

Sorption du produit de traitement de bois par l'argile dans la
construction en terre : cas de l'octaborate disodique
tétrahydraté (DOT)

par

Meriam AOUINTI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A

MONTREAL, LE 8 JANVIER 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Meriam Aouinti, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Claudiane Ouellet Plamondon, directrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Sophie Lerouge, présidente du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. François Duhaime, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Rompré, examinateur externe
Boralife Technologies

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 25 NOVEMBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude et mes remerciements à ma directrice de recherche, Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, pour ses conseils avisés et le soutien qu'elle n'a jamais cessé de m'apporter tout au long de ce projet. Je tiens également à la remercier de m'avoir donné la chance de réaliser ce travail et de la confiance qu'elle m'a témoignée. J'apprécie sincèrement le temps et le travail qu'elle a consacrés à notre recherche.

J'aimerais également remercier toutes les personnes rencontrées à Montréal, sans qui ce séjour n'aurait pas été ce qu'il fut.

Un remerciement particulier va également envers mes collègues de travail, Aguerata Kaboré et Mathieu Bendouma, pour leur disponibilité, leur aide à la révision de mon travail et leurs conseils. Je remercie également Palakiyem Mouzou pour sa participation antérieure au travail de la partie caractérisation des argiles et Patrick Brisebois pour sa contribution au travail de l'étude spectroscopique.

Je tiens à exprimer ma gratitude à ma famille pour sa tolérance et son courage. Je suis vraiment reconnaissante à mes parents pour leurs encouragements et leur confiance en moi tout au long de mon parcours universitaire. Mon mari mérite le plus de gratitude. Ma vie a trouvé un cadre stimulant grâce à leurs sacrifices et à leur soutien moral. Sans leur aide précieuse, ce travail n'aurait en effet pu voir le jour. Je leur offre ce travail en signe de mon amour intense.

Sorption du produit de traitement de bois par l'argile dans la construction en terre : cas de l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT)

Meriam AOUINTI

RÉSUMÉ

L'utilisation de la construction en terre crue est idéale pour l'architecture écologique car elle a un impact environnemental positif. Le torchis représente la méthode et le matériau de remplissage d'une structure en bois. Pour pouvoir supporter la charge des bâtiments, il doit avoir une capacité puissante. Le bois utilisé dans ce projet a été traité avec l'octaborate disodique tétrahydraté DOT, qui offre la capacité de protéger à la fois du feu et des agents de détérioration biologiques. Le but ultime de cette étude est d'évaluer la capacité du bois à conserver la durabilité accordée au contact avec le torchis en fonction du temps, du pourcentage d'humidité, des essences de bois (épinette et sapin), et de l'axe de remplissage. Les résultats en fonction de temps montrent un profil de mouvement DOT décroissant dans l'argile allant de la partie en contact avec le bois vers la surface. Ce profil disparaît généralement si un contact dure plus de deux mois. L'expérience à long terme a montré que la quantité de DOT sorbée a tendance à se stabiliser avec le temps même si la concentration initiale de DOT est différente. Les résultats en fonction de l'humidité de conditionnement (9 et 19 %) montrent que cette dernière n'a pas un effet significatif sur la quantité de DOT sorbée par l'argile. Afin d'identifier les différentes phases présentes et de déterminer les changements microstructuraux provoqués par le traitement et le contact avec l'argile, une étude spectroscopique a été menée sur quelques échantillons de bois traités avec et sans contact avec l'argile ainsi que sur certains échantillons de bois non traités. À partir de cette étude, nous n'avons pas pu détecter la présence du bore sur le sapin de façon statistiquement significative alors que les résultats pour l'épinette nous ont permis d'identifier le mécanisme de fonctionnement de l'argile sur le bois.

Mots-clés : sapin, épinette, octaborate disodique tétrahydraté (ODT), torchis, durabilité, protection biologique et contre le feu, architecture écologique

Sorption of wood treatment product by clay in earthen constructions: case of disodium octaborate tetrahydrate (DOT)

Meriam AOUINTI

ABSTRACT

Raw earth construction provides a positive environmental balance and is ideal for ecological architecture. Cob is a material and a technique for filling a load-bearing wooden structure, half-timbering. It must have a bearing capacity to be able to support the building load. In this project the wood was treated with disodium octaborate tetrahydrate (DOT), which protects it against biological degradation agents and fire. The goal of this study is to evaluate the ability of wood to maintain its durability when in contact with cob as a function of time, external conditions (temperature, humidity), and direction of filling. The first results obtained as a function of time show a decreasing DOT migration profile in the clay from the part in direct contact with the wood to the surface part. This profile tends to disappear when the contact time exceeds 2 months. The long-term test showed that the amount of DOT absorbed tends to stabilize over time even if the initial DOT concentration is different. The results as a function of humidity show that the latter does not have a significant effect on the amount of DOT absorbed by the clay. The results as a function of humidity show that the latter does not have a significant effect on the amount of DOT absorbed by the clay. To identify the different phases, present and to determine the microstructural changes caused by the treatment and the contact with clay, a spectroscopic study was carried out on some samples of treated wood with and without contact with clay as well as on some samples of untreated wood. From this study, we could not detect the presence of boron on fir in a statistically significant way whereas the results for spruce allowed us to identify the mechanism of operation of the clay on the wood.

Keywords: fir, spruce, disodium octaborate tetrahydrate (DOT), cob, durability, biological and fire protection, ecological architecture

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Généralités sur la construction en terre crue.....	5
1.1.1 Construction en terre crue dans le monde.....	5
1.1.2 Intérêt de la construction en terre crue.....	6
1.2 Techniques de construction en terre	7
1.2.1 Torchis	8
1.2.2 Construction en torchis dans le monde	8
1.3 Utilisation de la terre dans la construction.....	10
1.3.1 Définition et composition	10
1.3.2 Formation des argiles.....	10
1.3.3 Structure des argiles.....	12
1.3.4 Différents types d'argile	13
1.3.4.1 Type des feuillets	13
1.3.4.2 Classification selon la couleur	17
1.3.5 Propriété des minéraux argileux	18
1.3.5.1 Pouvoir absorbant et adsorbant.....	18
1.3.5.2 Propriétés colloïdales.....	20
1.3.5.3 Autres propriétés : acide, oxydoréductrice, photovoltaïque, radioactive.....	20
1.4 L'utilisation du bois en tant que matériau de construction	21
1.4.1 Le bois : de l'arbre à la cellule.....	21
1.4.1.1 Macrostructure	21
1.4.1.2 Microstructure.....	22
1.4.1.3 Ultrastructure de la cellule unitaire du bois	23
1.4.2 Avantages de la construction en bois.....	24
1.4.2.1 Matériau vert.....	24
1.4.2.2 Solidité et durabilité.....	25
1.4.2.3 Efficacité énergétique	27
1.4.2.4 Résistance au feu.....	28
1.4.3 Inconvénients de l'utilisation du bois dans la construction	28
1.4.3.1 Durabilité naturelle du bois.....	29
1.4.3.2 Traitement du bois	30
1.4.3.3 Méthodes d'imprégnation du bois par des produits de préservation.....	32
1.4.3.4 Différents produits de préservation du bois	33
1.4.4 Borates en tant que pesticides	36
1.4.5 Avantages du borate.....	37
1.4.5.1 Faible toxicité	37
1.4.5.2 Facilité d'application	38

	1.4.5.3 Ignifugation.....	38
1.4.6	Problèmes liés à un conservateur hydrosoluble: le cas des borates	39
1.4.7	Facteurs affectant la pénétration des borates en profondeur.....	40
CHAPITRE 2 MÉTHODE ET MATÉRIAUX UTILISÉS LORS DES DIFFÉRENTS		
	ESSAIS DE LABORATOIRE.....	43
2.1	Matériaux	43
2.1.1	Aperçu général sur les argiles utilisées	43
2.1.2	Essences de bois.....	44
2.1.3	Présentation du produit utilisé pour le traitement du bois	44
2.2	Caractérisation physique des argiles	45
2.2.1	Limites d'Atterberg.....	45
	2.2.1.1 Matériels et méthodes	45
2.2.2	Granulométrie laser.....	47
	2.2.2.1 Matériels et méthodes	47
2.2.3	Diffraction par rayon X.....	48
	2.2.3.1 Matériels et méthode.....	48
2.3	Mesure de la quantité du DOT absorbée dans l'argile et la migration du DOT dans le bois traité.....	49
2.3.1	Méthodes.....	50
	2.3.1.1 Principe de l'ICP-OES	50
2.3.2	Essais en fonction de temps et d'humidité.....	51
	2.3.2.1 Méthodologie	51
2.3.3	Essai sur l'effet de sens : sens latéral et gravitationnel.....	55
	2.3.3.1 Méthodologie	55
2.3.4	Test de suivi de la migration de DOT dans le temps	57
	2.3.4.1 Méthodologie	57
2.3.5	Mesure du gradient de DOT dans le bois.....	58
	2.3.5.1 Mesures avant contact bois-argile.....	58
	2.3.5.2 Mesures après la mise en contact.....	59
	2.3.5.3 Broyage du bois	61
	2.3.5.4 Digestion du bois	62
	2.3.5.5 Préparation des réactifs	64
	2.3.5.6 Conditionnement du bois	64
2.3.6	Mesure de gradient de DOT dans l'argile.....	66
2.4	Microscopie à force photo-induite des échantillons de bois (MFPi) et infrarouge à transformée de Fourier (IFTR).....	69
	2.4.1 Matériels et méthode.....	69
2.5	Mesure de potentiel zeta	71
	2.5.1 Méthodologie	71
2.6	Méthodologie suivie dans la présentation des résultats	72
CHAPITRE 3 RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE.....		
3.1	Résultats des caractérisations des argiles utilisées.....	77
	3.1.1 Limites d'Atterberg.....	77

3.1.2	Granulométrie laser.....	79
3.1.3	Diffraction par rayon X.....	80
3.2	Résultats de conditionnement du bois.....	82
3.3	Effet du temps et de l'humidité sur la migration de DOT vers l'argile : cas de l'argile rouge-sapin.....	83
3.3.1	Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur.....	83
3.3.2	Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur.....	86
3.3.2.1	Effet du temps.....	86
3.3.2.2	Effet de l'humidité.....	88
3.3.3	Bilan de masse.....	89
3.4	Effet du temps et de l'humidité sur la migration de DOT vers l'argile : Cas d'argile beige-sapin.....	91
3.4.1	Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur.....	91
3.4.2	Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur.....	93
3.4.2.1	Effet du temps.....	93
3.4.2.2	Effet d'humidité.....	95
3.4.3	Bilan de masse.....	96
3.5	Effet du temps et de l'humidité sur la migration de DOT vers l'argile : Cas argile rouge -épinette.....	97
3.5.1	Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur.....	97
3.5.2	Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur.....	100
3.5.2.1	Effet du temps.....	100
3.5.2.2	Effet d'humidité.....	102
3.5.3	Bilan de masse.....	104
3.6	Effet de temps sur la migration de DOT vers l'argile : Cas argile beige-épinette.....	105
3.6.1	Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur.....	105
3.6.2	Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur.....	108
3.6.2.1	Effet du temps.....	108
3.6.2.2	Effet de l'humidité.....	109
3.6.3	Bilan de masse.....	110
3.7	Résultats des essais sur l'effet de sens.....	112
3.7.1	Cas sapin-argile rouge.....	112
3.7.2	Cas sapin - argile beige.....	114
3.7.3	Cas de l'épinette - argile rouge.....	115
3.7.4	Cas de l'épinette - argile beige.....	117
3.8	Résultats de l'essai sur la stabilité de la quantité de DOT sorbée.....	119
3.8.1	Quantité de DOT sorbée par l'argile dans le temps.....	119
3.8.2	Bilan de masse.....	122
3.9	Résultats de l'infrarouge à transformée de Fourier et de la microscopie à force photo-induite.....	124
3.9.1	Infrarouge à transformée de Fourier.....	124
3.9.2	Microscopie à force photo-induite.....	125
3.10	Résultats de potentiel zêta.....	129
	CHAPITRE 4 DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	133

4.1	Caractérisation des argiles	133
4.2	Effet du temps, de l'humidité et du sens de migration sur la sorption de DOT dans l'argile	134
4.3	Effet du temps et du pourcentage d'humidité sur la migration de DOT dans le bois	137
CONCLUSION.....		139
RECOMMANDATIONS		141
ANNEXE I CONDITIONNEMENT DU BOIS PAR SOLUTION SALINE SATURÉE		143
ANNEXE II IMAGERIE PRISE PAR LA MICROSCOPIE À TABLE POUR LES ÉCHANTILLONS D'ARGILE ET RÉSULTATS EDS		147
BIBLIOGRAPHIE		153

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1	Différentes techniques de construction en terre.....7
Tableau 1-2	Caractéristiques techniques des bois résineux : cas de sapin et d'épinette31
Tableau 2-1	Tableau illustratif des caractéristiques des planches reçues44
Tableau 2-2	Tableau illustratif des caractéristiques de la pâte d'argile52
Tableau 2-3	Dimension d'un échantillon du bois53
Tableau 2-4	Nombre des échantillons totaux pour le test sur l'effet de temps et d'humidité : cas d'épinette54
Tableau 2-5	Nombre des échantillons totaux pour le test sur l'effet de temps et d'humidité : cas du sapin.....55
Tableau 2-6	Dimension d'une planche témoin59
Tableau 2-7	Caractéristique d'une tranche du bois59
Tableau 2-8	Caractéristiques d'un échantillon avant et après broyage.....62
Tableau 2-9	Quantité du bois par tranche nécessaire pour la technique de digestion et ICP64
Tableau 2-10	Caractéristiques d'une tranche d'argile après découpage67
Tableau 3-1	Limites de plasticité de l'argile rouge et de l'argile beige.....78
Tableau 3-2	Calculs de l'indice de plasticité de l'argile beige et de l'argile rouge78
Tableau 3-3	Relation entre Indices de plasticité (Ip) et potentiel de gonflement79
Tableau 3-4	Relation entre Indices de plasticité (Ip) et potentiel de gonflement79
Tableau 3-5	Surfaces spécifiques des argiles fournies par la granulométrie laser.....80
Tableau 3-6	Résultats de la DRX.....81
Tableau 3-7	Composition en oxydes des argiles.....81
Tableau 3-8	Composition en éléments chimiques des argiles81

Tableau 3-9	Quantité de DOT restante dans le bois après une mise en contact avec l'argile : cas de l'argile rouge - sapin	85
Tableau 3-10	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction du temps : cas de l'argile rouge - sapin	88
Tableau 3-11	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de l'humidité du bois : cas d'argile rouge - sapin.....	88
Tableau 3-12	Quantité relative de DOT sorbée et restée par rapport à la quantité de DOT initiale après une mise en contact avec l'argile : cas argile rouge - sapin.....	90
Tableau 3-13	Quantité de DOT restante au niveau du bois après mise en contact avec argile : cas de l'argile beige - sapin	93
Tableau 3-14	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de temps : cas d'argile beige - sapin.....	95
Tableau 3-15	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction d'humidité de bois : cas de l'argile beige - sapin	95
Tableau 3-16	Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile beige - sapin	97
Tableau 3-17	Quantité de DOT restante au niveau du bois après mise en contact avec argile : Cas argile rouge - épinette	99
Tableau 3-18	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de temps : cas d'argile rouge - épinette	101
Tableau 3-19	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction d'humidité de bois : cas d'argile rouge - épinette.....	102
Tableau 3-20	Quantité relative de DOT sorbée et restée par rapport à la quantité de DOT initiale après mise en contact avec l'argile : Argile rouge - épinette.....	105
Tableau 3-21	Quantité de DOT restante au niveau du bois, après mise en contact avec argile : Cas argile beige - épinette.....	107
Tableau 3-22	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de temps : cas d'argile beige - épinette.....	109
Tableau 3-23	Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction d'humidité de bois : cas d'argile beige - épinette	110

Tableau 3-24	Quantité relative de DOT sorbée et restée par rapport à la quantité de DOT initiale après mise en contact avec l'argile : Argile beige - épinette111
Tableau 3-25	Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile rouge - sapin113
Tableau 3-26	Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile beige - sapin115
Tableau 3-27	Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile rouge - épinette117
Tableau 3-28	Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile beige - épinette119
Tableau 3-29	Masse d'eau perdue au niveau de la couche d'argile après mise en contact121
Tableau 3-30	Taille moyenne des particules des solutions testées130
Tableau 3-31	Potentiel zêta obtenu pour chaque échantillon130
Tableau 4-1	Tableau récapitulatif de la quantité de DOT sorbée par l'argile versus la quantité de DOT totale restante au niveau du bois à une humidité de 9 %134
Tableau 4-2	Tableau récapitulatif de la quantité de DOT sorbée par l'argile versus la quantité de DOT totale restante au niveau du bois à une humidité de 19 %135
Tableau 4-3	Tableau récapitulatif de la quantité de DOT sorbée par les deux types d'argile selon les 3 sens de migration135

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1	La terre comme matériau de construction dans le monde6
Figure 1-2	Chalet en torchis (cob cottage) au Canada9
Figure 1-3	Palais de Najran en Arabie saoudite.....9
Figure 1-4	Maison en torchis en Angleterre9
Figure 1-5	Représentation schématique du cycle des argiles dans la croûte continentale11
Figure 1-6	Représentation schématique des couches tétraédrique et octaédrique13
Figure 1-7	Représentation schématique de la kaolinite,14
Figure 1-8	Représentation schématique de la structure d'une argile de type TOT....15
Figure 1-9	Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type TOTO.....17
Figure 1-10	Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore20
Figure 1-11	Schéma présentant les différentes zones anatomiques d'un arbre22
Figure 1-12	Organisation cellulaire d'un bois résineux23
Figure 1-13	Illustration d'une cellule de bois avec l'organisation des différentes couches de la paroi cellulaire : LM : lamelle mitoyenne, P : paroi primaire, S : paroi secondaire avec ses couches S1, S2 et S323
Figure 1-14	Consommation des ressources naturelles dues à la fabrication de différents matériaux de construction, selon les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables24
Figure 1-15	Données comparatives d'un cycle de vie d'un bâtiment commercial25
Figure 1-16	Exemple des conceptions en bois à grande longévité : A -Temple des Bambous 1279 -1368- B - Butler Square construit en 1906.....26
Figure 1-17	Exemple des conceptions en bois à grande portée : A- Résidence Brock Commons B - Odata Jukai Dôme.....27

Figure 1-18	Résistance thermique du système international (RSI) des matériaux28
Figure 2-1	a) Argile en sac provenant de chez le commerçant et conservé dans le labo LG2, b) argiles à la sortie des sacs43
Figure 2-2	Bois reçu de Boralife44
Figure 2-3	Octaborate disodique tétrahydraté (DOT)45
Figure 2-4	Pâte d'argile préparée pour l'essai des limites d'Atterberg46
Figure 2-5	Mise en place de l'échantillon dans la coupelle et traçage de la rainure...46
Figure 2-6	Différentes étapes de la limite de plasticité d'Atterberg47
Figure 2-7	Granulomètre laser Mastersizer 3000 au laboratoire48
Figure 2-8	Tamiseur ultrason49
Figure 2-9	Principaux composants et disposition d'un instrument ICP-OES typique50
Figure 2-10	Organigramme montrant la méthodologie d'une analyse typique par ICP-OES51
Figure 2-11	Coupage des segments du bois pour les essais sans conditionnement et conservation dans des sacs hermétiques52
Figure 2-12	a) Mise en contact de la couche d'argile avec le bois, b) conservation de l'échantillon contre l'humidité53
Figure 2-13	Moule fabriqué pour la mise en place de la couche d'argile de 5 cm d'épaisseur54
Figure 2-14	Orientation latérale de l'échantillon au moment de formulation (à gauche) ; Orientation gravitationnelle de l'échantillon durant la période de conservation (à droite)56
Figure 2-15	Schéma récapitulatif de principe de l'essai sur la stabilité de DOT migré dans le temps58
Figure 2-16	a-Échantillon du bois coupé à l'aide d'une scie à ruban, b - Scie à ruban60
Figure 2-17	Schéma illustratif de la procédure de découpe a) état initial du segment du bois avant découpage, b) découpe du segment en 4 épaisseurs égales (perte de 1.5 mm)60

Figure 2-18	Échantillon de bois après détachement de l'argile et après découpage par la scie à ruban.....	60
Figure 2-19	a) Broyeur à couteau SM300 existant à l'ETS, b) grille 1,5 mm	61
Figure 2-20	a) Bois avant broyage, b) bois après broyage avec le moulin à café.....	61
Figure 2-21	Échantillon après tamisage à 600 μm	62
Figure 2-22	Schéma illustratif du processus de digestion du bois	63
Figure 2-23	Chambre climatique ThermoThron maintenue à une $T = 22^{\circ}\text{C}$ et une $\text{HR} = 90\%$	65
Figure 2-24	Placement des échantillons soumis au conditionnement dans la chambre climatique à l'aide de grille en acier	66
Figure 2-25	a) Scie à fil ; b) Boîte pour faciliter la découpe de l'argile en couche	67
Figure 2-26	Schéma illustratif de la procédure de découpe : A - État initial de la pâte d'argile avant découpage, B- Découpage de la pâte d'argile en 4 couches d'égale épaisseur	68
Figure 2-27	Échantillon d'argile après détachement et après découpage par la scie à fil	68
Figure 2-28	Schéma illustratif du processus de préparation de l'argile pour l'analyse à l'ICP.....	69
Figure 2-29	Schéma illustratif de calcul des bilans de masse	73
Figure 2-30	Schéma explicatif des dimensions des tranches d'argile et de bois présenté au niveau des histogrammes des résultats	74
Figure 2-31	Schéma explicatif des sens de migration de DOT testés.....	75
Figure 3-1	Granulométrie des argiles par la granulométrie laser.....	80
Figure 3-2	Variation moyenne de la masse des échantillons de bois lors du conditionnement.....	82
Figure 3-3	Évolution de l'humidité du bois lors du processus de conditionnement...	83
Figure 3-4	Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après une mise en contact avec l'argile : argile rouge - sapin reçu à 9 %.....	84

Figure 3-5	Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après une mise en contact avec l'argile : argile rouge - sapin conditionné à 19 %.....	84
Figure 3-6	Histogramme de la quantité de DOT initialement présente dans le bois conditionné (19 %) et non conditionné (9 %) sans contact avec les argiles	86
Figure 3-7	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge-sapin reçu à 9 %.....	87
Figure 3-8	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge-sapin conditionné à 19 %.....	87
Figure 3-9	Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas de l'argile rouge - sapin	89
Figure 3-10	Bilan de masse : cas de l'argile rouge - sapin 9% (haut) et 19% (bas)	90
Figure 3-11	Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : cas argile beige - sapin reçu à 9 %	91
Figure 3-12	Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : cas argile beige - sapin conditionné à 19 %.....	92
Figure 3-13	Effet du temps de contact sur la sorption du DOT par l'argile : argile beige-sapin reçu à 9 %	94
Figure 3-14	Effet du temps de contact sur la sorption du DOT par l'argile : argile beige-sapin conditionné à 19 %	94
Figure 3-15	Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas de l'argile beige - sapin	96
Figure 3-16	Bilan de masse : cas d'argile beige - sapin 9% (haut) et 19% (bas).....	97
Figure 3-17	Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : cas de l'argile rouge - épinette reçue à 9 %	98
Figure 3-18	Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : Cas argile rouge -épinette conditionnée à 19 %	99
Figure 3-19	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge -épinette reçue à 9 %.....	100

Figure 3-20	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge-épinette conditionnée à 19 %.....	101
Figure 3-21	Histogramme de la quantité de DOT initialement présent au sein d'épinette conditionnée à 19 % et reçu à 9 % sans contact avec l'argile.....	103
Figure 3-22	Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas d'argile rouge - épinette	104
Figure 3-23	Bilan de masse : cas d'argile rouge – épinette 9% (haut) et 19% (bas).....	105
Figure 3-24	Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : Cas argile beige - épinette reçue à 9 %	106
Figure 3-25	Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : Cas argile beige - épinette conditionnée à 19 %	107
Figure 3-26	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile beige - épinette reçue à 9 %	108
Figure 3-27	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile beige -épinette conditionnée à 19 %	109
Figure 3-28	Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas d'argile beige - épinette	110
Figure 3-29	Bilan de masse : cas d'argile beige - épinette 9% (haut) et 19% (bas).....	111
Figure 3-30.	Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l'argile : Cas de sapin -argile rouge	112
Figure 3-31	Bilan de masse : cas d'argile rouge - sapin après 1 semaine selon l'orientation	113
Figure 3-32	Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l'argile : cas d'argile beige -sapin	114
Figure 3-33	Bilan de masse : cas d'argile beige - sapin après 1 semaine selon l'orientation	115
Figure 3-34	Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l'argile : cas argile rouge - épinette.....	116

Figure 3-35	Bilan de masse : cas d'argile rouge - épinette après 1 semaine selon l'orientation116
Figure 3-36	Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l'argile : cas d'argile beige - épinette117
Figure 3-37	Bilan de masse : cas d'argile beige-épinette après 1 semaine selon l'orientation118
Figure 3-38	Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge - épinette.....120
Figure 3-39	Photos de l'état des échantillons au moment de détachement après un temps de contact de 1 mois, 2 mois, 3 mois et 4 mois121
Figure 3-40	Bilan de masse entre 1 et 6 mois : Argile rouge - épinette (9%).....122
Figure 3-41	Évaporation de l'eau de l'argile dans le temps.....123
Figure 3-42	Évolution de la masse d'eau sorbée par le bois après la mise en contact avec l'argile123
Figure 3-43	Spectres IRTF pour les échantillons de sapin (a) et d'épinette (b) non-traité et dopé avec des solutions de 5% et 10% d'acide borique.....125
Figure 3-44	Cartographie chimique par MFPi à 1096 cm^{-1} pour les échantillons de sapin (a) et d'épinette (b) non-traité, traité et traité en contact avec l'argile.....126
Figure 3-45	Spectres MFPi moyennés pour les échantillons de sapin (a) et d'épinette (b) non traité, traité et traité en contact avec l'argile.....128

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American Society for Testing and Material
$C_{arg\ t\ (i)}$	Concentration dans la tranche d'argile i
$C_{bois\ t\ (i)}$	Concentration dans la tranche de bois i
DOT	Octaborate disodique tetrahydraté
HR-9 %	Humidité relative de bois de 9%
HR-19 %	Humidité relative de bois 19%
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry
I_p	Indice de plasticité
$m_{arg\ t\ (i)}$	Masse de la tranche d'argile i
$m_{bois\ t\ (i)}$	Masse de la tranche de bois i
Ratio E/A	Ratio eau/argile
MFPi	Microscopie à force photo-induite (MFPi)
T	Température
Wl	Limite de liquidité
Wp	Limite de plasticité

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**UNITÉS DE BASE**

m	mètre
kg	kilogramme
C°	degré Celsius

Volume

m ³	mètre cube
ml	millilitre

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES**Longueur**

m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
µm	micromètre
nm	nanomètre

UNITÉS DE MASSE**Masse**

kg	kilogramme
g	gramme

Masse volumique

kg/m ³ :	kilogramme par mètre cube
---------------------	---------------------------

UNITÉS DE TEMPS**Vitesse angulaire**

r/min tour par minute

Puissance

μ W micro Watt

INTRODUCTION

Contexte de recherche

L'utilisation de la terre crue dans les projets de construction présente d'importants avantages environnementaux et culturels, qu'ils soient en cours aujourd'hui ou dans le passé. Tirer le meilleur parti des ressources de la terre, développer son utilisation et promouvoir ses avantages contribuent à réduire l'impact environnemental de l'industrie du bâtiment. Ce procédé permet en revanche des rénovations de qualité, à la fois efficaces et respectueuses de l'architecture du bâtiment, ainsi que la valorisation du patrimoine bâti.

Les terres résultent d'une transformation de la roche mère sous l'influence de divers processus (physiques, chimiques et biologiques) opérant sur des temps géologiques longs. Physiquement, elles sont constituées de grains de tailles très différentes, dont les plus fins sont les composants de l'argile et ont des capacités de collement importantes en raison de leur forte affinité pour l'eau. En conséquence, dans la croûte terrestre, lorsque l'argile et l'eau sont combinées, les grains les plus gros sont enfermés et maintenus ensemble dans une matrice qui agit comme principal agent de cohésion du sol après séchage. Puisque les connexions sont réversibles, le matériau utilisé pour fabriquer la terre est recyclable et le restera longtemps s'il n'est pas mélangé avec des matériaux non recyclables. En raison de leurs propriétés catalytiques, absorbantes et échangeuses d'ions, les argiles ont suscité l'intérêt au cours des trois dernières décennies. Elles sont très facilement disponibles et ont d'excellentes propriétés d'adsorption (Zhu.R et al., 2016).

Les constructions en terre crue ou en terre renforcée de fibres végétales sont parfois à ossature de bois qui doit avoir une capacité portante bien déterminée. Comme le bois représente un matériau structural pour l'extérieur, des propriétés physiques, biologiques et mécaniques élevées sont requises. Afin de protéger les structures en bois des insectes et des attaques fongiques, des agents de conservation leur sont appliqués depuis longtemps. Les borates font partie de ces agents. Depuis les années 1950, ces derniers sont utilisés dans l'industrie du bois et se sont avérés efficaces dans la lutte contre les caries fongiques et les insectes xylophages destructeurs (Clausen & Yang, 2007; Creffield et al., 1983; Temiz et al., 2008; Yamauchi et

al., 2007). Au cours des deux dernières décennies, les borates ont été de plus en plus utilisés dans l'industrie de la conservation. Cela est dû au fait qu'ils sont non seulement efficaces pour prévenir la pourriture du bois, mais qu'ils ont également une faible toxicité pour les mammifères, sont inodores et incolores et n'interfèrent pas avec les finitions ou les fixations (Baysal et al., 2006; Turner, 2008). Par conséquent, la capacité du bois à maintenir son produit traité dans des conditions environnementales changeantes est cruciale. Ce projet est une recherche de type industriel et n'est pas une étude fondamentale sur la migration du DOT.

Objectifs du mémoire

Dans ce contexte, l'objectif général de mon travail est de définir un protocole pour déterminer s'il y a une migration du produit de traitement de bois vers l'argile en vue de la construction en terre en fonction du temps de contact, de l'humidité initiale de bois et de l'épaisseur de migration. Au niveau des hypothèses, il a été supposé que la concentration de l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT) détectée par l'ICP dans les tranches d'argile et de bois est homogène et que l'ensemble du bore détecté vient du DOT. Deux types d'essences de bois, le sapin et l'épinette, ainsi que deux types d'argile, rouge et beige, ont été utilisés dans notre travail. Dans ce mémoire, le terme argile est utilisé pour faire référence à un mélange de sable et d'argile.

Les objectifs spécifiques sont :

- Mesurer la concentration de DOT de deux essences de bois (sapin et épinette) selon l'épaisseur du bois et le temps de contact avec l'argile ;
- Mesurer la concentration de DOT de deux types d'argile selon l'épaisseur de l'argile, le temps de contact avec le bois traité et le taux d'humidité du bois ;
- Mesurer la concentration de DOT de deux types d'argile selon la direction de migration de DOT.

Limites de la recherche

Les contributions de ce mémoire concernent l'étude de l'argile en tant que composant liant et de remplissage pour la fabrication en torchis, c'est-à-dire une structure en bois avec un

remplissage de terre argileuse. La capacité d'absorption des autres composants telle que les fibres végétales, les agrégats ainsi que la terre renforcée avec ces composants ne sont pas pris en compte. Les niveaux d'humidité du bois dans différents pays peuvent varier entre 9 % et 19 % selon la nature de leur climat (par exemple, pluvieux ou ensoleillé). Les humidités de bois supérieures à 19 % et inférieures à 9 % ne sont pas testées à ce niveau. C'est l'influence de l'humidité initiale de bois qui a été testée dans cette mémoire et non pas de l'humidité extérieure; ceci est lié à la livraison du bois par des industriels. La stabilité de la migration du DOT dans le temps (de 1 à 6 mois) n'a pas été testée dans cet essai pour l'argile beige et le sapin. L'argile rouge a été choisie, car nous n'avons pas constaté de différence significative d'absorption entre les deux argiles, et cette argile est la plus utilisée dans les constructions de bâtiment en terre. L'épinette a été préférée au sapin car c'est l'essence du bois qui montre les résultats les plus stable par rapport à la grande variabilité de mesure au niveau des résultats de sapin. Le bore dans le DOT est un élément très léger, numéro atomique 5. Dans les concentrations utilisées pour le traitement du bois, il n'est pas possible de l'observer par les méthodes de microscopie liées à la détection élémentaires. Il n'est donc pas possible de d'observer le traitement du bois par le DOT et la sorption du DOT dans l'argile.

Limites liées au COVID

A cause de la pandémie, il y a eu des retards de livraison des produits pour le travail de laboratoire comme le gaz d'argon pour l'instrument avec lequel les analyses (ICP-OES) ont été réalisées et différents consommables de laboratoire (ex. : fioles, tube coniques). De plus, il y a fermeture des laboratoires pendant des périodes et limitation de nombres de personnes dans un même laboratoire. Après la reprise des activités, les analyses ont dû être priorisées selon la disponibilité du personnel et des instruments. Certaines analyses liées aux isothermes d'adsorption n'ont pas pu être réalisées durant le temps accordé à ce mémoire.

Contribution originale

Ce projet de recherche portant sur la capacité d'adsorption des argiles par rapport au produit de traitement du bois a été initié pour apporter une contribution à la protection des structures

des bâtiments en ossature de bois contre les agents biologiques. Il s'inscrit dans la dynamique du développement durable, écologique. Il comporte un double avantage : d'une part, il est crucial que le produit de traitement soit présent dans toutes les structures en bois et il l'est encore plus pour les structures en bois/terre, car son utilisation empêche les agents biologiques omniprésents d'agresser les différents composants du bâtiment, assurant ainsi la longévité des structures bois/terre. D'autre part, leur absorption par le sol en petites quantités peut ne pas nuire à la protection du bois tout en affectant positivement la protection des matériaux du sol, qui sont composés de terre argileuse et de fibres végétales. Le développement des dispositifs de fixation utilisant des formations de préservation supplémentaire pourra être testé dans des travaux futurs si l'absorption de produit de traitement par l'argile a affecté d'une façon significative la protection de structure en bois.

Structure du mémoire

Ce travail réalisé est présenté de la manière suivante.

Un premier chapitre, consacré à la revue de la littérature, commence par l'état de l'art sur la construction en terre et sa répartition dans le monde ainsi qu'à l'intérêt qu'elle suscite. Une section traite de l'utilisation de la terre en abordant l'argile et son origine, sa structure, les différents types et leurs principales propriétés. Une autre section présente le bois en tant que matériaux de construction ainsi que ses principaux avantages et inconvénients. Finalement, les différents types de traitements du bois, les produits utilisés pour sa préservation, incluant une description approfondie des borates en tant que produits de préservation de bois, sont présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie suivie et au protocole expérimental retenu pour les différents essais réalisés au laboratoire.

Les principaux résultats expérimentaux et la discussion des résultats sont exposés dans le troisième et le quatrième chapitre respectivement.

Une conclusion qui résume les principaux résultats obtenus clôt ce travail. À la fin, des perspectives et des suggestions sont proposées dans le but d'élargir la portée de la présente recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Généralités sur la construction en terre crue

La terre, matériau disponible en quantité et présent partout, est utilisée dans la construction depuis des milliers d'années, ce qui fait de la construction en terre crue le type de bâtiments le plus populaire dans le monde. Qu'elle soit la technique de construction, l'architecture de terre permet de construire des édifices simples ou monumentaux dans des environnements variés. Depuis toujours, cette technique de construction est soumise à des perfectionnements. De plus, des textes de Vitruve, Varron, Caton ou encore Palladius contiennent des tentatives de normalisation de la construction en terre crue (Chazelles, 2003).

1.1.1 Construction en terre crue dans le monde

Le Moyen-Orient, l'Amérique latine et la quasi - totalité de l'Afrique (Égypte, Sénégal, Algérie, etc.) concentrent la majorité des ouvrages en terre (Figure 1-1). Dans les régions indigènes, on les trouve également en Chine et en Inde. Les bâtiments en terre crue sont encore visibles dans le paysage comme un témoignage du passé en Europe, où ce mode de construction connaît un regain d'intérêt du fait de sa faible empreinte environnementale. On les trouve dans l'Europe de l'Est, en Allemagne, au Danemark, en Suède, et également en Espagne, en France, en Belgique (Anger & Fontaine, 2005; Doat et al., 1979).

Même encore, il existe plusieurs millions de bâtiments en Europe, mais la plupart d'entre eux sont des structures anciennes. Bien qu'ils soient encore occupés, ils nécessitent un entretien annuel coûteux (Anger, 2011). Selon des études, au moins 30 % de la population mondiale vit dans des structures en terre et 17 % des structures inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des exemples d'architecture en terre (Anger & Fontaine, 2005).

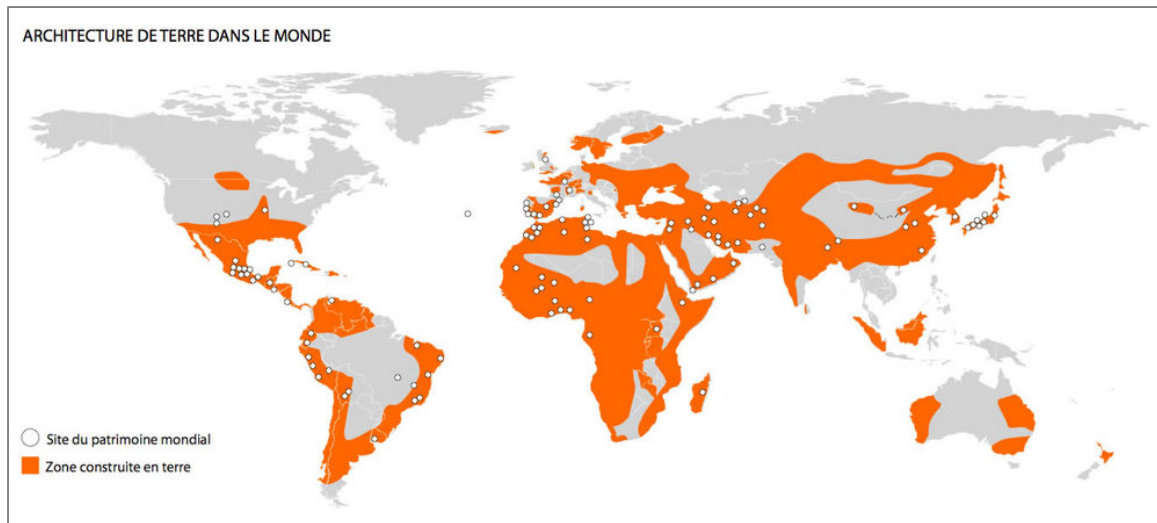


Figure 1-1 La terre comme matériau de construction dans le monde, Tirée de <http://craterre.org/>

1.1.2 Intérêt de la construction en terre crue

Les bâtiments construits à partir de matériaux disponibles localement sont actuellement intéressants dans une logique de développement durable. En raison du fait qu'ils sont généralement naturels, ces matériaux peuvent être utilisés sans mettre en danger l'environnement. Les matières premières sont extraites directement sur le site de la construction ou près du site, comme la terre ou les fibres végétales. Par la suite, avec une très faible consommation d'énergie de fabrication, ils sont transformés en matériaux de construction (Elnabouch et al., 2015).

Plusieurs intérêts résident dans l'utilisation des matériaux locaux. Ils traitent des questions environnementales, de la durabilité, du confort et des facteurs socio-économiques. L'utilisation de tels matériaux permet de réduire l'énergie utilisée dans l'extraction, le transport et la fabrication, entre autres. Par conséquent, ils génèrent une énergie grise quasi nulle. L'utilisation de ces matériaux, d'autre part, favorise l'emploi local. Ils ont ainsi un intérêt socio-économique évident (Elnabouch et al., 2015).

Le matériau terre est capable de réguler naturellement l'humidité de l'air et, par conséquent, la température à l'intérieur du bâtiment, grâce à ses propriétés hygroscopiques. Tout d'abord,

l'humidité intérieure ajustée naturellement réduit le risque de pathologies liées à une condensation prolongée, comme le développement de moisissures et de maladies respiratoires chez les habitants (Birkhauser, 2009). De plus, l'inefficacité thermique qui en résulte permettra de réduire les coûts énergétiques associés au chauffage et à la climatisation des maisons de la région.



1.2 Techniques de construction en terre

Il existe différentes méthodes de construction en terre. Dans certains cas, la terre est amendée avec des fibres principalement végétales pour réduire les fissures de rétraction ou améliorer ses propriétés isolantes. On distingue également les murs monolithiques et ceux réalisés avec des briques. Dans le Tableau 1-1, les approches les plus connues sont incluses.

Tableau 1-1 Différentes techniques de construction en terre (Hugo et al., 2006)

Technique	Description	Illustration
Adobe	Briques de terre moulées à la main et séchées au soleil. Le matériau a une consistance visqueuse. Des fibres végétales ou animales sont parfois ajoutées au mélange.	
Pisé	Murs de terre compactée par couches dans des banches. Le matériau a une consistance ferme.	
Brique de terre comprimée (BTC)	Briques le plus souvent parallélépipédiques de terre obtenues par compaction mécanique. Elles sont souvent stabilisées par du ciment ou de la chaux. Le matériau a une consistance ferme.	

Tableau 1-1 Différentes techniques de construction en terre (suite)

Torchis/terre paille	Parois à structure en bois sur laquelle est appliqué un mélange de terre et de fibres végétales tel que la paille. L'ajout de fibres permet de maintenir la cohésion et de limiter le retrait du matériau lors du séchage.	
Bauge	Mur monolithique à base de terre (avec ajout de fibres ou non). Elle est montée en posant successivement des couches du mélange sur des couches inférieures sèches. Les parois des couches encore fraîches sont arasées pour avoir un aspect lisse.	

1.2.1 Torchis

Le torchis est un matériau utilisé pour le remplissage des structures porteuses en bois appelées ossature de bois ou colombage. Après avoir été plastifié par piétinement, un mélange constitué de terre argilolimoneuse, de fibres végétales et d'eau est inséré entre et autour de l'ossature en bois à l'aide d'une structure d'attache qui peut être constituée d'un lattage, d'un barreaudage, ou d'un tressage (Dewulf, 2015).

1.2.2 Construction en torchis dans le monde

Utilisant ces avantages : économiques, écologiques, esthétiques et environnementaux, de nombreux bâtiments ont été construits près que partout dans le monde. Par exemple, on trouve le *cob cottage* l'un des bâtiments en torchis les plus célèbres dans le monde au Canada (Figure 1-2); le palais de Najran en Arabie saoudite (Figure 1-3); et une maison en torchis en plus de 70 ans en Angleterre (Figure 1-4).



Figure 1-2 Chalet en torchis (cob cottage) au Canada,
Tirée de Built Green (2017)



Figure 1-3 Palais de Najran en Arabie saoudite,
tirée de Alamy Limited (2021)



Figure 1-4 Maison en torchis en Angleterre,
Tirée de Rootwell Product (2018)

1.3 Utilisation de la terre dans la construction

1.3.1 Définition et composition

La terre crue est le constituant de base du pisé, du torchis, de la bauge. Elle est généralement constituée d'une fraction fine : l'argile qui agit comme un liant sur les autres constituants (sable, gravier et fibres) et lui donne de la cohésion et d'une fraction grossière : les particules de graviers, de sable et de limons sont destinées à former le squelette granulaire qui confère de la résistance au matériau. Chaque technique constructive et chaque type d'enduit nécessitent des qualités et des dosages particuliers pour chacun des constituants : argile, sable, fibres végétales, graviers (Phung, 2018). Le comportement du sol change avec la proportion d'éléments fins ou grenus. Avec une forte proportion d'argile, le sol gonfle en présence d'eau et se rétracte après séchage. Cependant, le sol est stable avec une proportion élevée d'éléments grenus à l'état sec ou humide. Les matériaux contenant des éléments fins en grande proportion sont à éviter dans les constructions (Joubert, 1992). Dans cette partie, nous mettrons l'accent sur l'argile, son origine, sa structure, les différents types d'argile.

1.3.2 Formation des argiles

Les argiles naissent du sol en mouvement constant. Elles apparaissent selon trois grands processus de formation, qui peuvent être juxtaposés. Le premier est lié à la simple décomposition des roches par l'érosion. De nombreux phénomènes naturels contribuent à la formation des argiles, notamment la pluie, le vent, le gel, le dégel, les vagues et bien d'autres. Le second processus est appelé néoformation. Il correspond à la formation du minéral. Par combinaison, les substances transportées par l'eau dans le sol vont s'organiser pour former une structure minérale. Le troisième mécanisme correspond au processus de transformation des minéraux évoluant par dégradation (perte d'équilibre du sol) ou agrégation (accumulation de sédiments dans un cours d'eau par un transport d'eau excessif) des ions minéraux de l'argile (Elhachmi, 2013; Villieras, 2008))Figure 1-5(.

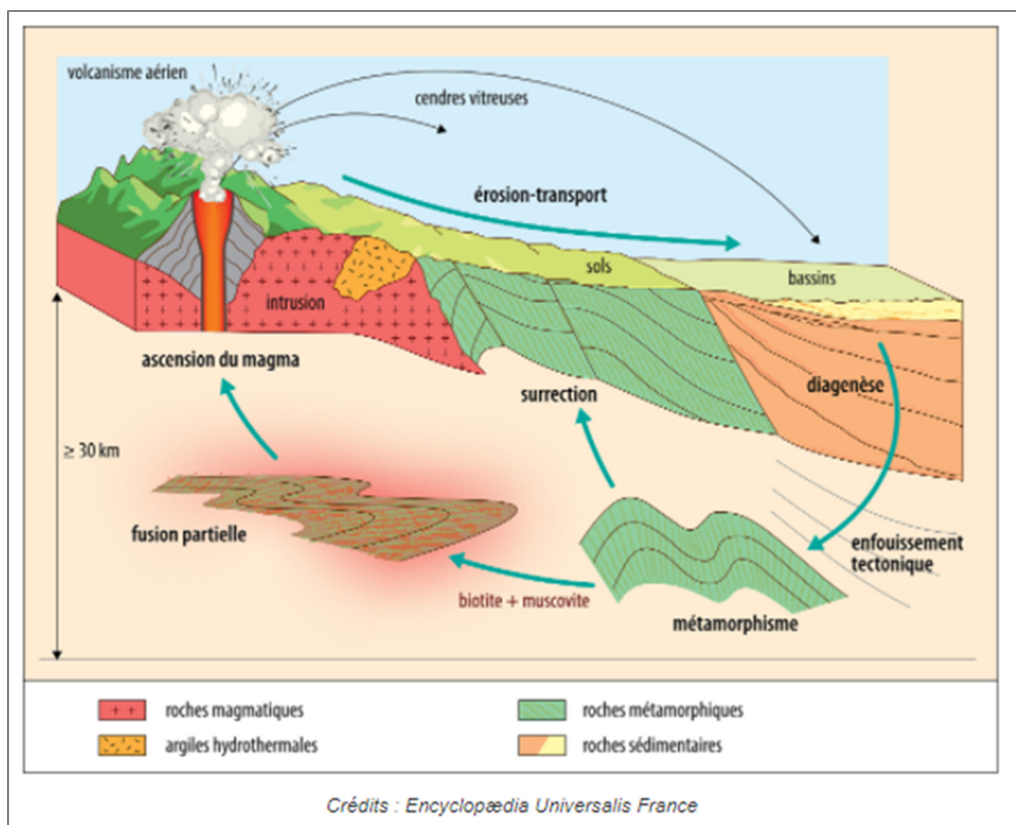


Figure 1-5 Représentation schématique du cycle des argiles dans la croûte continentale d'après R.J. Merriman (2005)

Les roches argileuses sont présentées sur la majeure partie de la surface terrestre, mais toutes ces roches ne sont pas identiques. Différentes argiles ont été créées à la suite de l'altération des différentes roches au cours des temps géologiques. Le type de roche à partir de laquelle l'argile est formée, le climat et la topographie de la terre y contribuent. Par exemple un climat froid provoquera une altération faible de la roche donc les minéraux argileux auront une composition similaire à celle des minéraux provenant de la roche d'origine provoquant la formation des illites et des chlorites alors qu'un climat chaud et humide favorisera une forte hydrolyse qui se traduira par la production de kaolinites et de smectites (Bencharif et al., 2017). La composition de l'argile peut également être influencée par la topographie du sol environnant. La kaolinite est formée à la suite du fort drainage de l'eau fourni par une zone de pente. En revanche, un milieu confiné, comme celui d'un fossé, entraînerait la concentration de smectites (Andrianne, 2003).

1.3.3 Structure des argiles

La composition et la structure de chaque argile les distinguent les unes des autres. Géologiquement parlant, une argile est un minéral dont la granulométrie est inférieure à 4 micromètres (Soraya, 2016). Les minéraux argileux sont des phyllosilicates d'aluminium dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres et de couches de tétraèdres reliées par les atomes O et OH mis en commun. Ces ions chargés négativement ont tendance à repousser et à former une charpente où les cations peuvent être logés, assurant la stabilité électrostatique de la structure globale (Bentahar, 2017). D'après la structure du feuillet, on distingue principalement les argiles TO (1 couche tétraédrique + 1 couche octaédrique) et les argiles TOT (2 tétraédrique pour 1 octaédrique).

- La couche tétraédrique est formée par un atome central, qui est principalement du silicium, entouré de quatre atomes d'oxygène (Figure 1-6). Chaque tétraèdre est relié à ses voisins en partageant trois angles. Six tétraèdres réunis forment une cavité hexagonale.
- La couche octaédrique est formée par un atome central, souvent l'aluminium, entouré par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles (Figure 1-6). Chaque octaèdre est connecté aux octaèdres voisins en partageant uniquement les arêtes entre eux.

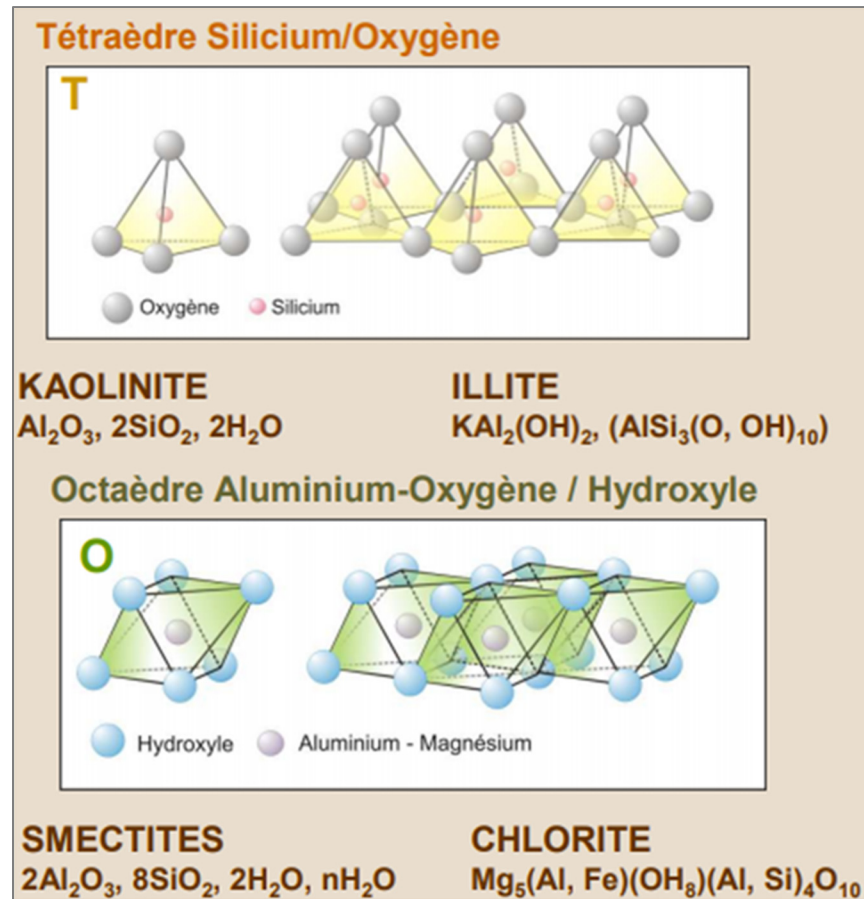


Figure 1-6 Représentation schématique des couches tétraédrique et octaédrique. Tirée de site : : <https://lms.fun-mooc.fr/c4x/MinesTelecom/04004/asset/Semaine5argiles.pdf>

1.3.4 Différents types d'argile

La classification des minéraux argileux présentée dans cette partie repose généralement sur l'utilisation des critères suivants :

- le type de feuillets,
- la couleur.

1.3.4.1 Type des feuillets

- Minéraux de type TO

Le feuillet de phyllosilicates est composé de deux couches : une couche tétraédrique et une couche octaédrique (Figure 1-7). Il est classé T/O ou 1/1. Son épaisseur est d'environ 7 Å. Ce type fait référence à la kaolinite, l'un des minéraux argileux les plus courants.

Des liaisons hydrogène assurent la liaison de deux feuillets adjacents. Ces liaisons se forment entre les hydroxyles de la couche octaédrique et les oxygènes de la couche tétraédrique. Ils provoquent une répulsion des feuillets adjacents, empêchant toute pénétration de molécules d'eau, de molécules organiques ou d'ions minéraux (Elhachmi, 2013). En conséquence, il n'y a aucune possibilité d'expansion ou de contraction des feuillets. La faible capacité d'échange des kaolinites est due aux sites superficiels amphotères.

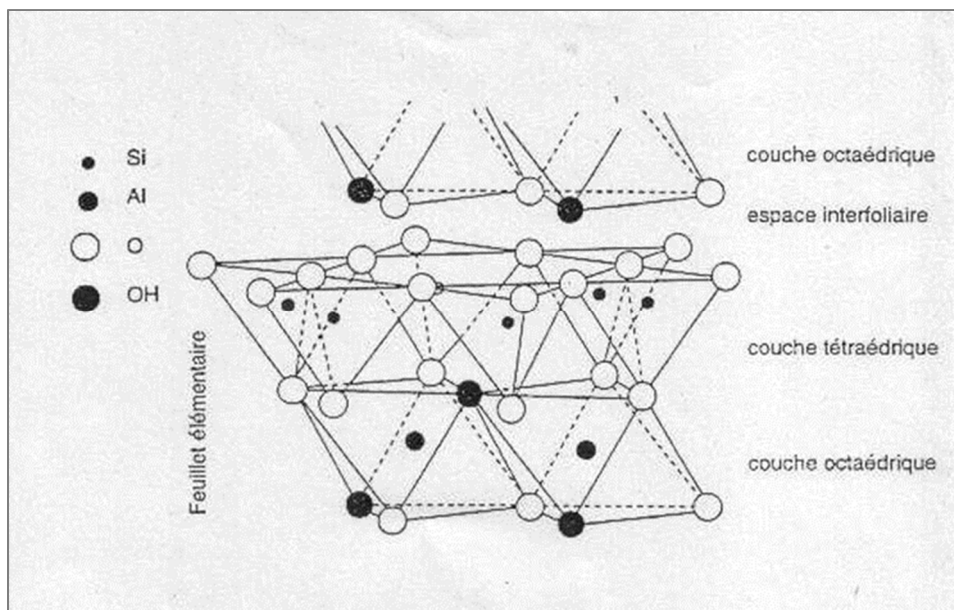


Figure 1-7 Représentation schématique de la kaolinite,
Tirée de Tertre (2005)

- Minéraux de type TOT

Ce type de minéraux est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est appelé type T/O/T ou 2/1. Son épaisseur est d'environ 10 Å. Ce type de minéral est classé en deux grandes familles : l'illite et les smectites.

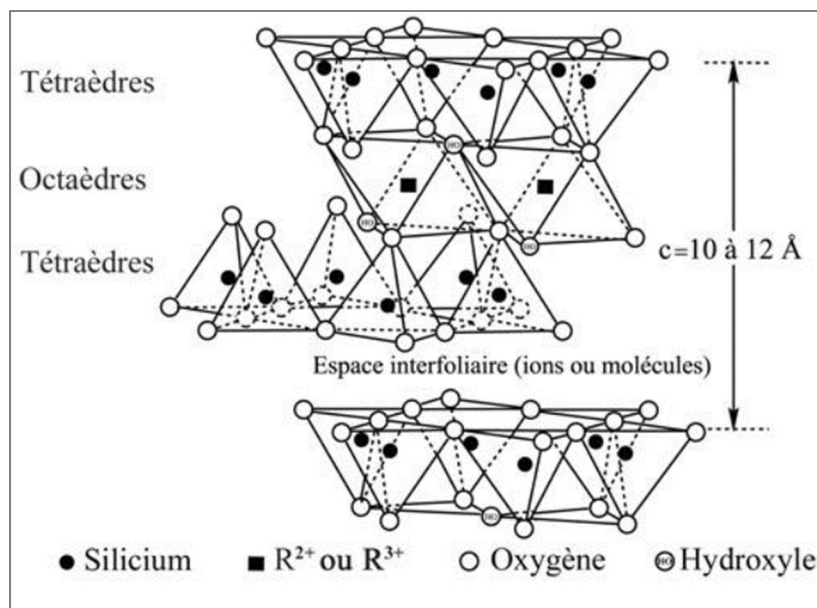


Figure 1-8 Représentation schématique de la structure d'une argile de type TOT Tirée de Elhachmi (2013).

L'illite est composée d'une couche octaédrique (O) qui s'intercale entre deux couches tétraédriques (T). Sa formule théorique est : $(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)(\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{K})_x)$ avec x proche de 0,5. Les illites sont des minéraux argileux à feuillet de type 2/1 et à équidistance basale stable à 10 Å. Elle a des remplacements fréquents de Si^{4+} pour Mg^{2+} , Fe^{2+} , ou Fe^{3+} , et les déficits de charge de la maille sont généralement compensés par des ions K^+ logés dans les cavités hexagonales des couches tétraédriques. La présence de potassium, un cation anhydre, dans l'espace interfoliaire procure la rigidité de la liaison entre les feuillets, empêchant ces minéraux de gonfler en présence d'eau (Elhachmi, 2013).

Étant donné leur structure, les smectites doivent équilibrer leur charge dans la zone interfoliaire en insérant des cations. Ces cations peu structurés sont susceptibles d'être remplacés par d'autres cations. C'est ce qu'on appelle la capacité d'échange cationique (CEC). Cette structure permet également l'injection de molécules telles que l'eau, la glycérine ou d'autres molécules organiques entre les feuillets. Cette insertion provoque l'expansion de la structure. Les deux minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite et la bentonite.

La montmorillonite a une teneur élevée en silice et en minéraux, notamment du potassium, du magnésium, du fer, du manganèse, de l'aluminium et du soufre. Les propriétés et les caractéristiques de l'argile montmorillonite sont supérieures à celles de toute autre forme d'argile verte, c'est pourquoi elle est la plus commercialisée (Hernot, 2016).

La bentonite, une des plus importants minéraux de la famille des smectites, se distingue par sa capacité élevée d'adsorption, d'échange d'ions et de gonflement, ainsi que par des propriétés rhéologiques uniques (thixotropie). De ce fait, elle a un large éventail d'applications dans des domaines variés (forage, compostage, céramique, peinture, pharmacie, sols décoratifs) (Belbachir et al., 1984).

- Minéraux de type TOTO

Le feuillet est une alternance composée d'un feuillet T/O/T avec couches octaédriques inter-foliaires. L'équidistance caractéristique est d'environ 14 Å. A ce type de minéraux appartient la famille de la chlorite (Figure 1-9).

La structure des chlorites correspond à l'association d'un feuillet de type micacé TOT avec une couche interfoliaire supplémentaire et indépendante composée d'hydroxyde de magnésium ou de fer ferreux. Les charges négatives résultant des différentes substitutions dans le feuillet 2/1 sont ainsi compensées par les charges positives développées dans l'octaédrique hydroxylée au sein de laquelle se produisent des substitutions bivalentes/trivalentes (par exemple : Mg^{2+}/Al^{3+} , Mg^{2+}/Fe^{3+} , Fe^{2+}/Fe^{3+}) (Hernot, 2016).

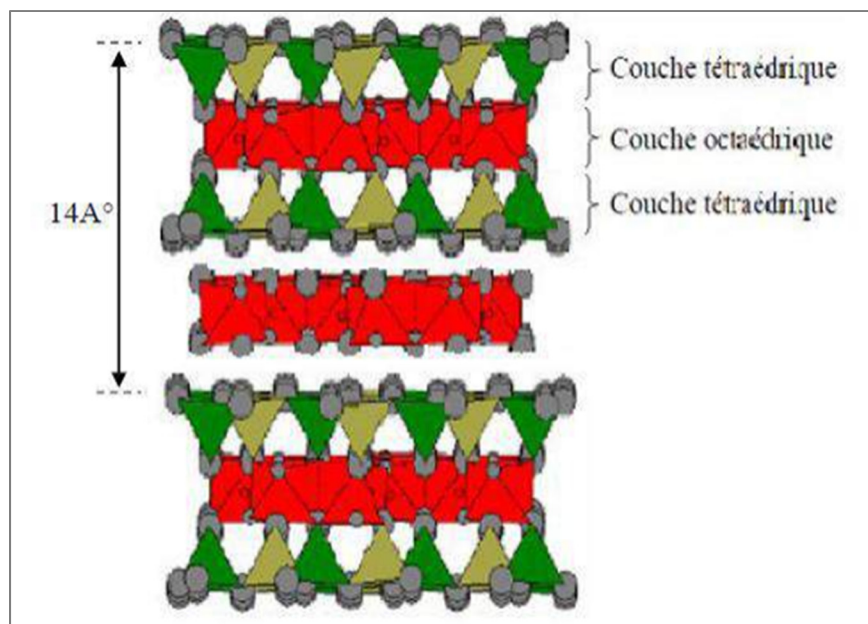


Figure 1-9 Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type TOTO tirée de Ouled abd eslam & Bouregaa (2019)

- Minéraux interstratifié

Les minéraux interstratifiés sont formés par l'accumulation aléatoire ou ordonnée de plusieurs espèces minérales argileuses (généralement deux). Les combinaisons de différents minéraux sont très nombreuses, mais seules quelques-unes représentent la majorité des interstratifiés naturels. Ces phyllosilicates sont difficiles à détecter par spectrométrie infrarouge (Truche, 2010).

1.3.4.2 Classification selon la couleur

Les argiles ne sont pas identifiables par leur couleur. Une couleur peut être assignée à plusieurs variétés d'argiles; par exemple, la couleur verte peut être trouvée dans la montmorillonite, l'illite et le chlorite. La différence de couleur observée est due à la concentration d'oxyde de fer (Hernot, 2016).

- Verte

Les argiles vertes ont une basse teneur en fer, ce sont le plus souvent des montmorillonites, des illites et des smectites.

- Blanche

Ces argiles pressentent des concentrations faibles en impuretés, c'est-à-dire, qu'il n'y a pas de coloration dans ces argiles. Les minéraux les plus courants sont les kaolinites, mais on trouve également des smectites.

- Rouge

Ces argiles, qui sont typiquement des illites, sont riches en oxyde de fer. Elles sont extrêmement reminéralisantes et sont idéales en usage externe sur les peaux irritées, fatiguées ou ternies. Ces argiles sont utilisées dans la construction sous forme de briques en terre crue, d'enduit de plafonnage, d'enduit de finition.

1.3.5 Propriété des minéraux argileux

Les propriétés uniques des minéraux argileux sont reliées à leur petite taille, à leur structure en lamelles et à la charge négative des particules.

1.3.5.1 Pouvoir absorbant et adsorbant

On appelle absorption la capacité de pénétration d'un liquide ou d'un gaz. L'exemple le plus connu est celui de l'éponge qui absorbe un liquide. Ce phénomène se manifeste au niveau de l'argile par capillarité, par opposition à l'absorption au niveau du tube digestif. Cette propriété d'absorption donne aux argiles la capacité d'être utilisées dans une variété de cataplasmes pour traiter les blessures en absorbant les fluides pathologiques tels que le pus. Une autre application est à domicile pour absorber les odeurs désagréables.

L'adsorption est une autre qualité des argiles. Contrairement au phénomène d'absorption qui internalise les molécules (à l'état liquide ou gazeux), l'adsorption correspond à la fixation des molécules en surface.

Il existe deux types d'adsorption :

- L'adsorption chimique (chimisorption) est l'interaction de liaisons covalentes ou hydrogène entre l'adsorbant et l'adsorbat. Les argiles sont chargées négativement à l'intérieur et positivement à l'extérieur. La présence d'atomes de silicium (Si) et d'aluminium (Al) au sein de la structure est bénéfique. Les ions oxygène (O) et hydroxyle (OH) aux sommets de la structure sont négatifs. Ces ions négatifs à la surface de la feuille sont fixés sur des atomes de sodium (Na)⁺ qui sont chargés positivement (Collet, 2004).
- L'adsorption physique (physisorption) : ce type d'adsorption peut être décomposé en trois phases selon l'humidité relative ambiante. En premier lieu la surface des pores est recouverte par les molécules d'eau en une couche et est maintenue sous l'effet des forces de Van der Waals (adsorption monocouche), puis lorsque l'humidité devient plus importante, d'autres couches de molécules d'eau se fixent à la première (adsorption multicouche) et finalement pour une humidité relative plus forte. Les couches poly-moléculaires se rejoignent et un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque se forme. Les forces capillaires retiennent l'eau à la surface des pores et entraînent le remplissage des pores les plus fins puis des pores plus importants (condensation capillaire) (Collet, 2004))Figure 1-10(.

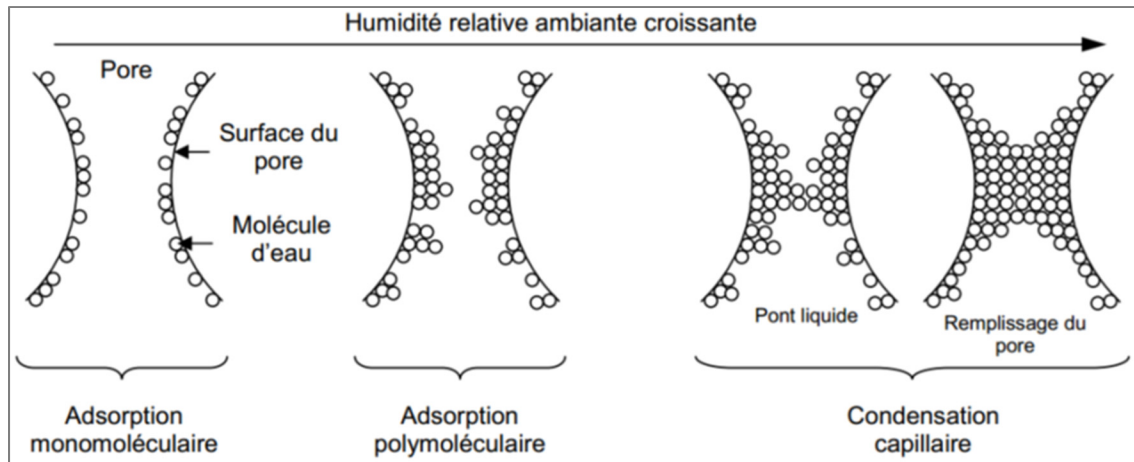


Figure 1-10 Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore, Tirée de Collet (2004)

Parmi les argiles, on trouve des smectites, des vermiculites et des minéraux interstratifiés, qui se distinguent par une grande capacité d'adsorption d'eau entre les feuillets de leur structure, provoquant une variation de volume et donc un gonflement (Bentahar, 2017).

1.3.5.2 Propriétés colloïdales

Par opposition à une véritable solution, la suspension d'argile est dite colloïdale. Cette caractéristique est déterminée par la taille des particules. En effet, les minéraux argileux produisent des solutions colloïdales avec l'eau qui flocculent lorsque les charges superficielles des particules sont neutralisées par les ions. Ce phénomène est réversible : lorsque les ions sont éliminés par rinçage, les particules retrouvent leur état dispersé (Andrianne, 2003).

1.3.5.3 Autres propriétés : acide, oxydoréductrice, photovoltaïque, radioactive

Le pH de l'argile est compris entre de 4,6 à 10,2. Les argiles ont des atomes de surface ayant des propriétés d'accepteur ou de donneur d'électrons. Les sites donneurs emprisonnent les accepteurs d'électrons et vice versa. Ceci est lié à la nature acide des argiles. Cette propriété

varie selon les argiles et les substances en contact avec elles. La nature du cation réversible de l'argile, sa teneur en eau ou encore sa charge électrique négative vont jouer sur l'acidité.

L'argile minérale peut capter, transférer et accumuler l'énergie solaire (ainsi que la radioactive). Une expérience de la NASA a découvert que bombarder l'argile avec des charges électriques et photoniques modifie sa structure en acceptant des électrons libres (Coyne, 1984). Cette caractéristique est liée à la présence de silice dans la structure argileuse.

On appelle propriété « radioactive » de l'argile la présence de roches dégradées présentant une faible radioactivité résiduelle. L'argile possède donc une radioactivité naturelle. Cette dernière est régénératrice, et l'argile peut même absorber certains rayonnements néfastes. Elle est capable de capter l'excès de radioactivité dans l'organisme et de la transmettre en cas de défaillance, offrant ainsi une protection naturelle à l'organisme (Andrianne, 2003).

1.4 L'utilisation du bois en tant que matériau de construction

Le bois est un matériau naturel d'origine végétale, exploité depuis longtemps pour de multiples usages. Il est indispensable dans la vie culturelle et identitaire québécoise, leur taux d'utilisation a passé de 15 % en 2007 à 28 % en 2017 dans les différents types de construction (commerciale, industrielle, multifamiliale) (Cecobois, 2022).

1.4.1 Le bois : de l'arbre à la cellule

1.4.1.1 Macrostructure

De point de vue macroscopique, la structure du tronc d'arbre présentée dans la Figure 1-11 montre l'existence de quatre types de bois différents en allant de la périphérie vers le centre. Tout d'abord, on constate l'écorce, couche protectrice, entoure le cambium, qui lui, produit l'aubier et achemine la sève. Les cellules mortes de l'aubier constituent le duramen. La

formation d'un nouveau cerne du bois annuellement est un indicateur sur l'âge de l'arbre et le type de climat le long de leur croissance.

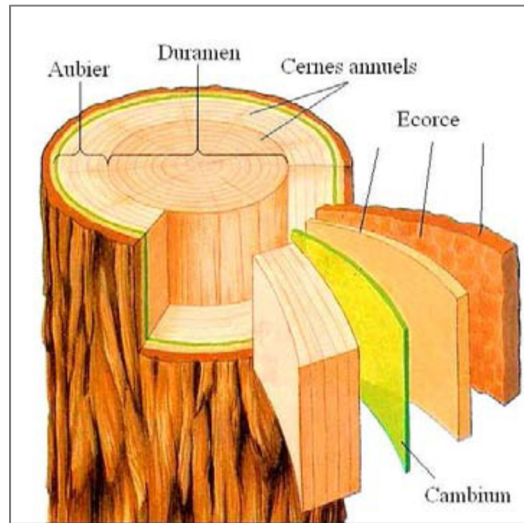


Figure 1-11 Schéma présentant les différentes zones anatomiques d'un arbre, Tirée de Pignolet.O, (2008)

1.4.1.2 Microstructure

Au niveau microscopique, le bois résineux est majoritairement constitué de trachéides de forme courbe (Figure 1-12). Il s'agit d'un ensemble d'alvéoles de longueurs allant de 2 à 9 mm et de longueurs transversales allant de 15 à 35 µm. Les trachéides du bois d'été se distinguent de celles du bois de printemps par des parois plus épaisses et un diamètre intérieur plus petit, conférant au bois d'été une densité et une rigidité plus élevées que le bois de printemps, ce qui détermine ses propriétés mécaniques et hydrauliques (Saifouni, 2014). Le bois possède également des canaux résinifères parallèles aux trachéides qui assurent la circulation de la résine. Les rayons ligneux assurent le transport de la sève dans le sens radial.

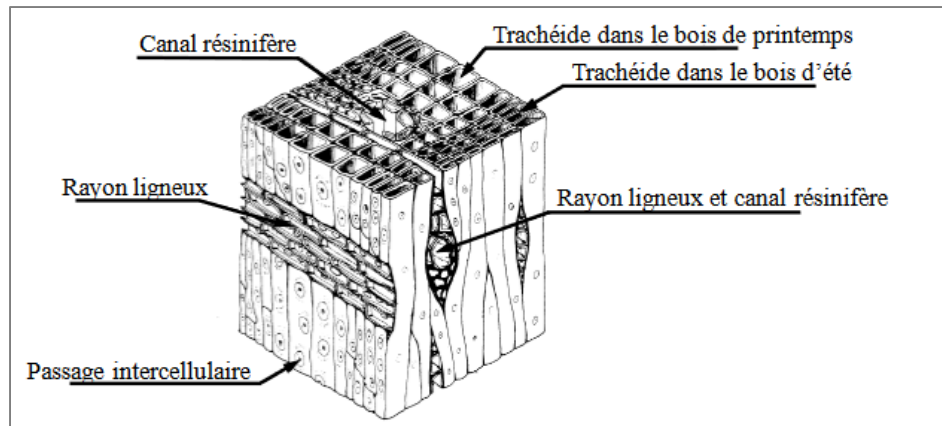


Figure 1-12 Organisation cellulaire d'un bois résineux tirée de Saifouni, (2014)

1.4.1.3 Ultrastructure de la cellule unitaire du bois

L'observation détaillée d'une structure cellulaire à l'aide d'un microscope électronique permet une description détaillée des couches de la paroi cellulaire. Elle est constituée d'une couche primaire P de 0,1 μ m d'épaisseur composée de microfibrilles orientées aléatoirement qui entoure une couche secondaire S composée de trois couches S1, S2 et S3)Figure 1-13(.

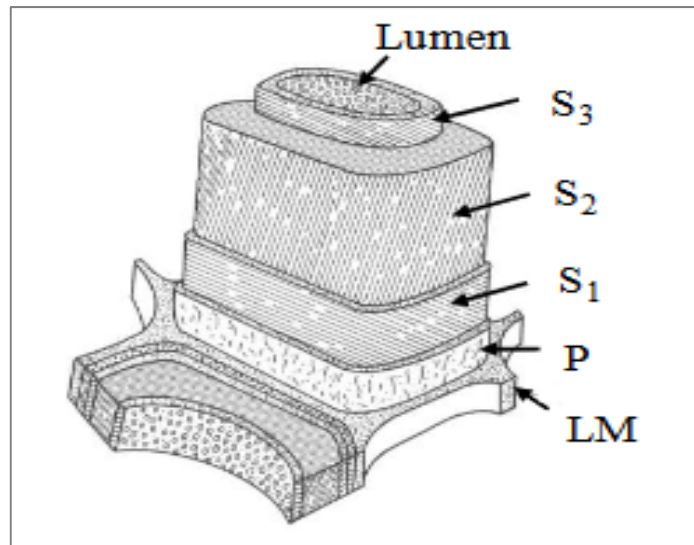


Figure 1-13 Illustration d'une cellule de bois avec l'organisation des différentes couches de la paroi cellulaire : LM : lamelle mitoyenne, P : paroi primaire, S : paroi secondaire avec ses couches S1, S2 et S3.
Tirée de Saifouni, (2014)

La couche S2 représente environ 85 % de l'épaisseur totale de la membrane cellulosique. Les microfibrilles qui composent cette paroi secondaire sont disposées en forme de spirales croisées. L'orientation des microfibrilles dans cette couche S2 détermine les propriétés mécaniques du bois. Les microfibrilles sont essentiellement des chaînes de molécules de cellulose entourées d'hémicellulose et incrustées de lignine.

1.4.2 Avantages de la construction en bois

1.4.2.1 Matériau vert

Figure 1-14 La Figure 1-14 montre que l'utilisation du bois permet de réduire considérablement l'utilisation de matériau non renouvelable ce qui joue un rôle très important dans le domaine de construction. Le bois a une capacité de piéger le carbone en raison de son origine qui est l'arbre, ce qui caractérise par son rôle important dans la réduction du gaz à effet de serre (GES) par la photosynthèse, ce carbone demeure dans le bois même après l'abattage de l'arbre. Il est entendu que 1 m³ du bois contribue à séquestrer environ 1 tonne de CO₂ (Cecobois, 2022).

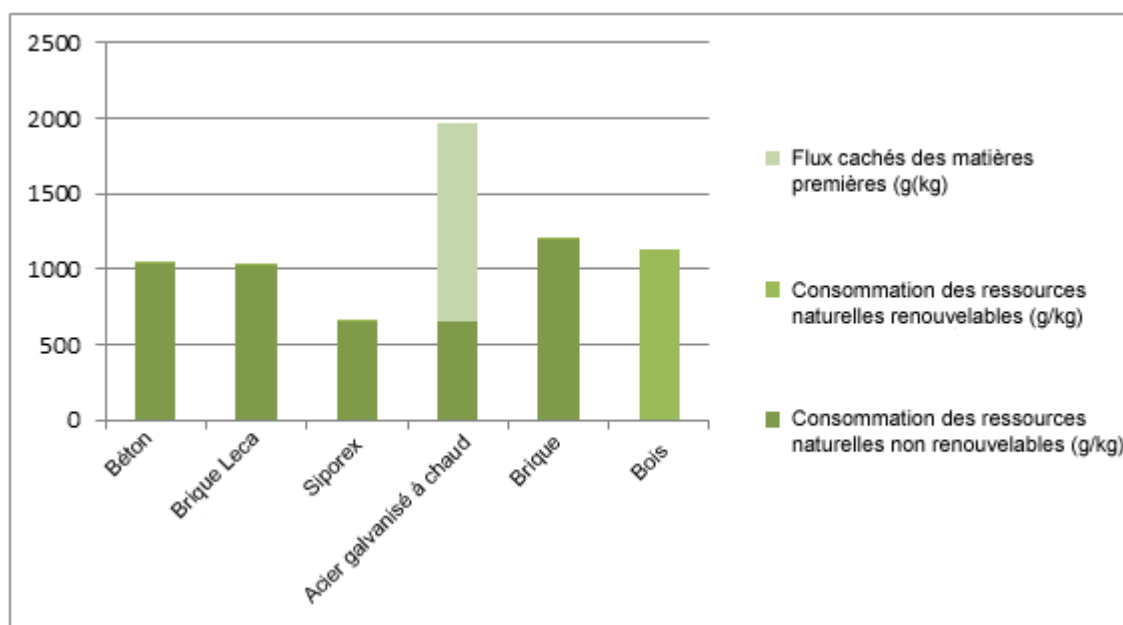


Figure 1-14 Consommation des ressources naturelles dues à la fabrication de différents matériaux de construction, selon les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables. Tirée de Puuinfo, (2020)

Par ailleurs, tout au long de son cycle de vie (coupe, transport, scierie, etc.), le bois nécessite moins d'énergie et a moins d'impact environnemental, social et économique que l'acier ou le béton, ce qui rend une conception structurale en bois bien étudié plus performante qu'une conception en béton ou en acier. D'après la Figure 1-15, l'utilisation d'acier ou du béton au lieu du bois pour la construction contribuerait à augmenter les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère de 76 % et 83 % respectivement. En conclusion, le bois peut être considéré comme un matériau renouvelable, recyclable et certifié respectueux de l'environnement (séquestration du carbone, faibles émissions de GES).

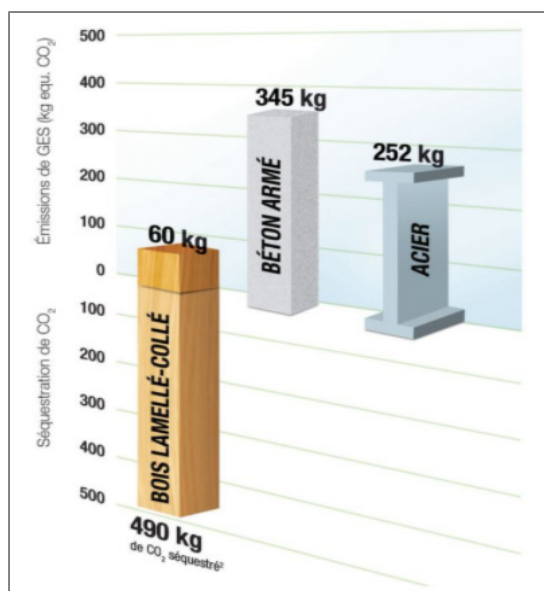


Figure 1-15 Données comparatives d'un cycle de vie d'un bâtiment commercial.
Tirée de Cecobois (2022)

1.4.2.2 Solidité et durabilité

La durabilité des constructions en bois a depuis longtemps été démontrée d'une manière certifiée. Il existe environ 50 systèmes de certification dans le monde dont le PEFC et la FSC sont les plus répandus et prouvent l'origine légale ainsi que la production durable du bois (Cecobois, 2022). Le monde entier regorge d'exemples de bâtiments en bois qui font preuve

d'une grande longévité, telle que le temple des bambous, à la Chine, il a été construit au début de la dynastie des Yuan (1279-1368) et a été reconstruit pendant la dynastie des Qing en 1885 ainsi que le Butler Square, aux États-Unis, qui a été construit en 1906.



Figure 1-16 Exemple des conceptions en bois à grande longévité : A - Temple des Bambous 1279 -1368- B - Butler Square construit en 1906

L'emploi du bois, matériau léger, confère aux constructions une meilleure résistance aux mouvements du sol et par conséquent, aux effets du temps. En témoignant ces exemples qui illustrent bien la capacité du bois à concevoir des bâtiments d'envergures impressionnantes.

Le Odata Jukai Dôme, au Japon, est l'un des plus grands stades au monde en forme de dôme ovale avec un toit en bois qui atteint une hauteur maximale de 52 mètres.

La résidence étudiante Brock Commons, au nord de l'Amérique, la plus haute construction hybride en bois au monde, à une hauteur de 53 mètres accueillant 404 étudiants à l'Université de Colombie-Britannique répartis sur 18 étages fabriqués en plancher du bois lamellé croisé (CTL), environ 2233 m³ de CTL ont été utilisés, qui correspond à un stockage de 1753 tonnes de CO₂ et une réduction d'émission de 679 tonnes de CO₂ (Résidence Brock Commons, 2016).

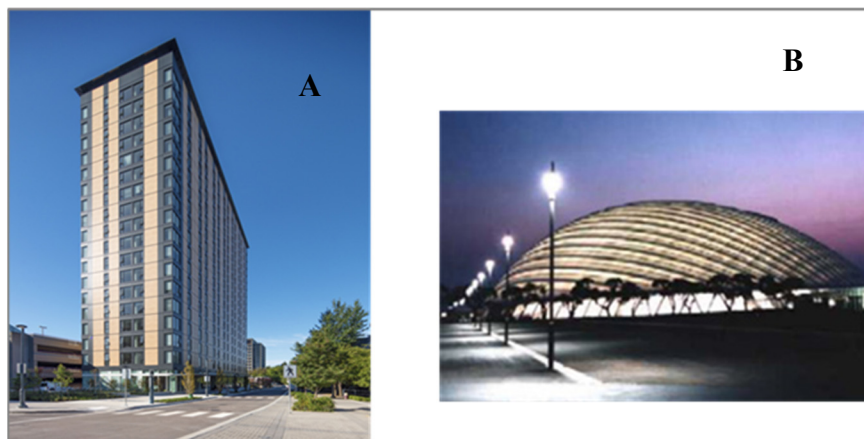


Figure 1-17 Exemple des conceptions en bois à grande portée :
A- Résidence Brock Commons B - Odata Jukai Dôme. Tirée de -
<https://web-japan.org/atlas/architecture/arc04.html>)

1.4.2.3 Efficacité énergétique

Le bois est un excellent isolant thermique en raison de sa structure cellulaire qui est composée de millions de petites poches d'air. D'ailleurs, les bâtiments construits avec des murs en bois d'une bonne épaisseur sont suffisamment isolants et ne nécessitent pas de système d'isolation. Selon les études réalisées par Cecoboïs (Figure 1-18), ses performances thermiques et sa qualité d'isolation sont supérieures à celles de l'acier et du béton (Cecoboïs, 2022). En effet, il est moins conducteur, a une résistance aux déperditions thermiques 500 fois meilleure que l'acier et 7 fois meilleure que le béton (Cecoboïs, 2022).

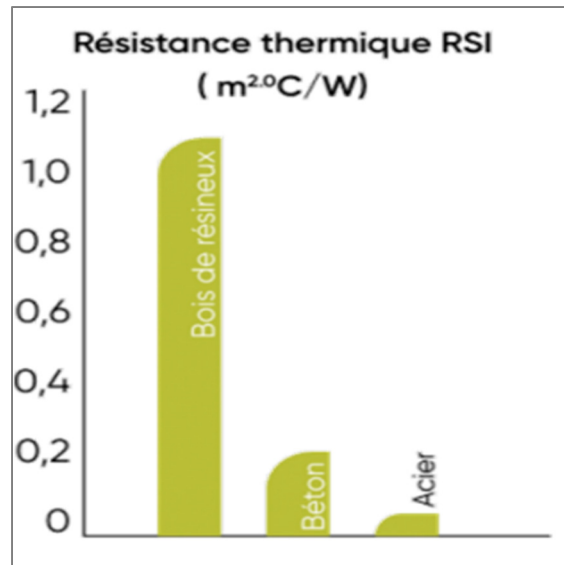


Figure 1-18 Résistance thermique du Système international (RSI) des matériaux

1.4.2.4 Résistance au feu

Le bois est considéré comme un matériau inflammable, mais il possède des propriétés de sécurité en cas d'incendie. En fait, le bois se carbonise de manière uniforme, la couche de charbon ainsi formée agit comme bouclier thermique et le bois demeure intact pendant longtemps. En outre, les structures en bois peuvent facilement atteindre des temps de freinage de la combustion de 45, 60, 90, 120 minutes (Cecobois, 2022). Le comportement du bois à l'exposition au feu est très explicite lorsque l'on compare avec celui de l'acier. En effet, la résistance mécanique du bois est presque trois fois supérieure à celle de l'acier.

1.4.3 Inconvénients de l'utilisation du bois dans la construction

Malgré ses nombreux avantages, notamment en tant que ressource renouvelable, matériau solide, durable, sécuritaire en cas de feu, Isolant thermique, écologique, chaleureux et esthétique, il présente l'inconvénient de se dégrader facilement sous l'action de divers facteurs climatiques et biologiques tels que les micro-organismes et les insectes. C'est pour cela qu'on distingue deux types de durabilité de bois à savoir naturelle et conférée.

1.4.3.1 Durabilité naturelle du bois

La durabilité naturelle du bois est la résistance naturelle des essences du bois aux attaques des agents biologiques en absence de tout traitement de préservation. L'examen de la durabilité naturelle d'une espèce ne concerne que son bois de cœur : le duramen. L'aubier n'est par définition pas durable puisqu'il est rempli d'amidon et autres ossements dont se nourrissent les insectes xylophages et les champignons lignivores.

La norme européenne (NF EN 350, 2016) spécifie la classification de la durabilité et la résistance aux insectes de la majorité des essences utilisées en Europe. Les espèces du bois sont conventionnellement réparties en cinq classes de durabilité contre les champignons comme suit :

- Classe de durabilité naturelle 1 : Très durable (Robinier),
- Classe de durabilité naturelle 2 : Durable (Chêne, châtaignier),
- Classe de durabilité naturelle 3 : Moyennement durable (Douglas, Mélèze),
- Classe de durabilité naturelle 4 : Faiblement durable (Sapin, épinette),
- Classe de durabilité naturelle 5 : Non durable (Hêtre, peuplier).

Le sapin et l'épinette appartient à une classe de durabilité naturelle 4, ces deux essences du bois sont caractérisées par une faible durabilité.

La durabilité vis-à-vis les insectes est classifiée selon le concept TOR (tout ou rien), c'est-à-dire une essence de bois peut être attaquée par un insecte spécifique ou non. Dans le secteur de la construction, les insectes majoritairement présents sont :

- Le capricorne, attaque uniquement les résineux,
- Le lyctus attaque uniquement les bois feuillus,
- Le petit vrillette, rare dans la nature et plus fréquente dans les habitations d'où son autre nom « vrillette domestique ».

1.4.3.2 Traitement du bois

Les essences de bois qui n'ont pas une durabilité naturelle suffisante par rapport à un emploi prévu vont subir un traitement qui leur offre la capacité de se protéger contre les agents de dégradation biologique, c'est ce qu'on appelle une durabilité conférée. L'obtention d'un bois traité adapté à un usage spécifique dépend de plusieurs critères comme la nature et l'imprégnabilité de l'essence, type de produit de préservation qui obéissent aux normes, à la maîtrise des prescripteurs ainsi qu'aux exigences des fabricants. À ce stade, la norme EN 350 a discerné deux types d'essences de bois, celles qui sont imprégnables où leur traitement dépend de leur aptitude à recevoir le produit de préservation (hêtre, chêne, tous les pins), et celles qui sont réfractaires qui ne sont pas imprégnable ni dans leur totalité ni dans leur aubier (sapin, épinette) (Salman, 2017).

Le traitement du bois dépend de la caractéristique intrinsèque de chaque espèce qui est la durabilité naturelle, celle-ci confère une résistance plus ou moins grande aux agents de dégradation biologique, ainsi que la perméabilité des différentes structures du bois (aubier, cœur du bois) aux substances chimiques. Selon l'étude du CWC sur la perméabilité des bois résineux courants utilisés en Amérique du Nord, les différents types de pin (pin rouge, pin blanc) sont plus faciles à être traités que l'épinette blanche et le sapin, car ces derniers présentent une perméabilité modérée dans la partie extérieure qui est l'aubier et une imperméabilité extrême dans le duramen qui définit le bois de cœur. Le Tableau 1-2 présente une comparaison entre les caractéristiques techniques pour les deux essences de bois utilisés dans notre étude, le sapin et l'épinette.

Tableau 1-2 Caractéristiques techniques des bois résineux : cas de sapin et d'épinette
(Outil de comparaison des essences, 2014)

Essences	Densité (kg/m ³)	Dureté	Sciage	Usinage	Résistance	Classe d'emploi sans traitement	Classe d'emploi avec traitement
Sapin	330 — Léger	Tendre	Facile	Facile	Bonne	1	3,1
Épinette	370 — Léger	Tendre	Facile	Facile	Moyenne	1	3,1

Un bois convenablement traité avec des produits de préservation peut avoir une durée de vie de 5 à 10 fois plus élevée qu'un bois non traité. Cette augmentation de l'espérance de vie permet d'économiser l'équivalent de 12,5 % de la récolte annuelle de billes du Canada (Canadian Wood Council, 2021). Le choix d'un produit du traitement du bois dépend de son type et du procédé adopté pour l'appliquer, ce qui rend le suivie d'une méthodologie bien définie et basée sur plusieurs étapes nécessaire afin d'augmenter sa durabilité à l'encontre des agents biologiques.

En premier lieu, il est nécessaire de définir les contraintes liées à la construction (humidité, type de sol, contact avec le sol...) ainsi que les pathologies associées à sa situation géographique. Ces deux paramètres conduisent à la détermination de la classe d'emploi et par la suite, le choix d'un bois non traité (à une durabilité naturelle suffisante vis-à-vis de l'usage) ou d'un bois traité (à durabilité conférée) s'établit donc en second lieu.

Finalement, quel que soit le bois choisi (traité ou non), une étude de cycle de vie incluant les impacts environnementaux et économiques paraît indispensable pour le choix d'une essence de bois qui répond aux critères du développement durable (Pignolet, 2008).

Selon l'Association canadienne de normalisation, il existe quatre classes d'emplois (CE) différentes pour le bois traités employés dans la construction :

Le CE1 fait référence au bois utilisé à l'intérieur et dans un environnement sec. Le CE2 fait référence aux produits en bois fabriqués ou dérivés de bois utilisé à l'intérieur et dans un environnement sec, mais pouvant être exposés à l'humidité. Le CE3 comprend le bois qui peut fréquemment entrer en contact avec l'humidité. Les bois en contact avec le sol ou l'eau douce sont regroupés en CE4 ; les bois traités peuvent être en contact avec les eaux salées ou les eaux de mer sont regroupés en CE5.

Les classes d'emploi 3 et 4 où le bois est en contact direct avec le sol et les agents biologiques nécessitent une durabilité globale (résistance à la pourriture, stabilité dimensionnelle). Les deux essences de bois utilisées dans cette étude, sapin et épinette, appartient à la classe d'emploi CE1 et CE2.

1.4.3.3 Méthodes d'imprégnation du bois par des produits de préservation

Tout d'abord, la mise en œuvre des produits de traitement préventifs du bois avant son utilisation peut se faire par différentes méthodes assurant la pénétration et la fixation du produit. Les principales techniques préventives sont :

- Les applications en surfaces (trempage court, pulvérisation) sont des procédés où la pénétration du produit dans le bois se fait par capillarité. Elle dépend de sa capacité d'adsorption naturelle qui varie en fonction de l'essence du bois et sa qualité de la surface (bois raboté ou brut). Ce type de procédé est souvent appliqué pour les classes d'emplois 1 et 2 et rarement utilisé pour la classe d'emploi 3 (Pignolet, 2008).
- Imprégnation à cœur, c'est un procédé où le bois reçoit un traitement en profondeur. La pénétration du produit de préservation est faite par autoclave vide ou pression et généralement une combinaison des deux. Ce procédé est particulièrement recommandé pour les classes d'emplois 3 et 4, où le bois exposé à des conditions rigoureuses (contact avec le sol et/ou sources d'humidité). Ces procédures permettent d'améliorer le traitement en modifiant

les paramètres qui affectent la pénétration et le taux de rétention. Diverses variantes de ces procédures existent, notamment les suivantes.

- La méthode de traitement à l'autoclave la plus utilisée est "l'injection à refus", également connue sous le nom de Bethell. Le terme "procédé à cellules pleines " fait référence à l'idée de saturer complètement les cellules du bois. Le bois est mis sous vide forcé, par la suite le produit de traitement est mis dans le récipient et une pression est appliquée. Le produit est généralement vidé et soumis à une application finale sous vide pour obtenir une surface lisse et pour équilibrer les pressions à l'intérieur du bois. Cette procédure entraîne des taux de rétention élevés.
- La méthode Rüping est privilégiée lorsque ce taux de rétention doit être limité, comme dans le cas d'essences facilement imprégnables. Il s'agit alors d'appliquer une légère pression d'air, d'injecter le produit en maintenant une pression stable, puis de l'augmenter. Le terme "procédé avec cellules vides" a été inventé car cela limite le remplissage des vides cellulaires.
- La pression d'air initiale n'est pas appliquée lors de l'utilisation de la méthode Lowry, qui est une variante de la méthode Rüping. D'autres variantes de ces procédures, utilisant divers cycles de vide et de pression, sont disponibles sur le marché, notamment les procédures à double vide (Pignolet, 2008).

1.4.3.4 Différents produits de préservation du bois

Historiquement, les produits de préservation du bois étaient classés en 3 familles : les goudrons et les huiles, les produits organiques et les produits hydrosolubles.

- Les goudrons et les huiles

Les produits les plus utilisés dans cette catégorie sont les créosotes issues de la distillation pour traiter le bois de façon préventive contre les décomposeurs naturels (champignons, insectes et plus). La créosote est un produit huileux complexe qui contient des impuretés comme les phénols, les crésols, et les hydrocarbures polycycliques aromatiques présentant des risques pour l'environnement (les sols, milieux aquatiques...) et pour la santé humaine. Elle est classée comme une substance cancérogène, génotoxique et reprotoxique, c'est pourquoi l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) en France a décidé de restreindre leur usage aux seules traverses ferroviaires. La question de l'incinération ou du retraitement du bois créosoté en fin de vie reste un problème (Salman, 2017).

- Composés organiques

Les composés organiques ont été utilisés souvent sous forme des solutions de deux ou trois matières actives dans des solvants contenant ou non des adjuvants de fixation et de stabilité. Les substances actives sont très nombreuses et très variées : parmi les familles les plus utilisées, on peut citer les suivants.

Pentachlorophénol (PCP) de formule chimique C_6HOC1_5 , il s'agit d'un fongicide. Malgré son efficacité pour le traitement du bois, son caractère nocif pour l'homme et l'environnement oblige leur interdiction à la mise sur le marché pour les produits contenant plus de 0,1 % depuis 1994. Les bois ainsi traités sont interdits pour certains usages (construction, aménagement de construction, emballages alimentaires) (Courtois et al., 2006).

Les azoles, principalement le propiconazole et l'azaconazole, sont des fongicides qui n'ont pas un potentiel cancérogène et sont de faible toxicité contre les mammifères (Courtois et al., 2006).

Les carbamates comme le butylcarbamate d'iodopropynyle (IPBC) sont utilisés comme fongicide dans les produits de traitement du bois. L'IPBC se dégrade vite (quelques jours) et présente par conséquent un faible risque de nocivité pour l'environnement (Adam, 2008).

Depuis longtemps, les produits organiques sont utilisés sous forme de solutions dans des solvants organiques associés ou non à des additifs de fixation. Les solvants se volatilisent après avoir pénétré dans le bois alors que les produits organiques demeurent dans le bois précisément à la surface des parois cellulaires. En vertu des nouvelles réglementations destinées à réduire les émissions de composés organiques volatils, les produits organiques sont mis en œuvre sous forme d'émulsion ou de microémulsion (Hyvönen et al., 2006).

- Produits hydrosolubles

Bien que les formulations hydrosolubles multi-sels aient été largement utilisées dans le passé en matière de préservation du bois, elles deviennent de moins en moins courantes. Pendant longtemps, les classes de risque 4 ont été traitées avec du bois à l'aide de multi-sels composés de cuivre, de chrome et d'arsenic (ACC). Ces multi-sels ont un haut niveau de toxicité vis-à-vis des insectes et des champignons (Nejad, 2011). Comparativement à d'autres composites non traités, Ashaari et al., ont constaté que les panneaux de particules traités avec 2 % de CCA présentaient une meilleure résistance aux termites (Ashaari et al., 2003).

Contrairement au PCP et à la créosote, le bois traité au ACC ne dégage pas de fumées nocives. Cependant, des quantités infimes des produits chimiques qui composent ces produits peuvent se disperser dans l'eau et contaminer les aliments lorsqu'ils entrent en contact avec elle.

Divers substituts ont également été proposés à la place de l'arsenic jugé trop toxique par le bore dans le cadre des produits BCC. Cependant, ces produits continuent d'être moins efficaces que l'ACC d'origine, bien qu'ils soient relativement efficaces.

Dans une famille de produits hydrosolubles, les dérivés de bore sont également regroupés. Ce principe actif, connu sous le nom de bore, est déjà présent dans la formulation de certains produits qui contrôlent la biodégradation provoquée par les insectes et les micro-organismes.

Même en présence de substances réfractaires, il imprègne facilement le bois. Ainsi, lorsqu'il est utilisé seul, son épuisement restreint ses applications à celles où l'humidité n'est jamais le facteur dominant.

La recherche sur la préservation du bois se concentre actuellement sur les produits respectueux de l'environnement. Les trois composés de bore les plus fréquemment utilisés dans ce domaine sont l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT) ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$), l'acide borique (H_3BO_3) et le borax ou tétraborate de sodium décahydraté ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) (Baysal et al., 2006). Étant donné que le DOT est le biocide que nous avons l'intention d'utiliser dans cette recherche pour examiner son efficacité à améliorer la durabilité du bois et son absorption par l'argile rouge et beige, un état de l'art plus approfondi sur les composés boriques est présenté dans la paragraphie suivante.

1.4.4 Borates en tant que pesticides

La contribution des borates à la prévention de la détérioration du bois fait l'objet d'un débat. Un grand nombre des recherches prouve l'efficacité des composés à base de bore contre les principaux agents pathogènes du bois (Clausen & Yang, 2007). Citons par exemple, en Nouvelle-Zélande, le bois de pin Radiata est traité avec des borates depuis les années 1950 pour leur utilisation dans l'industrie de construction en bois. Par la suite, le traitement au borate, en vertu de son caractère écologique, est alors ressorti comme un choix évident comparativement au traitement par l'arséniate de cuivre chromatés (ACC). À ce jour, tellement ce traitement a prouvé son efficacité que les agences d'assurances exigent leur application pour toute maison à ossature en pin Radiata. Cross en 1992 a démontré que la majorité des cas de défaillance signalés retournent à le fait que le bois est supposé naturellement résistants (Turner, 2008). À Hawaï également, tout le bois de construction est obligatoirement prétraité avec des pesticides pour se battre contre les termites.

Un prétraitement et un post-traitement aux boracol ont été testés sur des échantillons de bois exposé aux pyrales et les résultats montrent une efficacité très importante et aucune infestation n'a été observée dans les échantillons prétraités et seuls des dommages minimes à l'infestation étaient visibles pour les échantillons post-traités (Creffield et al., 1983).

D'autres travaux à travers le monde soulignent également l'efficacité des borates en tant que pesticide. Yamauchi et al (2007), ont montré qu'une solution aqueuse en bore imprègne plus facilement les parois cellulaires du bois de cèdre japonais qu'une solution méthanoïque pour une même concentration en bore. Temiz et al (2008), ont aussi testé dans leur étude deux concentrations d'acide borique 1 % et 2 % et des dérivés d'huile de tall de composition chimique variable seul et en combinaison afin de déterminer leurs efficacités dans la préservation de bois contre les champignons. Selon Obanda et al., il existe plusieurs stratégies suivies dans les laboratoires du monde entier afin d'étendre l'utilisation de borate en tant que préservateur de bois. Ces derniers sont classés en quinze catégories en fonction de la résistance de bois traités aux organismes destructeurs, la résistance de lessivage et les applications potentiels (Obanda et al., 2008).

1.4.5 Avantages du borate

1.4.5.1 Faible toxicité

Le DL-50 c'est la dose létale requise pour tuer 50 % d'un échantillon de population. Les borates, comparativement au pentachlorophénol avec une DL-50 de 125 mg/kg, présentent un DL-50 de 3500 mg/kg. Donc, les borates présentent une très basse toxicité pour les mammifères (Jamart et al., 2012). Il existe des études qui ont montré que le bore est très peu absorbé par la voie cutanée, soit moins de 1 % par dose (Wester et al., 1998). Le bore est aisément excrété par les reins en cas d'absorption vu qu'il possède une demi-vie biologique moins d'un jour (Mastromatteo & Sullivan, 1994). D'autres recherches ont affirmé que les borates n'ont pas d'effet négatif sur la qualité de l'air avec leurs vapeurs (Turner, 2008).

Le bore est un élément nécessaire pour la santé des plantes, il joue un rôle important dans le transport des sucres, la lignification et la structure des parois cellulaires, la respiration (Kabu & Akosman, 2013). Le bore est largement présent dans les aliments tels que les fruits et légumes avec une concentration comprise entre 1,5 à 3 mg/100g, aussi pour le caviar présente une concentration très importante en bore ainsi que dans l'eau potable avec une valeur

comprise entre 0,3 g/l et 0,5 g/l. Ces aliments riches en bore contribuent à la réduction des maladies coronariennes chez les êtres humains (Mangas & Samman, 2001).

De même pour les animaux, le bore est un composé alimentaire indispensable, il est jugé non toxique pour les poissons, les invertébrés aquatiques et les poissons (Obounou Akong, 2012), ainsi que les animaux qui ont une capacité innée à contrôler les niveaux de bore dans leurs corps (Kabu & Akosman, 2013).

1.4.5.2 Facilité d'application

Les borates sont caractérisés par leur facilité d'application sur le bois. Il est simplement nécessaire de disposer d'un réservoir suffisamment grand pour une immersion totale et d'un espace pour entreposer le bois traité. En cas de nombreux échantillons de bois à traiter, cette méthode est plus utile et elle est plus rapide comparativement à la méthode avec pulvérisateur ou avec pinceau (Turner, 2008).

1.4.5.3 Ignifugation

L'ignifugation est une technique utilisée pour arrêter ou ralentir la propagation des incendies. Au Canada, selon WPC (Wood Preservative Canada) le bois traité ignifuge est strictement contrôlée, ce dernier doit être produit selon la méthode d'imprégnation sous pression et par une usine agréée aux normes spécifiques de la CSA (Association canadienne de normalisation). Ce type de bois doit réussir l'essai de propagation de flamme pour mériter l'indice de propagation de la flamme et de développement de fumée (WPC, 2022).

En raison de ses caractéristiques d'inflammabilité, le bore est utilisé depuis longtemps pour protéger le bois contre le feu. La préservation de la masse et la réduction de l'inflammabilité du bois sont des aspects de la fonction de bore en tant qu'agent de résistance au feu.

Le bore joue le rôle d'un catalyseur dans la réaction de carbonisation du bois, qui est un mécanisme naturel de résistance au feu. En effet, la couche carbonisée du bois réduisait le flux

de chaleur et limitait le dégagement de matières combustibles extractibles (Rowell, 2005a). Un film à haute température qui sert également d'isolant contre la chaleur et les matières volatiles extractibles inflammables se forme lorsque le bore fusionne à une température relativement basse. La capacité de l'acide borique à réduire la perte de masse par combustion, pénétration de la flamme, combustion lente, et même le volume de fumée pour les taux de bore les plus élevés est bien connue (Cockcroft & Levy, 1973). La majorité des auteurs estiment que la plage d'efficacité de l'acide borique se situe entre 40 et 48 kg/m³ (LeVan & Tran, 1990). Cependant, comparé aux borates comme le Borax et le DOT, l'acide borique a peu d'effet sur la propagation du feu (Lyon, 2007). Ces produits favorisent une combustion lente et incandescente (Rowell, 2005b) et sont significativement moins efficaces que l'acide borique pour la préservation de la masse. Par conséquent, la méthode la plus couramment utilisée pour avoir un impact positif sur toutes ces propriétés est un mélange de borates et d'acide borique (Ayrilmis et al., 2005). Comme ils augmentent la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion, l'ajout de borates ou d'acide borique améliore la résistance globale à la flamme (Yalinkilic et al., 1997).

1.4.6 Problèmes liés à un conservateur hydrosoluble: le cas des borates

Les borates possèdent un inconvénient majeur : leur grande solubilité dans l'eau. Les borates présentent une faible résistance à l'eau ce qui leur rends incapable de protéger parfaitement le bois en contact avec le sol et les applications extérieures à cause de sa diffusibilité naturelle et de sa sensibilité au lessivage (Kartal, 2010).

Grâce à l'eau libre existant dans le bois, les borates sont capables de diffuser dans le bois et également, ils peuvent s'échapper de bois lorsqu'il est soumis à des environnements aqueux. Afin d'améliorer leur efficacité, fixation et solubilités, nombreuses recherches antérieures ont développé plusieurs dispositifs de fixation pour limiter la lixiviation du bore en utilisant des formations de préservation supplémentaire telle que l'éthanolamine qui augmente la fixation de bore dans le bois (Lesar et al., 2008) ainsi que le tétraphénylborate de sodium et l'acide phénylboronique qui sont considérés en tant que des sels résistants à la lixiviation (Deveci et al., 2017). Également, un post-traitement avec de l'huile de ricin suivi d'un chauffage à 160 C°

sont capable à réduire la lixiviation de bore en augmentant aussi la stabilité dimensionnelle et la résistance aux champignons (Priadi et al., 2021).

Certaines études ont montré que le lessivage n'abaisse pas les niveaux de borate en dessous des niveaux requis pour la lutte antiparasitaire. Lloyd est arrivé à la conclusion que les problèmes liés au lessivage étaient initialement surestimés après une revue de la littérature sur le sujet (Lloyd, 1995).

Selon une étude citée par Lloyd, les niveaux d'acide borique correspondant (EAB) dans le bois ont été maintenus à des niveaux suffisamment élevés pour rester efficaces même après une perte de 30 % d'EAB après six mois d'exposition. De nombreuses autres études soutenant l'idée que la lixiviation n'est pas toujours synonyme de perte d'efficacité sont incluses dans l'analyse de Lloyd. En fait, le mécanisme de lessivage lui-même peut augmenter la pénétration en redistribuant le borate en profondeur dans le bois (Lloyd, 1995).

Également, William. L. H a confirmé l'hypothèse de Lloyd selon laquelle lors de lessivage, les borates pénètrent plus profondément dans le bois qu'à l'extérieur (William, 1991). Dans cette dernière, l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT) dans l'eau fabriquée par Nisus a été utilisé pour traiter des échantillons de bois qui ont été exposés aux intempéries pendant trente mois. Les échantillons ont été placés dans des bocal infestés de termites. Les échantillons ont été retirés après six semaines d'exposition et une perte de poids d'environ 2 % a été constatée, ce qui correspond au « grignotage de surface » des termites (William, 1991).

1.4.7 Facteurs affectant la pénétration des borates en profondeur

La profondeur à laquelle les borates pénètrent dans le bois dépend de diverses circonstances. La température, la concentration de la solution et la densité du bois sont d'autres facteurs à prendre en compte. Les borates pénètrent plus facilement les bois plus légers que ceux ayant une densité plus élevée (Turner, 2008). Le gain de masse final appliqué au bois après imprégnation est influencé par la concentration de la solution. En conséquence, une

concentration accrue entraîne également une croissance en masse accrue. Il a été constaté que les solutions de borates de glycol appliqué à la concentration de 23 % de DOT génèrent une pénétration significative plus importante que les solutions à une concentration de DOT de 15 % (P. K. Lebow et al., 2013). Selon l'utilisation du bois, la concentration de la solution de borate varie. Considérant l'étude de Lima et al., qui a testé 3 concentrations différentes de solutions de borate de chromate de cuivre, à savoir 1,5 %, 2 % et 2,5 %, ainsi que 3 temps de pression différents (Fonseca Lima et al., 2020). Il a été constaté qu'une application d'une concentration de 1,5 % de CCB et 30 minutes de pression ont fourni la pénétration nécessaire à l'utilisation du bois comme poteaux de clôture en contact avec le sol. Il a également été démontré qu'une teneur plus élevée en DOT permettait une meilleure imprégnation lors d'un processus de traitement sous pression, offrant une meilleure défense contre les termites et les champignons de décomposition (Mohamad-Nasir et al., 2019).

De plus, la température joue un rôle crucial dans la diffusion. La solubilité de l'acide borique est directement corrélée à la température, ce qui peut être la raison pour laquelle le taux de diffusion double tous les 20 degrés Celsius (Turner, 2008). La température a un effet significatif sur la concentration de bore dans la solution, qui est contenue dans le film superficiel du bois durci. Cela a un impact sur la quantité de bore disponible pour la diffusion. Seuls 4 % de BAE peuvent être présents dans des solutions de borax ou d'acide borique qui n'ont pas été chauffées. Le BAE était plus élevé dans les solutions froides de Tim-bor® ou de pentaborate de sodium. La quantité de BAE dans les solutions chauffées peut atteindre environ 35 % (Cookson, 2004).

Le facteur qui a le plus d'impact sur la profondeur de pénétration est la teneur en humidité (MC). La teneur minimale en humidité (CM) requise pour un processus de diffusion dépend du type de sel utilisé, bien qu'elle soit souvent proche du niveau de saturation de la fibre de la paroi cellulaire, c'est-à-dire environ 30 % de teneur en humidité (Becker, 1976). La définition du point de saturation des fibres est le point auquel toutes les cavités cellulaires sont exemptes d'eau, mais les pores cellulaires restent saturés d'eau liée. Les deux types d'eau libre et liée sont présents à des niveaux d'humidité inférieurs à celui-ci. La diffusion du bore peut se

produire dans le bois dont la teneur en humidité est comprise entre 18 et 20 %. Lorsque le bois est initialement sec, mais qu'il est ensuite exposé à des circonstances humides pendant et après la construction, la diffusion peut encore se produire à ces niveaux d'humidité relativement faibles (S. Lebow et al., 2010). Selon Ra et al (2001), il a été noté que la plage de MC qui permettait la diffusion était assez large et que l'augmentation de taux d'humidité augmentait le taux de diffusion (Ra et al., 2001). Tandis que Lebow et al (2013), ont montré qu'une légère différence de teneur en humidité peut entraîner des différences significatives dans l'étendue de la pénétration de produit de traitement dans le bois (P. K. Lebow et al., 2013).

CHAPITRE 2

MÉTHODE ET MATÉRIAUX UTILISÉS LORS DES DIFFÉRENTS ESSAIS DE LABORATOIRE

2.1 Matériaux

2.1.1 Aperçu général sur les argiles utilisées

Afin d'étudier le phénomène d'adsorption des produits de traitement du bois, deux types de mélanges argileux sont testés : rouge et beige. Elles ont été acquises auprès de Sial Laval qui est le leader dans la fabrication et la distribution de produits pour les potiers et les céramistes. Le terme argile est utilisé dans ce mémoire pour représenter un mélange de quartz, argiles et autres composés minéralogiques. Les deux types d'argiles, vendues sous forme de sacs d'environ 23 kg, ont été acheminés et conservés à température ambiante dans le laboratoire LG2 du département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure (Figure 2-1).



Figure 2-1 a) Argile en sac provenant de chez le commerçant et conservé dans le labo LG2, b) argiles à la sortie des sacs

2.1.2 Essences de bois

Deux essences sont utilisées, l'épinette et le sapin. Les planches de bois proviennent de Boralife, une société spécialisée dans le traitement du bois avec du DOT, utilisant le procédé de pointe exclusif qui est plus rapide, plus vert et plus pratique que la méthode conventionnelle de traitement du bois (sous pression) (Figure 2-2). Le Tableau 2-1 résume les caractéristiques des planches reçues par Boralife Technologie, un partenaire du projet.

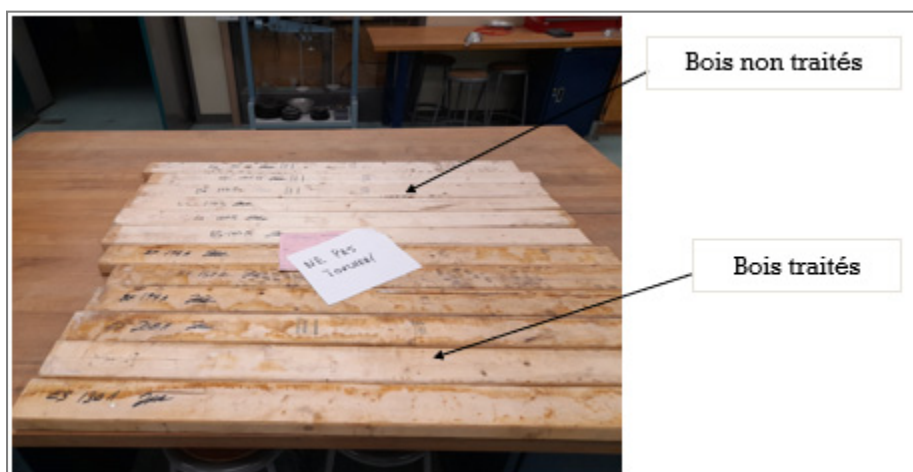


Figure 2-2 Bois reçu de Boralife

Tableau 2-1 Tableau illustratif des caractéristiques des planches reçues. Adapté d'AWPA A12 (2019)

Caractéristique d'une planche		
Essence	Sapin	Épinette
Longueur reçu (m)	1,25	
Largeur (m)	0,089	
Épaisseur (m)	0,038	
Volume (m ³)	4,23 E-03	
Densité (kg/m ³)	330	370
Masse (kg)	1,40	1,56

2.1.3 Présentation du produit utilisé pour le traitement du bois

L'octaborate disodique tétrahydraté (DOT) a pour formule chimique ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) et est considéré comme un produit à faible impact environnemental (Salman, 2017). Il est inodore,

incolore et relativement non toxique. Il assure une protection efficace contre les insectes destructeurs du bois tels que les termites, les fourmis charpentières et les poudres (Figure 2-3).



Figure 2-3 Octaborate disodique tétrahydraté (DOT)

2.2 Caractérisation physique des argiles

2.2.1 Limites d'Atterberg

La détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande et de la limite de plasticité faite selon la norme nationale canadienne (CAN/BNQ 2501-090, 2005).

2.2.1.1 Matériels et méthodes

- **Limite de liquidité**

Pour mesurer la limite de liquidité, environ 250 g de chaque sorte d'argile est pesé, et une quantité massique d'eau comprise entre 20 et 30 % est ajoutée. Le tout a été mélangé manuellement dans un récipient non absorbant pour créer une pâte homogène assez plastique. Puis, pour permettre l'introduction d'eau, cette pâte a été conservée à température ambiante pendant au moins 24 heures dans un sac plastique hermétique (Figure 2-4). Avant de déterminer la limite de liquidité, le dispositif doit être réglé de manière que pendant l'essai, la coupelle contenant l'échantillon tombe d'une hauteur de 1 cm.



Figure 2-4 Pâte d'argile préparée pour l'essai des limites d'Atterberg

Une fois le dispositif ajusté, une portion de l'échantillon préparé est placée dans la coupelle et étalée à la spatule jusqu'à ce qu'elle ait une épaisseur de 1 cm au centre de la coupelle. Puis, à l'aide de l'outil de rainurage, une rainure qui suit le plan axial de la coupelle est créée. La manivelle est mise en rotation à raison d'environ deux tours par seconde jusqu'à ce que les deux lèvres de la rainure se rejoignent à une distance de 12 à 13 mm (Figure 2-5).

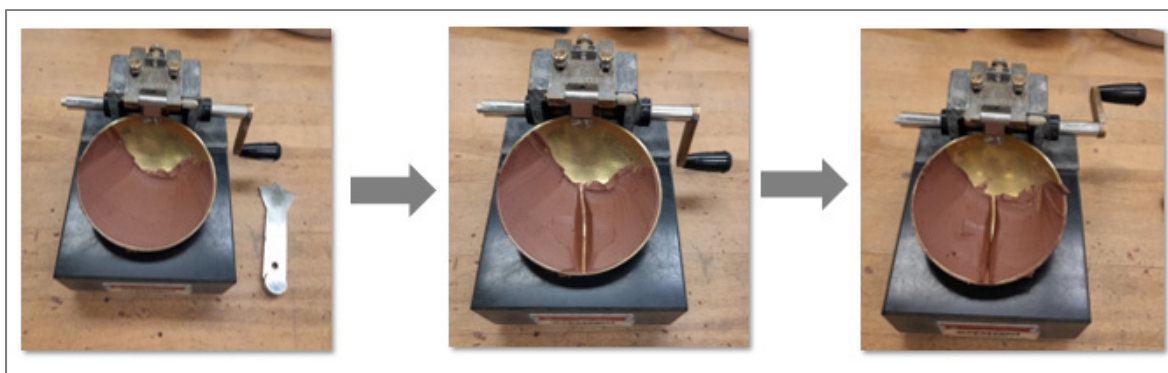


Figure 2-5 Mise en place de l'échantillon dans la coupelle et traçage de la rainure

Par la suite, un échantillon d'environ 10 grammes est prélevé dans la zone où les deux lèvres se rejoignent. Il est immédiatement pesé puis introduit dans l'étuve à 110 °C pendant 24 heures. L'objectif est d'obtenir 3 à 4 teneurs en eau équivalentes à des fermetures de rainures réparties de part et d'autre de 25 coups.

- **Limite de plasticité**

Pour mesurer la limite de plasticité., une masse de 40 grammes de chaque échantillon d'argile humidifiée sont pré-pesés et asséchés avec le papier absorbant jusqu'à ce qu'ils forment une petite boule qui ne se casse pas lorsqu'on la presse.

Le mélange est ensuite tourné entre les mains pour créer un rouleau qui est coupé pour produire un rouleau de 3 mm de diamètre et de 5 à 6 cm de long. Le rouleau se brise en petits morceaux lorsque son diamètre atteint 3 mm, mesurant 1 à 2 cm de longueur. Ces derniers sont pesés et placés directement dans l'étuve afin de déterminer la teneur en eau (Figure 2-6).



Figure 2-6 Différentes étapes de la limite de plasticité d'Atterberg

2.2.2 Granulométrie laser

2.2.2.1 Matériels et méthodes

La granulométrie à diffraction laser Mastersizer 3000 (Figure 2-7) a été utilisée pour mesurer la granularité des argiles et fournir des distributions précises et rapides pour les modes de dispersion sec et liquide. L'accessoire Hydro EV, une unité de dispersion d'échantillon semi-automatisée pour les voies liquides pouvant être utilisées avec des béciers standards de laboratoire allant de 600 ml à 1000 ml, a été connecté au granulomètre. L'accessoire Hydro EV est livré avec une pompe centrifugeuse et un agitateur à immersion ainsi que des ultrasons de 40 W pour une agglutination rapide des particules. L'ensemble du système pompe/agitateur

ainsi que la sonde à ultrasons peuvent être entièrement contrôlés par le logiciel de la granulométrie laser.



Figure 2-7 Granulomètre laser Mastersizer 3000 au laboratoire

2.2.3 Diffraction par rayon X

2.2.3.1 Matériels et méthode

Pour les argiles rouge et beige, la diffraction des rayons X a été réalisée sur trois fractions : 0 - 20 μm , 20 μm - 63 μm et 63 μm - 2 mm. Ces derniers ont été préparés à l'aide de tamiseur ultrason Sonic Sifter Separator model L3P (Figure 2-8). La préparation au DRX commence par un broyage de 5 g d'échantillon avec 25 mL d'isopropanol avec le XRD mill Mc Crone pendant 5 minutes à une vitesse 3 suivi d'une filtration sur Buchner avec papier filtre N°50 et un séchage au four pendant 30 minutes à une température égale à 40 degrés Celsius.



Figure 2-8 Tamiseur ultrason

Les raies de diffraction du composé, propres à chaque structure cristalline, indiquent la nature des phases dans le composé. Le diffractomètre utilisé est un Bruker D8 advance fonctionnant à 40 kV et 40 mA avec un tube de rayons X à anticathode de cuivre. La géométrie est de type Bragg-Brentano. La fente de divergence du faisceau incident était fixée à $0,26^\circ$ (0,5 mm). Une lame a été utilisée pour réduire la diffusion de l'air et une fente anti-diffusion de réception de $1,10^\circ$ (2,5 mm)

Les échantillons d'argile ont été tournés autour de l'axe vertical du goniomètre à 15 tr/min pour améliorer les statistiques des particules et les mesures sont prises sur une plage angulaire de 5 à $70^\circ 2\theta$ avec une taille de pas de $0,020^\circ 2\theta$. Avec un temps cumulé par pas de 0,50 s, le temps total de mesure de 28 minutes par analyse.

2.3 Mesure de la quantité du DOT absorbée dans l'argile et la migration du DOT dans le bois traité

La mesure de la migration du DOT du bois traité vers l'argile est liée à l'objectif général du mémoire. Spécifiquement, la concentration de DOT dans le bois selon son épaisseur et le temps de contact avec l'argile doit être mesurée, ainsi que la concentration de DOT dans l'argile selon

l'épaisseur, le temps de contact avec le bois traité et le taux d'humidité du bois. Après les expériences, il sera possible de déterminer s'il y a une migration du DOT.

2.3.1 Méthodes

La mesure de l'adsorption du DOT sur les argiles est effectuée par la méthode d'analyse par voie humide ICP-OES (spectrométrie à plasma à couplage inductif) (Figure 2-9).

2.3.1.1 Principe de l'ICP-OES

En spectrométrie d'émission optique par plasma à couplage inductif, l'échantillon est généralement acheminé dans l'instrument sous la forme d'un flux d'échantillon liquide. À l'intérieur de l'instrument, le liquide est transformé en aérosol par un processus appelé nébulisation. L'aérosol de l'échantillon est ensuite transporté vers le plasma où il est désolvaté, vaporisé, atomisé, excité et/ou ionisé par le plasma. Les atomes et les ions excités émettent leur rayonnement caractéristique qui est collecté par un dispositif qui trie le rayonnement par longueur d'onde. Le rayonnement est détecté et transformé en signaux électroniques qui sont convertis en informations sur la concentration pour l'analyste (Boss & Fredeen, 1997) (Figure 2-9 ; Figure 2-10).

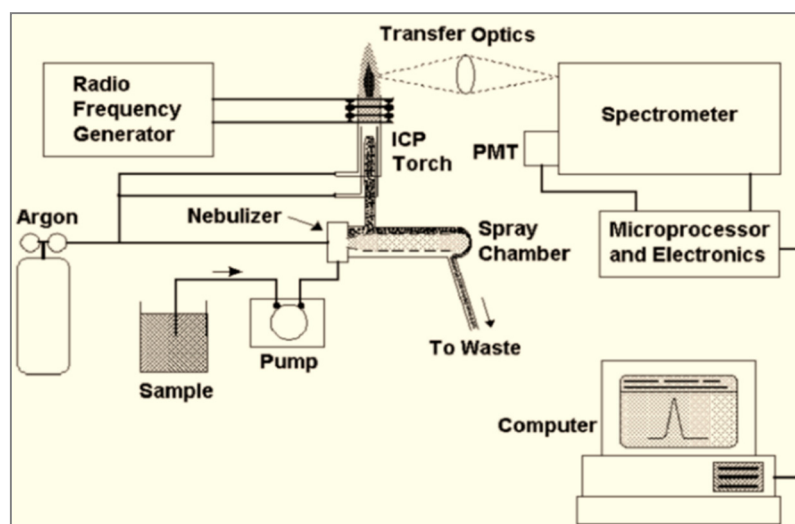


Figure 2-9 Principaux composants et disposition d'un instrument ICP-OES typique tirée de Boss & Fredeen (1997)

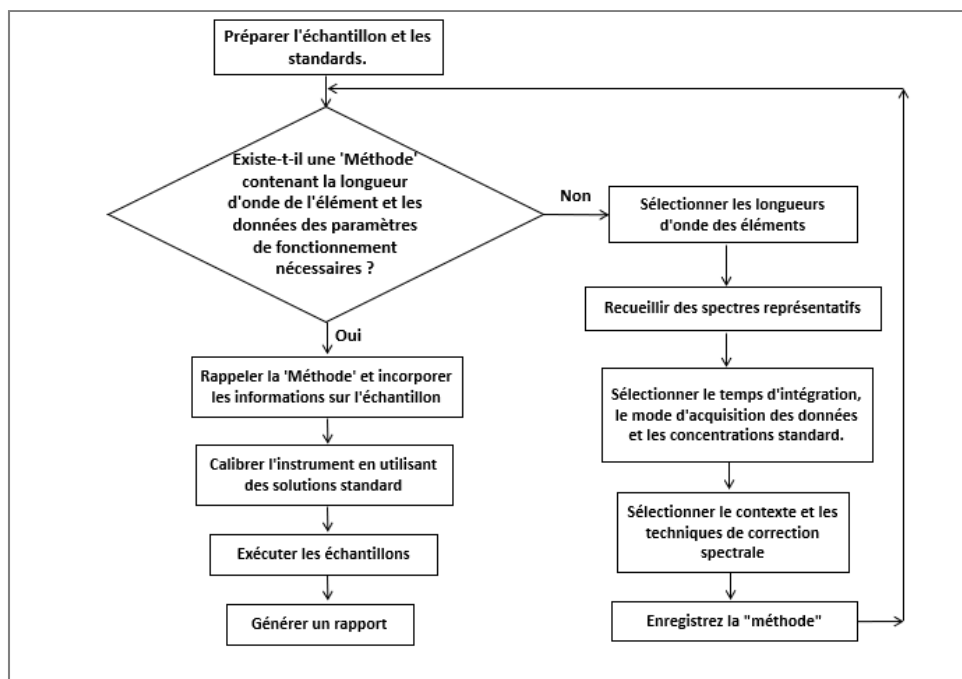


Figure 2-10 Organigramme montrant la méthodologie d'une analyse typique par ICP-OES tirée de Boss & Fredeen (1997)

2.3.2 Essais en fonction de temps et d'humidité

2.3.2.1 Méthodologie

Dans cette partie, les différentes étapes de préparation des échantillons et d'analyse à suivre pour le bois et pour l'argile sont détaillées.

- **Formulation des pâtes d'argile**

Cette étape consiste à mélanger une quantité d'argile avec de l'eau où le ratio E/A est égal à 0,25 afin d'obtenir des pâtes représentatives des échantillons à utiliser directement pour la construction en ossature de bois. Les quantités nécessaires pour former une pâte d'argile, que nous utilisons pour obtenir une couche d'épaisseur de 5 cm en contact avec le bois, sont détaillées dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 Tableau illustratif des caractéristiques de la pâte d'argile

Caractéristiques de la couche d'argile qui sera mise en contact avec le bois		
Type d'argile	Argile rouge	Argile beige
Longueur (cm)	8,9*	
Largeur (cm)	3*	
Épaisseur (cm)	5	
Volume de la couche (cm ³)	133,5	
Masse volumique (kg/m ³)	2790	2722
Masse d'argile (g)	372,5	363,4
Masse d'eau (g)	93,1	90,9

* : les 8.9 cm et les 3 cm désignent respectivement la longueur et la largeur d'un segment du bois découpé à partir de la planche pour le test de l'effet du temps.

- **Mise en contact des argiles avec le bois traité**

Avant de procéder à la mise en contact entre le bois et l'argile, les échantillons de bois ont été coupés de la planche entière (Figure 2-11), les dimensions de chaque échantillon sont illustrées dans le Tableau 2-3. À côté des échantillons qui sont en contact avec l'argile, des échantillons de bois témoin sont coupés afin d'être analysés pour comparer et constater s'il y a une adsorption du DOT par l'argile.

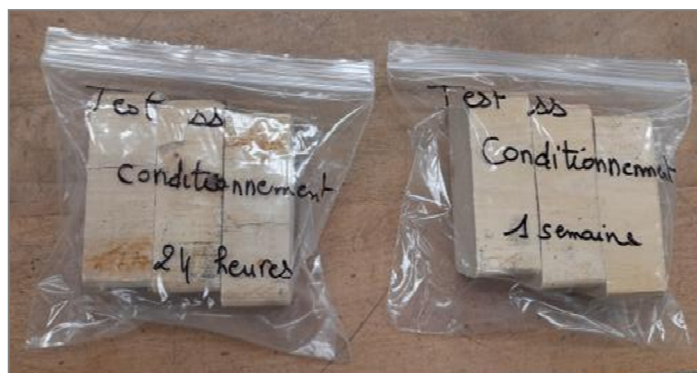


Figure 2-11 Coupage des segments du bois pour les essais sans conditionnement et conservation dans des sacs hermétiques

Tableau 2-3 Dimension d'un échantillon
du bois

Dimension d'un échantillon du bois	
Longueur (cm)	8,9
Largeur (cm)	3,0
Épaisseur (cm)	3,8

Après découpage, la pâte d'argile est appliquée à la main sur la planche de manière à recouvrir toute la partie supérieure de la planche, puis l'ensemble bois-argile est recouvert dans un sac hermétique pour éviter toute interaction avec l'air et ainsi prévenir la perte d'humidité par évaporation et ensuite conservé dans le laboratoire à température ambiante (24 C°). Pour faciliter la mise en place de la couche d'argile, nous avons utilisé des moules en plastique non absorbant comme illustré par les Figure 2-12 et Figure 2-13.

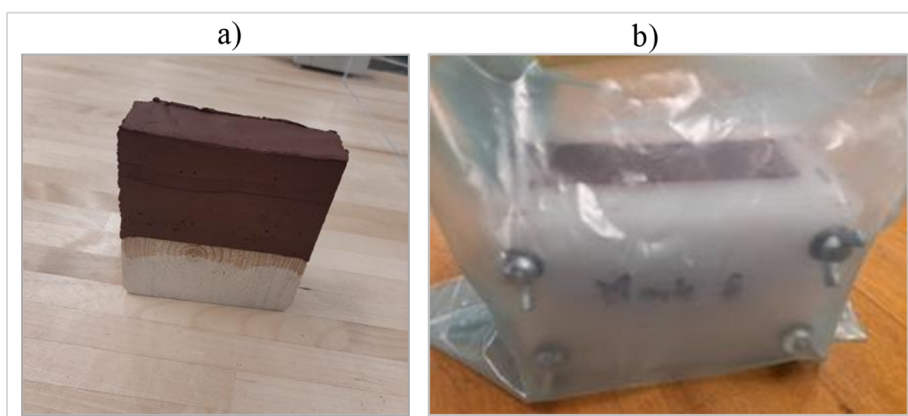


Figure 2-12 a) Mise en contact de la couche d'argile avec le bois
b) conservation de l'échantillon contre l'humidité

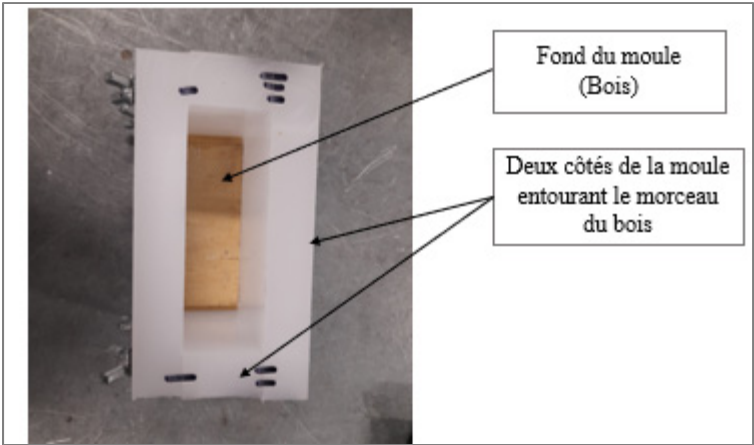


Figure 2-13 Moule fabriqué pour la mise en place de la couche d’argile de 5 cm d’épaisseur

Ensuite, l’analyse est faite en fonction du temps, après 24 h et une semaine, cela nous permet d’évaluer l’effet du temps sur la migration du DOT. Pour l’effet de l’humidité, nous utilisons deux types de bois, le premier est non conditionné, c’est-à-dire tel qu’il est reçu du fabricant avec une humidité de 9 % (déterminé à l’arrivée du bois) et le second est conditionné à une humidité de 19 %, ce qui représente l’humidité d’équilibre du bois le plus utilisé dans les bioconstructions. Pour la détermination de l’humidité de 9 %, nous avons pris trois échantillons de bois coupé à partir de la planche entière et nous avons déterminé la teneur en humidité selon la norme (BNQ 2501-170, 2014). Trois échantillons par temps sont testés pour assurer la validité des résultats. Le nombre total des échantillons est illustré dans le Tableau 2-4 et le Tableau 2-5.

Tableau 2-4 Nombre des échantillons totaux pour le test sur l’effet de temps et d’humidité : cas d’épinette

Paramètres	Nombre d’échantillons nécessaire pour tester l’effet du temps			
	Épinette			
Essence de bois				
Humidité testée	9 %		19 %	
Temps testés	24 h	1 semaine	24 h	1 semaine
Nombre des réplifications	3	3	3	3
Nombre total des échantillons	12			

Tableau 2-5 Nombre des échantillons totaux pour le test sur l'effet de temps et d'humidité : cas du sapin

Paramètres	Nombre d'échantillons nécessaire pour tester l'effet du temps			
Essence de bois	Sapin			
Humidité testée	9 %		19 %	
Temps testés	24 h	1 semaine	24 h	1 semaine
Nombre des réplifications	3	3	3	3
Nombre total des échantillons	12			

2.3.3 Essai sur l'effet de sens : sens latéral et gravitationnel

Lors des discussions avec le partenaire industriel, il a été soulevé qu'il y avait d'incertitudes si la sorption variait avec le sens de migration. Des expériences ont été réalisées pour répondre à la question.

2.3.3.1 Méthodologie

L'objectif est d'étudier l'effet de sens de migration du produit de traitement (le DOT), sur la quantité absorbée par l'argile, puisque dans la construction en torchis, l'argile recouvre toutes les faces intérieures et extérieures du squelette en bois. La méthode consiste à formuler une pâte d'argile en mélangeant de l'eau et de l'argile avec un rapport ($E/A=0,25$) et à l'appliquer sur un échantillon de bois traité au DOT. La mise en place de la couche d'argile a été faite dans le sens horizontal à l'aide du moule en plastique non-adsorbant, une fois la formulation terminée, l'ensemble 'moule-bois-argile' est inversé dans le sens latéral ou gravitationnel et conservé dans un récipient hermétique pendant une semaine (Figure 2-14).

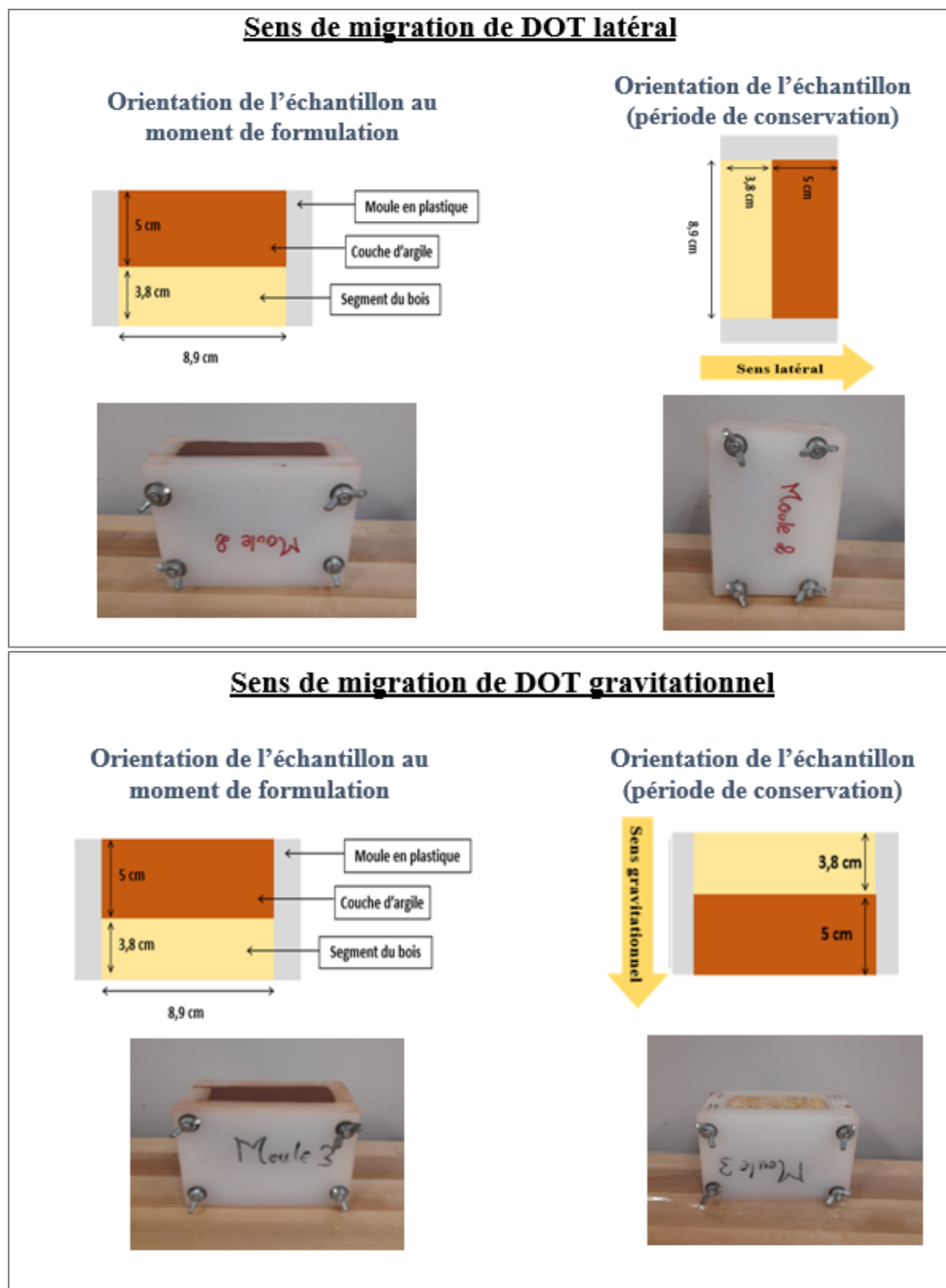


Figure 2-14 Orientation latérale de l'échantillon au moment de formulation (à gauche) ; Orientation gravitationnelle de l'échantillon durant la période de conservation (à droite)

Le test a été effectué pour deux essences de bois qui sont le sapin et l'épinette assemblées avec deux types d'argile (argile rouge et argile beige) ainsi que pour un temps de contact d'une semaine. Trois répliques par combinaison sont fabriquées pour assurer la validité des résultats obtenus.

2.3.4 Test de suivi de la migration de DOT dans le temps

L'objectif de ce test est de suivre la migration de DOT vers l'argile dans le temps et voir s'il existe une stabilité au niveau de la quantité de DOT migrée à travers le temps.

2.3.4.1 Méthodologie

Ce test consiste à fabriquer des échantillons où une pâte d'argile de rapport $E/A=0,25$ est mise en contact avec un échantillon de bois traités avec l'octaborate disodique tétrahydraté. Une fois la fabrication terminée, les échantillons sont conservés dans des sacs hermétiques et l'ensemble est placé dans un récipient hermétique afin d'éviter toute perte d'humidité (Figure 2-15).

Les temps testés sont 1 mois, 2 mois, 3 mois, 4 mois, 5 mois et 6 mois et le sens de migration de DOT choisi est le sens latéral. Le nombre de répliques par temps est fixé à 2. L'essence de bois utilisé pour cet essai est l'épinette, associée à de l'argile rouge.

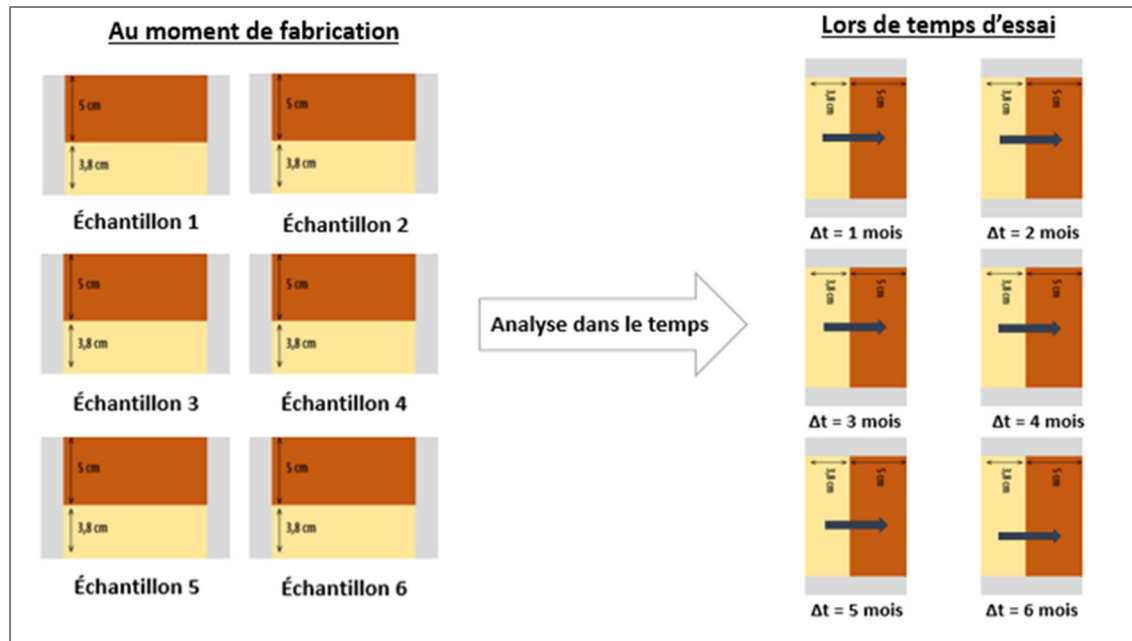


Figure 2-15 Schéma récapitulatif de principe de l'essai sur la stabilité de DOT migré dans le temps

2.3.5 Mesure du gradient de DOT dans le bois

La détermination se fait par soustraction, elle consiste à analyser le bois avec la méthode humide ICP-OES décrite ci-dessus avant et après le contact de l'argile.

2.3.5.1 Mesures avant contact bois-argile

Ces mesures sont réalisées sur les échantillons témoins, qui ne rentrent pas en contact avec l'argile, trois échantillons témoins sont prélevés et testés afin d'avoir le profil du bois imprégné. Ce test est réalisé sur toutes les planches qui sont étudiées (sapin, épinette), car le profil d'imprégnation varie d'une planche à l'autre en raison de différents paramètres : essence de bois, âge d'imprégnation, taux de rétention du DOT, origine de la planche (arbre, localisation dans l'arbre) et la variabilité du traitement. Les dimensions d'un échantillon témoin sont détaillées dans le Tableau 2-6.

Tableau 2-6 Dimension d'une planche témoin

Dimension d'un échantillon témoin	
Longueur (cm)	8,9
Largeur (cm)	3,0
Épaisseur (cm)	3,8

2.3.5.2 Mesures après la mise en contact

L'analyse au niveau du bois est faite par couche d'épaisseur, en allant de l'intérieur (couche en contact direct avec l'argile) vers l'extérieur (couche superficielle) pour pouvoir estimer la migration du DOT, plus précisément pour voir s'il y a une baisse de la concentration en borate au niveau de la surface. Quatre tranches sont testées dans le sens de la largeur d'une planche.

Le bois a été tranché avec une scie à ruban, disponible à l'ÉTS, avec une épaisseur de lame de scie d'environ 0,75 mm (Figure 2-16). Le tranchage donne 4 tranches d'égale épaisseur d'environ 8,5 mm. Les caractéristiques d'une tranche sont illustrées dans le Tableau 2-7.

Tableau 2-7 Caractéristique d'une tranche du bois

Caractéristique d'une tranche du bois		
Essence	Sapin	Épinette
Longueur (cm)	3,0	
Largeur (cm)	8,9	
Épaisseur (cm)	0,84	
Volume (cm ³)	21,4	
Masse volumique (kg/m ³)	330	370
Masse d'une tranche (g)	7,37	8,27

Le découpage de bois se fait à l'état sec et donc après le séchage dans une étuve pendant 24 heures avec une température de 103 ± 2 C°. La méthodologie suivie pour la découpe du bois et l'échantillon de bois avant et après découpage par la scie à ruban est présentée par la Figure 2-16, Figure 2-17 et la Figure 2-18.

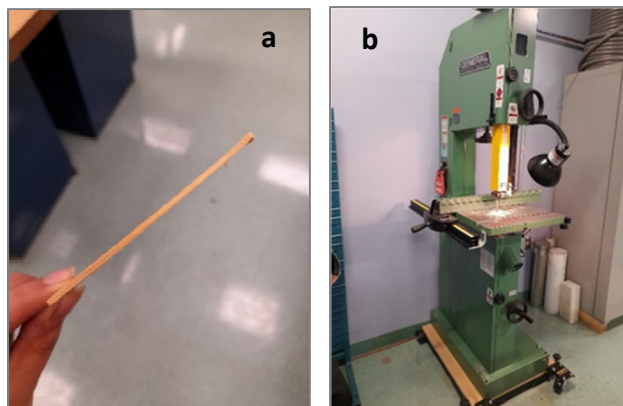


Figure 2-16 a-Échantillon du bois coupé à l'aide d'une scie à ruban, b - Scie à ruban

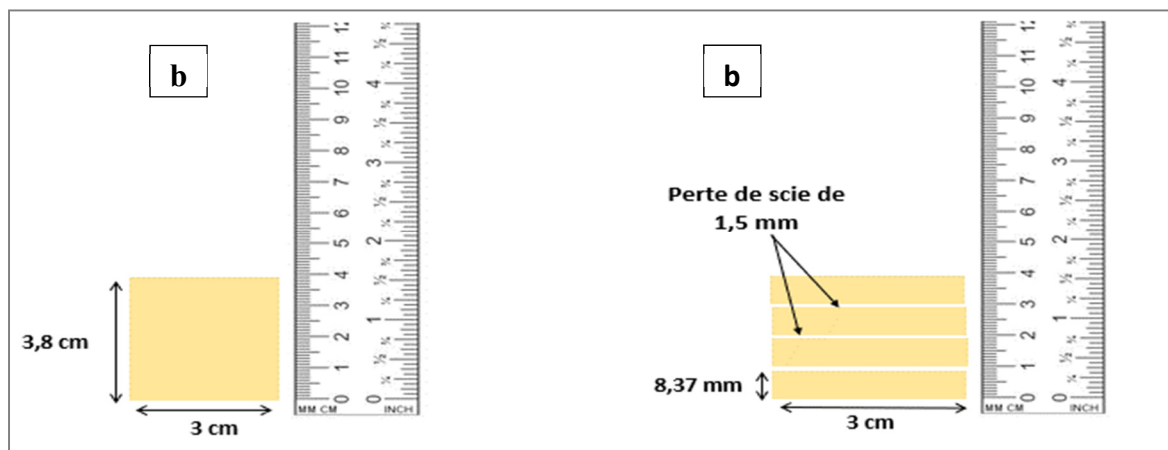


Figure 2-17 Schéma illustratif de la procédure de découpe a) état initial du segment du bois avant découpage, b) découpe du segment en 4 épaisseurs égales (perte de 1.5 mm)

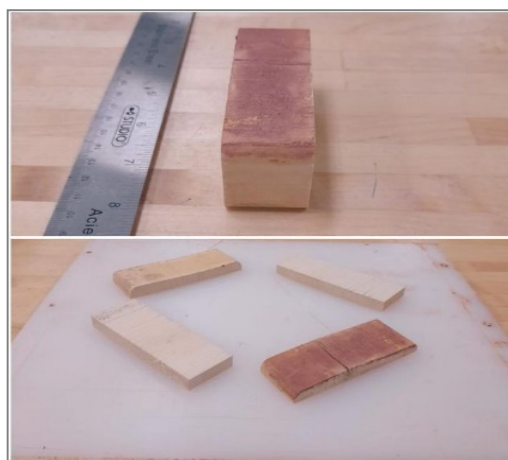


Figure 2-18 Échantillon de bois après détachement de l'argile et après découpage par la scie à ruban

2.3.5.3 Broyage du bois

Après les essais effectués avec différentes procédures de broyage (broyeur à couteau SM300, moulin à café, moulin à billes, broyeur à disque), la procédure de broyage la plus adaptée a été sélectionnée. Tout d'abord, un broyage grossier de la tranche de bois est effectué avec le moulin SM300 en utilisant une grille de 1,5 mm (Figure 2-19) pendant une minute et à une vitesse de 1500 rpm, une fois le broyage grossier terminé, un second broyage est commencé avec le moulin à café (Figure 2-20). Enfin, un tamisage avec un tamis de 600 μm est fait pour avoir du bois en poudre comme mentionné dans la norme (Figure 2-21). Après les deux broyages, la masse récupérée est d'environ 85 % de la masse initiale de l'échantillon (Tableau 2-8).

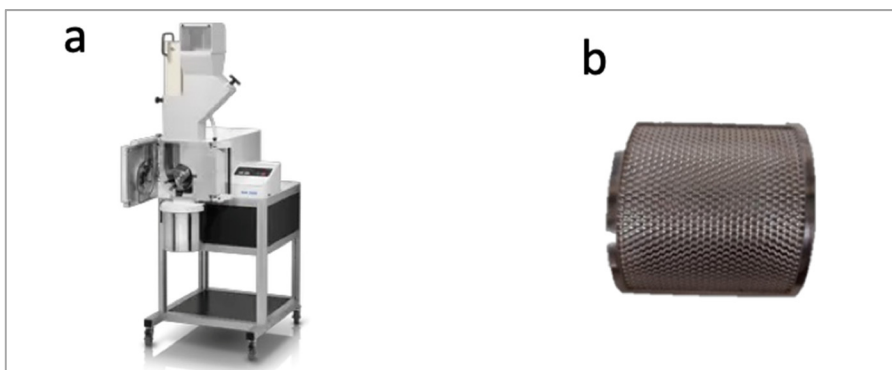


Figure 2-19 a) Broyeur à couteau SM300 existant à l'ETS, b) grille 1,5 mm

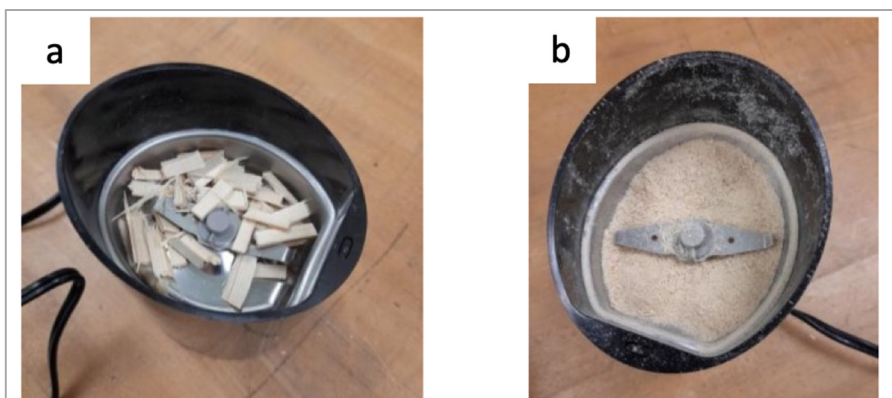


Figure 2-20 a) Bois avant broyage, b) bois après broyage avec le moulin à café

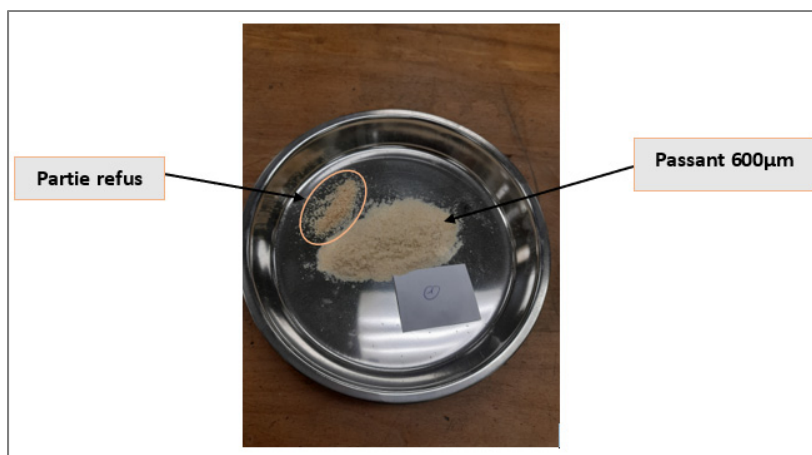


Figure 2-21 Échantillon après tamisage à 600 µm

Le Tableau 2-8 présente les caractéristiques d'un exemple d'échantillon broyé avec le broyeur à couteau et le moulin à café.

Caractéristiques d'un échantillon	
Masse de l'échantillon avant le broyage (g)	4,26
Masse après le broyage et tamisage (g)	3,62
Masse de la partie refus (g)	0,64
Masse récupérée (%)	85

Après avoir coupé le bois en segment de 4 tranches et les avoir broyés, la digestion est faite sur 3 échantillons par tranche, selon la norme CEAEQ (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2020).

2.3.5.4 Digestion du bois

- Matériels nécessaires

Pour la préparation des échantillons de bois et d'argile pour l'ICP-OES, nous avons besoin de flacons de 50 ml, de filtres de 45 µm, d'une balance de haute précision de 0,0001 g, d'une plaque chauffante, d'une pompe à air (filtration du bois) et d'une centrifugeuse (filtration de

l'argile). Des solutions d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique sont aussi requises comme agents réactifs.

La digestion du bois est une étape primordiale pour extraire l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT) existant dans la partie liquide et pour le quantifier à l'aide de la méthode d'analyse ICP-OES. La digestion est réalisée conformément à la méthode d'analyse MA200-Met 1.2 (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2020).

Tout d'abord, après avoir séché l'échantillon à 104 °C et l'avoir broyé en poudre, une pesée d'environ 2 g de bois dans une fiole de 50 ml à l'aide d'une balance de précision de 0,0001 g est effectuée. Ensuite, 8 ml d'acide nitrique et 20 ml d'acide chlorhydrique sont ensuite ajoutés dans la fiole. Par la suite, l'échantillon est chauffé à reflux sur une plaque chauffante pendant 60 minutes sans agitation, cette étape permet au bois de réagir avec les acides ajoutés. Une fois le contenu chauffé, puis refroidi pendant 30 minutes, une filtration est effectuée avec des filtres de 0,45 µm en appliquant une pression sous vide pour accélérer le processus et séparer les deux composants de l'échantillon (solide et liquide). Enfin, de l'eau distillée est ajoutée jusqu'au trait de jauge pour diluer la partie liquide récupérée (Figure 2-22). Le Tableau 2-9 résume la quantité totale de bois que nous utilisons pour la mesure du DOT par digestion.

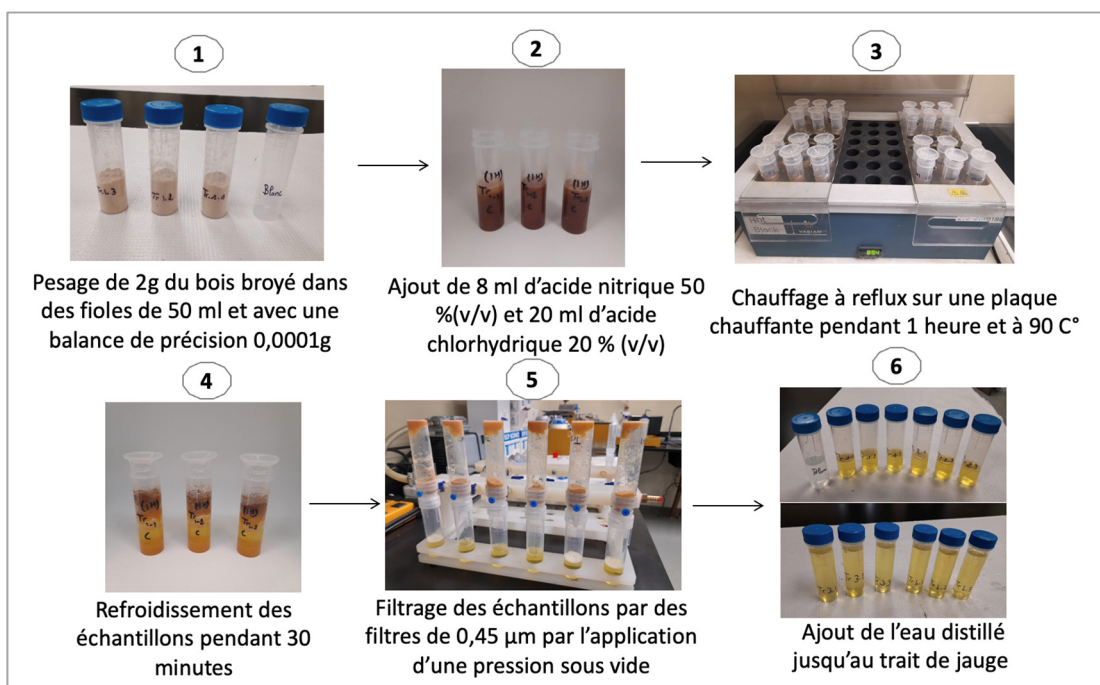


Figure 2-22 Schéma illustratif du processus de digestion du bois

Tableau 2-9 Quantité du bois par tranche nécessaire pour la technique de digestion et ICP

Mesure de DOT par digestion (ICP)		
Essence	Sapin	Épinette
Masse de l'échantillon (g)	2	
Nombre d'échantillons prélevés par tranche	3	
Masse totale des échantillons par tranche (g)	6	

2.3.5.5 Préparation des réactifs

- **Solution d'acide chlorhydrique 20 % (V/V)**

Pour la solution d'acide chlorhydrique, 100 ml d'acide ont été dilués dans environ 300 ml d'eau en utilisant une fiole jaugée de 500 ml. Après refroidissement, ce mélange a été complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée pour obtenir un rapport volumétrique de 20 %. La solution finale obtenue peut être conservée jusqu'à un mois.

- **Solution d'acide nitrique 50 % (V/V)**

Pour avoir une solution d'acide nitrique de rapport volumique de 50 %, 250 ml d'acide nitrique ont été dilués dans environ 200 ml d'eau au sein d'une fiole jaugée de 500 ml. Après refroidissement, ce mélange a été complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. La solution finale obtenue peut être conservée jusqu'à un mois.

2.3.5.6 Conditionnement du bois

Pour le bois traité à 19 %, les mêmes démarches ont été suivies avec une étape primordiale qui est le conditionnement. Le conditionnement du bois est une étape indispensable pour que le bois passe d'une humidité de 9 % à une humidité d'équilibre de 19 %. Cet essai est effectué selon la norme (ASTM D4933, 2016). Ce test consiste à suivre la variation de masse des échantillons mis dans une chambre climatique sous des conditions de température et d'humidité bien définies, en les pesant avec une balance de précision 0,01 g jusqu'à une

stabilité de masse qui indique l'obtention de l'humidité d'équilibre souhaitée, soit 19 % dans cette étude.

Pour ce but, la chambre climatique ThermoThron a été utilisée, capable de maintenir un couple température-humidité relative spécifique (Figure 2-23). Dans le cadre de cette étude, et selon les études précédentes, les conditions d'exposition nécessaire pour avoir une humidité d'équilibre du bois de 19 % sont : $T = 22^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 90\%$ (Cecobois, 2021 ; Wood Products, 2013).



Figure 2-23 Chambre climatique ThermoThron maintenue à une $T = 22^{\circ}\text{C}$ et une $\text{HR} = 90\%$

Les échantillons sont mis sur une grille en acier comme illustré sur la Figure 2-24, afin d'éviter qu'ils soient en contact direct avec les gouttelettes d'eau qui peuvent être générées par la chambre climatique durant le conditionnement.

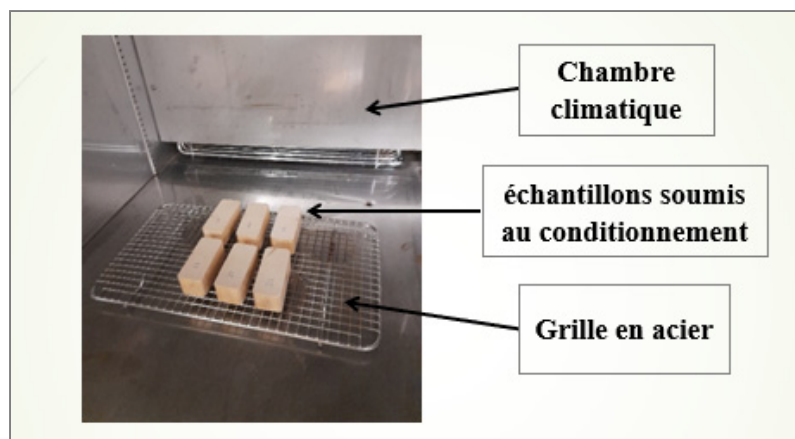


Figure 2-24 Placement des échantillons soumis au conditionnement dans la chambre climatique à l'aide de grille en acier

2.3.6 Mesure de gradient de DOT dans l'argile

Avant le contact avec le bois, l'argile est analysée par ICP pour vérifier la présence de bore, la détermination peut se faire par extraction à l'eau et ensuite par ICP. Après le contact avec le bois, l'analyse de l'argile est faite par couche d'épaisseur en allant de l'intérieur (couche en contact direct avec le bois) vers l'extérieur (couche superficielle).

Pour couper l'argile, des tests en laboratoire ont d'abord été planifiés pour voir s'il était possible de couper l'argile en couches avec un couteau ou si une autre méthode était requise. La méthode la plus adaptée pour le coupage de la pâte d'argile en couche a été obtenue avec la scie à fil et à l'aide d'une boîte de découpage en plastique, fabriqué à l'ÉTS, qui facilite la mise en place de la pâte d'argile (Figure 2-25).

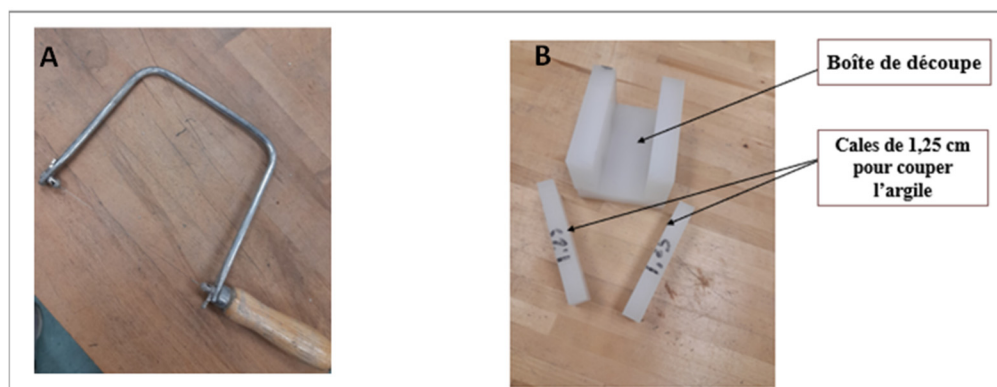


Figure 2-25 a) Scie à fil, b) Boîte pour faciliter la découpe de l'argile en couche

Le tranchage de la pâte d'argile d'épaisseur 5 cm se fait en 4 couches d'égale épaisseur de 1,25 cm chacune, en utilisant des cales en plastique. Les caractéristiques d'une couche d'argile après découpage sont illustrées dans le Tableau 2-10. La méthodologie suivie pour la découpe d'argile et l'échantillon d'argile avant et après découpage par la scie à fil sont présentées par la Figure 2-26 et Figure 2-27.

Tableau 2-10 Caractéristiques d'une tranche d'argile après découpage

Caractéristiques d'une tranche d'argile après découpage		
Type d'argile	Argile rouge	Argile beige
Longueur (cm)	8,9*	
Largeur (cm)	3,0*	
Épaisseur (cm)	1,25	
Volume (cm ³)	33,4	
Masse volumique (kg/m ³)	2790	2722
Masse d'une couche d'argile (g)	93,1	90,9

* : les 8.9 cm et les 3,0 cm désignent respectivement la longueur et la largeur d'un segment du bois découpé à partir de la planche pour le test de l'effet du temps.

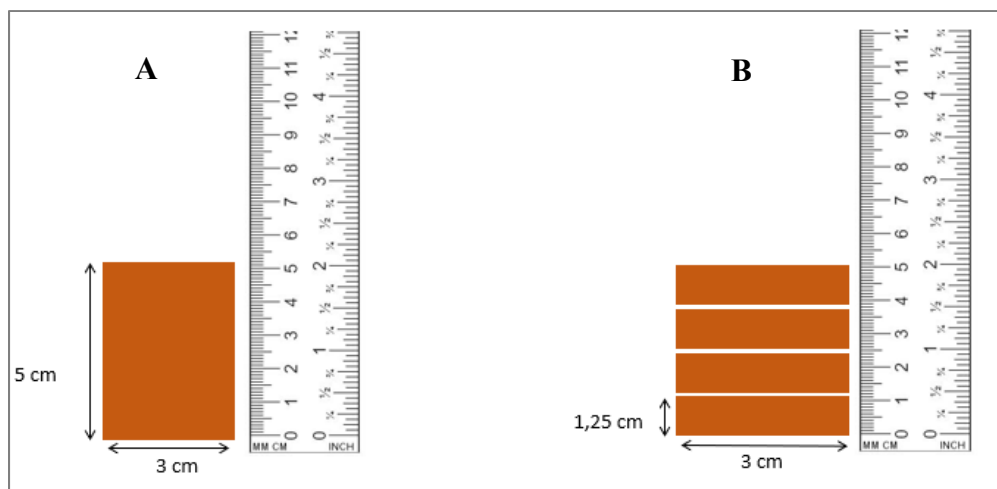


Figure 2-26 Schéma illustratif de la procédure de découpe : A - État initial de la pâte d'argile avant découpe, B- Découpage de la pâte d'argile en 4 couches d'égale épaisseur

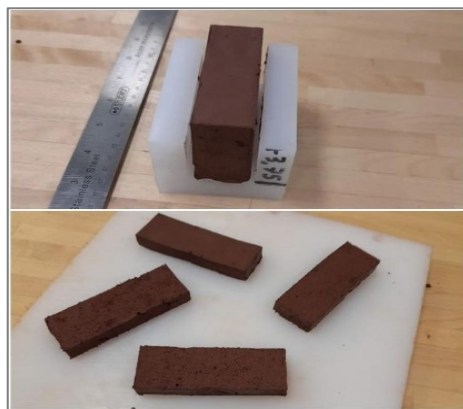


Figure 2-27 Échantillon d'argile après détachement et après découpage par la scie à fil

L'extraction du DOT des pâtes d'argile a été faite sur 3 échantillons par couche et selon la méthode d'analyse MA200-Met 1.2 (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2020). Cette méthode nous permet de voir la quantité du bore absorbé sur la phase solide d'argile et la phase liquide, entre les feuillets d'argile, et par la suite d'établir un profil de migration du DOT dans l'argile.

Pour l'argile, une procédure similaire à la préparation du bois pour l'ICP a été suivie selon la méthode d'analyse MA200-Met 1.2 (Centre d'expertise en analyse environnementale du

Québec, 2020). La seule différence réside dans la méthode de filtration utilisée pour l'argile qui est la centrifugation. Cette méthode consiste à séparer mécaniquement les composants du mélange qui sont l'argile et l'acide au moyen de l'action d'une force centrifuge ce qui nous permet de récupérer finalement la partie liquide du mélange (Figure 2-28).

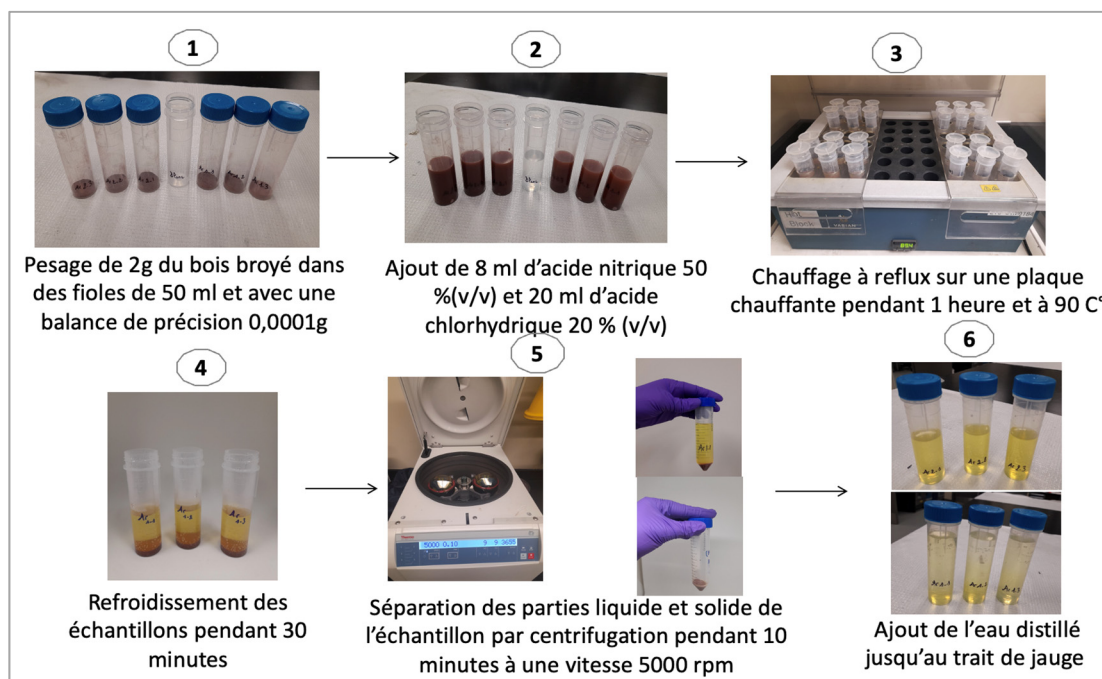


Figure 2-28 Schéma illustratif du processus de préparation de l'argile pour l'analyse à l'ICP

2.4 Microscopie à force photo-induite des échantillons de bois (MFPI) et infrarouge à transformée de Fourier (IFTR)

2.4.1 Matériels et méthode

- **Préparation des échantillons pour l'infrarouge à transformée de Fourier**

Les échantillons de bois non-traité étaient coupés en cube de 1cm x 1cm x 1cm. Les cubes étaient ensuite submergés dans des solutions de 5% et 10% (poids/volume) d'acide borique (Grade ACS) pendant 24 heures. Les cubes ont été déshydratés dans un four à 40°C pendant 3 jours.

- **Infrarouge à transformée de Fourier**

Les spectres infrarouges ont été enregistrés sur un spectrophotomètre Nicolet 4700 (Thermo Scientific) muni d'un accessoire de réflexion diffuse pour optimiser la collecte de rayonnement diffus dispersés par un échantillon solide. Les spectres ont été enregistrés avec 16 scans dans la fenêtre spectrale comprise entre 800 et 1800 cm^{-1} . Des corrections atmosphérique (CO_2) et de la ligne de base ont été appliqués automatiquement aux spectres obtenus.

- **Préparation des échantillons pour la microscopie**

Les échantillons de bois non traité, traité et traité en contact de l'argile étaient coupés en cube de 1 cm x 1 cm x 1 cm. La surface radiale des échantillons démontrait le minimum de variation et était aplanie davantage au Microtome (Leica Instruments) en retranchant environ 1 μm de la surface dans le sens longitudinal. Ensuite, une tranche de 1 mm était coupée manuellement du cube avec une lame tranchante pour dégager la surface aplanie. Ensuite, l'arrière de la tranche de 1 mm exposant la surface aplanie vers le haut était collé sur le port échantillon magnétique de 12 mm de diamètre avec de la colle instantanée pour empêcher le mouvement des échantillons dans les analyses avec le microscope de force photo-induite (MFPI). Tous les échantillons ont été préparés en duplicata.

- **Microscopie de force photo-induite (MFPI)**

Le VistaScope (Molecular Vista Inc, San-José, CA, USA) consiste en un MFA enligné avec une source laser en cascade quantique (LCQ) dans le moyen infrarouge de 770 cm^{-1} à 1910 cm^{-1} (Block Engineering, Southborough, MA, USA) pour effectuer les mesures de spectroscopie MFPI et le mappage chimique. La sonde utilisée était un levier couvert d'or avec un apex de ~ 40 nm en diamètre (fabriquée par NanosensorsTM, Neuchâtel, Switzerland, nettoyée et vendue par MolecularVista Inc.). Les échantillons ont été scannés en mode "tapping" avec une amplitude de 50 nm. La puissance laser était maintenue avec une valeur à la ligne de base de 7 % pour obtenir une intensité de puissance de plusieurs 100 μW pour toutes les valeurs de

longueurs d'onde. Le laser couvrait une superficie de type ellipsoïdale de $\sim \lambda \times 2\lambda$. Les spectres multispectraux ont été tracés en choisissant 8 longueurs d'onde d'intérêt sur l'échelle du spectre (1017 cm^{-1} , 1096 cm^{-1} , 1251 cm^{-1} , 1373 cm^{-1} , 1445 cm^{-1} , 1508 cm^{-1} , 1602 cm^{-1} et 1752 cm^{-1}). Chacun de ces nombres d'ondes correspond à un mode vibrationnel du bois (cellulose) et a été sélectionné à partir des échantillons de bois non-traités (sapin, épinette). Les images du mapping chimique ont été tracées à 1096 cm^{-1} pour chevaucher l'augmentation du signal après traitement et rendre l'image du MFPI plus sensible et représentative de l'effet du traitement. L'imagerie chimique par spectroscopie MFPI a été obtenue en prenant la moyenne de 10 mesures équidistantes sur une ligne suivant la coupe transversale des échantillons. Tous les spectres ont été enregistrés en 20 secondes avec une résolution de $0,5\text{ cm}^{-1}$. Les images ont été traitées avec le logiciel MolecularVista.

2.5 Mesure de potentiel zeta

2.5.1 Méthodologie

- **Préparation des échantillons pour la mesure de potentiel zêta**

Le potentiel zêta est une caractéristique électrochimique clé des minéraux argileux, qui est défini comme le potentiel électrique développé à l'interface solide-liquide en réponse au mouvement relatif des particules de sol et d'eau.

La mesure de potentiel zêta a été effectuée pour les deux types d'argile, rouge et beige. Toutes les solutions ont été préparées avec de l'eau distillée désionisée (DDI). Les argiles ont été préparées en dispersant 40 mg d'argile dans 40 ml de l'eau distillée (1g/L). D'autres solutions ont été préparées en mettant en contact l'argile avec le DOT, dans ces derniers nous avons mis 40 mg d'argile (rouge/beige) avec 40 mg de DOT en poudre dans 40 ml de l'eau distillée. Toutes les solutions ont été préparées en triplicata et ont été agitées pendant 24h à une vitesse de 5,5 rpm. Cet essai nous a permis de savoir l'effet de contact DOT-argile sur la mesure de potentiel zêta. Avant de procéder à la mesure de potentiel zêta, le pH de chaque solution a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre afin de l'introduire dans les paramètres de logiciel de mesure

« BIC Zeta potentiel ». La détermination de potentiel zêta de la solution aqueuse de DOT n'était pas possible car cette dernière ne contenant pas de particules solides et sa granulométrie est inconnue.

- **ZetaPlus : Zeta potentiel analyser**

ZetaPLUS, conçu par Brookhaven Instruments, est capable de mesurer la taille des particules (2 nm - 3 000 nm) et le potentiel Zeta (-150 mV à +150 mV) des nanoparticules et microparticules, ainsi que des polymères et des protéines, en se basant sur la diffusion dynamique de la lumière (DLS). La taille des particules est déterminée en utilisant le logiciel « BIC particle size » et le potentiel zêta à l'aide de « BIC zêta potentiel ». Trois répliques d'échantillons de 2 ml ont été injectées dans la cellule et les deux électrodes ont été immergées totalement dans la solution tout en évitant la formation des bulles d'air qui peuvent perturber la mesure, le potentiel zêta de l'échantillon a ensuite été déterminé en analysant ces solutions. La moyenne de ces lectures a été calculée et rapportée avec la "largeur" du pic de potentiel zêta fournie par l'instrument. Le système ZetaPlus dispose d'un faisceau laser qui traverse l'échantillon dans une cellule avec deux électrodes pour fournir le champ électrique. La lumière diffusée par les particules subit un décalage Doppler lorsque les particules diffusées se déplacent dans le champ électrique (Brookhaven Instruments Corporation, 1994).

2.6 Méthodologie suivie dans la présentation des résultats

Les résultats pour les essais sur l'effet du temps, de l'humidité, du sens ainsi que les essais sur la stabilité de la quantité de DOT à long terme sont présentés dans le chapitre d'après. Les résultats de chaque test sont représentés par des histogrammes présentant la concentration massique de DOT dans l'argile et dans le bois. De plus, des bilans de masse montrant la répartition de DOT après la mise en contact avec l'argile pour chaque essai ont été effectués (Figure 2-29). Ces derniers sont présentés en masse (mg DOT).

Le calcul des différents compartiments de bilan de masse est réalisé selon l'équation 2.1

$$m_{total} = \sum_{i=1}^4 m_{argt(i)} \times C_{argt(i)} + \sum_{i=1}^4 m_{boist(i)} \times C_{boist(i)} \quad (2.1)$$

Avec

$m_{argt(i)}$: Masse de la tranche d'argile i ,

$C_{argt(i)}$: Concentration dans la tranche d'argile i ,

$m_{boist(i)}$: Masse de la tranche de bois i ,

$C_{boist(i)}$: Concentration dans la tranche de bois i .

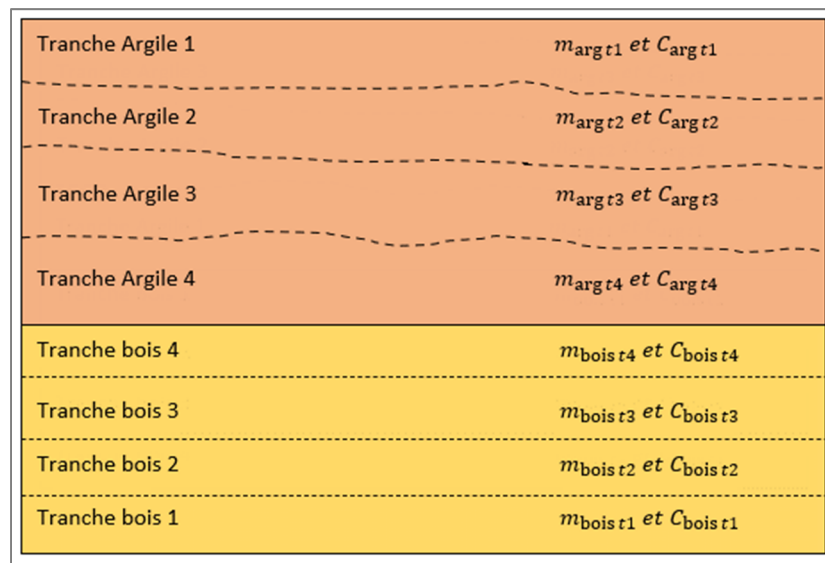


Figure 2-29 Schéma illustratif de calcul des bilans de masse

La Figure 2-30 présente deux schémas qui illustrent la découpe des échantillons de bois et d'argile mis en contact. La nomenclature définie sur cette figure est utilisée par la suite pour l'analyse.

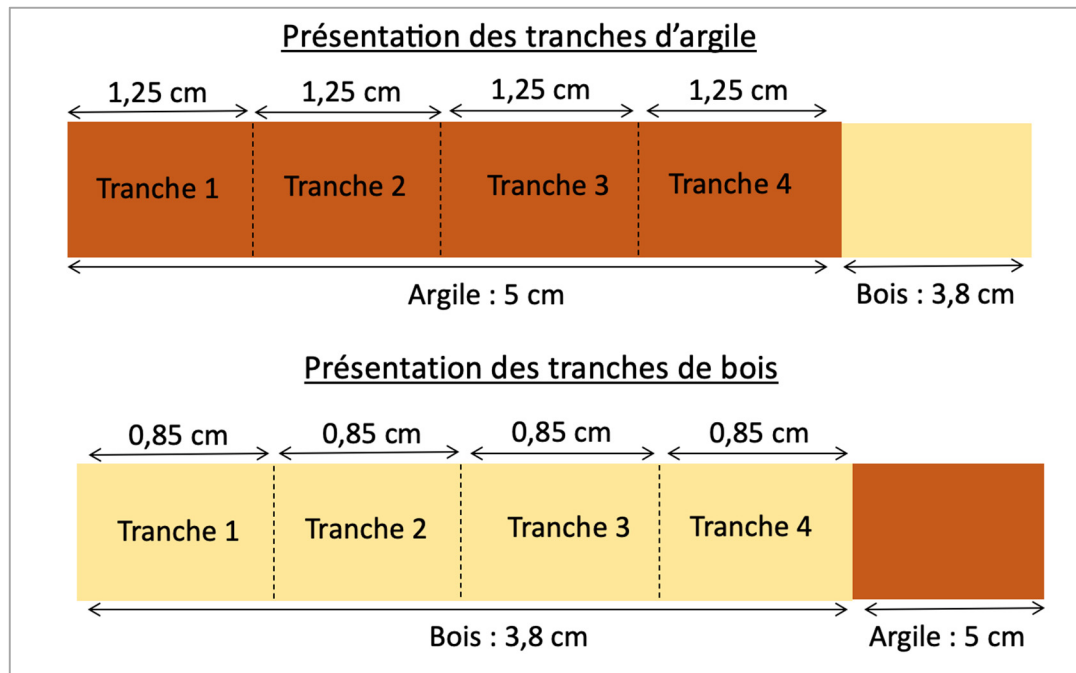
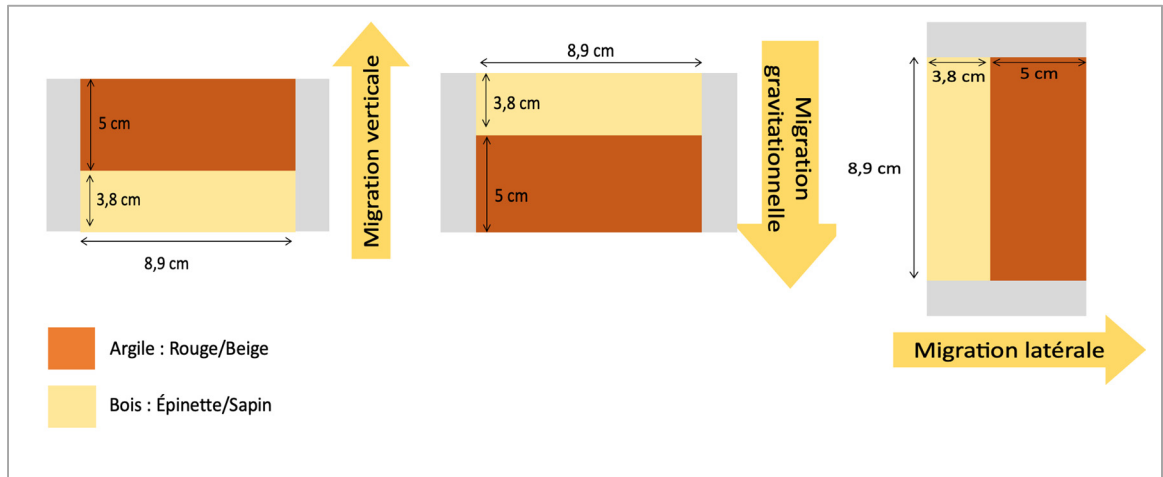


Figure 2-30 Schéma explicatif des dimensions des tranches d'argile et de bois présenté au niveau des histogrammes des résultats

La quantité de DOT absorbée au niveau d'argile a été corrigée en tenant compte de la quantité de bore naturellement présent. Cette dernière est estimée en analysant 3 échantillons d'argile sans contact avec le bois. La correction a été calculée en faisant la soustraction de la quantité moyenne de bore naturellement présente de la quantité de bore dans l'argile estimée par l'ICP après la mise en contact avec le bois traité.

- **Les sens de migration testés**

Après contact avec le bois, l'orientation des échantillons dans les trois directions de migration verticale, gravitationnelle et latérale est représentée sur la Figure 2-31. Lorsque le terme "migration verticale du DOT" est utilisé, il fait référence à un mouvement du bas (bois) vers le haut (argile), par opposition à la migration gravitationnelle, qui se produit du haut (bois) vers le bas (argile). Enfin, le sens latéral de la migration est le mouvement de la gauche (bois) vers la droite (argile).



CHAPITRE 3

RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

Ce chapitre présente d'abord les résultats des essais sur la caractérisation des argiles (limite d'Atterberg, granulométrie et DRX), par la suite, les résultats des essais sur l'effet du temps (24 heures, 1 semaine), de l'humidité du bois (9 % et 19 %) et du sens de migration (latéral, vertical et gravitationnel), puis, l'essai sur la stabilité de la migration dans le temps (de 1 mois à 6 mois) et, finalement, les résultats de la microscopie de force à photo-induite sur les échantillons de bois (non traités / traités/ en contact avec l'argile).

3.1 Résultats des caractérisations des argiles utilisées

3.1.1 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ont été réalisées afin d'identifier et de décrire l'étendue de domaine de plasticité des deux types d'argile au moyen de ces indices de plasticité.

Pour l'argile rouge, la limite de liquidité est égale à 32 % et à 34 % pour l'argile beige. Les limites de plasticité des argiles rouge et beige sont illustrées dans le Tableau 3-1. La moyenne des teneurs en eau des échantillons 1 et 2 représente les limites de plasticité de l'argile rouge et de l'argile beige et elles sont respectivement de 15 % et 16 %.

Au regard de la littérature, les résultats les plus nombreux concernent les blocs de terre comprimée (BTC) et les adobes. Pour les autres techniques, le nombre de valeurs disponibles dans la littérature est trop faible pour être significatif. Pour la construction en blocs de terre comprimée, la majorité des sols étudiés ont des plages de limites de liquidité comprises entre 25 et 45 %, ce qui est légèrement supérieur à celui des adobes (Bruno et al., 2017; Goodhew et al., 2021; Laborel-Préneron et al., 2017). Pour les adobes, la plupart des sols ont des limites de liquidité comprises entre 20 et 40 % (Aubert et al., 2015; Pekrioglu Balkis, 2017). De plus,

pour les deux techniques de construction, les sols présentent généralement des limites de plasticité comprises entre 15 % et 29 %.

Tableau 3-1 Limites de plasticité de l'argile rouge et de l'argile beige

	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Limite de plasticité (%)
Argile rouge			
Échantillon 1	20,36	17,74	15
Échantillon 2	19,08	16,46	
Argile beige			
Échantillon 1	19,25	16,59	16
Échantillon 2	18,52	15,85	

L'indice de plasticité (I_p) présente la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité $I_p = W_L - W_p$. Les résultats présentés au Tableau 3-2 indiquent que l'indice de plasticité de l'argile rouge et de l'argile beige est respectivement de 17 % et de 18 %. En se basant sur le diagramme de Casagrande représentant la variation de la limite de liquidité en fonction de l'indice de plasticité, l'argile rouge et l'argile beige appartiennent à la catégorie des argiles moyennement plastiques.

Tableau 3-2 Calculs de l'indice de plasticité de l'argile beige et de l'argile rouge

Type d'argile	Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_p (%)	Indice de plasticité $I_p = W_L - W_p$ (%)
Argile rouge	32	15	17
Argile beige	34	16	18

Inspirés par les travaux de Casagrande, Chen (1975) et Snethen (1980, 1984) mènent une série d'essais sur des sols gonflés et arrivent à la conclusion qu'il est possible de reconnaître ou de prévoir le caractère gonflé d'un sol argileux par un seul paramètre. Le potentiel de gonflement d'un sol argileux est alors évalué uniquement à l'aide de l'indice de plasticité. D'après les travaux de Snethen (1980) et Chen (1975) (Tableau 3-3 et Tableau 3-4), les deux argiles qui sont des mélanges de sable avec des argiles dont les indices de plasticité sont inférieurs ou égaux à 18 % ont un potentiel de gonflement faible. Ce dernier constitue un paramètre primordial dans le choix de matériau de construction.

Tableau 3-3 Relation entre Indices de plasticité (Ip)
et potentiel de gonflement selon Snethen (1980)

Selon Snethen (1980)	
Ip (%)	Potentiel de gonflement
0 - 18	Faible
22 - 32	Moyen
25 – 48	Élevé

Tableau 3-4 Relation entre Indices de plasticité (Ip)
et potentiel de gonflement selon Chen (1975)

Selon Chen (1975)	
Ip (%)	Potentiel de gonflement
0 – 15	Faible
10 – 35	Moyen
20 – 55	Élevé

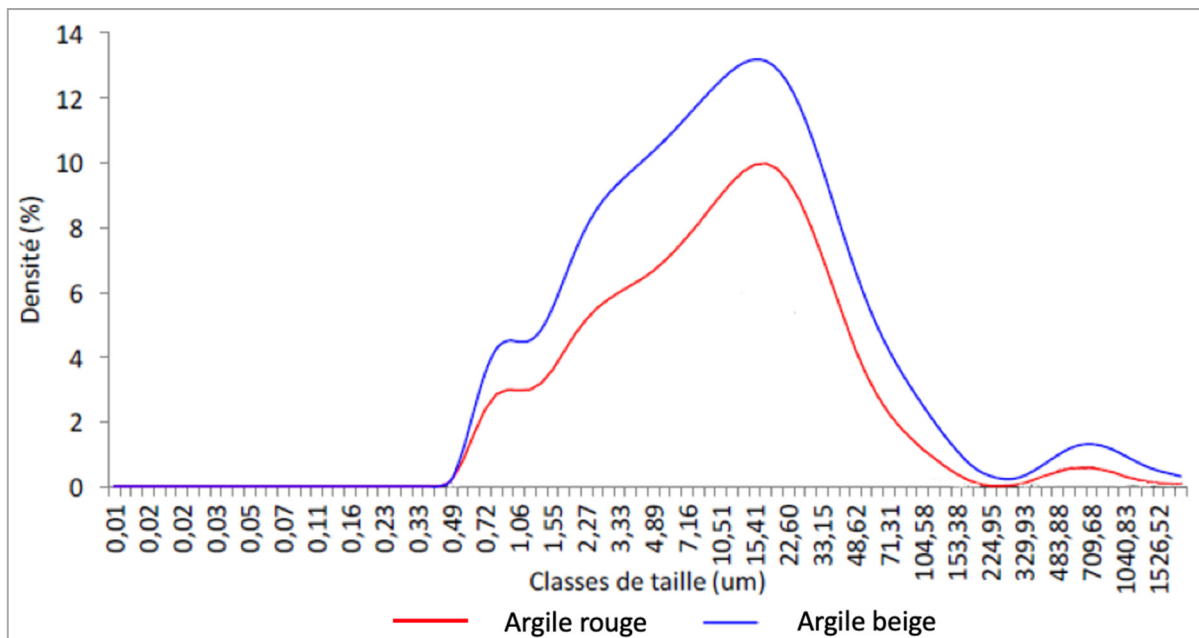
3.1.2 Granulométrie laser

Les résultats de la granulométrie laser réalisée sur les argiles sont présentés à la Figure 3-1. Pour les deux types d'argiles (argile beige et argile rouge), la taille des particules varie principalement entre 0,49 μm et 153,38 μm . Ces deux argiles sont donc composées d'un mélange d'argile et de sable. En ce qui concerne la construction en torchis, il existe peu des données dans la littérature sur la distribution granulométrique comparativement aux autres techniques de construction vu l'omniprésence des fibres végétales pour ce type de matériau. Une étude réalisée par Saxton (1994) recommande une répartition granulométrique idéale composée de 35 % d'argile, de 35 % de sable et de 30 % de gravier (Aubert et al., 2022). Le torchis dépend de l'argile pour lier ou "coller" les autres éléments du mélange. Dans la construction traditionnelle en torchis, la teneur en argile des sols doit être de l'ordre de 10 à 25 % (Goodhew et al., 2021). L'argile beige et l'argile rouge utilisées dans cette recherche ont chacune la densité la plus élevée à la classe de taille de 22,6 μm , correspondant à des densités

de 13 % pour l'argile beige et de 10 % pour l'argile rouge. Les différentes surfaces d'argiles obtenues à l'aide de la granulométrie laser sont présentées dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5 Surfaces spécifiques des argiles
fournies par la granulométrie laser

Type d'argile	Surface spécifique (m ² /kg)
Argile rouge	1296
Argile beige	1297



3.1.3 Diffraction par rayon X

La composition minéralogique des deux types d'argiles est présentée au Tableau 3-6. Les résultats montrent que les argiles beige et rouge incluent le quartz comme constituant dominant, avec 42,6 % pour l'argile rouge et 42,5 % pour l'argile beige. Les autres minéraux qui contribuent significativement à la composition des deux argiles sont la kaolinite, l'illite et la muscovite ; quant à l'hématite, elle n'est détectée que sous forme de traces. La composition en oxydes et en éléments chimiques est illustrée aux Tableau 3-7 et Tableau 3-8.

Tableau 3-6 Résultats de la DRX

Composition minéralogique (%)	Argile rouge	Argile beige
Quartz (silicates)	42,6	42,5
Kaolinite	8,9	25,8
Illite	21,8	14,6
Muscovite (Mica)	24,5	16,9
Hématite	2,2	0,1

Tableau 3-7 Composition en oxydes des argiles

Nom	Composition en oxyde (wt %) à partir résultats DRX					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	H ₂ O
Argile beige	70,4	21,3	3,2	0,1	0,5	4,4
Argile rouge	70,1	19,9	4,7	2,2	0,8	2,4

Tableau 3-8 Composition en éléments chimiques des argiles

	Argile rouge 20-63 µm	Argile beige 20-63 µm
Élément	%	%
O	48,84	49,58
Mg	0,59	0,63
Al	10,22	12,00
Si	30,85	32,18
P	0,14	ND
K	2,66	2,76
Ca	0,26	0,14
Ti	0,43	0,45
Fe	5,41	1,55
Ba	0,52	0,40

La composition minéralogique de l'argile rouge et de l'argile beige, comparée à la littérature, révèle que ces deux argiles peuvent présenter des propriétés mécaniques et géotechniques intéressantes, ce qui les rend aptes à être utilisées comme matériaux de remblai routier (Hyoubi et al., 2018). Des argiles provenant de 3 gisements du nord du Cameroun utilisées en tant que matériau de construction ont été caractérisées et ont montré une composition minéralogique presque semblable aux argiles rouge et beige (Kagonbé et al., 2021). De plus, Alvarez Acevedo et al., dans leur étude, ont caractérisé deux argiles naturelles de la région du sud du Brésil et ont démontré que leur composition minérale est principalement composée de

quartz, de kaolinite et d'illite (Alvarez Acevedo et al., 2017). En raison de leur disponibilité facile et de leur faible coût, ces argiles ont le potentiel d'être utilisées comme adsorbants pour remplacer des matériaux plus coûteux.

3.2 Résultats de conditionnement du bois

La Figure 3-2 présente les résultats de l'essai de conditionnement du bois et montre la variation de la masse moyenne des échantillons dans le temps jusqu'à la stabilisation de la masse qui indique l'obtention de l'humidité d'équilibre souhaitée, 19 % dans notre étude (Figure 3-3). Au cours des quatre premiers jours, nous avons pu observer une augmentation significative de la masse, suivie d'une augmentation progressive jusqu'à ce que la stabilisation de la masse commence le jour 14.

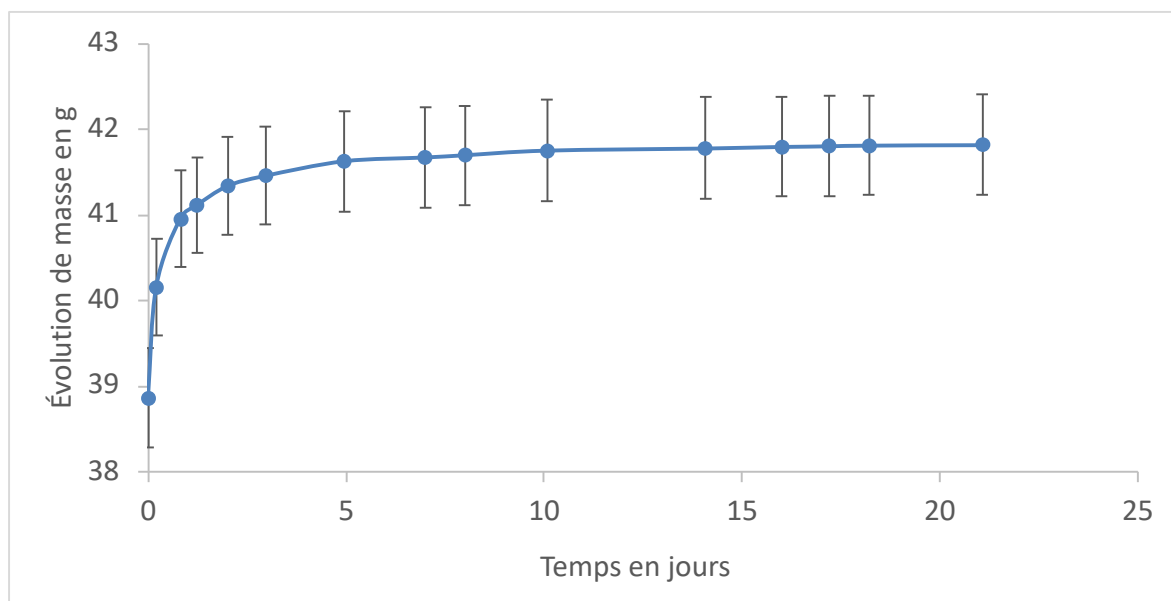


Figure 3-2 Variation moyenne de la masse des échantillons de bois lors du conditionnement

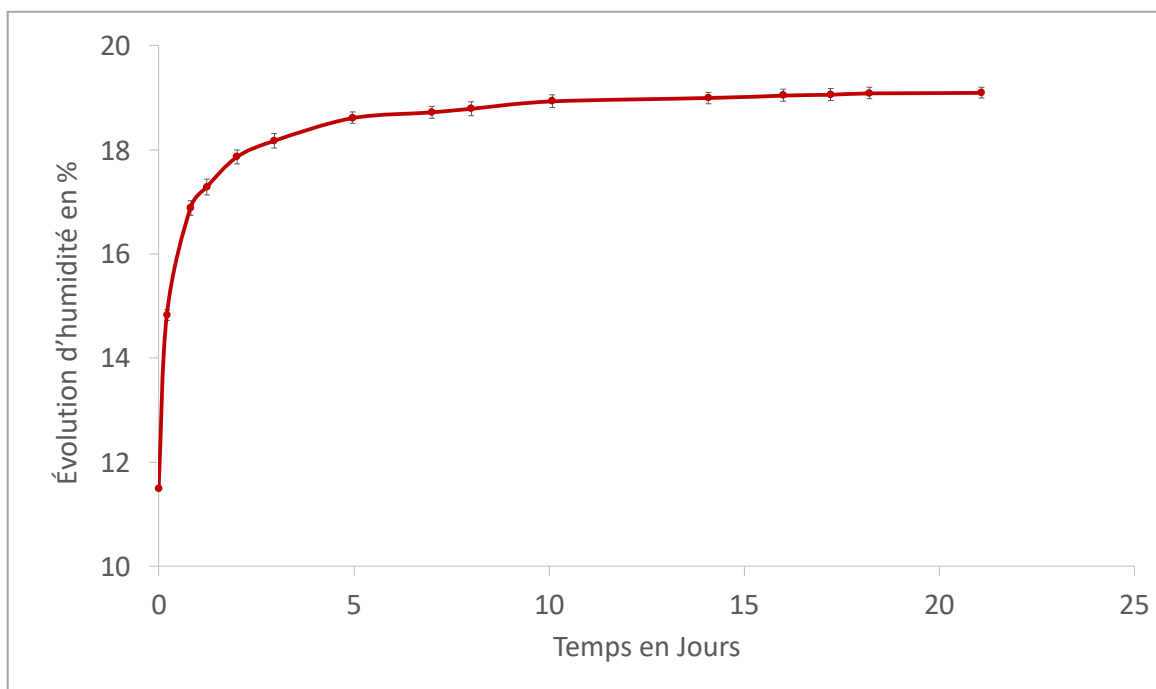


Figure 3-3 Évolution de l'humidité du bois lors du processus de conditionnement

3.3 Effet du temps et de l'humidité sur la migration de DOT vers l'argile : cas de l'argile rouge-sapin

3.3.1 Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur

Les deux histogrammes (Figure 3-4 et Figure 3-5) montrent la variation de la quantité de DOT existant dans le bois avant (sans contact argile : témoin) et après un temps de contact avec l'argile (24 heures et une semaine). La quantité de DOT est plus grande dans la partie de la planche de bois la plus éloignée de l'argile. L'augmentation de la concentration de DOT est plus importante au niveau de la 4^e tranche qui est en contact direct avec l'argile, pour les deux temps de contact et les deux pourcentages d'humidité du bois (HR = 9 % et 19 %).

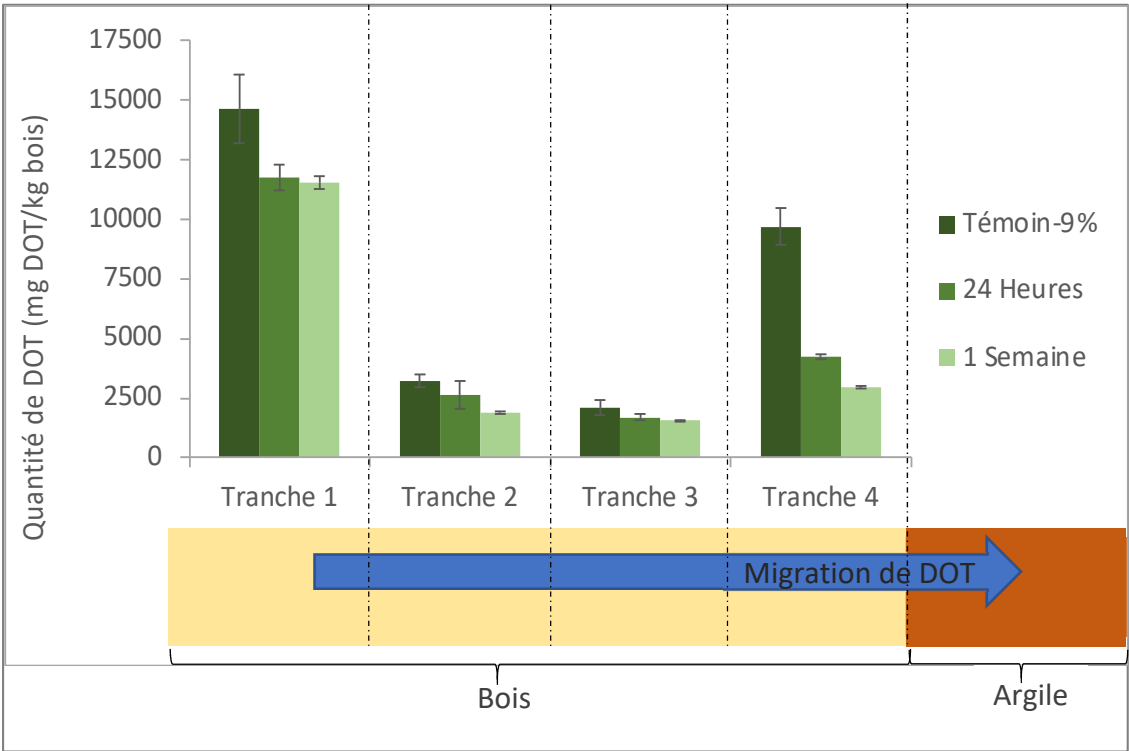


Figure 3-4 Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après une mise en contact avec l'argile : argile rouge - sapin reçu à 9 %

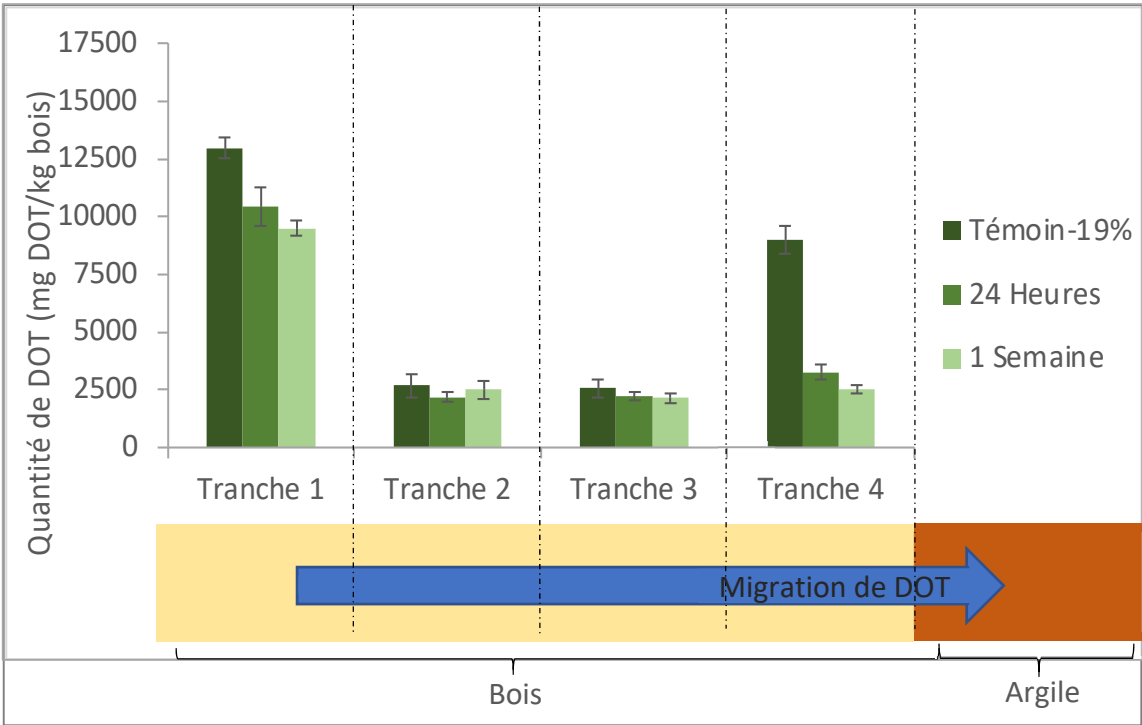


Figure 3-5 Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après une mise en contact avec l'argile : argile rouge - sapin conditionné à 19 %

La répartition du DOT dans le bois n'est pas uniforme ; la majorité du DOT est concentrée sur les surfaces de l'échantillon de bois, et en comparant ces dernières, il y a une différence de près de 30 % entre les concentrations massiques des deux côtés. La quantité de DOT restante demeure sensiblement la même après le conditionnement, en tenant compte de l'écart type : pour un même temps de contact, une quantité de DOT restante égale à $20,3 \pm 1,39$ et à $18,1 \pm 1,54$ pour les échantillons à 9 % et 19 % d'humidité respectivement. Ces grands écarts types peuvent être dus au traitement irrégulier d'une planche de bois, ce qui entraîne une variation significative des concentrations de DOT d'une réplication à une autre. Ceci a été calculé sur la base des résultats de trois réplifications. Comparativement à la quantité de DOT initialement présente, la variation de la quantité de DOT restante est d'environ 8 % et 5 % entre un temps de contact de 24 heures et une semaine pour un pourcentage d'humidité de 9 % et de 19 % respectivement. (Tableau 3-9).

Tableau 3-9 Quantité de DOT restante dans le bois après une mise en contact avec l'argile : cas de l'argile rouge - sapin

	Quantité de DOT totale restante (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT restante par rapport au bois témoin (%)
24 heures - HR 9 %	$20,3 \pm 1,39$	$29,6 \pm 2,81$	$68,6 \pm 2$
24 heures - HR 19 %	$18,1 \pm 1,54$	$27,2 \pm 1,93$	$66,3 \pm 1$
1 semaine - HR 9 %	$17,9 \pm 3,77$	$29,6 \pm 2,81$	$60,6 \pm 5$
1 semaine - HR 19 %	$16,7 \pm 1,13$	$27,2 \pm 1,93$	$61,3 \pm 0,3$

En se basant sur les pourcentages établis pour la quantité de DOT restante, de 31 à 33 % du DOT est sorbé par l'argile après 24 heures de contact, et environ 39 % de DOT pour un temps de contact d'une semaine. Les échantillons de sapin témoin 9 % présentent une quantité de DOT légèrement plus importante que les échantillons de sapin témoin 19 %. Il est clairement établi que le traitement se concentre davantage sur les bords que sur le centre (Figure 3-6). En fait, le conditionnement n'a que peu d'effet sur la quantité de DOT déjà présente, mais il a tendance à être moindre dans le bois initialement et après le contact avec l'argile.

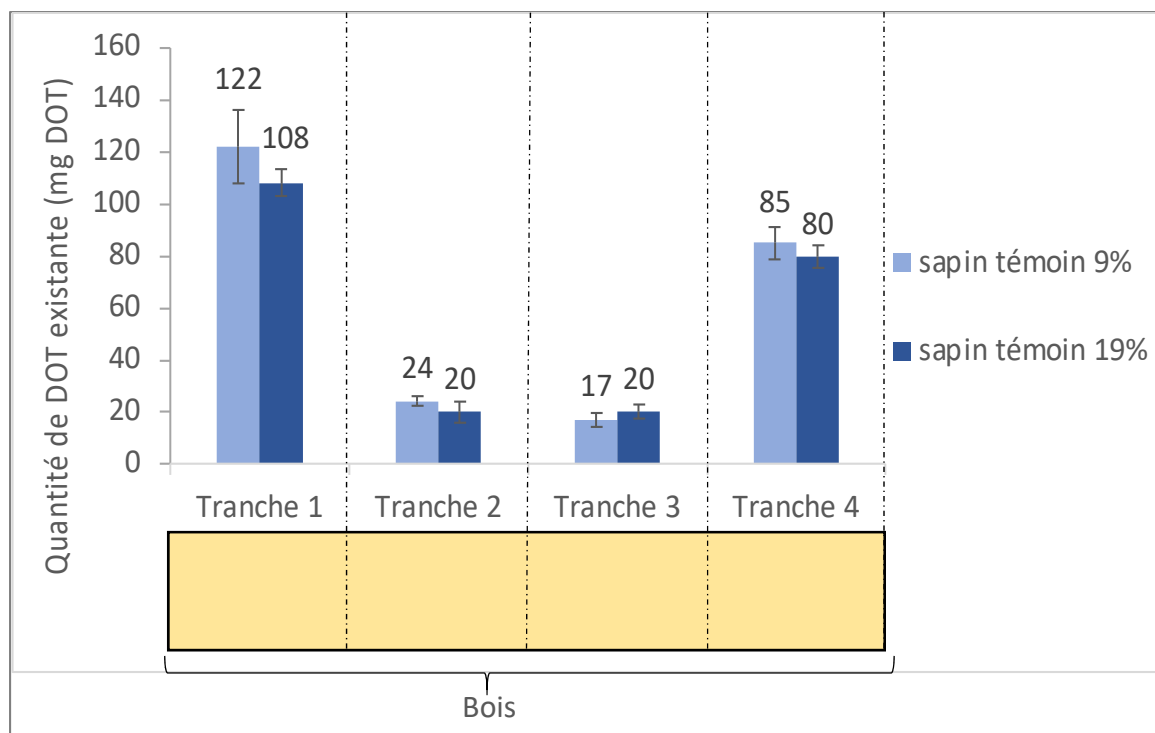


Figure 3-6 Histogramme de la quantité de DOT initialement présente dans le bois conditionné (19 %) et non conditionné (9 %) sans contact avec les argiles

3.3.2 Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur

3.3.2.1 Effet du temps

Pour les échantillons avec un temps de contact de 24 heures, la quantité de DOT sorbée est concentrée dans la tranche en contact direct avec le bois. Lorsque la mise en contact est prolongée à une semaine, nous pouvons constater un profil de migration décroissante en allant de la tranche en contact directe avec le bois (4^e tranche) vers les tranches superficielles (3, 2 puis 1) (Figure 3-7 et Figure 3-8). Les échantillons d'argile présentent une sorption nulle pour les deux tranches superficielles, ceci provient de la correction de la concentration trouvée à l'ICP pour prendre en compte le bore naturellement présent dans l'argile.

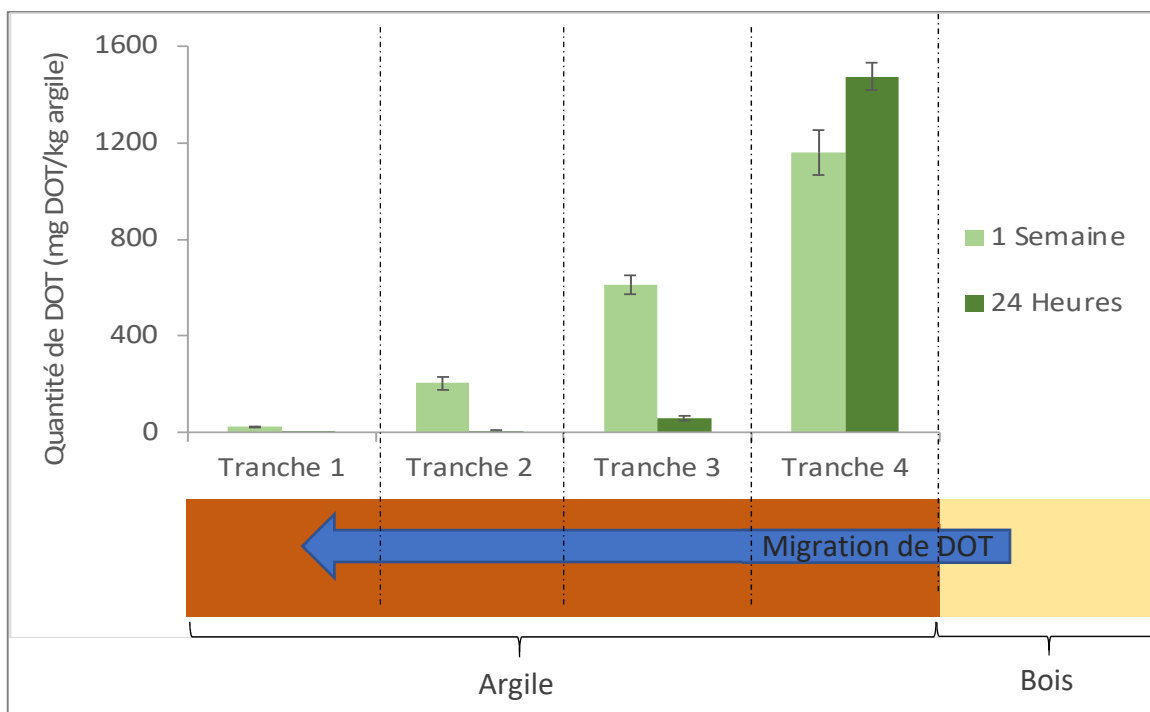


Figure 3-7 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile :
argile rouge - sapin reçu à 9 %

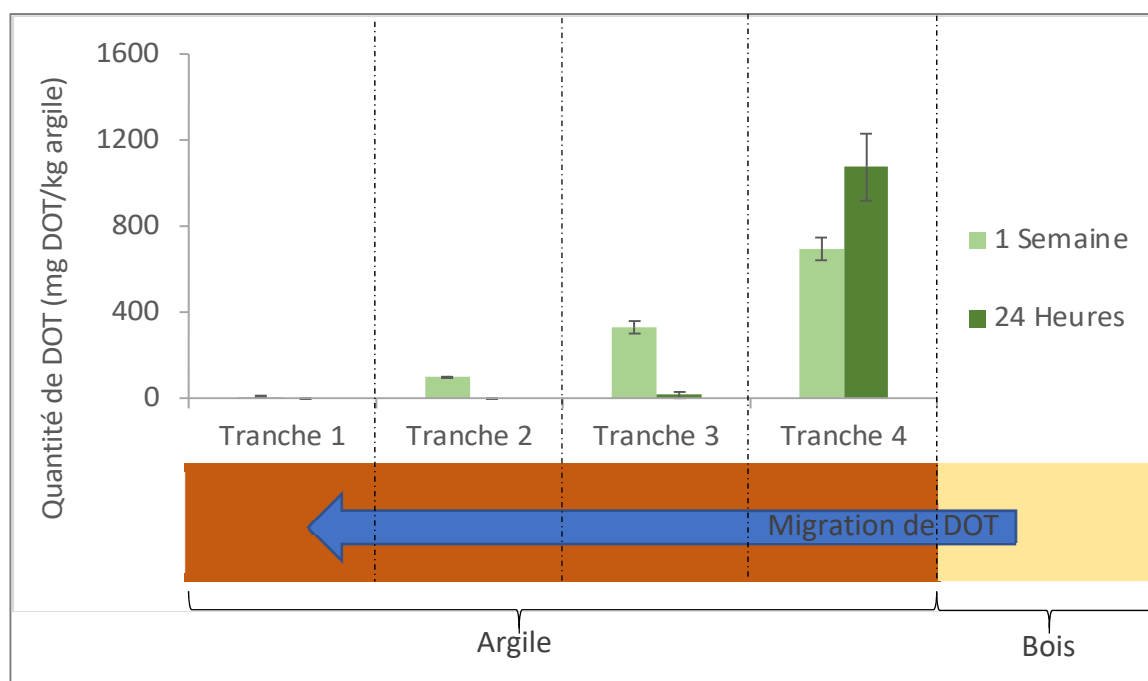


Figure 3-8 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile :
argile rouge - sapin conditionné à 19 %

La quantité totale de DOT sorbée par l'argile (la somme des quantités sorbées par l'argile 1, 2, 3 et 4) augmente à mesure que le temps de contact augmente. Dans le cas de l'assemblage argile rouge-sapin (HR= 9 %), nous observons une augmentation de l'ordre de 30 % sur la concentration de DOT dans l'argile entre des expositions de 24 heures et d'une semaine. Pour le cas du sapin conditionné à une humidité de 19 %, cette augmentation est d'environ 4 % (Tableau 3-10).

Tableau 3-10 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction du temps : cas de l'argile rouge - sapin

Type d'assemblage	Quantité de DOT totale sorbée (g DOT/kg argile)	Degré d'augmentation (%)
Argile rouge - sapin 9 % - 24 heures	$1,54 \pm 0,02$	$30 \pm 1 \%$
Argile rouge - sapin 9 % - 1 semaine	$2,00 \pm 0,04$	
Argile rouge - sapin 19 % - 24 heures	$1,09 \pm 0,04$	$4 \pm 2 \%$
Argile rouge - sapin 19 % - 1 semaine	$1,13 \pm 0,03$	

3.3.2.2 Effet de l'humidité

À partir des résultats présentés dans le Tableau 3-11, l'argile rouge en contact avec le sapin à 9 % d'humidité sorbe plus de DOT que lorsqu'elle est en contact avec celui qui est conditionné à 19 % d'humidité. La variation du taux d'humidité dans le bois ainsi que la légère différence de la quantité de DOT initialement présente entre les échantillons de bois à 9 % et à 19 % peuvent être à l'origine de cette constatation.

Tableau 3-11 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de l'humidité du bois : cas d'argile rouge - sapin

Type d'assemblage	Quantité de DOT totale sorbée (g DOT/kg argile)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT / kg bois)
Argile rouge - sapin 9 % - 24 heures	$1,54 \pm 0,02$	$29,6 \pm 2,8$
Argile rouge - sapin 19 % - 24 heures	$1,09 \pm 0,04$	$27,2 \pm 1,9$
Argile rouge - sapin 9 % - 1 semaine	$2,00 \pm 0,04$	$29,6 \pm 2,8$
Argile rouge - sapin 19 % - 1 semaine	$1,13 \pm 0,03$	$27,2 \pm 1,9$

La Figure 3-9 montre la répartition de DOT par tranche relativement à la quantité de DOT totale sorbée pour les deux temps de contact et les deux humidités du bois, nous pouvons conclure que l'humidité initiale du bois n'a pas d'influence significative sur le transfert de DOT du bois vers l'argile.

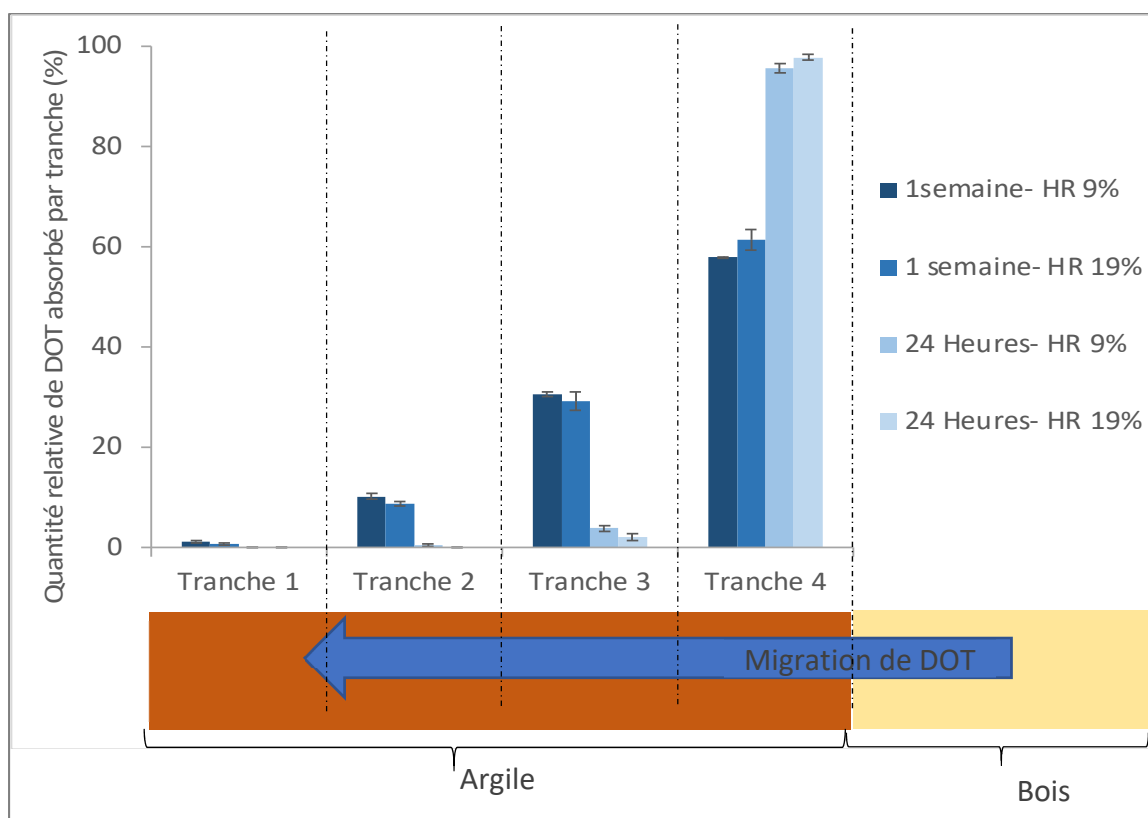


Figure 3-9 Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas de l'argile rouge - sapin

3.3.3 Bilan de masse

La quantité de DOT ainsi perdue au niveau du sapin, après la mise en contact avec l'argile rouge, pour les deux temps de contact (24 heures et une semaine) et les deux humidités de bois 9 % (haut) et 19 % (bas), est illustrée par les bilans de masse représentés par la Figure 3-10. Nous pouvons remarquer que la quantité de DOT migré au niveau du bois représenté celle sorbée par l'argile pour les différents types d'assemblage.

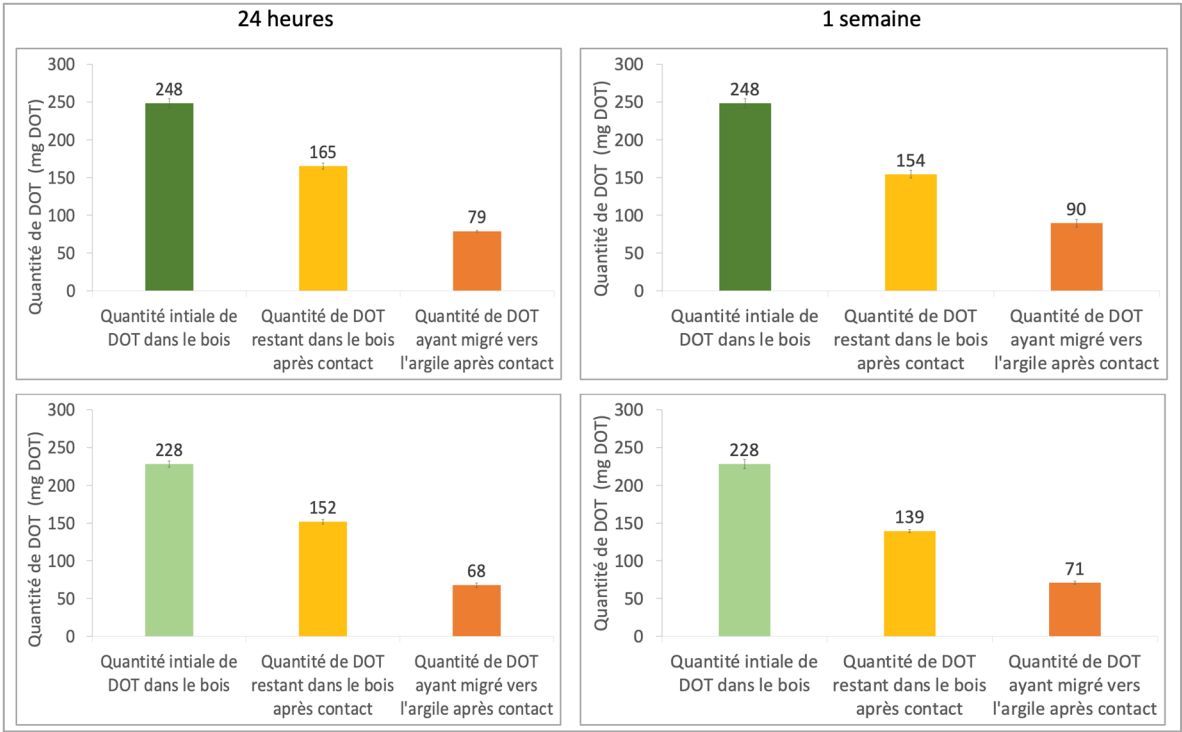


Figure 3-10 Bilan de masse : cas de l’argile rouge – sapin 9% (haut) et 19% (bas)

La quantité de DOT sorbée par l’argile relativement à la quantité de DOT initialement présente dans le bois est illustrée au niveau du Tableau 3-12. En comparant les deux humidités de bois 9 % et 19 %, ces résultats montrent que la quantité de DOT sorbée augmente avec l’augmentation de la quantité de DOT initialement présente.

Tableau 3-12 Quantité relative de DOT sorbée et restée par rapport à la quantité de DOT initiale après une mise en contact avec l’argile : cas argile rouge - sapin

Type d’assemblage	Quantité de DOT migrée vers l’argile	Quantité de DOT restante au niveau du bois
Argile rouge - sapin 9 % - 24 heures	32 %	68 %
Argile rouge - sapin 9 % - 1 semaine	36 %	64 %
Argile rouge - sapin 19 % - 24 heures	30 %	70 %
Argile rouge - sapin 19 % - 1 semaine	31 %	69 %

3.4 Effet du temps et de l'humidité sur la migration de DOT vers l'argile : Cas d'argile beige-sapin

3.4.1 Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur

Pour le cas de l'argile beige, les histogrammes (Figure 3-11 et Figure 3-12) montrent que la variation de quantité de DOT est plus remarquable au niveau de la 1^{ère} tranche, puis au niveau de la 4^e tranche, qui est en contact direct avec l'argile, pour les deux temps de contact et les deux humidités de bois 9 % et 19 %.

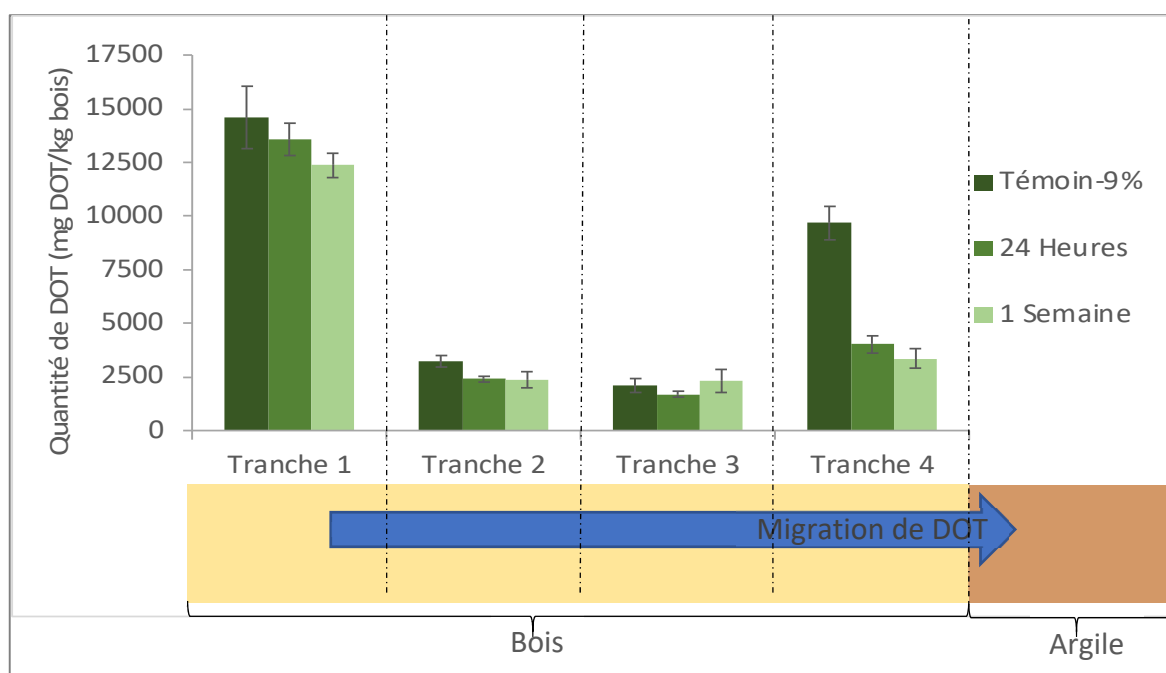


Figure 3-11 Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : cas argile beige - sapin reçu à 9 %

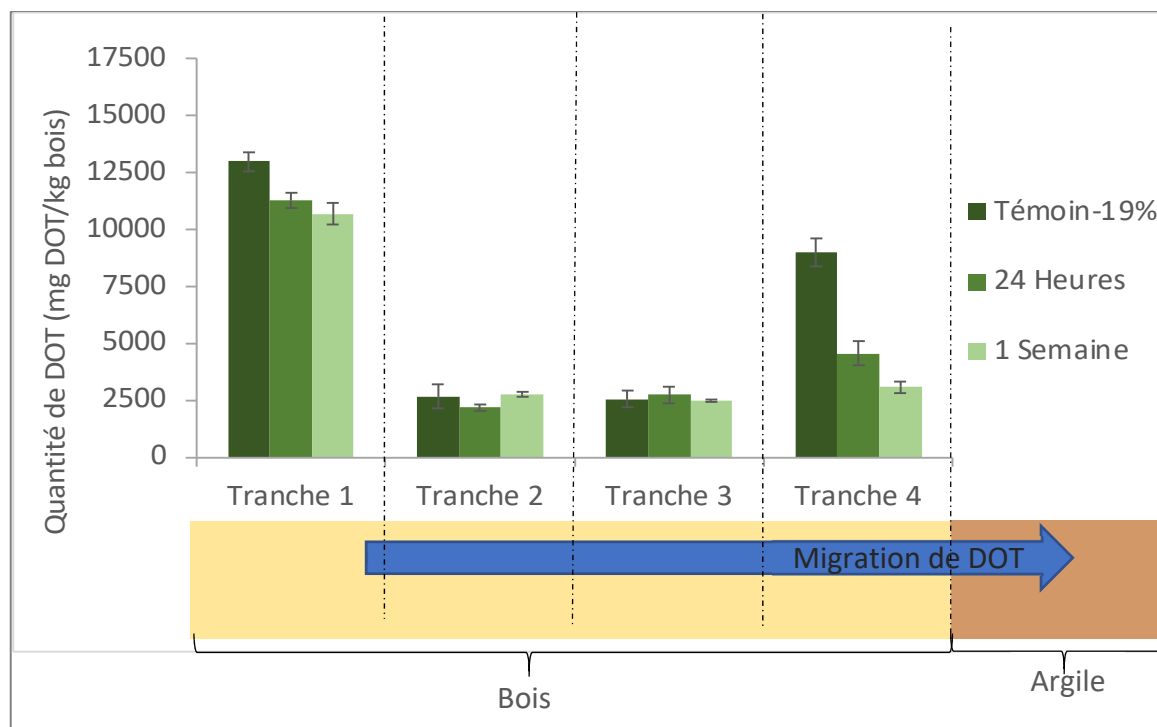


Figure 3-12 Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : cas argile beige - sapin conditionné à 19 %

Pour les deux temps de contact, les échantillons de sapin à 19 % associés à l'argile beige montrent une quantité résiduelle de DOT moins importante que les échantillons de sapin à 9 %. Cette variation peut être reliée d'une part à la variation d'humidité au niveau du bois et d'autre part à l'hétérogénéité de traitement du DOT au niveau de bois. Nous avons remarqué également des écarts types qui s'entrecroisent parfois notamment au niveau de la première tranche de bois qui est la plus éloignée de l'argile. Comparativement à la quantité de DOT initialement présente, pour une même humidité de bois, la variation de la quantité de DOT diffusée est d'environ 4 % et 7 % entre un temps de contact 24 heures et une semaine (Tableau 3-13).

Tableau 3-13 Quantité de DOT restante au niveau du bois après mise en contact avec argile : cas de l'argile beige - sapin

	Quantité de DOT totale restante (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT restante par rapport au bois témoin (%)
24 heures - HR 9 %	21,7 ± 0,36	29,6 ± 2,81	73,2 ± 6,4
24 heures - HR 19 %	20,8 ± 0,35	27,2 ± 1,93	76,3 ± 4,5
1 semaine - HR 9 %	20,4 ± 0,48	29,6 ± 2,81	69 ± 5,5
1 semaine - HR 19 %	18,9 ± 0,22	27,2 ± 1,93	69,8 ± 4,5

3.4.2 Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur

3.4.2.1 Effet du temps

Le phénomène de profil de migration décroissante observé pour le cas d'argile rouge-sapin est également observé pour cet assemblage pour un temps de contact d'une semaine. Pour un temps de contact de 24 heures, la quantité sorbée est stockée au niveau de la 4^e tranche et les tranches superficielles (les plus loin du bois) présentent une sorption presque nulle (Figure 3-13 et Figure 3-14).

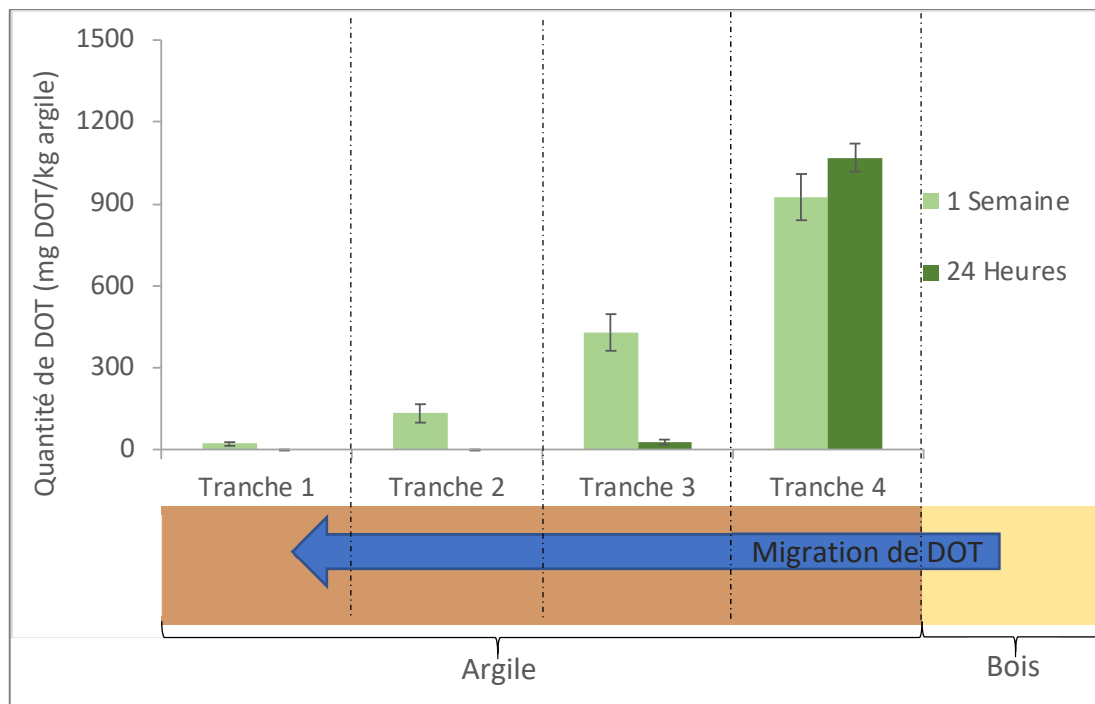


Figure 3-13 Effet du temps de contact sur la sorption du DOT par l'argile :
argile beige - sapin reçu à 9 %

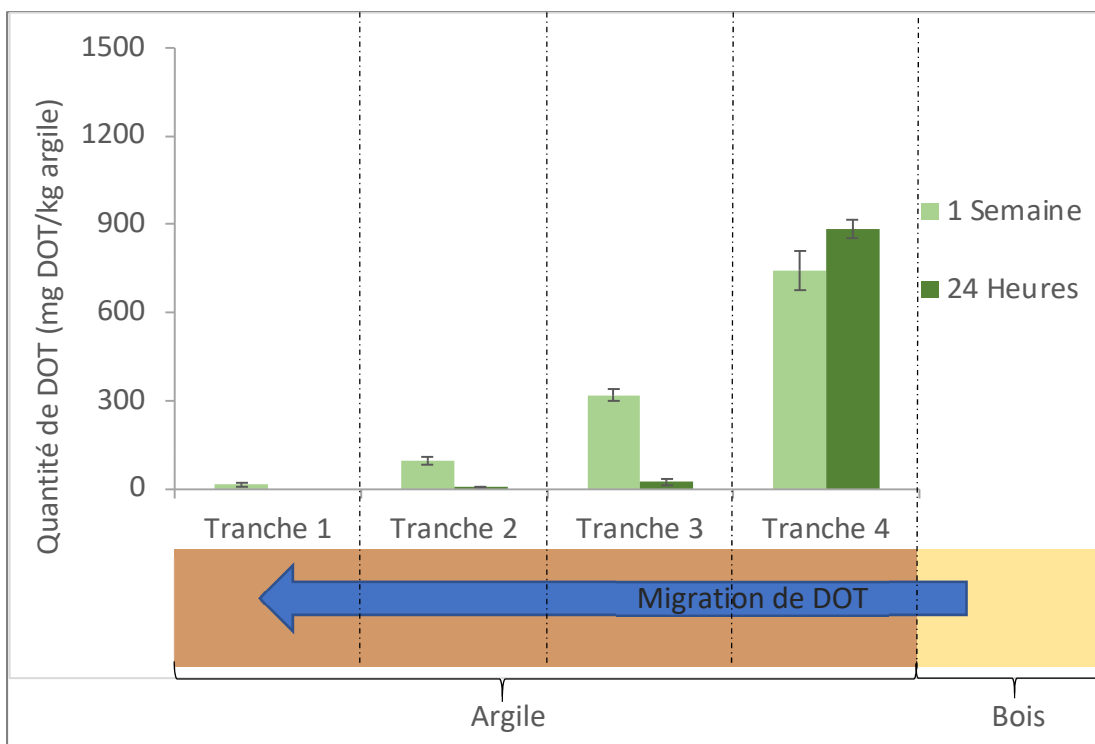


Figure 3-14 Effet du temps de contact sur la sorption du DOT par l'argile :
argile beige - sapin conditionné à 19 %

Plus le temps de contact augmente, plus la quantité de DOT totale sorbée par l'argile (somme de quantité sorbée par les tranches d'argile 1, 2, 3, 4) augmente. Cela représente une augmentation de 38 % en comparant les échantillons ayant un temps de contact de 24 heures et ceux d'une semaine pour le cas de sapin 9 %. Pour le cas du sapin à une humidité relative de 19 %, cette augmentation est de 28 % (Tableau 3-14).

Tableau 3-14 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de temps :
cas d'argile beige - sapin

Type d'assemblage	Quantité de DOT totale sorbée (g DOT/kg argile)	Degré d'augmentation (%)
Argile beige - sapin 9 % - 24 heures	$1,10 \pm 0,02$	$38 \pm 2 \%$
Argile beige - sapin 9 % - 1 semaine	$1,51 \pm 0,05$	
Argile beige - sapin 19 % - 24 heures	$0,92 \pm 0,01$	$28 \pm 0,9 \%$
Argile beige - sapin 19 % - 1 semaine	$1,17 \pm 0,03$	

3.4.2.2 Effet d'humidité

Des mêmes tendances s'appliquent à l'argile beige : à mesure que la teneur en humidité d'origine du bois diminue, le DOT a une propension à migrer vers l'argile. C'est d'autant plus impressionnant pour un temps de contact d'une semaine (Tableau 3-15). Cette différence peut également être liée à l'hétérogénéité du traitement DOT d'un échantillon à l'autre et même au sein d'un même échantillon de bois.

Tableau 3-15 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction d'humidité
de bois : cas de l'argile beige - sapin

Type d'assemblage	Quantité sorbée (g DOT/kg argile)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT / kg bois)
Argile beige - sapin 9 % - 24 heures	$1,51 \pm 0,05$	$29,6 \pm 2,81$
Argile beige - sapin 19 % - 24 heures	$1,17 \pm 0,03$	$27,2 \pm 1,93$
Argile beige - sapin 9 % - 1 semaine	$1,10 \pm 0,02$	$29,6 \pm 2,81$
Argile beige - sapin 19 % - 1 semaine	$0,92 \pm 0,01$	$27,2 \pm 1,93$

La Figure 3-15 illustre la répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile allant de la couche en contact direct avec le bois vers la couche superficielle. Pour 24 heures, 98 % de la quantité de DOT est stocké au niveau de la tranche en contact direct avec le bois. De plus, nous pouvons dire que l'humidité initiale du bois n'a pas d'effet sur le transfert de DOT du bois vers l'argile.

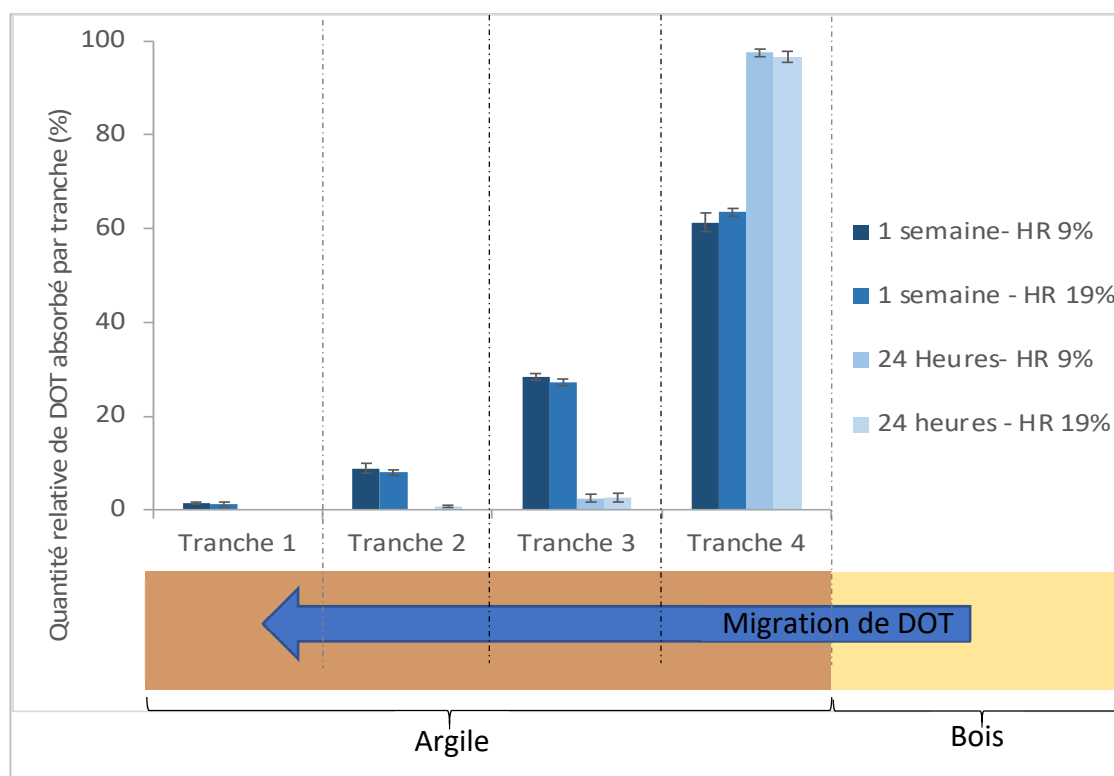


Figure 3-15 Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas de l'argile beige - sapin

3.4.3 Bilan de masse

Par rapport aux bilans de masse, les mêmes constatations peuvent être établies par rapport à celles présentées pour l'assemblage d'argile rouge-sapin (Figure 3-16). En comparant les deux humidités de bois 9 % (haut) et 19 % (bas), les résultats présentés au niveau du Tableau 3-16 montrent que la quantité de DOT sorbée augmente avec l'augmentation de la quantité de DOT initialement présente.

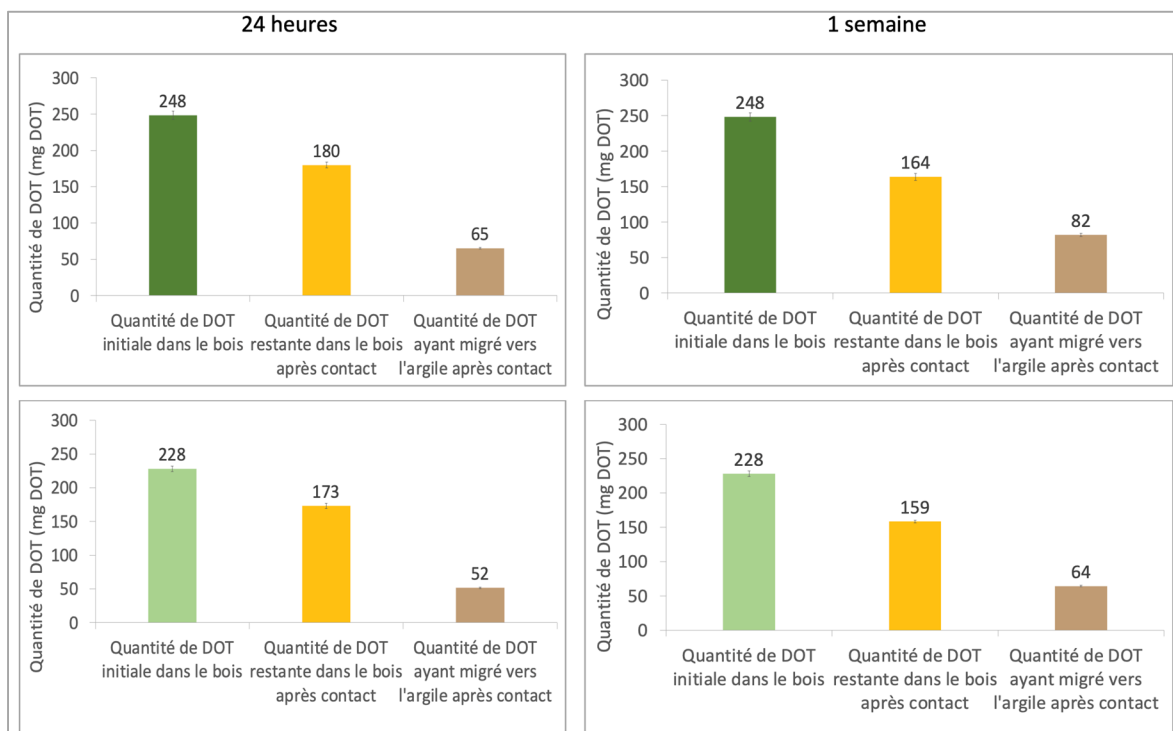


Figure 3-16 Bilan de masse : cas d'argile beige – sapin 9% (haut) et 19% (bas)

Tableau 3-16 Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile beige - sapin

Type d'assemblage	Quantité de DOT migrée vers l'argile	Quantité de DOT restante au niveau du bois
Argile beige - sapin 9 % - 24 heures	26 %	74 %
Argile beige - sapin 9 % - 1 semaine	33 %	67 %
Argile beige - sapin 19 % - 24 heures	23 %	77 %
Argile beige - sapin 19 % - 1 semaine	28 %	72 %

3.5 Effet du temps et de l'humidité sur la migration de DOT vers l'argile : Cas argile rouge -épinette

3.5.1 Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur

Les quantités de DOT présentes dans le bois avant (sans contact argile : témoin) et après les deux-temps de contact avec l'argile (24 heures et d'une semaine) sont présentées sur la Figure 3-17 et Figure 3-18. Pour les deux temps de contact et les deux humidités de bois (9 % et 19 %), la variation de la quantité de DOT est plus notable au niveau de la 4^e tranche, qui est

en contact direct avec l'argile. Pour une même humidité, les échantillons d'épinette présentent une quantité de DOT restante moins importante au bout d'une semaine qu'au bout de 24 heures. Ce qui est logique, car l'argile sorbe plus de DOT après une semaine qu'après 24 heures.

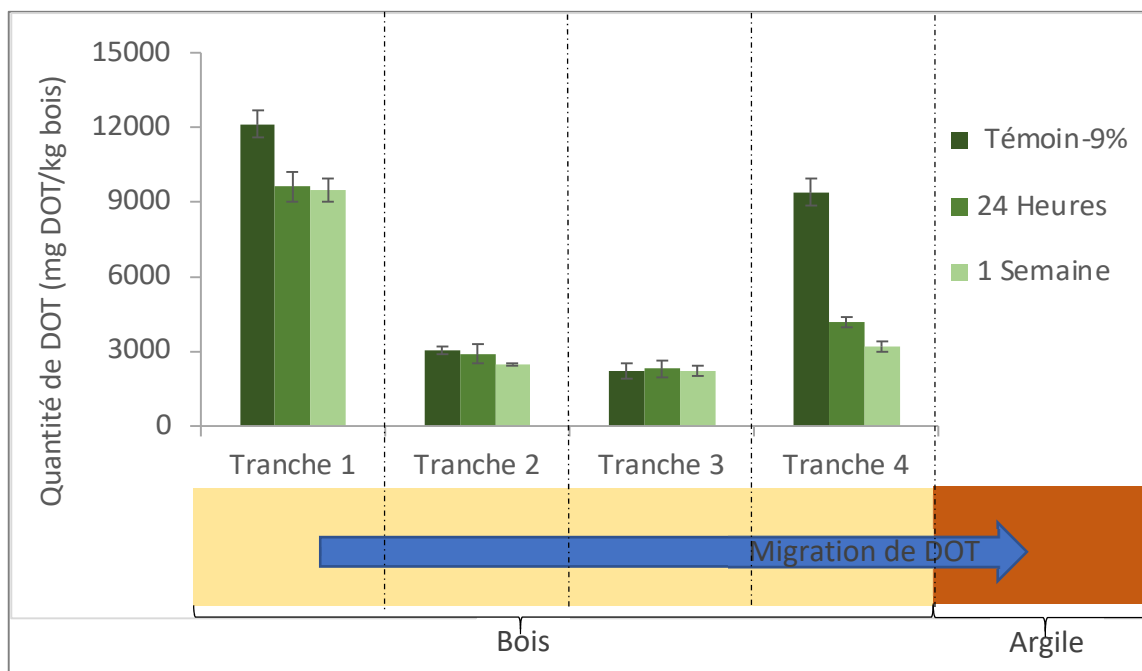


Figure 3-17 Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : cas de l'argile rouge - épinette reçue à 9 %

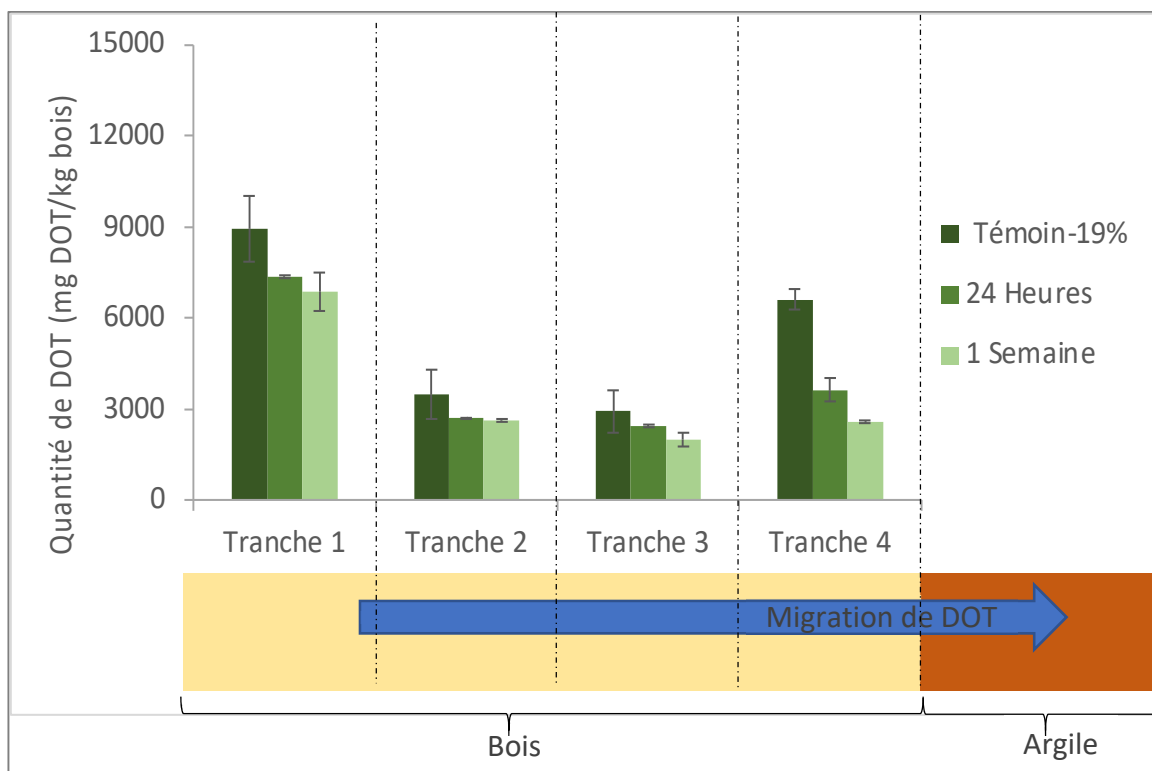


Figure 3-18 Effet du temps sur la quantité du DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : Cas argile rouge - épinette conditionnée à 19 %

Pour un même temps de contact, les échantillons de bois à 9 % ont plus de DOT résiduels que les échantillons d'épinette à 19 % (Tableau 3-17). Comparativement à la quantité de DOT initialement présente, cette variation est d'environ 6 % dans le cas de bois à 9 % et de 23 % dans le cas de bois à 19 %. En tenant compte des écarts types, les échantillons à 19 % d'humidité présentent presque la même quantité de DOT initiale que les échantillons à 9 %.

Tableau 3-17 Quantité de DOT restante au niveau du bois après mise en contact avec argile : Cas argile rouge - épinette

	Quantité de DOT totale restante (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT restante par rapport au bois témoin (%)
24 heures - HR 9 %	18,9 ± 1,52	26,8 ± 1,52	70,9 ± 1,7
24 heures - HR 19 %	16,2 ± 0,50	21,9 ± 2,93	73,6 ± 8,6
1 semaine - HR 9 %	17,4 ± 0,91	26,7 ± 1,53	64,9 ± 0,3
1 semaine - HR 19 %	14,1 ± 0,95	21,9 ± 2,93	64,2 ± 4,9

3.5.2 Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur

3.5.2.1 Effet du temps

Le profil de migration décroissante est bien établi après un temps de contact d'une semaine pour les deux humidités de bois, 9 % et 19 %. Pour un temps de contact de 24 heures, ce profil ne se manifeste pas et nous avons remarqué une sorption presque nulle au niveau des tranches superficielles (Figure 3-19 et Figure 3-20). Ceci est similaire aux assemblages précédents.

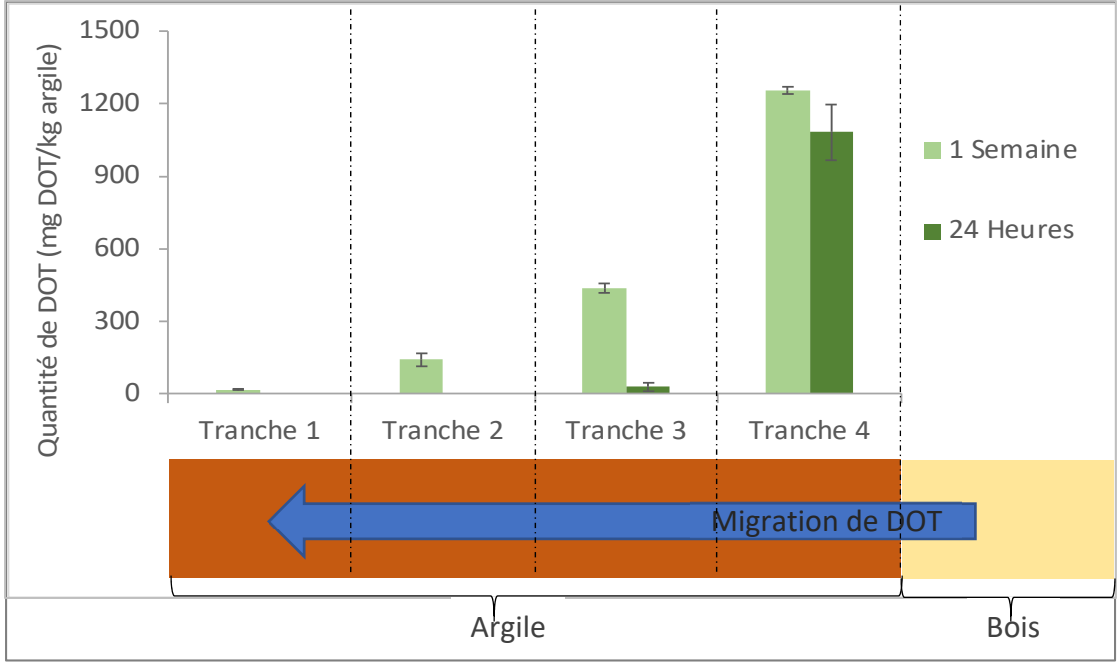


Figure 3-19 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge - épinette reçue à 9 %

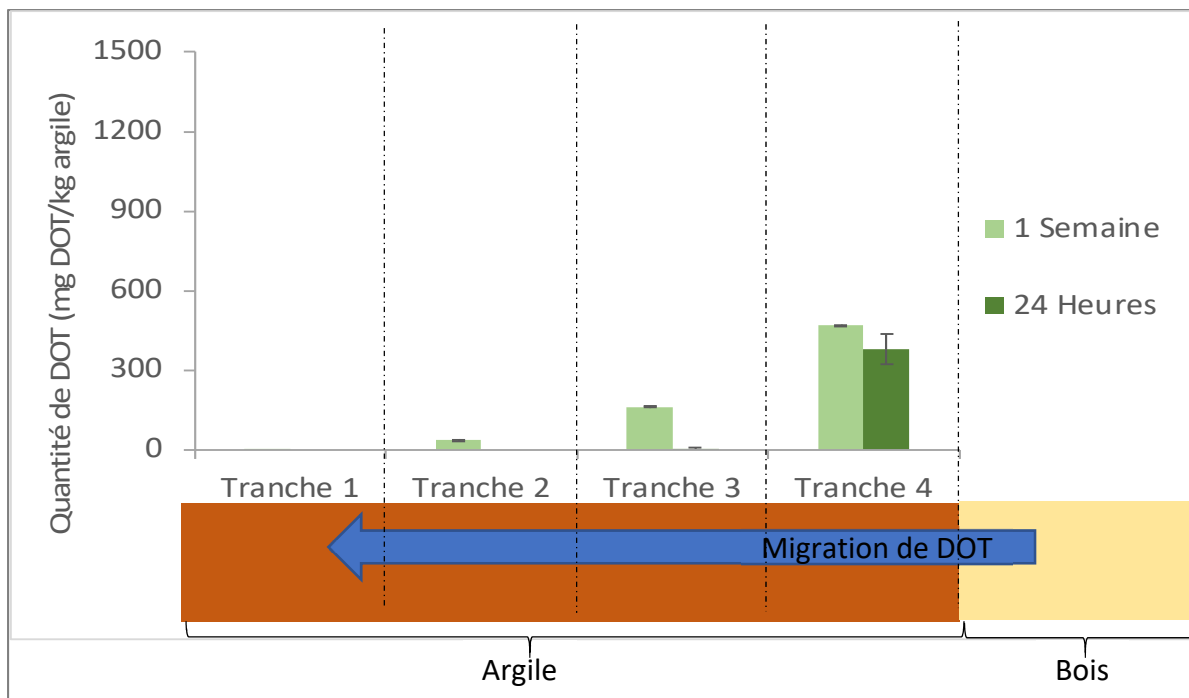


Figure 3-20 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile rouge - épinette conditionnée à 19 %

Les échantillons d'argile rouge mis en contact avec l'épinette pendant 24 heures présentent une quantité de DOT moins importante qu'avec un temps de contact d'une semaine, pour les deux taux d'humidité de bois (9 % et 19 %). Les augmentations de DOT dans l'argile sont de 66 % et 75 % pour des humidités d'épinette de 9 % et 19 % respectivement (Tableau 3-18).

Tableau 3-18 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de temps : cas d'argile rouge - épinette

Type d'assemblage	Quantité sorbée (g DOT/kg argile)	Degré d'augmentation (%)
Argile rouge - épinette 9 % - 24 heures	1,11 ± 0,03	66 ± 4 %
Argile rouge - épinette 9 % - 1 semaine	1,85 ± 0,02	
Argile rouge - épinette 19 % - 24 heures	0,38 ± 0,02	75 ± 6 %
Argile rouge - épinette 19 % - 1 semaine	0,67 ± 0,01	

3.5.2.2 Effet d'humidité

La quantité de DOT sorbée par l'argile rouge diminue lorsque le taux d'humidité de l'épinette passe de 9 % à 19 % (Tableau 3-19). Cela peut être lié au fait que la teneur initiale en DOT des échantillons d'épinette de 19 % sont inférieure à celle des échantillons 9 %. Le traitement semble se concentrer davantage sur les bords et moins sur le centre (Figure 3-21). La tendance est qu'il y a légèrement moins de DOT présent lorsqu'il est conditionné, le conditionnement n'a en fait pas d'impact significatif sur la quantité de DOT existante en tenant compte des écarts types. À partir de l'histogramme présenté au niveau de la Figure 3-22, l'humidité initiale de bois n'a pas affecté la distribution de la quantité de DOT sorbée par tranche d'argile.

Tableau 3-19 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction d'humidité de bois : cas d'argile rouge - épinette

Type d'assemblage	Quantité sorbée (g DOT/kg argile)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT / kg bois)
Argile rouge - épinette 9 % - 24 heures	$1,11 \pm 0,03$	$26,8 \pm 1,52$
Argile rouge - épinette 19 % - 24 heures	$0,38 \pm 0,02$	$21,9 \pm 2,93$
Argile rouge - épinette 9 % - 1 semaine	$1,85 \pm 0,02$	$26,8 \pm 1,52$
Argile rouge - épinette 19 % - 1 semaine	$0,67 \pm 0,01$	$21,9 \pm 2,93$

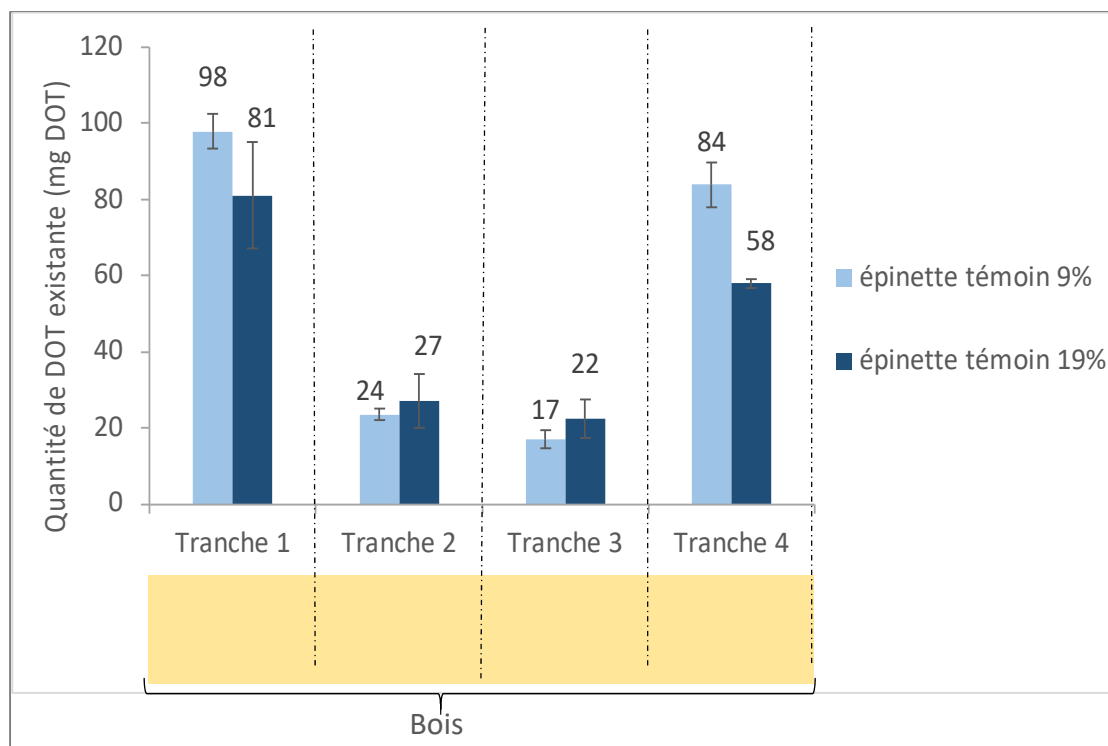


Figure 3-21 Histogramme de la quantité de DOT initialement présent au sein d'épinette conditionnée à 19 % et reçu à 9 % sans contact avec l'argile

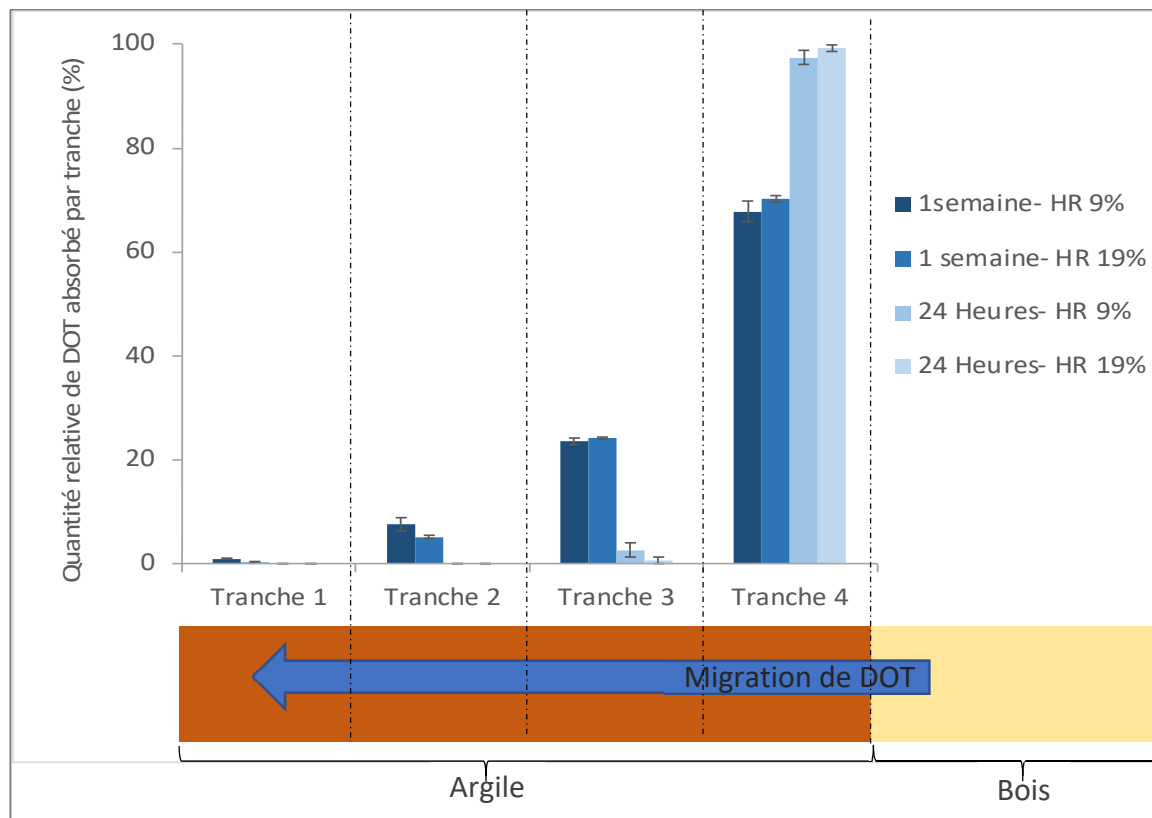


Figure 3-22 Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas d'argile rouge - épinette

3.5.3 Bilan de masse

La quantité de DOT ainsi migrée/diffusée au niveau d'épinette, après la mise en contact avec l'argile rouge, pour les deux temps de contact (24 heures et 1 semaine), et les deux humidités de bois 9 % (haut) et 19 % (bas) est illustrée par les bilans de masse représentée par la Figure 3-23.

On constate que pour les différents types d'assemblage, la quantité de DOT qui migre au niveau du bois correspond à celle sorbée par l'argile. La quantité de DOT sorbée par l'argile relativement à la quantité de DOT initialement présente dans le bois est illustrée au niveau du Tableau 3-20. En comparant les deux humidités de bois 9 % et 19 %, la quantité de DOT sorbée augmente avec l'augmentation de la quantité de DOT initialement présente.

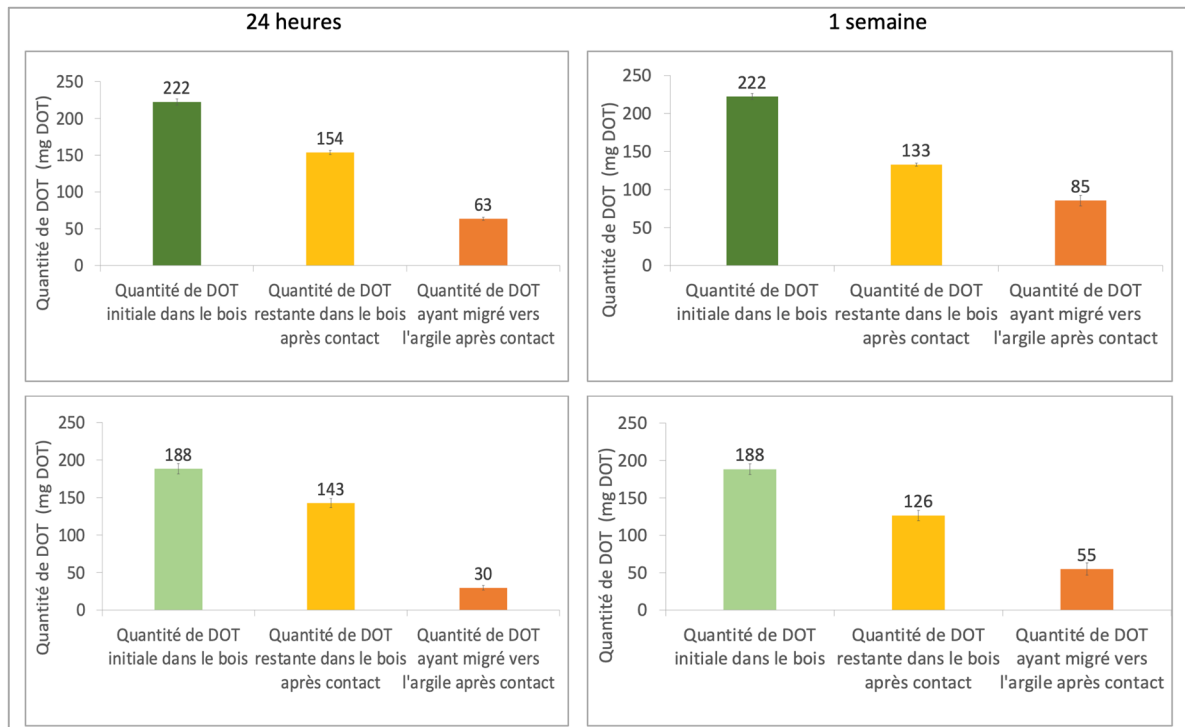


Figure 3-23 Bilan de masse : cas d'argile rouge – épinette 9% (haut) et 19% (bas)

Tableau 3-20 Quantité relative de DOT sorbée et restée par rapport à la quantité de DOT initiale après mise en contact avec l'argile : Argile rouge - épinette

Type d'assemblage	Quantité de DOT migrée vers l'argile	Quantité de DOT restante au niveau du bois
Argile rouge – épinette 9 % - 24 heures	28 %	72 %
Argile rouge – épinette 9 % - 1 semaine	38 %	62 %
Argile rouge – épinette 19 % - 24 heures	15 %	85 %
Argile rouge – épinette 19 % - 1 semaine	29 %	71 %

3.6 Effet de temps sur la migration de DOT vers l'argile : Cas argile beige-épinette

3.6.1 Concentration de DOT dans le bois selon la profondeur

Les deux histogrammes (Figure 3-24 et Figure 3-25) montrent que la variation de quantité de DOT est plus remarquable au niveau de la 4^e tranche, qui est en contact direct avec l'argile, pour les deux temps de contact (24 heures et 1 semaine) et les deux humidités de bois (9 % et 19 %), par rapport aux sections du centre. La face de la planche de bois la plus éloignée de

l'argile comporte plus de DOT que le reste. Pour un taux d'humidité de bois constant, la quantité de DOT restante au niveau des échantillons d'épinette diminue avec le temps, mais en tenant compte des écarts types, cette variation n'est pas significative. Relativement à la quantité de DOT initialement présente, la variation de la quantité de DOT restante est de l'ordre de 3 % pour le bois à 9 % d'humidité et d'environ 2 % pour le bois à 19 % (Tableau 3-21).

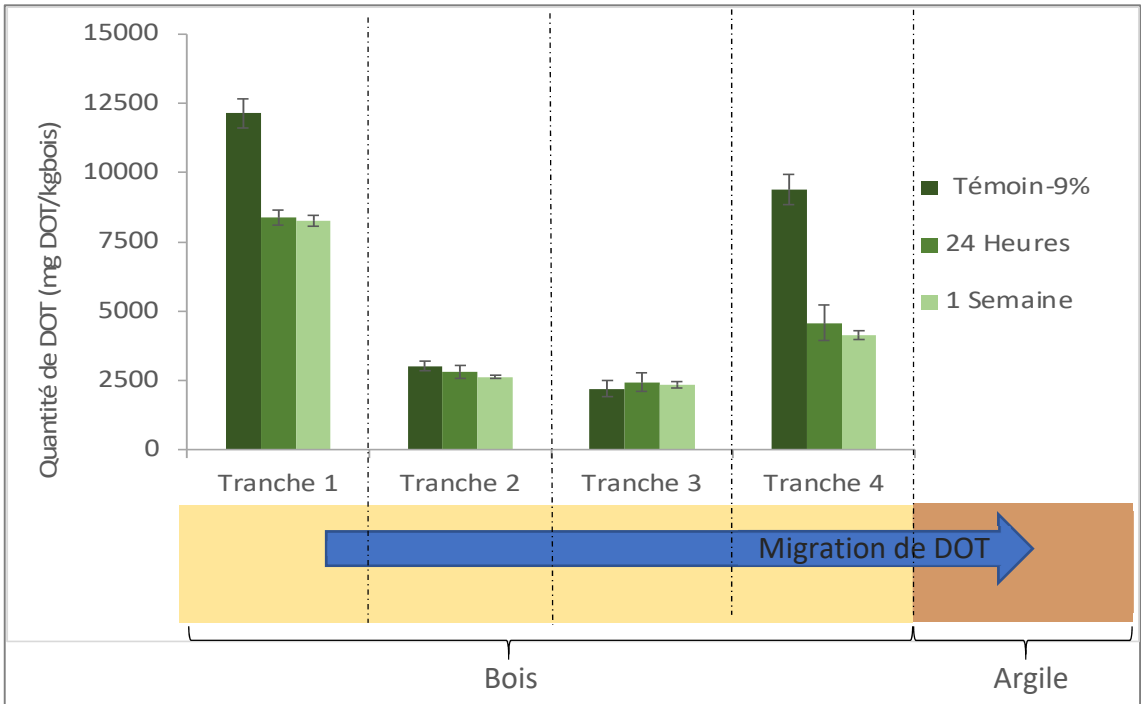


Figure 3-24 Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : Cas argile beige - épinette reçue à 9 %

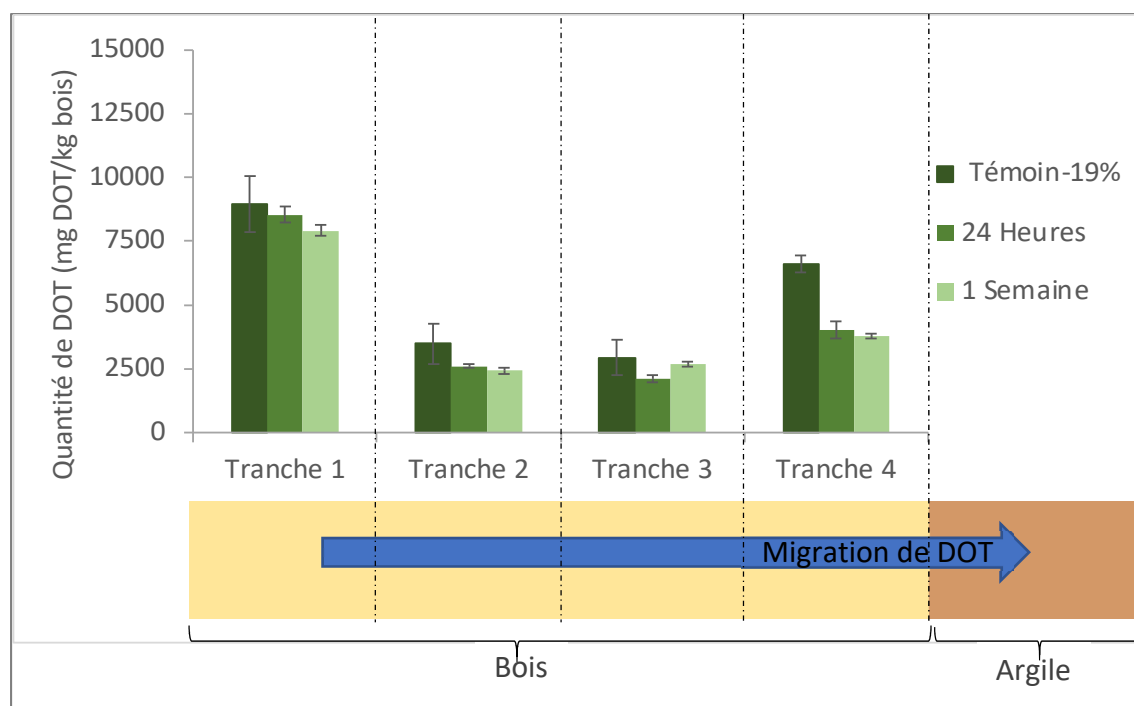


Figure 3-25 Effet du temps sur la quantité de DOT présente dans le bois après mise en contact avec l'argile : Cas argile beige - épinette conditionnée à 19 %

Tableau 3-21 Quantité de DOT restante au niveau du bois, après mise en contact avec argile : Cas argile beige - épinette

	Quantité de DOT totale restante (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT/kg bois)	Quantité de DOT restante par rapport au bois témoin (%)
24 heures - HR 9 %	18,2 ± 1,47	26,8 ± 1,53	68 ± 1,7
24 heures - HR 19 %	17,3 ± 0,88	21,9 ± 2,93	78,4 ± 7,6
1 semaine - HR 9 %	17,4 ± 0,51	26,8 ± 1,53	65 ± 1,8
1 semaine - HR 19 %	16,8 ± 0,49	21,9 ± 2,93	76,5 ± 9,3

Pour l'argile beige en contact avec l'épinette, les échantillons d'épinette à 19 % présentent une quantité de DOT restante moins importante que les échantillons d'épinette à 9 %, pour les deux temps de contact. Ceci peut être lié à la différence de la quantité de DOT initialement présentes au sein des deux échantillons de bois pour les deux humidités 9 % et 19 %. Lorsque le bois est conditionné, le DOT a tendance à être moins présent, mais, compte tenu des écarts types, le conditionnement ne présente pas d'effet significatif sur la quantité de DOT déjà présente.

3.6.2 Concentration de DOT dans l'argile selon la profondeur

3.6.2.1 Effet du temps

La plupart de l'adsorption du DOT se fait dans le premier 24 h. La 4^e tranche d'argile présente presque la même quantité de DOT sorbée pour les deux de contact (des écarts types s'entrecroisent). En plus, un profil de migration décroissante est manifesté pour un temps de contact d'une semaine et une sorption concentrée au niveau de la 4^e tranche pour un temps de contact de 24 heures (Figure 3-26 et Figure 3-27). La quantité de DOT sorbée par l'argile beige en contact avec l'épINETTE augmente avec le temps. Les augmentations de DOT constatées entre 24 heures et une semaine représentent 59 % et 169 % pour des humidités relatives de 9 % et 19 % respectivement (Tableau 3-22).

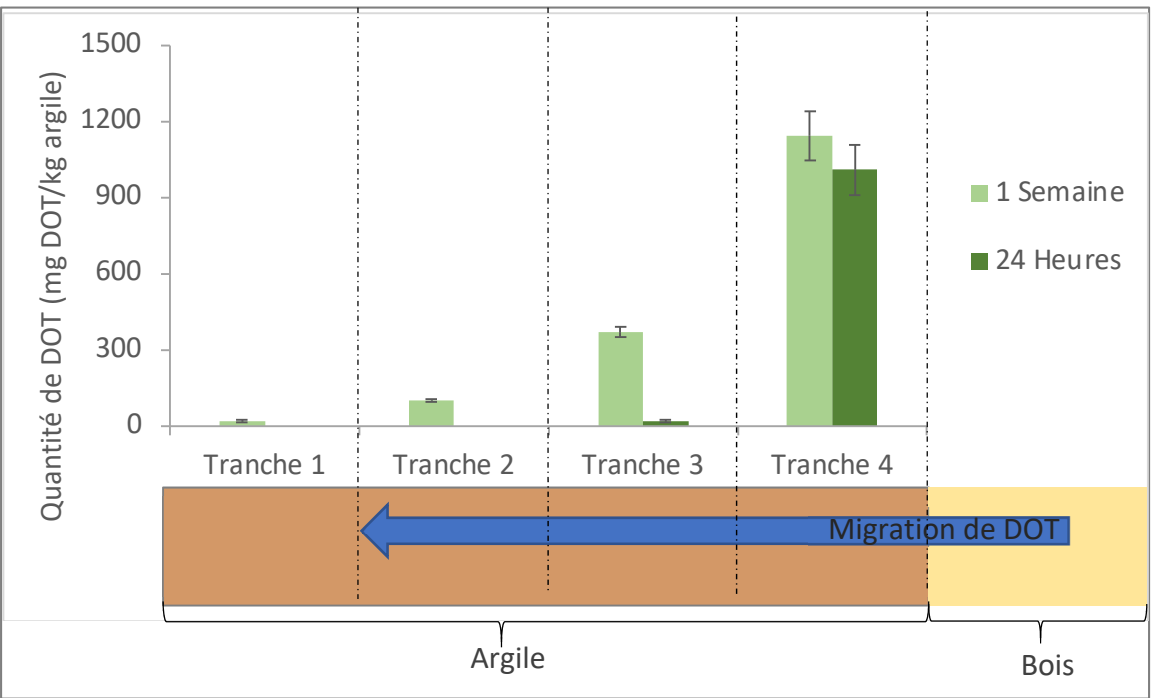


Figure 3-26 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile beige -épINETTE reçue à 9 %

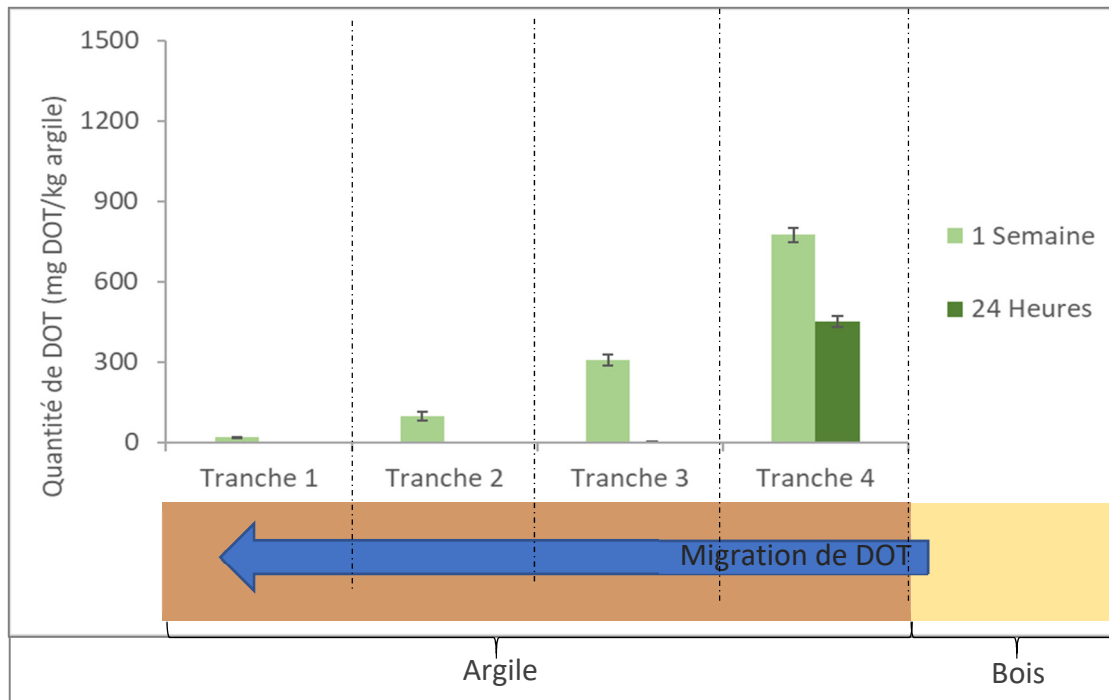


Figure 3-27 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile : argile beige - épinette conditionnée à 19 %

Tableau 3-22 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction de temps : cas d'argile beige - épinette

Type d'assemblage	Quantité sorbée (g DOT/kg argile)	Degré d'augmentation (%)
Argile beige - épinette 9 % - 24 heures	1,03 ± 0,03	59 ± 1 %
Argile beige - épinette 9 % - 1 semaine	1,63 ± 0,03	
Argile beige - épinette 19 % - 24 heures	0,45 ± 0,01	169 ± 0,4 %
Argile beige - épinette 19 % - 1 semaine	1,20 ± 0,02	

3.6.2.2 Effet de l'humidité

La quantité de DOT sorbée par l'argile beige diminue avec l'augmentation de la teneur en humidité du bois (épinette) (Tableau 3-23). Ceci est lié à la différence de la quantité de DOT initialement présente entre les échantillons d'épinette à 9 % et à 19 %. À partir de la Figure 3-28 présentant la répartition de DOT par tranche d'argile relativement à la quantité de DOT totale sorbée, nous pouvons affirmer que l'humidité n'a pas d'effet significatif sur la quantité de DOT migré du bois vers l'argile.

Tableau 3-23 Quantité de DOT totale sorbée par l'argile en fonction d'humidité de bois : cas d'argile beige - épinette

Type d'assemblage	Quantité sorbée (g DOT/kg argile)	Quantité de DOT initialement présente (g DOT / kg bois)
Argile beige - épinette 9 % - 24 heures	$1,03 \pm 0,03$	$26,8 \pm 1,53$
Argile beige - épinette 19 % - 24 heures	0,45	$21,9 \pm 2,93$
Argile beige - épinette 9 % - 1 semaine	$1,63 \pm 0,03$	$26,8 \pm 1,53$
Argile beige - épinette 19 % - 1 semaine	$1,20 \pm 0,02$	$21,9 \pm 2,93$

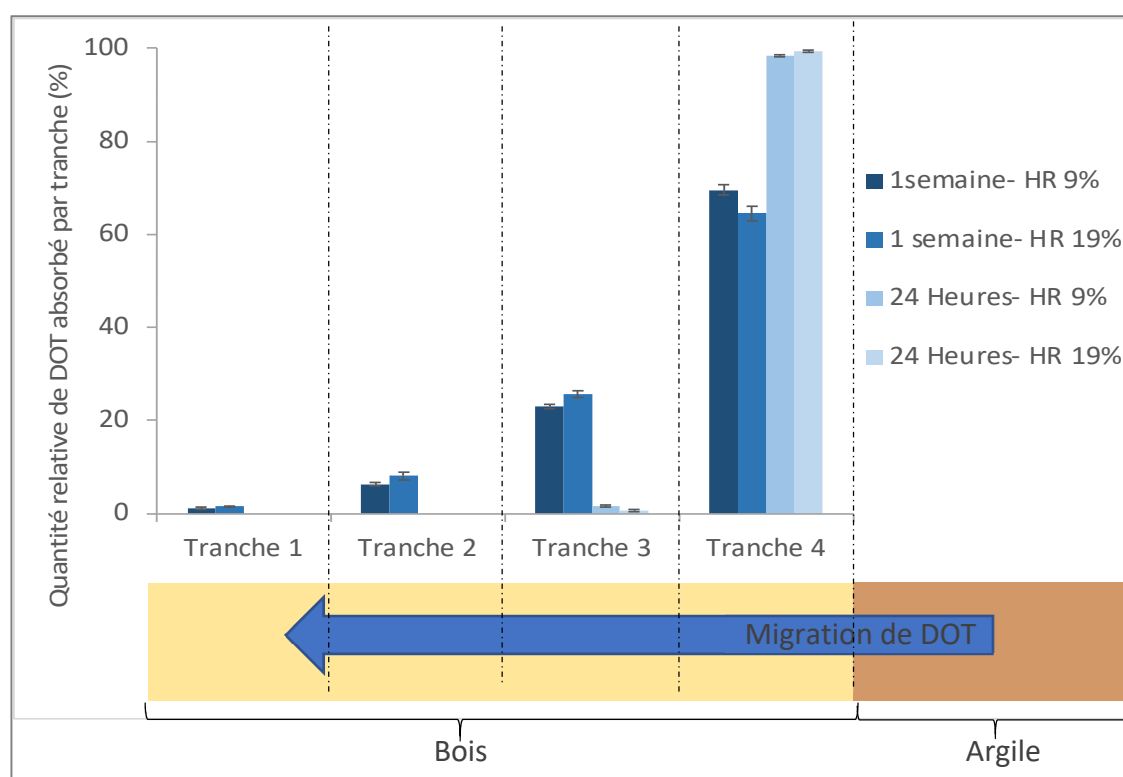


Figure 3-28 Répartition en pourcentage de la quantité totale de DOT sorbée par l'argile : cas d'argile beige - épinette

3.6.3 Bilan de masse

La quantité de DOT ainsi migrée/diffusée au niveau de l'épinette, après la mise en contact avec l'argile beige, pour les deux temps de contact (24 heures et une semaine), et les deux humidités de bois 9 % (haut) et 19 % (bas), est illustrée par les bilans de masse représentée par la Figure 3-29. Pour le cas épinette-argile beige, les mêmes constatations qu'avec l'assemblage à base

d'argile rouge ont été observées. La quantité de DOT sorbée est plus importante lorsque la quantité de DOT initialement présente dans le bois est plus élevée (Tableau 3-24).

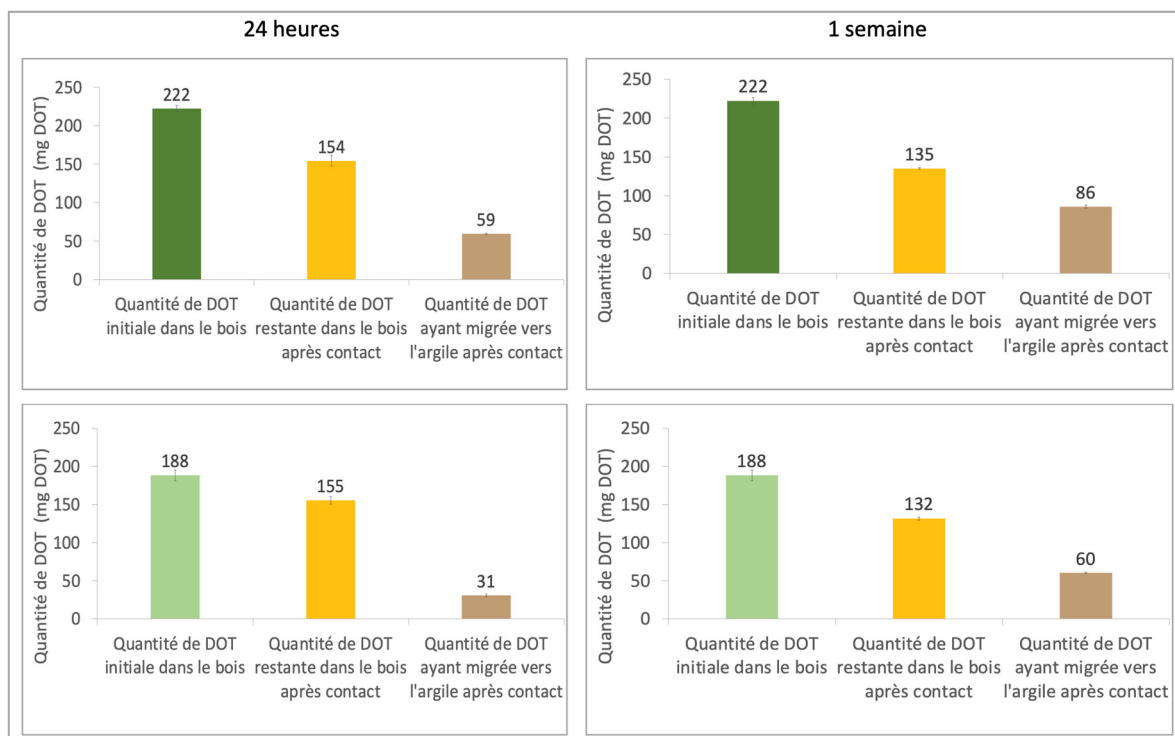


Figure 3-29 Bilan de masse : cas d'argile beige – épinette 9% (haut) et 19% (bas)

Tableau 3-24 Quantité relative de DOT sorbée et resté par rapport à la quantité de DOT initiale après mise en contact avec l'argile : Argile beige - épinette

Type d'assemblage	Quantité de DOT restante au niveau du bois	Quantité de DOT migrée vers l'argile
Argile beige - épinette 9 % - 24 heures	73 %	27 %
Argile beige - épinette 9 % - 1 semaine	61 %	39 %
Argile beige - épinette 19 % - 24 heures	84 %	16 %
Argile beige - épinette 19 % - 1 semaine	68 %	32 %

3.7 Résultats des essais sur l'effet de sens

3.7.1 Cas sapin-argile rouge

Selon l'histogramme présentant les résultats sur la quantité de DOT sorbée dans les 3 sens de migration pour un temps de contact d'une semaine et une humidité de bois de 9 %, un profil de migration décroissante est constaté en allant de la couche en contact direct avec le bois vers les couches superficielles (Figure 3-30).

Nous avons remarqué une quantité de DOT sorbée plus importante dans le sens vertical (2002 mg DOT/kg argile) que dans le sens latéral et gravitationnel (1187 mg DOT/kg argile et 1147 mg DOT/kg argile respectivement). La quantité de DOT sorbée par l'argile semble être influencée par le sens de migration, mais également la quantité de DOT initialement présente dans les échantillons testés peut différer en raison de l'inégalité du traitement DOT appliquée sur une même planche de bois.

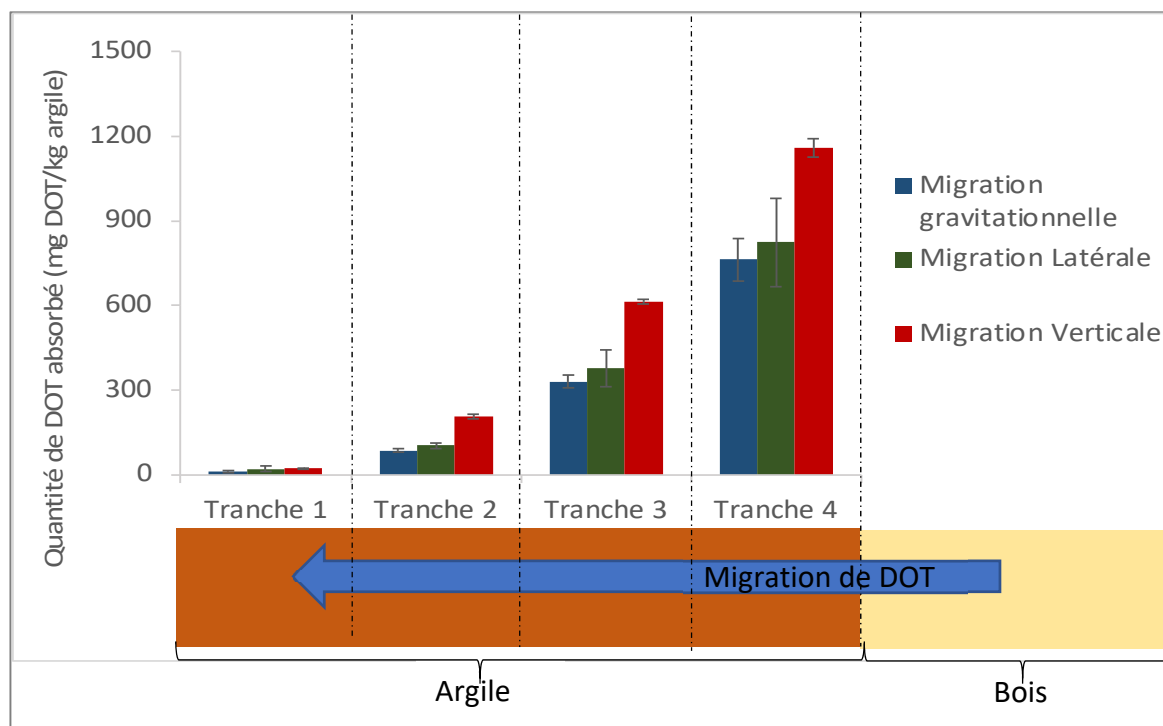


Figure 3-30 Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l'argile : Cas de sapin - argile rouge

À partir des bilans de masse établis (Figure 3-31), la différence entre la quantité de DOT initialement présente dans le bois et la quantité restante après la mise en contact bois – argile définit la quantité de DOT sorbée par l’argile.

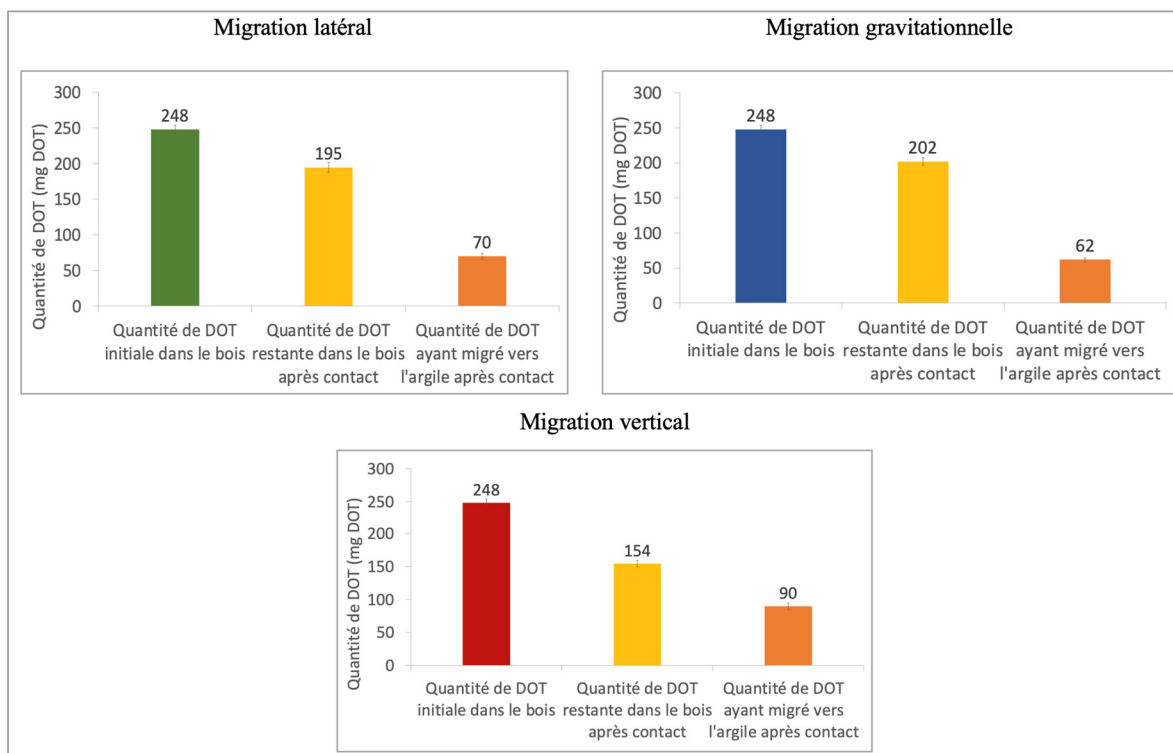


Figure 3-31 Bilan de masse : cas d’argile rouge - sapin après 1 semaine selon l’orientation

La quantité de DOT sorbée par l’argile relativement à la quantité de DOT initialement présente dans le bois est illustrée au niveau du Tableau 3-25. Pour une même quantité de DOT initiale, l’argile rouge a absorbé plus de DOT dans le sens vertical que dans le sens latéral et gravitationnel.

Tableau 3-25 Quantité relative de DOT sorbée par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l’argile : Argile rouge - sapin

Type d'assemblage	Quantité de DOT migrée vers l'argile
Argile rouge - sapin 9 % - sens vertical	36 %
Argile rouge - sapin 9 % - sens latéral	25 %
Argile rouge - sapin 9 % - sens gravitationnel	24 %

3.7.2 Cas sapin - argile beige

Pour le cas d’argile beige, nous pouvons également remarquer un profil de migration décroissant en allant de la couche en contact directe avec le bois vers les couches superficielles, et ce pour les 3 sens de migration de DOT (Figure 3-32). La quantité de DOT sorbée par l’argile dans le sens vertical est plus importante que dans le sens latéral et gravitationnel, à savoir, une quantité de 1512 mg DOT/kg argile dans le sens vertical contre 1297 et 1037 mg DOT/kg argile dans les sens latéral et gravitationnel respectivement.

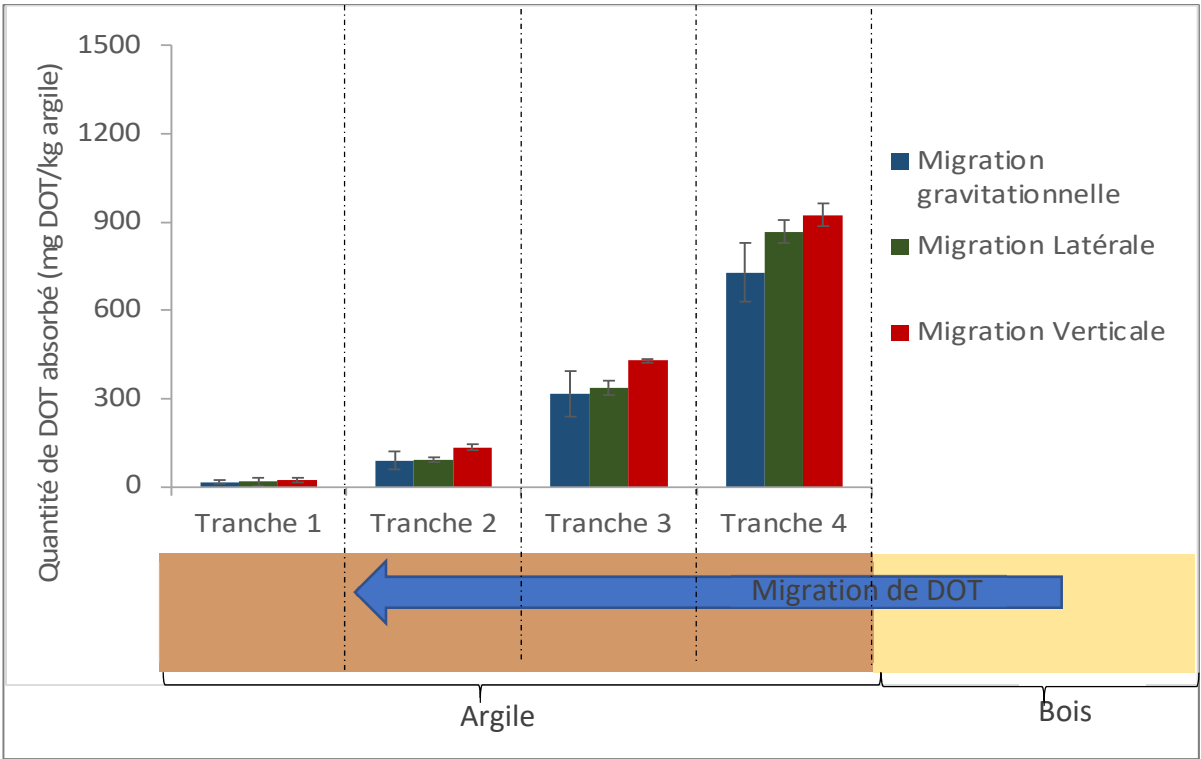


Figure 3-32 Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l’argile : cas d’argile beige - sapin

D’après les bilans de masse établis, la quantité totale de DOT migrée est plus importante dans le sens de migration verticale que dans les sens latéral et gravitationnel pour le cas de l’assemblage sapin-argile beige (Figure 3-33).

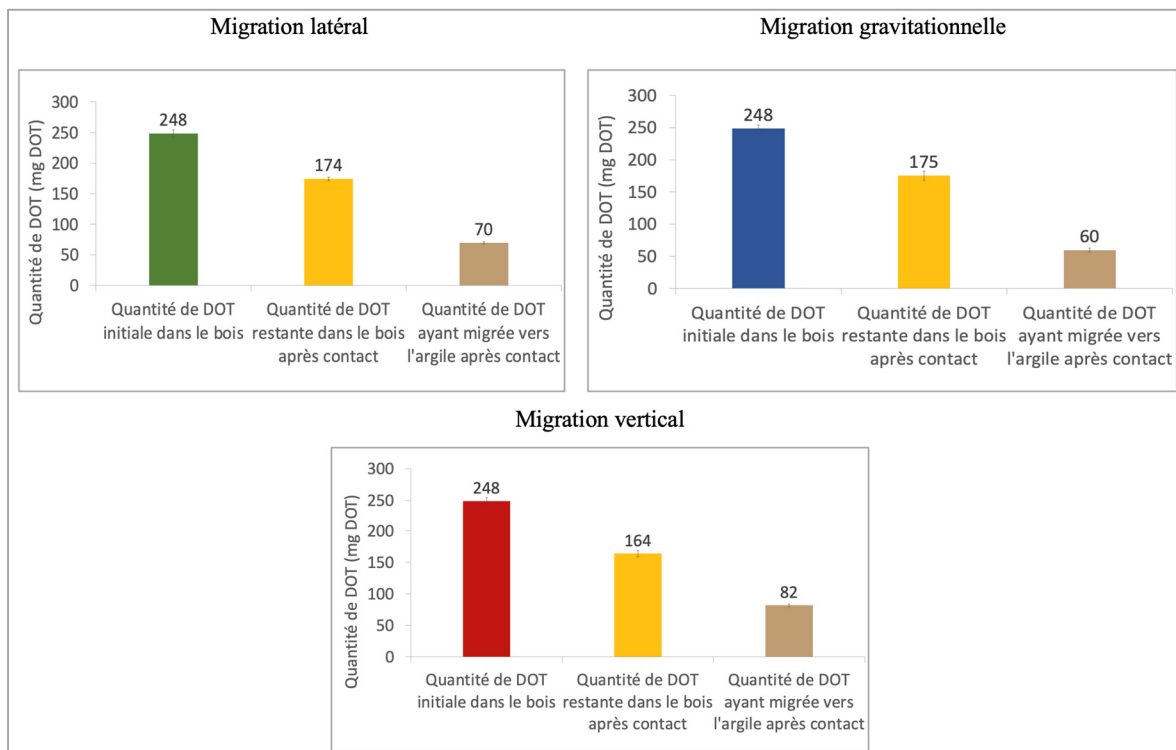


Figure 3-33 Bilan de masse : cas d'argile beige - sapin après 1 semaine selon l'orientation

Les bilans de masse confirment aussi que l'argile beige sorbe plus de DOT dans le sens vertical (33 %) que dans le sens latéral (27 %) et gravitationnel (21 %) (Tableau 3-26).

Tableau 3-26 Quantité relative de DOT sorbé par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile beige - sapin

Type d'assemblage	Quantité de DOT migrée vers l'argile
Argile beige - sapin 9 % - sens vertical	33 %
Argile beige - sapin 9 % - sens latéral	27 %
Argile beige - sapin 9 % - sens gravitationnel	22 %

3.7.3 Cas de l'épinette - argile rouge

À partir des histogrammes de sorption (Figure 3-34), l'argile présente une sorption plus importante dans le sens vertical que dans le sens latéral et gravitationnel identiquement aux assemblages précédents avec des quantités de DOT migrées égales à 1852 mg DOT/ kg argile contre 1531 et 1529 mg DOT/kg argile respectivement. Ceci est également confirmé par les bilans de masses présenté au niveau de la Figure 3-35.

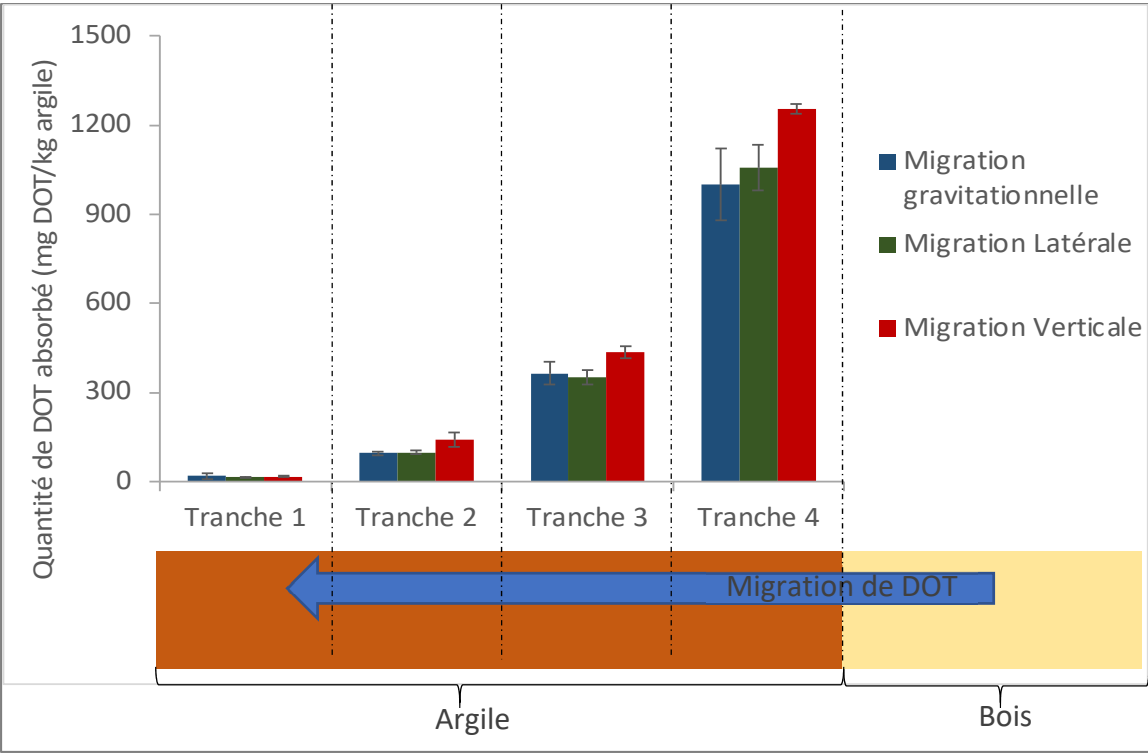


Figure 3-34 Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l’argile : cas argile rouge - épinette

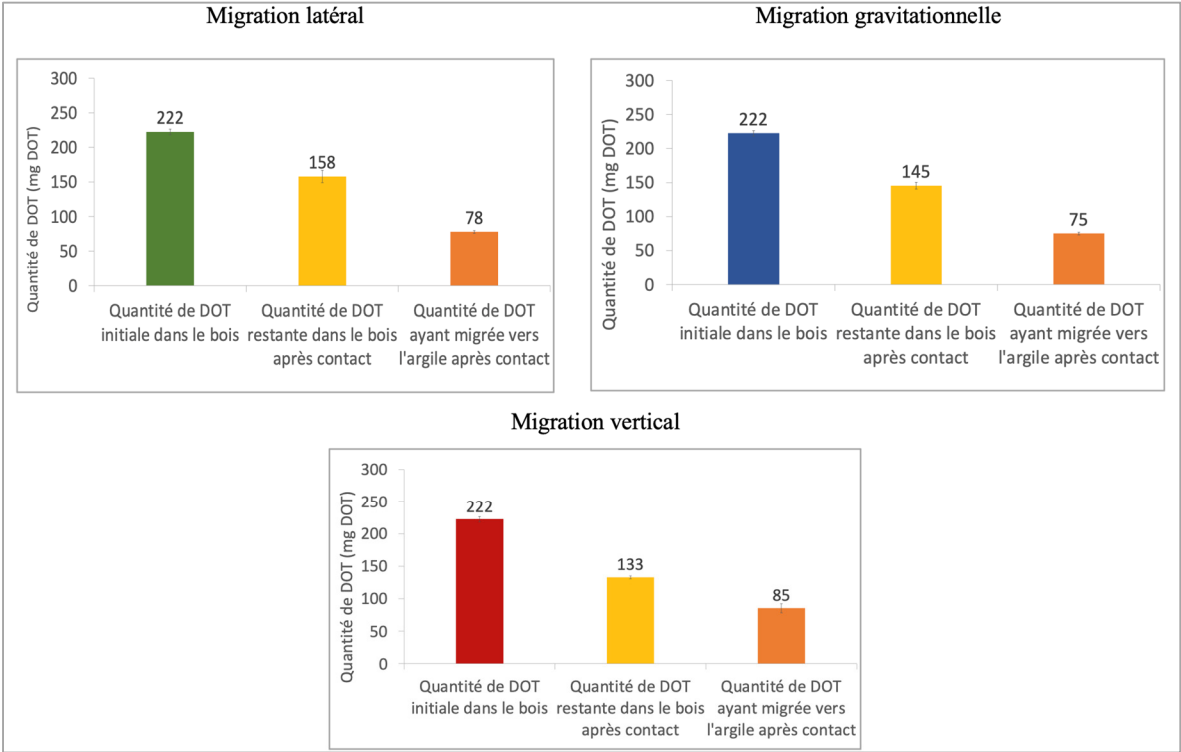


Figure 3-35 Bilan de masse : cas d’argile rouge - épinette après 1semaine selon l’orientation

La quantité de DOT sorbée relativement à la quantité initialement présente dans le bois est illustrée au niveau du Tableau 3-27.

Tableau 3-27 Quantité relative de DOT sorbé par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile rouge - épinette

Type d'assemblage	Quantité de DOT migrée vers l'argile
Argile rouge - épinette 9 % - sens vertical	39 %
Argile rouge - épinette 9 % - sens latéral	35 %
Argile rouge - épinette 9 % - sens gravitationnel	35 %

3.7.4 Cas de l'épinette - argile beige

Pour le cas de l'épinette-argile beige, nous avons constaté que la quantité de DOT totale sorbée par l'argile est plus importante dans le sens gravitationnel et vertical que dans le sens latéral (Figure 3-36), à savoir, 1634 et 1624 mg DOT/kg_{argile} respectivement contre 1350 mg DOT/kg_{argile}.

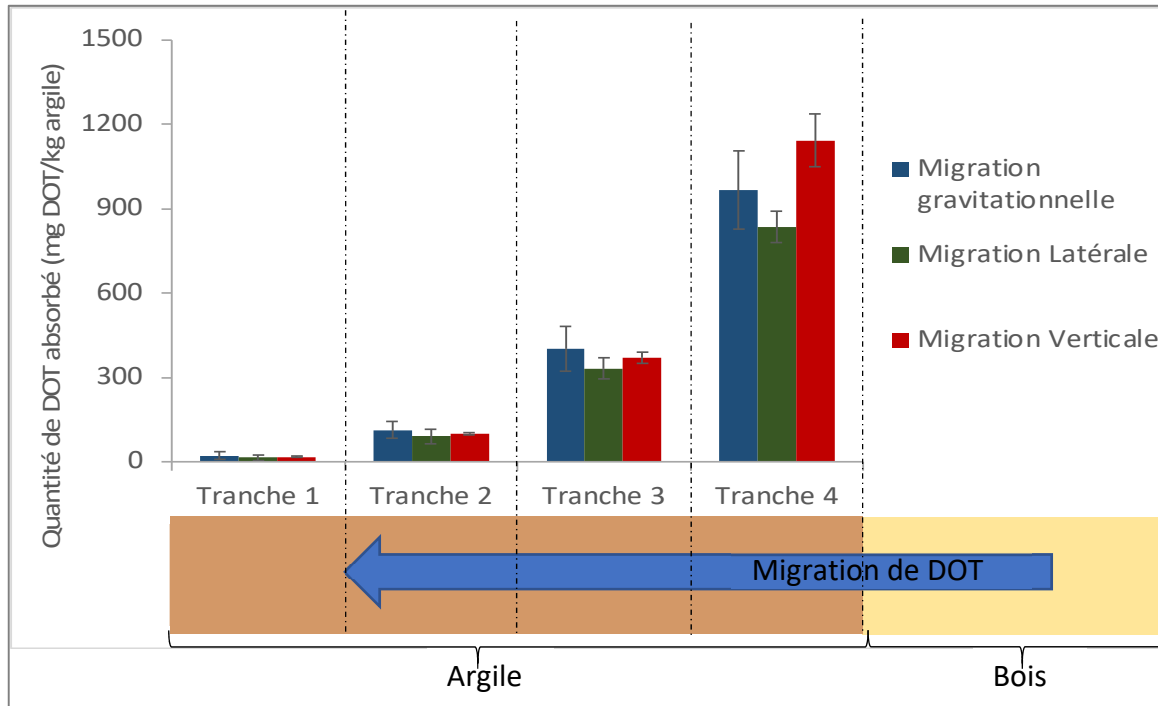


Figure 3-36 Effet de sens de migration de DOT sur la quantité sorbée par l'argile : cas d'argile beige - épinette

Les bilans de masses établis (Figure 3-37) montrent également que la quantité de DOT totale sorbée par argile est plus importante dans le sens gravitationnel et vertical que dans le sens latéral. Bien que l’argile présente presque une sorption similaire dans le sens vertical et gravitationnel, mais nous observons que les bilans de masse, la quantité de DOT restante au niveau de bois dans le sens gravitationnel sont plus importants que dans le sens vertical. Ce qui rend que la variation de la quantité de DOT sorbée dans le sens gravitationnel comparativement aux sens latéral et vertical peut être due à l’hétérogénéité de traitement et à la quantité de DOT initialement présente dans les échantillons de bois. Les sorptions relativement à la quantité de DOT initialement présente sont de 39 % et 38 % dans le sens vertical et gravitationnel respectivement contre une sorption de 30 % dans le sens latéral (Tableau 3-28).

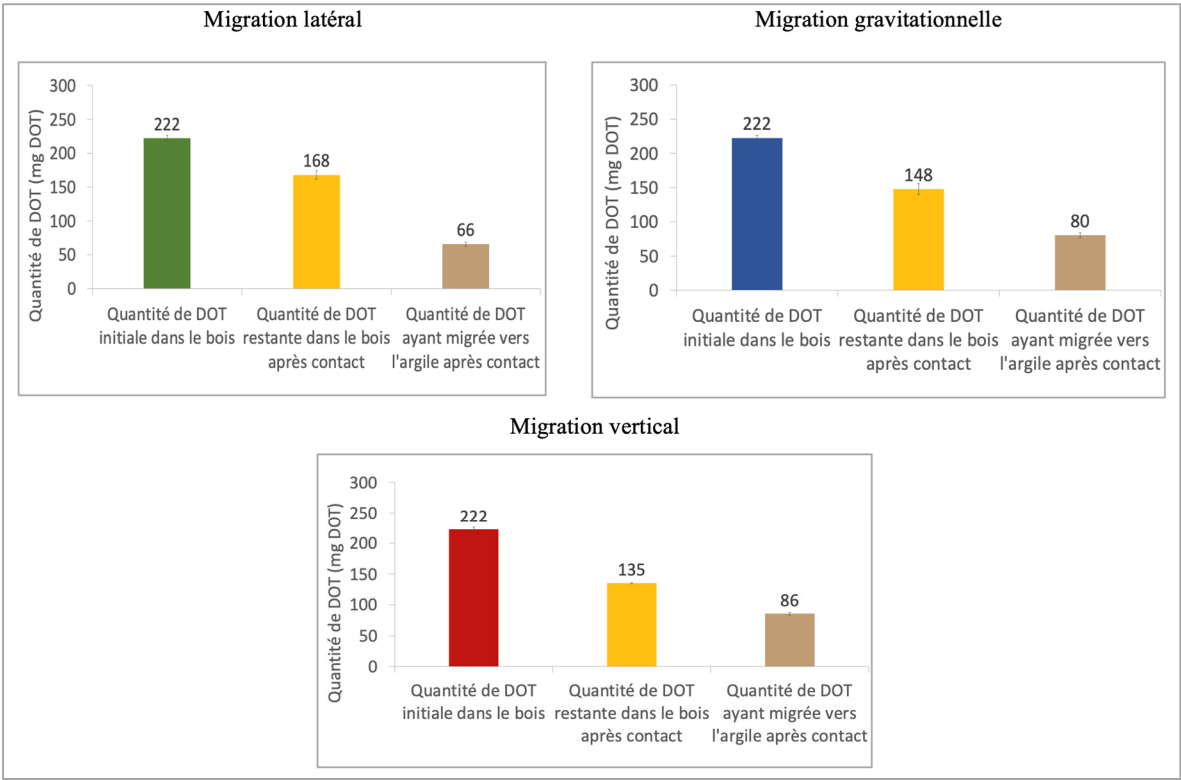


Figure 3-37 Bilan de masse : cas d’argile beige - épINETTE après 1 semaine selon l’orientation

Tableau 3-28 Quantité relative de DOT sorbé par rapport à la quantité de DOT initiale au niveau du bois après mise en contact avec l'argile : Argile beige -épinette

Type d'assemblage	Quantité de DOT migrée vers l'argile
Argile rouge - épinette 9 % - sens vertical	39 %
Argile rouge - épinette 9 % - sens latéral	30 %
Argile rouge - épinette 9 % - sens gravitationnel	38 %

- **Récapitulatif des principales constatations de l'essai à effet de sens :**

En comparant les différents assemblages entre les deux essences de bois (le sapin et l'épinette), et les deux types d'argile (argile rouge et argile beige), nous avons pu constater que :

⇒ Quelle que soit l'essence de bois utilisée :

- La sorption est plus remarquable au niveau de la tranche en contact direct avec le bois que pour les autres tranches pour les 3 sens de migration différents et dans le cas des deux essences de bois.
- La quantité de DOT sorbée par l'argile (rouge/beige) dans le sens vertical est plus importante que dans les sens gravitationnel et latéral, cela peut dépendre de la quantité de DOT initialement présente.

3.8 Résultats de l'essai sur la stabilité de la quantité de DOT sorbée

3.8.1 Quantité de DOT sorbée par l'argile dans le temps

La Figure 3-38 présente la quantité de DOT relativement à la quantité de DOT initialement présente dans le bois, nous avons remarqué des écarts types qui s'entrecroisent, ce qui montre une sorption quasi identique malgré l'augmentation de temps de contact. Également, en regardant l'évolution pendant 4 mois, nous avons constaté que la quantité de DOT sorbée est plus importante pour les deux premiers mois, par la suite, cette quantité a tendance à diminuer et se stabiliser pour les échantillons de 3 mois et 4 mois.

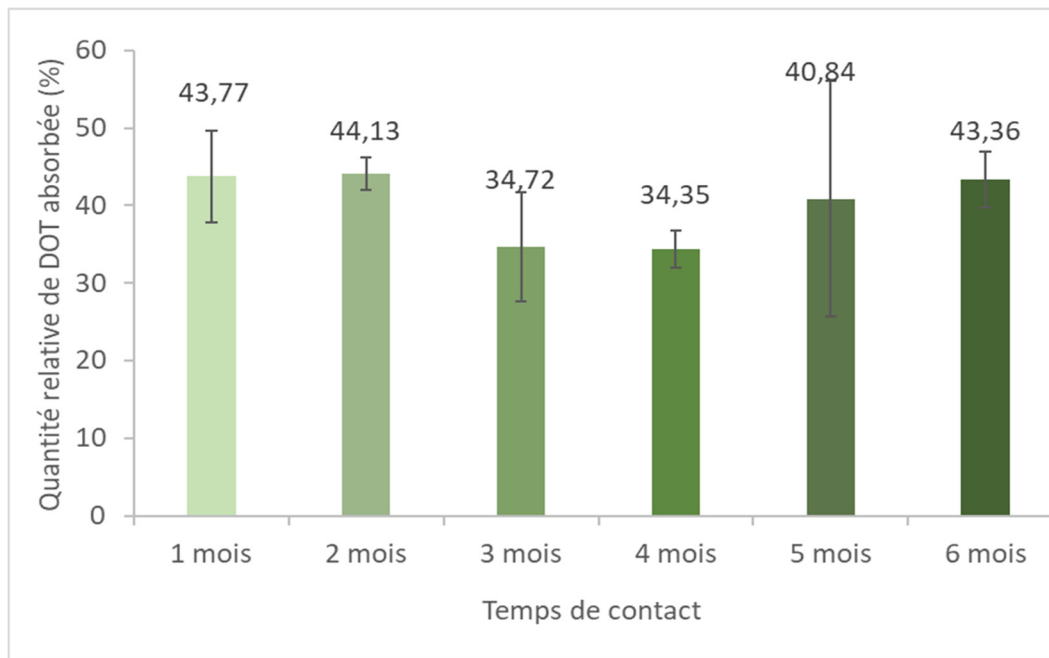


Figure 3-38 Effet du temps de contact sur l'adsorption du DOT par l'argile :
argile rouge - épinette

La diminution de la quantité de DOT sorbée après 3 mois et 4 mois de contact peut être expliquée par le fait que le DOT est très soluble dans l'eau et que les échantillons de 1 mois et 2 mois sont encore humides jusqu'au moment du détachement ce qui favorise la migration du DOT. À l'inverse, les échantillons de 3 mois et 4 mois ont perdu leur humidité au moment du détachement et ont présenté des taches de moisissure au niveau de surface, quelques fissures à l'intérieur de l'échantillon ainsi qu'une manifestation de retrait due à la perte d'humidité autour des 4 arrêts de la moule (Figure 3-39). La perte d'humidité au niveau de la couche d'argile au cours du temps est illustrée par le Tableau 3-29.

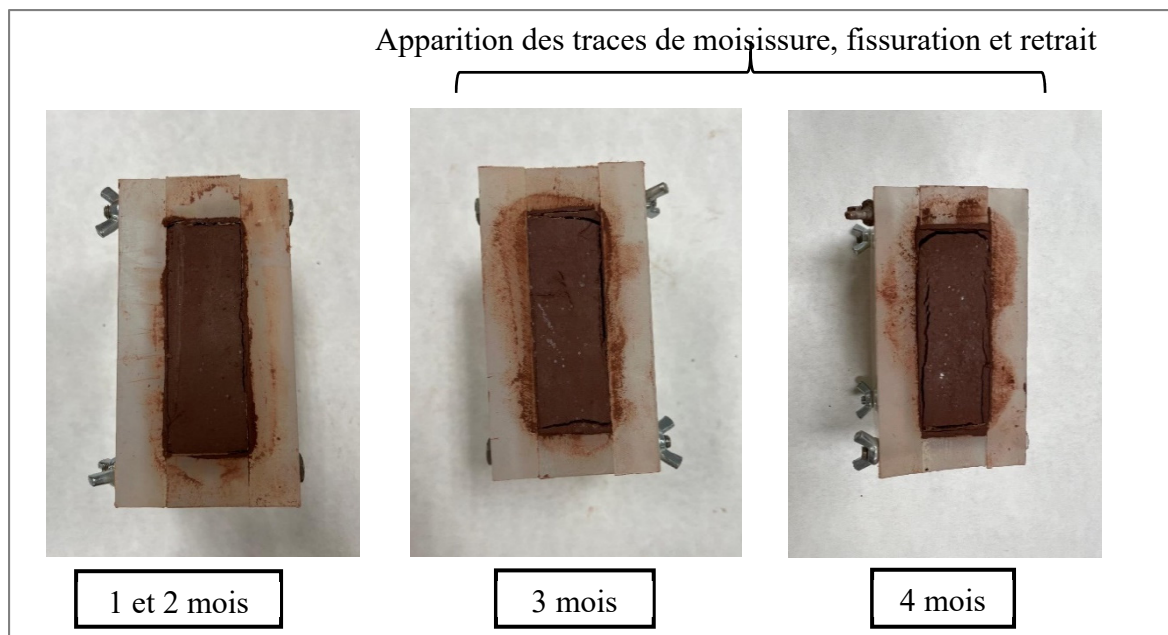


Figure 3-39 Photos de l'état des échantillons au moment de détachement après un temps de contact de 1 mois, 2 mois, 3 mois et 4 mois

Tableau 3-29 Masse d'eau perdue au niveau de la couche d'argile après mise en contact

Temps de contact	Couche d'argile avant mise en contact (g)	Couche d'argile après mise en contact (g)	Masse d'eau perdu (g)
1 mois	268,85	254,07 \pm 0,3	14,78 \pm 2,9
2 mois	268,85	250,93 \pm 1,45	17,91 \pm 2,8
3 mois	268,85	245,93 \pm 0,04	22,92 \pm 0,4
4 mois	268,85	241,96 \pm 2,2	26,89 \pm 2,2
5 mois	268,85	241,13 \pm 3,18	27,73 \pm 3,3
6 mois	268,85	240,38 \pm 2,46	28,47 \pm 4

En calculant les bilans de masse, nous avons remarqué que la somme de la masse de DOT sorbé par l'argile et la masse de DOT restante dépasse la quantité de DOT supposé témoin (222 mg DOT).

Ceci est lié à l'hétérogénéité de traitement d'un échantillon à un autre vu que le DOT n'est pas uniformément réparti sur toute la planche du bois (des différences allant jusqu'à 30 % entre les deux surfaces de bois) et montre que les échantillons de bois utilisé pour le test de stabilité dans le temps présentent des quantités de DOT initiale différent, ce qui influe sur la quantité de DOT sorbée.

De plus, les bilans de masse sont calculés en fonction de la concentration en DOT et la masse des échantillons de bois et d’argile qui varient d’un assemblage à un autre.

3.8.2 Bilan de masse

Au niveau des bilans de masse, il a été supposé que la quantité de DOT initiale représente la somme de la quantité de DOT sorbée par l’argile et restée au niveau du bois après la mise en contact (Figure 3-40).

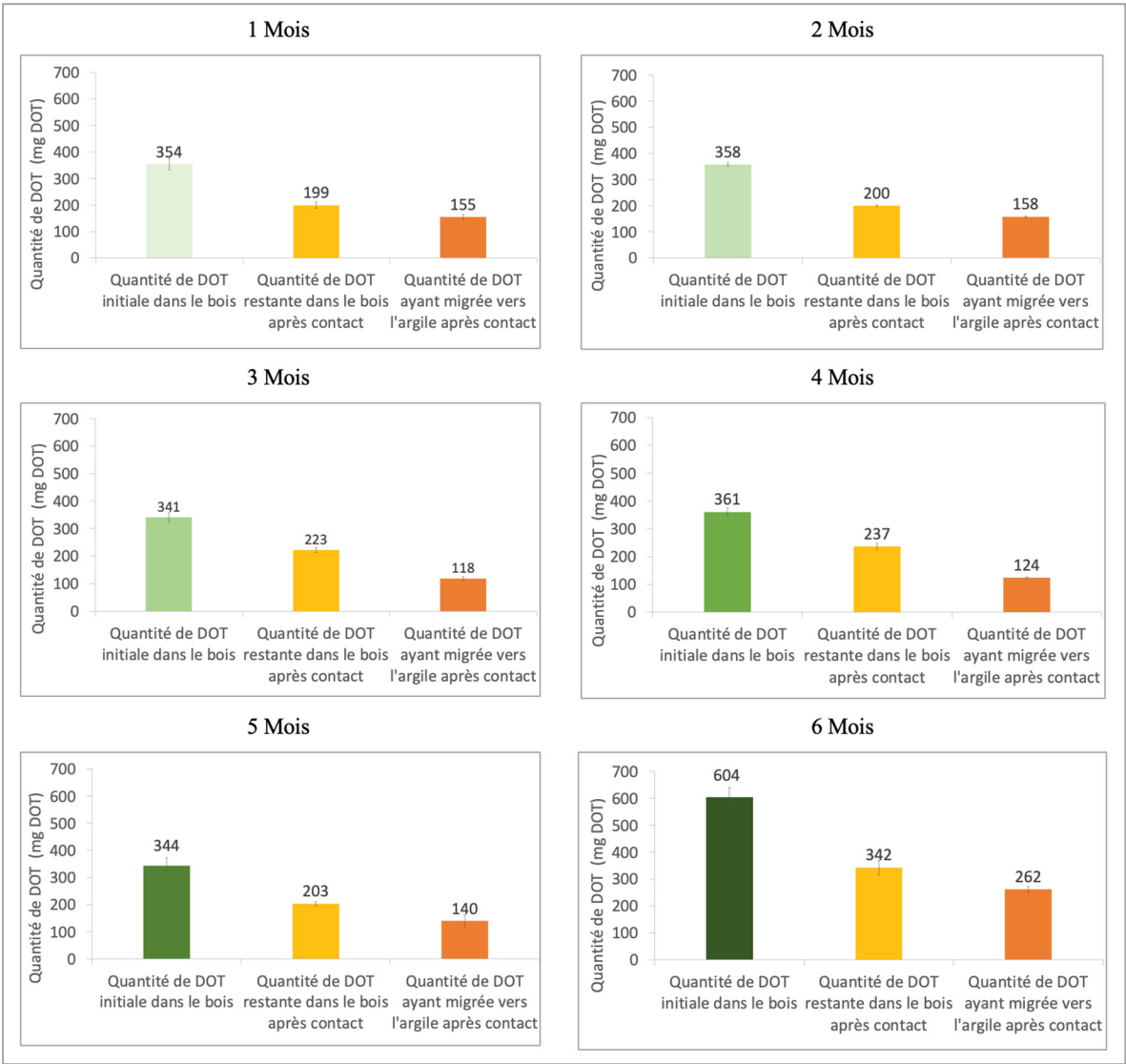


Figure 3-40 Bilan de masse entre 1 et 6 mois : Argile rouge - épinette (9%)

En effet, au fur et à mesure que le temps de contact augmente, l'argile perd plus d'humidité (Figure 3-41). Une partie de la masse d'eau a été sorbée par le bois, qui augmente avec l'augmentation du temps de contact, et le reste représente la masse d'eau évaporée (Figure 3-42).

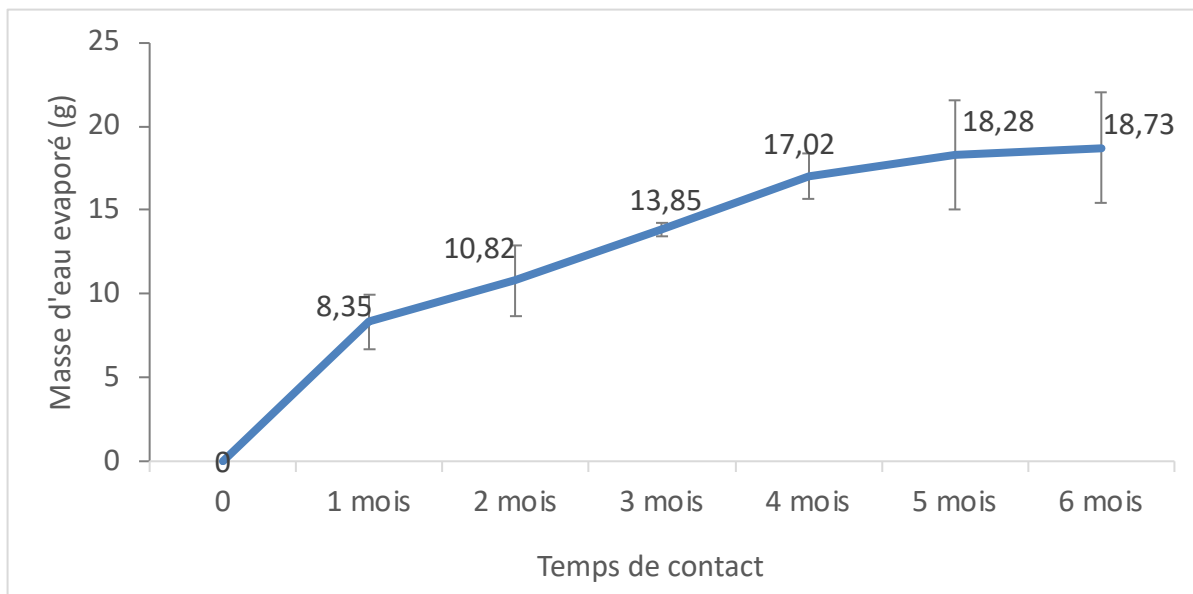


Figure 3-41 Évolution de la masse d'eau évaporée de l'argile au cours du temps

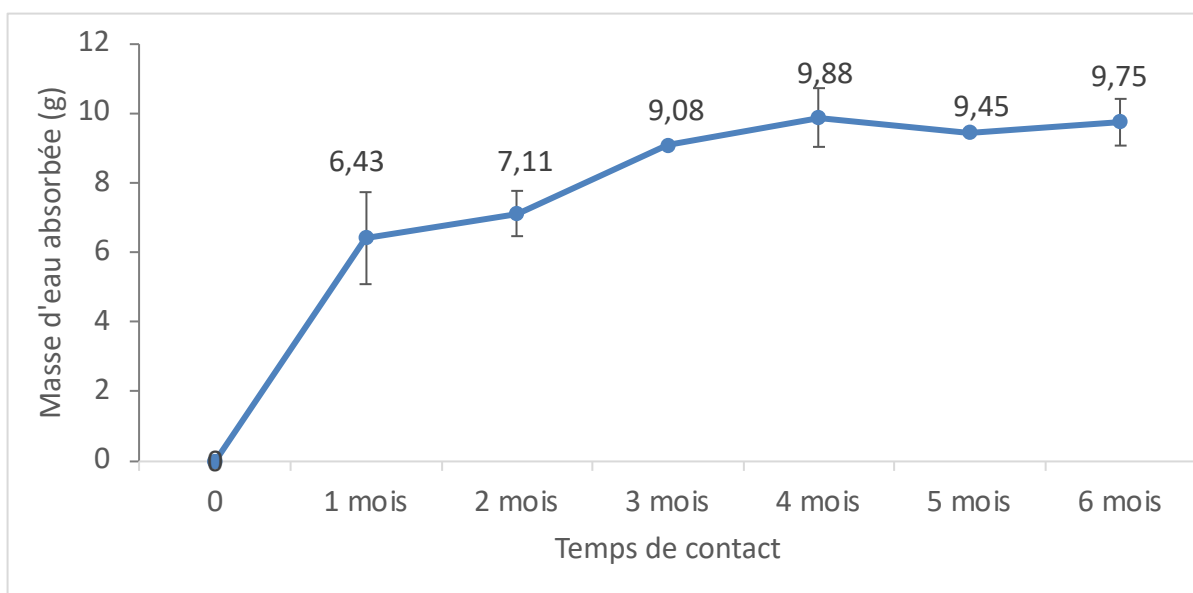


Figure 3-42 Évolution de la masse d'eau sorbée par le bois après la mise en contact avec l'argile

3.9 Résultats de l'infrarouge à transformée de Fourier et de la microscopie à force photo-induite

3.9.1 Infrarouge à transformée de Fourier

Les résultats avec le sapin et épinette non traitées, dopé à 5 % et 10 % d'acide borique est représenté au niveau de la Figure 3-43. Il s'agit d'un test préliminaire pour déterminer la longueur d'onde la plus sensible à l'analyse à laquelle nous pouvons détecter notre produit de traitement qui est le DOT. Nous avons observé une augmentation du signal pour les deux essences de bois à mesure que la concentration en acide borique augmentait. Cette hausse de signal est associée à une longueur d'onde égale 1096 cm^{-1} et c'est pour cette raison que cette longueur d'onde a été utilisée pour réaliser une cartographie chimique par microscopie photo-induite de force.

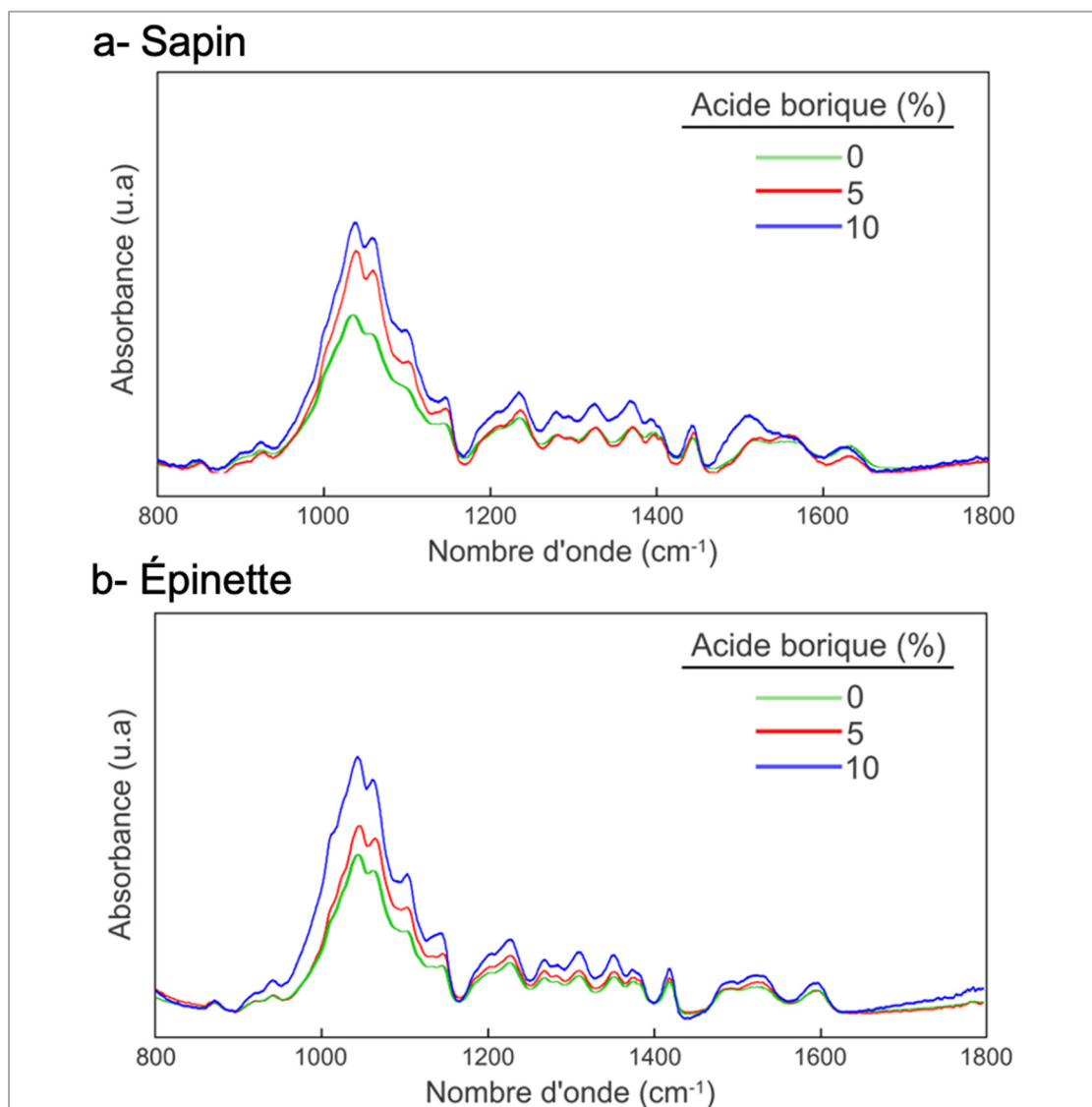


Figure 3-43 Spectres IRTF pour les échantillons de sapin (a) et d'épinette (b) non-traité et dopé avec des solutions de 5% et 10% d'acide borique.

3.9.2 Microscopie à force photo-induite

Le microscope à force photoinduite (MFPI) est capable de détecter simultanément la topographie de l'échantillon et les forces photoinduites. La topographie est enregistrée en mode AFM régulier à l'aide d'une pointe en porte-à-faux. Les faisceaux lumineux laser sont modulés en amplitude pour distinguer les forces photoinduites de toutes les autres forces présentes dans la jonction pointe-échantillon (Jahng et al., 2015). La Figure 3-44 présente la cartographie

chimique obtenue par microscopie photo-induite de force pour les deux essences de bois, épinette et sapin ; trois cartographies ont été réalisées en surface pour le sapin non traité, le sapin traité, le sapin traité au contact de l'argile, de même que pour le cas de l'épinette.

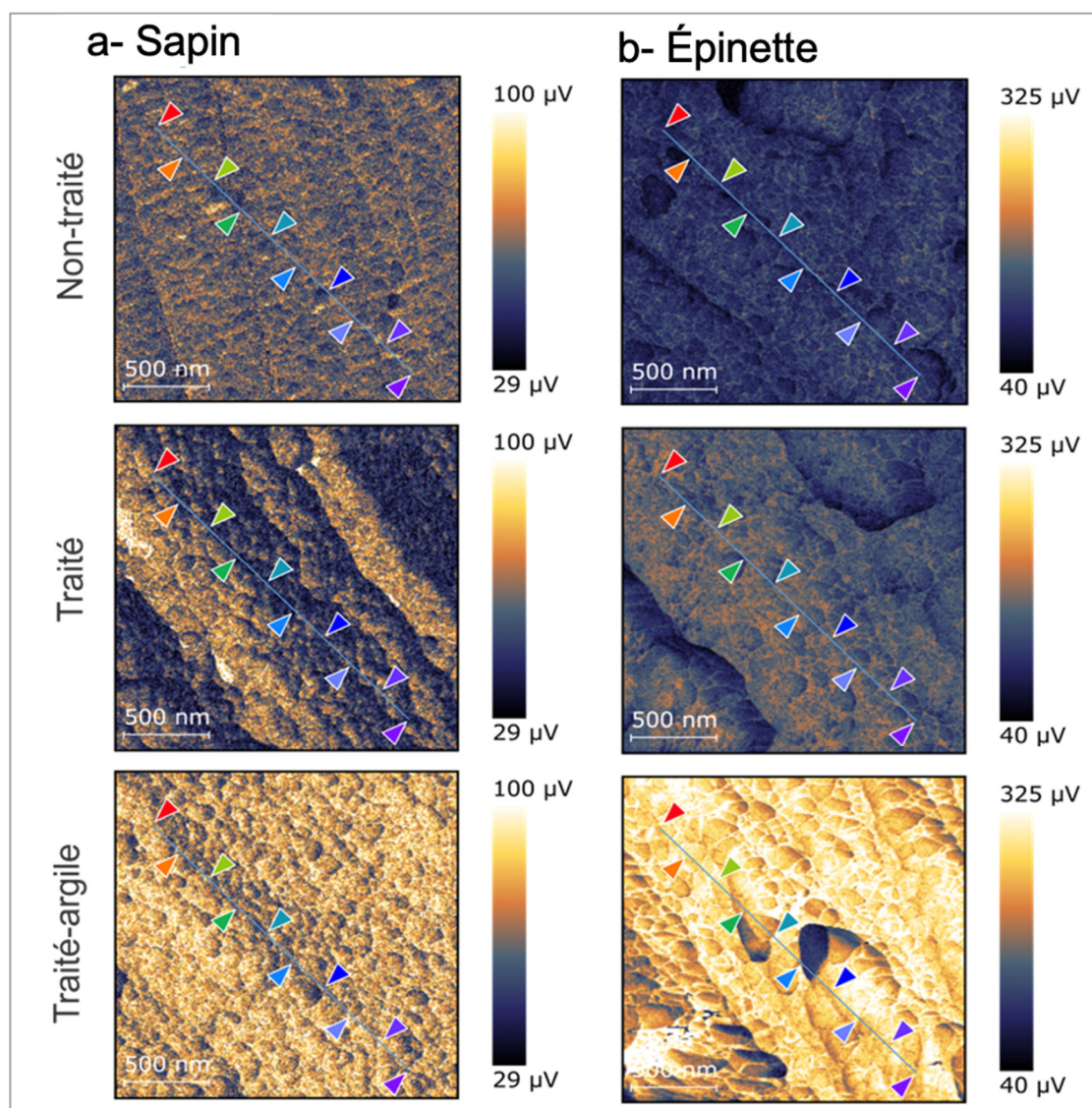


Figure 3-44 Cartographie chimique par MFPi à 1096 cm^{-1} pour les échantillons de sapin (a) et d'épinette (b) non-traité, traité et traité en contact avec l'argile

Sur la base de ces spectres, il y a une légère augmentation de l'intensité du signal pour le sapin en contact avec l'argile par rapport aux deux autres signaux. Les signaux dans le cas du sapin ont sensiblement la même intensité. En effet, il n'a pas été possible de détecter d'augmentation de signal significatif associé au bore dans le sapin traité, c'est-à-dire qu'il n'apparaît pas de

concentration significative en bore (Figure 3-45-a). Dans le cas de l'épinette, nous avons remarqué une augmentation significative de l'intensité des signaux entre les 3 échantillons. Cela signifie qu'en surface, nous avons pu détecter l'existence de bore en cas des échantillons traités comparativement aux échantillons non traités, et nous avons pu détecter encore plus de bore dans le cas d'épinette traitée en contact avec de l'argile. Cela signifie qu'en surface, il était possible de détecter le bore dans les échantillons traités par rapport aux échantillons non traités, et nous avons pu détecter encore plus de bore dans l'épinette traitée qui est entrée en contact avec l'argile. Nous avons remarqué une pique d'intensité entre les échantillons non traités et les échantillons traités et traités en contact avec l'argile associée à une longueur d'onde égale à 1700 cm^{-1} ce qui visualise l'effet de traitement de DOT (augmentation de la concentration de DOT en surface par rapport aux échantillons non traités). L'importance de cette différence d'intensité entre les différents échantillons est plus apparente pour des longueurs d'onde comprises entre 1000 et 1150 cm^{-1} . Une migration de bore à la surface en contact avec l'argile a été manifestée, cela pourrait s'expliquer par le fait que le contact avec l'argile provoque une déshydratation du bois provoquant un mouvement de l'eau, et les ions de bore sont transportés et accumulés à la surface de contact. (Figure 3-45-b). Les borates présentent une diffusibilité naturelle et une sensibilité au lessivage importante prouvées par de nombreux chercheurs (Brischke & Alfredsen, 2020; Kartal, 2010; Obanda et al., 2008).

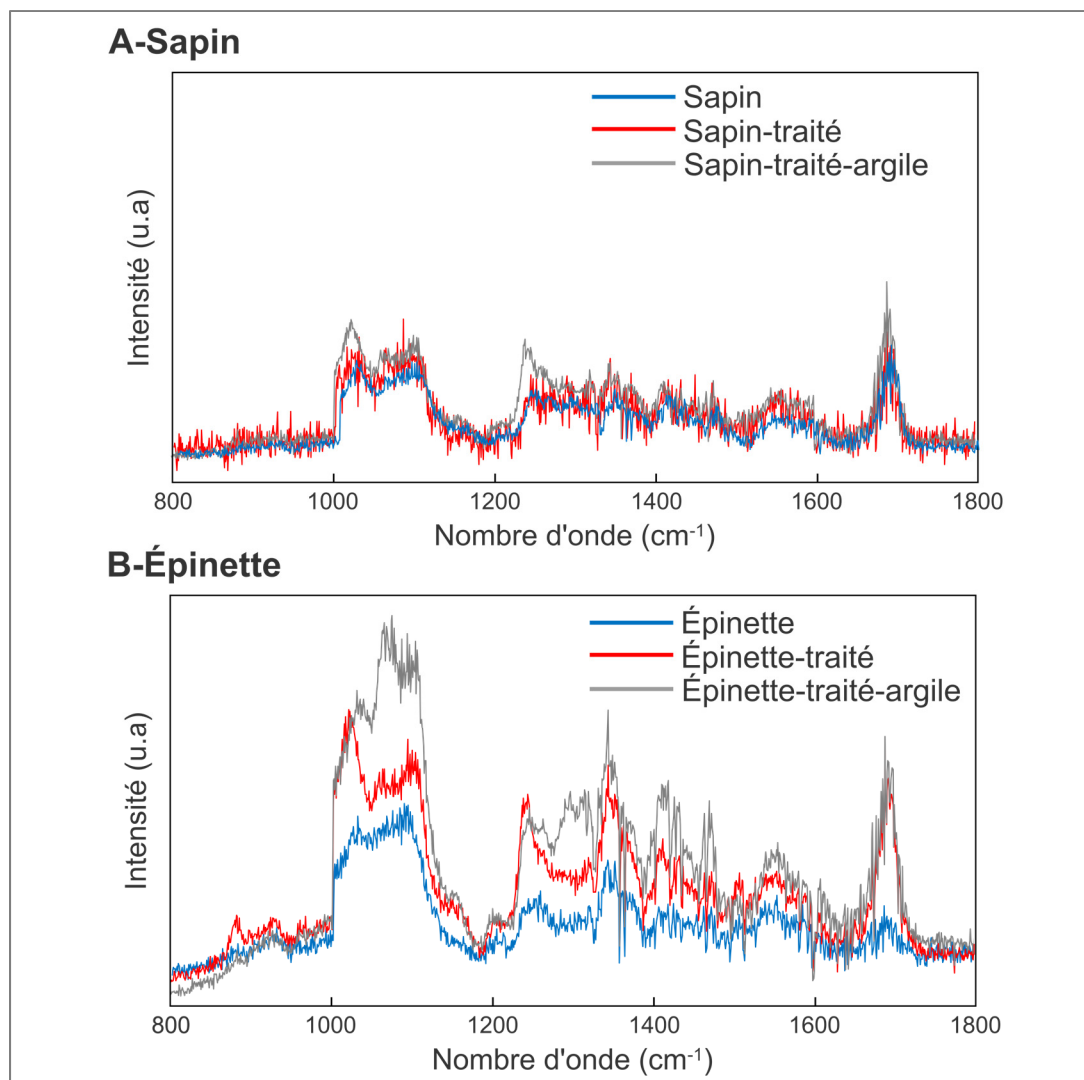


Figure 3-45 Spectres MFPi moyennés pour les échantillons de sapin (a) et d'épinette (b) non traité, traité et traité en contact avec l'argile

Le MFPi combine la haute résolution spatiale du microscope AFM avec les capacités analytiques fournies par la spectroscopie optique. Depuis son avènement en 2010, le MFPi a démontré son applicabilité dans de nombreux domaines différents, mais ses atouts particuliers dans la caractérisation de la chimie locale de la surface ont commencé à être exploités au cours des deux dernières années (Davies-Jones & Davies, 2022). Dans le domaine de la science et de la technologie de bois, l'étude des coupes ultrafines au microtome d'épinette de Norvège par Kesari et al. démontre le potentiel de MFPi à visualiser la composition chimique des parois cellulaires (Kesari et al., 2021). En utilisant des bandes vibrationnelles à 1505, 1471, 1220 et

1145 cm^{-1} , la distribution de la lignine et de la cellulose a été cartographiée à travers les parois cellulaires. Des concentrations élevées de lignine ont été trouvées dans les zones de la lamelle moyenne composée (CML) et de la lamelle moyenne du coin cellulaire (CCML) de la paroi cellulaire. En cas de MFPI, il existe peu des données trouvées caractérisant la composition chimique de la paroi cellulaire du bois dans la littérature comparativement aux autres techniques de cartographie.

Parmi ces techniques, il y a la microscopie infrarouge à force maximale (PFIR) qui, grâce à sa haute résolution spatiale de manière non destructive, présente plusieurs avantages pratiques dans le domaine de la caractérisation du bois : préparation simple des échantillons, insensibilité à la fluorescence par rapport, par exemple, à la microscopie Raman, un rapport signal/bruit élevé, et pas besoin d'étapes de coloration (Gusenbauer et al., 2020), on trouve également la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) qui a prouvé sa capacité à inspecter rapidement et simplement les propriétés physiques telles que la densité (Fujimoto et al., 2012; Santos et al., 2012), la teneur en humidité (Watanabe et al., 2011) ainsi que la composition chimique (He & Hu, 2013; Silva et al., 2013) des bois lorsque nous utilisons des bois comme bois d'œuvre.

3.10 Résultats de potentiel zêta

La taille moyenne des particules des différents échantillons, argile rouge, argile beige, argile rouge + DOT et argile beige + DOT sont illustrés par le Tableau 3-30. Ces résultats ont été introduits au niveau de logiciel « BIC Zeta potentiel » accompagnés par la concentration en particule (1g/L) et le pH de chaque solution pour la détermination de potentiel zêta. Le Tableau 3-31 présente la valeur moyenne des potentiels zêtas obtenus pour chaque échantillon.

Tableau 3-30 Taille moyenne des particules des solutions testés

Échantillons	Concentration (g/l)	Taille moyenne des particules (nm)	Écart type
Argile rouge	1	1074	19
Argile rouge + DOT	1	924	194
Argile beige	1	991	30
Argile beige + DOT	1	951	63

Tableau 3-31 Potentiel zêta obtenu pour chaque échantillon

Échantillons	pH	Potentiel zêta (mv)	Écart type
Argile rouge	7,04	-17	2,52
Argile rouge + DOT	8,45	-40	5,03
Argile beige	7,12	-19	1,11
Argile beige + DOT	8,44	-37	4,56

À partir des résultats présentés au niveau du Tableau 3-31, l'argile rouge et beige dans l'eau produisent des potentiels zêtas négatifs pour un pH neutre (-17 et -19 respectivement mV), ceci dépend fortement de la composition minéralogique de ces deux argiles ou il y a une dominance en quartz accompagnés de kaolinite et illites. Ces derniers produisent des potentiels ζ négatifs dans la gamme de pH varie de 3 à 11 (Kaya & Yukselen, 2005).

Nous avons comparé les valeurs du potentiel zêta avant et après le processus d'adsorption. L'adsorption d'ions de borate a provoqué le changement du potentiel zêta des particules d'argile. Le potentiel zêta est devenu plus négatif. Le potentiel zeta est passé de -17 à -40 mV et de -19 à -37 mV pour l'argile rouge et beige respectivement. Lorsque le potentiel zêta s'éloignent de zéro, les forces inter-particulaires augmentent. Les forces répulsives deviennent alors prépondérantes et les particules se désagrègent. La sorption du bore à la surface de l'argile rouge et beige entraîne une augmentation des charges négatives à la surface des particules.

Cette augmentation de potentiel zêta peut être due au changement de pH qui passe d'un pH neutre à un pH basique égale à 8,45 et 8,44 pour le cas d'argile rouge et beige respectivement à la suite de l'ajout de DOT. L'influence du pH sur le potentiel zêta des minéraux argileux est constatée par plusieurs études (Kaya & Yukselen, 2005; Marsalek, 2012). En général, on peut dire que les ions d'hydrogène et les ions hydroxyliques sont facilement adsorbés à la surface des articles. L'adsorption d'ions H^+ sur les surfaces minérales comprime la double couche électrique diffuse et entraîne des valeurs plus faibles pour le potentiel zêta. L'adsorption des ions OH^- sur les surfaces minérales entraîne une grande double couche électrique diffuse, ce qui se traduit par une valeur plus élevée du potentiel zêta (Chorom & Rengasamy, 1995; Yukselen & Kaya, 2003).

CHAPITRE 4

DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1 Caractérisation des argiles

Les paramètres physiques étudiés dans ce mémoire visent à caractériser et à catégoriser le matériau d'un point de vue géotechnique. Une caractérisation plus complète tenant compte de la variété et de la complexité des matériaux en terre (par exemple, des informations spécifiques sur l'origine pédologique ou géologique des matériaux en terre) devrait être prise en compte dans l'évaluation de leur aptitude en tant que matériau de construction.

La caractérisation physique des deux types d'argile utilisés dans ce travail a été révélatrice, l'argile beige et l'argile rouge sont composées à plus de 77 % du minéral le plus commun sur terre, le quartz. Ce minéral n'est pas connu pour avoir une capacité d'adsorption importante. D'après des études réalisées auparavant, ces argiles ont le potentiel d'être utilisées comme adsorbants pour remplacer des matériaux plus coûteux en raison de leur disponibilité facile et de leur faible coût (Alvarez Acevedo et al., 2017; Hyoumbi et al., 2018).

Les limites de liquidité et de plasticité des deux argiles utilisées dans cette étude ressemblent à plusieurs résultats antérieurs pour les matériaux en terre, en particulier pour le cas de CEB et adobe (Aubert et al., 2022). D'après les travaux antérieurs, l'argile rouge et beige dont les indices de plasticité sont inférieurs ou égaux à 18 % ont un potentiel de gonflement faible (Chen, 1975; Snethen, 1980). Ce paramètre de plasticité permet de dire que l'argile beige et l'argile rouge sont des argiles à choisir s'il fallait faire du béton dans le domaine de construction afin d'éviter tout risque d'instabilité de la structure construite pour durer dans le temps.

4.2 Effet du temps, de l'humidité et du sens de migration sur la sorption de DOT dans l'argile

Les Tableaux 4-1 et 4-2 illustrent la quantité de DOT sorbée par les deux types d'argile versus la quantité de DOT totale restante au niveau des échantillons de bois à 9 % et à 19 % d'humidité. Les quantités en pourcentage sont calculées relativement à la quantité de DOT initialement présente dans les échantillons de bois à 9 % et à 19 % d'humidité.

À partir des résultats obtenus lors des essais en fonction du temps et de l'humidité, nous avons remarqué une différence d'adsorption de DOT entre l'argile rouge et l'argile beige pour le cas de contact avec le sapin alors que ce n'est pas le cas pour l'épinette (presque même quantité sorbée). Des essais réalisés pendant 6 mois pour le cas d'épinette-argile rouge ont montré que, relativement à la quantité de DOT initialement présente, la quantité de DOT sorbée se stabilise dans le temps en comparant les échantillons d'un mois et de 6 mois. Cette quantité est d'environ 44 %.

Tableau 4-1 Tableau récapitulatif de la quantité de DOT sorbée par l'argile versus la quantité de DOT totale restante au niveau du bois à une humidité de 9 %

Essence de bois	Argile	Dans l'argile				Dans le bois			
		24 heures		1 semaine		24 heures		1 semaine	
		↗ (%)	↗ (mg DOT)	↗ (%)	↗ (mg DOT)	↘ (%)	↘ (mg DOT)	↘ (%)	↘ (mg DOT)
Sapin	Rouge	31,8	79	35,8	89	66,5	165	62,1	154
Sapin	Beige	26,2	65	33,1	82	72,6	180	66,1	164
Épinette	Rouge	28,4	63	38,3	85	69,4	154	60	133
Épinette	Beige	26,6	59	38,7	86	69,4	154	60,8	135

Tableau 4-2 Tableau récapitulatif de la quantité de DOT sorbée par l'argile versus la quantité de DOT totale restante au niveau du bois à une humidité de 19 %

Essence de bois	Argile	Dans l'argile				Dans le bois			
		24 heures		1 semaine		24 heures		1 semaine	
		↗ (%)	↗ (mg DOT)	↗ (%)	↗ (mg DOT)	↘ (%)	↘ (mg DOT)	↘ (%)	↘ (mg DOT)
Sapin	Rouge	29,8	68	31,1	71	66,7	152	60,9	139
Sapin	Beige	22,8	52	28,1	64	75,8	173	69,7	159
Épinette	Rouge	14,9	28	29,3	55	75,5	142	67	126
Épinette	Beige	16,5	31	31,9	60	82,4	155	70,2	132

Le Tableau 4-3 résume la quantité totale sorbée en mg de DOT pour les deux types d'argile après le contact avec le bois en fonction du sens de migration, ces 3 sens sont définis dans la partie méthodologie ; une semaine est le temps de contact testé pour les 3 configurations. Nous pouvons constater qu'il n'y a pas de différence significative de la quantité de DOT sorbée par les deux types d'argile pour un même sens de migration en ce qui concerne les deux essences, épinette et sapin.

Tableau 4-3 Tableau récapitulatif de la quantité de DOT sorbée par les deux types d'argile selon les 3 sens de migration

Essence de bois	Type d'argile	Sens de migration	Quantité de DOT totale sorbée (mg DOT)
Sapin	Argile rouge	Vertical	90
		Latéral	61
		Gravitationnel	58
	Argile beige	Vertical	82
		Latéral	66
		Gravitationnel	53
Épinette	Argile rouge	Vertical	85
		Latéral	78
		Gravitationnel	77
	Argile beige	Vertical	86
		Latéral	71
		Gravitationnel	88

À partir de la caractérisation physique réalisée, les deux argiles présentent presque la même composition minéralogique ainsi qu'une surface spécifique presque semblable et un potentiel de gonflement faible (Chen, 1975; Snethen, 1980). Leurs limites d'Atterberg se situent dans l'intervalle des limites recommandées pour la construction en blocs de terre et pour les adobes en se basant sur des travaux antérieurs (Aubert et al., 2022), ce qui signifie que cette différence de sorption dans le cas du sapin peut être liée à l'hétérogénéité de traitement de DOT d'un échantillon de bois à un autre.

Lors de conditionnement, la grande solubilité des borates vis-à-vis de l'eau peut être à l'origine de la variation de la quantité de DOT initiale au niveau des échantillons à 9 % et à 19 % d'humidité. Plusieurs études ont montré que la diffusibilité naturelle des borates et leur sensibilité au lessivage les rendent incapables de protéger parfaitement le bois et qu'ils ne sont pas recommandés pour une utilisation en classe d'emplois n° 3 (au-dessus du sol) ou n° 4 (contact au sol) (Baysal et al., 2006; Kartal, 2010; Obanda et al., 2008). C'est pour cela que de nombreuses recherches antérieures ont développé plusieurs dispositifs de fixation pour limiter la lixiviation du bore, en utilisant des formations de préservation supplémentaire, par exemple, l'utilisation de l'éthanolamine (Lesar et al., 2008), l'utilisation des agents hydrofuges (polyéthylène glycol-400) (Baysal et al., 2006), ainsi que leur transformation en des sels résistant à l'eau tels que le tetraphénylborate de sodium et l'acide phénylboronique (Deveci et al., 2017).

En plus, le bois est un matériau poreux et hygroscopique. Il peut absorber de l'eau sous forme liquide et gazeuse et l'eau est libérée du bois par évaporation en suivant un gradient de pression de vapeur d'eau (Brischke & Alfredsen, 2020). Par conséquent, grâce à l'eau libre présente dans le bois, les borates sont capables de se diffuser dans le bois. Toutefois, ils peuvent s'échapper du bois lorsque celui-ci est soumis à des environnements aqueux, ce qui explique son sorption par les argiles.

L'absence de montmorillonites et de smectites dans la composition minéralogique et l'abondance de quartz, de kaolinite et de l'illite pour les deux types d'argile peuvent limiter leur pouvoir absorbant vis-à-vis du DOT. La kaolinite présente le plus faible pouvoir absorbant

comparativement aux autres minéraux argileux (montmorillonites, smectites, etc.) (Barrier-Battut, I., 2018). En effet, elle présente une capacité d'échange cationique (CEC) qui ne dépasse pas 15 milliéquivalent/100 g. Cependant, les illites et les chlorites ont une CEC comprise entre 10-40 milliéquivalent/100 g. Ces valeurs peuvent atteindre 150 milliéquivalent/100g pour le cas des vermiculites et des smectites (Hernot, 2016). Donc il est suggéré d'utiliser ces deux types d'argile rouge et beige dans les constructions en bois traité comparativement à des argiles composées de minéraux ayant une capacité absorbante élevée.

4.3 Effet du temps et du pourcentage d'humidité sur la migration de DOT dans le bois

Les résultats obtenus lors des essais sur l'effet du temps et du pourcentage d'humidité permettent d'observer que, pour une humidité de 19 %, l'épinette est plus performante que le sapin et plus apte à maintenir la durabilité conférée par l'octaborate disodique tétrahydrate (DOT), après avoir été mise en contact avec l'argile beige et rouge. Ceci peut être relié à la force d'adhérence entre le bois et le produit de traitement ; cette force est relativement faible pour les espèces de bois tendre (épinette, sapin) alors qu'elle est plus élevée pour les bois durs. De nombreux facteurs, tels que l'intensité, la structure cellulaire, les constituants du bois primaire et secondaire, la texture et les matériaux extractifs, peuvent être à l'origine de cette variation entre les essences (Kaygin & Akgun, 2008). Dans leur étude, Sonmez, Budakci et Bayram ont montré que l'humidité croissante diminue la force d'adhérence chimique et spécifique (Sonmez et al., 2009). Selon l'Association forestière du sud du Québec, l'épinette est plus robuste et adaptée aux conditions extrêmes et elle croît bien, particulièrement dans des sols loam argileux frais et bien drainés, à humidité moyenne. Quant au sapin, il croît bien dans des sols graveleux à sableux et constamment humides (Association forestière du sud du Québec, 2022). Cependant, cette différence de quantité de DOT dispersée entre le sapin et l'épinette n'est pas significative puisque ce n'est qu'une question de quelques mg de DOT. Par conséquent, comparer les deux essences est un peu difficile étant donné qu'elles appartiennent toutes les deux à la même famille de composés résineux et qu'elles ont des propriétés remarquablement similaires. L'hétérogénéité du traitement de DOT au niveau du bois ainsi

que les écarts types qui s'entrecroisent parfois peuvent conduire également à des incertitudes de mesure au niveau des résultats obtenus.

De plus, avec l'augmentation du temps de contact, et pour une même humidité de bois, si la quantité de DOT dissipée est plus importante, ceci peut être relié à la quantité d'eau absorbée par le bois, puisque celle-ci favorise et augmente davantage la diffusibilité de DOT. Pour les différentes essences de bois, feuillus ou résineux, la masse d'eau absorbée augmente proportionnellement avec la racine carrée du temps (Johansson & Salin, 2011; Sedighi-Gilani et al., 2014). Ceci peut être relié également à l'hétérogénéité de traitement et à la quantité de DOT initialement présente.

À partir des résultats obtenus par la microscopie à force photo-induite, nous n'avons pas pu détecter, de façon statistiquement significative, la présence de bore dans le sapin alors que les résultats pour l'épinette nous ont permis d'identifier le mécanisme de fonctionnement de l'argile sur le bois. Ceci est probablement causé par la grande variabilité de la concentration de DOT dans le sapin tel qu'observé en ICP.

CONCLUSION

La construction de bâtiments en terre crue est une technique ancienne qui connaît un nouvel essor aujourd'hui dans le monde, mais elle doit rencontrer un certain nombre de standards. Les constructions en terre crue, à ossature de bois, doivent avoir une capacité portante bien déterminée. De plus, le bois étant un matériau structural utilisé pour l'extérieur, il doit posséder des propriétés physiques, biologiques et mécaniques élevées. En outre, afin de protéger les structures en bois des insectes et des attaques fongiques, des agents de conservation doivent être appliqués et ce, depuis fort longtemps.

Ce travail a pour objectif principal l'établissement d'un protocole expérimental permettant d'étudier la capacité du bois à maintenir un produit de traitement lorsque celui-ci est en contact direct avec l'argile dans des conditions environnementales changeantes (ex. : température et humidité) et en fonction du temps de contact et du sens d'application de l'argile. Notre méthodologie consiste à mettre en contact une pâte d'argile formulée au laboratoire avec un ratio E/A de 0,25 en contact direct avec du bois traité avec l'octaborate disodique tétrahydraté (DOT). Après un temps de contact, les deux matériaux, argile et bois, ont été analysés à l'aide de l'ICP (spectrométrie à plasma à couplage inductif) et la quantité de DOT absorbée a été déterminée.

Cette étude a permis, d'une part, de dégager des conclusions sur les caractéristiques physiques de l'argile et les propriétés microscopiques du bois traités en contact avec l'argile et, d'autre part, de mettre en évidence l'adsorption de DOT par les deux types d'argile, rouge et beige.

Les résultats montrent un profil de migration DOT décroissant dans l'argile (rouge et beige) depuis la zone directement en contact avec le bois vers la surface en fonction du temps. Lorsqu'un contact dure plus de deux mois, ce profil disparaît généralement. L'expérience à long terme a montré que la quantité de DOT sorbée a tendance à se stabiliser dans le temps, quelle que soit la concentration initiale de DOT. Cette sorption est d'environ 44 %. Donc, pour une protection efficace de bois, il est préférable de prévoir un traitement supplémentaire

d'environ 40 % de DOT pour une utilisation dans une construction en bois-argile. Les résultats basés sur l'humidité montrent que l'humidité initiale de bois n'a pas d'impact appréciable sur la quantité de DOT sorbée par l'argile.

La comparaison entre les deux types d'argile a révélé que l'argile rouge a une sorption plus importante que l'argile beige dans le cas du sapin alors qu'une sorption quasi identique dans le cas de l'épinette. Ceci peut être due à la grande variabilité de concentration en DOT constatée dans le cas de sapin vu que les deux argiles présentent presque les mêmes caractéristiques physiques.

De point de vue de sens de migration, la quantité de DOT sorbée par l'argile (rouge ou beige) dans le sens vertical (du bas (bois) vers le haut (argile)) est plus importante que dans les sens gravitationnel (du haut (bois) vers le bas (argile)) et latéral (de la gauche (bois) vers la droite (argile)). Cette constatation est plus prononcée dans le cas du sapin, mais cela peut dépendre de la quantité de DOT initialement présente.

La comparaison entre les deux essences de bois a révélé que le sapin diffuse plus de DOT que l'épinette dans la majorité des assemblages, mais cela ne peut être définitivement confirmé en raison de la non-uniformité de traitement de DOT et de la grande variabilité des mesures notée, surtout dans le cas du sapin pour les résultats de l'ICP et du MFPI.

Sur la base des résultats obtenus durant cette étude, les argiles montrent une capacité de sorption vis-à-vis du produit de traitement du bois (DOT), mais cette capacité dépend fortement de la concentration du produit de traitement du bois, du temps de contact et des conditions environnementales.

RECOMMANDATIONS

À la lumière de cette étude, plusieurs pistes de recherches complémentaires sont proposées.

- Des mesures sur l'isotherme d'adsorption du DOT sur les deux types d'argiles sont souhaitables. Elles n'ont pas pu être réalisées suite à des enjeux de disponibilité de personnel et des équipements, suite à la réouverture des laboratoires après la pandémie. Les mécanismes de sorption doivent être mieux identifiés.
- Des analyses complémentaires telles que l'analyse de la microstructure par microscopie électronique à balayage (MEB) et par microscopie électronique à transmission (MET) sont nécessaires afin de révéler l'effet de la mise en contact du bois traité-argile sur la microstructure des deux matériaux. Le bore est par contre un élément très léger et il n'est pas possible de le détecter aux concentrations utilisées pour le traitement du bois.
- Des essais de diffraction à petits angles pourraient être réalisés sur des composés argileux purs pour comprendre les mécanismes d'adsorption liés la microstructure de l'argile.
- Les mêmes essais que ceux qui ont été réalisés durant cette étude pourraient être refaits en utilisant de la terre crue (mélange d'agrégats, argile, sable, silt) au lieu des argiles purs afin d'être plus proches de la réalité
- Une étude plus approfondie pourrait s'intéresser à l'effet de l'humidité initiale de bois sur la concentration de produit de traitement au sein du bois. Pour ce faire, un essai de conditionnement à différentes concentrations d'humidité pourrait être mené en utilisant des échantillons de bois présentant les mêmes concentrations de produit de traitement.
- L'effet de l'humidité atmosphérique sur la migration du DOT pourrait être étudié.

ANNEXE I

CONDITIONNEMENT DU BOIS PAR SOLUTION SALINE SATURÉE

Des solutions salines/eau saturées peuvent être utilisées pour maintenir des valeurs particulières d'humidité relative à l'intérieur de conteneurs scellés selon la norme ASTM E104. Une solution saline saturée est un mélange boueux à base d'eau distillée et d'un sel chimiquement pur. Dans notre cas, pour 90 % d'humidité relative, une solution saturée de nitrate de potassium a été utilisée et mise dans un petit récipient (comme un moule en verre) au fond de la glacière et nous avons laissé l'air à l'intérieur de la glacière atteindre l'équilibre. Les échantillons de bois ont été placés par-dessus à l'aide d'une grille en plastique qui est monté dans la glacière (Figure-A I-1).



Figure-A I-1 : mise en place des échantillons de bois dans le récipient hermétique

L'humidité et la température d'équilibre ont été mesurées à l'aide d'un thermohygromètre (Figure-A I-2).



Figure-A I-2 : Thermohygromètre
de type HH414

La solution saturée de nitrate de potassium permet de fournir des conditions d'équilibre bien définie : $T = 21 - 22\text{ C}^\circ$ ET une $HR=85\%$ et nous a permis de conditionner le bois à une $HR=18,5\%$.

Tableau-A I-1 : Conditionnement de bois par solution saline : réplication 1

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 8	Jour 9	Jour 10
Masse initiale (g)	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69
Masse après chambre humide (g)	13,69	15,59	15,99	16,15	16,16	16,20	16,21	16,21
Taux d'humidité (%)	0	13,88	16,80	17,97	18,04	18,33	18,41	18,41

Tableau-A I-2 : Conditionnement de bois par solution saline : réplication 2

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 8	Jour 9	Jour 10
Masse initiale (g)	13,62	13,62	13,62	13,62	13,62	13,62	13,62	13,62
Masse après chambre humide (g)	13,62	15,52	15,9	16,05	16,07	16,09	16,11	16,11
Taux d'humidité (%)	0	14,02	16,74	17,84	17,99	18,14	18,28	18,28

Tableau-A I-3 : Conditionnement de bois par solution saline : réplication 3

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 8	Jour 9	Jour 10
Masse initiale (g)	13,58	13,58	13,58	13,58	13,58	13,58	13,58	13,58
Masse après chambre humide (g)	13,58	15,46	15,88	16,03	16,05	16,07	16,09	16,09
Taux d'humidité (%)	0	13,84	16,94	18,04	18,19	18,34	18,48	18,48

Tableau-A I-4 : Variation moyenne de masse et d'humidité lors de conditionnement

Variation moyenne de masse	13,63	15,52	15,92	16,07	16,09	16,12	16,13	16,13
Écart type	0,055	0,065	0,058	0,064	0,058	0,07	0,064	0,064
Variation moyenne d'humidité	0	13,91	16,82	17,95	18,07	18,26	18,39	18,39
Écart type	0	0,095	0,100	0,101	0,103	0,115	0,101	0,101
Variation du temps (Heures)	0	19	46	75	90	160	195	214
Variation du temps (J)	0	0,8	1,9	3,1	3,8	6,7	8,1	8,9

Les résultats présentés au niveau de la Figure-A I-3 et la Figure-A I-4 montrent la variation moyenne de masse des échantillons jusqu'à stabilisation ce qui indique l'obtention de l'humidité d'équilibre souhaité.

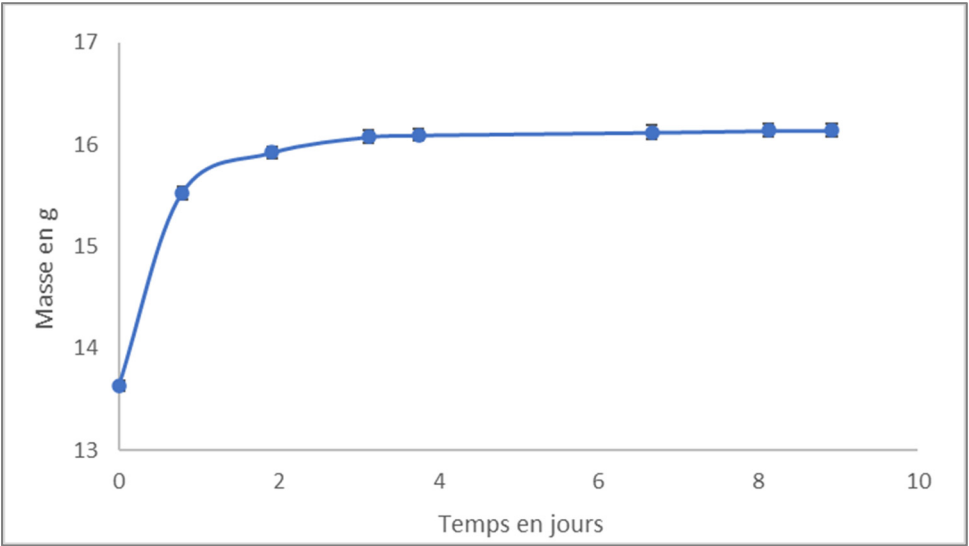


Figure-A I-3 : Variation moyenne de masse lors de conditionnement avec la solution saline (KNO₃)

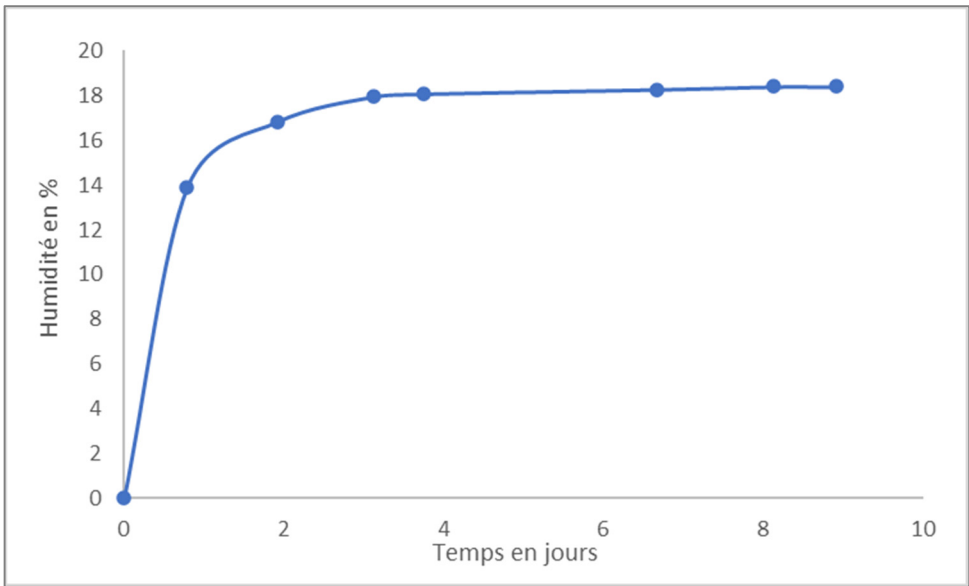


Figure-A I-4 : Variation moyenne de masse lors de conditionnement avec la solution saline (KNO₃)

ANNEXE II

IMAGERIE PRISE PAR LA MICROSCOPIE À TABLE POUR LES ÉCHANTILLONS D'ARGILE ET RÉSULTATS EDS

Le TM3000 est un microscope de table fonctionnant selon le principe de l'observation à faible vide, dans lequel un faisceau d'électrons étroitement focalisés est dirigé sur l'échantillon, les électrons rétrodiffusés résultants sont détectés et de minuscules parties de l'échantillon sont agrandies pour être observées. Le TM3000 représente des améliorations considérables en termes de performance et de fonctionnalité par rapport au modèle précédent, le TM-1000, offrant un système de haute performance vraiment facile à utiliser (Figure-A II-1).



Figure-A II-1 : Microscope à table TM3000

Tout d'abord, le talon de l'éprouvette est placé sur la jauge de hauteur de l'éprouvette pour régler sa hauteur. Puis l'ensemble de bouts d'échantillon de l'argile sera inséré, avec sa hauteur déjà ajustée, solidement dans la base du support pour la platine jusqu'à ce qu'il s'arrête. Par la suite la platine porte-échantillon est insérée progressivement tout en vérifiant que l'échantillon ne touche pas l'avant de la chambre d'échantillon (Figure-A II-2).

Tout en maintenant doucement la platine de l'échantillon, nous avons appuyé sur le commutateur EVAC/AIR pour procéder à l'évacuation. La LED EVAC (bleue) clignotera. Lorsque le processus d'évacuation est terminé, la LED EVAC (bleue) passe du clignotement à un état fixe.

Ensuite, le mode d'affichage et la condition d'observation seront définis ainsi que le réglage de luminosité/contraste d'image sera établi. Une fois le champ de vision d'observation est sélectionné, l'analyse EDS sera lancée et les données seront enregistrées.

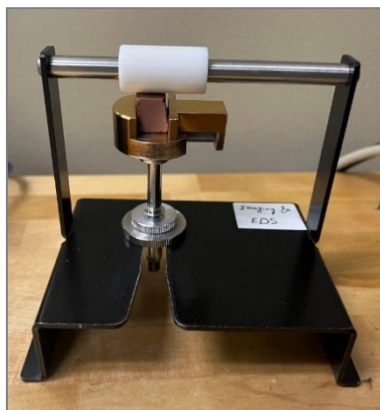


Figure-A II-2 : Mise en place de l'échantillon dans la porte-échantillon et ajustement de la hauteur

- **Microscopie de la surface en contact direct avec le bois (Coupe longitudinale)**

La spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) permet une analyse élémentaire et chimique d'un échantillon à l'intérieur d'un microscope électronique. Les figures montrent 3 images prises de la coupe longitudinale d'un échantillon d'argile ainsi que l'analyse EDS associée à chaque image (Figure-A II-3 ; Figure-A II-4 ; Figure-A II-5).

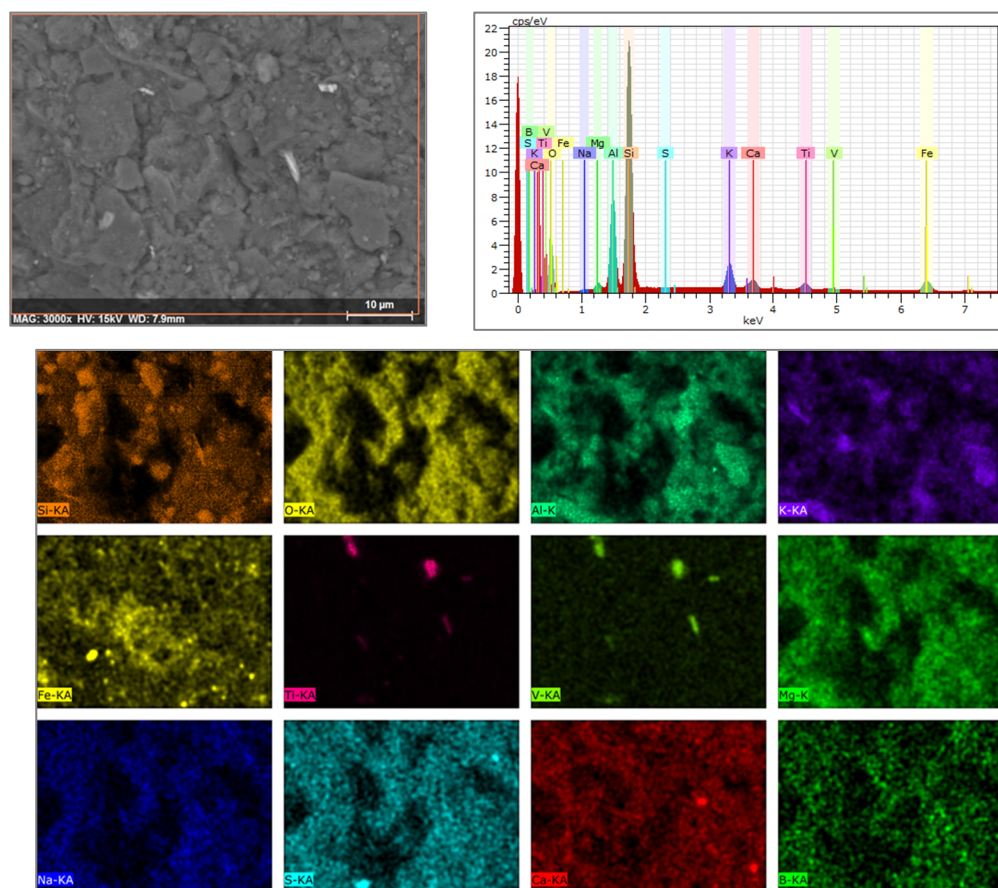


Figure-A II-3 : Image 1 et les résultats obtenus lors de l'analyse EDS

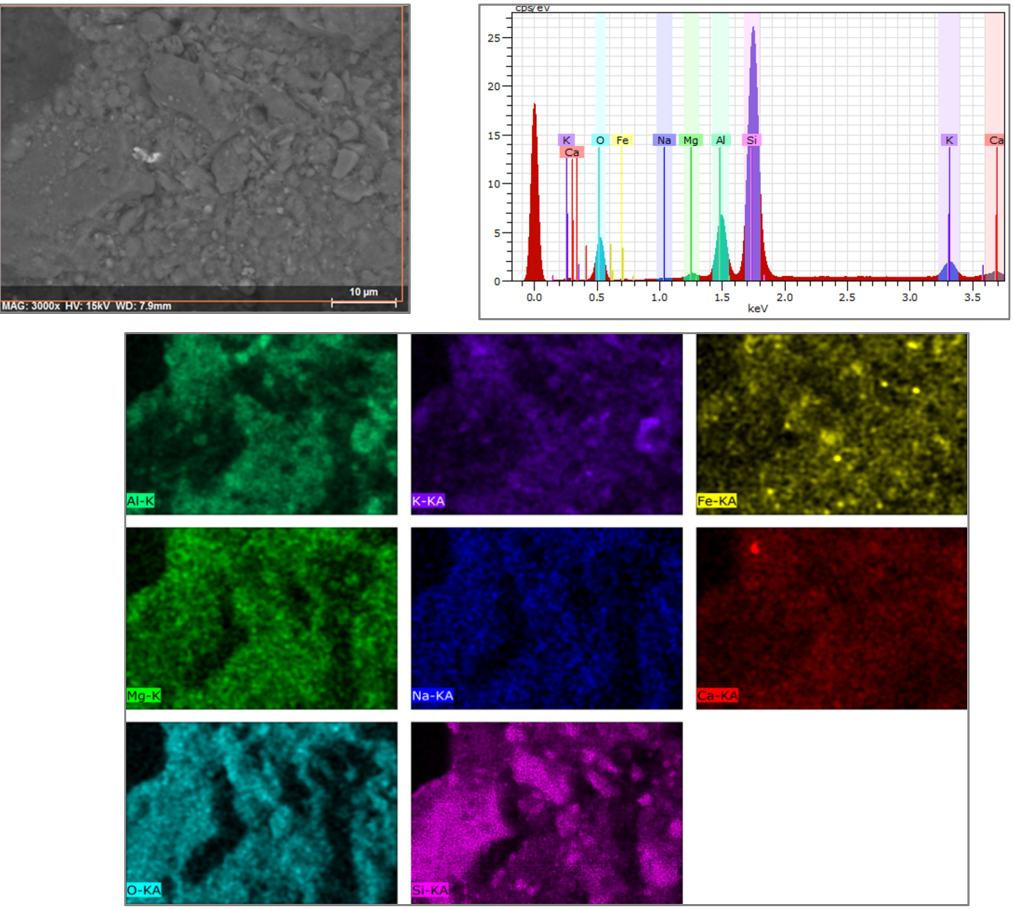


Figure-A II-4 : Image 2 et les résultats obtenus lors de l'analyse EDS

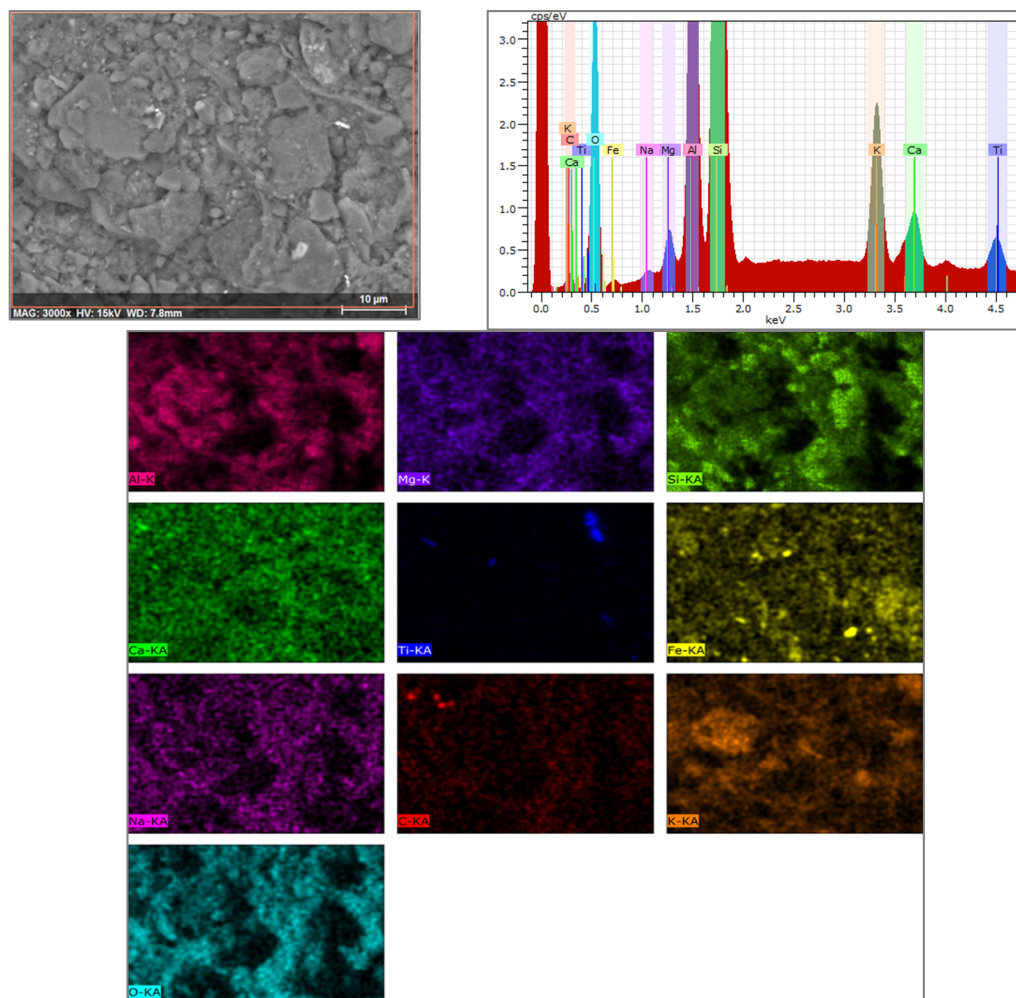


Figure-A II-5 : Image 3 et les résultats obtenus lors de l'analyse EDS

- **Microscopie de la surface perpendiculaire à la surface en contact direct avec le bois (coupe transversale)**

La Figure-A II-6 montre les images prises en coupe transversale ainsi de l'analyse EDS obtenus.

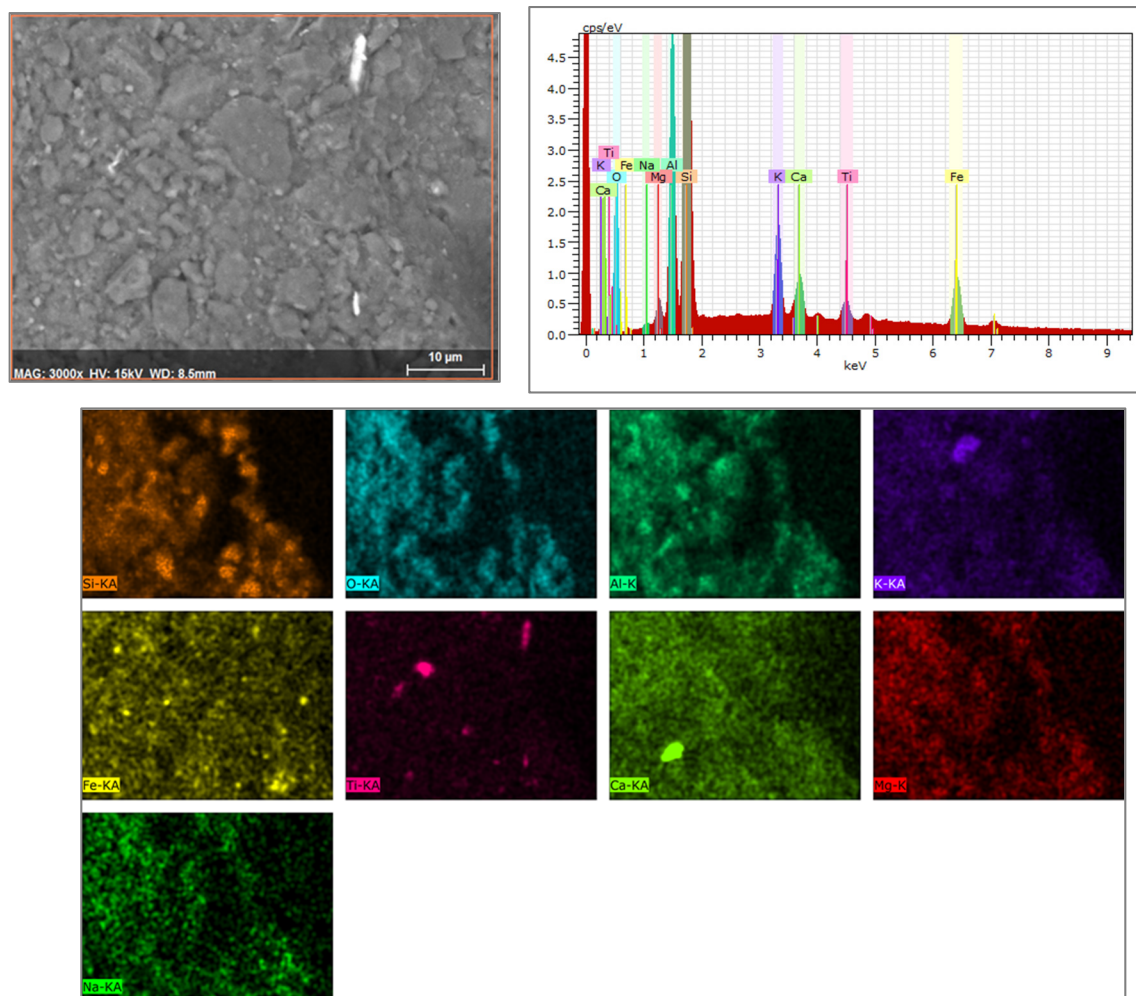


Figure-A II-6 : Coupe transversale de l'échantillon d'argile et les résultats obtenus lors de l'analyse EDS

• Conclusion

Les résultats obtenus montrent que le TM3000 n'est pas capable d'identifier le bore comme un élément chimique absorbé par l'argile, ceci peut être lié à son appartenance aux éléments légers ou à sa présence avec une faible concentration dans l'argile qui nécessite l'utilisation d'un microscope plus spécialisé et avec des limites de détection capables d'atteindre la limite de détection du bore.

Les éléments chimiques majoritairement présents au sein de nos échantillons d'argile sont : le sodium, le fer, le calcium, le magnésium, le silicium, le potassium et quelques traces de Titane et Vanadium

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, O. (2008). Impact des produits de traitement du bois sur les amphipodes *Gammarus pulex* (L.) et *Gammarus fossarum* (K.) : Approches chimiques, hydro-écologique et écotoxicologique.
- Alamy Limited. (2021). L'Arabie saoudite, Najran, Najran. Construit dans les années 1940, Fort de Najran, ou Qasr al-Imara, avec ses murs en adobe Photo Stock—Alamy. <https://www.alamyimages.fr/photo-image-l-arabie-saoudite-najran-najran-construit-dans-les-annees-1940-fort-de-najran-ou-qasr-al-imara-avec-ses-murs-en-adobe-37118547.html>
- Alvarez Acevedo, N. I., Rocha, M., & Bertolino, L. (2017). Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, 63, 253-262. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662045>
- Andrianne, P. (2003). L' Argile, médecine ancestrale : De la tradition aux preuves scientifiques. Amyris. Paris. <http://www.espace-kenere.fr/Default/doc/SYRACUSE/77197/l-argile-medecine-ancestrale-de-la-tradition-aux-preuves-scientifiques>
- Anger, R. (2011). Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction [Thèse de doctorat, INSA de Lyon]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00735722>
- Anger, R., & Fontaine, L. (2005). Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture.
- Ashaari, Z., Moy, C. S., Sajap, A. S., & Md. Tahir, P. (2003). Resistance of CCA and borontreated rubberwood composites against termites, *Coptotermes curvignathus* Holmgren. *Pertanika J. Sci. Technol.* 11, 65-72.
- Association forestière du sud du Québec. (2022). Épinette blanche. <https://afsq.org/information-foret/nos-arbres/epinette-blanche/>
- ASTM D4933. (2016). Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Based Materials. ASTM International.
- Aubert, J.-E., Marcom, A., Oliva, P., & Segui, P. (2015). Chequered earth construction in south-western France. *Journal of Cultural Heritage*, 16(3), 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.07.002>
- Aubert, J.-E., Paulina, F., Pascal, M., Kouka Amed, J. O., Claudiane, O. P., & Elodie, P. (2022). Characterization of earth used in earth construction materials. In *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements* (Vol. 35, p. 41-98). RILEM State-of-the-Art Reports.

- AWPA A12. (2019). Wood densities for preservative retention calculations.
- Ayrilmis, N., Kartal, S. N., Laufenberg, T. L., Winandy, J. E., & White, R. H. (2005). Physical and mechanical properties and fire, decay, and termite resistance of treated oriented strandboard. *Forest Products Journal*. Vol. 55(5), 74-81.
- Barrier-Battut, I. (2018). Les vertus de l'argile. Institut français du cheval et de l'équitation. <https://equipedia.ifce.fr/sante-et-bien-etre-animal/soin-prevention-et-medication/soin/les-vertus-de-l-argile>
- Baysal, E., Sonmez, A., Colak, M., & Toker, H. (2006). Amount of leachant and water absorption levels of wood treated with borates and water repellents. *Bioresource Technology*, 97(18), 2271-2279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.044>
- Becker, G. (1976). Treatment of wood by diffusion of salts. *Journal of the Institute of Wood Science*.
- Belbachir, M., Boutevin, B., Piétrasanta, Y., & Rigal, G. (1984). Télomérisation du chlorure de vinylidène, 1. Réaction avec le tétrachlorure de carbone par catalyse rédox. *Die Makromolekulare Chemie*, 185(8), 1583-1595. <https://doi.org/10.1002/macp.1984.021850808>
- Bencharif, Z., Ikhlef, k, & Akdim, A. (2017). Valorisation du kaolin dans le domaine para pharmacologique [Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira]. <http://172.17.1.105:8080/xmlui/handle/123456789/5279>
- Bentahar, Y. (2017). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : Application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse [Phdthesis, COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019); Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc)]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01452518>
- Birkhauser, G. M. (2009). *Building with Earth : Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 9-16.
- BNQ 2501-170. (2014). Sols—Détermination de la teneur en eau—BNQ.
- Boss, C. B., & Fredeen, K. J. (1997). Concepts, instrumentation, and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectrometry (2nd edition). Perkin Elmer.
- Brischke, C., & Alfredsen, G. (2020). Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(9), 3781-3795. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>
- Brookhaven Instruments Corporation. (1994). *Instruction Manual*.

- Bruno, A. W., Gallipoli, D., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). Mechanical Behaviour of Hypercompacted Earth for Building Construction. *Materials and Structures*, 50. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1027-5>
- Built Green. (2017). La maison canadienne en torchis la plus célèbre du monde | Build Green. <https://www.build-green.fr/la-maison-canadienne-en-torchis-la-plus-celebre-du-monde/>
- CAN/BNQ 2501-090. (2005). Sols—Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande et de la limite de plasticité—BNQ.
- Cecobois. (2022). Pourquoi construire en bois. <https://cecobois.com/pourquoi-construire-en-bois/>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2020). Détermination des métaux : Méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon, MA. 200 – Mét. 1.2, révision 7. ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques,.
- Chazelles, C.-A. (2003). Témoignages croisés sur les constructions antiques en terre crue : Textes latins et données archéologiques. *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, 41, Art. 41. <https://doi.org/10.4000/tc.55>
- Chen, F. H. (1975). *Foundations on expansive soils*. Elsevier Scientific Pub. Co.
- Chorom, M., & Rengasamy, P. (1995). Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, 46(4), 657-665. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01362.x>
- Clausen, C., & Yang, V. (2007). Protecting wood from mould, decay, and termites with multi-component biocide systems. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 59(1), 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.07.005>
- Cockcroft, R., & Levy, J. F. (1973). Bibliography on the use of boron compounds in the preservation of wood. *Journal of the Institute of Wood Science*, 28-37.
- Collet, F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux [Thèse de doctorat].
- Cookson, L. (2004). *Treatment Methods for the Protection of Hardwood Sapwood from Lyctine Borers*.
- Courtois, B., Sageot, H., & Heisel, E. (2006). Composition, dangers, mesures de prévention. 12.

- Coyne, L. (1984). Evidence found supporting mineral origins of life theory: Vol. Volume 15 à 16 (NASA activities).
- Creffield, J. W., Howick, C. D., & Greaves, H. (1983). Boracol 40 – a potential remedial and preservative treatment for Lyctids. Internat. Research Group on Wood Preserv. Working Group I, Sub-group 5, Document No. IRG/WP/1192.
- Davies-Jones, J. A., & Davies, P. R. (2022). Photo induced force microscopy : Chemical spectroscopy beyond the diffraction limit. *Materials Chemistry Frontiers*, 6(12), 1552-1573. <https://doi.org/10.1039/D2QM00040G>
- Deveci, I., Baysal, E., Toker, H., Yuksel, M., Turkoglu, T., & Peker, H. (2017). Thermal characteristics of oriental beech wood treated with some leaching resistant borates. *Wood Research*, 62(1), 91-102. Scopus.
- Dewulf, M. (2015). *Le torchis, mode d'emploi* (2e éd). Eyrolles.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire En Terre*. Ed. Alternative et Parallèles. <http://archive.org/details/ConstruireEnTerre>
- Elhachmi, A. (2013). Argile et minéraux argileux : Propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés colloïdales. Mémoire Online.
- Elnabouch, R., Bui, Q. B., Perrotin, P., Ple, O., & Plassiard, J.-P. (2015). Modélisation numérique de structures en pisé : Analyses et recommandations.
- Fonseca Lima, P. A., Gouveia, F., Baraúna, E., & Jr, C. (2020). CCB retention and penetration in eucalyptus fence posts in function of condition of preservative treatment. *FLORESTA*, 50, 1345. <https://doi.org/10.5380/rf.v50i2.63737>
- Fujimoto, T., Kobori, H., & Tsuchikawa, S. (2012). Prediction of Wood Density Independently of Moisture Conditions Using near Infrared Spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(3), 353-359. <https://doi.org/10.1255/jnirs.994>
- Goodhew, S., Boutouil, M., Streiff, F., Le Guern, M., Carfrae, J., & Fox, M. (2021). Improving the thermal performance of earthen walls to satisfy current building regulations. *Energy and Buildings*, 240, 110873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110873>
- Gusenbauer, C., Jakob, D., Xu, X., Vezenov, D., Cabane, E., & Konnerth, J. (2020). Nanoscale Chemical Features of the Natural Fibrous Material Wood. *Biomacromolecules*. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c01028>
- He, W., & Hu, H. (2013). Rapid Prediction of Different Wood Species Extractives and Lignin Content Using Near Infrared Spectroscopy. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 33(1), 52-64. <https://doi.org/10.1080/02773813.2012.731463>

- Hernot, F. (2016). L'argile, son utilisation a l'officine [Thèse de doctorat, université d'angers]. <https://dune.univ-angers.fr/fichiers/20073109/2016PPHA5426/fichier/5426F.pdf>
- Hugo, H., Fabienne, D., & Hubert, G. (2006). *Traité de construction en terre (PARENTHESSES)*. Centre de recherche et d'appli.
- Hyoumbi, W., Pizette, P., Wouatong, A., & Abriak, N.-E. (2018). Mineralogical, Chemical, Geotechnical and Mechanical Investigations of Bafang Lateritic Fine Soils Formed on Basalts (West-Cameroon) for Road Embankment Purpose. *Earth Science Research*, 7, 42. <https://doi.org/10.5539/esr.v7n2p42>
- Hyvönen, A., Piltonen, P., & Niinimäki, J. (2006). Tall oil/water – emulsions as water repellents for Scots pine sapwood. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 64(1), 68-73. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0040-5>
- Jahng, J., Fishman, D. A., Park, S., Nowak, D. B., Morrison, W. A., Wickramasinghe, H. K., & Potma, E. O. (2015). Linear and Nonlinear Optical Spectroscopy at the Nanoscale with Photoinduced Force Microscopy. *Accounts of Chemical Research*, 48(10), 2671-2679. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00327>
- Johansson, J., & Salin, J. (2011). Application of percolation modelling on end-grain water absorption in aspen (*Populus tremula* L.). *Wood Material Science & Engineering*, 6(3), 112-118. <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.537768>
- Joubert, J. P. (1992). Terrassements—Norme de classification des materiaux, « nouvelle rtr ». NOTE D'INFORMATION CHAUSSEES DEPENDANCES, 73. <https://trid.trb.org/view/987981>
- Kabu, M., & Akosman, M. (2013). Biological Effects of Boron. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 225, 57-75. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6470-9_2
- Kagonbé, B. P., Tsozué, D., Nzeukou, A. N., & Iii, S. N. (2021). Mineralogical, Geochemical and Physico-Chemical Characterization of Clay Raw Materials from Three Clay Deposits in Northern Cameroon. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(6), Art. 6. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.96005>
- Kartal, S. (2010). Boron-based wood preservatives and their uses. In *Handbook on Borates : Chemistry, Production and Applications* (p. 329-348). Scopus.
- Kaya, A., & Yukselen, Y. (2005). Zeta potential of clay minerals and quartz contaminated by heavy metals. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), 1280-1289. <https://doi.org/10.1139/t05-048>
- Kaygin, B., & Akgun, E. (2008). Comparison of Conventional Varnishes with Nanolacke UV Varnish With Respect to Hardness and Adhesion Durability. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(4), 476-485.

- Kesari, K. K., O'Reilly, P., Seitsonen, J., Ruokolainen, J., & Vuorinen, T. (2021). Infrared photo-induced force microscopy unveils nanoscale features of Norway spruce fibre wall. *Cellulose*, 28(11), 7295-7309. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04006-2>
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Maillard, P., & Poirier, C. (2017). Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12), 04017244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002096)
- Lebow, P. K., Lebow, S. T., & Halverson, S. A. (2013). Boron Diffusion in Surface-Treated Framing Lumber. *Forest Products Journal*, 63(7-8), 275-282. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00098>
- Lebow, S., Lebow, P., & Halverson, S. (2010). Penetration of Boron from Topically Applied Borate Solutions. *Forest Products Journal*, 60(1), 13-22. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.1.13>
- Lesar, B., Podlesnik, B., Pohleven, F., Humar, M., Kralj, P., & Veber, M. (2008). Performance of boron-ethanolamine-quaternary ammonium based wood preservatives against leaching, wood decay and blue stain fungi. *Wood Research*, 53(3), 17-26. Scopus.
- LeVan, S. L., & Tran, H. C. (1990). The role of boron in flame-retardant treatments. First International Conference on Wood Protection with Diffusible Preservatives, Nashville, Tennessee, Forest Products Research Society, 39-41.
- Lloyd, J. D. (1995). Leaching of boron wood preservatives-a reappraisal. . annual convention of the British Wood Preserving & Damp-Proofing Association.
- Lyon, F. (2007). Amélioration de la durée de vie d'essences de bois peu durables à l'aide d'un traitement combiné boates/huiles végétales [Phdthesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc]. <https://theses.hal.science/tel-00567069>
- Mangas, S., & Samman, S. (2001). Review paper Potential essentiality of boron : A ubiquitous dietary constituent. (Review paper). *Australian Journal of Nutrition and Dietetics*, 58(2), 104-107.
- Marsalek, R. (2012). Zeta Potential—Applications. 2nd International Conference on Environment and Industrial Innovation IPCBEE.
- Mastromatteo, E., & Sullivan, F. (1994). Summary : International Symposium on the Health Effects of Boron and Its Compounds. *Environmental Health Perspectives*, 102, 139-141. <https://doi.org/10.2307/3431977>
- Mohamad-Nasir, M., Roszaini, K., Salmiah, U., Tumirah, K., & Zaihan, J. (2019). Durability of Selected Malaysian Wood Treated with Disodium Octaborate Tetrahydrate Used Under Hazard Class 2 Condition. *Journal of Tropical Forest Science*, 31(1), 43-49.

- Nejad, M. (2011). Coating Performance on Preservative Treated Wood. 171.
- NF EN 350. (2016). Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois—Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois.
- Obanda, D., Shupe, T., & Barnes, H. (2008). Reducing leaching of boron-based wood preservatives – A review of research. *Bioresource technology*, 99, 7312-7322. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.077>
- Obounou Akong, F. (2012). Composés amphiphiles originaux à propriétés gélifiantes : Synthèse et caractérisations physico-chimiques. Application à la formulation de produits de préservation du bois hydrosolubles.
- Ouled abd eslam, F., & Bouregaa, N. (2019). Valorisation industrielle des argiles de la région d'Adrar. Université Ahmed Draïa Adrar.
- Outil de comparaison des essences. (2014). <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/comparaison.php?essence1=1&cat1=2&arbre1=5&essence2=1&cat2=2&arbre2=7&essence3=0&categorie=9&soumission=Comparer>
- Palakiyem, M. (2017). Adsorption de trois polymères sur des d'argiles (p. 48) [Rapport technique]. Ecole de technologie supérieure.
- Pekrioglu Balkis, A. (2017). The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen. *Construction and Building Materials*, 134, 556-562. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.172>
- Phung, T. A. (2018). Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : La bauge. 180.
- Pignolet, O. (2008). Optimisation de la durabilité de bois d'oeuvre (classe d'emploi 4) à l'aide d'anhydrides alkényles succiniques d'origine végétale [Phd]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001191/>
- Priadi, T., Lestari, M. D., & Cahyono, T. D. (2021). Posttreatment effects of castor bean oil and heating in treated jabon wood on boron leaching, dimensional stability, and decay fungi inhibition. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 49(6), 602-615. Scopus. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2021.49.6.602>
- Puuinfo. (2020). Le bois est une ressource naturelle renouvelable. Puuinfo.
- Ra, J.-B., Barnes, H., & Conners, T. E. (2001). Determination of boron diffusion coefficients in wood. *Wood and Fiber Science*, 33, 90-103.

- Résidence Brock Commons. (2016). Le plus grand immeuble en bois du monde : Détails de chantier en photos et en vidéo. la maison bois par maisons-bois.com.
- Rootwell Product, I. (2018). Cob Houses : The Greenest Way To Build - Eco Buildings. <https://www.rootwell.com/blogs/cob-houses>
- Rowell, R. M. (Éd.). (2005a). Biological Properties. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (p. 100-120). CRC Press.
- Rowell, R. M. (Éd.). (2005b). Thermal Properties. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (p. 136-137). CRC Press.
- Saifouni, O. (2014). Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux : Application au comportement mécanosorptif du bois. 167.
- Salman, S. (2017). Développement de nouvelles méthodes de préservation du bois basées sur l'utilisation combinée d'un traitement thermique et de borax [Thèse de doctorat].
- Santos, A. J. A., Alves, A. M. M., Simões, R. M. S., Pereira, H., Rodrigues, J., & Schwanninger, M. (2012). Estimation of Wood Basic Density of *Acacia Melanoxylon* (R. Br.) by near Infrared Spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(2), 267-274.
- Sedighi-Gilani, M., Vontobel, P., Lehmann, E., Carmeliet, J., & Derome, D. (2014). Erratum to : Liquid uptake in Scots pine sapwood and heartwood visualized and quantified by neutron radiography. *Materials and Structures*, 47(6), 1097-1097. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0136-z>
- Silva, A. R. da, Pastore, T. C. M., Braga, J. W. B., Davrieux, F., Okino, E. Y. A., Coradin, V. T. R., Camargos, J. A. A., & Prado, A. G. S. do. (2013). Assessment of total phenols and extractives of mahogany wood by near infrared spectroscopy (NIRS). *Holzforschung*, 67(1), 1-8. <https://doi.org/10.1515/hf-2011-0207>
- Snethen, D. (1980). Expansive Soil in Highway Subgrades (p. 80-236) [Report FHWA-TS].
- Snethen, D. (1984). Evaluation of expedient methods for identification and classification of potentially expansive soils. 84/3. <https://trid.trb.org/view/209471>
- Sonmez, A., Budakci, M., & Bayram, M. (2009). Effect of wood moisture content on adhesion of varnish coatings. *Sci. Res. Essays*, 6.
- Soraya, V. (2016). Caractérisations des georessources argileuses de bemololo, mangatany et miandrivazo pour leur valorisation. 126.
- Temiz, A., Alfredsen, G., Eikenes, M., & Terziev, N. (2008). Decay resistance of wood treated with boric acid and tall oil derivatives. *Bioresource technology*, 99, 2102-2106. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.052>

- Truche, C. (2010). Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain. [Phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00594021>
- Turner, A. A. (2008). Penetration Depth of Borates in Historic Wooden Structures in Virginia City, Montana. University of Pennsylvania.
- Villieras, F. (2008). Argiles. Histoire d'avenir. <https://www.decitre.fr/livres/argiles-9782742782840.html>
- Watanabe, K., Mansfield, S. D., & Avramidis, S. (2011). Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green hem-fir timber. *Journal of Wood Science*, 57(4), 288-294. <https://doi.org/10.1007/s10086-011-1181-2>
- Wester, R., Hui, X., Hartway, T., Maibach, H. I., Northington, D. J., Strong, P., & Culver, B. D. (1998). In Vivo Percutaneous Absorption of Boric Acid, Borax, and Disodium Octaborate Tetrahydrate in Humans Compared to in Vitro Absorption in Human Skin from Infinite and Finite Doses. 10.
- William, L. H. (1991). Diffusion Treatment of Wood—An American Perspective. In *The Chemistry of Wood Preservation* (edited by R. Thompson, p. 34-52).
- WPC. (2022). Bois traite ignifuge. WPC. <https://woodpreservation.ca/fr/residentielle-sitemap/bois-traite-ignifuge/>
- Yalinkilic, M. K., Su, W. Y., Demirci, Z., Baysal, E., Takahashi, M., & Ishihara, S. (1997). Oxygen index levels and thermal analysis of wood treated with melamine formaldehyde-boron combinations. Document - the International Research Group on Wood Preservation (Sweden). https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Oxygen+index+levels+and+thermal+analysis+of+wood+treated++with+melamine+formaldehyde-boron+combinations&author=Yalinkilic%2C+M.K.&publication_year=1997
- Yamauchi, S., Sakai, Y., Watanabe, Y., Kubo, M., & Matsue, H. (2007). Distribution of boron in wood treated with aqueous and methanolic boric acid solutions. *Journal of Wood Science*, 53(4), 324-331. <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0863-7>
- Yukselen, Y., & Kaya, A. (2003). Zeta Potential of Kaolinite in the Presence of Alkali, Alkaline Earth and Hydrolyzable Metal Ions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 145(1), 155-168. <https://doi.org/10.1023/A:1023684213383>
- Zhu, R., Chen, Q., Zhou, Q., Xi, Y., Zhu, J., & He, H. (2016). Adsorbents based on montmorillonite for contaminant removal from water: A review. *Applied Clay Science*, 123, 239-258. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.024>

