



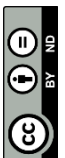
Revue bibliographique des propriétés de la paille et de la balle : Vers des matériaux de construction durables

LOT 131

09/05/2025

Contacts pour le volet technique et scientifique

Etablissement	Nom	Téléphone	Mail
UniLaSalle	Koceila BOUNDAOUI	02.32.82.91.68	koceila.boundaoui@unilasalle.fr
	Feriel BACOU	02.32.82.91.68	feriel.bacoup@unilasalle.fr
	Hafida ZMAMOU	02.32.82.91.68	hafida.zmamou@unilasalle.fr
	Jean-Baptiste BESNIER	02.32.82.91.84	jean-baptiste.besnier@unilasalle.fr
	Nathalie LEBLANC	02.32.82.91.45	nathalie.leblanc@unilasalle.fr



Ce document a été financé par l'État dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME

Sommaire

Introduction	1
I. Caractéristiques de la paille	2
I.1 Structure et composition biochimique de la paille	3
I.1.1 Composition structurale de la paille	3
I.1.2 Composition biochimique de la paille.....	4
I.2 Physicochimie de la paille	7
I.2.1 Conductivité thermique de la paille.....	7
I.2.2 Capacité thermique massique de la paille	16
I.2.3 Comportement hygroscopique de la paille.....	17
I.2.4 Décomposition thermique de la paille	22
I.2.5 Mesure du pH de la paille	28
I.2.6 Propriétés acoustiques de la paille	28
I.2.7 Propriétés mécaniques de la paille	29
II. Caractéristiques de la balle	30
II.1 Structure et composition biochimique de la balle	31
II.1.1 Composition structurale de la balle	31
II.1.2 Composition biochimique de la balle.....	33
II.2 Physicochimie de la balle	33
II.2.1 Conductivité thermique de la balle.....	33
II.2.2 Capacité thermique massique de la balle	34
II.2.3 Propriétés hygroscopiques de la balle	35
II.2.4 Décomposition thermique de la balle	36
Conclusion générale	37
Références	39

Introduction

La production céréalière génère beaucoup de coproduits dont la valorisation devient une priorité dans le contexte de la transition écologique que vit le monde actuellement [1]. Le secteur du bâtiment est en pleine expansion pour répondre aux besoins démographiques croissants. Il représente une émission de 120 millions de tonnes de CO₂. Cela en fait un domaine clé dans la lutte contre le réchauffement climatique [2]. Le remplacement des matériaux polluants de constructions et d'isolation traditionnels, comme le ciment, le verre et le fer, par des matériaux d'origine lignocellulosique est une excellente alternative [3]. En effet, l'abondance, le faible coût et l'empreinte carbone négative des grandes cultures (blé, tournesol...) sont des qualités attractives pour leur utilisation dans ce secteur. Mehravar et al. ont montré que le remplacement des matériaux standards de construction par des coproduits lignocellulosiques est à l'origine d'une réduction de 76 % de l'empreinte carbone [4]. En plus de ce volet écologique, la construction avec des coproduits, comme la paille d'orge, présente d'autres avantages tels que la facilité de construction, la qualité de l'air, l'isolation thermique, la résistance sismique... [5]

L'homme a déjà porté son attention à l'usage des coproduits pour la construction par le passé. La paille a été utilisée dans les toitures de chaume et sous forme de mélange avec l'argile, le sable et l'eau dans les maisons de torchis. À la fin du 19^{ème} siècle, l'invention des botteleuses aux États-Unis a aussi contribué à l'apparition des constructions avec des bottes de paille (technique de Nebraska). Le premier brevet des murs en paille est d'ailleurs apparu durant cette période dans l'état d'Indiana aux États-Unis [6,7]. Du côté français, la maison la plus ancienne construite avec la paille se trouve à Montargis. Elle porte le nom de la maison Feuillette [6,8].

Dans ce manuscrit, un état de l'art sur les connaissances existantes sur les pailles et les balles dans la littérature scientifique sera présenté. Les pailles qui seront discutées dans ce document sont celles de blé, de riz, d'orge, de triticale, de seigle et d'avoine, et les balles sont celles d'épeautre, d'orge, de riz et d'avoine. Nous aborderons leurs propriétés structurales, biochimiques et physicochimiques qui justifient leur usage dans le bâtiment. La figure 1 résume les principaux éléments qui seront discutés dans ce document.



Figure 1. Résumé des thèmes traités dans le manuscrit.

I. Caractéristiques de la paille

La paille est un coproduit de l'agriculture des céréales à paille, qui sont le blé, l'épeautre, l'orge, l'avoine, le triticale, le seigle et le riz. Sa production mondiale atteint 2000 millions de tonnes annuelles, et sa production européenne 110 millions de tonnes selon l'institut politique européenne de l'environnement [1]. Par conséquent, sa destruction régulière par incinération, notamment la paille de riz dans les pays asiatique, génère des gaz à effet de serre, des poussières de silice cristalline et d'autres contaminants nocifs pour la santé [9]. Il existe également d'autres moyens moins polluants de la gestion de sa fin de vie, comme l'enfouissement dans le sol, le paillage et l'utilisation en litière. De par sa très grande demande en matériaux, le secteur du bâtiment est capable de consommer le dixième de la production annuelle française de la paille [2]. Ceci réduirait l'empreinte carbone des bâtiments.

Afin de comprendre le comportement de la paille dans un vrai bâtiment, les propriétés structurales et physicochimiques de cette biomasse sont étudiées dans la suite de ce chapitre.

I.1 Structure et composition biochimique de la paille

I.1.1 Composition structurale de la paille

La paille est la partie tubulaire qui se trouve entre l'épi et la racine des plantes [6]. Elle est composée d'un ensemble de tissus végétaux secs et poreux, organisés sous forme de tige concentrique creuse (lumen). La partie dense la plus externe est appelée l'épiderme. Elle est mécaniquement résistante et étanche à l'évaporation de l'humidité. L'étanchéité de la paille à l'humidité est renforcée par une fine couche de cire apolaire qui recouvre l'épiderme. [10]. En dessous de l'épiderme, il existe un autre tissu plus lâche avec une porosité plus conséquente appelée le parenchyme. Dans le cas de la paille de blé et d'orge, le diamètre de la porosité est de 7 à 20 μm [11]. La vascularisation apparente dans le parenchyme appelée le phloème et le xylème, est responsable du transport de la sève brute et élaborée (Figure 2, A et C). Il convient de préciser que la paille exportée des champs est composée de la tige découpée à 10 cm avant la racine et des épis vidés de leurs graines (Lot 111).

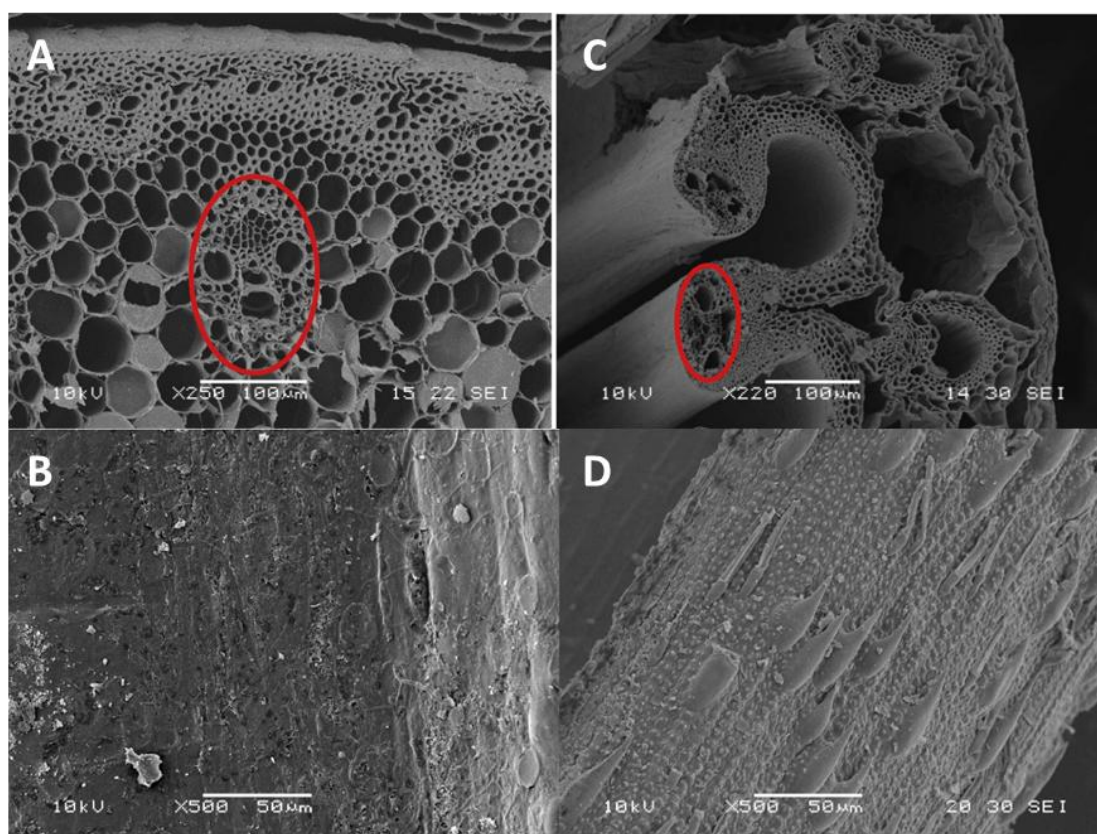


Figure 2. Image du microscope électronique à balayage de la coupe (A et C) et surface externe (B et D) de la paille de blé (A et B) et de la paille de riz (C et D) [16].

La structure et la porosité de la paille ne sont pas communes à toutes les espèces. Il existe des particularités propres à chacune [13–16]. La paille de riz se distingue des autres par des excroissances

de l'épiderme, orientées dans le sens de la tige (Figure 2, C). La disposition globale des tissus n'est également pas circulaire comme ce qu'on pourrait retrouver dans le cas du blé. De plus, la microstructuration interne des tissus (pores) est plus fine et plus homogène [12] (Figure 2, D).

La paille est une bioressource très légère. En effet, sa porosité très élevée souvent supérieure à 80 % lui permet une occupation élevée de l'espace avec une faible masse (Tableau 1). La densification artificielle de la paille peut compromettre légèrement sa porosité, comme ce qu'on peut observer dans le tableau [17,18].

Tableau 1. Exemples des densités et des porosités de la paille obtenues expérimentalement.

Origine de la paille	Densité apparente (Kg.m⁻³)	Densité réelle (Kg.m⁻³)	Porosité (%)	Réf
Blé	25 - 30	865 - 871	96 - 97	[11]
Orge	47	870	94	[11]
Blé	190 - 212	1177 - 1318	82 - 85	[17]
Colza	125	1259	90	[18]

I.1.2 Composition biochimique de la paille

La composition chimique de la paille est complexe et dépendante de l'origine, l'espèce et les conditions de développement de la plante. Les méthodes de caractérisations chimiques basées sur la résonance magnétique nucléaire (RMN) sont inadaptées pour caractériser la biomasse à cause de la complexité des mélanges. L'infrarouge donne quelques renseignements indicatifs de la présence de certains composés chimiques comme la cellulose. Toutefois, elle reste non pertinente d'un point de vue quantitatif [19]. La méthode de Van Soest reste la plus commune pour la caractérisation quantitative des constituants majeurs de la biomasse. Techniquement, cette méthode est basée sur des traitements et extractions successifs et spécifiques des différents constituants qui permettent de déterminer la composition massique globale [20].

Plusieurs études ont été réalisées sur la composition biochimique de la paille de différentes sources et localisations. Elles regroupent les composants communs des parois cellulaires végétales. Les principaux sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. La cellulose joue un rôle primordial dans la structure des parois cellulaires et tissulaires. Sa semi-cristallinité lui permet de s'organiser en fibres rigides dont l'orientation varie selon leur localisation dans la paroi cellulaire [19]. L'hémicellulose et la lignine, quant à elles, jouent un rôle de liants renforçant la cohésion des fibres de cellulose. La paille comporte également d'autres constituants secondaires comme des espèces solubles dans l'eau

(pectine et protéine) et des minéraux (oxyde de silicium) [19]. La Figure 3 illustre les composants de la double paroi d'une cellule végétale.

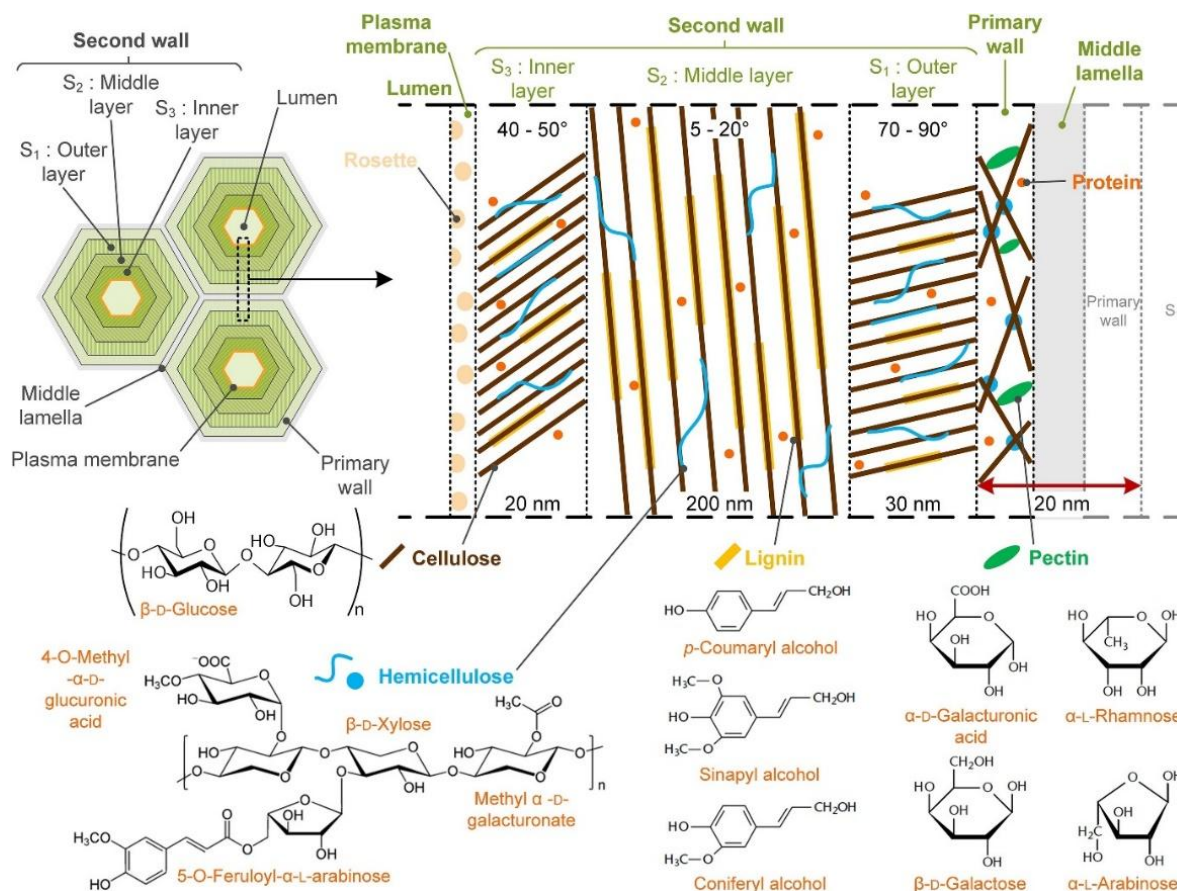


Figure 3. Schéma de la double paroi des cellules végétales, ses composants et leurs structures chimiques [19].

Généralement, le classement des constituants biochimiques de la paille dans l'ordre décroissant de leur proportion massique est le suivant : la cellulose, l'hémicellulose, la lignine, les extractibles (hydrosolubles et cire) et ensuite les cendres (Tableau 2). Il est difficile de trouver une corrélation entre les constituants et l'espèce de la paille analysée. L'évolution transversale de la composition biochimique selon son état de maturité à la récolte, les conditions météorologiques de son développement et la zone géographique des plantations, compliquent cette tâche [19]. La seule spécificité qu'on pourrait distinguer est la richesse minérale (cendre) de la paille de riz par rapport aux autres (Tableau 2) [15,21]. L'hypothèse d'une favorisation de la silicification au détriment de la lignification lors du développement de la plante du riz est émise par Van Soest [22].

Tableau 2. Composition chimique de la paille en fonction de son espèce et de sa provenance

Paille	Pays	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Extractibles (%)	Cire (%)	Cendres (%)	Réf
Avoine	-	38,5	31,7	16,8	4,6	2,2	6,1	[23]
Blé	France	43,0	30,0	5,2	20,4	-	0,8	[19]
Blé	-	38,6	32,6	14,1	4,7	1,7	5,9	[23]
Colza	France	53,1	18,1	9,6	17,7	-	0,8	[19]
Colza	-	37,6	31,4	21,3	-	3,8	6,1	[23]
Orge	Chine	37,7	37,1	15,8	5,2	-	4 (1,7*)	[24]
Orge	Chine	37,6	34,9	15,8	-	2,2	4,3	[25]
Riz	Iran	38,4	25,6	21,0	4,0	-	11,0	[26]
Riz	Iran	32,0 - 38,6	19,7 - 35,7	13,5 - 22,3	-	-	13,0 - 17,0	[27]
Riz	Indonésie	37,5	35,4	14,5	-	-	11,3	[28]
Riz	Inde	32,4	28,3	19,6	11,3	-	8,4	[18]
Riz	Inde	28,5 - 41,0	15,3 - 25,9	6,2 - 12,6	-	-	5,0 - 8,0*	[29]
Riz	Chine	33,9	25,6	12,2	-	-	11,8	[30]
Riz	Chine	42,2	24,2	20,8	-	-	-	[31]
Riz	-	36,5	27,7	12,3	6,1	3,8	13,3	[23]
Seigle	-	37,9	32,8	17,6	4,1	2,0	3,0	[23]
Triticale	Tunisie	39	31	21	4	-	5	[32]

* Oxyde de silicium (SiO₂)

N.B Pour une meilleure homogénéité des résultats du tableau, toutes les valeurs ont été arrondies au dixième, sauf la dernière ligne dont les résultats sont fournis sans chiffres après la virgule

I.2 Physicochimie de la paille

Les propriétés de la paille ont fait l'objet d'une recherche poussée afin de valider son usage dans le secteur du bâtiment. Son utilisation comme isolant ou comme murs porteurs dépend fortement de ses propriétés. Dans ce chapitre, nous discuterons principalement les propriétés de la paille brute issues des analyses à l'échelle laboratoire.

I.2.1 Conductivité thermique de la paille

La performance thermique des matériaux est un paramètre essentiel dans l'industrie du bâtiment. Des matériaux de forte performance thermique, de moindre coût et avec une faible empreinte carbone sont très recherchés pour répondre aux critères stricts de la transition écologique. En effet, un matériau est déclaré « isolant » quand sa conductivité thermique (λ) est inférieure à 0,065 et sa résistance thermique (R) est supérieure ou égale à 0,5 m².K.W⁻¹ [33]. Quand la conductivité thermique d'un matériaux (λ) est inférieure à une valeur de 0,05 W.m⁻¹.K⁻¹, il est considéré comme étant très isolant [34]. En France, l'ADEME (agence de la transition écologique) a fixé des valeurs minimales seuil de la résistance thermique de chaque partie d'une bâtisse en fonction de sa situation géographique.

Les produits biosourcés légers présentent de façon générale une conductivité thermique intéressante [35]. Compte tenu de sa structure poreuse, la paille présente des performances attractives en isolation thermique. Les conductivités thermiques retrouvées dans les différents travaux de recherche sont très variables. Elles dépendent de plusieurs paramètres liés aux conditions de l'analyse et à la nature de la paille (Tableau 3). D'un point de vue historique, c'est en 1993 que la conductivité thermique de la paille est, pour la première fois, estimée par McCabe à 0,048 et 0,061 W.m⁻¹.K⁻¹ [36]. Plusieurs autres recherches sont menées depuis sur la conductivité thermique de la paille dans différentes conditions. Une valeur représentative générale de 0,064 W.m⁻¹.K⁻¹ a même été proposée par Shea et al. [37,38]. Bien qu'elle soit dans la gamme de conductivité thermique retrouvée dans la littérature, soit de 0,03 à 0,194 W.m⁻¹.K⁻¹ [5,39], elle reste peu représentative [38]. En effet, la conductivité thermique de la paille est dépendante de plusieurs paramètres qui peuvent significativement influencer son transfert de la chaleur. Ces différentes conditions ont fait l'objet d'une recherche poussée afin de comprendre les phénomènes physicochimiques impliqués et de concevoir des modèles de prédictions.

Tableau 3. Conductivité thermique des différentes espèces de paille

Espèce de la paille	Epaisseur (cm)	Densité (Kg.m ⁻³)	Humidité relative (%)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Instrument de mesure	Réf
n.s	50 ^a 35 ^b	n.s	-	0,13 ^a 0,08 ^b	Mesure <i>In situ</i> (mur entier)	[40]
Orge	10,2	100 - 120	Sec - 90	0,047 - 0,080 ^d	HFM	[13]
Blé	-	80 - 120	15 - 95	0,054 - 0,124 ^a 0,048 - 0,090 ^b	THW	[3]
Blé	10	120	50	0,078 ^a 0,048 ^b	HFM	[41]
Blé	8,4	35 61	-	0,047 ^d 0,046 ^d	HFM	[4]
Orge	5	80 - 180	-	0,036 - 0,044 ^c	GPH	[17]
Blé	-	126 129	-	0,078 ^a 0,056 ^b	HFM	[42]
Riz	-	80 et 100	Sec, 50 et 80	0,039 - 0,048 ^b	GHP	[43]
Triticale	-	65 - 86	-	0,055 - 0,065 ^d	-	[44]
Orge	-	91	-	0,060 ^d	-	[44]
n.s	45	150	-	0,058 ^d	-	[45]
Blé	36	116	-	0,044, 0,045 et 0,046 ^a	-	[46]
Blé	45	75	-	0,069 ^c	-	[47]
Blé	10	78	-	0,057 ^c	HFM	[48]
Riz	10	50 - 90	Sec - 80	0,069 - 0,194 ^a 0,04 - 0,084 ^{b, c}	TPS	[39]
Seigle	4,5	51	-	0,047 ^b	HFM et Appareil à plaques Laser Comp Fox 602	[49]
Blé	20 - 45	68 - 123	50	0,06 - 0,08 ^c	GHP	[50]
Blé	12,5	80	40	0,053 ^d	GHP	[51]

Espèce de la paille	Epaisseur (cm)	Densité (Kg.m ⁻³)	Humidité relative (%)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Instrument de mesure	Réf
n.s	10	80	Sec	0,072 ^a 0,051 ^b	GHP	[52]
n.s	-	30 - 120	Sec, 50 et 80	0,040 - 0,059 ^d	-	[53]
n.s	-	98	-	0,065 ^d	Appareil de mesure ISOMET 2114 avec la sonde à aiguille IPN 1100	[54]
Triticale	ns	46 - 425 57 - 694	1 - 1,5 13 - 44	0,046 - 0,061 ^d 0,057 - 0,081 ^d	Appareil Lasercomp	[55]
Blé	-	63 - 123	50	0,059 - 0,064 ^c	HFM et GHP	[37]
n.s	40	105	-	0,05 ^d	-	[56]
Orge	-	40 -120	-	0,085 - 0,087 ^a 0,048 - 0,074 ^b	GHP	[57]
Triticale	10	50-110	-	0,041 - 0,065 ^b	GHP	[58]
Orge	10	65,2	-	0,06 ^b	GHP	[59]
n.s	16	51 76	-	0,061 ^d 0,053 ^d	-	[60]
Orge	22	80	-	0,041 ^b	GHP	[61]
Orge	38	69 - 98	-	0,03 - 0,094 ^d	-	[5]
Blé	58,4 ^a 41,9 ^b	133	-	0,061 ^a 0,048 ^b	GHP	[36]

Orientation des fibres par rapport au flux de chaleur : ^a Parallèle, ^b perpendiculaire, ^c aléatoire et ^d orientation non renseignée

GHP Plaque chaude gardée, **HFM** Fluxmètre de chaleur, **TPS** Source plane transitoire et **THW** La méthode du fil chaud

n.s non spécifié

N.B Pour une meilleure homogénéité des résultats de conductivité thermique, toutes les valeurs ont été arrondies au millième, sauf dans les cas des conductivités thermiques fournies avec moins de 3 chiffres après la virgule

I.2.1.1 Orientation des fibres de paille

L'influence de l'orientation par rapport au flux de chaleur (perpendiculaire, parallèle ou aléatoire) était le premier test réalisé après la mise au point d'une méthode de mesure de la conductivité thermique de la paille (Figure 4). McCabe a montré, déjà à cette époque, l'importance du contrôle de l'orientation de la paille de blé sur sa conductivité thermique [36]. Dans les mêmes conditions de mesure, la conductivité thermique de la paille perpendiculaire au flux de chaleur était estimée à $0,048 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et à $0,061 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ lorsqu'elle était parallèle. Un avantage significatif de l'organisation perpendiculaire est par conséquent conclu. D'autres auteurs ont confirmé la même tendance avec des différences de 11 à 44 % (Tableau 3) [3,12,39–42,52,57,58]. L'analyse des résultats bibliographiques montre que, quelles que soient les conditions de mesure, la moyenne des conductivités thermiques confirme que la paille perpendiculaire est plus isolante que la paille parallèle. L'orientation aléatoire, quant à elle, engendre une isolation thermique intermédiaire entre les deux extrêmes orientations [15,50]. Nous retrouvons la même tendance avec les résultats regroupés dans le Tableau 3, soient une $\lambda_{\text{Perpendiculaire}} = 0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ qui est plus faible que la $\lambda_{\text{Aléatoire + non spécifié}} = 0,052 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et qui est elle-même plus faible que $\lambda_{\text{Parallèle}} = 0,075 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.



Figure 4. Photographie des différentes possibilités de l'orientation de la paille du riz par rapport au flux de chaleur : a) orientation parallèle, b) aléatoire et c) perpendiculaire [39].

La paille doit sa faible conductivité thermique à sa structure lignocellulosique poreuse. Les volumes remplis, conducteurs de la chaleur, s'alternent avec les volumes poreux isolants [3]. Par conséquent, le parcours de la chaleur sur la partie solide de la paille est rallongé par sa porosité. Ceci réduit sa conductivité thermique globale par rapport à un matériau lignocellulosique non poreux. La même logique s'applique aux deux orientations de la paille par rapport au flux thermique. En effet, il faut savoir que la porosité de la paille est tubulaire dans le sens de la longueur. Ainsi, la disposition parallèle des fibres est plus favorable à un parcours de transfert thermique direct. Dans une autre étude, cet écart de la conductivité thermique a été lié aux possibilités de mouvement de l'air en

fonction de l'orientation. Un mouvement direct dans la configuration de tige parallèle est plus favorable que celui des tiges perpendiculaires [39].

I.2.1.2 Effet de la densité

L'effet de la densité de la paille sur sa conductivité thermique est sujet de divergentes tendances de résultats. Dans certains travaux de recherche, les auteurs montrent une augmentation de la conductivité thermique en fonction de la densité [3,13,39,50]. Ils associent ce constat à un rétrécissement des espaces vides (inter-fibres et dans la porosité) sous l'effet de la compression [17]. Ainsi, le parcours de la chaleur à travers la partie solide de la paille est réduit, et la conductivité thermique est augmentée (Figure 5).

D'autres travaux de recherche montrent une autre évolution. Une tendance baissière et ensuite autre haussière après l'atteinte d'une conductivité thermique optimale dans la zone des 70 à 120 Kg.m⁻³ est observée [38,62,63]. Cette zone de densité optimale pour l'isolation thermique est par ailleurs la gamme de densité conseillée pour la construction avec la paille. Elle est approuvée par l'évaluation technique européenne [64] et par la réglementation française en matière de construction [65]. Des densités en dehors de cette zone sont fortement déconseillées pour des contraintes pratiques et mécaniques qu'on abordera dans la section dédiée [38].

Véjélien et al. étaient les premiers à mettre en évidence ce phénomène de baisse et d'augmentation de la conductivité thermique de la paille en fonction de sa densité. Ils expliquent la baisse de conductivité thermique par une réduction de la convection du gaz. À faibles densités, la structure de la paille est ouverte et laisse des grands espaces qui permettent une conductivité thermique par l'air. L'augmentation de la densité baisse ces volumes d'air, ce qui engendre une baisse de la conductivité thermique globale [58]. Au-delà d'une densité optimale, l'augmentation de la conductivité thermique est expliquée par la diminution du parcours de la chaleur comme montré précédemment (Figure 5). Csanaday et al. ont observé la même évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité de la paille [17]. Pour expliquer ce phénomène, les auteurs ont proposé un modèle mathématique qui relie la conductivité thermique totale de la paille à plusieurs contributions par la relation théorique suivante :

$$\lambda_{tot} = K_s + K_{g,tot} + K_r + K_{conv}$$

Où λ_{tot} est la conductivité thermique totale de la paille, K_s la conductivité thermique de la partie solide et la porosité de la paille, $K_{g,tot}$ la conductivité thermique de l'air entre les tiges de paille et l'air à l'intérieur des tiges, K_r la conductivité par radiation et K_{conv} la conductivité thermique par convection de l'air dans les espaces entre les fibres.

Le modèle mathématique de Csandey a été développé et validé avec la paille de blé et d'orge. Sachant que les espaces interfibres sont inférieurs à un diamètre de 3 mm, la contribution de la conductivité thermique par convection (K_{conv}) est considérée négligeable [62]. La conductivité thermique par radiation (K_r) est également ignorée à cause de sa très faible valeur malgré son évolution exponentielle en fonction de la densité. Les deux seuls paramètres qui contribuent principalement sont la conductivité thermique de l'air et celle de la partie solide. Mathématiquement, la conductivité thermique de l'air diminue linéairement (diminution de la quantité de l'air) tandis que celle de la partie solide augmente exponentiellement (diminution du parcours de la chaleur) (Figure 6). La somme de ces deux contributions donne une conductivité thermique totale qui diminue dans un premier temps sous l'effet de la diminution de la quantité de l'air et qui augmente dans un second temps sous l'effet de la diminution du parcours de la chaleur à travers la paille [17,62]. L'interprétation du modèle mathématique et théorique de Csandey et al. concorde avec celle avancée par Vêjeliéné et al.

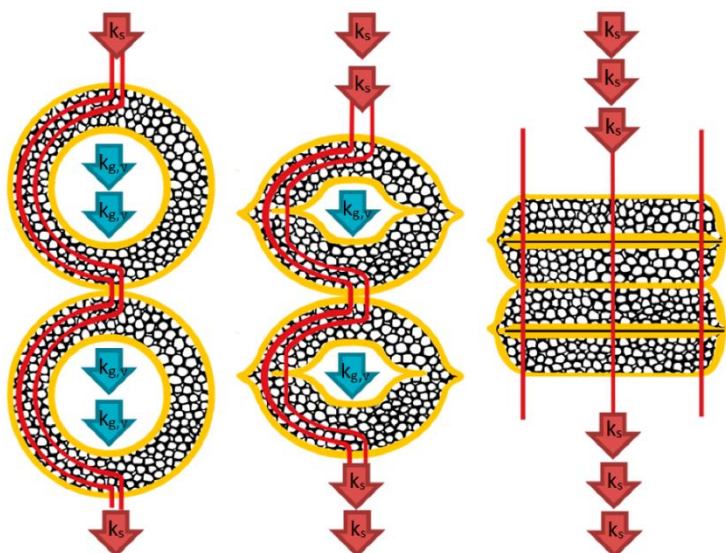


Figure 5. Effet de la compression sur la conductivité thermique de la paille [17].

Le reproche qui pourrait être fait au modèle de Csandey et al. est sa négligence de l'orientation de la paille par rapport au flux de chaleur et de son taux d'humidité. Ces aspects présentent une incidence majeure sur la conductivité de la paille (voir les sections dédiées) [3]. N'incluant pas ces paramètres, les résultats théoriques annoncés par ce modèle pourraient être très écartés des valeurs expérimentales de la conductivité thermique de la paille.

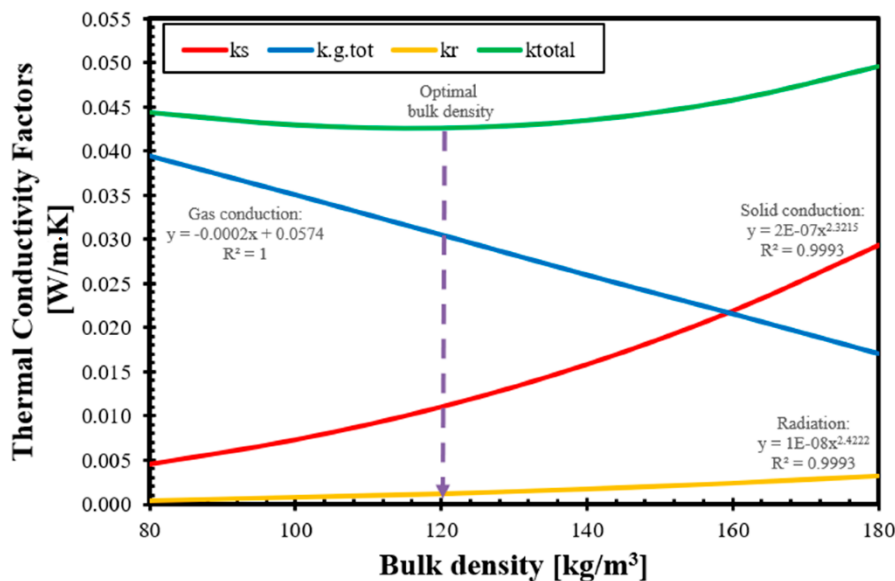


Figure 6. Décomposition des différents facteurs contribuant à la conductivité thermique de la paille de blé en fonction de sa densité selon le modèle de Csanády et al [17].

I.2.1.3 Effet de la température

L'augmentation de la température engendre une augmentation de la conductivité thermique de la paille [3,5,37,39,43,48,52,61] et celle des autres isolants thermiques conventionnels [66]. Ceci est principalement dû à l'augmentation de la conductivité thermique de l'air contenu entre les tiges et dans la porosité. La paille parallèle au flux de chaleur est par ailleurs plus sensible à la température à cause d'une plus grande liberté de mouvement de l'air dans cette configuration [39]. La conductivité thermique par rayonnement est aussi légèrement augmentée sous l'effet de la température, mais sa contribution reste très modeste. La partie solide sèche de la paille est insensible à la variation de la température vu que la contribution solide (solide et air contenu dans les pores) est principalement liée à la cellulose et les autres constituants [3]. Suivant ce raisonnement, la conductivité thermique de la paille devrait être moins sensible à la température aux hautes qu'aux faibles densités, et cela en raison de la différence de la quantité de l'air dans les échantillons de paille dans les deux cas de figure. D'un point de vue mathématique, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température est parfois décrite par une fonction linéaire [3,5,52] et parfois par une fonction exponentielle [48].

I.2.1.4 Effet de l'humidité

L'humidité relative du conditionnement des matériaux lignocellulosiques est un paramètre clé à fixer pour les mesures de conductivité thermique. Un conditionnement à 23°C et à une humidité relative de 50 %, jusqu'à stabilité massique de ces matériaux, est courant. Cela permet de fixer leur taux d'humidité en amont des analyses de conductivité thermique [11]. En effet, la nature chimique

hydrophile de ces matériaux entraîne souvent une forte fixation de la vapeur d'eau dans un milieu humide. À fort taux d'humidité, la saturation de la porosité de la paille pourrait même entraîner un phénomène de condensation [67]. Ces aspects sont discutés avec plus de détails dans le chapitre I.2.3.

Sans ces étapes de conditionnement, la composition chimique de la paille (humidité comprise) n'est pas contrôlée. Même des faibles variations de l'humidité de la paille (vapeur ou liquide condensé) pourrait entraîner des conséquences majeures sur sa conductivité thermique globale. En effet, la conductivité thermique de l'humidité est très élevée ($0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à 10°C sous forme liquide) par rapport à l'air dans la porosité de la paille ($0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) [68]. Par conséquent, le remplacement d'un gaz isolant par un liquide (ou vapeur) bien conducteur augmente significativement la conductivité thermique de la paille dans son ensemble. Ce constat est commun à l'ensemble des études de la conductivité de la paille en fonction taux d'humidité [3,5,37,39,43,55].

Il a été démontré que l'évolution de la conductivité thermique de la paille en fonction de l'humidité relative de son conditionnement est sensible à son orientation. Tout comme ce qui a été démontré pour la conductivité thermique de la paille en fonction de la température, la paille parallèle est la plus sensible à ce changement [39]. Une évolution de la conductivité thermique de la paille parallèle d'un facteur de 2,5 est retrouvée en passant d'un conditionnement sec à une humidité de 80 % contre uniquement 1,5 dans le cas des autres orientations (Figure 7). Les auteurs ont lié ce phénomène à une plus grande liberté de mouvement de l'humidité (vapeur d'eau) en orientation parallèle qu'en orientation perpendiculaire [39]. La difficulté de l'atteint d'un état d'équilibre, lors des mesures de la conductivité thermique de la paille parallèle au flux de chaleur, peut aussi être à l'origine d'une forte surestimation de sa conductivité thermique.

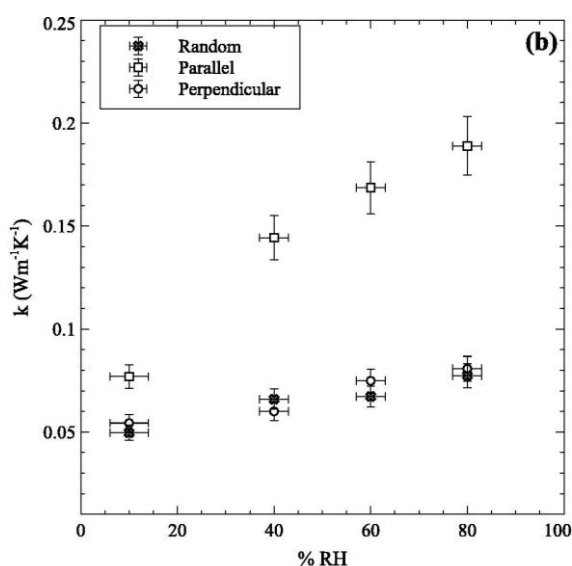


Figure 7. Évolution de la conductivité thermique de la paille de blé à $68 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ selon différentes orientations par rapport au flux de chaleur en fonction du RH [39].

I.2.1.5 Effet de l'espèce de la paille, sa composition biochimique et son taux de porosité

L'effet de l'espèce de paille utilisée sur sa conductivité thermique n'est pas beaucoup étudié dans la littérature. À notre connaissance, Csanady et al. sont les seuls à avoir comparé la conductivité thermique de la paille, strictement dans les mêmes conditions d'analyse et de conditionnement, de deux espèces différentes (l'orge et le blé) [17]. Les résultats montrés dans la Figure 8 révèlent une faible conductivité thermique de la paille d'orge par rapport à celle de blé sur toute la gamme de densité testée. Ces résultats ont mené les auteurs à conclure, dans ce cas précis, une plus grande isolation thermique de la paille d'orge par rapport à celle du blé. Ils ont expliqué ce comportement par une différence des deux pailles à l'échelle biochimique et structurale. En effet, la porosité de la paille d'orge est plus élevée que celle de la paille de blé. De plus, le taux de cellulose plus élevé de la paille d'orge est favorable à l'isolation thermique. En effet, deux pailles de blé de différentes proportions de cellulose (38 et 48 %) de même porosité ont montré que l'augmentation de la quantité de cellulose baisse significativement la conductivité thermique du produit [3].

Pour conclure, la diversité de la composition chimique (Tableau 2), ajoutée à la différence de la structuration interne, empêche d'établir une conclusion générale sur l'ordre des conductivités thermiques des différentes espèces de paille.

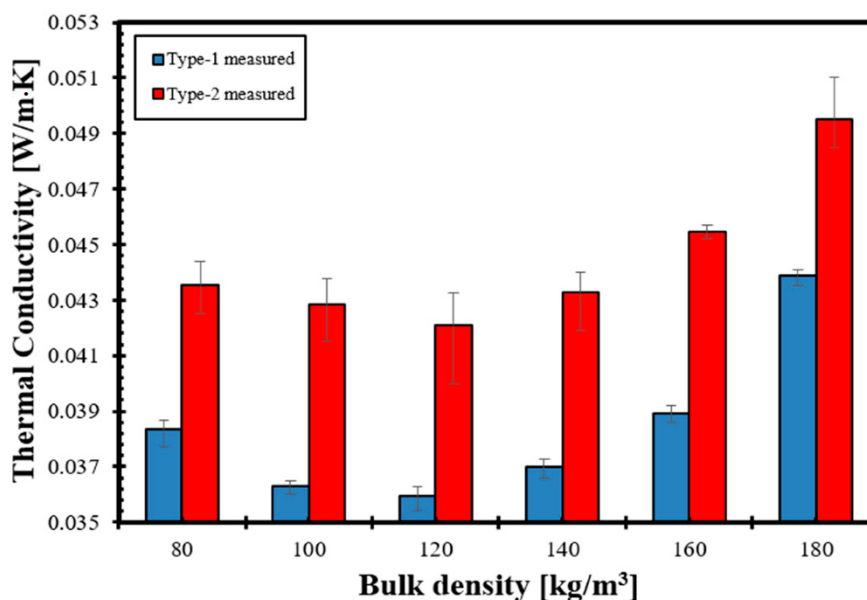


Figure 8. Comparaison de la conductivité thermique de la paille d'orge (type 1) et de la paille de blé (type 2) en fonction de la densité [69].

I.2.1.6 Modèles multiparamètres de prédiction de la conductivité thermique

Il existe plusieurs études qui ont essayé de prédire numériquement la conductivité thermique de la paille dans différentes conditions d'analyse. Des modèles mathématiques avec une variable comme la densité [17,50,63], la température [52] et l'humidité relative [70] ont été développés. D'autres modèles avec de multiples variables comme la température et la densité [70], la température, la densité et l'humidité relative simultanément [39] ont également été proposés. Ces modèles sont intéressants, mais restent très insuffisants pour prédire numériquement la conductivité thermique d'un type de paille. En effet, des paramètres comme l'orientation des fibres, la température et le taux d'humidité, ne sont pas systématiquement pris en considération dans le calcul de la conductivité thermique. Et cela, en dépit de leur grande influence [3]. Le modèle multivarié prometteur est celui de Tlaji et al. Il inclut dans son calcul de la conductivité thermique : l'angle de l'orientation des fibres, le taux de cellulose, la densité, la température et l'humidité relative de conditionnement [3]. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux obtenus sur la paille de blé a révélé un bon accord avec un indice de dispersion de 6 %.

I.2.2 Capacité thermique massique de la paille

La capacité thermique massique d'un matériau est un paramètre essentiel pour définir ses performances thermiques dans un bâtiment, en plus de sa conductivité thermique. Ce paramètre est défini comme l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un kg de matière d'un degré Celsius. Ainsi, plus ce terme est élevé, plus le matériau est capable d'absorber et de stocker la chaleur. Il contribue alors à une meilleure stabilisation de la température interne du bâtiment face aux variations externes [71]. Une valeur de $1400 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est considérée comme le seuil minimal pour qualifier un matériau d'isolant du point de vue de sa capacité thermique [34].

La capacité thermique massique de la paille est souvent négligée comparée à sa conductivité thermique [34]. Concernant la paille, les valeurs retrouvées dans la littérature sont peu nombreuses et divergentes. Une valeur de $1250 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a été retrouvée avec la paille de blé commercial ECOPA® [47]. Tandis qu'une autre étude sur la même espèce de paille a trouvée uniquement une valeur surprenante de $600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [48]. Ceci démontre une divergence des résultats au sein de la même espèce. La capacité thermique massique de la paille de riz a aussi été étudiée selon deux méthodes. La méthode directe par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) a été faite sur une gamme de températures ascendantes de 0 à 40°C. Les mesures ont révélé des valeurs allant de 1075 à 2025 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ceci démontre une augmentation de ce paramètre en fonction de la température. La méthode de mesure

indirecte par plaque chaude gardée a montré des valeurs plus élevées, soient de 3179 et 2259 J.kg⁻¹.K⁻¹ pour des densités respectives de 80 et de 100 Kg.m⁻³ d'échantillons secs [43].

La dépendance de la capacité thermique de la paille, à la fois des conditions et des méthodes de mesure, rend difficile la désignation d'une valeur référence de la capacité thermique massique de la paille. Mais dans l'ensemble, les valeurs retrouvées sont très proches de celles des matériaux de construction habituels (ciment, brique et bois) qui sont situées dans la gamme suivante de 1000 à 2500 J.kg⁻¹.K⁻¹ [72]. La capacité thermique massique de la paille reste, par conséquent, très proche ou supérieure au seuil recommandé pour les matériaux de construction, soit 1400 J.kg⁻¹.K⁻¹ [34]. Cela confirme encore une fois le potentiel de ce coproduit dans le domaine du bâtiment.

I.2.3 Comportement hygroscopique de la paille

L'hygroscopie de la paille est intéressante à connaître pour comprendre son comportement et sa résistance dans un contexte d'humidité ordinaire et extrême (inondation). En effet, 14 et 30 % de teneur en eau dans la paille sont les seuils annoncés à partir desquels des développements fongiques et bactériens peuvent se produire [49,62]. Des valeurs inférieures sont par conséquent souvent recherchées.

I.2.3.1 Sorption/désorption de la vapeur d'eau

La paille qui est un matériau lignocellulosique poreux, est capable de capter l'humidité de son environnement. Sa structure poreuse et sa composition biochimique favorisent ce comportement hygroscopique. En effet, la cellulose et l'hémicellulose, dont la proportion massique occupe en moyenne les trois quarts de la masse sèche de la paille, sont des macromolécules hydrophiles (chapitre I.1.2). Ainsi, leur structure moléculaire qui comporte beaucoup de groupements hydroxyles polaires (fonction OH) interagit avec l'eau. Quant à la lignine, malgré sa proportion non négligeable dans les différentes pailles, elle ne contribue pas à la sorption des molécules d'eau du fait de sa nature hydrophobe. Ajoutée à ce côté biochimique, la porosité de la paille engendre une grande surface spécifique. Cette dernière est en faveur de l'adsorption des molécules d'eau et leur piégeage dans les cavités [12,73].

Pour caractériser les propriétés hygrothermiques de la paille vis-à-vis de l'humidité, des isothermes de sorption/désorption de la vapeur d'eau sont souvent réalisées sur les agroressources. Concrètement, l'évolution de la masse à l'équilibre de la paille à différents taux d'humidité est collectée pour construire les isothermes en question. L'isotherme obtenue par l'augmentation graduelle du taux d'humidité est appelée l'isotherme de sorption, et celle obtenue par la baisse des taux d'humidité est appelée l'isotherme de désorption. Il est important de souligner que la température de la mesure est

fixe au cours des analyses même s'il a été démontré que son influence sur le résultat de sorption de la paille est négligeable [13,74].

La paille présente une sorption de vapeur d'eau caractéristique des fibres végétales [43]. Le profil de sorption est généralement similaire pour toutes les pailles. À faibles humidités relatives (0 à 20 %), une prise de masse rapide est constatée. Elle est par la suite suivie d'une diminution de la vitesse, avant sa brusque augmentation dès l'atteinte des 70 % d'humidité relative environ. A l'échelle moléculaire, ces différentes évolutions sont liées à différents phénomènes: A) adsorption monocouche des molécules d'eau, B) adsorption multicouche des molécules d'eau, C) interconnexion des couches d'eau adsorbées, D) condensation de la vapeur d'eau (eau libre dans les capillaires) et E) sursaturation (Figure 9) [12]. Il arrive que ces différentes étapes soient cachées par un manque de résolution de l'analyse [43].

Le profil de sorption de la vapeur d'eau de la paille de blé et celle du riz dans les mêmes conditions d'analyse ont montré une nette superposition [12,13]. D'une façon semblable, le même résultat est retrouvé lors de la comparaison des profils de sorption de la paille de blé avec celui de la paille d'orge [11]. L'hystérésis de désorption marquée de la paille d'orge était la seule différence retrouvée avec ces derniers. Elle a été expliquée par une plus grande densité des couches externes de la paille d'orge par rapport à celle de blé [11]. À l'humidité relative la plus élevée des tests, la sorption maximale de la vapeur d'eau par la paille peut atteindre des valeurs très élevées. 45 % environ de prise de masse, est la valeur maximale retrouvée avec de longues fibres de la paille de riz et de blé exposées à une humidité relative de 95% [12,43]. Une étude de sorption de la vapeur d'eau sur des petites fibres de paille a également montré un maximum de sorption de 40 % à 90 % RH [13]. Il existe aussi d'autres résultats de prises de masses maximales très écartés par rapport à ces dernières. Seulement 20 % de prise de masse avec la paille de blé à 97 % RH [75] et des valeurs surprenantes de 280 et 350 % avec la paille de blé et d'orge respectivement, ont été retrouvées à 98 % RH [11].

La comparaison de la sorption de la vapeur d'eau de la paille et d'autres agroressources (fibres de bois, chanvre et lin) a confirmé l'évolution similaire des profils [46,54]. En revanche, les quantités de vapeur d'eau absorbées sont dépendantes des agroressources analysées. La paille est la plus hygroscopique de toutes. Cela pourrait être dû à sa structure poreuse, qui favorise la sorption de la vapeur d'eau. Ces résultats montrent aussi que la paille est la plus prédisposée à de potentiels développements fongiques suite à de longues expositions à des humidités relatives élevées.

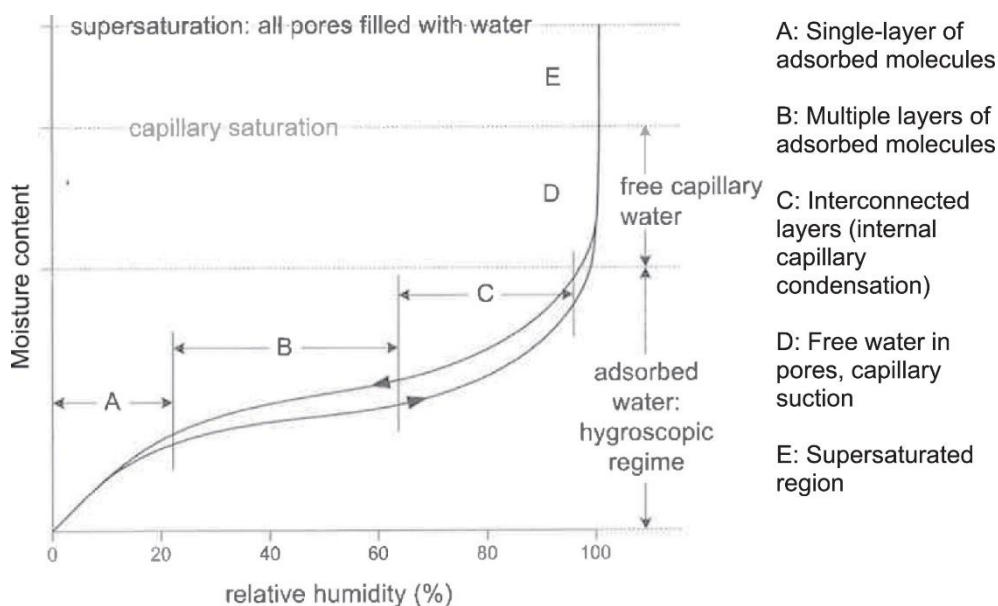


Figure 9. Interprétation de l'origine des différentes étapes de la sorption de la vapeur d'eau de la paille [12].

1.2.3.2 Valeur de la capacité de tampon hydrique (MBV)

Les analyses de la capacité de tampon hydrique sont très intéressantes pour évaluer le comportement d'un mur de paille vis-à-vis de l'humidité dans de vraies constructions. Étant hygroscopiques, les murs de paille régulent l'humidité intérieure des bâtiments par l'exercice d'un effet tampon, sous réserve d'utilisation d'enduits et de panneaux perméables à la vapeur d'eau. Ainsi, ils font face aux grandes fluctuations de l'humidité extérieure. Ce pouvoir tampon de l'humidité intérieure est caractérisé par la valeur MBV « moisture buffer value ». Elle correspond au rapport entre la quantité absorbée et désorbée de l'humidité de l'air d'une surface d'un matériau et le produit de cette surface avec la différence des deux humidités relatives auxquelles il a été exposé de manière répétitive (33 % et 75 %) [76]. La MBV d'un matériau permet de classer son pouvoir tampon de l'humidité selon le classement suivant : 0 - 0,2 g.m⁻².(% RH)⁻¹ effet tampon négligeable, 0,2 - 0,5 g.m⁻².(% RH)⁻¹ effet tampon limité, 0,5 - 1 g.m⁻².(% RH)⁻¹ effet tampon modéré, 1 - 2 g.m⁻².(% RH)⁻¹ bon effet tampon et >2 g.m⁻².(% RH)⁻¹ excellent effet tampon [76,77].

Comme la plupart des matériaux biosourcés, la paille est un bon tampon hydrique dans l'ensemble [13]. Sa valeur de MBV, dans le cas de l'orge, est estimée à 3,2 g.m⁻².(% RH)⁻¹ [70] et à 2,12 - 2,95 g.m⁻².(% RH)⁻¹ [13]. Il a d'ailleurs été démontré que la MBV de la paille d'orge est très dépendante de la densité et de la longueur des fibres de paille (Figure 10) [13]. En effet, le passage de 100 à 120 kg.m⁻³ a manifesté une baisse de la valeur de MBV de 2,95 à 2,35 g.m⁻².(% RH)⁻¹ avec les longues fibres.

De même, la valeur de MBV des fibres courtes passe de 2,54 à 2,12 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(\% \text{ RH})^{-1}$. Cela s'explique par l'écrasement de porosité de la paille sous l'effet de la pression. Ainsi, sa capacité de sorption de la vapeur d'eau et sa MBV diminuent. Concernant l'effet de la longueur des fibres, les auteurs ne l'ont pas justifié. L'hypothèse de la porosité ouverte et de la facilité de circulation de la vapeur d'eau pourrait être proposée.

Les MBV retrouvées dans la littérature ne sont pas toujours aussi attractives. Des valeurs plus faibles que celles citées précédemment sont observées avec la paille de blé, soit 0,44 et 0,59 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(\% \text{ RH})^{-1}$, respectivement avec une orientation perpendiculaire et parallèle. La différence entre ces deux résultats est expliquée par la facilité de pénétration de la vapeur d'eau dans les fibres de paille parallèles au flux [41].

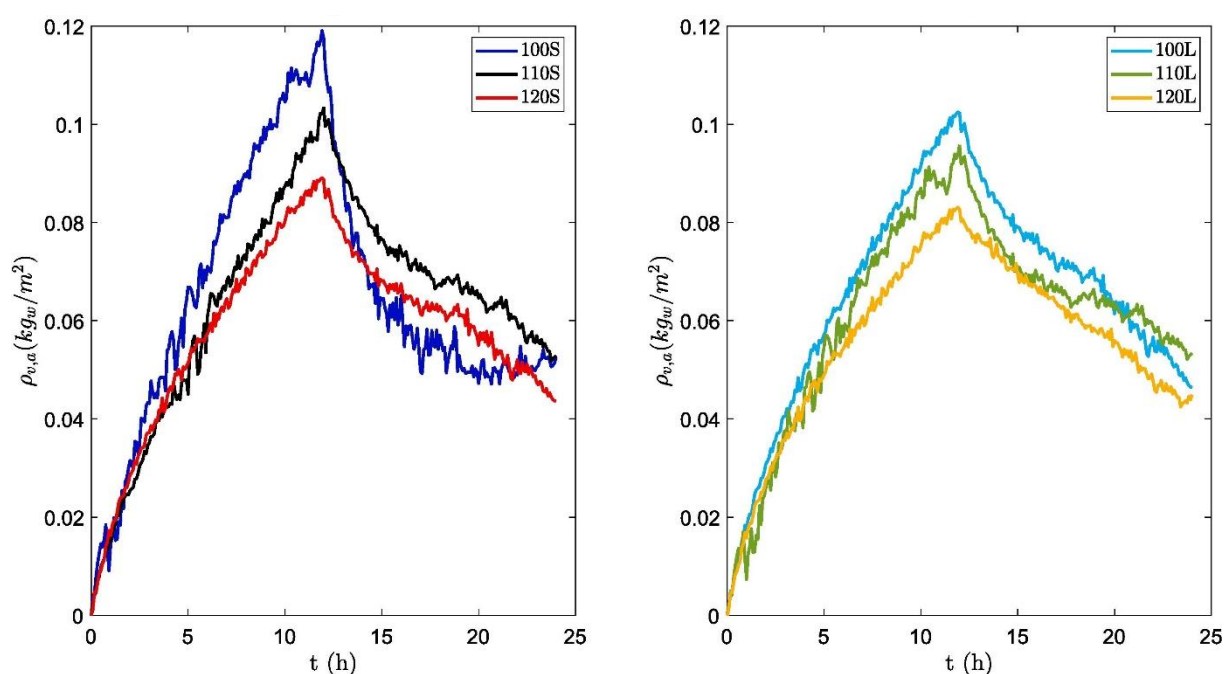


Figure 10. Comparaison de la sorption (75 % RH) et désorption (53 % RH) de la paille d'orge à deux longueurs de fibres différentes (S : fibres courtes et L : fibres longues) à différentes densités (100, 110 et 120 $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$) pour le calcul du MBV. [13]

I.2.3.3 Absorption de l'eau

L'absorption de l'eau est une technique qui permet de quantifier la capacité d'un matériau à se charger en eau après son immersion. Dans la littérature, cette propriété a été étudiée sur la paille de riz, de blé et d'orge [11,43,62]. Les profils observés sont similaires et peuvent être subdivisés en deux étapes. La première étape est linéaire et elle dure dix minutes environ. Elle est liée à la pénétration de l'eau dans les microstructures de la paille. La seconde étape est caractérisée par la perte de la linéarité

de l'évolution de l'absorption de l'eau avec une tendance vers la saturation (Figure 11). Cette étape est accompagnée par un gonflement qui cause une contrainte sur la structure interne de la paille [11].

La paille de riz entière a montré seulement environ 100 % de gain massique après 24 heures d'immersion dans l'eau [43]. Dans une autre étude spécifique aux tiges de paille de riz dépourvues de feuillage, une absorption d'eau de 312 % a été retrouvée après 48 heures d'immersion. La paille de blé et d'orge ont montré des absorptions plus conséquentes, dans un laps de temps plus restreint (60 minutes à 20°C), soit 270 - 320 % et d'environ 400 %, respectivement [11]. L'absorption faible de la paille de riz entière pourrait s'expliquer par la densité à laquelle les mesures ont été réalisées. En effet, la densité de la paille de riz (100 kg.m^{-3}) était environ 3 fois plus élevée que celle du blé et 2 fois plus que celle de l'orge. Toutefois, l'ordre de résultat entre la paille de blé et d'orge reste surprenant au regard de la densité et de la porosité de la paille d'orge. Ces paramètres sont théoriquement favorables à une plus faible absorption d'eau de la paille d'orge. Une différence dans la composition biochimique des deux espèces de paille pourrait potentiellement justifier ces résultats.

L'effet de la température sur l'absorption de l'eau de la paille a également été analysé par Bouasker et al. [11]. Ces derniers ont observé une amélioration de l'absorption de l'eau par l'augmentation de la température. Ce constat est surtout marqué lors du passage de la température de l'analyse de 10 à 20°C. Le passage d'une température de 20 à 40°C a seulement manifesté une légère augmentation de la quantité d'eau absorbée (Figure 11).

Dans les deux situations, l'absorption de l'eau de la paille est très conséquente du fait de sa polarité et de sa microstructuration. Ce taux d'absorption reflète, comme dans le cas de la sorption de la vapeur d'eau, des contenances en eau qui peuvent potentiellement provoquer des développements fongiques.

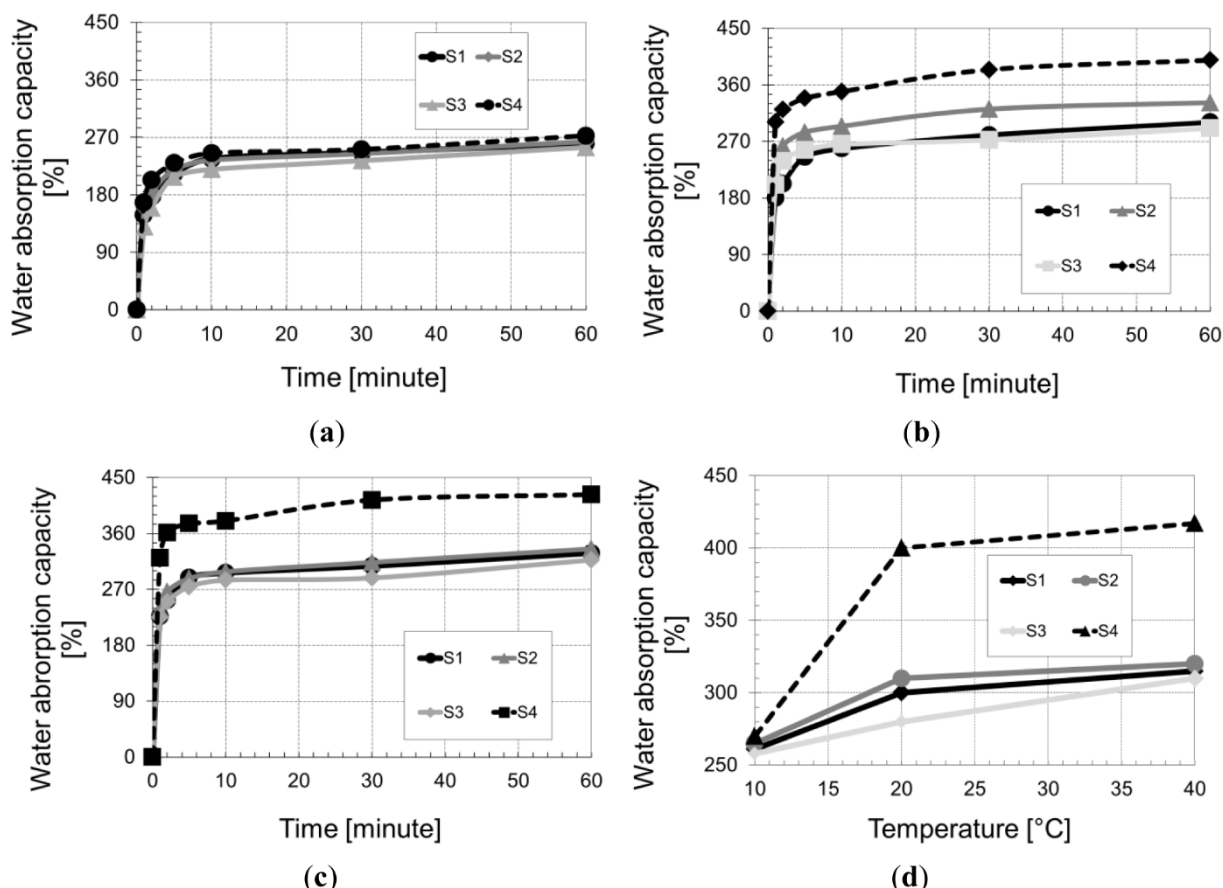


Figure 11. Absorption de l'eau de la paille de blé (S1, S2 et S3) et la paille d'orge (S4) à : a) 10°C, b) 20°C et c) 40°C, et d) le résumé de l'absorption maximale des différentes pailles en fonction de la température de l'analyse [11].

I.2.4 Décomposition thermique de la paille

I.2.4.1 Comportement au feu

La compréhension de la décomposition thermique de la paille est un paramètre clé pour son usage dans le domaine du bâtiment. Elle peut permettre d'écarter les idées reçues concernant l'inflammabilité des bâtiments réalisés en paille. Du fait de son origine végétale et de sa très faible teneur en eau, il est clair que la paille s'enflamme facilement comme la plupart des matériaux lignocellulosiques. Dans le cas d'un mur de paille, la résistance en feu devient plus élevée. En effet, la combustion est une réaction qui nécessite un carburant (la paille dans ce cas) et du dioxygène comme comburant. Par conséquent, la combustion des murs de paille de densités élevées se trouve limitée par le dioxygène [15]. La paille passe alors d'une classe de matériau très inflammable à l'état isolé, à un matériau normalement inflammable, de classe E selon le standard EN 1364-1, quand elle est utilisée dans un mur. Il faut souligner que la classe E comporte aussi les isolants traditionnels comme le polystyrène et l'amiante [6,15,55,62].

Conformément à la norme EN ISO 11925-2, Teslík et al. ont réalisé un essai d'incendie à source de flamme unique sur la paille d'une densité de 90 kg.m^{-3} [78]. La paille directement exposée à la source de flamme a montré une faible réaction au feu. En effet, la flamme sur la paille s'est directement éteinte après l'arrêt de son exposition qui a duré 15 s. Ajoutée à cela, la propagation de la flamme sur la paille (trace noire) est uniquement de 65 mm. Cette distance de propagation de feu inférieure à la valeur critique de 150 mm confirme que la paille de forte densité a réussi ce test (Figure 12).

Dans les murs de construction, la paille est souvent couverte d'une couche supplémentaire d'enduit. Bien que peu épaisse, cette couche améliore considérablement la résistance au feu du mur entier. Le test de la résistance au feu d'un mur de paille enduit à la chaux selon la norme EN 1364-1 a été réalisé par Wall et al. [79]. Ce test a montré que la couche de chaux s'est détachée de la paille uniquement après 90 min d'exposition à la chaleur. La paille est donc laissée exposée directement à une chaleur de 1000°C environ. Malgré ça, la carbonisation complète a été atteinte après 45 min supplémentaires d'exposition. La durée totale de 135 min de résistance au feu dépasse de 4 fois la durée minimale requise pour les murs de construction en Angleterre. Plusieurs autres tests ont aussi montré une bonne résistance des murs de paille aux incendies pendant 30, 90 min et même pendant deux heures [72,80]. Cela prouve encore une fois la sécurité des murs de paille contre les incendies [15]. Il convient aussi de signaler, qu'en plus de cette résistance au feu, les produits de combustion issus de l'inflammation de la paille sont beaucoup moins toxiques que les isolants traditionnels [62]. Ces paramètres réunis font de la paille un bon matériau de remplissage isolant en termes de sécurité contre les incendies.

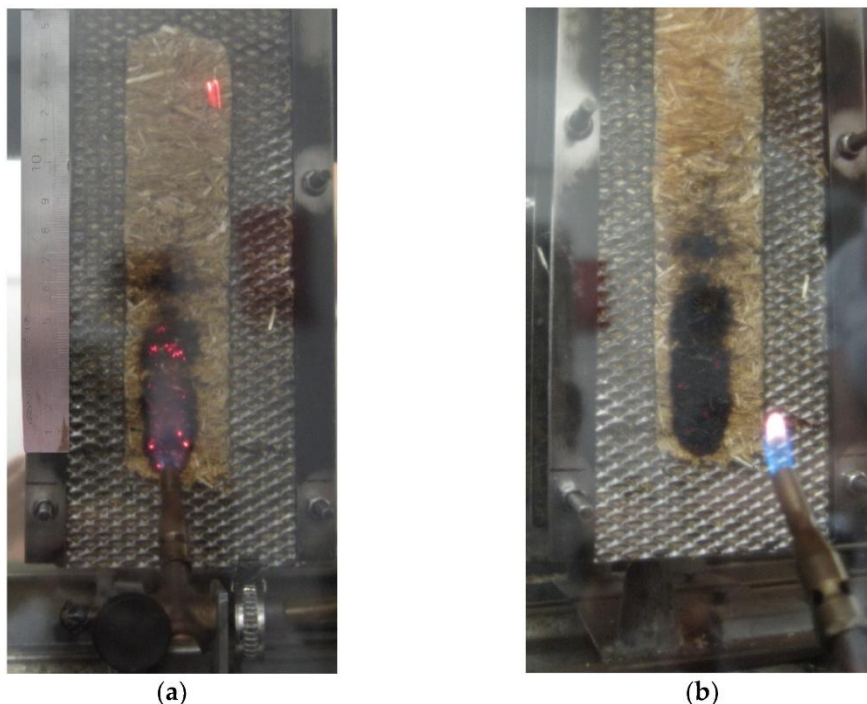


Figure 12. Test de l'exposition de la paille à une source de flamme unique a) pendant l'exposition et b) après l'exposition [78].

1.2.4.2 Pyrolyse de la paille

Pour comprendre les différentes étapes de la décomposition thermique de la paille, des tests d'analyse thermogravimétrique sont souvent réalisés. Le comportement de la paille en pyrolyse (haute température sous atmosphère inerte) est beaucoup étudié dans la littérature. Ces tests, en absence de dioxygène, sont les plus significatifs pour la compréhension de la dégradation thermique de la paille dans le cas d'un incendie.

Le profil de pyrolyse de la paille est commun à tous les matériaux lignocellulosiques [81]. Étant constituée de plusieurs molécules et macromolécules différentes, sa dégradation thermique est un cumul de ces derniers. Les thermogrammes de sa pyrolyse sont décomposés en 3 grandes étapes distinctes : la déshydratation ($T < 110^{\circ}\text{C}$), la dévolatilisation ($110 - 350^{\circ}\text{C}$) et la carbonisation ($T > 350^{\circ}\text{C}$) [82]. *i)* L'étape de la déshydratation est l'étape pendant laquelle l'eau liquide contenue dans la paille se volatilise. *ii)* L'étape de dévolatilisation concerne la dépolymérisation et la décomposition des éléments constituants de la paille. C'est la zone de la principale perte massique, car elle est liée à la dégradation des composants majoritaires qui sont l'hémicellulose et la cellulose. L'hémicellulose se décompose d'abord aux alentours de 150°C , et la cellulose vers 275°C [83]. La lignine commence aussi sa décomposition lente dans cette étape et déborde sur l'étape suivante. *iii)* La carbonisation est l'étape pendant laquelle la lignine continue de se dégrader. Une partie des produits de sa dégradation se

volatilise et une autre partie forme le char [82]. Les différentes étapes de décomposition des éléments de la paille sont peu visibles directement sur le thermogramme. En revanche, la première (DTG) et deuxième dérivée (DDTG) du thermogramme offrent une facilité d'identification des différents pics de dégradation (Figure 13).

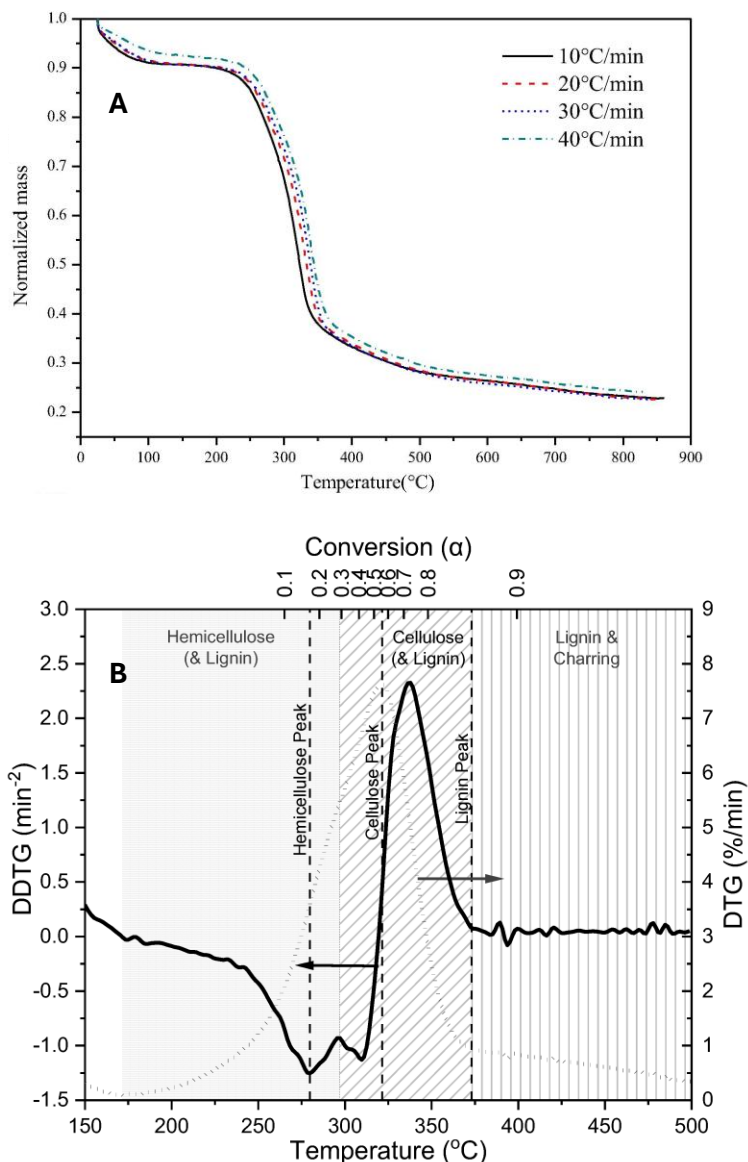


Figure 13. A) Thermogramme de la pyrolyse de la paille de colza à différentes vitesses de balayage [81], et (B) de désignation de l'ordre de décomposition des différents constituants de la paille de blé [84].

Il faut préciser que les analyses thermogravimétriques sont dépendantes de la vitesse de balayage de température imposée. Les vitesses élevées sont à l'origine d'un déplacement du thermogramme dans le sens des hautes températures (Figure 13). Ce phénomène, appelé le décalage thermique, est expliqué par la limitation du transfert thermique vers l'échantillon à haute vitesse de

balayage [85,86]. C'est pourquoi il est préférable de travailler à faible vitesse de balayage pour une meilleure précision des différentes températures de pyrolyse.

Tableau 4. Récapitulatif des températures caractéristiques de la pyrolyse de la paille de différentes espèces

Espèce de paille	Vitesse de Balayage de température (°C.min ⁻¹)	Température de début de pyrolyse (°C)	Température de la vitesse maximale de pyrolyse (°C)	Réf
Blé	15	215	321	[87]
Blé	10	248*	349	[83]
Blé et orge	10	-	329	[11]
Colza	10	151	-	[81]
Orge	30	230	329	[88]
Riz	5	≈ 177	-	[85]
Riz	5	220	304	[89]
Soja	5	180	340	[90]
Triticale	10	247*	339	[83]

* Température de début de pyrolyse déterminée par la méthode des tangentes « onset »

L'analyse thermogravimétrique de la pyrolyse de différentes espèces de paille, telles que la paille de blé, de colza, d'orge, de riz, de soja et de triticale, est fréquente dans la littérature (Tableau 4). Les analyses ont montré que le profil global de pyrolyse des différentes pailles dans les différentes conditions est sensiblement le même. En moyenne, la température de début de dégradation thermique des différentes pailles se situe autour de 200°C. Des petites exceptions existent notamment avec la paille de colza qui se dégrade à partir de 151°C [75]. La paille de blé et la paille de triticale montrent également un début de pyrolyse très élevé par rapport aux autres [83]. En effet, la méthode de la sélection de cette température de début de pyrolyse semble être différente de celle des autres. Les auteurs se sont appuyés sur la méthode de tangentes « onset » qui donne des valeurs intrinsèquement plus élevées par rapport aux autres méthodes. En résumé, cette différence de température n'est pas liée à une différence de la pyrolyse de la matière, mais plutôt à la différence de la méthode de traitement des thermogrammes. Une méthode plus normalisée de la sélection de la température de début de pyrolyse devrait être utilisée pour une meilleure comparabilité des résultats. Quant à la température de la vitesse maximale de dégradation thermique, qui correspond à la zone de dégradation de la cellulose, elle se situe aux alentours de 330°C pour l'ensemble des pailles analysées.

I.2.4.3 Combustion de la paille

Les analyses thermogravimétriques peuvent également être réalisées en condition oxydantes, en présence de dioxygène. Ces analyses, dites de combustions, sont plus rarement abordées dans la littérature que les analyses de pyrolyse. Les profils des thermogrammes de combustion ressemblent légèrement à ceux de la pyrolyse avec une étape supplémentaire d'oxydation. Nath et al. [91] ont décomposé les thermogrammes de combustion de la paille en quatre étapes (Figure 14). i) L'étape de déshydratation qui se produit avant 110°C. ii) L'étape de l'oxydation et de la dégradation des composants principaux de la paille comme l'hémicellulose et la cellulose se produit de 110 à 350°C. Cette étape est spécifique à la combustion. iii) L'étape de combustion et de dégradation des produits volatils se produit de 350 à 550°C. iv) Enfin, à partir de 550°C, c'est la combustion de la lignine.

La température de début de la combustion de la paille de blé, avec une vitesse de balayage de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, est de 172°C. La même température obtenue par la méthode des tangentes « onset », est quant à elle estimée dans ces travaux à 227°C. Cela confirme une influence majeure de la méthode de traitement des thermogrammes comme expliquée dans le chapitre de la pyrolyse. La température de la vitesse maximale de combustion est de 292°C [91]. Dans d'autres études, la paille de blé a présenté un début de dégradation à 197 et 198°C [92,93]. La même analyse réalisée sur la paille de riz a révélé des valeurs caractéristiques de combustion très écartées. Une température de début de combustion de 160°C est trouvée par Tang et al. [94] tandis qu'une température plus élevée estimée à 230°C est retrouvée par Zhaosheng et al. [93]. La température correspondant à la vitesse maximale de combustion est estimée à 300°C [94].

Ces différentes températures sont clairement plus faibles que ce qu'on a rencontré en pyrolyse. Le phénomène d'oxydation qui favorise la dégradation des produits explique cette différence. La quantité de charbon générée à la fin des analyses est également différente. En effet, la pyrolyse est favorable à une formation du charbon très sensible à la combustion.

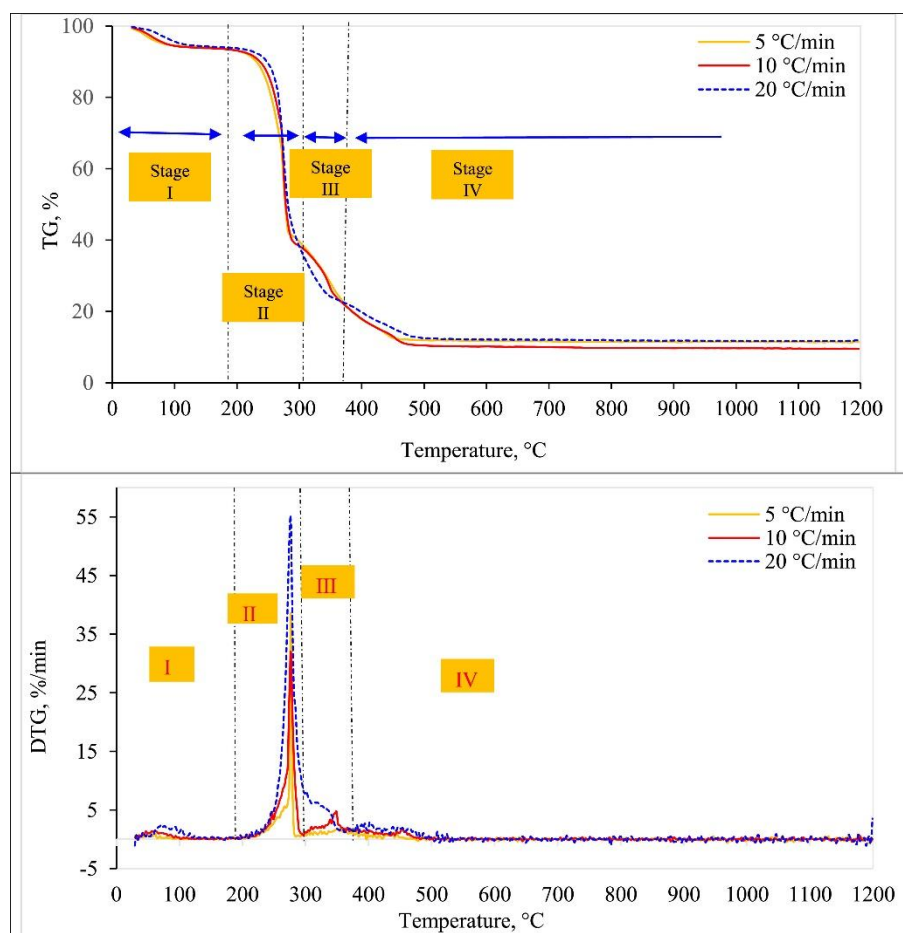


Figure 14. Profil de combustion de la paille de blé [91].

I.2.5 Mesure du pH de la paille

La mesure du pH de la paille (dans l'eau) est une caractéristique intéressante pour prédire la durabilité de la paille face aux micro-organismes. Comme expliqué précédemment, la paille est vulnérable à la croissance fongique et bactérienne dans des conditions extrêmes d'humidité (au-delà de 14 % d'humidité) [49]. Il a été démontré que la paille possédant une valeur de pH très éloignée de la neutralité est plus favorable à un développement fongique. Ceci est le constat de Bouasker et al. qui a comparé le développement fongique de la paille d'orge ayant un pH de 8,3 (ajusté artificiellement) à une autre ayant un pH neutre [2,11]. La valeur de pH de la paille de blé a également été mesurée dans d'autres travaux de recherche. Elle a été estimée à pH 7,29 [95] et à pH 7,5 [96]. Ces valeurs de pH sont neutres, ce qui indique un développement fongique qui pourrait potentiellement être retardé dans des conditions d'humidité critiques.

I.2.6 Propriétés acoustiques de la paille

Les propriétés d'isolation phonique sont intéressantes pour le secteur du bâtiment. Des matériaux de construction capables d'absorber les nuisances sonores extérieures sont plus appréciés

pour un meilleur confort acoustique. Il existe même des standards qui permettent de classer les performances acoustiques en fonction de deux paramètres principaux : l'indice de réduction du bruit apparent (R'_w), et la différence de niveau pondérée normalisée ($D_{2m,nt,w}$) [48].

Trabelsi et Kammoun ont testé l'isolation sonore d'un mur de paille de 19 et 45 cm et avec une densité de 120 Kg.m^{-3} . Ils ont montré que la réduction sonore obtenue est très intéressante et dépendante à la fois de l'épaisseur du mur ainsi que de l'onde sonore émise [97]. A 4000 Hz, ils ont montré que la réduction sonore est de 56 dB pour le mur de 19 cm et de 58 dB pour celui de 45 cm. La comparaison de la réduction sonore de ces murs avec celle d'un mur de pierre a montré un écart significatif en faveur du mur de paille. Bien que la réduction sonore soit inférieure à celle des autres matériaux de construction conventionnels, qui est de 60 dB, les murs de paille sont classés comme de bons isolants phoniques. En effet, cette classe d'isolation phonique est attribuée par un standard italien UNI 11367 lorsque la $R'_w > 50 \text{ dB}$ [51]. D'autres études ont démontré qu'un mur de paille de 46 cm avec une couche d'argile de 2,5 et de 3,5 cm exerce également une réduction sonore de 53 dB [2]. Dans le cas d'un mur de paille de blé d'une épaisseur de 20 cm sans enduit, la réduction sonore observée est de 49 dB et la différence de niveau pondérée normalisée est de 43 dB [47,48]. N'ayant pas été classé comme un bon isolant phonique, les auteurs ont suggéré que l'addition de deux plaques de plâtre de 2,5 cm d'épaisseur de part et d'autre augmenterait la réduction sonore du mur de paille à 54 dB. Le mur de paille pourrait ainsi monter en grade à la classe de bon isolant acoustique. Concernant le $D_{2m,nt,w}$, la valeur est suffisante au regard du standard qui requière une valeur supérieure ou égale à 43 dB pour une classe de bon isolant phonique [47]. L'hypothèse d'addition des couches de plâtre de 2,5 cm minimum n'est pas confirmée par les travaux de D'alessandro. Ces derniers ont montré qu'un mur de paille de 51 cm d'épaisseur avec 45 cm de paille et une couche de 6 cm d'un mélange de terre et de chaux n'était quand même pas suffisant pour atteindre une réduction sonore supérieure à 50 [51,98]. Toutefois, le $D_{2m,nt,w} = 48 \text{ dB}$ est suffisant [51,98]. D'autres travaux ont aussi confirmé que les performances acoustiques des murs de paille ne sont pas toujours satisfaisantes. Seulement une réduction sonore de 44 dB est observée pour un mur de 35 cm de paille couvert d'une couche de chaux de 3,5 cm [99].

I.2.7 Propriétés mécaniques de la paille

De par l'usage de la paille dans des murs porteurs, les propriétés mécaniques de cette dernière sans couches de plâtre ont fait l'objet d'étude pour évaluer leurs déformations et élasticité [2]. Il existe cependant très peu de littérature concernant les différentes propriétés mécaniques de la paille brute. Ashour et al. étaient les premiers à s'intéresser aux comportements de la paille de blé (densité de $102,6 \text{ kg.m}^{-3}$) à la compression [100]. Ils ont démontré que la paille est fortement déformable, quelle que soit

son orientation par rapport à la compression. L'augmentation de la charge a engendré une déformation ascendante quasiment linéaire. À 10 kN, une déformation respective de 0,2 et 0,25 a été retrouvée avec les fibres de paille parallèles et perpendiculaires. Cet écart de déformation a été attribué à l'orientation des fibres et à une différence de la surface des balles de paille testées. Une autre étude de déformation de la paille aux deux orientations et avec une densité allant de 83 à 97 kg.m⁻³ a également été réalisée [101]. La paille perpendiculaire était significativement plus déformable que celle qui est parallèle au sens de la compression. Les auteurs ont, en plus de cela, constaté une linéarité de la déformation de la paille de 2 à 10 kN de charge avec une superposition des résultats avec ceux de Ashour et al. [100]. Au-delà des 10 kN, la linéarité était perdue. L'augmentation de la résistance à la compression imposée aux fortes densités de paille explique ce phénomène. À la suite des tests de compressibilité, les densités initiales de la paille sont retrouvées, ce qui prouve la réversibilité de ces tests.

Les modules d'élasticité des ballot de paille ont également été calculés par Ashour et al. [100]. Ils ont démontré une baisse du module d'élasticité de 700 à 200 kPa à la suite du passage de 2 à 10 kN. La même gamme des modules d'élasticités (200 – 800 kPa) est également retrouvée par Forêt et al. [102]. Néanmoins, des modules d'élasticités plus faibles à une charge légèrement plus élevée sont retrouvés dans d'autres travaux [101].

II. Caractéristiques de la balle

La balle est un autre coproduit céréalier qu'on retrouve sous forme de capsule sur les graines et se différencie en fonction de son espèce (Figure 15). Son rôle physiologique est la protection des graines contre les attaques fongiques et bactériennes [103]. En raison de la production élevée de céréales, les balles sont aussi produites en très grande quantité. En Europe, la balle de blé est la plus produite avec une quantité allant jusqu'à 30 millions de tonnes. Elle constitue 20 % de coproduits de la production totale de blé [104]. Comme la paille, la valorisation de la balle peut diminuer l'impact carbone du secteur de son utilisation d'une part, et éviter son élimination par incinération d'autre part [104].

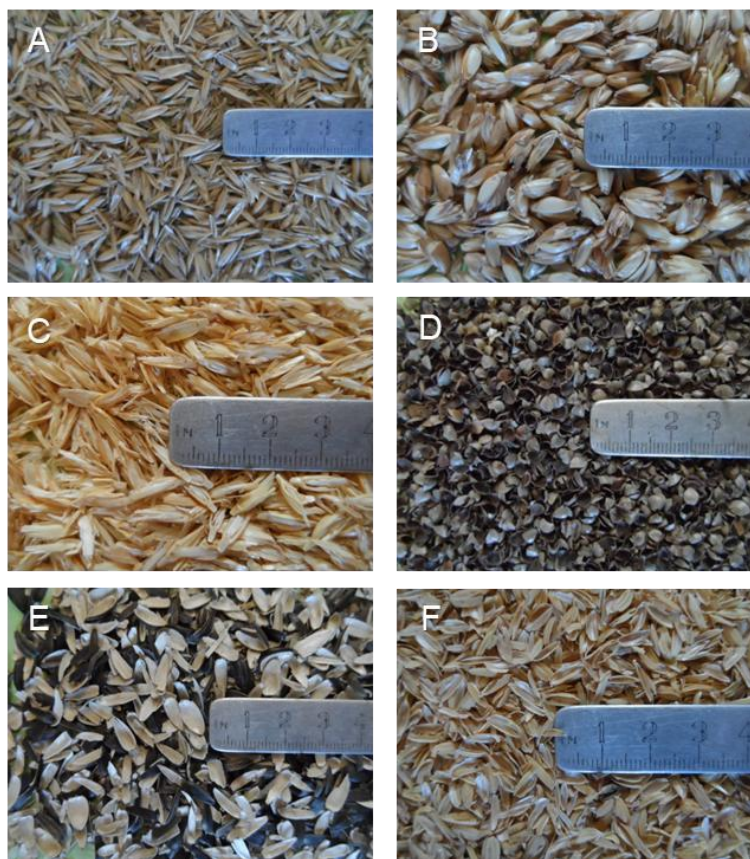


Figure 15. Photos de balles de : A) avoine, B) grand épeautre, C) petit épeautre, D) sarrasin, E) tournesol et F) riz [105].

II.1 Structure et composition biochimique de la balle

II.1.1 Composition structurale de la balle

La balle se présente comme une coiffe protectrice des graines de céréales. Elle est souvent de forme ovale (Figure 16 a et b). Elle présente des dimensions de $9,51 \pm 0,76$ à $26,08 \pm 3,31$ mm de longueur et de $3,77 \pm 0,42$ à $4,71 \pm 1,38$ mm de largeur dans le cas de la paille de blé [104,106]. La forme ovale des balles n'est pas toujours conservée lors de leur séparation mécanique des graines par battage. Ce procédé mécanique engendre des cassures et une forte disparité dans les tailles des balles [104,106]. La surface externe de la balle de blé présente des extensions cellulaires connues sous le nom de trichome (Figure 16 c et f). Ces derniers ressemblent aux extensions de la surface externe de la paille de riz (chapitre I.1). Les trichomes sont aussi présents en faible abondance sur la surface interne de la balle. On trouve aussi, dans cette dernière, quelques extensions cellulaires avec des stomates qui assurent les échanges gazeux avec l'environnement externe (Figure 16 d). Mais dans l'ensemble, la surface interne reste moins rugueuse que l'externe.

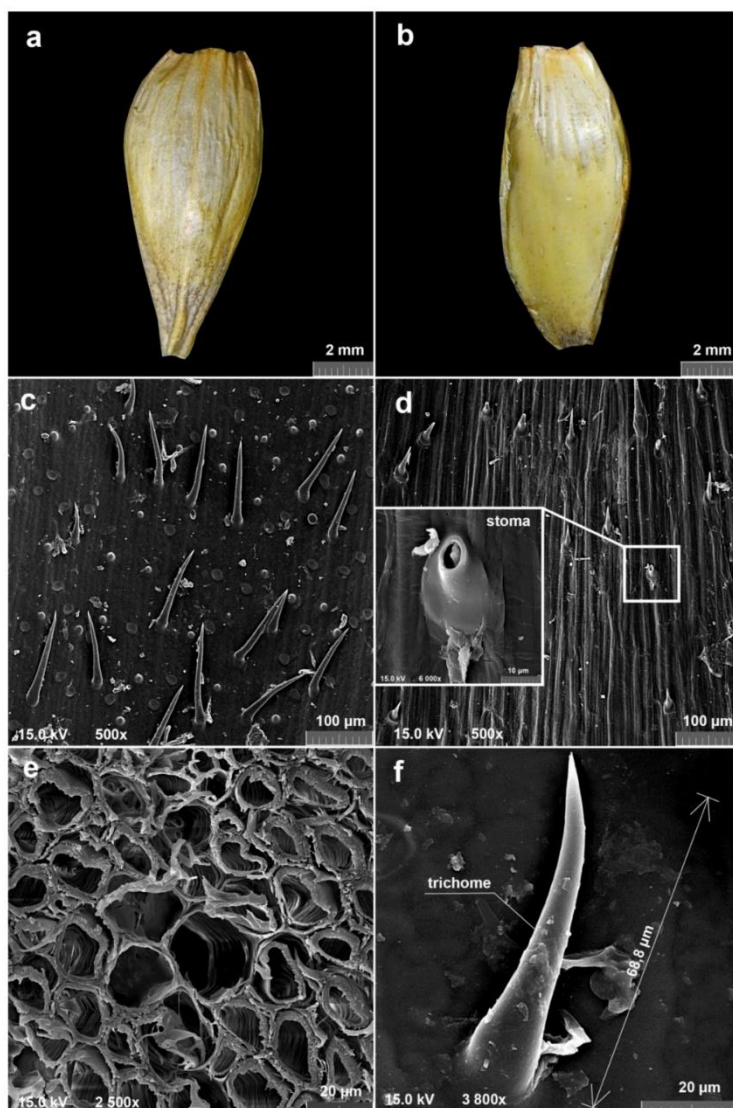


Figure 16. Images obtenues par microscopie optique (a et b) et par microscopie électronique à balayage (c et d) de la surface extérieure (a et c) et intérieure (b et d) de la balle de blé et l'image obtenue par microscopie électronique à balayage de la section radiale (e) et d'un trichome de la balle de blé (f). [104].

La section radiale de la balle de blé présente également une structure très poreuse et aérée, comme la paille (Figure 16 e) [104]. La porosité mesurée retrouvée pour une balle de blé en tas contenant 10 % d'humidité est de 76 % [106]. Cette valeur est nettement inférieure à celles de la paille brute non compactée qui sont de l'ordre de 90 à 98 % (Tableau 1). La densité de la balle de blé non compactée a été estimée à 104 kg.m^{-3} selon Pavelek et al. [104] et à 142 kg.m^{-3} selon Barbieri et al. [107]. Ces densités, supérieures à celles de la paille non compactée, sont logiquement expliquées par la différence de porosité et le volume de vide occupé par le lumen dans le cas de la paille [19]. Comparée aux matériaux de construction conventionnels, comme le béton standard (2400 kg.m^{-3}), la balle reste considérée comme légère [108].

II.1.2 Composition biochimique de la balle

La composition biochimique montre dans l'ensemble les mêmes proportions que ce dont nous avons précédemment discuté avec la paille (Tableau 5). La cellulose est le composé majoritaire. Elle est suivie par l'hémicellulose, puis par les composés solubles et par la lignine. Le même ordre n'est pas retrouvé dans les travaux de Mann et al. [109]. Ces derniers ont démontré une très forte proportion des composés solubles à hauteur de 77 % et une très faible proportion de la cellulose. Les résultats du tableau montrent également une forte disparité de la composition de la balle d'une même espèce, notamment dans le cas de la balle de blé [109–111] et de riz [112,113]. De plus, la proportion des cendres de la balle de riz est supérieure à la balle de blé. Ce constat, qui concorde avec les discussions menées précédemment, s'explique par la forte proportion de silice présente dans la plante de riz [22].

Tableau 5. Composition biochimique de la balle en fonction son espèce.

Balle	Pays d'origine	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Extractibles (%)	Protéine (%)	Cendres (%)	Réf
Orge	Canada	-	32,3	-	-	8,0	-	
Orge	Canada	-	34,8	-	-	7,2	-	[110]
Blé	Canada	-	39,5	-	-	6,1	-	
Avoine	Canada	-	30,2	-	-	7,5	-	
Blé	Canada	6,6	48,3	-	77,0	5,7	-	[109]
Blé	-	39	30	16	9	-	6	[111]
Gand épeautre	Allemagne	36	18	16	20	-	10	[114]
Grand épeautre	-	32,6	38,3	6,2	16,4	-	6,4	[115]
Riz	Inde	31,3	24,3	14,3	8,4	-	23,5	[112]
Riz	Etat Unis et Afrique de l'ouest	25,9 – 35,5	18,1 – 21,4	24,9-31,4	-	-	18,2-24,6	[113]

II.2 Physicochimie de la balle

II.2.1 Conductivité thermique de la balle

La conductivité thermique de la balle, à l'état brut, est peu étudiée dans la littérature. Les seuls résultats que nous avons trouvés sur la balle de blé sont ceux de Pavelek et al. [104]. Une conductivité thermique de $0,047 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 15°C pour une densité de 104 Kg.m^{-3} a été mesurée. Dans une autre étude, la conductivité thermique de la balle de riz a été estimée à $0,041 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une densité de $101,7 \text{ kg.m}^{-3}$ [116]. Les mêmes auteurs ont montré, comme dans le cas de la paille, une influence négative de la teneur en eau sur la conductivité thermique de la balle de riz. Ils ont observé un passage de $0,041$ à $0,078 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, suite à l'augmentation de la teneur en eau de $11,5$ à $21,2 \%$ [116]. En accord

avec ces résultats, d'autres auteurs ont mesuré une conductivité thermique de la balle de riz à une densité de 130 à 170 kg.m^{-3} et une teneur en eau de 8,68 à 10,68%, et ils l'ont estimée à 0,040 - 0,041 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [117]. Des travaux de recherche, qui s'intéressent plutôt aux panneaux de particule de la balle de riz, ont montré des conductivités thermiques très proches de la balle brute. Des valeurs comprises entre 0,046 et 0,057 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ont été mesurées avec des densités de panneaux allant de 154 à 168 kg.m^{-3} à différentes températures sont mesurées [34,118].

Ces conductivités thermiques inférieures à 0,05 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, dans les conditions de mesure optimales, démontrent un grand potentiel de la balle de riz dans le domaine de construction en tant que matériau isolant [34].

II.2.2 Capacité thermique massique de la balle

La capacité thermique de la balle a été introduite pour la première fois par Mishra et al. [119]. Les auteurs l'ont estimée sur la balle de riz à différentes teneurs en eau. Ils ont ainsi conclu une capacité thermique de 1213 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une teneur en eau de 10 % et 2301 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une teneur en eau de 21%. Ces résultats sont expliqués par la grande capacité thermique massique de l'eau [119]. Les auteurs ont aussi montré que le broyage fin de la balle de riz (diamètre inférieur à 0,71 mm) est bénéfique pour sa capacité thermique. Ils ont constaté un passage de 1213 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 1632 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ après le broyage et tamisage à 0,71 mm. Dans une autre étude, la capacité thermique de la balle de blé en fonction de la température et du broyage a été recherchée [104]. Comme attendu, la capacité thermique massique augmente linéairement avec la température (Figure 17). À faible température, la capacité thermique massique de la balle broyée est plus élevée que celle non broyée. Cet écart diminue graduellement en fonction de la température jusqu'à superposition vers 30°C. Au-delà de cette température, un début de l'inversement de la tendance est retrouvé. À 25°C, la capacité thermique massique de la balle non broyée est estimée à 1800 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre 1900 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la balle broyée.

Ajoutée à la conductivité thermique de la balle, sa capacité thermique massique semble être intéressante pour l'isolation thermique des bâtiments vu qu'elle est très proche ou dépasse largement la consigne minimale de 1400 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [34].

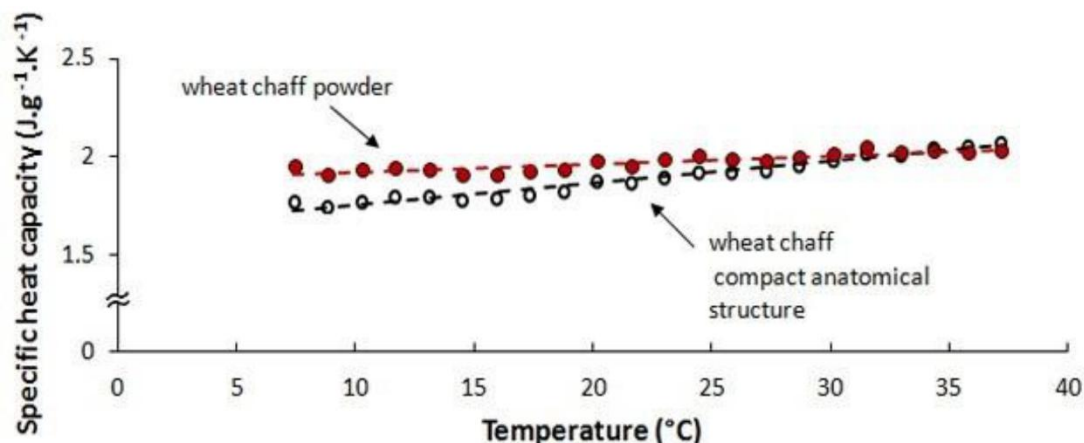


Figure 17. Évolution de la capacité thermique massique de la balle de blé broyée (cercles rouges pleins) et non broyée (cercles noirs vides) en fonction de la température [104].

II.2.3 Propriétés hygroscopiques de la balle

Les propriétés hygroscopiques de la balle brute sont peu étudiées dans la littérature, comparée à celle de la paille. À notre connaissance, uniquement l'absorption de l'eau de la balle de blé a été comparée à celle de la chènevotte (Figure 18) [107]. Les résultats ont montré une absorption logarithmique de l'eau sur 48 h d'immersion. Ce comportement est exactement le même que celui décrit avec la paille dans le chapitre 1.2.3.3 et avec les agroressources de façon générale [11]. Les auteurs ont montré qu'après les 48 h d'analyse, une absorption maximale qui avoisine les 250 % a été retrouvée. Cette dernière avoisine les résultats trouvés avec la paille, mais reste beaucoup moins élevée que celle de la chènevotte qui est d'environ 410 %. La différence de la vitesse et du taux d'absorption maximal est liée à la différence de la structuration interne des deux matières. La chènevotte présente une porosité connectée qui facilite l'absorption de l'eau, contrairement à la balle de blé qui est plus individualisée.

Le comportement hygroscopique de la balle confirme sa forte affinité vis-à-vis de l'eau. Il est donc très prévisible d'avoir une forte sorption de la vapeur d'eau avec la balle, comme ce qui a été décrit avec la paille. Pour ce qui est du MBV, il est très difficile de la prédire avec aussi peu d'information. Des analyses dédiées devraient être faites pour confirmer le potentiel de la balle dans la régulation de l'humidité interne des bâtiments face aux grosses variations de l'humidité environnante.

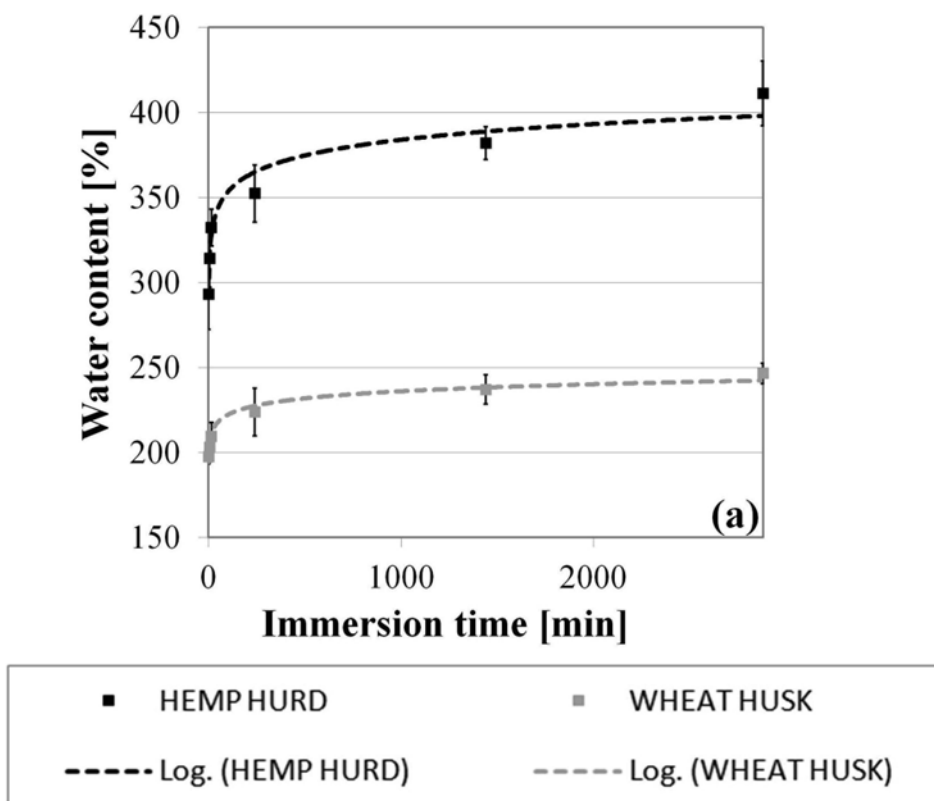


Figure 18. Profil de l'absorption d'eau de la balle de blé (gris) et de celui de la chènevotte (noir) pendant 48 h [107].

II.2.4 Décomposition thermique de la balle

La décomposition thermique de la balle a été étudiée dans la littérature sous condition inerte (pyrolyse). Étant donné sa composition lignocellulosique, la balle présente exactement le même thermogramme de pyrolyse que la paille. On distingue alors une étape de déshydratation aux alentours des 100°C. Cette dernière est suivie par une perte massique significative relative à la décomposition de l'hémicellulose, de la cellulose et ensuite de la lignine. Les températures de début de pyrolyse de la balle de riz sont de 200 et 230°C [117,120]. Dans une autre étude, la résistance à la température de la balle de riz s'est montrée plus élevée que celle de la pyrolyse de la paille d'orge testée dans les mêmes conditions, ainsi que les autres pailles abordées dans la section 1.2.4.2. Les auteurs ont montré que la température de début de pyrolyse commence à 268°C pour la balle de riz et à 230°C pour la paille d'orge [88].

Dans les exemples de pyrolyse des balles de riz étudiées dans ce chapitre, nous remarquons une quantité de char d'environ 40 % à l'issue de l'analyse. Cette propriété pourrait ne pas être anodine en cas d'incendie. Bien que carbonisé, le char pourrait jouer un rôle de barrière physique qui empêche la propagation des flammes aux autres éléments de la construction (ex. ossature en bois).

La combustion de la balle est également semblable à celle des autres matériaux lignocellulosiques. La température de début de combustion est variable en fonction du type de la balle de riz analysé. Des valeurs allant de 202 à 230°C ont été retrouvées avec une vitesse de balayage de 10°C.min⁻¹ [120,121].

Le comportement au feu de la balle brute n'est pas étudié dans la littérature à notre connaissance. Mais étant donné sa composition lignocellulosique, la balle pourrait présenter une bonne inflammabilité à l'état brute et une bonne résistance au feu à forte densité par manque de comburant, tout comme la paille. Ces hypothèses restent à confirmer expérimentalement dans le cadre du projet POP2030.

Conclusion générale

La paille et la balle sont des matériaux lignocellulosiques peu chers potentiellement exploitables à grande échelle dans le secteur du bâtiment. Leur usage permet de réduire l'impact carbone des constructions et de bénéficier de leurs différentes propriétés.

L'isolation thermique de la paille et de la balle est comparable à celle des matériaux d'isolation conventionnels. La propriété hygroscopique est un autre atout. La capacité de stockage de la vapeur d'eau, prouvée par la mesure de sorption/désorption, peut agir pour réguler l'humidité environnante et la transporter pour améliorer le confort intérieur. Elle peut même jouer un rôle de tampon pour faire face aux variations extrêmes de l'humidité externe des bâtiments. Cela est prouvé par un ordre de valeur du facteur MBV qui classe la paille comme un matériau à bon pouvoir tampon de l'humidité. Pour ce qui est de la balle, son effet tampon de l'humidité n'a pas été recherché à notre connaissance. La paille présente également de bonnes propriétés mécaniques. Les propriétés acoustiques sont correctes et peuvent être perfectibles, si nécessaire, par l'addition d'éléments supplémentaires, comme des plaques d'enduit.

La plus grande appréhension qu'a le grand public par rapport à la construction avec des agroressources est certainement leur résistance au feu et le développement fongique. Les résultats rapportés dans ce manuscrit confirment la bonne inflammabilité de la paille prise à l'état brut. En revanche, la paille utilisée à forte densité pour la construction est normalement inflammable (classe E).

La littérature scientifique concernant la paille et ses différentes propriétés structurelles et physicochimiques valide la conformité de ce matériau pour la construction. Cependant, la bibliographie

scientifique sur la physicochimie de la balle reste restreinte. Il n'existe que quelques exemples de sa conductivité et décomposition thermique et de ses propriétés hygroscopiques. Des expérimentations de sorption et de désorption de la vapeur d'eau et des mesures de MBV sont essentielles pour valider le comportement de la balle dans la construction. Il n'existe également aucun test au feu qui a été réalisé dans la littérature scientifique à notre connaissance. En revanche, l'entreprise « bâtir en balle » a montré une classification C des murs de balle de riz. La garantie expérimentale de la sécurité des murs des autres espèces de balle vis-à-vis du feu devrait donc être prouvée. Les propriétés mécaniques et acoustiques sont également intéressantes à étudier. Avec l'ensemble de ces études, l'usage de la balle dans la construction devrait être facilement adopté.

Il est intéressant de mentionner que des erreurs de traduction sont très souvent rencontrées dans le report des noms des espèces de paille et de balle. Cela concerne principalement le blé commun (*wheat*) et les épeautres (*Spelt* et *wheat spelt*) qui appartiennent à la famille des Triticums. Les épeautres (petit, moyen et grand épeautre) sont des espèces anciennes, tandis que le blé communément utilisé de nos jours est le résultat de plusieurs croisements génétiques de ces anciennes espèces. Dans certaines régions de l'Europe, les anciennes espèces de blé sont ancrées dans les habitudes alimentaires des populations et restent encore très produites. Cela concerne par exemple l'Italie qui produit du moyen épeautre et les pays du nord de l'Europe comme l'Allemagne [114] qui produisent beaucoup de grand épeautre. Ces espèces sont appelées « blé » malgré la différence visuelle marquée avec le blé commun. Cette appellation pourrait être une source sérieuse de confusion et d'erreurs dans le processus commun de transfert du savoir. Il est par conséquent recommandé d'utiliser les appellations scientifiques des espèces des plantes de la paille et de la balle.

Références

- [1] Y. Singh, S. Sharma, U. Kumar, P. Sihag, P. Balyan, K.P. Singh, O.P. Dhankher, Strategies for economic utilization of rice straw residues into value-added by-products and prevention of environmental pollution, *Sci. Total Environ.* 906 (2024) 167714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167714>.
- [2] G. Tlaji, S. Ouldboukhitine, F. Pennec, P. Biwole, Thermal and mechanical behavior of straw-based construction: A review, *Constr. Build. Mater.* 316 (2022) 125915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125915>.
- [3] G. Tlaji, P. Biwole, S. Ouldboukhitine, F. Pennec, Effective thermal conductivity model of straw bales based on microstructure and hygrothermal characterization, *Constr. Build. Mater.* 387 (2023) 131601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131601>.
- [4] M. Mehravar, A. Veshkini, S. Veisheh, R. Fayaz, Physical properties of straw bale and its effect on building energy conservation and carbon emissions in different climatic regions of Iran, *Energy Build.* 254 (2022) 111559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111559>.
- [5] T. Ashour, W. Wu, Using barley straw as building material, in: *Barley Prod. Cultiv. Uses*, Nova Science Publishers, Inc, (2011).
- [6] C. Giron, Rumeurs de paille : la construction paille en Pays de la Loire, porteuse de changements ?, (2016) 135.
- [7] S. Goodhew, J. Carfrae, P. De Wilde, Briefing: Challenges related to straw bale construction, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Eng. Sustain.* 163 (2010) 185–189. <https://doi.org/10.1680/ensu.2010.163.4.185>.
- [8] N. Belloir, La construction paille - Systèmes constructifs, *Tech. Bâtiment. Envel. Bâtiment.* (2024). <https://doi.org/10.51257/a-v1-tba1932>.
- [9] N. Sharma, B.J. Allardyce, R. Rajkhowa, R. Agrawal, Rice straw-derived cellulose: a comparative study of various pre-treatment technologies and its conversion to nanofibres, *Sci. Rep.* 13 (2023) 16327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43535-7>.
- [10] S.K. Wiśniewska, J. Nalaskowski, E. Witka-Jeżewska, J. Hupka, J.D. Miller, Surface properties of barley straw, *Colloids Surf. B Biointerfaces* 29 (2003) 131–142. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(02)00178-9).
- [11] M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha, M. Al-Mukhtar, Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications, *Materials* 7 (2014) 3034. <https://doi.org/10.3390/ma7043034>.
- [12] X. Yin, M. Lawrence, D. Maskell, M. Ansell, Comparative micro-structure and sorption isotherms of rice straw and wheat straw, *Energy Build.* 173 (2018) 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.033>.
- [13] J.C. Castañeda Múnera, L. Gosselin, Impact of density, relative humidity, and fiber size on hygrothermal properties of barley straw for building envelopes, *Constr. Build. Mater.* 409 (2023) 133954. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133954>.
- [14] H. Yu, R. Liu, D. Shen, Z. Wu, Y. Huang, Arrangement of cellulose microfibrils in the wheat straw cell wall, *Carbohydr. Polym.* 72 (2008) 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.035>.
- [15] Y. Zhou, A. Trabelsi, M. El Mankibi, A review on the properties of straw insulation for buildings, *Constr. Build. Mater.* 330 (2022) 127215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127215>.
- [16] P. Hornsby, E. Hinrichsen, K. Tarverdi, Preparation and properties of polypropylene composites reinforced with wheat and flax straw fibres: Part I Fibre characterization, *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 443–449. <https://doi.org/10.1023/A:1018521920738>.
- [17] D. Csanády, O. Fenyvesi, B. Nagy, Heat transfer in straw-based thermal insulating materials, *Materials* 14 (2021) 4408. <https://doi.org/10.3390/ma14164408>.

- [18] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, T. Langlet, Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 102 (2016) 679–687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.
- [19] M. Viel, F. Collet, C. Lanos, Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material, *Ind. Crops Prod.* 120 (2018) 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.
- [20] M. Carrier, A. Loppinet-Serani, D. Denux, J.-M. Lasnier, F. Ham-Pichavant, F. Cansell, C. Aymonier, Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass, *Biomass Bioenergy* 35 (2011) 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.067>.
- [21] J.O. Titiloye, M.S. Abu Bakar, T.E. Odetoeye, Thermochemical characterisation of agricultural wastes from West Africa, *Ind. Crops Prod.* 47 (2013) 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.011>.
- [22] P.J. Van Soest, Rice straw, the role of silica and treatments to improve quality, *Anim. Feed Sci. Technol.* 130 (2006) 137–171. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.01.023>.
- [23] R.-C. Sun, J. Tomkinson, Appendix 1. Essential Guides for Isolation/Purification of Polysaccharides, in: *Encycl. Sep. Sci.*, Elsevier, (2000) pp. 4568–4574. <https://doi.org/10.1016/B0-12-226770-2/07271-9>.
- [24] R. Sun, Fractional and structural characterization of hemicelluloses isolated by alkali and alkaline peroxide from barley straw, *Carbohydr. Polym.* 49 (2002) 415–423. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00349-6](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00349-6).
- [25] J.X. Sun, F. Xu, X.F. Sun, B. Xiao, R.C. Sun, Physico-chemical and thermal characterization of cellulose from barley straw, *Polym. Degrad. Stab.* 88 (2005) 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.12.013>.
- [26] M. Dilamian, B. Noroozi, A combined homogenization-high intensity ultrasonication process for individualizaion of cellulose micro-nano fibers from rice straw, *Cellulose* 26 (2019) 5831–5849. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02469-y>.
- [27] S. Mirmohamadsadeghi, K. Karimi, Recovery of silica from rice straw and husk, in: *Curr. Dev. Biotechnol. Bioeng.*, Elsevier, (2020) pp. 411–433. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64321-6.00021-5>.
- [28] R. Raudhatussyarifah, W.B. Sediawan, M.M. Azis, I. Hartati, Microcrystalline cellulose production by acid hydrolysis of hydrotropic rice straw pulp, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 963 (2022) 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012055>.
- [29] P. Bhattacharyya, D. Bhaduri, T. Adak, S. Munda, B.S. Satapathy, P.K. Dash, S.R. Padhy, A. Pattanayak, S. Routray, M. Chakraborti, M.J. Baig, A.K. Mukherjee, A.K. Nayak, H. Pathak, Characterization of rice straw from major cultivars for best alternative industrial uses to cutoff the menace of straw burning, *Ind. Crops Prod.* 143 (2020) 111919. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111919>.
- [30] S. Jin, H. Chen, Near-infrared analysis of the chemical composition of rice straw, *Ind. Crops Prod.* 26 (2007) 207–211. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.004>.
- [31] Y.-F. Huang, S.-L. Lo, Utilization of rice hull and straw, in: *Rice*, Elsevier, (2019) pp. 627–661. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00019-8>.
- [32] S. Boufi, A. Gandini, Triticale crop residue: a cheap material for high performance nanofibrillated cellulose, *RSC Adv.* 5 (2014) 3141–3151. <https://doi.org/10.1039/C4RA12918K>.
- [33] NF P75-101 Isolants thermiques destinés au bâtiment - Définition, (1983).
- [34] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustain. Mater. Technol.* 4 (2015) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.
- [35] P. Raja, V. Murugan, S. Ravichandran, L. Behera, R.A. Mensah, S. Mani, A. Kasi, K.B.N. Balasubramanian, G. Sas, H. Vahabi, O. Das, A review of sustainable bio-based insulation materials for energy-efficient buildings, *Macromol. Mater. Eng.* 308 (2023) 2300086. <https://doi.org/10.1002/mame.202300086>.

- [36] J.C. McCabe, The thermal resistivity of straw bales for construction, (1993).
- [37] A. Shea, K. Wall, P. Walker, Evaluation of the thermal performance of an innovative prefabricated natural plant fibre building system, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 34 (2013) 369–380. <https://doi.org/10.1177/0143624412450023>.
- [38] C. Sun, J. Gu, Q. Dong, D. Qu, W. Chang, X. Yin, Are straw bales better insulation materials for constructions? A review, *Dev. Built Environ.* 15 (2023) 100209. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100209>.
- [39] K.A. Sabapathy, S. Gedupudi, Straw bale based constructions: Measurement of effective thermal transport properties, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.256>.
- [40] F. Rota Font, Y. Ciriano Nogales, D. Temes Mendoza, M. Vallbé Mumburú, G. Barbeta Solà, J.J. De Felipe Blanch, Straw bale as a construction material: in-situ determination of thermal conductivity in relation to fiber orientation, (2024). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4747506>.
- [41] S.L. Platt, D. Maskell, A. Shea, P. Walker, Impact of fibre orientation on the hygrothermal properties of straw bale insulation, *Constr. Build. Mater.* 349 (2022) 128752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128752>.
- [42] S. Platt, D. Maskell, P. Walker, A. Laborel-Préneron, Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120035. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120035>.
- [43] B. Marques, A. Tadeu, J. Almeida, J. António, J. de Brito, Characterisation of sustainable building walls made from rice straw bales, *J. Build. Eng.* 28 (2020) 101041. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101041>.
- [44] L. Conti, G. Goli, M. Monti, P. Pellegrini, G. Rossi, M. Barbari, Simplified method for the characterization of rectangular straw bales (RSB) thermal conductivity, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 245 (2017) 052035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052035>.
- [45] B. Diker, F. Yazicioğlu, A research on straw bale and traditional external wall systems: Energy and cost-efficiency analysis, *AZ ITU J. Fac. Archit.* 17 (2020) 95–103. <https://doi.org/10.5505/itujfa.2019.65882>.
- [46] A. Mesa, A. Arenghi, Hygrothermal behaviour of straw bale walls: experimental tests and numerical analyses, (2019). <https://doi.org/10.1051/sbuild/2019003>.
- [47] G. Evola, S. Cascone, G. Sciuto, C.B. Parisi, Performance comparison between building insulating materials made of straw bales and EPS for timber walls, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 609 (2019) 072020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072020>.
- [48] S. Cascone, G. Evola, A. Gagliano, G. Sciuto, C. Baroetto Parisi, Laboratory and in-situ measurements for thermal and acoustic performance of straw bales, *Sustainability* 11 (2019) 5592. <https://doi.org/10.3390/su11205592>.
- [49] P. Brzyski, P. Kosiński, M. Nadratowska, Thermal bridge occurrence in straw-bale timber frame walls, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 710 (2019) 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/710/1/012029>.
- [50] J.-P. Costes, A. Evrard, B. Biot, G. Keutgen, A. Daras, S. Dubois, F. Lebeau, L. Courard, Thermal conductivity of straw bales: full size measurements considering the direction of the heat flow, *Buildings* 7 (2017) 11. <https://doi.org/10.3390/buildings7010011>.
- [51] F. D'Alessandro, F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili, S. Schiavoni, Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance, *J. Build. Eng.* 11 (2017) 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.012>.
- [52] O. Douzane, G. Promis, J.-M. Roucoult, A.-D. Tran Le, T. Langlet, Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations, *J. Build. Eng.* 8 (2016) 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.002>.
- [53] M. Reif, J. Zach, J. Hroudová, Studying the properties of particulate insulating materials on natural basis, *Procedia Eng.* 151 (2016) 368–374. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.390>.

- [54] M. Volf, J. Diviš, F. Havlík, Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials, *Energy Procedia* 78 (2015) 1599–1604. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219>.
- [55] V. Gurskis, R. Skominas, Investigation of physical and mechanical properties of straw as a building material, *Build. Mater.* 5 (2014).
- [56] L. Brojan, A. Petric, P. Clouston, Comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives, *ARNP J. Eng. Appl. Sci.* 8 (2013) 920–926.
- [57] J. Vèjeliènè, Processed straw as effective thermal insulation for building envelope constructions, *Eng. Struct. Technol.* 4 (2012) 96–103. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2012.730286>.
- [58] J. Vejelienė, A. Gailius, S. Vejelis, S. Vaitkus, G. Balciunas, Development of thermal insulation from local agricultural waste, 8th Int. Conf. (2011).
- [59] J. Vèjeliènè, A. Gailius, S. Vèjeliš, S. Vaitkus, G. Balčiūnas, Evaluation of structure influence on thermal conductivity of thermal insulating materials from renewable resources, *Mater. Sci.* 17 (2011) 208–212. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.17.2.494>.
- [60] M. Pruteanu, Investigations regarding the thermal conductivity of straw, *Bul Inst Polit Iași* 3 (2010) 10–16.
- [61] A. Beck, U. Heinemann, M. Reidinger, J. Fricke, Thermal transport in straw insulation, *J. Therm. Envel. Build. Sci.* 27 (2004) 227–234. <https://doi.org/10.1177/1097196304039831>.
- [62] Y. Li, N. Zhu, J. Chen, Straw characteristics and mechanical straw building materials: a review, *J. Mater. Sci.* 58 (2023) 2361–2380. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08153-8>.
- [63] J. Vèjeliènè, Processed straw as effective thermal insulation for building envelope constructions, *Eng. Struct. Technol.* 4 (2012) 96–103. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2012.730286>.
- [64] ETA-17/0247, (2017). <https://www.dibt.de/en/service/approval-download/detail/eta-170247> (accédé en février 2025).
- [65] RFCP, Floissac: Règles professionnelles de construction en paille, (2012).
- [66] L.D. Hung Anh, Z. Pásztor, An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials, *J. Build. Eng.* 44 (2021) 102604. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>.
- [67] D. Kosiachevskyi, Approches micro-macroscopiques pour l'évaluation des mécanismes fongiques impliqués dans la dégradation des mortiers biosourcés : impact sur les propriétés hygrothermiques, phdthesis, Université Paris-Saclay, 2021. <https://theses.hal.science/tel-04510270> (accédé en février 2025).
- [68] ISO 10456 Building materials and products, (2008).
- [69] D. Csanády, O. Fenyvesi, B. Nagy, Heat transfer in straw-based thermal insulating materials, *Materials* 14 (2021) 4408. <https://doi.org/10.3390/ma14164408>.
- [70] M. Palumbo, A.M. Lacasta, N. Holcroft, A. Shea, P. Walker, Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106>.
- [71] P. Muñoz, C. González, R. Recio, O. Gencel, The role of specific heat capacity on building energy performance and thermal discomfort, *Case Stud. Constr. Mater.* 17 (2022) e01423. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01423>.
- [72] G. Tlaji, P. Biwole, S. Ouldboukhite, F. Pennec, A mini-review on straw bale construction, *Energies* 15 (2022) 7859. <https://doi.org/10.3390/en15217859>.
- [73] T.H. Mokhothu, M.J. John, Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites, *Carbohydr. Polym.* 131 (2015) 337–354. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.027>.
- [74] J.H. Perry, Chemical engineers' handbook, *J. Chem. Educ.* 27 (1950) 533. <https://doi.org/10.1021/ed027p533.1>.
- [75] H. Huang, G. Wu, E. Sun, F. Chen, X. Yang, Z. Chang, Application of sunlight greenhouse with straw bale thermal insulation wall in north of Jiangsu province, *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* 30 (2014) 170–178.

- [76] E. Latif, M. Lawrence, A. Shea, P. Walker, Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime, *Build. Environ.* 93 (2015) 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>.
- [77] R. Peuhkuri, H. Lone, B. Time, A. Gustavsen, T. Ojanen, J. Ahonen, K. Svennberg, L.-E. Harderup, J. Arfvidsson, Moisture buffering of building materials, Technical University of Denmark DTU, Denmark, 2006. https://www.byg.dtu.dk/forskning/publikationer/byg_rapporter (accédé en mars 7, 2025).
- [78] J. Teslík, Analysis of the fire properties of blown insulation from crushed straw in the buildings, *Materials* 14 (2021) 4336. <https://doi.org/10.3390/ma14154336>.
- [79] K. Wall, P. Walker, C. Gross, C. White, T. Mander, Development and testing of a prototype straw bale house, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.* 165 (2012) 377–384. <https://doi.org/10.1680/coma.11.00003>.
- [80] S. Džidić, Fire resistance of the straw bale walls, 5th Int. Conf. Contemp. Achiev. Civ. Eng. 21 33 (2017) 423–432. <https://doi.org/10.14415/konferencijaGFS2017.044>.
- [81] L. Xu, Y. Jiang, L. Wang, Thermal decomposition of rape straw: Pyrolysis modeling and kinetic study via particle swarm optimization, *Energy Convers. Manag.* 146 (2017) 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.020>.
- [82] B. Nath, G. Chen, L. Bowtell, E. Graham, Thermal decomposition of wheat straw pellets in a nitrogen environment: Characterization using thermogravimetric analyzer, *Case Stud. Therm. Eng.* 64 (2024) 105457. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105457>.
- [83] K. Ross, D. Godfrey, Effect of extractives on the thermal decomposition of wheat, triticale, and flax crop residues: a kinetic study, *Int. J. Biomass Renew.* 1 (2012) 19. <https://doi.org/10.61762/ijbrvol1iss2art13821>.
- [84] F.G. Fonseca, A. Anca-Couce, A. Funke, N. Dahmen, Challenges in kinetic parameter determination for wheat straw pyrolysis, *Energies* 15 (2022) 7240. <https://doi.org/10.3390/en15197240>.
- [85] N. Kongkaew, W. Pruksakit, S. Patumsawad, Thermogravimetric kinetic Analysis of the pyrolysis of rice straw, *Energy Procedia* 79 (2015) 663–670. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.552>.
- [86] F. Fan, Z. Yang, X. Xing, Study on the pyrolysis properties of corn straw by TG–FTIR and TG–GC/MS, *J. Therm. Anal. Calorim.* 143 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09778-6>.
- [87] S. Zou, H. Li, L. Liu, S. Wang, X. Zhang, G. Zhang, Experimental study on fire resistance improvement of wheat straw composite insulation materials for buildings, *J. Build. Eng.* 43 (2021) 103172. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103172>.
- [88] M. Palumbo, J. Formosa, A.M. Lacasta, Thermal degradation and fire behaviour of thermal insulation materials based on food crop by-products, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.028>.
- [89] P. Fu, S. Hu, J. Xiang, L. Sun, T. Yang, A. Zhang, J. Zhang, Mechanism study of rice straw pyrolysis by fourier transform infrared technique, *Chin. J. Chem. Eng.* 17 (2009) 522–529. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60240-2](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60240-2).
- [90] X. Huang, J.-P. Cao, X.-Y. Zhao, J.-X. Wang, X. Fan, Y.-P. Zhao, X.-Y. Wei, Pyrolysis kinetics of soybean straw using thermogravimetric analysis, *Fuel* 169 (2016) 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.011>.
- [91] B. Nath, G. Chen, L. Bowtell, E. Graham, An investigation of thermal decomposition behavior and combustion parameter of pellets from wheat straw and additive blends by thermogravimetric analysis, *Int. J. Thermofluids* 22 (2024) 100660. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100660>.
- [92] C. Wang, F. Wang, Q. Yang, R. Liang, Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion, *Biomass Bioenergy* 33 (2009) 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.04.013>.

- [93] Y. Zhaosheng, M. Xiaoqian, L. Ao, Kinetic studies on catalytic combustion of rice and wheat straw under air- and oxygen-enriched atmospheres, by using thermogravimetric analysis, *Biomass Bioenergy* 32 (2008) 1046–1055. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.001>.
- [94] Y. Tang, X. Ma, Z. Lai, Q. Yu, Oxy-fuel combustion characteristics and kinetics of microalgae and its mixture with rice straw using thermogravimetric analysis, *Int. J. Energy Res.* 42 (2018) 532–541. <https://doi.org/10.1002/er.3836>.
- [95] S. Halvarsson, H. Edlund, M. Norgren, Wheat straw as raw material for manufacture of medium density fiberboard (MDF), *BioResources* 5 (2010) 1215–1231. <https://doi.org/10.15376/biores.5.2.1215-1231>.
- [96] W.E. Johns, K.A. Niazi, Effect of pH and buffering capacity of wood on the gelation time of urea-formaldehyde resin, *Wood Fiber Sci.* (1981) 255–263.
- [97] A. Trabelsi, Z. Kammoun, Experimental evaluation of acoustic characteristics of ball straw walls, *Can. Acoust.* 46 (2018) 49–56.
- [98] S. Schiavoni, F. Bianchi, F. D'Alessandro, Straw as an acoustic material, in: London, 2017. <https://doi.org/10.25144/23966>.
- [99] K. Wall, P. Walker, C. Gross, C. White, T. Mander, Development and testing of a prototype straw bale house, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.* 165 (2012) 377–384. <https://doi.org/10.1680/coma.11.00003>.
- [100] T. Ashour, H. Georg, W. Wu, Performance of straw bale wall: A case of study, *Energy Build.* 43 (2011) 1960–1967. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.001>.
- [101] P. Konečný, J. Teslík, M. Hamala, Mechanical and physical properties of straw bales, *Adv. Mater. Res.* 649 (2013) 250–253. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.649.250>.
- [102] G. Forêt, C. Hamelin, M. Olivier, La botte de paille, matériau porteur, *ECOBATSciencesTechniques 2012* (2013).
- [103] N. Dikmen, S.T.E. Ozkan, N. Dikmen, S.T.E. Ozkan, Unconventional insulation materials, in: *Insul. Mater. Context Sustain.*, IntechOpen, 2016. <https://doi.org/10.5772/63311>.
- [104] M. Pavelek, M. Prajer, K. Trgala, Static and dynamic thermal characterization of timber frame/wheat (*Triticum Aestivum*) chaff thermal insulation panel for sustainable building construction, *Sustainability* 10 (2018) 2363. <https://doi.org/10.3390/su10072363>.
- [105] Grains vêtus, *Batir En Balles*. <https://batirenballes.fr/balles/grains-vetus/> (accédé en mai 2025).
- [106] Q. Bian, R.P.K. Ambrose, B. Subramanyam, Effect of chaff on bulk flow properties of wheat, *J. Stored Prod. Res.* 64 (2015) 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.08.004>.
- [107] V. Barbieri, M. Lassinantti Gualtieri, C. Siligardi, Wheat husk: A renewable resource for bio-based building materials, *Constr. Build. Mater.* 251 (2020) 118909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118909>.
- [108] M.A. Khalaf, C.C. Ban, M. Ramli, The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 215 (2019) 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.146>.
- [109] M.E. Mann, R.D.H. Cohen, J.A. Kernan, H.H. Nicholson, D.A. Christensen, M.E. Smart, The feeding value of ammoniated flax straw, wheat straw and wheat chaff for beef cattle, *Anim. Feed Sci. Technol.* 21 (1988) 57–66. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0377-8401(88)90019-3).
- [110] D.H. McCartney, H.C. Block, P.L. Dubeski, A.J. Ohama, Review: The composition and availability of straw and chaff from small grain cereals for beef cattle in western Canada, *Can. J. Anim. Sci.* 86 (2006) 443–455. <https://doi.org/10.4141/A05-092>.
- [111] S. Ahmad, Y. Iqbal, R. Muhammad, Effects of coal and wheat husk additives on the physical, thermal and mechanical properties of clay bricks, *Bol. Soc. Esp. Cerámica Vidr.* 56 (2017) 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.02.001>.
- [112] K. Raveendran, A. Ganesh, K.C. Khilart, Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics, *Fuel* 74 (1995) 1812–1822. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)80013-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)80013-8).
- [113] K. G. Mansaray, A. E. Ghaly, Thermal degradation of rice husks in an oxygen atmosphere, *Energy Sources* 21 (1999) 453–466. <https://doi.org/10.1080/00908319950014759>.

- [114] A.K. Bledzki, A.A. Mamun, J. Volk, Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.12.004>.
- [115] E. Escarnot, M. Aguedo, M. Paquot, Characterization of hemicellulosic fractions from spelt hull extracted by different methods, *Carbohydr. Polym.* 85 (2011) 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.03.005>.
- [116] P. Mishra, A. Chakraverty, H.D. Banerjee, Studies on physical and thermal properties of rice husk related to its industrial application, *J. Mater. Sci.* 21 (1986) 2129–2132. <https://doi.org/10.1007/BF00547958>.
- [117] K.R. Neira, J.P. Cárdenas-Ramírez, C.J. Rojas-Herrera, L. Haurie, A.M. Lacasta, J.T. Ramo, A. Sánchez-Ostiz, Assessment of elaboration and performance of rice husk-based thermal insulation material for building applications, 14 (2024) 1720. <https://doi.org/10.3390/buildings14061720>.
- [118] D. Yarbrough, K. Wilkes, P. Olivier, R. Graves, A. Vohra, Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells, (2005).
- [119] P. Mishra, A. Chakraverty, H.D. Banerjee, Studies on physical and thermal properties of rice husk related to its industrial application, *J. Mater. Sci.* 21 (1986) 2129–2132. <https://doi.org/10.1007/BF00547958>.
- [120] C.-Y. Yin, B.-M. Goh, Thermal degradation of rice husks in air and nitrogen: Thermogravimetric and kinetic analyses, *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.* 34 (2011) 246–252. <https://doi.org/10.1080/15567030903586048>.
- [121] K.G. Mansaray, A.E. Ghaly, Thermogravimetric analysis of rice husks in an air atmosphere, *Energy Sources* 20 (1998) 653–663. <https://doi.org/10.1080/00908319808970084>.

