,24E-05	4,50E-05	Constante d'hydrolyse	[s ⁻¹]
K _{MH}	6,5	6,5	Constante de saturation du groupe MH/X	[-]
M _{fuel}	0,03	0,03	Masse molaire du carburant	[kg/mol]
M _{O2}	0,032	0,032	Masse molaire O2	[kg/mol]
M _{CO2}	0,044	0,044	Masse molaire CO2	[kg/mol]
M _{CO}	0,028	0,028	Masse molaire CO	[kg/mol]
M _{CH4}	0,016	0,016	Masse molaire CH4	[kg/mol]
M _{H2O,vap}	0,018	0,018	Masse molaire de la vapeur d'eau	[kg/mol]
M _{H2O,liq}	0,018	0,018	Masse molaire de l'eau liquide	[kg/mol]
MB ₀	6,8	8,1	Concentration initiale de matière facilement biodégradable	[kg/m ³]
MC ₀	0,35	0,46	Teneur en humidité initiale	[-]
MH ₀	130	218	Concentration initiale matière difficilement biodégradable	[kg/m ³]
q _{O2}	62,5	62,5	Enthalpie de production consommation d'oxygène	[kJ/kg]
R	8,314	8,314	Constante universelle des gaz	[J/mol K]
RH ₀	0,94	0,76	Humidité relative initiale (assumée constante)	[-]
T ₀	293	293	Température initiale du bois	[K]
T _{0,air}	286	286	Température initiale de l'air ambiant	[K]
X ₀	2,76E-02	3,45E-02	Concentration initiale de la biomasse	[kg/m ³]
Y	0,68	0,68	Rendement de microorganisme pour MB	[-]
Y _{CO2}	1,79	1,79	Rendement de microorganisme pour CO2	[-]
α	8	8	Coefficient de transfert de chaleur	[W/m ² K]
ΔH _R	2,01E+07	2,01E+07	Pouvoir calorifique	[J/kg]
ΔH _v	2,10E+06	2,10E+06	Enthalpie d'évaporation de l'eau	[J/kg]
λ	0,188	0,069	Conductivité thermique du bois	[W/m K]
μ _m	7,09E-05	7,09E-05	Constante de croissance des microorganismes	[s ⁻¹]
v _{fuel}	-1	-1	Coefficient stœchiométrique du carburant	[-]
v ₁	-0,961	-0,961	Coefficient stœchiométrique O2	[-]
v ₂	0,79	0,79	Coefficient stœchiométrique CO2	[-]
v ₃	0,189	0,189	Coefficient stœchiométrique CO	[-]
v ₄	0,021	0,021	Coefficient stœchiométrique CH4	[-]
v ₅	0,812	0,812	Coefficient stœchiométrique vapeur d'eau	[-]
ρ	210	300	Masse volumique moyenne du bois	[kg/m ³]