



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

Qualité des approvisionnements des industries du panneau de process

Projet :

FCBA : B01773

CODIFAB : 2018_FCBA_30/49

Chef de projet : P. MONCHAUX

Équipe projet : P. MONCHAUX, A. BOUVET, M. LECOURT, C. L'HOSTIS

25/03/2020

Siège social

10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84

www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :
Forêt, Cellulose, Bois – Construction
Ameublement

SOMMAIRE



Contexte de l'étude, notions relatives à la teneur en humidité	3
Définitions de la siccité et de la teneur en humidité	4
1. Humidités des bois verts : variations intra et inter arbres, influence des facteurs environnementaux	5
1.1 Introduction	5
1.2 Teneurs en eau intra-arbre.....	5
1.2.1 Variations aubier-duramen	5
1.2.2 Variations selon l'axe longitudinal de la grume	6
1.2.3 Variations temporelles de teneur en eau.....	7
1.3 Variations des teneurs en eau inter-arbres	8
1.3.1 Variation de la teneur en eau selon les essences.....	8
1.3.2 Influence du taux de lignine sur l'humidité.....	8
1.4 Variations climatiques et géographiques	9
1.4.1 Variations selon le climat et les évènements météorologiques.....	9
1.4.2 Variations selon la localisation géographique	9
1.4.3 Influence de la sylviculture.....	10
1.5 Conclusion partielle	10
2. Analyse de données d'usine de production de panneaux concernant la siccité des bois ronds	11
2.1 Usine A.....	11
2.2 Usine B.....	14
2.3 Usine C	17
2.4 Résultats globaux.....	20
2.5 Conclusion partielle	22
3. Influence de la siccité sur les procédés de fabrication de panneaux	23
3.1 Contexte.....	23
3.2 Ecorçage	23
3.3 Mise en copeaux	24
3.3.1 Déstructuration	25
3.4 Séchage des éléments	28
3.5 Conclusion partielle	28
Conclusion générale	29
Références	30

Contexte de l'étude, notions relatives à la teneur en humidité

Les industries des panneaux constatent depuis quelques années une évolution de la siccité des bois qui a tendance à augmenter. Ils s'interrogent sur les causes de cette évolution en amont du parc à bois et sur l'impact que celle-ci pourrait avoir en aval sur les chaînes de production et la qualité des panneaux produits.

Pour répondre à ces interrogations, ont été réalisées :

- Une étude bibliographique sur l'influence des facteurs environnementaux sur les variations de l'humidité intra et inter arbres
- Une analyse de données de siccité de 3 usines sur plusieurs années, avec l'étude de la présence d'un effet tendanciel et le lien avec les données météorologiques locales.
- Une étude bibliographique sur les impacts de l'humidité sur l'amont des processus de production de panneaux,

L'ensemble de ces travaux sont présentés par la suite.

Définitions de la siccité et de la teneur en humidité

Les deux expressions classiques de la teneur en humidité du bois sont l'humidité sur **base sèche** et l'humidité sur **base brute**, dont les principes de calcul sont proches, mais les valeurs peuvent être très différentes.

✓ **Humidité sur base sèche :**

Il s'agit de la masse d'eau contenue dans le matériau par rapport à la masse de bois anhydre, c'est-à-dire ne contenant plus du tout d'eau.

$$H_{sec} \% = \frac{m_{eau}}{m_{bois\ anhydre}} \times 100$$

✓ **Humidité sur base brute :**

Il s'agit de la masse d'eau contenue dans le matériau par rapport à la masse du bois à l'humidité à laquelle est faite la mesure, c'est-à-dire, à la masse de bois anhydre plus la masse d'eau contenue dans le bois à l'humidité considérée.

$$H_{brut} \% = \frac{m_{eau}}{m_{bois\ humide}} \times 100$$

✓ **Passage d'une humidité à l'autre :**

Dans les deux cas, la masse d'eau peut être obtenue par la simple soustraction suivante :

$$masse\ eau = masse\ bois\ humide - masse\ bois\ anhydre$$

Il est également possible de convertir une teneur en humidité sur base sèche en base brute. Cette opération est particulièrement utile dans le cas, par exemple, de la conversion d'une valeur donnée par humidimètre à pointes : cet appareil donne généralement une valeur sur base sèche, et il convient de la convertir sur base brute pour une application en bois bûche. Les équations de conversion sont données ci-après :

$$H_{brut} \% = \frac{H_{sec} \%}{100 + H_{sec} \%} \times 100$$

et

$$H_{sec} \% = \frac{H_{brut} \%}{100 - H_{brut} \%} \times 100$$

✓ **Siccité :**

La siccité (S) correspond à la masse de matière sèche par rapport à la masse totale de matière à une humidité donnée :

$$S = \frac{m_{bois\ anhydre}}{m_{bois\ humide}} (\times 100, si\ expression\ en\ \%)$$

Une autre manière de calculer la siccité par rapport à la teneur en humidité sur brut est de réaliser le calcul suivant :

$$S = 1 - H_{brut}$$

Dans le document, toutes les humidités sont exprimées par rapport à la masse sèche.

1. Humidités des bois verts : variations intra et inter arbres, influence des facteurs environnementaux

1.1 Introduction

Ce document consiste en une brève revue de l'état de l'art concernant les variations des teneurs en eau dans les bois sur pied, et par extension dans les bois fraîchement abattus.

L'objectif est de mettre en lumière l'ensemble des facteurs pouvant expliquer des changements de teneur en eau, et donc de siccité dans des approvisionnements de bois ronds fraîchement abattus.

De nombreuses études existent concernant les facteurs influençant la croissance des arbres. En revanche, les données restent extrêmement limitées en ce qui concerne les teneurs en eau des arbres en fonction de ces facteurs. De telles données seraient pourtant très précieuses, afin de pouvoir quantifier précisément l'impact des différents facteurs évoqués ici sur l'humidité des bois ronds.

Cette étude ne tient pas compte d'éventuelles variations des conditions climatiques rencontrées par les bois mentionnés précédemment pendant leur stockage et leur transport entre leur abattage et la mesure de leur siccité. A l'entrée des parcs à bois des usines, il sera cependant important de garder à l'esprit que la durée de stockage des bois après leur abattage, ainsi que les conditions climatiques (température, humidité relative de l'air) rencontrées peuvent avoir un très fort impact sur la siccité des bois.

1.2 Teneurs en eau intra-arbre

A l'échelle de la grume, de très fortes disparités des teneurs en eau existent déjà pour un arbre donné. Les variations d'humidité selon que l'on considère de l'aubier ou du duramen peuvent être considérables, mais des variations selon l'axe longitudinal de la grume existent également.

1.2.1 Variations aubier-duramen

L'aubier et le duramen ont des rôles très différents pour l'arbre sur pied. L'aubier a un rôle de conduction de la sève, et se trouve donc soumis en permanence à de très fortes humidités. Le duramen ne possède plus ce rôle de conduction de fluides, mais sert au soutien mécanique de l'arbre, et présente donc généralement des humidités bien plus faibles.

De manière générale, les humidités selon l'aubier et le duramen peuvent être résumées selon le tableau suivant (Perré, 2006) :

Type de bois	Teneur en eau	
	Aubier	Duramen
Résineux	150% à 200%	40% à 80%
Feuillus	80% à 120%	60% à 100%

Tableau 1 : Ordre de grandeur des teneurs en eau pour les aubiers et duramens de feuillus et de résineux (Perré, 2006)

Dans le cas du Douglas, cette différence peut être particulièrement forte. Il a, par exemple, été mesuré des teneurs en eau de 30% dans le duramen, alors que celles de l'aubier variaient entre 80% à 150% (Frédéric Mothe, 2000). De fortes variations de teneur en eau entre aubier et duramen sont également présentes pour d'autres essences [Tableau 1, (Polge, 1964)]

Essence	Teneur en eau à l'état frais	
	Duramen	Aubier
Epicéa	30%	140%
Mélèze	57%	124%
Pin sylvestre	48%	125%
Alisier	52%	96%
Sorbier	46%	65%
Merisier	40%	104%

Tableau 1 : Teneur en eau de différentes essences à l'état frais, d'après Polge, 1964

Pour certaines essences en revanche, les teneurs en eau entre l'aubier et le bois parfait peuvent être très proches. C'est le cas du chêne et du hêtre par exemple (Maks MERELA, 2007), en particulier durant la saison estivale (Polge, 1964).

Les différences de teneur en eau entre l'aubier et le duramen sont influencées par des facteurs saisonniers. Nous étudierons ce point ultérieurement.

1.2.2 Variations selon l'axe longitudinal de la grume

Des variations de teneur en eau peuvent être remarquées selon l'axe longitudinal de la grume.

Le pied de l'arbre présentera des humidités inférieures à celles des parties plus hautes de la grume (Clarks, 1957) (Clark). Cet élément est notamment à prendre en compte en ce qui concerne la méthodologie de mesure de la siccité. En effet, en cas de prélèvement à des hauteurs différentes dans la grume, il sera alors normal d'observer des teneurs en eau différentes. Si une méthode de prélèvement change (prélèvement au niveau le plus haut de la

grume vers un prélèvement au pied de la grume par exemple), on aura alors une siccité mesurée différente, sans que cela ne corresponde à une réalité en ce qui concerne la teneur en eau globale de la grume.

1.2.3 Variations temporelles de teneur en eau

Les variations de teneur en eau des arbres s'observent à deux échelles : l'échelle journalière et l'échelle saisonnière. Cette dernière joue un rôle prépondérant.

✓ Variations journalières

La contribution des réserves d'eau de l'arbre à la transpiration est essentielle, il doit pour cela puiser dans ses ressources au gré de la journée, ce qui a pour effet de diminuer sa teneur en eau. A l'inverse, lorsque la transpiration s'arrête, l'arbre peut alors stocker de l'eau afin de la restituer plus tard. Des variations de teneur en eau sont observables par le biais de déformations du tronc : plus l'arbre contient d'eau, plus le diamètre du tronc est important.

Les variations de teneur en eau journalières dépendent de l'heure considérée (période de transpiration ou non) et de la météorologie (H. Verbeeck, 2007). Ainsi, dans des conditions de faible pluviométrie, de fort ensoleillement et de sécheresse du sol, la contribution à la transpiration de l'eau stockée dans l'arbre sera supérieure à celle d'une journée de forte pluviométrie, de faible ensoleillement et avec une humidité importante du sol.

De manière générale, la consommation de l'eau stockée par l'arbre a majoritairement lieu entre la matinée et le début d'après-midi (Phillips, 2003).

Il existe également un temps de latence entre l'apparition de conditions favorables à la consommation de l'eau stockée par l'arbre et sa consommation réelle. Il est donc difficile de connaître le moment exact où la teneur en eau de l'arbre sera minimale dans une journée. Pour une mesure sur 14 pins sylvestres, la consommation journalière maximale d'eau stockée par l'arbre était en moyenne de 10 kg (± 4 kg), pour une quantité maximale d'eau stockée moyenne de 177 kg (± 49 kg), soit une variation moyenne de 6% par rapport à masse d'eau stockée dans le bois.

✓ Variations saisonnières

Ces variations sont celles qui engendrent les plus grands écarts de teneur en eau de l'arbre. Le rythme saisonnier de l'arbre fait que des pics de teneur en eau seront constatés autour du mois d'avril, pour connaître un minimum à la fin de la période estivale (Clarks, 1957).

La mesure de la teneur en eau par Clarks (1957, figure 1) sur des bouleaux du Nouveau-Brunswick (Canada) a donné la tendance suivante :

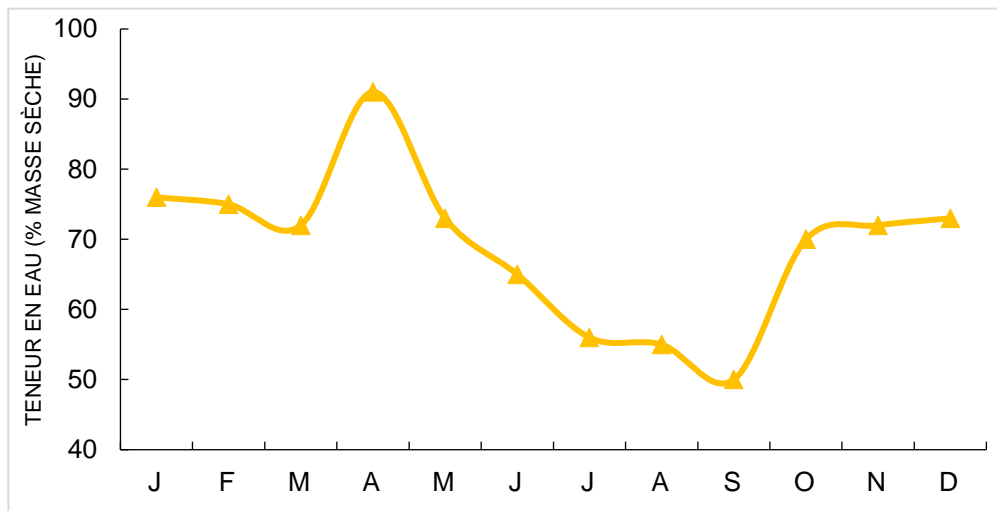


Figure 1 : évolution sur une année de la teneur en humidité d'après Clarks (1957)

Ces variations saisonnières sont évidemment impactées par les conditions climatiques propres à une saison ou à une essence donnée. Nous verrons par la suite l'impact des conditions climatiques particulières sur la teneur en eau des bois.

1.3 Variations des teneurs en eau inter-arbres

1.3.1 Variation de la teneur en eau selon les essences

Nous avons déjà vu en ce qui concerne les variations de teneur en eau entre l'aubier et le duramen que de fortes disparités existaient entre les différentes essences.

La première distinction à faire est entre les feuillus et les résineux. Ces derniers présentent généralement des humidités supérieures à celles des feuillus et donc des siccités plus faibles.

Dans chaque groupe une grande variabilité existe également. Une étude au cas par cas s'impose. Il reste très difficile d'obtenir des valeurs de siccité « moyennes » pour chaque essence dans la littérature. Le fait que les facteurs déterminant cette grandeur soient très nombreux, comme nous pouvons le voir dans ce document, permet en partie d'expliquer ce constat. Une étude large pour obtenir des données fiables représenterait un travail considérable.

A titre d'exemple une comparaison des teneurs en eau de 22 essences provenant de peuplements géographiquement proches a montré des teneurs en eau allant de 51% à 115% pour l'ensemble de l'arbre (Manwiller, 1975), soit des valeurs pouvant plus que doubler d'une essence à l'autre.

1.3.2 Influence du taux de lignine sur l'humidité

La lignine, l'un des constituants principaux du bois, détermine grandement sa teneur en eau. En effet, cette molécule est hydrophobe, contrairement à la cellulose et aux autres polysaccharides du matériau.

Une augmentation du taux de lignine du bois implique une forte baisse de sa teneur en eau, comme cela a été observé sur des peuplements de peupliers transgéniques (Voelker, 2011).

Nous pouvons également noter que le duramen présente des taux de lignine supérieurs à l'aubier, ce qui peut également contribuer à une teneur en eau plus faible (Raiskila, 2007)

1.4 Variations climatiques et géographiques

La littérature se place très majoritairement du point de vue des flux d'eau au sein de l'arbre, dans l'optique de déterminer une situation de stress hydrique pour la plante, qui pourrait impacter sa croissance ou sa survie. L'étude de la teneur en eau des arbres sur pied reste extrêmement limitée.

1.4.1 Variations selon le climat et les événements météorologiques.

Les arbres confrontés à des situations de sécheresse adaptent leur structure afin d'augmenter leurs capacités de stockage d'eau (Noutier, 2014). Pour cela, l'arbre va avoir tendance à former plus d'aubier, qui possède une teneur en eau supérieure au duramen, et donc dans sa globalité, l'arbre aura des capacités de stockage d'eau supérieures à ceux n'ayant pas connu de sécheresse.

Ce point n'indique cependant pas que les arbres ayant connu des sécheresses présentent des teneurs en eau supérieures, pour deux raisons :

- Une partie de l'aubier peut ne plus assurer la conduction de sève en raison des sécheresses (embolie de l'arbre).
- Le climat plus sec implique des apports en eau limités pour l'arbre.

Alors qu'il va connaître des ensoleillements importants, l'arbre va puiser dans ses réserves d'eau pour alimenter la transpiration, et par conséquent, réduire la quantité d'eau stockée (H. Verbeeck, 2007).

La teneur en eau de l'arbre varie en fonction de la pluviométrie. On peut directement corrélérer, sur le court terme, la teneur en eau du bois aux épisodes pluvieux qui lui permettront de recharger ses réserves en eau. (Hao, 2013)

1.4.2 Variations selon la localisation géographique

La localisation géographique d'un arbre va impacter l'humidité du bois par différents biais. En premier lieu, de la localisation va dépendre le climat auquel est soumis l'arbre, qui, comme nous l'avons vu, va jouer un rôle primordial pour la constitution des réserves en eau de l'arbre, et donc sur sa teneur en eau. Ce point ayant déjà été abordé, nous n'y reviendrons pas ici.

Ensuite, la localisation du peuplement définit le type de sol sur lequel est implanté l'arbre. Chaque sol se comporte différemment par rapport à l'eau : capacité en eau, pouvoir drainant, etc... permettent ou non à l'arbre de se trouver en présence de réserves d'eau abondantes, et conditionnent donc sa capacité à pouvoir la stocker. En période de sécheresse, ce facteur est primordial quant à la constitution de réserves pour l'arbre, et donc pour sa teneur en eau.

1.4.3 Influence de la sylviculture

Le caractère dominant ou dominé de l'arbre peut également influencer de façon considérable sa teneur en eau. L'arbre dominant présentera une teneur en eau bien supérieure à l'arbre dominé (Chalk, 1956). Les arbres de grande taille ont en effet une capacité de stockage en eau supérieure aux arbres de taille inférieure (Phillips, 2003).

1.5 Conclusion partielle

Les paramètres influant sur la teneur en eau des arbres, et par conséquent sur la siccité des bois ronds sont très nombreux et divers.

La siccité dépendra notamment de l'essence considérée en raison de particularités concernant son anatomie et sa composition chimique, de la situation géographique et climatique des peuplements, et sera très fortement impactée par la période de l'année, en raison de la saisonnalité des teneurs en eau des arbres.

Comme cela a été énoncé en introduction, d'autres facteurs liés aux processus d'approvisionnement peuvent entrer en compte concernant l'augmentation sur le long terme de siccité des bois : des grumes stockées à l'air pendant des périodes plus longues, et sous des climats plus chauds et plus secs verront leur siccité augmenter.

Il est difficile de conclure quant aux facteurs majoritaires pouvant expliquer une augmentation chronique de la siccité des bois ronds, en raison de l'absence de données bibliographiques déterminant cette grandeur par rapport à l'ensemble des facteurs présentés dans ce document. L'ensemble des points évoqués restent donc à considérer.

2. Analyse de données d'usine de production de panneaux concernant la siccité des bois ronds

Cette analyse est basée sur des mesures de siccité réalisées sur trois sites industriels par les industriels eux-mêmes pour le suivi de leur approvisionnement. Les résultats ont été anonymisés, et sont présentés par la suite pour chaque usine et dans une analyse globale.

2.1 Usine A

Plus de 77 000 mesures de siccité ont été réalisées à l'entrée en usine (une mesure par camion). Les mesures ont été réalisées sur 6 ans de 2012 à 2018, et sur trois essences : bouleau, douglas et pins (majoritairement du pin sylvestre).

A partir de ces mesures, des moyennes mensuelles ont été calculées (Figure 2), et un lien a été recherché avec les données météorologiques.

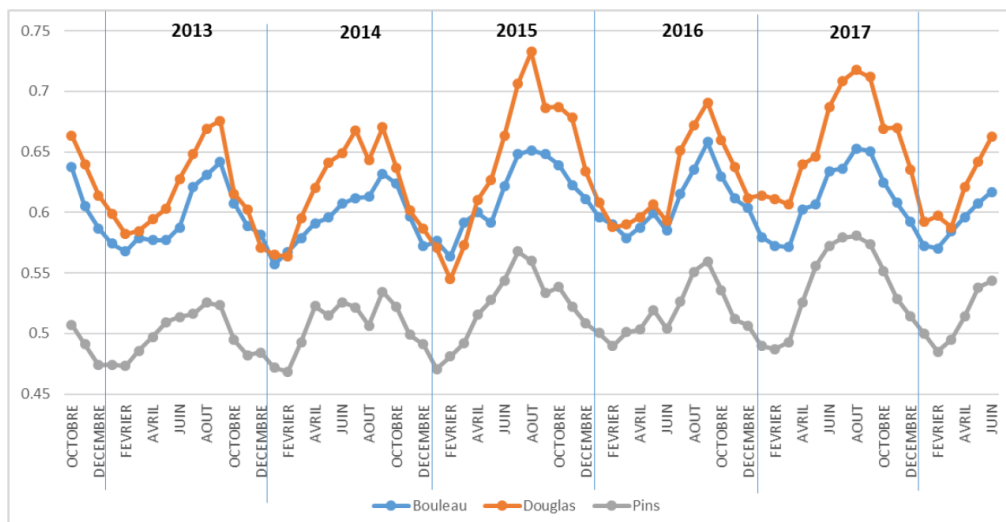


Figure 2 : évolution des données de siccité mensuelles moyennes sur la période de l'étude

La siccité varie, dans l'année, d'un mois à l'autre : maximale en été, minimale en hiver. La variation interannuelle est faible. La siccité est très variable d'une essence à l'autre.

Les mêmes observations peuvent être faites sur l'évolution interannuelle des siccités par essence (Figure 3). Néanmoins, les variations sont moins importantes pour le bouleau que pour le pin et le douglas, et sont plus importantes en période estivale qu'hivernale.

Les siccités sont plus élevées en 2015 et en 2017 que sur les autres années considérées.

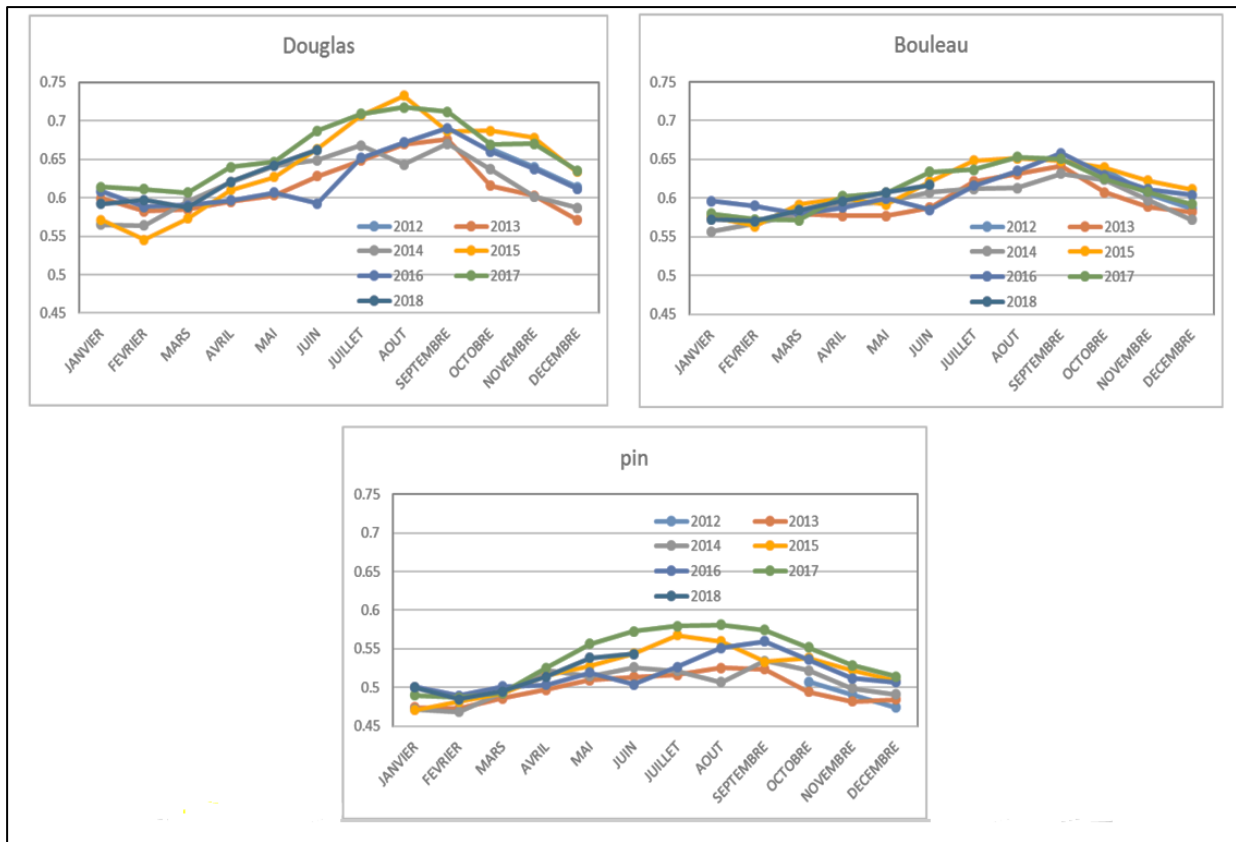


Figure 3 : évolution interannuelle de la siccité pour les trois essences considérées

Les données météorologiques de la station Météo France la plus proche du site A, concernant les cumuls de précipitations et l'ensoleillement ont été comparées aux valeurs de siccité. C'est avec la durée d'ensoleillement que la siccité est la mieux corrélée. (Figure 4).

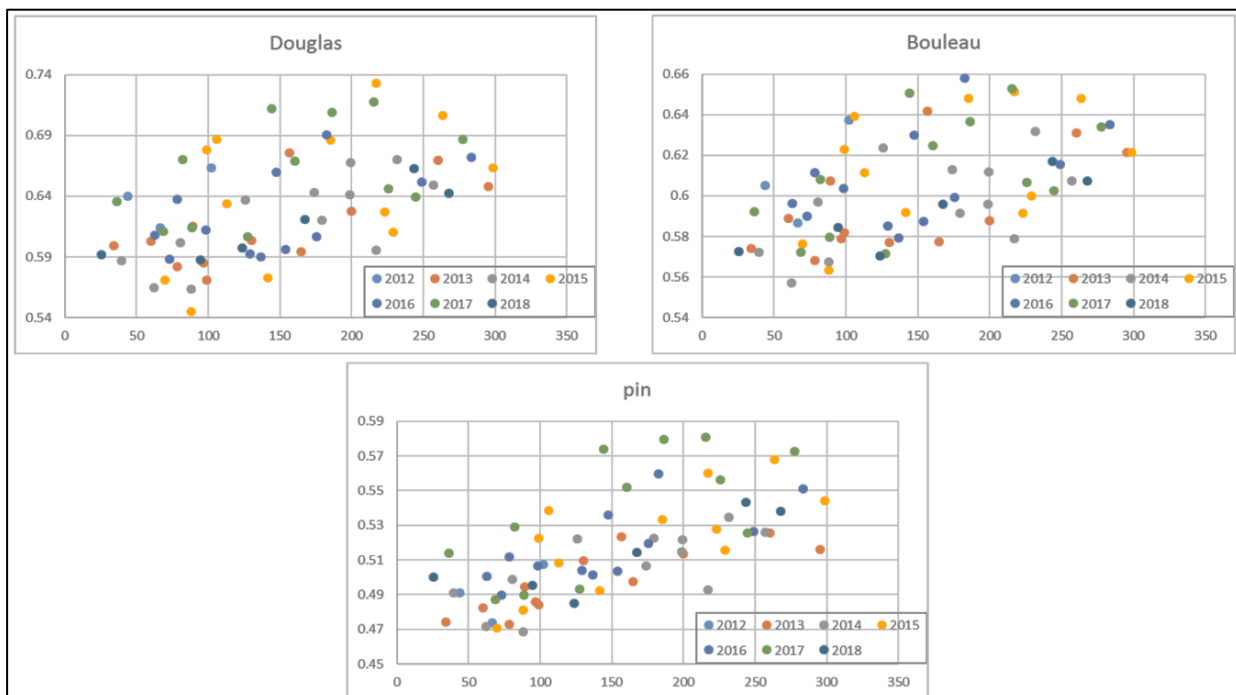


Figure 4 : Comparaison entre la siccité (ordonnée) et la durée d'ensoleillement mensuelle en heures (abscisse)

En complément, les moyennes journalières de siccité (par essence) ont été calculées. Les données météorologiques journalières ont été recherchées (site Tutiempo.net, station proche du site A) avec 3 indicateurs principaux :

- Hauteur de précipitation
- Température moyenne
- Humidité relative

Pour chaque livraison, il a été calculé la température, l'humidité moyenne et la somme des précipitations :

- Pour les 10 journées précédentes
- Pour les 20 journées précédentes.

La siccité d'une journée observée un jour donné est donc mise en relation aux données météorologiques des 10 jours et des 20 jours précédents (Figure 5).

La meilleure corrélation est celle avec la température moyenne des 20 jours précédents.

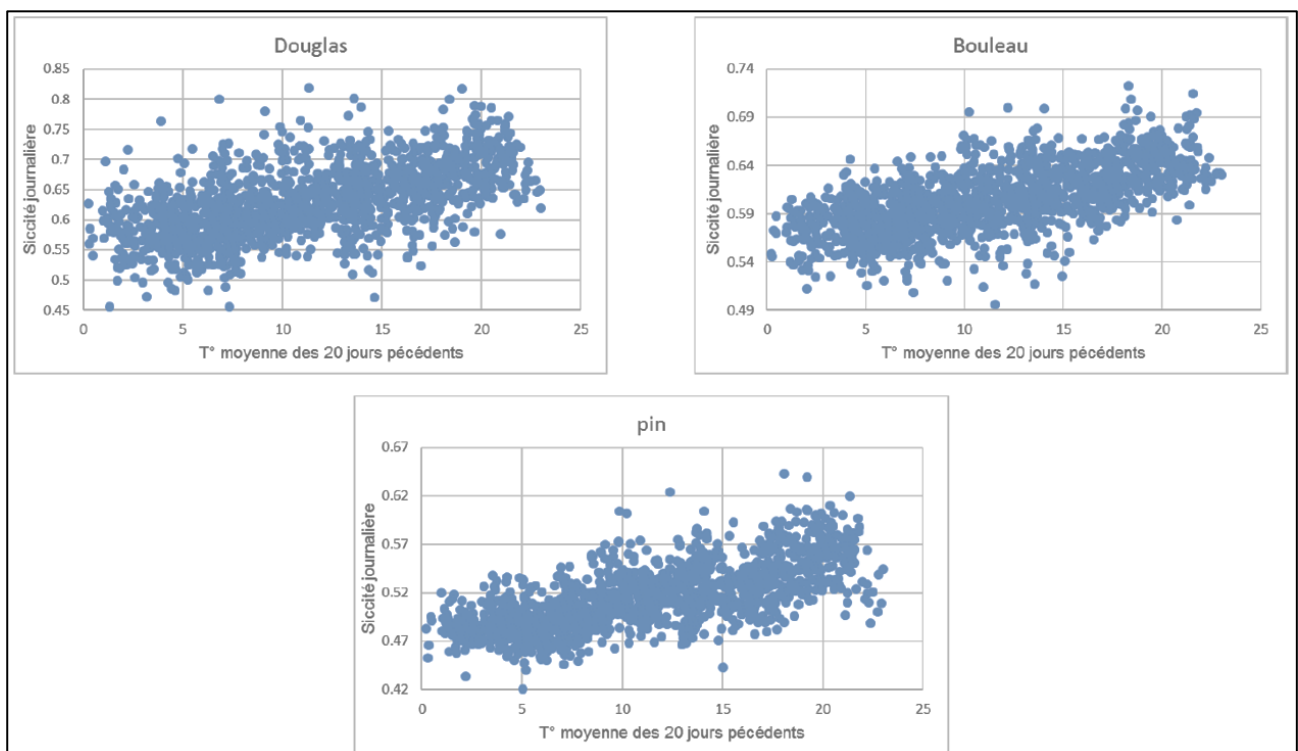


Figure 5 : comparaison de la siccité et de la température moyenne des 20 jours précédents

La corrélation entre Siccité observée à la livraison et température moyenne des 20 jours précédents la livraison est très bonne, ceci quelle que soit l'essence considérée.

2.2 Usine B.

La base fournie comporte les données moyennes mensuelles sur 10 ans (Figure 6), d'août 2008 à décembre 2018, pour 7 produits :

- Dosses écorcées
- Plaquettes écorcées
- Sciure
- Chutes courtes
- Rondins résineux
- Rondins feuillus durs
- Rondins hêtre

De plus pour les rondins de hêtre les données de siccité par camion sur la même période ont été fournies, soit plus de 11000 données (11000 camions).

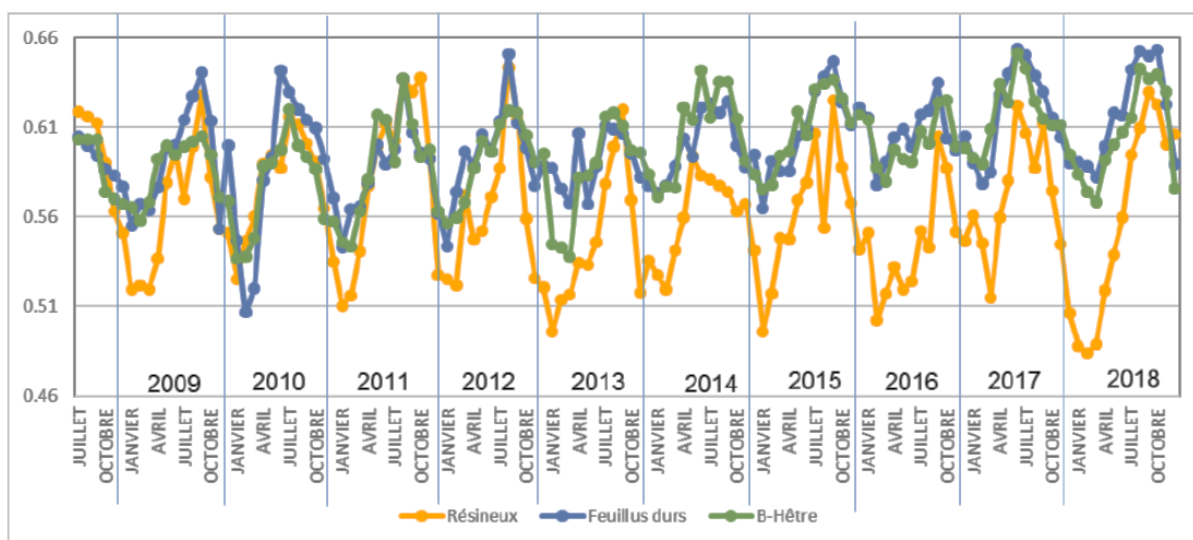


Figure 6 : évolution de la siccité entre 2009 et 2018 sur le site B

La siccité varie, dans l'année, d'un mois à l'autre : maximale en été, minimale en hiver. L'effet de la saisonnalité nettement plus marqué sur les résineux. Les résineux sont proches des feuillus sur les 3 premières années mais nettement plus humides les années suivantes. Ces observations sont confirmées en étudiant les variations interannuelles par essence (Figure 7).

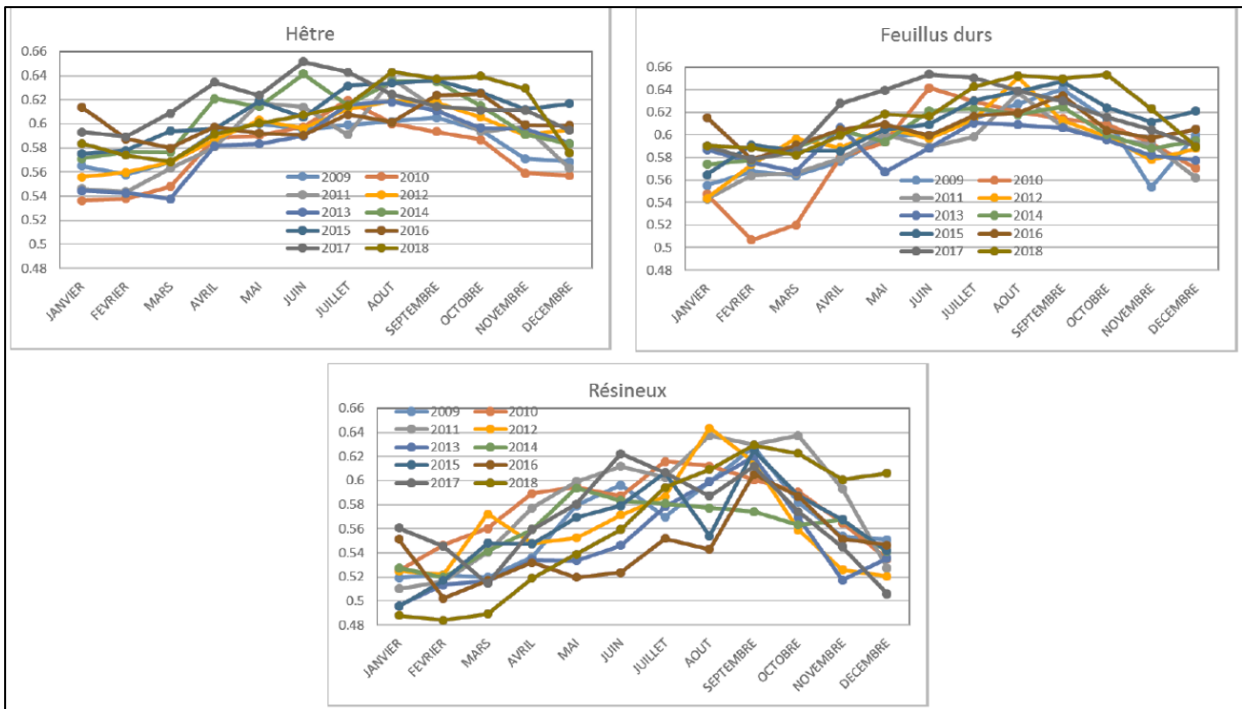


Figure 7 : évolution mensuelle des siccités de trois essences sur 10 ans

L'analyse de la moyenne mobile sur 12 mois des siccités moyennes mensuelles montre en outre une augmentation nette de la siccité à partir de 2014 dans le cas du hêtre (Figure 8).

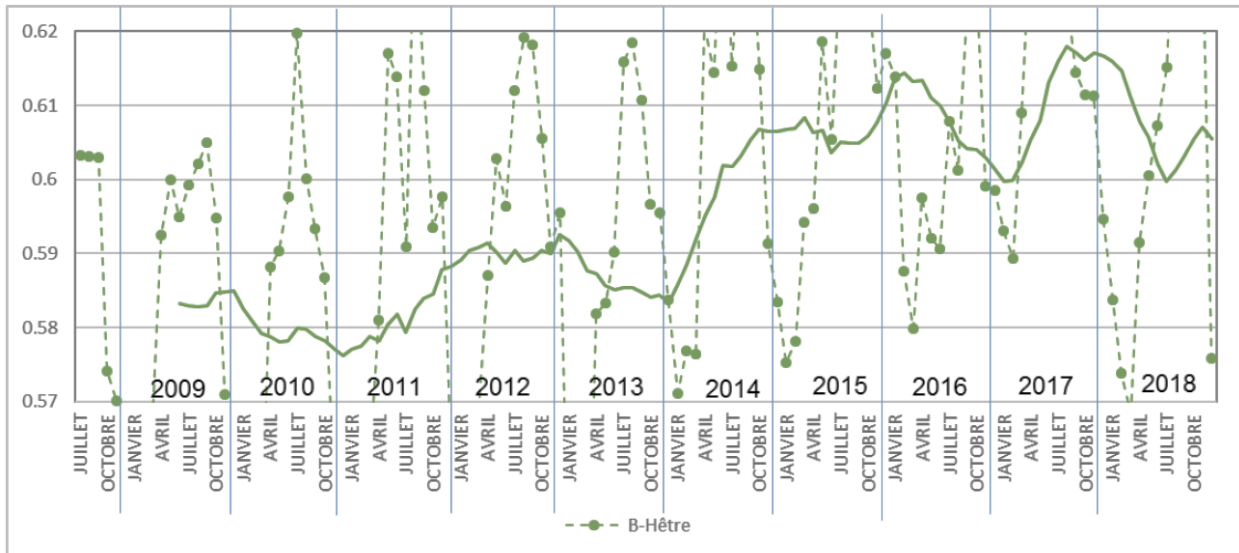


Figure 8 : moyenne mobile sur 12 mois de la siccité du hêtre

La comparaison des données entre les fournisseurs (Figure 9), montre une nette augmentation pour le fournisseur 2 (49% des données de siccité), et un peu moindre pour le fournisseur 1 (45% des données de siccité).

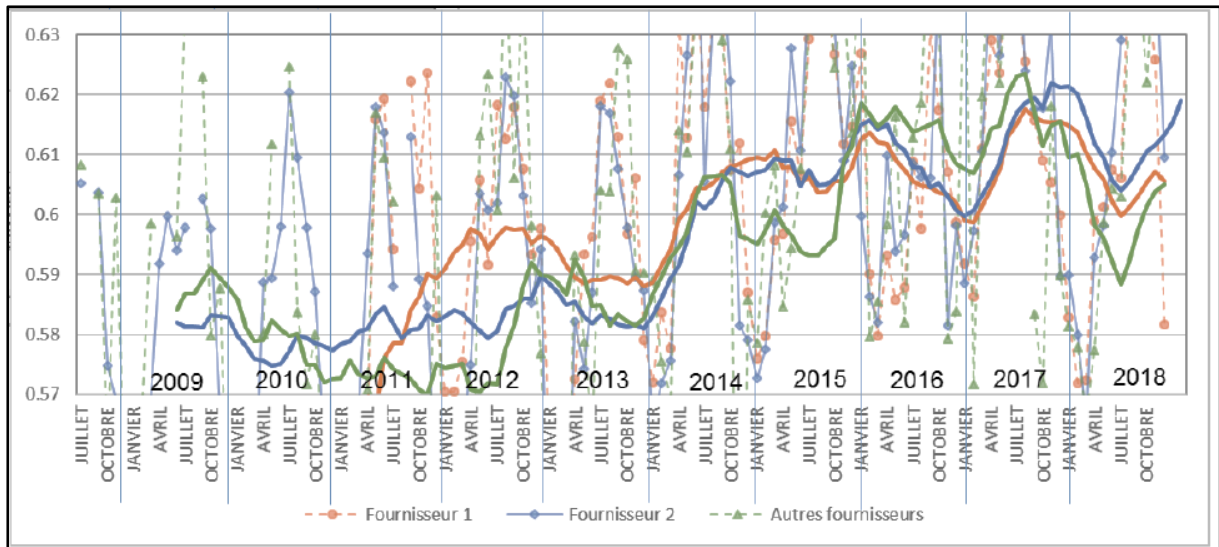


Figure 9 : moyenne mobile sur 12 mois de la siccité du hêtre - comparaison entre les fournisseurs

L'étude de l'impact des conditions météorologiques sur la siccité de billons de hêtre est présentée sur la Figure 10 et sur la Figure 11, concernant respectivement l'ensoleillement et la température.

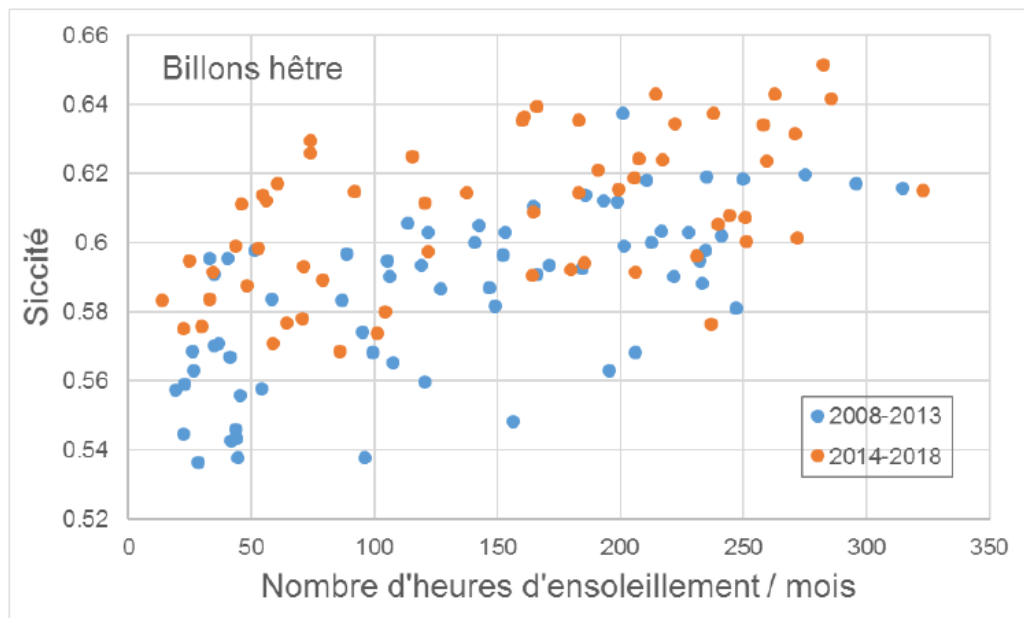


Figure 10 : moyenne mensuelle de la siccité en fonction de l'ensoleillement mensuel

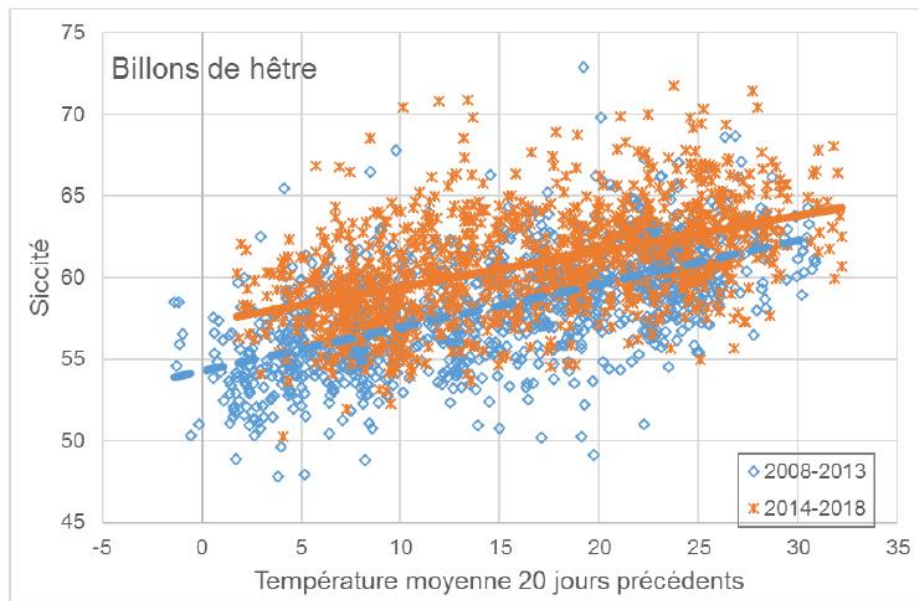


Figure 11 : siccité journalière en fonction de la température moyenne sur les 20 jours précédents

Un décalage peut être observé entre la période 2008-2013 et la période 2014-2018, surtout en ce qui concerne la période hivernale, tendant à montrer que la siccité est plus élevée sur la deuxième période, la plus récente.

2.3 Usine C

La base fournie comporte les données moyennes mensuelles sur 18 ans, de janvier 2001 à décembre 2018 et pour 2 produits : rondins et plaquettes (Figure 12).

Pour les rondins résineux, une distinction est faite entre pins, épicéa et douglas de 2003 à 2015. Tous les résineux sont confondus à partir de 2016

Pour les rondins feuillus, tous les feuillus sont confondus jusqu'en 2004 (mais les quantités sont très faibles en 2001 et 2002). Une distinction est faite pour le chêne à partir de 2005 et pour le peuplier à partir de 2007.

Nous pouvons observer de fortes fluctuations sur les données correspond aux plaquettes, et une tendance à une augmentation de la siccité sur les dernières années.

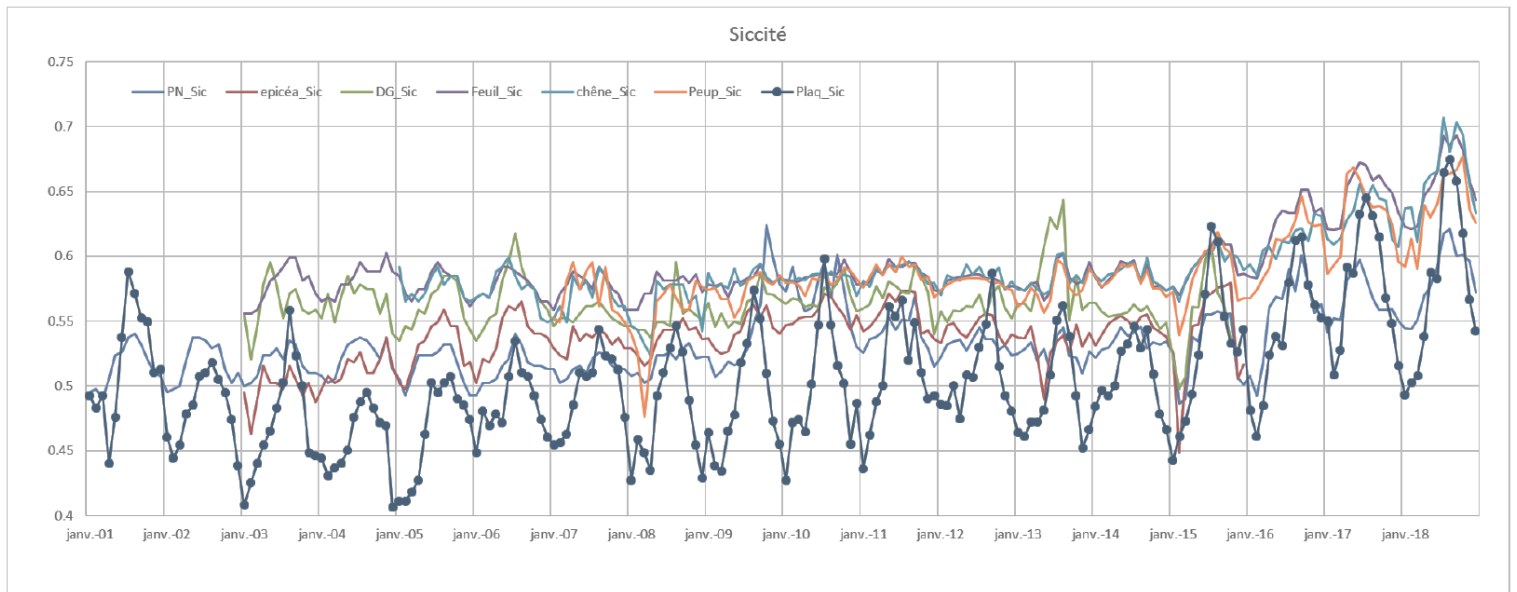


Figure 12 : évolution de la siccité mensuelle moyenne sur 18 ans

La moyenne mobile de la siccité sur 12 mois nous permet de distinguer deux groupes constitués respectivement des feuillus et du douglas pour une part, et des pins et épicéas d'autre part. Le premier groupe est celui qui présente les siccités les plus fortes.

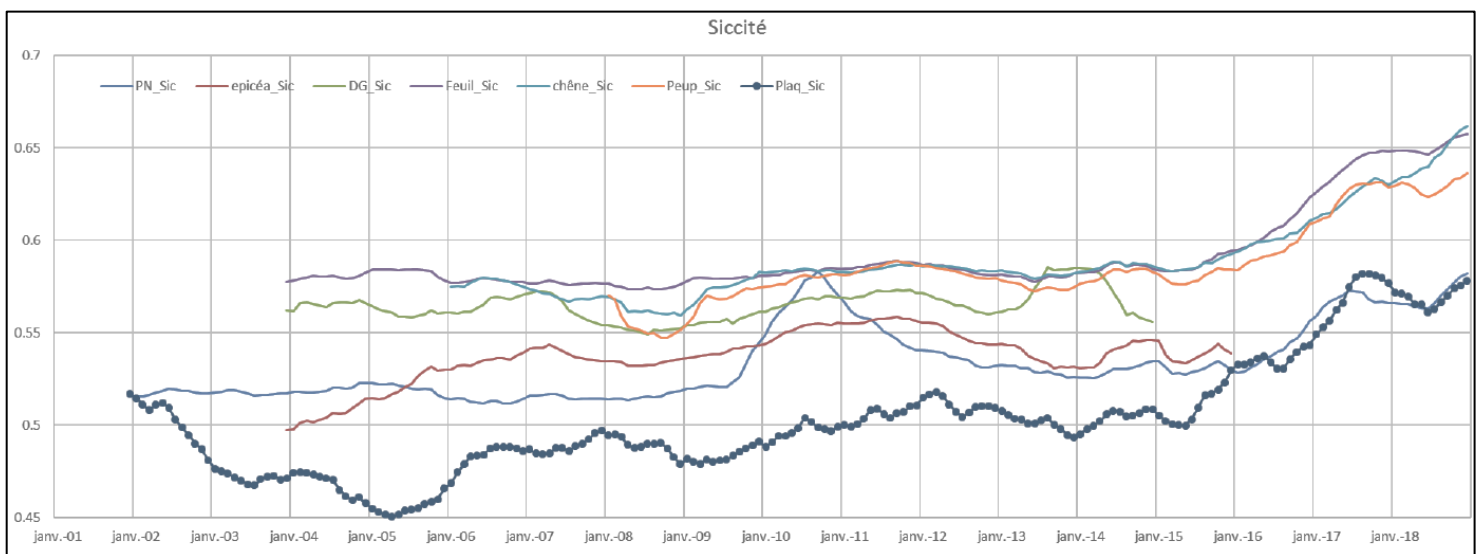


Figure 13 : moyenne mobile de la siccité sur 12 mois pour les différents groupes considérés

A conditions météorologiques égales (Figure 14), les pins et les résineux dans leur ensemble présentent des siccités plus élevées sur la période 2015-2018.

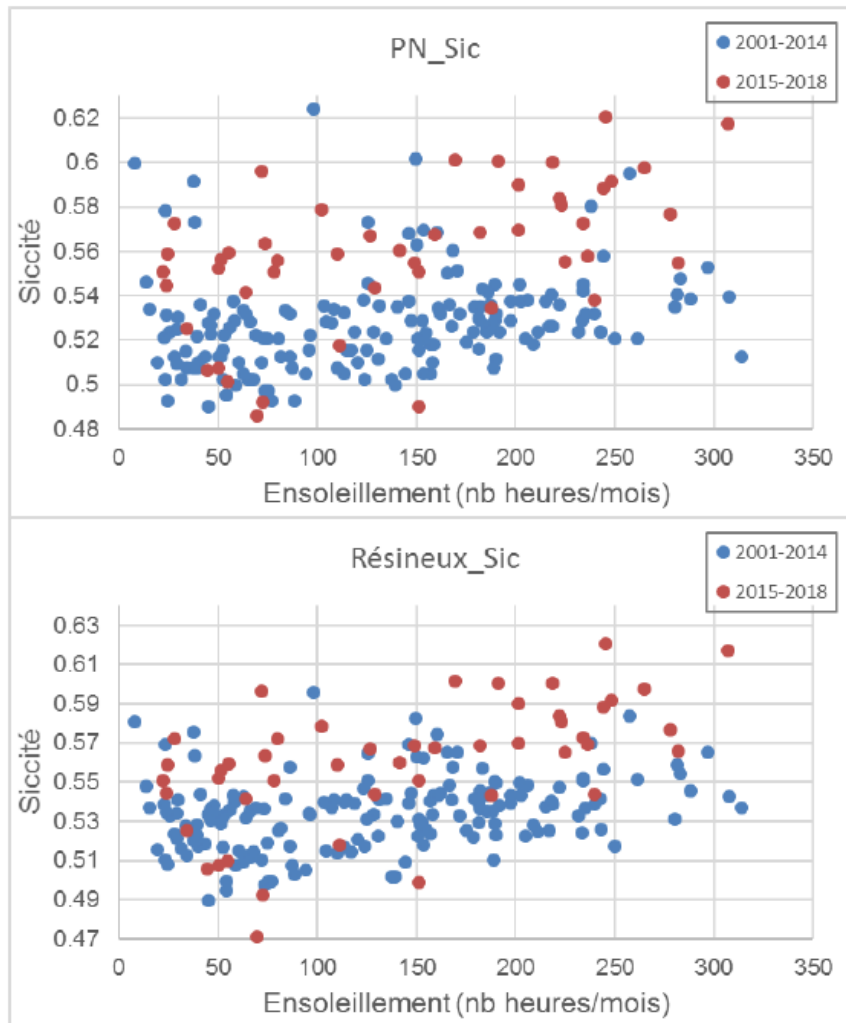


Figure 14 : siccité en fonction de l'ensoleillement mensuel pour les pins et les résineux dans leur ensemble.

Pour les feuillus, la différence entre les périodes 2001-2014 et les périodes 2015-2018 sont particulièrement marquées. La période la plus récente présente les siccités les plus élevées (Figure 15).

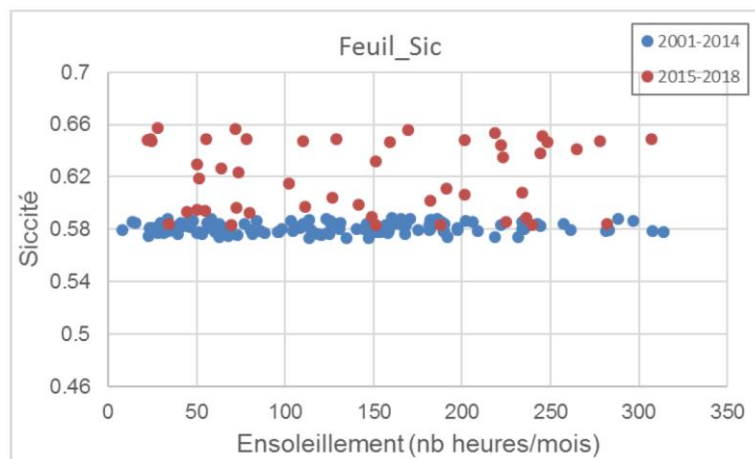


Figure 15 ; siccité des feuillus en fonction des périodes d'étude et de l'ensoleillement

2.4 Résultats globaux

Dans l'ensemble, les résultats semblent montrer une augmentation de la siccité dans la période les plus récente (Figure 16).

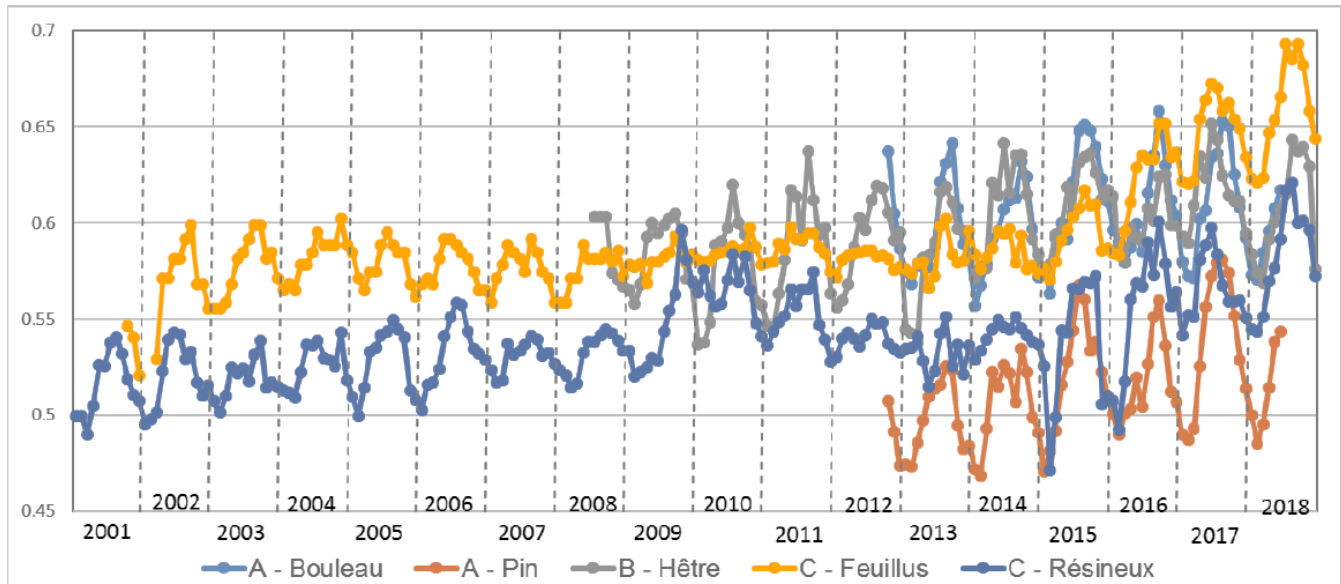


Figure 16 : siccité mensuelle moyenne sur les trois site pour différentes essences

La mise en place de modèles pour déterminer s'il existe une tendance générale à une évolution de la siccité (intégrant la variabilité saisonnière) permet de calculer un coefficient quantifiant cette évolution tableau suivant (Figure 17). Un coefficient positif indique une tendance à l'augmentation et un coefficient négatif à une diminution (un coefficient de 0,36 signifie une augmentation moyenne de la siccité sur la période de 0,36 par an par exemple). Ces coefficients sont presque toujours positifs et souvent significatifs.

		Coefficients tendanciels	
		Valeur	Proba = 0
Usine B (10 années)	Feuillus durs	0.36	***
	Hêtre	0.37	***
	résineux	-0.15	*
	dosses	0.39	***
	plaquettes	0.19	*
	sciures	0.53	***
	Chutes	0.15	Ns
Usine A (5 années)	Douglas	0.67	*
	Bouleau	0.31	Ns
	Pins	0.75	***
Usine C (18 années)	Feuillus	0.40	***
	Résineux	0.28	***

Figure 17 : coefficient tendanciels pour la variation de la siccité. NS = non significatif ; * = significatif au seuil de 5% ; *** = significatif au seuil de 1%

Mais ces résultats sont à moduler car la tendance bien souvent n'est pas régulière sur la période considérée. On peut parfois observer un changement brutal avec 2 périodes de relative stabilité avant et après ce changement. La comparaison d'un modèle global (Figure 18) et d'un modèle segmenté (Figure 19) sur les données hêtre de l'usine B montre dans le deuxième cas, qu'il ne peut être observé d'effet tendanciel dans chacune des périodes considérées. Un changement dans le mode d'approvisionnement pourrait expliquer les différences observées.

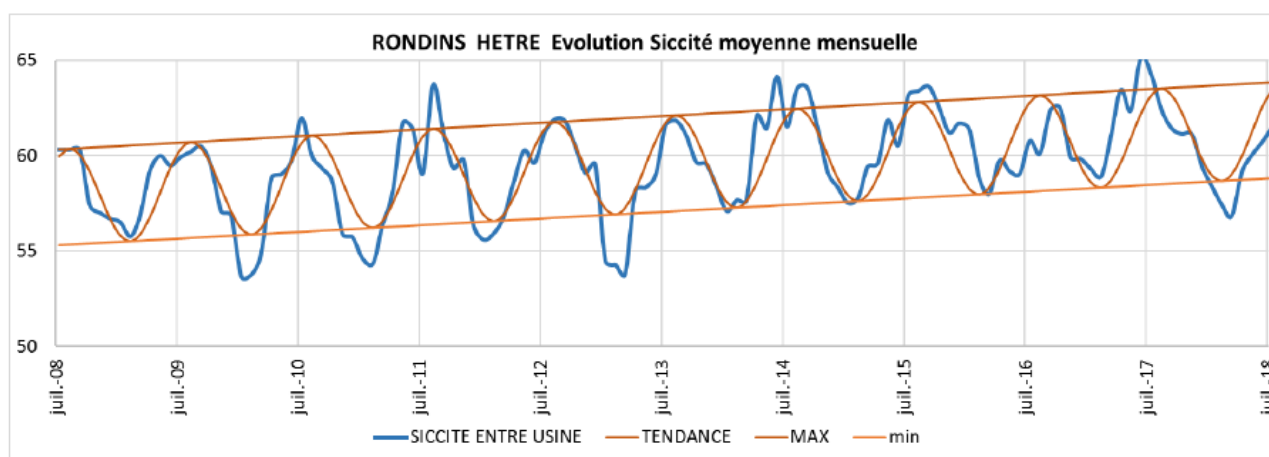


Figure 18 : modèle global de l'évolution de la siccité semblant montrer une augmentation générale

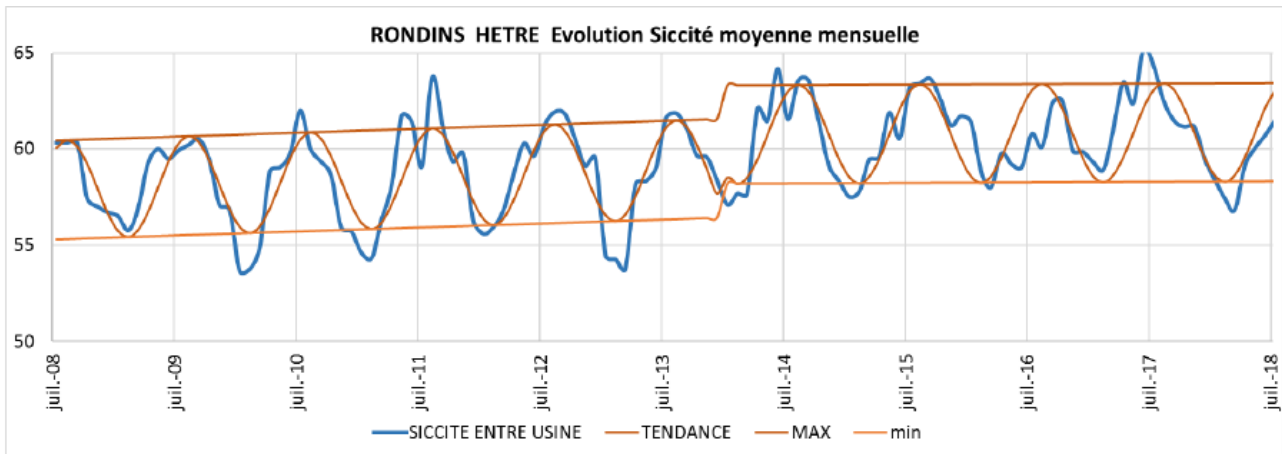


Figure 19 : modèle segmenté sur deux périodes ne permettant pas de montrer d'évolution tendancielle sur chacune des deux périodes considérées

Le deuxième modèle est statistiquement meilleur que le premier.

2.5 Conclusion partielle

De nombreux paramètres influencent la teneur en eau des arbres et donc la siccité des bois ronds frais d'abattage.

Les conditions météorologiques des jours qui précèdent la réception en usine des bois ronds influencent leur siccité, et les variations saisonnières de siccité des bois à la réception suivent d'année en année les mêmes grandes tendances.

La tendance d'évolution interannuelle des siccités observées sur 6, 10 et 18 ans dans trois usines ne permet pas de conclure à un effet « changement climatique », les délais de livraison (non connus) doivent également avoir une influence.

Les nombreuses données de siccité prises par les usines sur chaque camion entrant sont une réelle richesse qui semble t'il n'est que partiellement exploitée par les usines.

Ces données de siccité pourraient être combinées à d'autres informations parfois disponibles dans les SI des entreprises, comme par exemple : essences, fournisseurs, types de produits (diamètre et longueur de billons), massifs forestiers d'origine, dates de coupe ... pour approfondir la connaissance des facteurs impactant la siccité générer des modèles d'évolution de siccité, et par là même être en mesure de mieux gérer les approvisionnements et mieux répondre aux exigences des process. Il serait également intéressant de rechercher des facteurs externes aux entreprises : contexte économiques dans la filière, évènements sanitaires impactant les forêts, ...

3. Influence de la siccité sur les procédés de fabrication de panneaux

3.1 Contexte

L'objectif de l'étude est d'identifier les impacts de l'humidité du bois sur les étapes amont du process de production de panneaux à base de bois.

Les panneaux de process sont produits en plusieurs étapes, successives qui peuvent être résumées selon :

- Écorçage
- Mise en copeaux
- Déstructuration pour mise en forme avant pressage

L'humidité des matériels considérés a un impact sur les résultats de ces différentes étapes qui sont reprises dans les parties suivantes. Les informations synthétisées ici sont issues d'une revue bibliographique et de l'expérience acquise par les personnels FCBA impliqués dans différents projets de recherche.

3.2 Ecorçage

L'humidité joue un rôle direct sur la liaison écorce/bois. En effet, la relation est inversement exponentielle tel que présenté dans les figures suivantes (Figure 20, Figure 21).

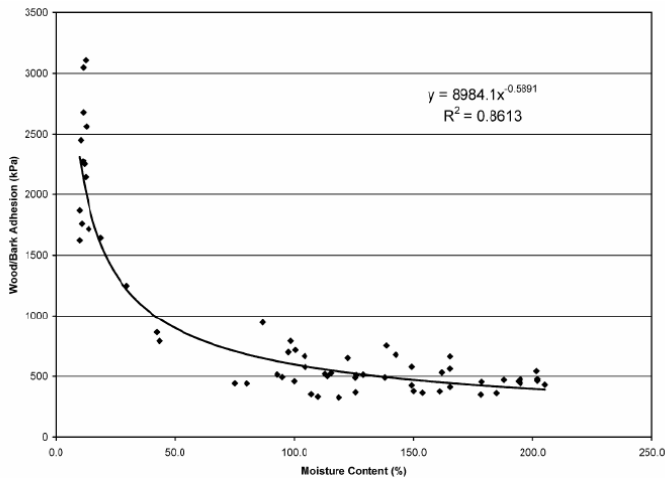


Figure 20 : Relation entre forces d'adhésion bois/écorce et humidité (sapin)

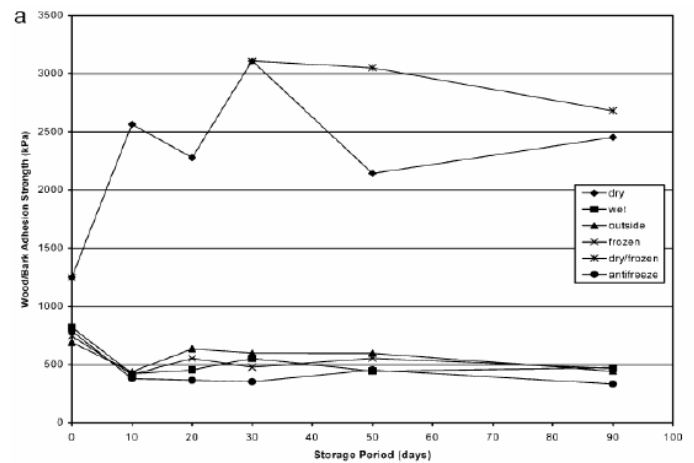


Figure 21 : Relations entre forces d'adhésion bois/écorce et temps de stockage (sapin) (BAROTH, 2005)

Plus le bois est sec est plus il sera difficile à écorcer. De fait, la facilité à écorcer au printemps est meilleure par rapport à la fin de l'été où le bois aura eu le temps de sécher après abattage. Egalement, un bois sec présentera un écorçage moins spécifique : les troncs ne seront que partiellement écorcés et des ruptures cohésives dans l'écorce plutôt qu'à l'interface bois/écorce seront plus nombreuses. Ainsi, les durées et conditions de stockage impactent indirectement l'adhésion bois/écorce en modifiant l'humidité des grumes.

Ces observations sont directement réalisables en forêt, où une grume ou billon juste abattu s'écorcera facilement. Dans le cas spécifique de l'eucalyptus, peu utilisé en Europe, il est nécessaire de réaliser un écorçage en forêt au risque de ne plus pouvoir réaliser de séparation entre écorce et bois une fois sur parc à bois.

3.3 Mise en copeaux

Lors du déchiquetage, les copeaux subissent l'action de couteaux et contre couteaux. Le comportement du bois lors de cette étape est relié à ses propriétés viscoélastiques. Elles dépendent de l'humidité et de la température, comme pour tout matériaux composite.

Ainsi, la dureté du bois varie avec l'humidité, plus le bois sera sec ou froid, plus il sera dur et aura tendance à éclater. Le bois est plus rigide, plus cassant. En conséquence, un bois sec générera plus de copeaux fins et des sciures. Le rendement après classage sera moins bon, et l'usure des couteaux prématurée.

Le phénomène mis en jeu est la température de transition vitreuse (T_g) qui varie avec l'humidité.

Par rapport à un bois humide, un bois sec présente une T_g supérieure de tous ses constituants : cellulose, hémicellulose et lignine. Par exemple, la lignine présente une T_g de 90 C pour un bois totalement saturé, valeur qui ne fera qu'augmenter avec la perte d'humidité. Ces évolutions sont directement observables sur le module de rupture tel que présenté dans la Figure 22.

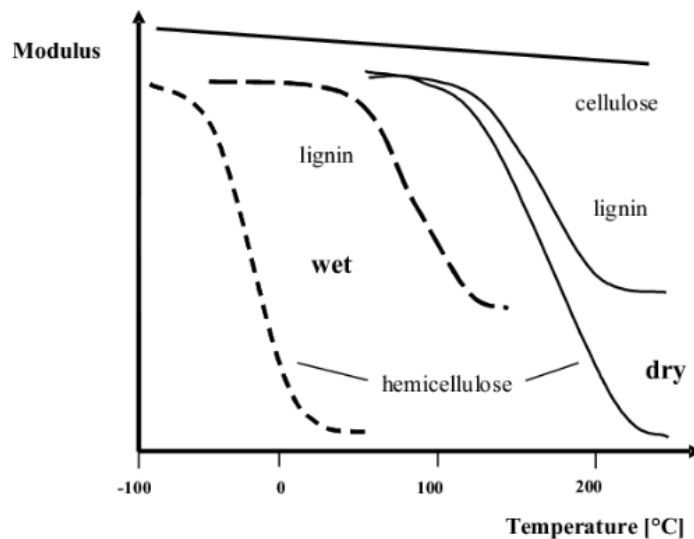


Figure 22 : module d'élasticité en fonction de la température pour les constituants structurels du bois (Morsing, 2000)

Humides, les constituants du bois présentent des modules équivalents, mais à des températures largement plus basses. Ainsi, un bois sec sera plus énergivore à déstructurer.

3.3.1 Déstructuration

✓ Cas des particules

Dans le cas des particules, le comportement au broyage sera similaire à ce qui a été précédemment décrit sur les copeaux : un bois sec sera plus cassant, les particules produites plus hétérogènes que sur un bois humide et plus énergivore tel que présenté en Figure 23.

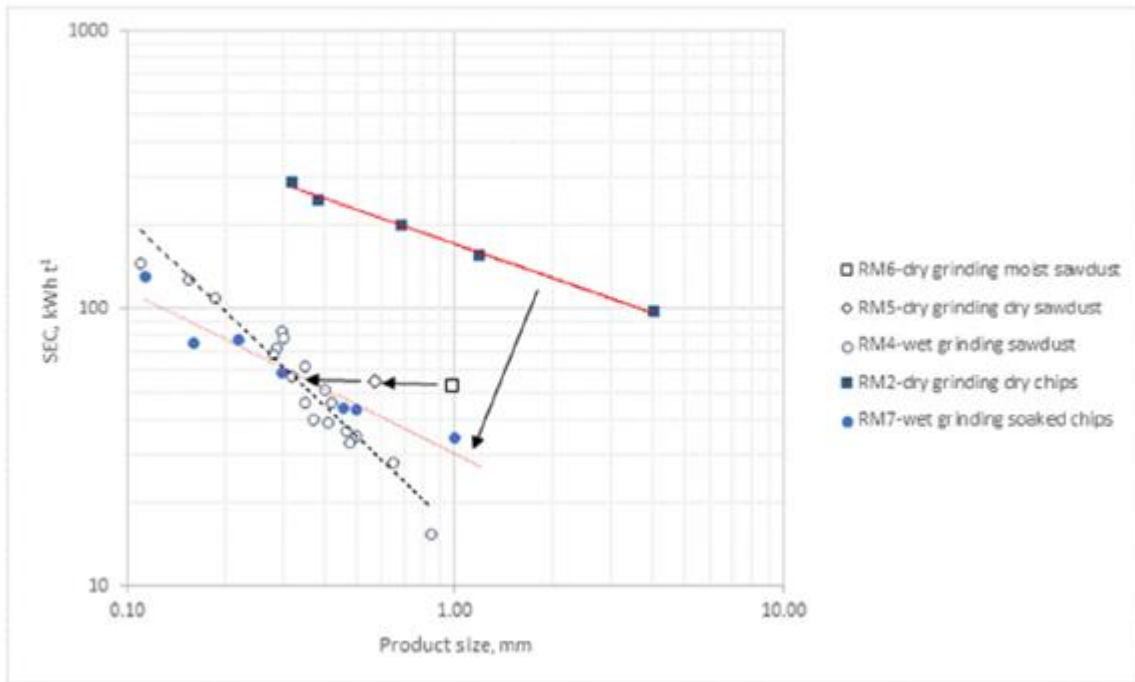


Figure 23 : Niveaux d'énergie requis pour le broyage comparatif de sciures et des copeaux secs ou humides (Pasi Karinkanta, 2018)

La réduction de dimension de copeaux ou de sciure est plus énergivore dans le cas de matériaux secs par rapport à des matériaux plus humides.

✓ Cas des fibres

Pour la production de fibres par défibrage à disque, pour des applications panneaux MDF ou isolants, il est à attendre des séparations entre les éléments constitutifs du bois moins sélectives sur bois sec : les ruptures de la matrice bois seront aléatoires (inter et intracellulaires), entraînant une plus grande hétérogénéité des éléments produits, en termes de taille et de constitution chimique extérieure. En effet, lors du défibrage à disque de copeaux, la séparation est attendue au niveau de la lamelle mitoyenne, en zone intercellulaire uniquement, tel que présenté dans la Figure 24, au niveau de la lamelle mitoyenne (ML).

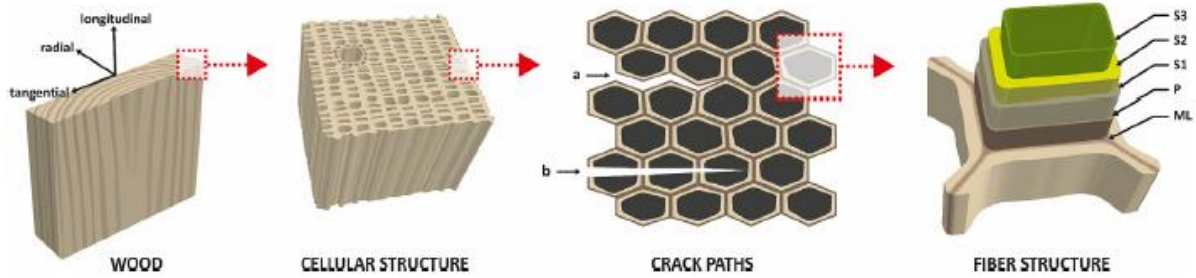


Figure 24 : Structure cellulaire du bois et de fibres individuelles. Les zones de rupture intercellulaires sont présentées en a, intracellulaires en b sur la 3ème figure ((Pasi Karinkanta, 2018))

C'est pour privilégier cette séparation et économiser de l'énergie de défibrage que les productions sont réalisées sous pression de vapeur, à plus de 150°C. Ces observations sont illustrées par les figures suivantes (Figure 25, Figure 26, (Takawa, 2018)).

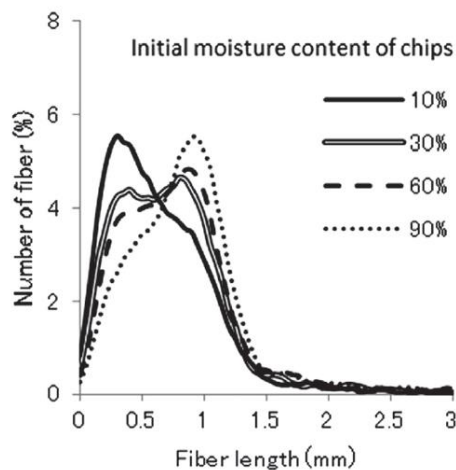


Figure 25 : Distribution des longueurs de fibres selon l'humidité des copeaux avant défibrage

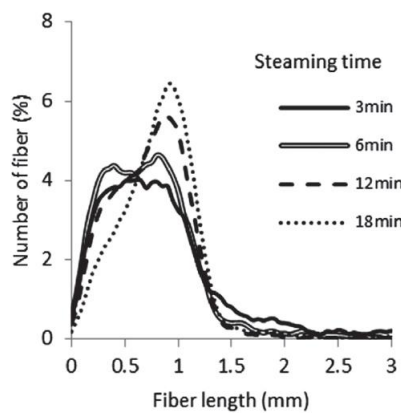


Figure 26 : Distribution des longueurs de fibres selon le temps d'étuvage pour des copeaux à 30% d'humidité

Plus l'humidité du bois augmente et plus la proportion de fibres longues augmente et centrée. Cet effet est similaire au temps d'étuvage : plus le bois est étuvé longtemps, plus la proportion de fibres longue augmente et l'homogénéité.

Des copeaux de bois humides se raffineront de façon plus sélectives et avec moins d'énergie, à température donnée, qu'un bois sec, en lien avec une température de transition vitreuse plus basse. Ainsi, si tous les bois étaient frais, il deviendrait possible de diminuer les températures de défibrage pour une consommation d'énergie identique.

Toutefois, cette variation d'humidité a peu de répercussion sur les performances panneaux, dans le cas du robinier, utilisé pour l'étude cité ici.

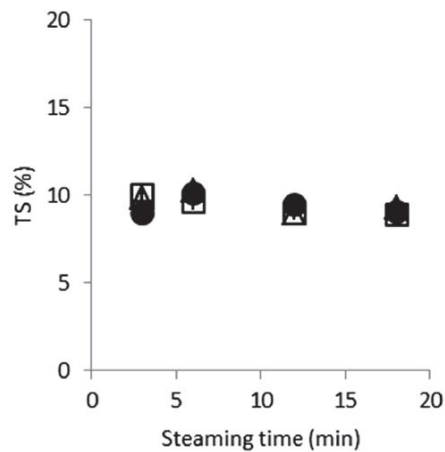


Fig. 7. Relationship between steaming time and thickness swelling (TS).

Notes : Initial moisture content of sample, ● : 10% ; □ : 30% ; △ : 60% ; + : 90%.

Figure 27 : Gonflement en épaisseur dans l'eau selon le temps d'étuvage pour des copeaux à différents niveaux d'humidité

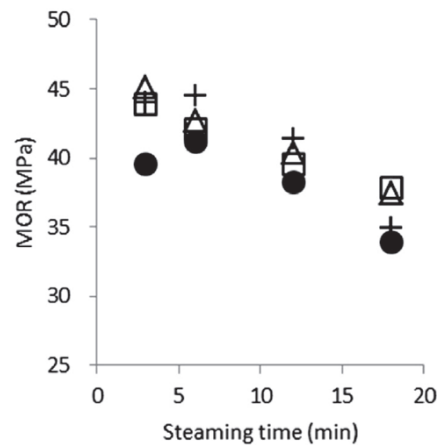


Fig. 5. Relationship between steaming time and modulus of rupture (MOR).

Notes : Initial moisture content of sample, ● : 10% ; □ : 30% ; △ : 60% ; + : 90%.

Figure 28 : Module de rupture selon le temps d'étuvage pour des copeaux à différents niveaux d'humidité

Le gonflement en épaisseur dans l'eau est insensible à l'humidité du bois, cette propriété est plus liée à la densité, à la nature des résines ou la nature du bois. De même, le module de rupture en flexion est peu impacté par l'humidité du bois, la nature et la quantité de résine restent les paramètres principaux. Ces observations semblent indiquer que la taille des fibres n'a pas de conséquence sur la qualité du MDF. Ces conclusions sont à la fois dues à l'essence

utilisée qui est un feuillu à fibre courte, le robinier, pour lequel les conséquences de la morphologie des fibres est largement compensée par la résine utilisée et par la quantité de résine ajoutée, trop importante pour observer un effet morphologie. Il n'a pas été possible de trouver une étude similaire sur un résineux, essence majoritairement utilisée pour ces applications et pour lesquels, des résultats inférieurs auraient été obtenus lors de l'usage de fibres plus courtes parce que défibrées moins sélectivement dans le cas de copeaux plus secs. En effet, les éléments fins entraînent une perte cohésion et leur présence nécessite d'augmenter le taux d'encollage pour garantir les performances des panneaux finaux.

En conséquence, l'humidité du bois impacte sur les consommations d'énergie, l'usure et la durée de vie des équipements de production au broyage. Les rendements de productions sont modifiés, que ce soit au déchetage pour l'obtention de copeaux à partir des rondins, au broyage pour l'obtention de particules ou de fibres par défibrage à disque.

3.4 Séchage des éléments

Quel que soit le procédé par voie sèche, une étape de séchage est indispensable avant la conformation et le pressage des mats. L'humidité des bois va directement impacter sur la consommation d'énergie de cette phase.

En effet, plus les éléments, particules ou fibres, introduits, seront secs et moins l'énergie calorifique requise pour évaporer l'eau sera grande.

3.5 Conclusion partielle

L'humidité du bois rond a peu de conséquences sur :

- L'interaction des panneaux MDF avec l'eau,
- Le MOR des panneaux MDF dans le cas d'un approvisionnement en feuillus exclusivement, dans le cas de résineux, des conclusions différentes seraient à attendre,
- Les performances des panneaux de particules dont le séchage intervient avant encollage/pressage.

L'humidité du bois rond a des conséquences sur :

- Le comportement viscoélastique du bois,
- La qualité de l'écorçage,
- Les types de ruptures et les dimensions lors de la mise en copeaux
- La sélectivité des productions,
- Lors du broyage pour particules,
- Au défibrage pour les fibres,
- La prolifération d'organismes biologiques,
- Nécessite des niveaux d'humidité > 18%/sec,
- Des températures idéalement > 20 C,
- Peut entraîner des pertes matières mais limitées / vitesse de séchage du bois

Conclusion générale

Cette étude a permis de mettre en lumière la complexité d'analyser des variations de siccité en entrée en usine, pour plusieurs raisons :

Les facteurs pouvant expliquer une variation de la siccité sont multiples. En identifier la cause est une tâche difficile, et au stade actuel une explication des variations ne peut être imputée uniquement à une cause liée au changement climatique, même si des variations liées à des conditions météorologiques ont pu être identifiées.

Par exemple, des changements dans les modes d'approvisionnement peuvent expliquer des variations de teneur en eau, notamment en raison des phénomènes de séchage mis en jeu, et qui peuvent se produire même au stade de billon. FCBA a notamment travaillé sur cette thématique concernant la modélisation du séchage de billons de bois d'industries ((FCBA, 2001)) et l'évolution de sa masse volumique après abattage ((FCBA, Fiche Information Forêt n°573, 1993)).

Il convient donc de suivre cette problématique avec attention dans un contexte de changement climatique, et il serait intéressant d'évoluer vers un suivi plus poussé de la teneur en humidité des billons depuis l'abattage, jusqu'au stockage sur les parcs à grumes.

Références

- BAROTH, R. (2005). *Literature review of the latest development of wood debarking*. Report A, n°27, 32p.
- Bréda, N. (1994). Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. *Biologie végétale*. Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- Chalk, L. B. (1956). The distribution of moisture in the living stem in sitka spruce and douglas fir. *Forestry* 29, 5-21.
- Clark, A. -D. (n.d.). ESTIMATING MOISTURE CONTENT OF TREE-LENGTH ROUNDWOOD.
- Clarks, J. G. (1957). Studies in tree physiology : IV Further investigations of seasonal changes in moisture content of certain canadian forest trees. *Canadian Journal of Botany*, 35, 219-253.
- FCBA. (1993). *Fiche Information Forêt n°573*. <https://www.fcba.fr/sites/default/files/fif573.pdf>
- FCBA. (2001). *Fiche Information Forêt n°636*. <https://www.fcba.fr/sites/default/files/fif636.pdf>
- Frédéric Mothe, R. M. (2000). Sécheresse à coeur du Douglas et aptitude au déroulage : recherche de procédés alternatifs d'étuvage. I Répartition de l'eau dans le bois vert et réhumidification sous autoclave. *Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences*, 2000, 57 (3), 219-228.
- H. Verbeeck, K. S. (2007). Model analysis of the effects of atmospheric drivers on. *Biogeosciences, European Geosciences*, 657-671.
- Hao, G.-Y. (2013). Investigating xylem embolism formation, refilling and water. *Journal of Experimental Botany* 64 (8), 2321-2332.
- Maks MERELA, I. S. (2007). Ressearch of anatomy and moisture distribution in beech and oak wood by 3D MR imaging technique. In J. K. S. KURJATKA, *Wood Structure and properties '06* (pp. 105-111). Arbora Publishers.
- Manwiller, F. (1975). Wood and Bark Moisture Contents of Small-Diameter Hardwoods Growing on Southern Pine Sites. *Wood Science vol 8 N°1*, 384-388.
- Moreno Vertovec, S. S. (2001). Diagnosing plant water status as a tool for quantifying water stress on a regional basis in Mediterranean drylands . *Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences*, 2001, 58 (2), 113-125.
- Morsing. (2000). Densification of wood : the influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. PhD Thesis n°R79. Department of structural engineering and marterials, Technical Univerity of Denmark.
- Noutier, M. C. (2014). Transpiration of silver Fir (*Abies alba* mill.) during and after drought in relation to soil properties in a Mediterranean mountain area. *Annals of Forest Science Sept 2014 71(6)* , 683-695.
- Pasi Karinkanta, A. Ä. (2018). Fine grinding of wood – Overview from wood breakage to applications . *Biomass and Bioenergy* 113 , 31-34.
- Perré, P. (2006). De l'eau dans l'arbre à l'eau dans le matériau bois : une introduction. *Rev. For. Fr.* 4, 305-315.
- Phillips, N. (2003). Reliance on stored water increases with tree size in three species in the Pacific Northwest. *Tree Physiology* 23, 237-245.
- Polge, H. (1964). Délimitation de l'aubier et du bois de coeur par analyse densitométrique de clichés radiographiques. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 1964, 21 (4), pp.605-623.
- Raiskila, S. P. (2007). FTIR spectroscopic prediction of Klason and acid soluble lignin variation in Norway spruce cutting clones. *Silva Fennica* 41(2), 351-371.
- Takawa. (2018). Change of moisture content and chemical composition of wood chips during the steaming process in the production of medium density fiberboard.
- Voelker, S. (2011). Transgenic poplars with reduced lignin show impaired xylem conductivity, growth efficiency and survival. *Plant, Cell and Environment* 34 (4), 655-668.