الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة وهران للعلوم و التكنولوجيا محمد بوضياف

THÈSE

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctorat en Sciences

Présentée par :

TERRAH Sidi Mohammed

Intitulée

Etude de la dégradation thermique d'un matériau poreux:

Application au matériau végétal

Faculté	*Physique*
Département	*Physique énergétique*
Spécialité	*Physique*
Option	*Physique des matériaux et des Plasmas*

Soutenue Le 25/11/2021
Devant le Jury Composé de :

Membres de Jury	*Grade*	*Qualité*	*Domiciliation*
KAMECHE MOSTEFA	*Professeur*	*Président*	*USTO-MB*
ZEKRI NOUREDINE	*Professeur*	*Encadreur*	*USTO-MB*
SIB JAMAL DINE	*Professeur*	*Examinateur*	*Univ1– Ahmed BEN BELLA Oran*
OUELD KADDOUR FOUZIA	*Professeur*	*Examinateur*	*Univ- Tlemcen AB B*
GHAMNIA MOSTEFA	*Professeur*	*Examinateur*	*Univ- Oran 1 AB*

Année Universitaire : 2021/2022

بسم الله الرحمن الرحيم

قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا
إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ

صدق الله العظيم

« اللهم لا علم لنا إلا ما علمتنا، إنك أنت العليم الحكيم، اللهم علمنا ما ينفعنا، وانفعنا بما علمتنا، وزدنا علما »

Je dédie le fruit de ce modeste travail

A ce qui m'est très chers dans cette vie : ma famille

- *Ma très chère et bien aimée épouse, le solide appui sur qui je peux toujours compter,*
- *Mes enfants adorables, Mohammed, Chems et Abderrahmane*

Que Dieu les protège

A la mémoire de mes très chers défunt parents
A la mémoire de ma très chère défunt sœur Nadira

" Que Dieu leur accorde sa miséricorde et les accueille dans son paradis"

Remerciements

*Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du L. E. P .M "**L**aboratoire d ’**E**tudes **P**hysiques des **M**atériaux" de l’Université des Sciences et de la Technologie d’Oran-Mohamed Boudiaf- dirigé par le professeur **ZEKRI Nouredine**.*

*Que le professeur **ZEKRI Nouredine** trouve ici l’expression de ma gratitude et ma reconnaissance pour le privilège qu’il m’a offert en m’encadrant et en me guidant le long de ce travail, il a toujours mis ses connaissances à ma disposition. Ses qualités scientifiques, sa rigueur, sa grande disponibilité et sa patience ont largement contribué à l’aboutissement de ce travail de thèse.*

*Je tiens à remercier le professeur **Mostefa KAMECH** pour m’avoir fait l’honneur de présider mon jury.*

*Le professeur **Jamal Dine SIB** est vivement remercié pour son aide et sa disponibilité, je lui exprime ma profonde reconnaissance et je le remercie également pour avoir accepté de juger ce travail.*

*J’exprime également ma gratitude au professeur **Fouzia OULD KADDOUR et professeur Mostefa GHAMNIA** pour avoir accepté d’examiner ce travail.*

Je remercie profondément tous les membres de ma famille pour m’avoir toujours supporté, encouragé, soutenu et poussé en avant, leur amour et leur compréhension sont indiscutablement la source de mon bonheur.

J’adresse toute ma gratitude à tous les membres de l’équipe Feux du Laboratoire « LEPM » qui m’ont beaucoup soutenu et aidé dans les manipulations, ils sont formidables. Je leur souhaite beaucoup de réussite et de courage.

*Je ne peux terminer ces quelques lignes sans citer Professeur **Lotfi ZEKRI** à qui j’adresse mes vifs remercîments. Merci Pr Lotfi pour votre disponibilité, votre esprit positif et l’ambiance que vous savez faire régner au laboratoire.*

Liste des figures

Figure I.1 : *Caractéristiques typiques de l'inflammabilité [8]* _____ *22*
Figure I.2 *: Modèle original de réseau de petit monde de Watts et Strogatz (Watts & Strogatz , 1998)[16]. On distingue les connections limitées aux plus proches voisins et celles à longue distance (ou courts circuits) représentées par une ligne rouge* _____ *36*
Figure II.1 : *Représentation conceptuelle du processus de séchage thermique pour matériau végétal solide[6]* _____ *42*
Figure II.2 : *isothermes de désorption adsorption [11]* _____ *46*
Figure II.3 : *Différentes zones d'une isotherme de sorption [11]* _____ *46*
Figure II.4 : *Courbe de séchage M=f(t)[10]* _____ *47*
Figure II.5 : *Courbe de séchage -dM/dt = f(t) [10]* _____ *47*
Figure II.6: *Courbe de séchage - dM/dt=f(M) [10]* _____ *48*
Figure II.7 : *|∂H/∂W|T vs W pour différentes températures pour le bois [1]* _____ *55*
Figure II.8 : *H vs W pour différentes températures et pour le bois [1]* _____ *56*
Figure II.9 : *Δcp en fonction de la teneur en eau pour différentes températures pour le bois [1]* _____ *57*
Figure II.10 : *Ajustement des différents paramètres de la chaleur de désorption (II.13)* ____ *59*
Figure II.11 : *Temps d'inflammation vs teneur en eau calculé avec le model de Koo & Pagni avec et sans introduction de la chaleur de désorption.* _____ *60*
Figure II.12 : *a) La répartition de la masse séchée pour une masse initiale m0 = 20g et des temps de séchage différents, b) La masse moyenne de séchage vs masse m0 initiale pour différents temps de séchage (t).* _____ *65*
Figure II.13 : *a) Une représentation schématique de la configuration expérimentale ; b) unéchantillon d'aiguilles fraîches, c) des aiguilles sèches.* _____ *66*
Figure II.14 : *tignvs. wc-w en double échelle logarithmique pour: a) divers flux de chaleur et saisons, b) diverses masses d'échantillons. Les résultats de Trabaud pour les combustibles morts sont inclus dans la figure II.14b à des fins de comparaison. wc=100%.* _____ *69*
Figure II.15 : *Temps d'allumage en fonction de la teneur en humidité sur une échelle semi-logarithmique. a) l'effet des saisons (m_0=15g), b) l'effet du flux incident (m_0=15g), c) l'effet de la masse de l'échantillon.* _____ *71*
Figure II.16 : *a) Double échelle logarithmique de tign vs. q"-q"c pour les aiguilles de pinus halepensis fraîches et sèches, b) un schéma de diagramme de phase flux chaleur /d'humidité montrant la transition allumage/non allumage.* _____ *72*
Figure II.17 : *Une représentation schématique des énergies d'allumage et de combustion par rapport à la teneur en humidité w. Les seuils d'allumage et de propagation sont clairement indiqués.* _____ *74*
Figure III.1 : *Corrélation perte de masse/composition du végétal [1]* _____ *83*
Figure III.2 : *Photos de l'arbre de pin d'Alep, a) Foret ; b) Arbre ; c) Aiguilles et fruit de pin d'Alep* _____ *88*
Figure III.3 : *Emissions relatives de COV par des aiguilles de Pinus pinea à différentes températures. (d'après Léo Courty [8])* _____ *90*

Figure III.4 : *schéma de l'aiguille de pin d'Alep* 94
Figure III.5 : *Forme d'une pastille après démoulage* 95
Figure III.6 : *Processus de transformation endothermique et exothermique* 98
Figure III.7 : *Distribution des pores sur une surface d'aiguille de pin d'Alep frais (humide)* 101
Figure III.8 : *Taille d'un pore sur une aiguille de pin d'Alep frais (humide)* 101
Figure III.9 *: Distribution des pores sur une surface d'aiguille de pin d'Alep séchée pendant 3mn dans le micro-onde.* 101
Figure III.10 : *Taille d'un pore sur une aiguille de pin d'Alep séchée pendant 3mn dans le micro onde.* 101
Figure III.11 : *Taille d'un pore sur une aiguille de pin d'Alep séchée dans une chambre climatique.* 102
Figure III.12 : *Perte de masse en fonction de la température et du signal (Aiguilles de pin d'Alep sèches)* 104
Figure III.13 : *Perte de masse et tension du signal en fonction de la température (Aiguilles de pin fraiches)* 104
Figure III.14 : *Variation de Cp en fonction de la température des aiguilles de pin sèches* 105
Figure III.15 : *L'inverse du temps d'inflammation en fonction du flux simulation et expérience* 106
Figure IV.1 : *Banc thermique d'essai* 115
Figure IV.2 *: L'évolution de la vitesse de la propagation pour chaque teneur en eau de la végétation : a) Séchage au Micro-ondes, b) Séchage dans la chambre climatique, c) Végétation morte.* 119
Figure IV.3 : *Profil de température à différentes positions des thermocouples ; A) Végétation séchée pendant 3min aux micro-ondes, B) Végétation Séchée pendant 1min 15s* 120
Figure IV.4 *: Liquide d'aspect huileux extrait de la végétation lors du séchage dans la chambre climatique et déposé sur le hublot de l'appareil.* 121
Figure IV.5 : *A) Schéma d'une flamme ascendante sur table inclinée. B) Photo de la table d'essai de propagation utilisée* 124
Figure IV.6 : *Le profil des vitesses à chaque angle d'inclinaison de la table de propagation* 124
Figure IV.7 : *A) Allure de la vitesse en fonction de la pente. B) Température en fonction du temps de passage de la flamme aux endroits des thermocouples* 125
Figure IV.8 : *Le profil des vitesses moyennes pour des pentes avec inclinaisons : a) 18°, b) 13° et c) 0°* 126
Figure IV.9 : *Photo montrant la propagation de la flamme sur banc d'essai du laboratoire « LEPM » (Vue de dessus)* 126

Liste des tableaux

Tableau II.1 : *paramètres d'ajustement de la chaleur de désorption en fonction de W (Fig.II.9) _____ 58*
Tableau II.2 : *paramètres d'ajustement de (II.21) (Figure II.10) _____ 58*
Tableau III.1 : *Analyse constitutionnelle (%) de Pinus pinaster (d'après Barboni et coll., 2010 et Leroy et coll., 2009) _____ 88*
Tableau III.2 : *Composition chimique de l'huile essentielle des aiguilles de Pinus halepensis Mill. [28] _____ 89*
Tableau III.3 : *Masse volumique moyenne (ρmoy) des aiguilles de pin d'Alep frais et sec_ 99*
Tableau III.4 : *masse volumique moyenne (ρmoy) des aiguilles de pin d'Alep fraiche et sèche (méthode pycnométrique)_____100*
Tableau III.5 : *Rapport surface /volume moyen (m^(-1)) (état naturel)_____100*
Tableau III.6 : *Rapport surface / volume du pin d'Alep (m^(-1)) (état de pastilles)_____100*
Tableau III.7 : *Diamètres des pores (effet du procédé du séchage sur la taille des pores)_102*
Tableau IV.1 : *Les distances des barrières par rapport à la première ligne d'allumage de la litière _____ 115*
Tableau IV.2 : *Structure des aiguilles de Pin d'Alep _____ 116*
Tableau IV.3 : *Structure de la litière _____ 116*
Tableau IV.4 : *Les différentes valeurs de la teneur en eau correspondantes à chaque temps de séchage dans la chambre climatique_____ 117*
Tableau IV.5 : *Les différentes valeurs de la teneur en eau correspondantes à chaque temps de séchage dans la chambre climatique_____ 117*
Tableau IV.6 : *Valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme à chaque temps de séchage aux micro-ondes_____ 120*
Tableau IV.7 : *Les valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme correspondant à chaque temps de séchage dans la chambre climatique _____ 121*
Tableau IV.8 : *Les valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, la teneur en eau, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme dans le cas de la végétation morte _____ 122*
Tableau IV.9 : *Extrait des études réalisées en laboratoire sur l'effet de la pente [15] ___ 123*
Tableau IV.10 : *La vitesse de propagation pour chaque pente _____ 125*

Résumé

Les résultats obtenus dans le présent travail sont pratiquement tous issus d'études expérimentales réalisées dans le laboratoire de physique des matériaux « LEPM » de l'université Mohamed Boudiaf « USTO » Oran. A travers ces expériences nous avons présenté dans un premier temps l'intérêt des procédés de séchage et leur influence sur la composition chimique d'une végétation en démontrant que le moyen le plus efficace pour faire sécher une espèce végétale est l'utilisation des micro-ondes (ceci est valable aussi pour les produits agroalimentaires). L'efficacité des dessiccateurs micro-onde réside dans le temps très réduit de séchage et la sauvegarde de l'essentiel des composants organiques de l'espèce.

Moyennant un cône calorimètre, le système de séchage par micro-ondes et en se basant sur la théorie de transition de phases, l'influence du paramètre « teneur en eau » d'une végétation sur son inflammation a été étudiée dans le but de déterminer une humidité critique pour l'inflammation. Les résultats obtenus ont montré l'inexistence d'une humidité critique pour l'inflammation, mais plutôt d'un flux critique d'inflammation. Ce résultat est considéré comme important dans les cas des feux de forêt, du fait que même une végétation très humide peut s'enflammer si le flux de chaleur incident dépasse un certain seuil de puissance. L'analyse des résultats des tests exprimant le temps d'inflammation en fonction de la teneur en eau de la végétation a mené également à la détermination d'une humidité caractéristique dont l'interprétation indique qu'au-delà de cette humidité le temps d'inflammation augment de manière exponentielle.

L'effet de saison et de l'intensité du flux incident sur le processus d'allumage (pyrolyse) a aussi été pris en considération dans la présente étude. Il a été montré que les saisons de même que l'intensité du flux incident n'ont pas d'influence sur ce processus. Ceci est confirmé à travers les mesures de temps d'inflammation lors des tests menés sur la même espèce de végétation mais dans différentes saisons et avec des flux différents.

La dégradation thermique du matériau végétal entant que matériau poreux a été étudiée en mesurant sa perte de masse par deux moyens, pendant son exposition à un flux thermique radiatif et en utilisant les analyses thermogravimétriques et calorimétriques (DSC couplée à l'ATG). Les effets des paramètres physiques (humidité, porosité) et thermique (flux thermique) sur le processus de dégradation thermique du matériau ont été mis en évidence.

La vitesse de propagation du feu en fonction de l'humidité de la végétation ainsi que l'humidité critique de propagation ont été déterminées expérimentalement, en utilisant des tables de végétation. Les résultats obtenus sont destinés à améliorer les performances du code de simulation de propagation du feu développé par le laboratoire.

Enfin, il a été démontré que l'introduction de la chaleur de désorption additionnelle dans le modèle physique de Koo et Pagni pour la détermination numérique du temps d'inflammation de la végétation n'a pratiquement aucune influence sur le comportement de ce temps. La variation de ce temps en fonction de la teneur en eau conserve la linéarité dans les deux cas avec ou sans introduction de cette énergie dans le modèle. Ce comportement linéaire est en désaccord avec les résultats expérimentaux ci-dessus qui montrent un comportement exponentiel.

Mots clés

Desorption, criticalmoisture, dryingprocess, pyrolyse, flammability,Combustion
Désorption, humidité critique, procédé de séchage, pyrolyse, inflammabilité, Combustion

Abstract

The results obtained in this work are practically all derived from experimental studies carried out in the "LEPM" materials physics laboratory of University Mohamed Boudiaf "USTO" Oran. Through these experiments, we first presented the interest of drying processes and their influence on the chemical composition of vegetation by demonstrating that the most effective way to dry a plant species is the use of micro- waves (this is also valid for agrifood products). The effectiveness of microwave dryers lies in the very short drying time and the preservation of most of the organic components of the species.

Using a cone calorimeter, the microwave drying system and based on the phase transition theory, the influence of the parameter "water content" of vegetation on its inflammation was studied in order to determine critical moisture for inflammation. The results obtained showed that there was no critical moisture for flammability, but rather a critical inflammation flux. This result is considered important in the case of forest fires, since even very humid vegetation can ignite if the incident heat flux exceeds a certain power threshold. The analysis of the results of the tests expressing the ignition time as a function of the water content of the vegetation also led to the determination of a characteristic moisture, the interpretation of which indicates that beyond this humidity the time of flammability increases exponentially.

The effect of season and the intensity of the incident flux on the ignition process (pyrolysis) was also considered in this study. It has been shown that the seasons as well as the intensity of the incident flow have no influence on this process. This is confirmed by measurements of ignition time in tests carried out on the same species of vegetation but in different seasons and with different fluxes.

The thermal degradation of vegetation as a porous material was studied by measuring its mass loss by two means, during its exposure to a radiative heat flux and by using thermogravimetric and calorimetric analyzes (DSC coupled with ATG). Effect of physical characteristics (moisture, porosity) and thermal parameters (thermal flux) on the process of thermal degradation of the material were highlighted.

The speed of fire propagation as a function of the moisture of the vegetation as well as the critical moisture of propagation were determined experimentally, using vegetation tables. The results obtained are intended to improve the performance of the propagation simulation code. fire developed by the laboratory.

Finally, it has been shown that the introduction of the additional heat of desorption into the physical model of Koo and Pagni for the numerical determination of the ignition time of vegetation has virtually no influence on the behavior of this time. The variation of this time as a function of the water content maintains linearity in both cases with or without introducing this energy into the model. This linear behavior is in disagreement with the experimental results above which show an exponential behavior.

Key Words

Desorption, critical moisture, drying process, pyrolyse, flammability,Combustion

ملخص

جميع النتائج التي تم الحصول عليها في هذا العمل مستمدة عمليا من الدراسات التجريبية التي أجريت في مختبر دراسة فيزياء المواد"**م د ف م**" التابع لجامعة محمد بوضياف وهران. من خلال هذه التجارب، قدمنا أولاً الاهتمام بعمليات التجفيف وتأثيرها على التركيب الكيميائي للغطاء النباتي من خلال إثبات أن الطريقة الأكثر فعالية لتجفيف نوع نباتي هي استخدام الموجات الدقيقة (وهذا صالح أيضًا لمنتجات الأغذية الزراعية). تكمن فعالية مجففات الميكروويف في وقت التجفيف القصير جدًا والحفاظ على معظم المكونات العضوية للأنواع.

باستخدام المسعر المخروطي ونظام التجفيف بالميكروويف واستناداً إلى نظرية المرحلة الانتقالية، تمت دراسة تأثير معامل "المحتوى المائي" للنبات على التهابه من أجل تحديد الرطوبة القصوى للالتهاب. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه لا توجد رطوبة قصوى للالتهاب، بل هناك تدفق حرج للالتهاب. تعتبر هذه النتيجة مهمة في حالة حرائق الغابات، حيث يمكن حتى للنباتات شديدة الرطوبة أن تشتعل إذا تجاوز تدفق الحرارة الساقط حدًا معينًا من الطاقة. أدى تحليل نتائج الاختبارات التي تعبر عن وقت الاشتعال بدلالة المحتوى المائي للنباتات أيضًا إلى تحديد قيمة خاصية للرطوبة، والتي يشير تفسيرها إلى أنه بعد هذه الرطوبة، يزداد وقت الالتهاب بشكل كبير.

تمت دراسة تأثير الموسم وشدة التدفق الساقط على عملية الاشتعال (الانحلال الحراري) في هذه الدراسة. لقد ثبت أن الفصول وكذلك شدة تدفق الحادث ليس لهما تأثير على هذه العملية. يتم تأكيد ذلك من خلال قياسات وقت الاشتعال في الاختبارات التي أجريت على نفس النوع من النباتات ولكن في مواسم مختلفة وبتدفقات مختلفة تمت دراسة التحلل الحراري للمادة النباتية كمادة مسامية عن طريق قياس فقدها الكتلي بطريقتين، أثناء تعرضها لتدفق حرارة إشعاعي وباستخدام التحاليل الحرارية (DSC مقترنة بـATG) و تم تسليط الضوء على فعاليات العوامل الفيزيائية (الرطوبة ، المسامية) و الحرارية (تدفق الحراري) على عملية التحلل الحراري للمادة.

تم تحديد سرعة انتشار الحريق بدلالة رطوبة الغطاء النباتي وكذلك رطوبة الانتشار الحرجة بشكل تجريبي باستخدام طاولة الغطاء النباتي. تهدف النتائج التي تم الحصول عليها إلى تحسين أداء نموذج محاكاة انتشار الحريق الذي طوره المختبر.

أخيرًا، ثبت أن إدخال الحرارة الإضافية للامتصاص في النموذج المادي"كو و باغني" من أجل التحديد العددي لوقت اشتعال الغطاء النباتي ليس له أي تأثير عمليًا على سلوك هذا الوقت. إن التغير في هذا الوقت كدالة لمحتوى الماء يحافظ على الخطية في كلتا الحالتين مع أو بدون إدخال هذه الطاقة في النموذج. هذا السلوك الخطي لا يتفق مع النتائج التجريبية المذكورة أعلاه والتي تظهر السلوك الأسي.

الكلمات الدالة

الامتصاص، الرطوبة الحرجة، عملية التجفيف، الانحلال الحراري، القابلية للاشتعال، الاحتراق

Sommaire

Résumé 4

Introduction 13

CHAPITRE I

Généralités 17

I. Généralités sur les feux 18
I.1 Qu'est-ce qu'un feu ? 18
I.2 Combustible et Processus de Combustion 18
I.3 Inflammation du combustible. Entretient de la flamme 19
I.3.1 Inflammation d'un Gaz 19
I.3.2 Inflammation d'un Liquide 19
I.3.3 Inflammation d'un Solide 20
I.4 Types d'allumage 20
I.5 Limites d'inflammabilité 20
I.6 Energie d'activation 22
I.7 Puissances Thermiques 22
I.7.1 Puissance thermique fournie par la combustion 23
I.7.2 Puissance thermique dissipée dans le milieu 24
I.8 Bilan entre puissance dégagée et dissipée 24
I.9 Auto-inflammation d'un système physico-chimique 24
I.9.1 Définition 24
I.9.2 Etat physique du combustible 25
I.9.3 Nature de l'auto-échauffement 25
I.9.4 Intervalle de temps nécessaire pour déclencher l'auto-combustion 25
I.10 Vitesse de combustion 25
I.11 Incandescence 26
I.11.1 Allumage de l'incandescence 26
I.11.2 Entretient de l'incandescence 26
I.11.3 Evolution de l'incandescence 27
I.11.4 Apparition de la flamme 28
I.12 Feu avec flammes 28

I.13 Explosion 29
I.14 Cas particulier : L'auto-échauffement 29
I.15 Combustible Végétal 30
I.16 Feux de Forêt 31
I.16.1 L'origine des feux de forêt 31
I.16.1.1 Quels sont les facteurs de prédisposition ? 31
A) Le type de végétation et le climat 31
B) L'occupation du sol 32
I.17 La propagation du feu 32
I.18 Les mécanismes de transfert de chaleur 33
I.18.1 La convection 33
I.18.2 La conduction 33
I.18.3 Le rayonnement 33
I.19 Echelles d'études des Feux 34
I.20 Les Modèles de Propagation 35
Références bibliographiques (Ch.I) 37

CHAPITREII

Teneur en Humidité de la Végétation et son Influence sur les Feux de Forêts 38

II.1 Teneur en Eau d'une Végétation 40
II.1.1 Méthode de Mesure 40
II.1.2 Procédés de séchage 41
II.1.3 Mécanismes de Séchage 41
II.1.4 Techniques de Séchages 43
II.2 Caractérisation des Matériaux Humides 44
II.3 Activité de l'Eau 44
II.4 Adsorption / Désorption d'un Matériau Humide (Végétation) 45
II.5 Isotherme de Désorption 45
II.6 Cinétique de séchage 47
II.6.1 Courbe de séchage 47
II.7 Inflammabilité et Teneur en eau d'un Combustible Végétal 49
II.8 Caractéristiques des Combustibles Affectant la Teneur en Humidité 50
II.8.1 Composition Chimique 50
II.8.2 Structure Interne 51
II.8.3 Propriétés Physiques 51

II.9 Energie de Désorption 52
II.10 Energie Nette d'Inflammation 53
II.11 Etude de l'effet de l'énergie de désorption sur le temps d'inflammation d'un matériau végétal 54
II.12 L'existence ou non d'une humidité critique d'inflammation 60
II.12.1 Protocole d'Expérimentation 63
II.12.2 Résultats et discussions 68
Références bibliographiques (Ch.II) 76

CHAPITRE III

Dégradation Thermique du Matériaux Végétal 80

III.1 Constitution des Combustibles Forestiers 81
III.2 Dégradation thermique du végétal 82
III.3 Combustion en phase gazeuse 85
III.4 Combustion hétérogène 85
III.5 La pyrolyse 86
III.6 Gaz Combustibles Emis pendant la dégradation thermique du Pin d'Alep 87
III.7 Effet de la température sur les émissions des COV 90
III.8 Paramètres physique de la végétation 91
III.8.1 Masse volumique 91
III.8.1.1 Masse volumique apparente ρa (Apparent density) 92
III.8.1.2 Méthodes de mesure de la masse volumique apparente ρa 92
A) Mesure dimensionnelle et mesure de masse 92
B) Déplacement d'un liquide non mouillant 92
III.8.1.3 Masse volumique réelle ρR : (true density) 92
III.8.2 Protocole expérimental 92
III.8.2.1 Méthode pycnométrique 92
III.8.2.2 Méthode métrique 94
A) Cas des aiguilles de pin d'Alep 94
III.8.2.3 Méthode de la pastille 95
III.8.3 Rapport surface-volume et masse volumique 95
III.8.4 La porosité 96
III.8.4.1 Pores Intérieurs à la végétation 96
III.8.4.2 Porosité extérieur à la végétation (porosité de l'échantillon) 96
III.8.5 Analyse thermique 97
III.8.5.1 Analyse Thermogravimétrie ATG 97

III.8.5.2 Differential Scanning Calorimetry « DSC » 97
III.8.5.3 La DSC couplée à l'ATG 98
III.8.5.4 Cône calorimètre 98
III.9 Résultats des Mesures des masses volumiques 99
III.9.1 Par méthode métrique 99
III.9.2 Méthode pycnométrique 99
III.10 Les rapports surface /volume 100
III.11 Caractérisation par Microscope Electronique à Balayage « MEB » 101
III.12 Détermination de la chaleur spécifique Cp par l'analyse ATG/DSC 103
III.13 Discussion des résultats 103
III.14 Modélisation 106
Références bibliographiques (Ch.III) 108

CHAPITRE IV
Effet de l'Humidité sur la Propagation du Feu 111

IV.1 Combustibilité 112
IV.2 Combustibilité des litières 113
IV.2.1 Méthode de mesure 113
IV.2.2 Les facteurs de la combustibilité 113
IV.3 Etude de la propagation de feu de litière 114
IV.3.1 Mode opératoire 114
IV.3.1.1 Banc litière (Banc thermique) 114
IV.3.1.2 Caractéristiques de la végétation 115
IV.3.1.3 Protocole expérimental 116
IV.3.2 Mesures des paramètres, vitesse de propagation, flux thermique dégagé et température de la flamme 117
IV.4 Résultats et Discussion 118
IV.4.1 Effet de l'humidité sur la propagation 118
IV.4.2 Effet de la pente sur la vitesse de propagation 122
IV.4.3 Etude expérimentale 124
IV.4.4 Résultats et discussions 124
Références bibliographiques (Ch.IV) 128

Conclusion générale 129
Productions scientifiques 132

Introduction

Générale

Introduction générale

La forêt joue un rôle très important sur l'écosystème de notre planète et elle est considérée comme un patrimoine précieux pour l'homme. Mais, durant ces dernières années, elle connaît une dégradation inquiétante tout autour de la planète causée principalement par la déforestation sauvage ainsi que du grand nombre d'incendies. Les feux de forêt sont très coûteux, tant au niveau des moyens humains mis en œuvre, que des conséquences environnementales et économiques, les dégâts résultant présentent des conséquences très néfastes. La dévastation des forets, des biens, des équipements, les pertes de vies humaines, tous ces incidents portent les feux et les incendies parmi les catastrophes les plus redoutables. Les feux de forets sont considérés parmi les catastrophes naturelles.

Actuellement, les évaluations du danger d'incendie sont faites généralement à partir des seules données météorologiques**,** or il est évident qu'il ne faut pas négliger les végétaux car ils constituent le matériau combustible qui brule. Les combustibles végétaux influencent notamment le comportement du feu, la connaissance donc des différents stades qui apparaissent successivement au cours de la combustion est capitale pour comprendre le phénomène d'apparition et le comportement des incendies de végétation. Parmi ces stades, on trouve quatre paramètres essentiels : l'inflammabilité, la persistance de la flamme, la calcination et la hauteur maximale de la flamme.

L'éclosion et la propagation d'un feu dépendent en effet de ces paramètres, sous l'effet d'une source de chaleur, l'eau contenue dans la végétation s'évapore. A environ 200°C commence la pyrolyse, réaction qui conduit à la formation de gaz combustibles et d'un résidu charbonneux. Les produits gazeux de pyrolyse s'ils sont en concentration suffisante, réagissent avec l'oxygène de l'air pour former une flamme chargée en suies. Plus la chaleur dégagée par les flammes est importante, plus la végétation en avant du front de flamme est chauffée, ce qui favorise le séchage et la pyrolyse du combustible, et par conséquent la propagation du feu.

Le besoin de recherche dans ce domaine est grand, si l'on veut comprendre et prédire la propagation des feux qui restent complexes et imprévisibles. Différents modèles sont utilisés dans l'étude des feux de forêt, ils sont classiquement regroupés en modèles statistiques, empiriques et physiques. La modélisation statistique semble être la plus appropriée dans la prédiction des grands feux de forêts.

Un modèle récemment développé, une variante du modèle de Réseau de Petit Monde initialement proposé par Watts et Strogatz[16](*Chap I*). Ce modèle inclut des paramètres physiques tel que l'hétérogénéité du système, les effets de rayonnement des flammes et l'émission des brandons, il reproduit d'une façon satisfaisante les systèmes réels. Il a été validé par différents résultats expérimentaux et sur des feux réels, avec des temps de calculs très inferieurs à ceux du terrain.

Cependant, tous les modèles développés à ce jour manifestent des insuffisances dans la prédiction des feux réels en raison de la complexité du phénomène, seul le recours à l'expérimentation peut contribuer à l'amélioration de ces modèles pour les rendre plus fiables et par conséquent utiles pour les opérationnels dans la lutte contre les incendies.

Le présent travail est consacré à l'étude du feu à petit échelle, il vise à étudier expérimentalement les premières phases qui précèdent l'éclosion du feu en l'occurrence l'évaporation de l'eau et la dégradation thermique du matériau végétal. L'objectif escompté est de contribuer à l'amélioration et l'enrichissement de cette variante du modèle de petit monde utilisée par l'équipe de recherche du laboratoire « LEPM » USTO en introduisant des résultats obtenus suite à des essais expérimentaux menés dans ce même laboratoire sur des espèces de végétation. Les essais ont portés sur l'étude de l'influence de la teneur en humidité sur l'inflammabilité de la végétation, la dégradation thermique du matériau végétal, les mesures des paramètres physiques qui influent sur le comportement du feu et la vitesse de propagation du feu en fonction de la teneur en eau du matériau végétal.

Le premier chapitre englobe des généralités nécessaires à la compréhension du phénomène du feu, des feux de forêts, la dégradation thermique et les différents paramètres physique et chimique influençant l'inflammabilité de la végétation et enfin des généralités sur le Modèle de réseau de petit monde.

Le deuxième chapitre traite l'influence du paramètre humidité sur l'inflammabilité et la propagation du feu de végétation. Une série d'expériences a été menée sur des aiguilles de pins d'Alep et sur de la paille de blé, les résultats ont montrés l'inexistence d'une humidité critique d'inflammabilité mais plutôt un flux critique d'inflammabilité aussi dans ce même chapitre, la probabilité d'inflammation au voisinage du flux critique a été étudiée.

Dans le troisième chapitre, le phénomène de dégradation thermique est étudié à travers la perte de masse en soumettant le matériau à un flux radiatif et en utilisant les analyses thermogravimétriques et calorimétriques (DSC couplée à l'ATG).

Les paramètres physiques, masses volumiques, porosité, rapport surface/volume et chaleur spécifique du matériau sont mesurés expérimentalement et analyser pour d'éventuelle intégration de ces paramètres dans le code de calcul développé par le laboratoire.

Le quatrième chapitre traite la propagation du feu en fonction de la teneur en eau du matériau végétal en vu de déterminer l'humidité critique de non propagation de même la vitesse de propagation en fonction de ce paramètre humidité est mesuré. Les expériences sont menées sur des tables de végétation avec différentes inclinaisons pour mettre en évidence l'effet de la pente.

CHAPITRE I

Généralités

I. Généralités sur les feux

I.1 Qu'est-ce qu'un feu ?

En tant que processus, un feu peut prendre différentes formes, toutes les formes qui impliquent des réactions chimiques entre des espèces de combustibles et l'oxygène contenu dans l'air [1]. Exploité convenablement, le feu présente un grand intérêt en tant que source d'énergie et de chaleur pour les besoins industriels et domestiques, à l'inverse, de manière non contrôlée devient un danger éminent, il peut causer des dommages humains et matériels considérables. Les feux ont ravagé des usines toutes entières causant des pertes colossales et dans les milieux urbains, les feux de bâtiments ont causé des pertes considérables en vies humaines.

I.2 Combustible et Processus de Combustion

La combustion est définie comme une oxydation rapide qui génère de la chaleur ou bien de la chaleur plus une flamme, aussi une oxydation lente accompagnée d'un léger dégagement de chaleur mais sans apparition de flamme. La combustion peut avoir lieu donc avec ou sans flamme [2].

Dans un feu, le combustible peut être solide, liquide ou gaz, le terme « combustible » est utilisé généralement pour décrire tout ce qui brule quel que soit l'état de la matière. On distingue en général deux régimes de combustion pour les gaz, un régime ou le gaz combustible et l'oxygène (ou l'air) sont préalablement mélangés avant de bruler et le régime où ces deux composants sont initialement séparés et qui brulent dans la région où ils se mélangent. Ces deux régimes définissent respectivement le concept de la flamme pré mélange et la flamme de diffusion. C'est ce dernier concept qui est rencontré dans l'inflammation des liquides et des solides [1].

Tous les combustibles peuvent bruler sous des conditions bien déterminées en se combinant avec l'oxygène contenu dans l'air. La combinaison de ces éléments génère un produit de combustion et un dégagement de chaleur. Les gaz dégagés suite à cette réaction s'allument dans l'air et produisent une flamme. D.Dougal [1] définit la flamme comme un phénomène de la phase gazeuse du combustible, c'est la proportion visible du volume ayant réagi dans le processus d'oxydation.

Pour la combustion avec flamme des solides et des liquides, une conversion à l'état gazeux est nécessaire voir indispensable, pour les liquides le processus est simple, il suffit

d'une simple évaporation à la surface ou une pulvérisation sous la forme de fines gouttelettes qui entourées de molécules d'air, constituent une atmosphère inflammable, par contre pour la plus part des solides une décomposition chimique ou pyrolyse est nécessaire pour produire suffisamment de molécules volatiles de la surface avant de s'enflammer. Ce processus nécessite donc beaucoup plus d'énergie qu'une simple évaporation et par conséquent la température d'allumage de la surface des solides tend vers des valeurs assez élevées (de l'ordre de 400°C). [1]

I.3 Inflammation du combustible. Entretient de la flamme

L'inflammation d'un combustible est le processus au cours duquel une source de chaleur amorce une réaction d'oxydo-réduction exothermique qui accroit rapidement la température du milieu [3].

I.3.1 Inflammation d'un Gaz

Comme déjà cité, le combustible peut être un gaz, un liquide ou solide. L'inflammation d'un gaz est examinée dans le détail puisque, hormis le cas de l'explosif, c'est toujours sous cet aspect physique que le matériau s'enflamme et brule ; elle permet de préciser les notions de limites d'inflammabilité, point éclair, température d'inflammation et température d'auto-inflammation qui sont essentielles puisqu'elles déterminent si un incendie est possible ou non.

L'énergie d'activation nécessaire pour provoquer l'inflammation de vapeurs combustibles mêlées à l'air est très faible (quelques mJ) puisque l'étincelle d'origine électrique suffit à enflammer le mélange. Avec un gaz, dès l'allumage, le combustible brule car l'énergie calorifique dégagée par la flamme entretient la réaction. Par contre, l'échauffement d'un combustible autre qu'un gaz jusqu'à son point d'inflammation demeure l'un des problèmes difficiles à résoudre car non seulement fait intervenir les lois du transport de la chaleur par conduction, convection ou rayonnement mais nécessite souvent le recours à l'expérimentation et/ou au calcul pour prouver la réalité physique d'un allumage. Dès lors, l'inflammation et la combustion d'un liquide ou solide font intervenir un deuxième paramètre : les puissances thermiques mises en jeu lors de l'allumage présumé.

I.3.2 Inflammation d'un Liquide

L'inflammation d'un liquide se ramène à définir les conditions dans lesquelles le combustible se transforme en vapeur pour permettre l'allumage du mélange gazeux.

Une fois sa vapeur enflammée, le liquide à haut pouvoir calorifique fournit suffisamment de chaleur pour vaporiser une masse de combustible frais qui s'enflamme à son tour. L'entretient de la flamme à la surface d'un liquide est fonction de la quantité de vapeur produite, consécutivement à l'inflammation, c'est-à-dire de la quantité de chaleur transmise au liquide par rayonnement et convection à partir de la flamme elle-même. Ainsi la réaction est entretenue jusqu'à épuisement de la réserve de carburant.

I.3.3 Inflammation d'un Solide

L'inflammation d'un solide exige la production de gaz combustible, c'est-à-dire sa décomposition chimique par la chaleur, la pyrolyse, qui peut donner naissance :

- A une flamme dont l'énergie est suffisante pour vaporiser une tranche de combustible frais et entretenir ainsi la combustion.
- A une incandescence au sein du matériau dont l'entretient dépend essentiellement du paramètre : équilibre entre la puissance thermique produite par la réaction et celle qui est dissipée dans le milieu ambiant.

La source d'énergie calorifique qui provoque le phénomène est toujours extérieur au solide et le processus exige pour plusieurs types de matériaux, le passage de l'état solide à l'état liquide puis à l'état gazeux.

L'allumage d'un solide est une fonction de sa seule température d'inflammation, qui dépend évidemment de la température de surface du combustible.

I.4 Types d'allumage

Deux types d'allumage sont possibles :

- Induit : la flamme est amorcée dans un mélange de vapeur inflammable et d'air par un élément inducteur tel qu'un corps chaud, une étincelle ou une flamme ;
- Spontané : la flamme naît, à l'intérieur du mélange réactionnel, de façon autonome.

I.5 Limites d'inflammabilité

L'inflammabilité d'un gaz ou d'une vapeur ne peut se produire que si la composition du mélange combustible-air est comprise dans un intervalle défini par des bornes appelées limites d'inflammabilité inférieure (L_i) et supérieure (L_s).

Pour une température donnée, les limites d'inflammabilité indiquent, en pourcentage par rapport à l'air, les proportions de gaz combustible ou de vapeur rendant l'allumage possible :

- 0% : absence de vapeur inflammable : le combustible manque ;
- 100% : vapeur pure : le comburant est absent.

Dans les deux cas, il n'y a évidemment aucun allumage possible. Les valeurs de L_i et L_s sont extraites des répertoires expérimentaux, pouvant varier suivant les sources ainsi que l'indique le **tableau I.1**, elles sont utilisées comme ordre de grandeur pour estimer le volume gazeux combustible répandu dans un espace clos.

	Hommel [4]		**CRC Handbook [5]**		**SFPE [6]**		**SFPE [7]**	
	L_i	L_s	L_i	L_s	L_i	L_s	L_i	L_s
Butane	1,5	8,5	1,9	8,5	1,9	8,4	1,8	8,4
Méthane	5,0	15,0	5,0	15,0	5,3	15,0	5,0	15,0
Propane	2,1	11,0	2,1	9,5	2,2	9,5	2,1	9,5
Acétone	?	?	2,5	12,8	2,6	12,8	2,6	13,0
Essence	0,6	8,0	?	?	1,4	6,8	1,3	7,1
Fuel	0,6	6,5	?	?	?	?	?	?
Gasoil	0,6	6,5	?	?	?	?	?	?

Tableau I.1 : *Différentes valeurs de Li et Ls (% en volume) selon les sources. [3]*

En matière d'incendie, c'est surtout la limite inférieure d'inflammabilité qui est utilisée car il s'agit de vérifier si une inflammation est possible, c'est-à-dire d'établir si la concentration de gaz par rapport à l'air est suffisante pour aboutir à un allumage.

Quant à la limite supérieure, elle ne constitue pas un critère important dans le domaine des incendies hormis lors de l'inflammation retardée ou généralisée. En milieu ouvert, un mélange trop riche pour être inflammable le devient par dilution dans l'air.

La figure I.1 [8] illustre schématiquement certaines caractéristiques de l'inflammabilité, les plus importantes au regard de l'allumage des poussières, des gaz et des mélanges vapeurs/air sont :

- Limite d'inflammabilité supérieure ;
- Limite d'inflammabilité inférieure ;
- Point d'éclair ;
- Température d'autoallumage ;

- Energie minimum d'allumage.

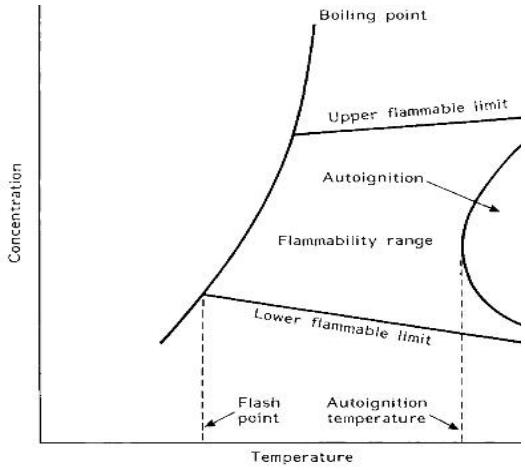

Figure I.1 : *Caractéristiques typiques de l'inflammabilité [8]*

I.6 Energie d'activation

Le mélange gazeux est entré dans l'intervalle d'inflammabilité : combustible et comburant sont mêlés de manière homogène. Quelque que soit la facilité avec laquelle le mélange gazeux combustible s'enflamme, l'allumage ne peut s'amorcer qu'en présence d'une énergie d'activation. La réaction ne débute pas de façon spontanée, le système initial doit absorber une quantité d'énergie calorifique :

$$\Delta H' = H_2 - H_1 \qquad \text{(I.1)}$$

Où :

H_1 : enthalpie de l'état initial : gaz + air

H_2 : enthalpie de l'état activé : inflammation mélange gaz + air

La réaction aboutit à l'état final en dégageant une quantité d'énergie :

$$\Delta H'' = H_3 - H_2 \qquad \text{(I.2)}$$

Où :

H_3 : enthalpie de l'état final stable : oxydes + dégagement chaleur

Une fraction de cette énergie $\Delta H''$, au contact du combustible frais, entretient la combustion.

I.7 Puissances Thermiques

Avec un combustible liquide ou solide, l'énergie transmise au système sert à constituer le mélange gazeux et à l'enflammer. La première étape requiert une quantité de chaleur beaucoup plus importante que la seconde.

I.7.1 Puissance thermique fournie par la combustion

La loi d'Arrhenius établit la relation entre l'énergie calorifique libérée au cours de la combustion et la température [8]. A partir de cette loi, la cinétique chimique calcule un facteur de vitesse applicable à toute réaction :

$$K = Ae^{(-H/RT)} \tag{I.3}$$

Avec :

R : Constante des gaz parfait ;

A : Facteur qui dépend de l'ordre de la réaction ;

H : Energie d'activation exprimée en Joule

T : Température en degré K.

L'énergie calorifique dégagée au cours de la combustion est fonction de la vitesse de réaction :

$$E = K\Delta H_{comb}.n \tag{I.4}$$

Avec :

ΔH_{comb} : Chaleur de combustion du gaz en $J.mole^{-1}$;

n : Nombre de mole de gaz.

La puissance thermique s'écrit :

$$P = \frac{E}{t} \ (W) \tag{I.5}$$

Donc :

$$P = (Ae^{\left(\frac{-H}{RT}\right)}.\Delta H_{comb}.n)/t \tag{I.6}$$

D'après cette formule, $P = 0$ si et seulement si $T \to 0$. Cette limite est importante, un système dont $T \neq 0$ produit de l'énergie calorifique. Si celle-ci ne peut pas être dissipée dans le milieu ambiant, l'élévation de la température est inévitable. Cependant, cette condition indique qu'un système dégageant une faible quantité de chaleur dans un milieu ouvert qui permet l'évacuation de l'énergie calorifique ne présente aucun risque d'inflammation. Par contre, si ce même système est disposé dans un environnement présentant une isolation thermique importante, il devient souvent dangereux car la chaleur produite de manière continue s'accumule et l'élévation de la température est inévitable.

I.7.2 Puissance thermique dissipée dans le milieu

La puissance calorifique dissipée par convection dans le milieu est représentée par une équation du premier degré due à Newton [8] :

$$P' = h.S.\Delta T \quad (W) \tag{I.7}$$

Donc

$$E' = h.S.\Delta T.t \quad (J) \tag{I.8}$$

Avec :

h : Facteur de transmission de la chaleur en $Wm^{-2}K^{-1}$;

S : Surface d'échange (constante pour un système donné) ;

ΔT : Différence de température du milieu réactionnel au temps t et celle du milieu ambiant $(T_t - T_{amb})$.

I.8 Bilan entre puissance dégagée et dissipée

La combustion est fonction de la différence entre la puissance thermique produite par la source chaude et celle qui est dissipée dans le milieu. Cette différence représente le bilan thermique de la réaction, une partie de la chaleur se propage dans le milieu ambiant dont la température s'élève, une partie se transmet au combustible et sert à :

- Sa vaporisation s'il est liquide, à sa décomposition ou pyrolyse s'il est solide ;
- Maintenir la température du milieu réactionnel au-dessus du point d'inflammation du gaz ou des composés volatils dégagés.

Ainsi, l'entretient de la flamme et sa propagation au-delà du volume d'inflammation dépendent des deux paramètres :

$P(T) =$ Puissance thermique fournie par la réaction après l'allumage ;

$P'(T) =$ Puissance thermique dissipée dans le milieu.

I.9 Auto-inflammation d'un système physico-chimique

I.9.1 Définition

L'inflammation spontanée d'un combustible est un phénomène connu depuis longtemps dans les secteurs de l'industrie et de l'artisanat qui utilisent des produits susceptibles de s'oxyder de manière exothermique et de déclencher un incendie, et dans les activités

agricoles, lorsque la fermentation provoque l'élévation de la température du fourrage et parfois sa destruction par le feu.

Par définition, l'auto-combustion se déclenche lorsque, sans apport d'énergie extérieure au système, la température d'auto-inflammation est atteinte. Celle-ci est, en général, élevée car le phénomène implique, à partir du solide et du liquide, la formation préalable de gaz ou de vapeurs qui, mêlés à l'oxygène, constituent un mélange susceptible de s'enflammer de manière autonome, puis de brûler. C'est donc le seul auto-échauffement du système qui produit le combustible et l'énergie d'activation.

I.9.2 Etat physique du combustible

L'auto-échauffement susceptible d'aboutir à l'inflammation du combustible peut se produire avec un solide, un liquide ou un gaz. En général, le mécanisme exige deux conditions : une réaction exothermique avec l'air et un milieu suffisamment isolé.

I.9.3 Nature de l'auto-échauffement

L'auto-échauffement du matériau peut être dû à :

- Son oxydation chimique à l'air ;
- Une action bactérienne qui se termine par l'oxydation chimique ;
- Un élément physique : l'établissement d'un milieu quasi isolé qui, par exemple, survient dans un réacteur au cours d'une synthèse chimique provoque l'élévation localisée de la température du milieu. La compression adiabatique d'un mélange combustible peut l'amener à son point d'auro-inflammation.

I.9.4 Intervalle de temps nécessaire pour déclencher l'auto-combustion

Le temps nécessaire pour que se déclenche la réaction d'auto-combustion varie d'une substance à l'autre : celle du phosphore est presque instantanée alors que celle d'un liquide, en plus de l'établissement de conditions quasi adiabatique, exige plusieurs heures, celle d'un solide tel que le fourrage, plusieurs semaines à plusieurs mois.

I.10 Vitesse de combustion

L'équilibre entre les puissances thermiques fournie au système et dissipée dans le milieu conditionne l'entretient de la réaction ; il ne joue quasiment aucun rôle dans la combustion du gaz.

En effet, comme l'inflammation du mélange gaz-air ne requiert qu'une très faible énergie d'activation, la combustion exige la même condition physique : la quantité de chaleur produite au point d'allumage est telle qu'elle se transmet de manière quasi instantanée à l'ensemble du mélange qui brûle en une fraction de seconde.

Par contre, l'inflammation puis l'entretient de la combustion d'un liquide et d'un solide dépendent de l'équilibre entre les puissances thermiques. Dès lors, un paramètre permet d'estimer leur rapport : c'est la vitesse de réaction qui, dans la plupart des cas d'incendies. Les trois phénomènes, incandescence, feu avec flammes et explosion sont des combustions qui ne diffèrent que par leur vitesse de réaction.

I.11 Incandescence

L'incandescence est une oxydation lente du combustible, sans flamme, due à la raréfaction de l'oxygène dans le milieu réactionnel. Deux phases distinctes interviennent dans le déroulement de l'incandescence : son initiation et son développement.

I.11.1 Allumage de l'incandescence

Il requiert évidemment la présence d'une source de chaleur dont la puissance peut être comprise entre de larges limites.

a) A la suite d'un feu important, l'incandescence suit l'extinction des flammes. Ce point ne concerne qu'un aspect de l'incendie : la combustion couvant perdure après l'extinction du sinistre et une résurgence du feu éclate.

b) Inversement, à partir d'une source d'énergie calorifique de faible puissance, le phénomène débute à la surface du combustible. Sa progression n'est concevable qu'à l'intérieur du matériau, sinon l'extinction se produit d'elle-même.

I.11.2 Entretient de l'incandescence

Une fois amorcée, l'incandescence perdure et se développe si un équilibre s'établit entre la puissance thermique dégagée par la combustion et celle qui est dissipée dans le milieu ambiant. Lorsque la différence entre les deux valeurs est faible, ni l'inflammation ni l'extinction ne se produisent ; l'incandescence perdure et l'entretient de la réaction exige sa progression dans du combustible frais. Dès lors, pour que cette différence garde une valeur constante, ou plus exactement une valeur ne variant qu'à l'intérieur d'étroites limites, il faut que l'apport d'oxygène, indispensable à toute combustion soit régulé.

De manière générale, en considérant la surface, puis la couche sous-jacente du combustible, la progression de l'incandescence est fonction des paramètres suivants :

1. En surface, la puissance thermique ne dépend pratiquement que du flux d'air entrant en contact avec la partie incandescente. Le phénomène est connu : un brusque apport d'oxygène avive la combustion lente et fait apparaitre la flamme ; inversement, sans apport d'air, l'incandescence de surface initie la combustion lente au cœur du combustible ; elle ne perdure que si les couches intérieures du matériau sont atteintes.
2. Au cœur du combustible, la puissance thermique est également fonction du flux d'air entretenant la réaction, mais celui-ci dépend de la structure du matériau qui doit être poreux pour permettre à la fois la circulation d'oxygène et l'évacuation dans le milieu ambiant d'une partie de la chaleur produite « le reste de l'énergie calorifique dégagée élevant la température du combustible frais ». Expérimentalement, certains matériaux permettent l'entretien et la progression de la combustion lente : le bois, les mousses de rembourrage ou d'isolation, les textiles, etc. Tous sont poreux avec un degré de perméabilité à l'aire variable, faible pour le bois dur, par exemple, élevé pour le bois tendre, très important pour les bois altérés par la pourriture ou les attaques d'insectes, la mousse ou les textiles. Cette différence de structure influence la vitesse de combustion ou de propagation de l'incandescence.

I.11.3 Evolution de l'incandescence

La progression de l'incandescence dans le combustible frais est aléatoire puisqu'elle évolue dans un milieu anisotrope. Cette hétérogénéité du matériau influence non seulement l'équilibre entre les puissances thermiques mises en jeu mais également la structure des résidus de la combustion : charbon carbonisé solide et poussière de cendre. Ce dernier paramètre modifie le débit d'oxygène parvenant au cœur de la réaction. Ainsi, l'incandescence peut produire deux résultats :

a) Parvenue au centre du combustible, la combustion lente est isolée du milieu ambiant par une couche importante de cendre ou de résidus partiellement carbonisés. Sous cette carapace, l'incandescence ne progresse plus ; mais, dans le même temps, cette couche protectrice empêche toute élimination de la chaleur dans le milieu ambiant. Le cœur du matériau demeure incandescent pendant une longue période dont la durée dépend exclusivement de la qualité de l'isolant ;

b) L'incandescence progresse en brulant du combustible frais. La réaction exothermique

élève la température d'une tranche de faible épaisseur. La combustion de ce matériau se produit ; la chaleur libérée élève la température d'une nouvelle tranche de combustible et le phénomène se déplace de proche en proche à l'intérieur du matériau, comme la braise parcourt la cigarette.

I.11.4 Apparition de la flamme

Les deux paramètres ci-dessus indiquent qu'aucune prévision ne peut être faite au sujet de l'apparition de la flamme : l'incandescence aboutit soit à l'extinction après une progression plus ou moins importante au cœur du combustible, soit à l'inflammation, phénomène affectant, dans un premier temps, exclusivement la surface du matériau. Pour que cette dernière se produise, un élément intervient fréquemment : le taux d'oxygène augmente, cela signifie que l'incandescence, qui a porté le cœur du combustible à une température élevée, entre en contact avec l'air ambiant : l'inflammation du matériau se produit alors brusquement et la flamme se propage rapidement.

Une telle évolution correspond, par exemple, à la propagation du feu à la surface d'un fourrage ayant subi un allumage par fermentation. Les témoins parlent parfois d'une explosion consécutive à l'emploi d'un liquide combustible tel que l'essence, alors que la rapidité de la combustion est essentiellement due au fait qu'elle progresse dans un milieu très inflammable dont la température est élevée et qui comprend non seulement le fourrage mais également les gaz imbrulés générés par l'incandescence au sein du matériau.

I.12 Feu avec flammes

La vitesse avec laquelle se développe la flamme varie entre de larges limites ; le phénomène s'accompagne d'une émission de chaleur et de lumière, sans augmentation sensible de la pression en milieu fermé.

La vitesse de propagation du feu avec flammes peut être rapide avec des liquides volatils tels l'essence ou l'alcool ou avec un métal dont l'oxydation est fortement exothermique tels l'aluminium ou le magnésium ; moyenne avec un liquide comme le fioul ou l'huile, avec un solide en couches minces comme le papier froissé ou finement divisé tels les copeaux de bois ; faible avec un solide massif comme le bois ou le charbon.

Dans le plan horizontal, la vitesse de propagation de la flamme à la surface d'un liquide peut s'estimer de la manière suivante :

- Entre 1 et 10 $cm.s^{-1}$ pour des combustibles comme le fioul ou l'huile devant atteindre la

température qui permet à la vapeur d'entrer dans son intervalle d'inflammabilité.

- Entre 10 et 100 $cm.s^{-1}$ pour des combustibles dont le mélange vapeur-air est réalisé à la température ambiante.

Ces vitesses ne sont évidemment que des approximations susceptibles de varier dans de larges proportions.

Avec un solide, s'il s'agit de tapis en fibres synthétiques tels l'acrylique ou le nylon qui sont exposés à un flux thermique de 2 à 12 $kw.m^{-2}$ nécessaire pour pyrolyser les matériaux, la vitesse de propagation de la flamme est généralement comprise entre 0,1 et 0,2 $cm.s^{-1}$, jamais supérieure à 0,6 $cm.s^{-1}$.

I.13 Explosion

C'est une combustion très rapide avec une élévation de la pression en atmosphère confinée. Tous les produits sont gazeux ; le pourcentage de gaz – H_2, CO- ou de vapeur – essence, alcool – ou de poussière – bois, grains – ou encore d'aérosol – microgouttes d'huile – est compris à l'intérieur des limites d'inflammabilité du combustible. Une source d'énergie provoque l'allumage. La production de chaleur étant quasi instantanée, l'air subit une très forte dilatation engendrant une pression sur les parois du volume.

Il est utile de relever que les effets de l'explosion peuvent être semblables et, de ce fait, confondus avec ceux de l'incendie se développant dans un espace confiné ; la combustion des matériaux élève la température de l'air ambiant qui, en se dilatant, exerce une poussée sur l'ensemble du volume, provoquant, par exemple, l'éclatement des surfaces vitrées. Surtout lorsque la surface brisée est importante.

I.14 Cas particulier : L'auto-échauffement

L'auto-échauffement aboutit rarement à l'inflammation du combustible. Par définition, la chaleur est produite par la seule oxydation du matériau. Si l'oxydant est l'oxygène de l'air, deux facteurs conditionnent l'élévation de la température du combustible jusqu'à son point d'auto-inflammation :

1. Porosité du matériau

La porosité du matériau permet la pénétration de l'air à l'intérieur du combustible solide. Dès lors, aucune auto-oxydation ne peut aboutir à un allumage :

- Si le milieu est liquide, l'oxygène est absent, sauf en surface où la chaleur dégagée par la réaction se dissipe dans le milieu ambiant sans atteindre le point d'auto-inflammation du

mélange gazeux. Par contre, l'allumage du matériau absorbant, imprégné d'un liquide susceptible de s'enflammer spontanément est identique à celui d'un solide.

- Si le milieu est gazeux, l'accumulation de chaleur élevant la température jusqu'à l'auto-inflammation est exclue bien que le mélange de combustible et d'oxygène soit toujours homogène.

2. Etat du combustible

La masse du combustible solide forme un système quasi-isolé ; il accumule la chaleur, consécutivement, il élève la température du milieu et, d'autre part, il autorise la pénétration de l'air nécessaire à l'oxydation du milieu.

I.15 Combustible Végétal

Comme tous les combustibles solides, le combustible végétal n'échappe pas à la règle de décomposition chimique (pyrolyse) pour produire des gaz volatiles inflammables. Cependant, l'aptitude d'un combustible végétal à s'enflammer et à entrer en combustion dépend de son type, de sa densité, de sa température mais aussi de sa teneur en eau.

Le combustible végétal étant un matériau hétérogène dont les composants varient d'une espèce à une autre, d'un état à un autre pour une même espèce (morte ou vivante), l'étude de son inflammabilité est d'une grande complexité. L'étude et la compréhension de l'influence des principaux composants sur l'inflammabilité des espèces végétales est cruciale dans la prédiction et la propagation des feux de forêts, S. McALLISTER et al [9] résument l'ensemble des travaux effectués dans ce domaine.

Du fait que ces derniers sont généralement classés selon l'emplacement de la couche de combustible la plus élevée à travers laquelle ils brûlent (feu de sol, de surface ou de cime), il est logique de penser à la classification des combustibles de la même manière ainsi ils peuvent être classés comme combustibles de sol, combustibles de surface et combustible de cimes [10]. Les combustibles de sol ou de surface à l'état mort contiennent tous de l'eau liquide libre et liée et sont sensibles aux précipitations, aux variations de l'humidité relative et de température.

Les combustibles de cime incluent la majorité de la canopée des conifères, arbustes, arbrisseaux à feuilles persistantes.

I.16 Feux de Forêt

Les feux de forêt sont des sinistres qui se déclarent dans une formation naturelle qui peut être de type forestière (forêt de feuillus, de conifères ou mixtes), subforestière (maquis, garrigues ou landes) ou encore de type herbacée (prairies, pelouses, ...) [11].

Les feux se produisent généralement pendant l'été mais plus d'un tiers ont lieu en dehors de cette période. La sécheresse de la végétation et de l'atmosphère accompagnée d'une faible teneur en eau des sols sont favorables aux incendies y compris en hiver.

I.16.1 L'origine des feux de forêt

Un feu de forêt est une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace. Différents facteurs de prédisposition, d'éclosion et de propagation concourent à la manifestation de ce phénomène.

I.16.1.1 Quels sont les facteurs de prédisposition ?

A) Le type de végétation et le climat

La probabilité qu'un feu parte et se propage dans un milieu forestier n'est jamais nulle. Cependant, les caractéristiques de la végétation et le climat peuvent créer des conditions favorables au développement des incendies.

Certaines formations végétales, comme les landes, le maquis et la garrigue, sont plus sujets que d'autres au feu. Cette prédisposition s'explique par les différences dans la composition des plantes (principalement la teneur en eau), mais aussi par les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises.

La période de l'année la plus propice aux feux de forêt est sans nul doute l'été (température de l'air élevée, absence de précipitations, épisodes de vent). Les effets conjugués de la sécheresse, d'une faible teneur en eau des sols et parfois de la présence d'une population touristique peu sensibilisée au danger, peuvent en effet favoriser l'éclosion d'incendies.

Dans les zones les plus propices, des conditions météorologiques particulières (année de sécheresse) peuvent également engendrer, en toute période de l'année, des situations favorables aux départs de feux.

Ces conditions de prédisposition ne sont pas constantes dans le temps. Elles évoluent, par exemple, en fonction de l'état de la végétation qui est le résultat à la fois de sa dynamique naturelle, de la foresterie qui lui est appliquée et des passages éventuels du feu.

B) L'occupation du sol

De nombreux facteurs anthropiques contribuent dans une certaine mesure au développement des incendies de forêt. C'est le fait des activités humaines : loisirs, production, certaines infrastructures de transport (routes, voies ferrées) qui peuvent être à l'origine de l'éclosion et de la propagation des feux. De même, l'évolution de l'occupation du sol influe notablement sur le risque d'incendie de forêt en raison du développement de l'interface forêt/habitat et de l'absence de zone tampon que constituent les espaces cultivés.

L'inflammabilité des végétaux rend compte de la facilité avec laquelle ils peuvent s'enflammer quand ils sont exposés à une source de chaleur. Elle est habituellement mesurée à l'aide d'un épiradiateur ou cône calorimètre : la mesure du délai et de la fréquence d'inflammation permet de déterminer une note d'inflammabilité pour chaque espèce. A titre d'exemple, elle est faible pour l'arbousier et forte pour le chêne vert et le pin d'Alep.

L'inflammabilité peut également être mesurée en prenant en compte certains facteurs naturels, plus particulièrement, la teneur en eau, la composition chimique des végétaux ainsi que les paramètres météorologiques.

Il est important de noter qu'il existe de nombreuses et complexes interactions entre les facteurs physiques du milieu naturel et les caractéristiques biologiques des combustibles. Il est donc très difficile de faire la part de chaque paramètre dans le déclenchement des incendies.

I.17 La propagation du feu

D'une manière générale, Le flux thermique émis par une flamme (et dans certains cas, les braises) préchauffe la végétation située en aval du front de feu. Lorsque la température des éléments de végétation devient suffisamment élevée, des produits volatils s'en dégagent et se mélangent avec l'oxygène de l'air pour former un mélange gazeux combustible devant le front. Ce mélange s'enflamme en suite au contact de la flamme, ce qui assure la propagation du feu. On est, ici, en présence d'un mode de propagation à courte et moyenne portée.

Il est un fait établi que la propagation du feu n'implique que les éléments végétaux les plus fins, typiquement inférieurs à 6 mm [12]. Les éléments plus épais brulent plus lentement en arrière du front de flammes.

I.18 Les mécanismes de transfert de chaleur

La propagation d'un feu se décompose en quatre étapes : combustion du matériel végétal avec émission de chaleur, transfert de la chaleur émise vers le combustible en avant du front de flammes, absorption de la chaleur par le végétal en avant du front de flammes et enfin l'inflammation.

Il existe trois mécanismes de propagation de la chaleur. Ils ont chacun leur particularité et une importance qui varie selon les types de feux de forêt.

I.18.1 La convection

La convection est un moyen de transport de chaleur important dans les feux de végétation. Elle repose sur le déplacement des masses fluides. Dans les feux de végétation, ce sont essentiellement les produits gazeux issus de la combustion qui chauffent les combustibles végétaux situés devant le front. Cette situation crée alors, des conditions favorables à une meilleure inflammation des combustibles.

Cependant, au voisinage du front de feu, des poches de gaz chauds peuvent se former. Lorsque le vent est fort, ces poches de gaz chauds peuvent se détacher du front et être transportées en avant de celui-ci.

I.18.2 La conduction

Le mécanisme de conduction est le passage de chaleur par contact direct entre un objet et la source de chaleur. Ce mode de propagation est en général négligé dans la modélisation de feux de forêt. En ce qui concerne la phase solide, le sol et le bois sont de très mauvais conducteurs de chaleur. En ce qui concerne la phase gazeuse, la conduction est négligeable comparée au rayonnement et à la convection, du moins à grandes échelles.

I.18.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le mécanisme principal de transfert de chaleur dans les feux de forêt. Il s'agit de la chaleur transmise par le rayonnement direct de la source (exemple : mode de propagation de la chaleur par le rayonnement du soleil), ou le transport des radiations thermiques peut être décrit par la théorie des ondes électromagnétiques ou par la

théorie de la mécanique quantique (d'une manière générale, en mécanique quantique, les radiations électromagnétiques sont considérées en termes de photons). Actuellement, ce mode transfert est très pris en considération par les chercheurs, il a fait l'objet de plusieurs publications [10]. Les résultats obtenus à travers ces recherches reconnaissent que pour des flammes dépassant 0,2m d'envergure, le transfert thermique par radiation est dominant par contre pour les flammes de petites tailles, le mode par convection est le dominant.

I.19 Echelles d'études des Feux

L'allumage et la propagation des feux de forêts sont des phénomènes complexes en raison de leur évolution à différentes échelles de temps et d'espace d'une manière simultanée, allant du micromètre jusqu'à plusieurs kilomètres.

La nomenclature utilisée par O. Séro-Guillaume [13] comporte quatre échelles de description de feux de forêts :

- L'échelle réduite est l'échelle « microscopique », le matériau végétal qui est le combustible solide est considéré comme un milieu poreux. Il est composé de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. Les principaux effets physiques mis en jeu à cette échelle sont les phénomènes de pyrolyse et d'évaporation d'eau ou de desséchement du matériau végétal.
- La seconde échelle considérée est l'échelle mésoscopique, à cette échelle, tous les éléments de végétation fins (aiguille, brindille, petites branches, feuilles etc…) et l'air environnant forme un milieu poreux. La géométrie de chaque élément de végétation joue un rôle éminent dans le transfert instantané d'énergie.
- Pour éviter la complexité de la description géométrique, une échelle plus large est prise en considération appelée échelle macroscopique liée à la taille de l'élément végétal ou à la hauteur de la flamme. A cette échelle, le combustible végétal est considéré comme milieu localement homogène composé de végétation et d'un mélange de gaz.
- En fin, si on considère un feu développé, le rang de taille s'étend à des centaines de mètres voir à plusieurs kilomètres. A cette échelle, qu'on appelle échelle gigascopique, le feu agit avec la topographie et le vent. La végétation apparait comme une couche frontière et le front du feu est une ligne unidimensionnelle qui se meut le long d'une surface bidimensionnelle.

I.20 Les Modèles de Propagation

En se référant aux différentes échelles sus citées, différents types de modèles ont été développés.

A l'échelle microscopique, les modèles développés traitent le phénomène de dégradation thermique pour un combustible poreux, un exemple de ce modèle est celui de Di Blasi [14].

Fons a analysé la propagation de la flamme de combustible végétal (feu de forêt), considérant que les trois modes de transfert de chaleur, conduction, convection et rayonnement de la zone en flamme sont à l'origine du préchauffage et l'allumage du combustible.

Hottel et al [15] ont développé des modèles de propagation de feu incluant les pertes par radiation et convection durant la phase de préchauffage.

Drissi et al [12] ont traité un modèle de propagation de feu de végétation à grande échelle. Dans leur étude, ils ont précisé qu'à l'échelle gigascopique on parle de modèles de propagation et que ces modèles sont de plusieurs types, selon la physique qu'ils contiennent ou mieux selon la nature de l'approche qu'ils utilisent : les modèles déterministes et les modèles stochastiques.

Les modèles déterministes de propagation sont des modèles semi-physiques qui nécessitent la détermination de paramètres dépendant du feu lui-même, ce qui restreint considérablement leurs domaines de validité.

Parmi les modèles stochastiques, les modèles de réseau (percolation, automate cellulaire, etc…) sont les plus utilisés.

A la fin des années 1990, Duncan J. Watts et Steven H. Strogatz [16] ont proposé un modèle de réseau appelé « Réseau de Petit Monde » (RPM) qui permet, en plus de la création d'amas, des connexions à longue distance en un nombre fini d'étapes.

L'expérience de Milgram en 1967 [17] suscita l'intérêt des chercheurs qui formulèrent l'hypothèse de « petit monde » : Milgram a constaté qu'avec six intermédiaires, en moyenne, on peut relier deux individus quelconques d'une même communauté, ce modèle a été appliqué avec succès à la propagation des maladies.

Le modèle de Réseau de Petit Monde utilise donc deux types d'interaction entre les sites du réseau déterministe (plus proches voisins) et probabiliste (courts circuits) ***Figure I.2***.

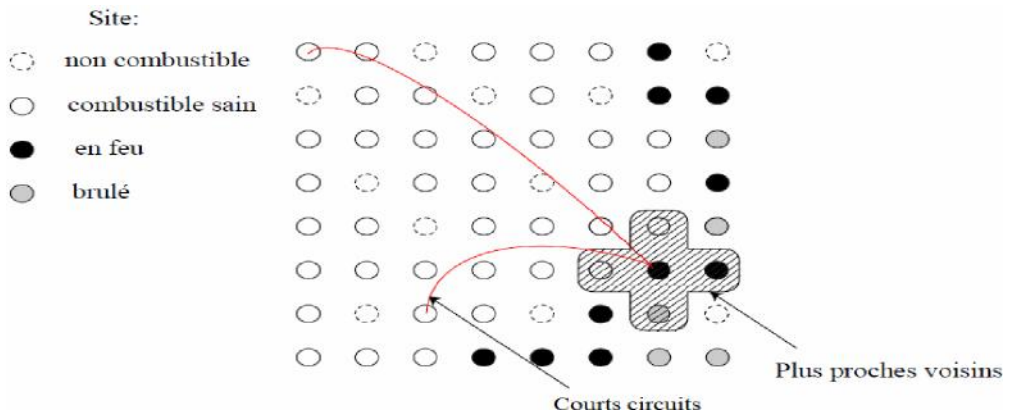

Figure I.2 : *Modèle original de réseau de petit monde de Watts et Strogatz (Watts & Strogatz, 1998 [16]). On distingue les connections limitées aux plus proches voisins et celles à longue distance (ou courts circuits) représentées par une ligne rouge*

En 2005 N.Zekri, B.Porterie, J.P.Clerc et J.C.Loraud [18] étendirent le modèle réseau « petit monde » aux feux de forêts. Ce modèle présente un rapport (temps de calcul/temps réel) de l'ordre du dixième ; ce qui lui confère un caractère opérationnel indéniable. A titre d'exemple, la propagation du feu exige environ 1 s de calcul pour une propagation réelle de 10 s.

Références Bibliographiques (Ch.I)

[1] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, 3eéd. John Wiley & sons, Chichester, 2011.

[2] S.R. Turns, An introduction to combustion, concepts and application, 2e éd. McGraw-Hill, Singapour 2000.

[3] J-C. Martin, Incendies et explosions d'atmosphère, 1re éd. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.

[4] G.Hommel, Handbuch des gefährlichen Güter, 2e éd. Springer, Verlag, 2003.

[5] D.R. Lide, CRC Handbook of chemistry and physics, 85e éd. CRC Press, 2004.

[6] A.M.Kanury, Ignition of Liquid Fuels , in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, , 3e éd. NFPA, 2002.

[7] C. Beyler, Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames,in:SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3e éd. NFPA, 2002.

[8] B. John, Sources of Ignition : Flammability characteristics of chemicals and products. Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.

[9] S. McAllister et D. R. Weise, « Effects of Season on Ignition of Live Wildland Fuels Using the Forced Ignition an Flame Spread Test Apparatus », Combustion Science and Technology. vol. 189, no 2, pp.231-247, 2017,

http://dx.doi.org/10.1080/00102202.2016.1206086

[10] R.M. Nelson, Jr, « Water Relations of Forest Fuels », in Forest Fires : Behavior and Ecological Effects, In E.A. Johnson and K. Miyanishi, p. 79-149.2001.

[11] Y. Baara, « Caractérisation fractale et multi-fractale du transfert de chaleur. Application aux feux », Thèse de doctorat, Université USTO,2014.

[12] M. Drissi, « Un Modèle de Propagation de Feu à Grande Echelle », Université de Provence - Aix-Marseille I, 2013. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00931806

[13] O. Séro-Guillaume,S.Ramezani, J. Margerit, D. Calogine, « On large Scale Forest Fires Propagation Models », International J. of therm.sciences, vol.47, pp.680-694, 2008, https://doi .org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.06.016

[14] Di Blasi, « Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels », Progress in energy and combustion science, p. 71-104, 1993.

[15] H.C. Hottel, G.C.Williams, F.R.Steward, « The modeling of fire spread through a fuel bed », 10th International Symposium on Combustion p. 997-1007, 1965.

[16]D.J. Watts et S.H.Strogatz, «Collective dynamics of 'small-world' networks », Nature Rev ., Volume 393, 440-442, 1998.

[17] S.Millgram, The Small World Problem, Psychology Today, 60, 1967.

[18] N.Zekri, B.Porterie, J.P.Clerc et J.C.Loraud, Propagation in a two-dimensionalweighted local small-world network. Phys., Phys. Rev.E71, 046121, 2005. doi:10.1103 /Phys Rev E.71. 046121

CHAPITRE II

Teneur en Humidité de la Végétation et son Influence sur les Feux de Forêts

Introduction

Les combustibles verts sur les parties hautes des arbres vivants dans les forêts, les branches ainsi que les herbes ne sont pas prédisposées à la combustion, pour s'enflammer, il est nécessaire d'avoir un taux élevé de l'énergie dégagée de la combustion des combustibles morts se trouvant sur le sol [1]. D'autre part, une teneur en eau élevée de ces combustibles de sol augmente l'énergie nécessaire à leur inflammation et diminue l'énergie de combustion dégagée. Cet état de fait donne au paramètre teneur en eau un rôle déterminant dans le départ et la propagation des feux. La teneur en eau a été directement corrélée à la possibilité pour un feu de surface de se transformer en feu de cime[2]. Elle apparait aussi dans la plupart des calculs d'indice de risque et de modèles de propagation [3], [4].

Une teneur en eau élevée augmente l'énergie nécessaire à l'inflammation des combustibles car une partie de cette énergie est utilisée pour l'évaporation. Plus la teneur en eau des végétaux est élevée, plus la propagation du feu sera lente du fait qu'une partie de l'énergie dégagée par le front de flamme sera utilisée par les combustibles non-brulés pour évaporer l'eau.

Il est avéré aussi que la teneur en eau du combustible végétal retarde le taux de combustion. Parmi les paramètres déterminant le comportement des feux de forêts affectés, il y a le préchauffage et l'allumage des combustibles imbrulés, la croissance du feu, le taux d'énergie dégagé et la production de fumée dans le cas des feux couvant. Si on veut améliorer notre compréhension sur ces aspects et d'autres du comportement du feu de végétations, il est donc nécessaire de déterminer et de quantifier la teneur en eau (avec des limites raisonnables) du combustible[5].

Dans ce chapitre, ce paramètre est étudié de manière expérimentale afin de s'affranchir de son effet sur l'inflammabilité de la végétation, sur les émissions de COV. Cette étude est faite sur deux espèces végétales (paille de blé, aiguilles de pin d'Alep). L'objectif est de mesurer la teneur en eau de ces différentes plantes par la technique de séchage et ce à travers différents procédés, aussi d'étudier l'effet de l'humidité relative sur l'inflammabilité de ces espèces et éventuellement sur les émissions de COV.

II.1 Teneur en Eau d'une Végétation

II.1.1 Méthode de Mesure

Le Standard Européen CEN EN 14774-1:2009 décrit la méthode de détermination de la quantité totale W_c(water content) d'eau contenue dans un échantillon de biocombustible solide par séchage dans un four. Cette méthode peut être utilisée quand une grande précision de mesure de la teneur en eau est recommandée et ce pour tout biocombustible solide. Toutefois, le terme teneur en eau quand il s'agit de la biomasse peut être trompeur car ce type de matériau contient différents éléments volatils (les extractives) qui peuvent être évaporés avec la détermination de l'humidité moyennant un four. Le principe est basé sur le séchage à la température de 105°C dans l'air atmosphérique jusqu'à atteindre une masse constante de l'échantillon considéré. Le pourcentage de l'humidité est calculé à partir de la perte de masse de l'échantillon.

Dans cette méthode, la teneur en humidité est rapportée sur la base humide. Elle peut être aussi déterminée sur la base sèche, le rapport de la masse d'eau dans le matériau sur la masse de la matière sèche dans ce matériau.

Sur la base humide, la teneur en eau est :

$$W_{ch}(\%) = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \text{x } 100 \qquad \text{(II.1)}$$

Avec :

M_0 : masse initiale de l'échantillon

M_f : masse finale de l'échantillon (masse de la matière sèche)

Sur la base sèche, la teneur en eau est :

$$W_{cs}(\%) = \frac{M_0 - M_f}{M_f} \text{x } 100 \qquad \text{(II.2)}$$

La relation entre ces deux termes W_{ch}et W_{cs} est :

$$W_{cs} = \frac{M_{ch}}{100 - M_{ch}} x100 \qquad \text{(II.3)}$$

II.1.2 Procédés de séchage

L'estimation du contenu en eau de la végétation étant basée sur le principe de son évaporation et par conséquent sur le flux de chaleur fourni à cette végétation, plusieurs procédés de séchage sont mis en œuvre pour aboutir à cette fin. Le séchage peut être assuré par l'exposition de la matière au milieu ambiant (séchage naturel), à un flux d'air chaud à différentes températures et humidité du milieu (séchage par convection), à un flux radiatif à différentes puissances ou à un flux d'ondes électromagnétique à différentes puissances (dans un four à micro-ondes). Chacun de ces procédés présente des avantages et des inconvénients selon l'objectif à atteindre de ce séchage car comme çà était décrit précédemment, l'évaporation de l'eau est accompagnée de dégagement de gaz volatils qui à forte concentration peuvent influencer sur la composition chimique de la végétation considérée. A titre indicatif, le procédé le plus utilisé dans l'industrie agro-alimentaire est le séchage par convection. Dans le cas des études des feux de forêts, tous ces procédés ont été utilisés pour déterminer le taux d'humidité des échantillons testés comme c'est le cas de la présente étude.

II.1.3 Mécanismes de Séchage

Le processus de séchage des matériaux végétaux est extrêmement complexe, impliquant des mécanismes transitoires couplés de la chaleur avec transfert de masse, de chaleur accompagnée de transformation physique, chimique et de changement de phase [5]. Dans le séchage de ces matériaux, deux différents mécanismes de transport se produisent simultanément, un transfert de chaleur du milieu sec (source de chaleur) au matériau végétal et le transport d'eau de l'intérieur du matériau solide vers sa surface extérieure à partir de laquelle l'eau est éventuellement transportée loin par un gaz porteur. Une représentation conceptuelle du phénomène se produisant pendant le séchage d'un matériau végétal solide est illustrée dans la figure (II.1) [6].

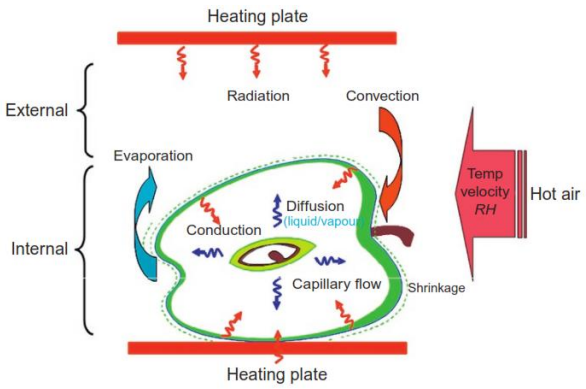

Figure II.1 : *Représentation conceptuelle du processus de séchage thermique pour matériau végétal solide[6]*

De l'énergie est nécessaire pour générer le changement de phase de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur et pour activer le mouvement des molécules. Le séchage est un fort consommateur d'énergie en raison de la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui est assez élevée. Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et radiation) peuvent être utilisés indépendamment ou en combinaison pour fournir la chaleur de la source aux matériaux. Tous les modes de transferts à l'exception de ceux qui utilisent l'énergie électromagnétique (micro-ondes et fréquences radio) fournissent la chaleur aux frontières du matériau à sécher de sorte que la chaleur diffuse à l'intérieur du solide par conduction en premier lieu.

Le phénomène de transfert de masse pendant le séchage peut être contrôlé soit par le taux de diffusion de l'humidité (liquide ou vapeur) à l'intérieur de la matrice de la végétation (transfert intérieur) ou le taux d'évaporation de l'humidité à partir de la surface vers le milieu de séchage (transfert extérieur). Le processus interne est fortement influencé par la température et prédomine une fois le taux d'approvisionnement de l'humidité de l'intérieur vers la surface du matériau est plus lent que le taux de transfert de masse externe. Le processus de transfert de masse interne implique souvent différents mécanismes de mouvement de l'eau.

Les matériaux végétaux sont généralement des milieux poreux contenant des matrices solides séparées par des espaces vides qui sont remplis de gaz ou de liquide. Dans ce cas, le matériau subit des déformations pendant le processus de séchage avec le transport d'eau dans le matériau.

II.1.4 Techniques de Séchages

L'extraction de l'eau du matériau végétal pendant le séchage peut s'effectuer de différentes façons et cette variété a conduit à plusieurs techniques de séchage. La sélection de la méthode de séchage pour une végétation donnée est une étape importante car la technique de séchage et les conditions dans lesquels cette opération s'effectue affectent la qualité du produit à sécher, ceci est plus particulièrement remarqué dans le cas des produits alimentaires car la qualité est directement liée au prix de ces produits. Le choix de la technique dépend de plusieurs paramètres incluant le type de la végétation, la teneur en eau, la cinétique de séchage, la sensibilité à la chaleur, la structure physique du matériau et d'autres facteurs [7].

Le classement des appareils de séchage est basé sur le mode de transfert de chaleur, la majorité des sécheurs utilisés dans l'industrie alimentaire sont du type convectif, en d'autres termes, l'air chaud est utilisé à la fois pour fournir la chaleur de vaporisation de l'eau et pour dégager l'humidité évaporée du matériau. Ce procédé est de loin le plus utilisé malgré son efficacité thermique relativement basse. Autres types d'appareils de séchage utilisant de l'énergie radiative fournie sous différentes formes d'ondes électromagnétiques selon leurs positions dans le spectre électromagnétique (fréquences radio, infrarouge, micro-ondes). Les ondes radio ont une longue longueur d'onde et par conséquent ont une bonne pénétration dans le matériau, le chauffage aux micro-ondes est similaire à celui au radio fréquences, tous les deux sont rapides et consistants, ils ciblent les molécules d'eau aboutissant ainsi à un chauffage volumétrique rapide.

Dans la plupart des procédés de séchage, l'énergie est transférée de la surface vers le centre du matériau à l'exception du séchage aux micro-ondes et radio fréquences ou l'énergie fournie génère de la chaleur de l'intérieur du matériau.

D'autres techniques sont développées toujours dans le but de gagner dans l'efficacité, tel que les systèmes utilisant les basses températures ou le matériau est congelé puis séché directement par sublimation directe (changement de phase directe de l'état solide à l'état vapeur de l'eau contenue dans le matériau). Des études ont mis en évidence l'application de la technologie des ultrasons combinée avec le procédé de séchage convectif [8].

Robert Samulsson et al. 2006 [9] ont mené une étude comparative entre différentes méthodes de séchage et ce sur vingt espèces de végétations. Le taux de dégagement des gaz volatils était un des paramètres de différence entre les méthodes utilisées dans cette étude.

II.2 Caractérisation des Matériaux Humides

L'eau présente dans un matériau humide tel que la végétation existe sous deux grandes formes : Eau titrable et eau de constitution :

- La forme titrable se compose de :
  - Eau libre et vapeur d'eau. Pour les produits à structures capillaires (bois) la vapeur occupe les vides cellulaires et l'eau libre est piégée par les forces capillaires dont l'intensité est d'autant plus grande que les dimensions des pores sont petites.
  - Eau liée ou adsorbée qui se trouve liée (d'où son nom) aux parois cellulaires.
- Eau de constitution : Elle participe à la constitution des molécules du squelette du matériau.

La surface externe d'un solide humide est recouverte par un film d'eau libre qui adhère à cette surface par l'action de forces superficielles au voisinage de ce film d'eau. L'air en son voisinage est saturé en vapeur d'eau. Cela signifie que la pression partielle de vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante.

Le processus de séchage évacue en premier la forme libre. Lorsque toute l'eau libre est (en tout point du produit) transformée en vapeur on dit que le point de saturation en eau liée des fibres est atteint ; les parois cellulaires restent imbibées d'eau liée.

II.3 Activité de l'Eau

L'activité de l'eau d'un produit est définie pour une température donnée, par :

$$a_w = \frac{p_v}{p_s} \qquad \text{(II.4)}$$

Avec p_v : pression partielle de vapeur d'eau à la surface du matériau (Pa)

p_s : pression partielle de vapeur saturante à la surface du matériau (Pa)

La valeur de l'activité de l'eau varie entre 0 (matériau sec) et 1 (eau libre).

Si le matériau est en équilibre hygroscopique avec l'air qu'il entoure, l'activité de l'eau est identique à l'humidité relative de l'air à l'équilibre (HRE).

Un matériau humide tel que la végétation est caractérisé par sa teneur en eau et par son activité de l'eau. Cette dernière donne des informations sur la stabilité physique, mécanique, chimique et microbiologique de ce matériau.

II.4 Adsorption / Désorption d'un Matériau Humide (Végétation)

Lorsqu'un matériau végétal est exposé à l'air à une certaine température et à une certaine humidité relative, le matériau absorbe ou désorbe l'humidité jusqu'à ce qu'une condition d'équilibre soit atteinte. La teneur en humidité à l'équilibre peut être déterminée après que celui-ci ait été exposé à un environnement particulier pendant une longue période de temps.

En d'autres termes, la pression de vapeur du matériau est égale à son air ambiant. C'est une condition d'équilibre où le taux de désorption d'humidité du matériau est égal au taux d'adsorption d'humidité de l'air ambiant. A cette condition, l'humidité relative de l'air ambiant (environnement immédiat et ambiant) est égale à l'humidité relative du matériau.

En phase de désorption, l'eau de la surface externe du matériau va être évacuée sous l'effet du gradient d'humidité entre l'air et le matériau. L'eau osmotique va migrer à l'état liquide de l'intérieur du grain vers cette périphérie séchée par différence de pression osmotique. Au cours de cette migration, des poches d'air apparaissent pour remplacer les pertes en eau. Au cours du séchage, la diffusion de cellule à cellule sera de plus en plus freinée par les cellules qui auront tendance à retenir leur eau. Les derniers points d'humidité seront donc plus difficiles à retirer que les premiers. L'eau liquide sera entièrement évaporée à l'exception de l'eau fortement retenue. Le matériau rentre en équilibre hygrométrique avec son environnement ; ce qui correspond à la fin du séchage.

II.5 Isotherme de Désorption

Les isothermes de désorption et d'adsorption permettent de décrire l'évolution, à une température donnée, de la teneur en eau d'un matériau en fonction de l'humidité relative de l'air dans lequel il est placé [10].

- Les isothermes d'adsorption sont déterminées à partir d'un produit sec qui est hydraté au cours du temps,
- Les isothermes de désorption sont obtenues à partir d'un produit humide qui est déshydraté au cours du temps.

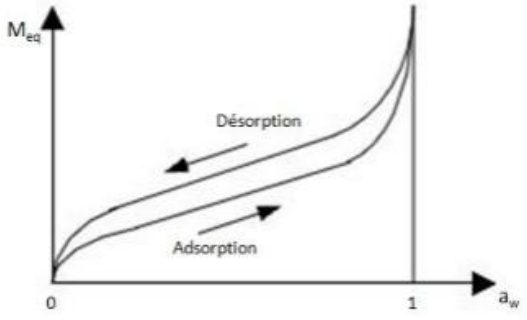

Figure II.2 : *isothermes de désorption adsorption [11]*

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones (figure II.2). Chaque zone correspond à un mode de fixation de l'eau au matériau[12], [13].

- Zone 1 (0<a_w<0,2) : Dans cette zone, une monocouche d'eau est fixée aux pores du matériau par des forces de type Van der Waals. Elle correspond à l'eau liée présente sous la forme d'une monocouche moléculaire fixée à la structure du matériau. Le passage à la zone suivante s'effectue lorsque tous les pores sont saturés d'eau.
- Zone 2 (0,2 <a_w< 0,6) : Cette zone correspond à l'adsorption de molécules d'eau sur la monocouche d'eau libre. L'isotherme est linéaire,
- Zone 3 (a_w> 0,6) : Elle correspond à l'eau libre. L'eau est présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

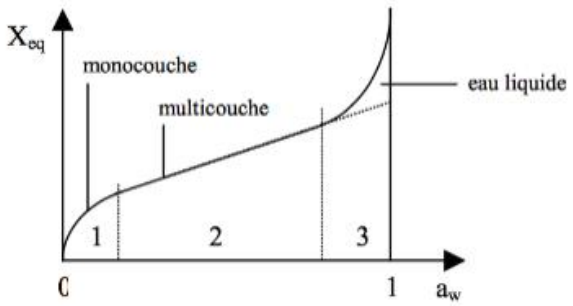

Figure II.3 : *Différentes zones d'une isotherme de sorption [11]*

Les isothermes de désorption sont exprimées par des relations entre la teneur en eau d'équilibre (base sèche), et l'activité de l'eau. Ces relations sont basées sur des approches théoriques, semi-théoriques ou empiriques. Sodha et al. [14] ont étudié plus en détail des modèles d'isothermes de désorption.

II.6 Cinétique de séchage

Chaque matériau a sa propre cinétique de séchage [15]. Etant donné la complexité des mécanismes mis en jeu lors du séchage et la diversité des matériaux, il n'existe pas de modèle unique de cinétique de séchage. Aussi, la cinétique de séchage est déterminée pour chaque espèce, à partir d'études expérimentales.

II.6.1 Courbe de séchage

Lescourbesdeséchagecaractérisentl'évolutionaucoursdutempsdelateneureneau du produit. Une courbe expérimentale représentante la perte de poids d'un produit en fonction du temps est illustrée sur la figure II.4. [10]:

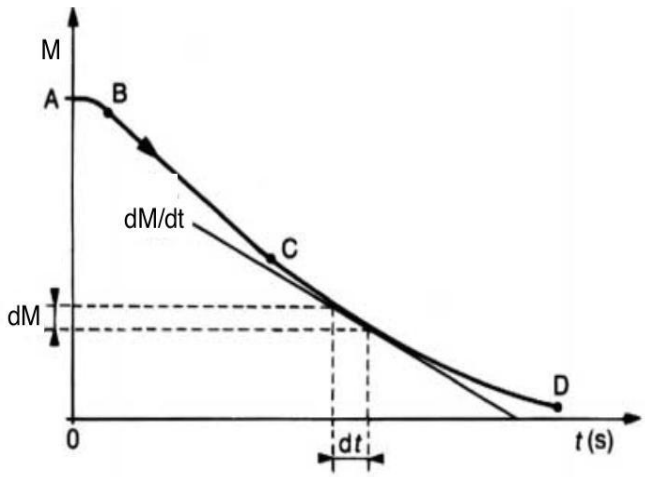

Figure II.4 :*Courbe de séchage M=f(t)[10]*

La courbe de la figure II.4 peut être transformée et représentée par les courbes des figures II.5 et II.6 :

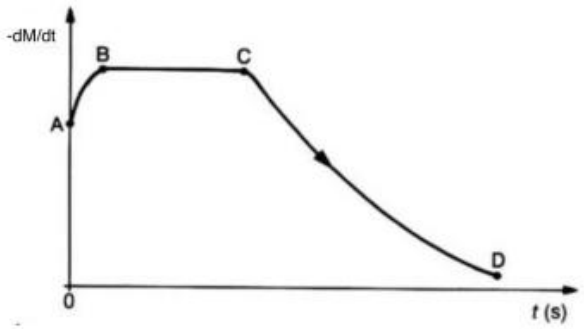

Figure II.5 : *Courbe de séchage -dM/dt = f(t)* [10]

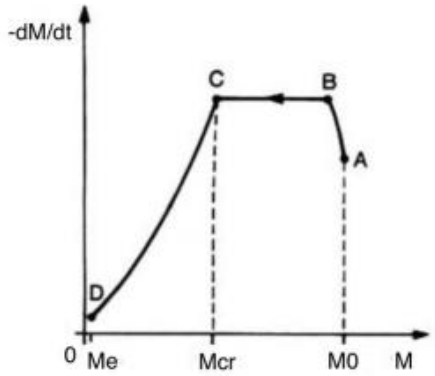

Figure II.6: *Courbe de séchage - dM/dt=f(M)* [10]

Les figures II-5 et II.6 mettent en évidence trois phases :

- la phase de mise en température du produit à sécher (AB),
- la phase à vitesse de séchage constante (BC),
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

1. Phase de mise en température du produit à sécher (AB) :

Lors de cette phase, la quantité de chaleur apportée au produit contribue à l'augmentation de sa température de surface jusqu'à celle de l'évaporation de l'eau libre. La période de mise en température est généralement courte par rapport au temps global de séchage et n'apparaît que si la différence de température entre l'air et celle du produit est importante.

2. Phase à vitesse de séchage constante (BC) :

La surface du produit est saturée en eau pendant toute la durée de cette phase. La diffusion d'eau libre du sein du produit vers sa surface est régie par les lois de diffusion.

Cette phase peut être observable tant que la vitesse de transport de l'eau du seindu produit vers sa surface est supérieure à celle de la vitesse globale d'évaporation. La durée de cette phase diminue avec la teneur en eau du matériau.

3. Phase à vitesse de séchage décroissante (CD) :

Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux difficultés de l'eau à migrer de l'intérieur du produit vers sa surface. Pendant cette phase, le transfert de l'eau du sein du produit à sa surface n'est pas suffisant pour maintenir le film d'eau entourant le produit. Par conséquent, la pression de vapeur d'eau à la surface du produit diminue. Cette phase correspond à l'évaporation de l'eau liée. L'eau libre, qui migrait de l'intérieur vers l'extérieur du matériau pour être alors transformée en vapeur d'eau, a complètement disparu en fin de

phase 2. Il ne reste plus dans le matériau que l'eau liée, plus accrochée au produit. L'eau ne s'évapore plus à la surface du matériau mais à l'intérieur. Un front d'évaporation s'enfonce vers le cœur du matériau. La vapeur d'eau est ensuite évacuée en surface par l'air. Plus le front s'éloigne de la surface extérieure du matériau, plus le transfert d'eau est difficile. A ce stade la température du matériau augmente et tend vers celle de l'air à l'entrée si la température et le débit restent les mêmes qu'avant.

II.7 Inflammabilité et Teneur en eau d'un Combustible Végétal

L'effet de la teneur en eau sur le comportement du feu est de ralentir l'inflammabilité ou le taux de consommation du combustible. Pour un front de feu en propagation, le taux d'inflammabilité moyen peut être calculé à partir de la masse du combustible consumée par unité de surface du sol divisé par le temps nécessaire pour la consommation de la surface. Ainsi, une teneur en humidité élevée du combustible retarde la consumation du combustible par unité de surface brulée (Kg m^{-2} s^{-1}) en réduisant la masse du combustible consommé et en augmentant le temps de combustion d'une particule ou temps de résidence pour une particule, en plus elle croit le temps de préchauffage du combustible. Plusieurs chercheurs ont observé un accroissement du temps d'inflammation avec le taux d'humidité que ce soit pour une végétation morte ou vivante, l'énergie nécessaire à l'inflammation peut être exprimée par l'équation : [16].

$$Q_T = Q_S + W_{cs} Q_M \qquad \text{(II.5)}$$

Avec :

Q_T : L'énergie calorifique totale nécessaire à l'inflammation

Q_S : La chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse de combustible sec de la température ambiante à la température de 400°C

Q_M : L'énergie nécessaire pour chauffer une unité de masse d'eau à 100°C et l'évaporer

W_{cs} : l'humidité ou fraction d'eau contenue dans le combustible exprimée par rapport à la masse sèche

La présence de l'humidité réduit aussi la température de la flamme à cause de l'utilisation d'une partie de la chaleur générée par la combustion pour chauffer la vapeur d'eau produite aussi parce que l'oxygène de l'air environnant est dilué par cette vapeur d'eau produite par la combustion [17].La baisse de température de flamme retarde le taux de décomposition et par conséquent tend à conduire le processus de combustion vers la production de produit charbonneux plutôt que vers l'élévation de la température des volatils.

Suite à des essais d'inflammation de feuilles d'Eucalyptus dans un calorimètre à flux d'air, Pompe et Vines [18] ont suggéré que l'eau contenue dans le combustible tend à promouvoir la formation de fumée, réduire la chaleur de combustion, réduire le taux d'élévation de la température du flux d'air dans le calorimètre et conduit à une très faible puissance de combustion.

II.8 Caractéristiques des Combustibles Affectant la Teneur en Humidité

En écartant l'effet des conditions météorologiques, les principaux facteurs affectant la quantité d'eau retenue et son transport dans le bois et les particules végétales en général sont la composition chimique, la structure interne et les propriétés physiques. La quantité d'humidité retenue dans les parois des cellules des particules du combustible est liée à la composition et à la structure cristalline des parois, tandis que l'eau liquide retenue dans les cavités de la cellule est déterminé par la structure capillaire à plus grande échelle.

II.8.1 Composition Chimique

La composition chimique du bois est similaire à celle des feuillages [16], Stamm et Haris [19]donnent en pourcentage la composition des parois de cellules du bois sur la base de la masse sèche comme : cellulose (40 – 55%), hémicellulose (15 – 25%), lignine (15 – 30%) et matière extractive et autres (2 – 15%) (les matières extractives incluent différents éléments organiques tel que résines, sucre et acides gras qui peuvent être solubles soit dans de l'alcool, de l'eau ou des solvants organiques comme le xylène ou éther. Le seul constituant minéral cité est la cendre avec une teneur entre 0,4 et 4%. On peut classer donc les constituants en quatre classes de famille chimique à savoir :

- Des hydrates de carbone représentant 55 à 80 % du végétal, il s'agit de la cellulose plus l'hémicellulose (holocellulose) ;
- Des substances phénoliques comprenant la lignine, les tanins, etc.… ;
- Des résines, regroupant les constituants volatils, les esters, des acides gras, du glycérol ou des stérols ;
- Des minéraux qui sont en proportion plus ou moins importante suivant les espèces.

Il s'agit principalement d'un arrangement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. On emploie donc le terme de combustibles ligno-cellulosiques dans le cadre des études concernant les feux de forêts.

D'autres part, les feuillages ont les mêmes constituants mais avec des proportions différentes. Il est avéré aussi que le pourcentage élevé des matières extractives dans les aiguilles et le bois tend à réduire la prise d'eau et l'échange du taux d'humidité [20].

II.8.2 Structure Interne

Le taux d'humidité instantané dans les combustibles végétaux est fortement influencé par la structure interne du matériau et par le fait que ce matériau est vivant ou mort. Les facteurs qui contrôlent le mouvement de l'eau dans les plantes vivantes sont les forces osmotiques dues aux différences de concentrations d'eau intercellulaires et les forces de tensions capillaires crées par la demande de transpiration aux niveaux des surfaces externes des feuilles et des aiguilles. Cette demande d'eau peut être satisfaite en premier lieu par l'absorption à travers les racines. Dans les particules d'une végétation morte, les facteurs les plus signifiants sont deux propriétés de modes de transport : la perméabilité de cette végétation à l'eau liquide (l'écoulement dans les cavités de la cellule par capillarité) et la diffusivité de l'humidité (écoulement moléculaire dans les parois de la cellule par la diffusion de l'eau liée ou dans les espaces d'air par diffusion de la vapeur d'eau). Un facteur additionnel pour les couches de litières est le drainage de l'eau par les forces gravitationnelles.

II.8.3 Propriétés Physiques

La différence de la diffusion de l'humidité dans le bois et les feuillages à l'état mort est en partie due aux différences dans la masse volumique, la taille et forme de la particule et les teneurs en extractives, de plus, les effets de l'altération en relations avec l'humidité opèrent principalement à travers ces variables. La masse volumique du bois dépend de sa densité et de sa teneur en eau, variant entre 300 et 800 Kg/m^3[21].La masse volumique de la particule est aussi affectée par les matières extractives solubles dans l'eau et ce à cause de l'action de gonflement, cet effet peut être éclipsé par la réduction de l'écoulement due la présence de cire sur les surfaces de la particule dans le cas des feuillages. Il est avéré par Van Wagner [22] que les particules de combustible qui ont subi une élimination de cire de leurs surfaces par altération peuvent gagner ou perdre de trois à six fois plus rapidement de l'humidité comparativement aux particules non altérées et qui conservent intacte la cire sur leurs surfaces.

II.9 Energie de Désorption

Dans l'équation (II.5), le terme Q_M représente l'énergie nécessaire pour chauffer à 100°C une unité de masse d'eau contenue dans la végétation et l'évaporer. Une énergie additionnelle est nécessaire selon Byram[1], cette énergie sert à séparer l'eau liée de la structure du matériau et de la vaporiser. La variation lente de la teneur en eau en fonction du temps correspondant à la phase CD de la courbe de désorption de la figure II.4 explique à notre avis l'existence de cette énergie additionnelle. L'énergie de désorption peut donc être écrite sous la forme :

$$H = Q_{Li} + Q_{Le} \tag{II.6}$$

Avec :

H : énergie de désorption

Q_{Li} : chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau libre équivalente à Q_M

Q_{Le} : chaleur additionnelle nécessaire à la séparation de l'eau liée et à son évaporation

La chaleur spécifique d'un matériau ligneux contenant de l'humidité n'est pas égale à la somme des chaleurs spécifiques de chacun des composants considéré séparément mais dépasse cette somme d'une quantité considérable. La chaleur spécifique du système matériau-eau est liée de manière complexe aux énergies liants la matière et l'eau. L'élévation de la chaleur spécifique peut être calculée à partir de l'énergie de désorption [1].

Le terme $c_p^v + Wc_p^e - \left[\frac{\partial H}{\partial T}\right]_W$ représente la chaleur spécifique généralisée, chaleur spécifique de l'échantillon (matière plus teneur en eau W) avec :

c_p^v: chaleur spécifique de la matière (fuel) sèche,

W : teneur en eau de la matière humide

c_p^e: chaleur spécifique de l'eau

Le terme $-\left[\frac{\partial H}{\partial T}\right]_W$ est positif car la quantité H décroit quand la température T croit et la chaleur spécifique généralisée est supérieure à la somme des chaleurs spécifique de la matière et de l'eau composant le matériau prises séparément. L'élévation de la chaleur spécifique ΔCp peut être déterminée par l'équation :

$$\Delta C_p = -\left[\frac{\partial H}{\partial T}\right]_w \tag{II.7}$$

L'énergie de désorption H représente la quantité de chaleur nécessaire pour dégager toute l'eau contenue dans un gramme de substance d'un matériau ligneux initialement à teneur en humidité Wet température absolue$T$. La différentielle de l'énergie de désorption est reliée à l'humidité relative à l'équilibre par l'équation de Clausius-Clapeyron suivante [1] :

$$\left[\frac{\partial H}{\partial W}\right]_T = -\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{m}}\left[\frac{\partial(\ln h_r)}{\partial(\frac{1}{T})}\right]_T \qquad \text{(II.8)}$$

Avec :

h_r : humidité relative à l'équilibre,

R : Constante des gaz parfaits,

m : masse moléculaire de l'eau

L'expression de l'énergie de désorption est donnée par :

$$H(W) = \int_0^W \left[\frac{\partial H}{\partial W}\right]_T dw \qquad \text{(II.9)}$$

II.10 Energie Nette d'Inflammation

L'énergie nette nécessaire pour l'allumage du bois humide peut être estimée analytiquement. Si une quantité de chaleur élémentaire dq est ajouté lentement à un système bois-eau, il en résulte une variation de température dT et une variation dans la teneur en humidité dW. Cette relation peut être écrite sous forme [1] :

$$dq = \left[m_s c_p^v + W c_p^e - \frac{\partial H(W)}{\partial T}\right] dT + \left[\frac{\partial H(W)}{\partial W} + L_v\right] dW \qquad \text{(II.10)}$$

Avec :

c_p^v: chaleur spécifique du bois sec (végétation),

c_p^e : chaleur spécifique de l'eau

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau

m_s : masse de la végétation sèche

II.11 Etude de l'effet de l'énergie de désorption sur le temps d'inflammation d'un matériau végétal

Dans les expressions d'élévation de température dans le model de Koo et Pagni, l'énergie reçue porte la végétation à 100°C puis évapore l'eau en supposant que l'énergie reçue pendant le temps dt élève la température de dT et évapore une quantité dW d'eau, soit :

$$\dot{q}dt = \left(m_s c_p^v + W c_p^e\right)dT + L_v dW \qquad \text{(II.11)}$$

Avec $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$, le bilan flux reçu par rayonnement, convection et braises, et perdu par rayonnement et convection. Cette équation permet de déterminer le temps d'inflammation t_{ign} après évaporation de toute l'eau (W) et que la végétation atteint la température d'inflammation T_{ign} (à partir de la température ambiante (T_{amb}), en intégrant (II.11):

$$\int_0^{t_{ign}} \dot{q}\, dt = \int_{T_{amb}}^{T_{ign}} \left(m_s c_p^v + W c_p^e\right)dT - \int_W^0 L_v\, dW \qquad \text{(II.12)}$$

A partir de (II.12) il est facile de déduire que t_{ign} est proportionnel à W. Or l'équation (II.12) néglige l'énergie additionnelle de désorption de l'eau. L'énergie d'adsorption et désorption $H(T, W)$ dépend de l'humidité relative de l'air à partir de l'équation de Clausius-Clapeyron.

L'élément d'énergie nécessaire pour une élévation de température (dT) et la désorption de (dM) est :

$$dH = \left.\frac{\partial H}{dT}\right|_W dT + \left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T dW \qquad \text{(II.13)}$$

La quantité $\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T$ est obtenue à partir des mesures d'isothermes elle est représentée par la figure II.7 pour le bois [1].

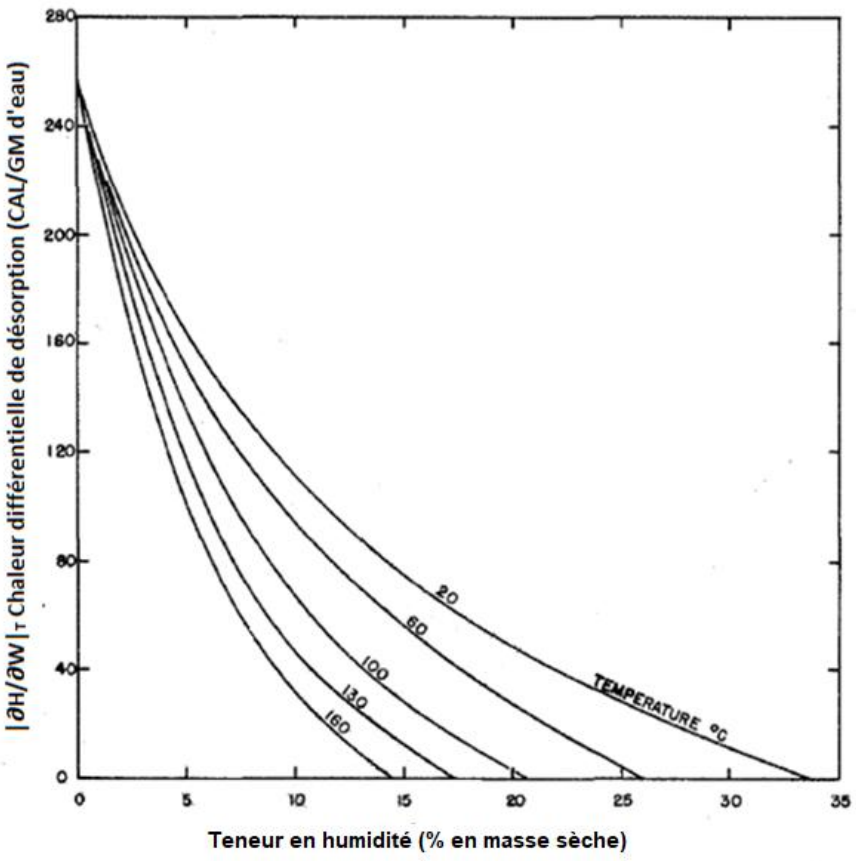

Figure II.7 : *$|\partial H/\partial W|_T$ vs W pour différentes températures pour le bois* [1]

Il est important de remarquer que $\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T$ décroit exponentiellement avec la teneur en eau et dépend de la température selon une loi d'Arrhenius (à partir de Clausius-Clapeyron)

$$\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T = \frac{A}{W_c} e^{T_0/T} e^{-W/W_c} \qquad \text{(II.14)}$$

T_0 et W_c sont une température et une teneur en eau caractéristiques de la désorption. L'énergie de désorption $H(T,W)$ correspond à l'intégrale de $\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T$:

$$H(T,W) = \int_0^W \left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T dW = Ae^{T_0/T}\left(1 - e^{-W/W_c}\right) \qquad \text{(II.15)}$$

Cette grandeur est représentée dans la figure II.8 pour le bois d'après Byram[1]

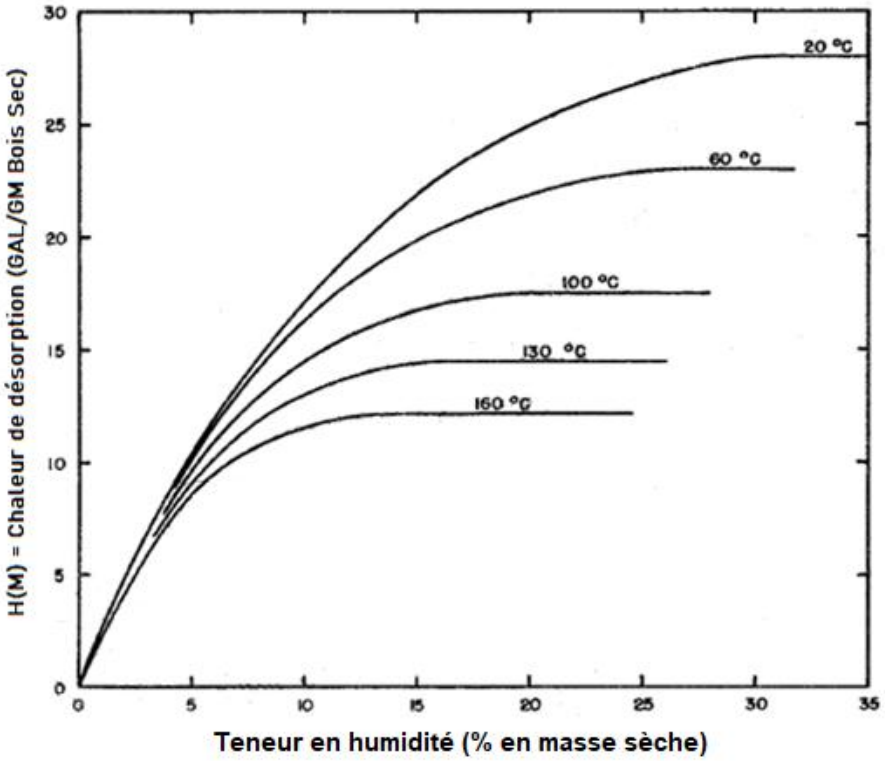

Figure II.8 : *H vs W pour différentes températures et pour le bois* [1]

Cette forme de la courbe correspond bien à l'allure de (II.15). En outre, on voit que *H* diminue lorsque la température augmente ce qui correspond bien au comportement de la loi d'Arrhenius (II.15). La grandeur restante à inclure dans (II.11) est $\left.\frac{\partial H}{dT}\right|_W$. De ce qui précède, cette grandeur est négative. Or, il a été observé Stitt et al. [23] que la chaleur spécifique d'une végétation est supérieure à la somme des chaleurs spécifiques de l'élément sec et de l'eau. Donc il y a une chaleur spécifique supplémentaire positive due à la désorption.

$$\Delta c_p = -\left.\frac{\partial H}{dT}\right|_W \tag{II.16}$$

Cette grandeur est représentée dans la figure II.9 pour le bois [1]. Ce terme est obtenu en dérivant (II.15) par rapport à la température

$$\Delta c_p = A e^{T_0/T}\left[\frac{T_0}{T^2}\left(1 - e^{-W/W_c}\right) + \frac{W}{W_c^2}\frac{\partial W_c}{\partial T} e^{-W/W_c}\right] \tag{II.17}$$

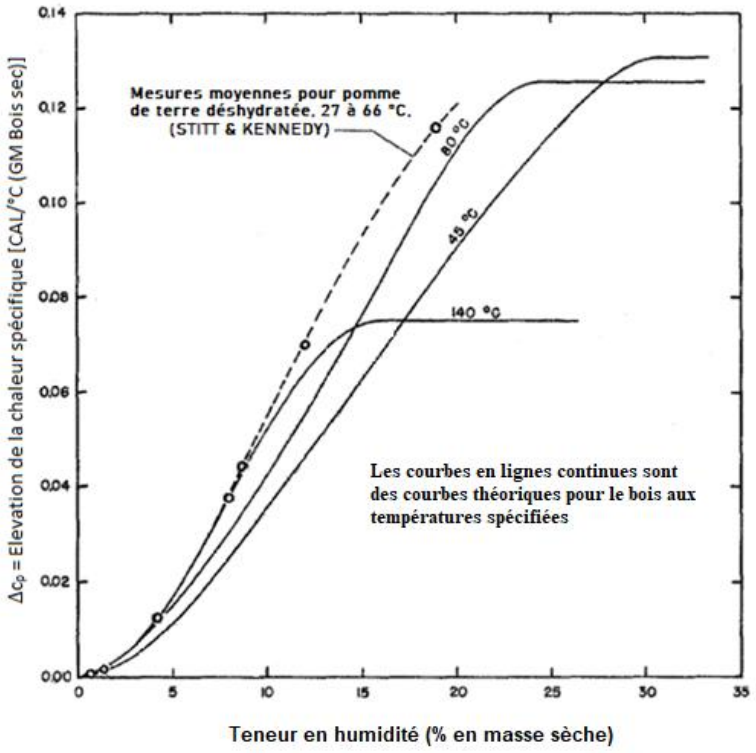

Figure II.9 : Δ_{cp} *en fonction de la teneur en eau pour différentes températures pour le bois* [1]

Comme on verra plus loin dans la détermination des paramètres de l'ajustement de la figure II.7, la teneur en eau caractéristique décroit exponentiellement avec la température :

$$W_c(T) = Be^{T_c/T} \tag{II.18}$$

Avec T_c une température caractéristique au-dessus de laquelle la teneur en eau W_c ne dépend plus de la température (il n'y a plus d'eau liée à extraire). La chaleur spécifique de désorption Δc_p devient :

$$\Delta c_p = A\frac{e^{T_0/T}}{T^2}\left[T_0\left(1-e^{-W/W_c}\right) - T_c\frac{W}{W_c}e^{-W/W_c}\right] \tag{II.19}$$

L'équation (II.11) sera donc modifiée pour tenir compte de la désorption :

$$\int_0^{t_{ign}} \dot{q}\, dt = \int_{T_{amb}}^{T_{ign}} \left(m_s c_p^v + W c_p^e - \frac{\partial H(W)}{\partial T}\right) dT - \int_W^0 \left(\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T + L_v\right) dW \tag{II.20}$$

Afin d'introduire les paramètres de la chaleur de désorption $\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T$ et Δc_p, nous numérisons la figure II.8 *H(T,W)* pour déterminer les paramètres A, T_0 puis T_c à partir de l'ajustement de W_c. L'ajustement de Fig.II.8 en $-A_1 e^{-W/W_c} + Y_0$ donne les résultats du tableau suivant avec R^2 la précision du fit :

T (°K)	Y0	A1	Wc	R²
293	30.42 ± 0.09	30.35 ± 0.08	12.1 ± 0.9	0.9995
333	24.14 ± 0.05	25.4 ± 0.2	8.51 ± 0.08	0.9994
373	18.29 ± 0.04	19.6 ± 0.2	6.15 ± 0.07	0.99952
403	15.30 ± 0.04	16.44 ± 0.07	5.16 ± 0.05	0.99984
433	13.25 ± 0.07	13.54 ± 0.07	4.84 ± 0.08	0.99862

Tableau II.1 : *paramètres d'ajustement de la chaleur de désorption en fonction de W (Fig.II.8)*

A partir de ces résultats et de l'équation (II.15), il est évident qu'aux erreurs prés $Y_0 = A_1$. L'ajustement de $Y_0(A_1)$ et W_c en fonction de la température est montré dans la figure II.10. Les meilleurs ajustements montrent que $Y_0(A_1)$ et W_c dépendent exponentiellement de la température comme :

$$Y_0|A_1 = Ae^{T_0/T}$$
$$W_c = Be^{T_c/T} \qquad \text{(II.21)}$$

Avec les valeurs des paramètres pour le bois représenté dans le tableau suivant :

Relations	A (cal/g)	B	T_0(°K)	T_c
$^{T_0/T}\left(1 - e^{-W/W_c}\right)$	1.73 ± 0.07		890 ± 20	
$W_c(T) = Be^{T_c/T}$		0.52 ± 0.04		920 ± 30

Tableau II.2 : *paramètres d'ajustement de (II.21) (Figure II.10)*

On remarque que les températures caractéristiques T_c et T_0

tel que :

$$T^* = T_c = T_0 = 900°K \qquad \text{(II.22)}$$

$$W_c(T) = Be^{T_c/T}$$

$$\Delta c_p = A\frac{e^{T_0/T}}{T^2}\left[T_0\left(1 - e^{-W/W_c}\right) - T_c\frac{M}{M_c}e^{-W/W_c}\right] \qquad \text{(II.23)}$$

$$\int_0^{t_{ign}} \dot{q}\, dt = \int_{T_{amb}}^{T_{ign}}\left(m_s c_p^v + W\, c_p^e\right)dT + AT_0\int_{T_{amb}}^{T_{ign}}\frac{e^{T_0/T}}{T^2}\left[1 - e^{-W/W_c} - \frac{W}{W_c}e^{-W/W_c}\right]dT - \int_W^0\left(\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T + L_v\right)dW \qquad \text{(II.24)}$$

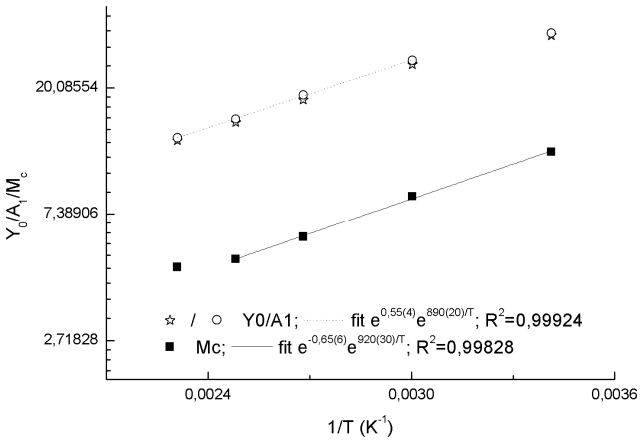

Figure II.10 : *Ajustement des différents paramètres de la chaleur de désorption (II.13)*

Récapitulons maintenant les relations et paramètres à insérer dans le modèle de Koo et Pagni pour introduire l'énergie de désorption additionnelle. Le nouveau bilan d'énergie contenant cette désorption est donné par (II.20)

$$\int_0^{t_{ign}} \dot{q}\, dt = \int_{T_{amb}}^{T_{ign}} \left(m_s c_p^v + w c_p^e + \Delta c_p\right) dT - \int_w^0 \left(\left.\frac{\partial H}{\partial w}\right|_T + L_v\right) dw \qquad \text{(A)}$$

Avec la partie de la chaleur de désorption à température constante donnée par (II.14)

$$\left.\frac{\partial H}{\partial W}\right|_T = \frac{A}{W_c} e^{T_0/T} e^{-W/W_c} \qquad \text{(B)}$$

Et la partie de désorption à teneur en eau constante $-\left.\frac{\partial H}{dT}\right|_W = \Delta c_p$. En considérant que les températures caractéristiques sont les mêmes (II.22), l'équation (II.19) donnant Δc_p devient :

$$\Delta c_p = A \frac{T^*}{T^2} e^{T^*/T} \left[1 - \left(1 + \frac{W}{W_c}\right) e^{-W/W_c}\right] \qquad \text{(C)}$$

Outres les paramètres intervenant dans la formule de Koo et Pagni, tous les paramètres utilisés dans (A), (B) et (C) sont donnés par la table II.2 et l'équation (II.21).

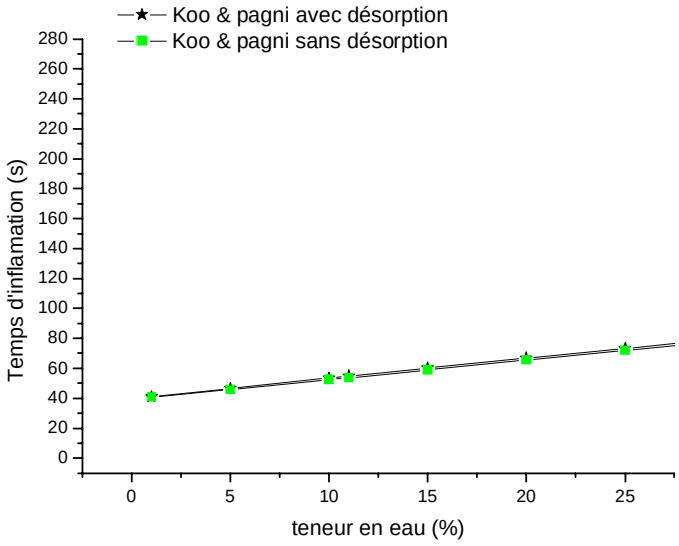

Figure II.11 : *Temps d'inflammation vs teneur en eau calculé avec le model de Koo & Pagni avec et sans introduction de la chaleur de désorption.*

La figure II.11 illustre le résultat de cette étude, il est à remarquer que l'introduction de la chaleur de désorption additionnelle dans le modèle physique de Koo et Pagni pour la détermination du temps d'inflammation de la végétation n'a pratiquement aucune influence sur ce paramètre. La variation de ce temps en fonction de la teneur en eau conserve la linéarité dans les deux cas. Toutefois il est toujours important de savoir que cette énergie est étroitement liée à la chaleur spécifique de chacun des composants de la végétation.

II.12 L'existence ou non d'une humidité critique d'inflammation

La teneur en eau est considérée comme l'un des paramètres les plus importants pouvant affecter le comportement du feu. Il est connu que pour un flux de chaleur incident capable d'allumer un combustible sec peut ne pas atteindre son inflammabilité à l'état humide. En plus le combustible humide une fois allumer, l'intensité de la flamme produite suite à sa combustion est beaucoup plus réduite comparativement à celle produite par le combustible sec [8], [24]. Comme montré par Jervis et Rein [25], les échantillons les plus inflammables sont les vieilles aiguilles mortes et fraiches suivies par les aiguilles sèches mortes et vivantes séchées. Viennent en dernière position d'inflammabilité les aiguilles vivantes fraiches. Ceci confirme l'importance de la teneur en humidité dans le comportement de la combustion des aiguilles de pins. Toutefois, la différence entre les échantillons de végétation morte et vivante ne peut pas s'expliquer par l'effet de l'humidité seulement,

d'autres considérations sont à prendre en compte notamment la composition chimique et le processus de séchage de l'échantillon.

La teneur en humidité du carburant peut être définie sur une base sèche ou humide. La base humide est choisie ici car la teneur en humidité varie dans une plage finie (de 0% pour le carburant sec à 100% pour l'eau uniquement) :

$$h(\%) = \frac{m_w}{m} \times 100 \qquad \text{(II.25)}$$

Ici, m_w est la masse d'eau, et m est la masse totale de combustible. Toutes les études n'ont pas réussi à corréler les mesures d'inflammabilité avec la teneur en humidité [26], [27]. Les fluctuations du temps d'allumage sont causées par la dispersion des matières volatiles, l'humidité et la disposition des particules du combustible dans l'échantillon. McAllister et Weise [28,29] ont fait remarquer que non seulement l'humidité affecte l'inflammabilité du carburant, mais aussi la composition chimique des substances volatiles. Les combustibles vivants et morts peuvent avoir des composants volatils très différents, et par conséquent des propriétés d'allumage et de combustion différentes.

Les études d'inflammabilité menées par Trabaud [26] sur certaines espèces végétales à différentes teneurs en eau et à différents états (mortes, vivantes et séchées) ont montré l'existence d'une teneur en eau appelée humidité critique W_{cr} à partir de laquelle il n'y a pas inflammation de la végétation. Cette limite est de l'ordre de 20% selon Trabaud.

Il propose une relation hyperbolique reliant le temps d'inflammation d'une végétation donnée à la teneur en contenue dans cette végétation ($t_{ign} \propto 1/(w_c - w)$, w_c est l'humidité critique). L'existence ou non d'une humidité critique d'allumage a fait l'objet d'intérêt de plusieurs études de recherches depuis plusieurs décennies. Cette question a aussi intéressé les responsables et les opérationnels dans la lutte contre les incendies car l'existence d'un tel seuil permet d'éviter le déclenchement ou la propagation d'un incendie. Une observation empirique encore inexpliquée est celle de « l'humidité d'extinction » [29,30]. Les feux de forêt ne se propagent pas dans les végétations mortes au-dessus d'un certain seuil de teneur en humidité du combustible, généralement supposé entre 10% et 40% [30].

Prèsde l'humidité critique d'allumage, une phase de transition endothermique/exothermique devrait se produire. Les transitions de phases sont observées dans différentes situations tel que conducteur/isolant [31], liquide/gaz [32] paramagnétique/ferromagnétique [33]. De fort désordrecaractériseces transitions aux limites

critiques. Des grandeurs physiques divergent ou disparaissent près des régions critiques en suivant une loi en puissance universelle [34,35].

Dans le cas où la teneur en humidité introduit une phase de transition allumage/non allumage similaire à celles déjà discutées, le temps d'allumage devrait diverger (non allumage) comme :

$$t_{ign} \sim \Delta w^{-\gamma}; \quad \text{avec} \Delta w = w_c - w \qquad \text{(II.26)}$$

Avec w_c est le seuil de la teneur d'humidité et correspond à la teneur maximale estimée par Trabaud pour l'allumage. L'exposant γ de la loi en puissance de la formule (II.26) caractérise différentes classes de transition [34,35]. Il détermine pour la phase de transition allumage/non allumage comment la phase non allumage est rapidement approchée pour des petites variations autour du seuil d'humidité critique. Différents processus d'allumage peuvent donner lieu à différents exposant γ (différent taux d'émission de composés volatiles, différentes réactions chimiques). Il y a lieu de noter la formule hyperbolique proposée par Trabaud [26] correspond bien au comportement d'une loi en puissance avec un exposant $\gamma = 1$.

Conformément à la norme ASTM 1354, il existe un flux de chaleur critique d'allumage pour chaque combustible [36]. Mindikowski et coll. [37] ont estimé ce flux critique de combustibles fins à partir du comportement linéaire de l'inverse du temps d'allumage (survenant pour des flux élevés comme prévu par la théorie de l'allumage [38]). Cela donne également un comportement de loi en puissance similaire à (II.26) avec un exposant 1 (ici le paramètre est le flux au lieu de la teneur en humidité). Par conséquent, les communautés scientifiques qui travaillent sur les feux de forêt estiment les seuils limites des quantités d'allumage en supposant des comportements de loi en puissance similaire à l'équation (II.26), sans être familiarisés avec la théorie des transitions de phase.

Des expériences effectuées au laboratoire d'études physique des matériaux « LEPM » de l'université de technologie « USTO » ont permis de constater l'inflammation de la végétation fraiche dont la teneur en eau dépasse 50% (en base humide). Cet état de fait a suscité l'intérêt de se poser la question sur l'existence ou non de cette humidité critique d'inflammation pour les matériaux végétaux.

Les tests réalisés par Trabaud concernent la végétation morte séchée naturellement durant différentes saisons ou années. Cependant, la composition chimique du combustible peut changer d'une saison à une autre pour les végétations mortes et vivantes engendrant des

variations dans les propriétés d'inflammabilité et combustibilité [25]. Les incendies de forêt extrêmes étant principalement causés par les feux de cimes, il est important d'étudier le seuil critique d'humidité pour l'allumage de la végétation vivante.

Dans le présent travail, des tests d'allumage sont réalisés pour les aiguilles de pin d'Alep « *pinus halepensis*» moyennant un cône calorimètre [25], [37], [39], [40]. Nous sommes concernés ici par l'effet de la teneur en eau. Afin d'éviter un changement dans la composition chimique et maintenir le caractère vivant du combustible dans les tests d'allumage, les échantillons sont cueillis dans le même jour et du même arbre puis séchés partiellement. La relation du temps d'allumage en fonction de l'humidité suivant (II.26) est utilisée pour vérifier l'existence ou non du seuil critique de la teneur en eau pour l'allumage.

II.12.1 Protocole d'Expérimentation

Afin de vérifier si la composition chimique et les propriétés biologiques des plantes récoltées changent d'une saison à l'autre [28], une série de tests a été réalisée pendant la période de Janvier à Août 2018. Des aiguilles de pin (pinus halepensis) ont été cueillies tôt le matin (à 8h00) du même arbre situé sur le campus (à proximité du laboratoire), et conservés à basse température (environ 10 ° C) pendant toute la journée pour des tests de combustion afin de s'assurer de leur caractère vivant. Les aiguilles récoltées utilisées pour les tests d'allumage ont une longueur d'environ 50 mm et un diamètre de 0,5 mm.

Ces tailles ont été maintenues homogènes pour tous les tests. Immédiatement après la récolte, des échantillons de 15 g ont été préparés pour la détermination de leur teneur en humidité (sauf si la masse est spécifiée). La masse de l'échantillon est pesée à l'aide d'une balance Kern PCB 350, avec une précision de 1 mg. A cet effet, deux techniques de séchage peuvent être utilisées en laboratoire ; un four à micro-ondes délivrant une puissance de 800 watts, et un sécheur à rayonnement infrarouge (dessiccateur) de type Kern MLS 3C. Les différences entre les techniques de séchage par micro-ondes et rayonnement infrarouge sont résumées ci-dessous :

- Le pic d'absorption de l'eau et des autres molécules dipolaires se situe dans la gamme de fréquences 0,9-0,95 GHz [41] qui appartient à la gamme de fréquences micro-ondes;
- La longueur d'onde des fréquences micro-ondes est de 1 mm à 1 m contrairement aux fréquences infrarouges où elle est d'environ quelques µm. Cela rend la diffusion (et l'effet de chauffage) par les micro-ondes dans les particules de combustible

poreux meilleure comparativement aux ondes infrarouges qui ne chauffent que la surface du combustible (la partie restante est chauffée par conduction) [41].

- L'énergie électromagnétique des micro-ondes est directement transformée en énergie cinétique de molécules dipolaires comme l'eau, ce qui conduit à leur évaporation [41].

Cependant, la technique des micro-ondes présente des limites pour le séchage des fruits et légumes en raison de la profondeur de pénétration limitée [42].Au-delà de la technique micro-onde seule, d'autres techniques combinées ont été utilisées pour accélérer le taux d'élimination de l'eau [43].L'épaisseur des aiguilles utilisées ici étant bien inférieure à la taille des fruits, la technique micro-onde seule est suffisante, et permet un séchage en un temps très court (quelques secondes à quelques minutes) par rapport aux techniques infrarouge et convection, ou le séchage complet prend au moins 24 heures. Cette différence importante dans les temps de séchage facilite les tests d'allumage pour différentes humidités avec un micro-onde qu'avec un dessiccateur.

Il convient de noter que le processus de séchage peut s'accompagner de l'évaporation de composants organiques pour les deux techniques. Cette évaporation a une conséquence sur la qualité des fruits secs [42]. Il influence également le processus d'allumage des aiguilles. Plus de composants organiques sont perdus et plus de fluctuations du temps d'allumage sont observées lorsque le temps de séchage est plus long (le processus d'évaporation est aléatoire). Les données précédentes obtenues pour le temps d'allumage à l'aide du dispositif dessiccateur ont montré de grandes fluctuations par rapport à la technique des micro-ondes [44]. Par conséquent, comme tous les tests doivent être réalisés dans la même journée, la méthode de séchage par micro-ondes est choisie. La durée maximale de séchage est déterminée de manière à ce que l'échantillon garde le même aspect. Ce temps maximum est de 3min.

Décrivons maintenant la préparation d'échantillons à humidité variable par séchage partiel. Des échantillons à diverses humidités intermédiaires sont préparés en faisant varier le temps de maintien dans le dispositif de séchage de manière à couvrir toute la plage d'humidité ($t \leq 3$ min).

Soit $m(t)$ la masse d'échantillon obtenue après un temps de séchage, la masse d'échantillon frais est la masse initiale $m_0 = m(t = 0)$. Afin de vérifier la standardisation du dispositif micro-ondes, 50 tests de séchage sont réalisés pour chaque masse initiale m_0 et chacun des temps de séchage utilisés $t \leq 3min$. Cela permet de déterminer la distribution de probabilité $P(m)$ pour obtenir une masse partiellement séchée m pour chaque temps t.

La masse minimale obtenue détermine la masse complètement séchée (m_{dry}) et la teneur en humidité w_{max} de l'échantillon frais m_0 est déterminée à partir de (II.25). La masse moyenne $m(t)$ détermine à partir de (II.24) la teneur en humidité comme suit :

$$w(t) = \frac{m(t) - m_{dry}}{m(t)} \times 100 \qquad \text{(II.27)}$$

La distribution de probabilité *P(m)* de l'échantillon partiellement séché est reportée sur la figure II.12a avec $m_0 = 20g$et pour différents temps de séchage (30s, 1*min* et 3*min*). La distribution de la masse séchée semble correspondre à une distribution gaussienne. Cela signifie que la masse obtenue par le processus de séchage par micro-ondes se comporte bien statistiquement (c'est-à-dire qu'elle est bien moyennée à mesure que le nombre d'essais augmente) [45]. La masse sèche moyenne (sur 50 tests) est représentée sur la figure II.12b en fonction de la masse initiale m_0 pour différents temps de maintien t (30s, 1*min* and 3*min*). Les données correspondent à une tendance linéaire pour tous les temps de séchage avec $R^2 > 0.99$. Ce comportement linéaire montre la stabilité de la détermination de la teneur en humidité pour toute masse séchée ($5g \leq m_0 \leq 20g$).

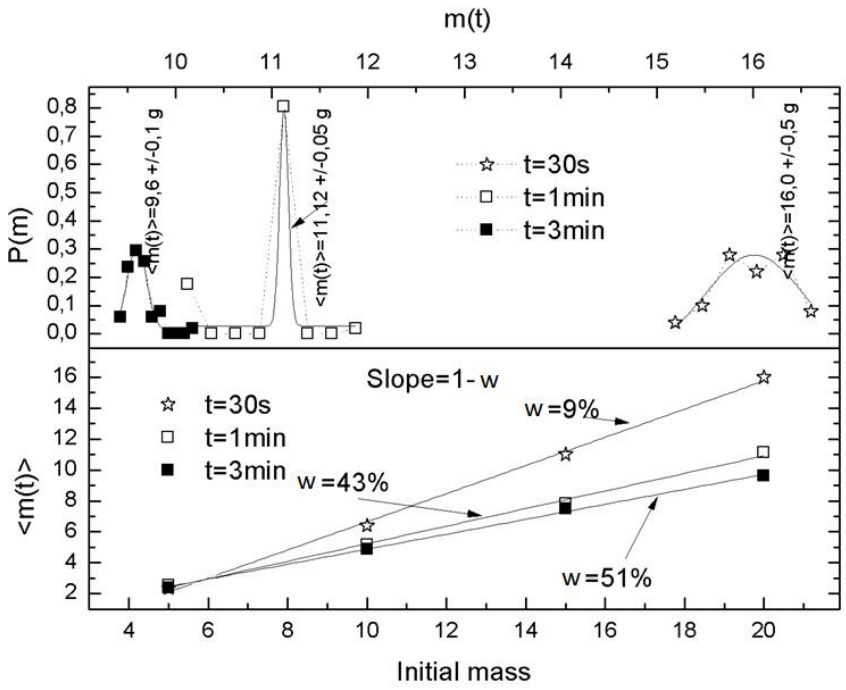

Figure II.12 : *a) La répartition de la masse séchée pour une masse initiale m0 = 20g et des temps de séchage différents,*
b) La masse moyenne de séchage vs masse m0 initiale pour différents temps de séchage (t).

Une fois séchés, les échantillons sont placés dans un porte-échantillon à mailles cylindriques de 10 cm de diamètre. Ils sont exposés ensuite à un flux thermique radiatif constant fourni par un cône calorimètre, dont la source de chaleur est une résistance électrique de *3000 W*. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure II.13a. Le flux thermique incident q'' à la position de la surface supérieure de l'échantillon dépend de la distance du cône chauffant. Il est mesuré par un capteur de flux thermique refroidi à l'eau de type Huksflux SBG 01 fonctionnant dans la plage $0 - 200 kW/m^2$. La distance est fixée de manière à obtenir un flux de chaleur de $17\ kW/m^2$ au centre de l'échantillon. Cette amplitude du flux de chaleur est supérieure au flux critique pour les aiguilles *pinushalepensis*, d'environ $5\ kW/m^2$obtenu par une méthode probabiliste [46]. L'allumage est contrôlé par une flamme pilote située à $1\ cm$ au-dessus de la surface de l'échantillon [47], et le temps d'allumage est enregistré. L'échantillon partiellement séché est placé dans le porte-échantillon de sorte que son épaisseur reste entre 1 et 1,5 cm avec une incertitude de 0,3 cm. Afin de tenir compte de l'hétérogénéité du combustible et de la disposition des aiguilles, chaque test est répété trois fois. Tous les tests ont été effectués dans un environnement sans courant d'air et avec une température ambiante et une humidité relative de la pièce qui variaient entre 13-19 ° C pendant l'hiver (23-26 ° C pendant l'été), et 50-60%, respectivement.

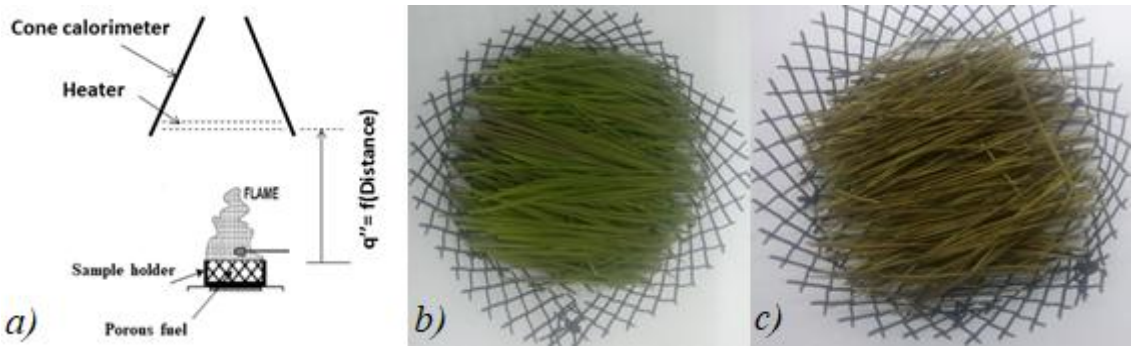

Figure II.13 : *a) Une représentation schématique de la configuration expérimentale ;*
b) unéchantillon d'aiguilles fraîches,
c) des aiguilles sèches.

Le séchage partiel par micro-ondes étant très court $\boldsymbol{t \leq 3min}$, les volatils émis sont négligés. Pendant le processus de séchage d'une masse initiale de l'échantillon ($\boldsymbol{m_0}$), la quantité de volatils reste constante. L'utilisation d'une partie seulement de la masse séchée pour l'inflammation réduit la quantité de volatils, influençant ainsi le processus d'allumage. Par conséquent, toute la masse séchée doit être brûlée.

L'échantillon est composé de fines particules de combustible disposées aléatoirement dans le support donnant un taux de compactage (packing ratio)moyen ϕ défini comme le rapport du volume des particules de combustible au volume du lit de ce dernier $(\boldsymbol{V_{fb}})$ pour la même masse $(\boldsymbol{m} = \boldsymbol{m}(\boldsymbol{t}))$, ou de manière équivalente :

$$\boldsymbol{\phi} = \frac{\boldsymbol{m}/\boldsymbol{V_{fb}}}{\boldsymbol{\rho}} \qquad \text{(II.28)}$$

Ici, $\boldsymbol{\rho}$ est la densité des particules de combustible. Puisque le produit $\boldsymbol{\phi} \times \boldsymbol{\rho}$ est impliqué dans l'augmentation de la température et le processus d'allumage (voir [48]), à partir de (II.27) et (II.28) cette quantité dépend uniquement de la teneur en humidité $\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{w}) \times \boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{w}) = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{0}) \times \boldsymbol{\rho}\ (\mathbf{0})/\ (\mathbf{1}-\boldsymbol{w})$. La masse volumique du combustible sec est de 789 kg/m^3[49], et celle du combustible humide est d'environ 1200 kg/m3 avec une teneur en humidité $w = \mathbf{52}\%$ [50]. La masse de l'échantillon frais est $\boldsymbol{m_0} = \mathbf{10}\boldsymbol{g}$ et celle de l'échantillon séché est de 4,8 g. L'épaisseur étant comprise entre 1 cm et 1,5 cm, cela donne un ratio de compactage pour les échantillons secs $\mathbf{0.052} < \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{w} = \mathbf{0}) < \mathbf{0.078}$, et pour les échantillons frais $\mathbf{0.070} < \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{w} = \mathbf{0.52}) < \mathbf{0.106}$. Ces rapports sont de même ampleur, et coïncident dans les incertitudes. Le processus d'allumage est affecté par un taux de compactage proche de 1 (échantillons fortement compactés), ou proche de 0 (aiguilles individuelles). La porosité élevée permet à l'air de circuler à travers le lit de combustible et facilite l'allumage.

Afin d'étudier si une humidité critique existe ou non, les mêmes conditions expérimentales décrites ici sont utilisées à différentes saisons tout en modifiant le flux de chaleur. L'instant où l'échantillon est exposé au flux de chaleur est défini comme le début du processus d'allumage $t = 0$. Les aiguilles sont chauffées et libèrent de l'énergie par des mécanismes radiatifs, convectifs et de conduction [47].

L'allumage se produit à un certain instant $(t = t_{ign})$ de l'exposition lorsque le mélange gaz/air émis atteint la limite d'inflammabilité inférieure à la température d'inflammation [51]. Comme il est connu, il existe deux types d'allumage : inflammable et couvant, le type inflammable est examiné dans cette étude. L'allumage est enregistré si le temps de persistance de la flamme est supérieur à 4s. On considère que le combustible ne s'est pas enflammé si la combustion couvant est observée avec une oxydation complète du combustible dans sa phase solide [52]. Le temps d'exposition de l'échantillon au flux thermique varie d'un essai à l'autre, et peut durer jusqu'à 75 minutes.

II.12.2 Résultats et discussions

Dans cette partie, nous examinons l'effet de la teneur en humidité sur l'allumage du combustible, et en particulier l'humidité critique. Les effets de la saison, du flux thermique et de la masse sur l'humidité critique sont étudiés en considérant deux valeurs pour chaque paramètre (hiver et été pour les saisons, 17kW/m² et 21kW/m² pour le flux thermique, et 15g et 8g pour la masse initiale $\boldsymbol{m_0}$).

Le temps d'allumage en fonction de la différence de teneur en humidité $\Delta w = w_c - w$ est illustré sur les figures II.14 (dans une double échelle logarithmique). La variation de la teneur en humidité sur ces figures est obtenue à partir du processus de séchage partiel par micro-ondes décrit ci-dessus (voir l'équation II.27). Près de l'humidité critique ($\Delta w \to 0$), le temps d'allumage devrait diminuer sous forme de loi en puissance avec Δw (II.26), c'est-à-dire un comportement linéaire en échelle logarithmique. Ici, l'humidité critique w_c est une variable estimée de telle sorte que la tendance de la courbe devient linéaire. Dans toutes les données (à l'exception de celles de Trabaud) le meilleur ajustement linéaire correspond à $w_c = 100\%$, ce qui signifie que le seuil de non-allumage se produit lorsque le système est composé uniquement d'eau. Par conséquent, il n'y a clairement aucune humidité critique pour l'inflammation.

Sur la figure II.14a, les effets du flux thermique et de la saison sont indiqués pour $m_0 = 15$g. L'exposant critique γ, défini dans l'équation II.26 (la pente de la droite), est indépendant de la saison et du flux de chaleur incident avec pour erreurs statistiques (3.7 ± 0.2et 3.6 ± 0.1pour les essais d'hiver et d'été à 17kW / m², 3.5 ± 0.2 pour les essais d'été à 21kW/m²).

Cela signifie que les deux données devraient appartenir à la même classe d'universalité pour la transition de phase d'allumage[34], [35].En supposant que l'exposant critique est lié au processus d'allumage, cette figure indique que le processus d'allumage (pyrolyse) est indépendant de la saison et du flux incident, ceci est vérifié pour les autres flux (non représentés ici pour ne pas encombrer cette figure). En outre, les données hivernales et estivales (avec le même flux incident) semblent coïncider, ce qui signifie que le taux d'émission de gaz avant l'allumage (pyrolyse) ne change pas de manière significative d'une saison à l'autre. Cela ne signifie pas que la composition des COV est la même, mais le taux d'émission est conservé d'une saison à l'autre. Le processus de pyrolyse est indépendant de la quantité de COV. L'effet des saisons sur la quantité de COV peut être estimé à partir de la

mesure du taux de dégagement de la chaleur et la chaleur de combustion. Le temps de résidence de la flamme peut fournir une estimation qualitative de la quantité de COV (non examinée ici).

Sur la figure II.14, l'effet de la masse est montré pour un flux incident de $17\ kW/m^2$. Les données de Trabaud[26] sont incluses dans cette figure. Un exposant γ légèrement différent est observé lorsque la masse varie. Les résultats pour $m_0 = 15g$ semblent coïncider avec ceux pour $m_0 = 8g$, mais avec des fluctuations plus importantes pour la deuxième masse. Ces fluctuations peuvent être dues à l'élargissement de la distribution de la porosité lorsque la masse devient plus petite. L'ajustement de la loi en puissance (II.26) des données de Trabaud donne une humidité critique $w_c = 20\%$ sur la figure II.14b, contrairement à nos données sur les combustibles vivants, où même des échantillons frais $(w = 52\%)$ ont été enflammés.

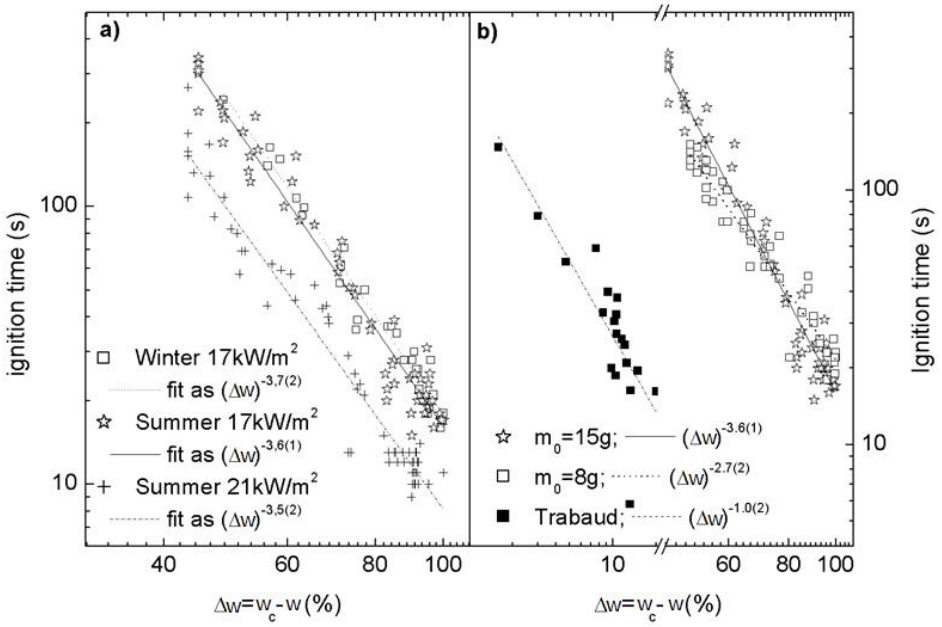

Figure II.14 : *t_{ign} vs. $w_c - w$ en double échelle logarithmique pour:*
a) divers flux de chaleur et saisons,
b) diverses masses d'échantillons.
Les résultats de Trabaud pour les combustibles morts sont inclus dans la figure II.14b à des fins de comparaison. w_c=100%.

Il est important de noter que le flux de chaleur utilisé par Trabaud (l'épi radiateur) est plus petit que celui fourni par notre cône calorimètre. Le flux de chaleur fourni dans les résultats de Trabaud pourrait être proche du flux critique d'inflammation des combustibles humides ($w = 20\%$). Comme le flux de chaleur critique dépend de l'humidité, au-dessus de

20% d'humidité, le flux de chaleur ne sera pas suffisant pour l'inflammation. Les trois points d'humidité maximale dominent clairement l'ajustement de la loi en puissance (II.26) sur la figure II.14b. Pour chacun de ces trois points, un seul test d'allumage a réussi sur les 5 (cinq) réalisés par Trabaud, c'est-à-dire que la probabilité d'allumage est inférieure à 1. Cet aspect probabiliste est une signature de l'existence d'une région critique de la transition de phase d'allumage, où la probabilité d'inflammation diminue de 1 à 0. Le flux de chaleur critique pour les mêmes combustibles (w = 52%) a été trouvé (en utilisant l'aspect probabiliste) autour de 4.5 kW/m^2[46], et 5 kW/m^2 dans cette étude (voir la figure II.16 ci-dessous).

Les mêmes données des figures II.14 (à l'exception de celles de Trabaud) sont représentées sur les figures II.15, où le temps d'allumage est maintenant présenté en fonction de l'humidité sur une échelle semi-logarithmique.

Une tendance linéaire est observée confirmant l'augmentation exponentielle du temps d'allumage avec l'humidité comme:

$$t_{ign} \propto e^{w/w_0} \tag{II.29}$$

Les fonctions exponentielles signifient l'existence d'un paramètre caractéristique. Ici w_0 est la teneur en humidité caractéristique du combustible. À partir de (II.29), le temps d'allumage est presque constant pour de très petites humidité ($w \ll w_0$). Pour un combustible avec une teneur en humidité w donnée, une partie de l'eau est libre et la partie restante est liée.

Pendant l'exposition de l'échantillon au flux thermique du cône calorimètre, l'eau libre s'évapore facilement, puis l'eau liée nécessite une chaleur supplémentaire de désorption. Le temps nécessaire pour évaporer l'eau libre est proportionnel à la quantité de cette eau. La quantité nécessaire pour extraire et évaporer l'eau liée varie de manière non linéaire avec la quantité d'eau, en raison de la chaleur supplémentaire de désorption.

L'humidité caractéristique ne dépend pas de la saison de récolte comme le montre la figure II.15a ni du flux incident comme le montre la figure II.15b. Cette humidité caractéristique semble augmenter à mesure que la masse du combustible diminue (figure II.15c). Le comportement exponentiel illustré sur les figures II.15 peut être dû au processus de chauffage de l'échantillon. En effet, si l'épaisseur de l'échantillon est supérieure à la longueur optique du rayonnement, seule une partie de l'échantillon est chauffée par rayonnement, la partie restante est chauffée par conduction. Une autre raison de cette

augmentation non linéaire est l'atténuation du flux thermique incident par l'eau et les COV évaporés de l'échantillon. C'est pourquoi à notre avis l'humidité caractéristique est plus grande pour une masse plus petite. Par conséquent, le résultat actuel doit être vérifié à l'aide d'un cône horizontal ou d'un panneau radiant afin d'éviter l'atténuation du flux thermique.

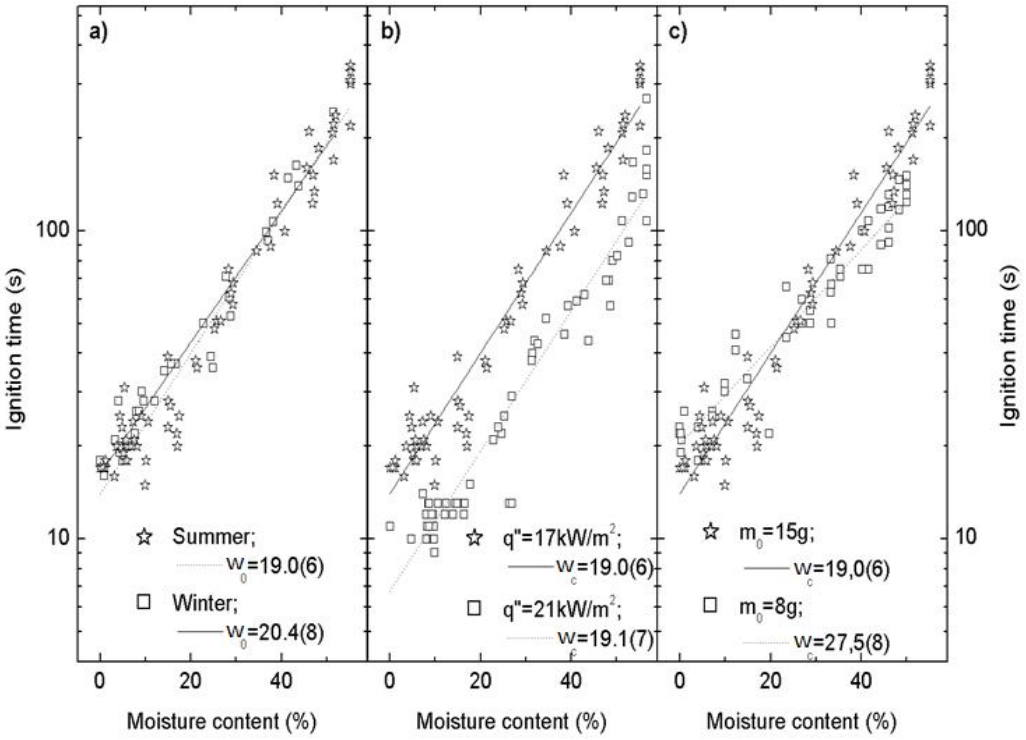

Figure II.15 : *Temps d'allumage en fonction de la teneur en humidité sur une échelle semi-logarithmique.*
a) l'effet des saisons (m_0=15g),
b) l'effet du flux incident (m_0=15g),
c) l'effet de la masse de l'échantillon.

Afin de vérifier si le flux thermique ou la teneur en humidité est le paramètre pertinent pour la transition de phase d'allumage, une série d'essais avec des échantillons frais et secs (séchés par micro-ondes) a été réalisée pour différentes intensités du flux thermique incident $\boldsymbol{q}''$. Si le flux thermique est le paramètre pertinent pour la transition de phase d'allumage pour les combustibles frais et secs, le temps d'allumage devrait se comporter dans la région de transition comme [46] :

$$t_{ign}\ \alpha\ (q''- q''_c)^{-\alpha} \qquad \text{(II.30)}$$

Le comportement de la loi en puissance (II.30) du temps d'allumage doit correspondre à une ligne dans le graphique logarithmique double de la figure II.16a, et la pente est l'exposant α. Le paramètre q''_c varie dans cette figure jusqu'à ce que le comportement linéaire avec le meilleur ajustement (valeur la plus grande de R^2) soit atteint.

Les valeurs estimées de $q"_c$ et le coefficient de corrélation (R^2) sont illustrés à la figure II.16a pour les échantillons secs et frais.

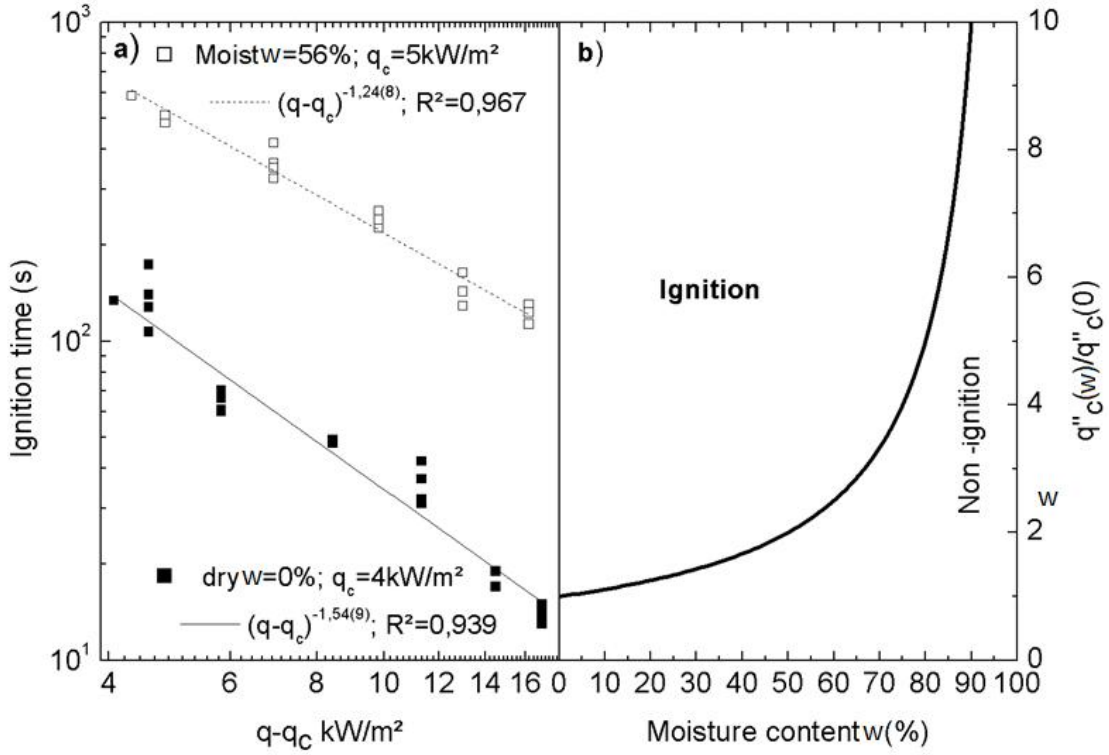

Figure II.16 : *a) Double échelle logarithmique de tign vs. $q"-q"_c$ pour les aiguilles de pinus halepensis fraîches et sèches,*
b) un schéma de diagramme de phase flux chaleur /d'humidité montrant la transition allumage/non allumage.

Comme prévu, le flux de chaleur critique estimé est plus petit pour les aiguilles sèches. L'exposant de puissance sur la figure II.16 est d'environ 1,55 pour les combustibles secs et 1,25 pour les combustibles humides. Ce comportement non universel de la transition de phase d'allumage [34] peut s'expliquer par la différence du processus d'allumage entre les combustibles humides et secs. L'humidité augmente les émissions de COV qui accompagnent la vapeur d'eau dans les combustibles humides [53]. Cependant, les substances volatiles inflammables ne peuvent pas s'enflammer en présence de vapeur d'eau. L'allumage nécessite donc un flux thermique plus important pour augmenter le taux d'émission des substances volatiles restantes jusqu'à ce que la limite inférieure d'inflammabilité soit atteinte. Par conséquent, la transition de phase d'allumage / non-allumage est régie par le flux thermique incident suivant (II.29). Pour toute teneur en humidité h, il existe un flux thermique critique $q"_c(w)$au-dessus duquel l'inflammation se produit. Soit $q"_c(0)$ le flux critique pour les

combustibles secs ($w = 0$). Pour une humidité $w = 100\%$ (eau uniquement), il n'y a pas d'allumage et le flux thermique critique diverge ($q"_c(w = 100\%) = \infty$). L'espace des phases (flux thermique / teneur en humidité) est indiqué schématiquement sur la figure II.16b en supposant une courbe hyperbolique de la dépendance du flux thermique critique à l'humidité. D'après cette figure, l'inflammation se produit pour toute humidité à condition que le flux thermique soit suffisamment important pour appartenir à la phase d'allumage. Très probablement, les données de Trabaud sont dans la phase de non-allumage.

Dans les feux de forêt, le temps de résidence de la flamme est fini (30-40s pour les combustibles fins s'ils sont disposés dans un lit non compacté [54]) contrairement au cône calorimètre, où le flux de chaleur radiatif est maintenu jusqu'à l'allumage du combustible. Par conséquent, la concurrence entre la combustibilité (chaleur de combustion) et l'inflammabilité (énergie d'inflammation) du combustible exposé conduit soit à une propagation ou non propagation de la flamme. Dans le cas où le taux de dégagement de chaleur du combustible en feu permet l'allumage de combustibles sains (c'est-à-dire la phase d'allumage ;$q" > q"_c$), le combustible en feu est caractérisé par sa chaleur de combustion et le combustible sain par son énergie d'allumage ($E_{ign} = q" \times t_{ign}$). Il est alors commode de comparer les énergies au lieu des flux de chaleur pour examiner les propriétés de propagation du feu. L'énergie d'allumage augmente avec la teneur en humidité (le combustible a besoin de plus d'énergie pour évaporer l'eau avant l'allumage).

La chaleur de combustion E_c (également appelée pouvoir calorifique) diminue avec l'humidité (l'évaporation de l'eau est accompagnée de l'évaporation des composants organiques comme indiqué par Ciccioli et al [53]). Sur la figure II.17, la chaleur de combustion et l'énergie d'inflammation sont schématiquement présentées en fonction de la teneur en humidité du combustible. Du Côté droit de cette figure, le seuil d'humidité pour l'allumage $w_c$correspond au flux de chaleur critique $q"_c$déterminé à partir de la figure II.16 (l'énergie d'inflammation est infinie $E_{ign} = q"_c \times \infty$). Le seuil d'humidité de propagation du feu est celui pour lequel l'énergie reçue par le combustible coïncide avec l'énergie d'allumage ($E_c = E_{ign}$). Il correspond au point d'intersection des courbes de la figure II.17.

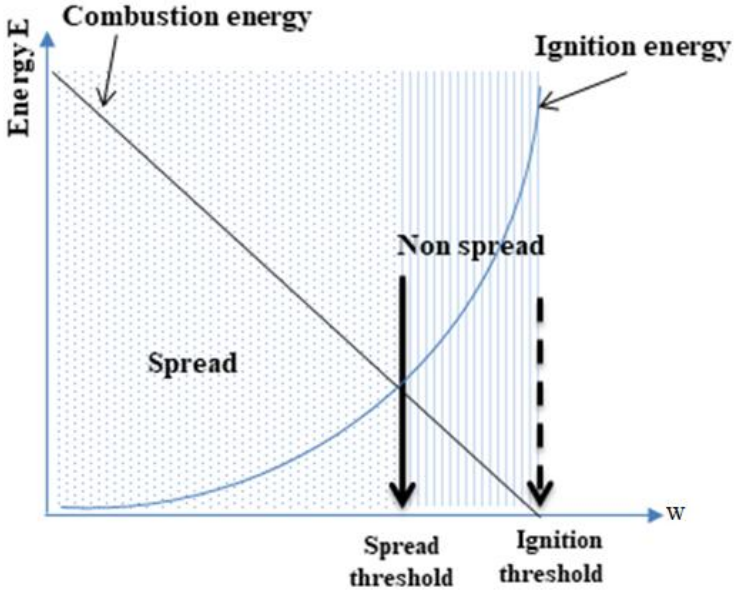

Figure II.17 : *Une représentation schématique des énergies d'allumage et de combustion par rapport à la teneur en humidité w. Les seuils d'allumage et de propagation sont clairement indiqués.*

Il convient de noter que seule une proportion de l'énergie de combustion libérée est reçue par le carburant sain (ce qui améliore le décalage du seuil d'humidité pour la propagation vers le côté gauche). Ainsi, le seuil d'humidité pour la propagation est déplacé vers des valeurs inférieures (flèche du côté gauche sur la figure II.17). Par conséquent, un seuil d'humidité fini (w_c < 100%) est attendu pour la propagation des feux de forêt. Ce seuil d'humidité correspond au seuil dynamique de propagation trouvé par Zekri et al. [55] en utilisant un modèle de petit mondepour la propagation du feu. Ce modèle de simulation a été validé par des feux de forêt historiques et expérimentaux [56].

Évidemment, un feu de forêt ne se propage pas lorsque les combustibles sont humides, c'est pourquoi l'étude de l'effet de l'humidité sur la transition de phase propagation / non propagation est nécessaire à la fois expérimentalement et théoriquement (à l'aide de modèles physiques impliquant la désorption et l'évaporation de l'eau).

Conclusion

L'énergie nécessaire à l'inflammation d'un combustible végétal est étroitement liée à l'énergie d'évaporation de l'eau contenue dans cette végétation, cette énergie d'évaporation est plus ou moins importante selon la distribution de l'eau à l'intérieur de la structure du végétal c'est-à-dire s'il s'agit d'une eau liée ou libre. Une étude analytique de l'influence de l'énergie de désorption sur le temps d'évaporation et par conséquent sur le temps d'inflammation du combustible végétal a été effectuée. Il a été démontré que l'introduction de cette énergie de désorption dans le modèle de Koo et Pagni utilisé pour la prédiction de la propagation du feu n'apporte pratiquement aucun changement dans le comportement de la variation du temps d'allumage en fonction de la teneur en eau contenue dans la végétation.

D'autre part, le seuil d'humidité pour l'inflammation est examiné en utilisant l'analyse de transition de phase endothermique / exothermique de la dépendance du temps d'allumage à la teneur en humidité. Des tests d'allumage d'aiguilles de *pinus halepensis* vivantes ont été réalisés à l'aide d'un cône calorimètre. Afin d'éviter les effets de saisons et les modifications de leur structure chimique, des combustibles vivants ont été récoltés du même arbre, partiellement séchés à l'aide d'un four à micro-ondes, puis allumés le même jour. Le processus de séchage permet la variation de la teneur en humidité. A partir de l'ajustement de la loi en puissance correspondant à la transition de phase d'allumage, l'humidité critique obtenue est $w_c = 100\%$, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'humidité critique pour l'inflammation. L'humidité maximale observée par Trabaud en 1976 qui a permis l'allumage, peut être en fait une humidité pour laquelle le flux thermique incident n'est pas suffisant pour l'allumage. Le flux thermique est donc le paramètre pertinent pour la transition de phase d'allumage, ce qui signifie que pour toute humidité, il y a un flux au-dessus duquel l'inflammation se produit. Cependant, un seuil d'humidité pour la propagation du feu peut exister en raison de la concurrence entre les énergies d'allumage et de combustion. Enfin, l'augmentation exponentielle du temps d'allumage avec l'humidité révèle l'existence d'une humidité caractéristique correspondant à l'eau liée contenue dans le combustible.

Références Bibliographiques (Ch.II)

[1] G. M. Byram, F. M. Sauer, W. L. Fons, R. K. Arnold, Thermal Properties of Forest Fuels . Interim Technical Reports AFSWP – 404, 1952.

[2] C. E. Van Wagner, Seasonal variation in moisture content of eastern canadian tree foliage and the possible effect on crown fires. Canada Dept. Forestry, Edmonton, For. Res.Br.-1204, 1967.

[3] R.C. Rothermel, R.A. Wilson, G.A Morris, S.S. Sackett, Modeling moisture content of dead fine wildland fuels : input into the BEHAVE fire prediction system, United States Departement of Agriculture, Forest service, Research paper INT. 359, February 1986

[4] O.Séro-Guillaume, S.Ramezani, J. Margerit, D.Calogine, On the experimental determination of flame front positions and of propagation parameters for a fire . International J. of Therm. Sciences, 1148-1157, 2008.

[5] R.M. Nelson, Water relations of forest fuels. In: E.A. Johnson, K.Miyanishi, (Eds.) Forest Fires, Behavior and Ecological Effects (Academic Press, San Diego,CA) pp. 79–149. 2001. https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50006-4.

[6] B. Serafim, K. Kai, J.F. Peter, Modeling Food Processing, Woodhead Publisher, 2015.

[7] S.V. Jangam, M.Karthikeyan. A.S.Mujumdar, A Critical Assessment of Industrial Coal Drying Technologies : Role of Energy, Emissions, Risk and Sustainability, 2011, https://doi.org/10.1080/07373937.2010.498070.

[8] J.V. Garcia-Perez, J.A. Carcel, E. Riera, A. Mulet, Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel, Drying Technology, vol. 27. 2009.

[9] R.Samuelsson, J.Burvall, R.Jirjis, Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass, Biomass and Bioenergy, vol.30, 929–934, 2006.

[10] O. Aumporn, Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phases, Th7se de doctorat, Université de Perpignan, 2017.

[11] Y.Jannot, A.Kanmogne, A.Talla, L.Monkam, Experimental Determination and Modelling of water Desorption Isotherms of Tropical Woods : Afzelia, Ebony, Iroko, Moabi and Obeche, Holz als Roh-und werkstoff, Vol.64,N°2, pp.121-124, 2006. doi : 10. 1007/s00107-005-0051-2

[12] C.J. Lomauro, A.S. Bakshi et T.P. Labuza, Evaluation of food moisture sorption isotherm equation. Lebenmittel-Wissenchaft und Technologie, vol. 18, 111-117, 1985.

[13] R.D.Andrade, R.M. Lemus, C.C.E. Perez, Models of sorption isotherms for food : uses and limitations, VITEA, vol.18 (3) , 2011.

[14] M.S. Sodha, A.Dang, P.K.Bansal, S.B.Sharman, An analytical and experimental study of open sun drying and a cabinet type drier, Energy Conversion and Management, 25, 263-271,1985. https://doi.org/10.1016/0196-8904(85)90042-1

[15] M.Daguenet, Les séchoirs solaires : théorie et pratique, Ed. Unesco 1985, http://hdl.handle.net/123456789/118877. Collections. Collection 8 [10000].

[16] Ralph M. Nelson, Jr, Water relations of water forest fuels, Chap 4, Behavionr and Ecological Effects. 2001. https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50006-4

[17] G.M. Byram, Combustion of forest fuels. In Davis KP (ed) Forest Fire: control and use. McGraw-Hill, New York.

[18] A. Pompe, RG Vines, The influence of moisture on the combustion of leaves, vol. 30. 1966. https://doi.org/10.1080/00049158.1966.10675417

[19] A.J. Stamm, E.E. Harris, Chemical Processing of wood. New York: Chemical Publishing Company, 1953.

[20] H.E. Anderson, Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels, Can.J.For.Res, vol. 20. 1990.

[21] W.T. Simpson, Specific gravity, Moisture content and density relationship for wood. Gen. Techn, Rep. FPL. GTR-67 Madison. 1993.

[22] C.E. Van Wagner, Drying rates of some fine forest fuels, Fire Control Note 30:5.

1969.

[23] F. Stitt, E.K. Kennedy, Specific Heats of Dehydrated Vegetables and Egg Powder, Food Reaserch, vol.10, 426-436, 1945.

[24] E.A. Catchpole et W.R. Catchpole, Modelling moisture damping for fire spread in a mixture of live and dead fuels, Int. J. Wildland Fire 1. 1991. https://doi.org/10.1071/WF 9910101

[25] F.X. Jervis, G. Rein, Experimental study on the burning behavior of pinus halepensis needels using small-scale fire calorimetry of live, aged and dead samples, Fire Mater, vol. 40. 2015. https://doi.org/10.1002/fam.2293

[26] L. Trabaud, Inflammabilité et combustibilité des principales espéces des garrigues de la regionméditerranéene, Oecol. Pant. 1976.

[27] TH Fletcher, BM Picket, SG Smith, SG Spittle, MM Woodhouse, E Haake, DR Weise, Effect of moisture on ignition behavior of moist California chaparral and Utahleaves, vol. 179. Combust. Sci. Technol, 2007.https://doi.org/10.1080/00102200601015574

[28] S. McAllister and D. R. Weise, Effect of season on ignition of live wildlandfuels using the forced ignition and flame spread test appartus, vol. 185. Combust. Sci. Technol, 2017. https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1206086

[29] D.R. Weise, RH. White, F.C. Beall, and M. Etlinger, Use of the cone calorimeter to detect seasonal differences in selected combustion characteristics of ornamental vegetation, vol. 14. Int. J.WildlandFire, 2005. https://doi.org/10.1071/WF04035

[30] R.C. Rothermel, A mathematical model for predecting fire spread in wildland fuels.USDA For. Serv.Res. Pap. INT-115. 40. 1972.

[31] D. Stauffer, A. Aharony, Introduction to Percolation Theory, Taylor and Francis, London, 1992.

[32] S.J. Blundell and K.M. Blundell, Concepts in Thermal Physics, Oxford University Press, Oxford. 2006.

[33] V. Pokrovski, Properties of ordered, continuously degenerate systems, vol. 28. Adv.Phys. https://doi.org/10.1080/00018737900101425

[34] H.E. Stanley, Introduction to phase transitions and critical phenomena Claredon Press, Oxford. 1971.

[35] J.M. Yeomans, Statistical mechanics of phase transitions, Clarendon Press, Oxford. 1992.

[36] V. Babrauskas, Heat release rate In: SFPE Handbook of fire protection engineering (Ed MJ Hurley), Springer, Heidelberg. 2016.

[37] P. Mindykowsky, P. Fuentes, JL. Consalvi, B. Porterie, Piloted Ignition of Wildland Fuels, vol. 46. Fire safety Journal, 2011. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.09.003

[38] J.G.Quintiere, Fundamentals of fire phenomena. J. Wiley& Sons West Sussex, 2006.

[39] T. Fateh, F. Richard, B. Batiot, T. Rogaume, J Luche, J Zaida, Characterisation of the burning behavior and gaseouse mission of pine needles in a cone calorimeter-FTIR appartus, vol. 82. Fire safety Journal. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.03.008

[40] V. Tihay-Felliceli, PA. Santoni, T. Barboni, L. Leonelli, Autoignition of Dead Shrub Twings, Fire Techn. 2016.

[41] R.F. Schiffmann, Microwave and dielectric drying , In Handbook of industrial drying (Ed Mujumdar AS) (CRC Press: Florida) Chapter 12, vol. 52. 2006. https://doi.org/10. 1007/s10694-015-0514-x

[42] M. Zhang, J. Tang, AS. Mujumdar, S. Wang, Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, vol. 17. Trends in food science &Technol, 2006. https://doi.org/10. 1016/j.tifs.2006.04.011

[43] S. Gunsekaran, Pulsedmicrowave-vacuum drying of food materials, vol. 17. DryingTechnology, 1999. https://doi.org/10.1080/07373939908917542

[44] S.M. Terrah, F.Z. Sabi, O. Mosbah, A. Dilem, N.Hamamousse, A. Sahila, O. Harrouz,

N. Zekri, A. Kaiss, JP. Clerc, O. Rahli, F. Giroud, C. Picard, Is there a critical fuel

moisture content for flammability? In: Advances in Forest Fire Research (Ed. D.X Viegas), ADAI/CEIF. Coimbra, 2018. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_57 .

[45] L.D. Landau, E.M. Lifshitz, StatisticalPhysics. Toronto: Pergamon Press, 1970.

[46] F.Z. Sabi, S.M. Terrah, O. Mosbah, A. Dilem, N. Hamamous, A. Sahila, N. Zekri, A. Kaiss, JP. Clerc, O. Rahli, F. Giroud, C. Picard, Ignition/non ignition phase transition,

In: Advances in Forest Fire Research (Ed. DX Viegas), ADAI/CEIF. Coimbra,2018. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_55

[47] J. Torero, Flaming ignition of solidfuels. In: SFPE Handbook of fire protection engineering (Ed MJ Hurley) Springer: Heidelberg. 2016.

[48] P. Koo, P. Pagni, P. Woycheese , S. Stephens , D. Weise, J. Huff, A Simple Physical Model for Forest Fire Spread Rate,. Fire Safety Science -proceedings of the Eighth International Symposium, 2005.

[49] A. Lamorlette, M. El Houssami, JC. Thomas, A. Simeoni, D. Morvan, A dimensional analysis of forest fuel layer ignition model: Application to the ignition of pine needle litters, vol. 33. Journal of Fire Sciences, 2015.

[50] H. Boutchiche, Comparison of the density of dry and fresh pine needles by two methods, Communication privée, LEPM, USTO. 2019.

[51] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, 3éd. Chichester: John Wiley and Sons, 2011.

[52] G. Rein, Smoldering combustion, In: M.J.Hurley (Ed), SFPE Handbook of fire protection engineering, chap. 19, Springer, Heidelberg. 2016.

[53] P. Ciccioli, M. Centritto and F. Loreto, Biogenic organic volatile compound emissions from vegetation fires, vol.37. Plant, Cell&Environment, Cell&Environment, 2014. https ://doi.org/10.1111/pce.12336

[54] B.M. Wottom, J.S. Gould, WL. MacCaw, NP. Cheney, SW. Taylor, Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest, vol. 21. Int. J.Wildland Fire, 2012.

[55] N. Zekri , B. Porterie , J-P. Clerc , J-C Loraud , *Propagation in a two-dimensional weighted local small-world network*. Phys. Rev.E71, 046121, 2005. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.046121

[56] J.K. Abdou, Y. Billaud, D.A. Brou, JP. Clerc, JL Consalvi , A. Fuentes, A. Kaiss, F. Nmira, B. Porterie, L. Zekri, N. Zekri, Simulating wildfire patterns using a small-world network model, vol. 221. Ecol.Modeling, 2010. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel

CHAPITRE III

Dégradation Thermique du Matériaux Végétal

Introduction

La dégradation thermique du combustible et la combustion des gaz émis dans l'air constituent un socle commun à toutes les études de modélisation car ce processus est à l'origine du feu. Il est donc nécessaire de mieux définir les étapes thermiques et chimiques qui consistent à dégrader un combustible solide en combustible gazeux qui alimente la flamme.

La propagation d'un incendie est déterminée par des facteurs naturels, parmi lesquels on distingue :

- Le vent qui active la combustion par apport d'oxygène, rabat les flammes sur la végétation, modifie la direction du feu et transporte des particules incandescentes,
- Le relief qui conditionne la vitesse de propagation en inclinant plus ou moins les flammes par rapport au sol,
- La structure et la composition de la végétation qui vont influencer la combustibilité (aptitude de la végétation à propager le feu)

Sur ce dernier point, le scientifique peut intervenir pour améliorer et créer des outils d'aide à la décision grâce à une meilleure connaissance des mécanismes chimiques de propagation du feu. La chimie physique et analytique intervient dans ce domaine pour l'étude de la composition des combustibles et la cinétique des réactions mises en jeu. Il s'agit d'aller un peu plus loin que de considérer uniquement l'information qualitative donnée par le mécanisme élémentaire connu sous le nom de triangle du feu [1].

Les flammes produites lors d'un incendie de forêt sont des flammes de diffusion. Elles sont caractérisées par une très faible quantité de mouvement initiale et d'écoulement. Elles sont alimentées par les gaz combustibles libérés par la pyrolyse des éléments fins végétaux (Feuilles, brindilles, etc.) [2], le processus de dégradation thermique étant entretenu par les transferts convectifs et radiatifs de la zone de combustion vers le combustible imbrûlé.

III.1 Constitution des Combustibles Forestiers

Le combustible végétal étant un matériau hétérogène dont les composants varient d'une espèce à une autre, d'un état à un autre pour une même espèce (morte ou vivante), l'étude de son inflammabilité est d'une grande complexité. L'étude et la compréhension de l'influence des principaux composants sur l'inflammabilité des espèces végétales est cruciale dans la prédiction et la propagation des feux de forêt, S. McALLISTER et al [3] résument

l'ensemble des travaux effectués dans ce domaine. Les émissions de combustion dépendent directement de la composition chimique du combustible et des conditions de la combustion.

La végétation se compose de matière organique [4]. Malgré la grande diversité des espèces, les variations climatiques et pédologiques, il est admis que les proportions en composants principaux sont relativement constantes [5], [6]. Généralement, ils sont constitués de carbone, d'hydrogène et d'oxygène [7–9]. Byram [7] donne la formule C6H9O4, représentant le matériel végétal. Ces éléments se combinent entre eux pour former les principaux constituants de la matière organique. On peut classer les constituants en quatre classes de famille chimique à savoir :

- Des hydrates de carbone représentant 60 à 80 % du végétal, il s'agit de la cellulose et des hémicelluses ;
- Des substances phénoliques (15 à 35 %), comprenant la lignine, les tanins, etc … ;
- Des résines, regroupant les constituants volatils, les esters des acides gras du glycérol ou des stérols ;
- Des minéraux qui sont en proportion plus ou moins importante suivant le sol et les espèces, et allant de 0,5 à 5 %.

Il s'agit donc principalement d'un arrangement de cellulose (40 à 50 %), d'hémicellulose (15 à 25 %) et de lignine (20 à 30%). On emploie donc le terme de combustibles lignocellulosiques dans le cadre des études concernant les feux de forêts [10].

III.2 Dégradation thermique du végétal

La combustion est un processus physico-chimique complexe, fortement exothermique, irréversible résultant de la combustion de l'oxygène de l'air et du combustible et pouvant être résumé à un mécanisme d'oxydoréduction où le dioxygène (O2) de l'air joue le rôle d'oxydant et le végétal celui du combustible [11].

La pyrolyse stricto sensu consiste en la dégradation thermique du végétal en l'absence d'agent oxydant [12], [13]. Dans le cas des combustibles forestiers, souvent très poreux, cette situation n'est généralement pas le cas. Il a été montré que la présence d'air active la pyrolyse oxydante d'un combustible [12], [14]. La vitesse de pyrolyse des végétaux sera ainsi supérieure sous une atmosphère oxydante.

La figure III.1 [1] représente la corrélation entre la composition d'un végétal et sa perte de masse en fonction de la température sous atmosphère oxydante ainsi que les produits émis aux différents stades de cette dégradation.

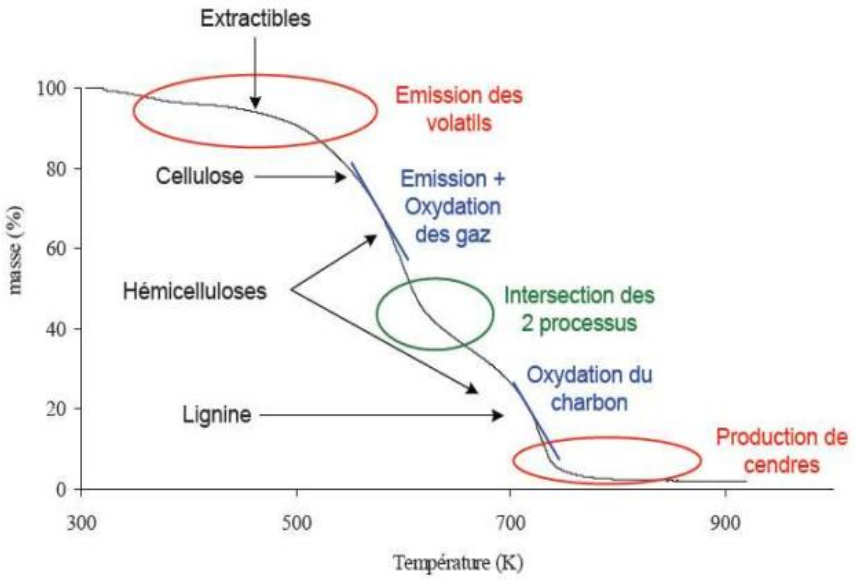

Figure III.1 : *Corrélation perte de masse/composition du végétal [1]*

Le processus de combustion d'un végétal peut être décomposé en une succession d'étapes. Au contact de la température (entre 50 et 200°C), le végétal se déshydrate et libère de la vapeur d'eau et des composés extractibles. Ensuite, lorsqu' il atteint sa température de pyrolyse (aux environs de 300°C), les molécules constitutives du végétal se cassent et produisent des gaz combustibles (monoxyde de carbone CO, méthane CH_4, …) et non combustible (CO_2) et du charbon [15].

Ce phénomène requière plus d'énergie qu'une simple évaporation. De ce fait, la température de surface des solides tend à être élevée (classiquement 400°C) [12].

Les gaz combustibles vont ensuite s'enflammer (auto-inflammation ou inflammation pilotée), au contact de l'air ambiant, c'est alors une combustion homogène. Le résidu charbonneux est ensuite oxydé au contact de l'air. Il s'agit de la phase de « smoldering » ou combustion sans flamme, c'est une combustion hétérogène gaz-solide. Enfin, l'extinction (flamme out) survient si l'apport d'oxygène est insuffisant ou bien si tout le combustible a été consommé [15], [16].

Les composés extracellulaires ; et plus particulièrement les extractibles constituent les Composés Organiques Volatiles (COV) émis [1], [17]. Ces composés gazeux

représentent une importance capitale dans la compréhension des phénomènes car ils peuvent être à l'origine d'embrasement généralisé éclair [1], [4].

Les gaz formés par la dégradation du végétal sont dépendants de la structure chimique de celui-ci. La dégradation thermique de la cellulose et de l'hémicellulose entraîne la formation de dérivés de polysaccharides alors que la dégradation de la lignine va engendrer la formation d'hydrocarbures et de composés phénoliques. Ces composés vont ainsi participer à la combustion et à la propagation du feu [15], [18].

La modélisation de la dégradation thermique d'un végétal est complexe en raison du fort couplage entre les procédés chimiques, thermiques et de transfert de masse [12], [19], [20]. L'énergie thermique nécessaire à cette dégradation est fournie sous forme de rayonnement thermique, convection ou conduction. La vitesse de montée en température du végétal va dépendre du flux de chaleur reçu par celui-ci et de ses propriétés physiques (son coefficient d'absorption, sa masse volumique, sa chaleur spécifique, sa conductivité thermique, son rapport surface-volume) [21]. On distingue deux régimes de dégradation, celui des combustibles thermiquement fins et celui des combustibles thermiquement épais.

L'appartenance à l'un ou l'autre de ces deux régimes de pyrolyse est déterminée par le nombre de Biot de la particule. Le nombre de Biot est un nombre sans dimension permettant de comparer l'importance relative des transferts thermiques à l'intérieur et à la surface du corps. Il est classiquement exprimé par [12] :

$$Bi = \frac{h\,L_c}{\lambda_s} \qquad \text{(III.1)}$$

Où h (W.m^{-2}.K^{-1}) est le coefficient de transfert thermique par convection, L_c (m) une longueur caractéristique de la particule et λ_s (W.m^{-1}.k^{-1}) la conductivité thermique du solide. Benkoussas et al. [19] proposent une expression du nombre de Biot basée sur le rapport surface-volume de la particule et le flux de chaleur reçu par celle-ci :

$$Bi = \frac{\varepsilon\,\Phi_{ext}}{\lambda\sigma\Delta T} \qquad \text{(III.2)}$$

Où ε est l'émissivité des particules, Φ le flux radiatif incident (W.m^{-2}), λ la conductivité thermique des particules (W.m^{-1}.K^{-1}), σ le rapport surface-volume des particules (m^{-1}) et T la différence entre une température caractéristique de pyrolyse et l'ambiant (K). La transition entre un régime thermiquement fin et un régime thermique épais se situe pour un nombre de Biot égal à 0,1 [19].

III.3 Combustion en phase gazeuse

Lors de la dégradation du végétal, des gaz combustibles (principalement du monoxyde et du dioxyde de carbone, et des hydrocarbures de faibles masses molaires [22] sont émis et se diffusent à la surface du végétal créant ainsi un mélange inflammable. Celui-ci va s'enflammer si la température atteint la température d'inflammation (ou en présence d'une source), créant une combustion entre les gaz combustibles et l'air ambiant.

Une flamme de diffusion se développe alors à la surface de l'échantillon au niveau de la zone où le combustible et le comburant se mélangent, provoquant une importante augmentation de la température.

L'énergie produite par la flamme est alors retransmise au combustible par rayonnement et par convection ce qui permet d'entretenir l'émission de ces gaz [23] et de poursuivre la combustion.

Ainsi, pour une flamme de diffusion la puissance de combustion est liée à la vitesse de production des gaz de dégradation qui est dépendante des transferts thermiques entre la flamme et le solide. Tewarson [24] écrit donc que la vitesse de production des gaz est donnée par la mesure de la vitesse de perte de masse du combustible ($\dot{m}''$) (g.m-2.s-1), en régime stationnaire par :

$$m'' = \frac{\dot{q}''_{fr} + \dot{q}''_{fc} - \dot{q}''_{rr}}{\Delta Hg} \qquad \text{(III.3)}$$

où $\dot{q}''_{fr}$ et $\dot{q}''_{fc}$ sont les densités de flux radiatif et convectif fournies par la flamme au solide en kW.m-2 ; $\dot{q}''_{rr}$ représente les pertes thermiques exprimées comme une densité de flux radiatif ré-rayonné depuis la surface du combustible en kW.m-2 et ΔHg est l'enthalpie de changement de phase nécessaires pour produire les composés volatils en $kJ.kg^{-1}$.

III.4 Combustion hétérogène

Lorsque le combustible n'émet plus de gaz de combustion, le résidu charbonneux qui s'est formé se retrouve au contact de l'air ambiant, il s'agit principalement de carbone pur et de cendres [15], [19]. C'est la dernière étape de la combustion avant l'extinction. A ce stade, l'oxygène est en contact direct avec la surface du résidu charbonneux qui présente alors un rougeoiement caractéristique de cette étape. La combustion va se poursuivre tant que la

température le permet (généralement supérieure à 260 °C [15], [25]; en formant principalement du monoxyde de carbone et de faible quantité de dioxyde de carbone.

A la fin de la combustion, il reste les cendres qui proviennent de l'oxydation des minéraux présents dans le combustible dont la composition varie suivant les végétaux et la température à laquelle est réalisée la combustion.

III.5 La pyrolyse

La pyrolyse est un phénomène de décomposition chimique complexe provoquée par l'absorption d'énergie (par exemple l'énergie reçue par une flamme ou un panneau radiant). Les molécules lourdes présentes dans le végétal (comme la cellulose) se transforment en des molécules plus légères (hydrocarbures) que l'on retrouve lors des réactions de combustion [26].

Dans son sens étymologique de « pyro » (chaleur) et « lyse » (coupure), la pyrolyse est un processus de dégradation thermique de la biomasse en atmosphère inerte ou confinée. Elle conduit à la formation de trois phases [1] :

- Un gaz composé principalement de CO, CO2, CH4 et H2. D'autres hydrocarbures légers incondensables tels que C2H4, C2H6, C2H2 sont également obtenus, en moindre proportion.
- Une fraction condensable complexe, appelée jus pyroligneux, composée d'une phase aqueuse, contenant essentiellement des alcools et des acides, et d'une phase organique contenant une grande variété d'hydrocarbures formant les goudrons.
- Un résidu solide carboné, le charbon de bois, qui conduit aux cendres après combustion.

Une fois la phase d'évaporation passée, le combustible monte en température. Entre 130°C et 190°C la lignine et l'hémicellulose commencent à se dégrader et à pyrolyser : ce sont des réactions endothermiques. Au-dessus de 200°C, cette dégradation s'accélère. Entre 200°C et 280°C une réaction chimique de déshydratation de la cellulose se produit avec modification des liaisons chimiques de la cellulose : la molécule d'hydrocellulose se forme. L'efficacité de cette transformation dépend de la vitesse de chauffe et de la quantité de minéraux présents. C'est également un processus endothermique. A ce stade le combustible a déjà perdu 35 % de sa masse initiale.

La présence d'une flamme dépend du taux de génération en gaz de pyrolyse, notamment en hydrocarbures. La composition de ces gaz dépend de la quantité d'énergie reçue par la végétation [27], de la quantité d'oxygène, de la composition des végétaux et de la température.

L'énergie libérée par la combustion est directement liée à la formation des molécules CO et CO2. Au cours d'une combustion totale, les produits de combustion sont CO2 et H2O. La formation en CO peut se produire dans des zones riches en gaz de pyrolyse où la température est moins élevée.

Au bout d'un certain temps, la flamme commence à s'affaiblir et finit par s'éteindre. Ce phénomène s'explique par plusieurs mécanismes [27] :

1. Une baisse de la quantité de gaz volatils.
2. La formation d'une couche de charbon à la surface du combustible (couche isolante).
3. Le manque de combustible.

Afin de mettre en évidence toutes ces phases décrites lors du développement d'un feu de végétation, une série d'expériences ont été effectuées dans le laboratoire "LEPM" à l'issu desquelles des grandeurs physiques tel que la température d'inflammation, la variation de la température du combustible en fonction du temps entre les moments de son exposition au flux thermique et son inflammation ont été mesurées. En plus, une description des phénomènes observés est relatée après chaque expérience étudiée.

III.6 Gaz Combustibles Emis pendant la dégradation thermique du Pin d'Alep

Les émissions de combustion dépendent directement de la composition chimique du combustible et des conditions de la combustion. Le combustible végétal est décrit comme un biopolymère complexe composé principalement de cellulose, de lignine, d'hémicellulose, de composés extractibles et de matières minérales donnant naissance aux cendres lors de la combustion, le pourcentage de chaque composant varie d'une espèce à l'autre.

Pinus halepensis, ou pin d'Alep, combustible utilisé dans cette étude est un arbre de taille moyenne (12m de hauteur à l'âge adulte), aux branches étalées. Il occupe une aire de répartition morcelée sur tout le pourtour méditerranéen. Les aiguilles sont de fausses feuilles

persistantes, filiformes, groupées par paire. Les cônes femelles ovoïdes de 6 à 12 cm de long, sont d'un roux vif, luisant à maturité.

En Algérie, *P. halepensis* Mill., occupe principalement l'étage semi-aride et s'accommode bien aux terrains calcaires. Cette espèce forme des forêts dans les collines et les régions sèches du littoral méditerranéen ainsi que dans les montagnes semi-arides ; elle peut atteindre parfois jusqu'à 2 200 m d'altitude dans les montagnes sèches de l'intérieur, et dans les terrains calcaires du littoral algérien [28].

a) b) c)

Figure III.2 : *Photos de l'arbre de pin d'Alep, a) Foret ; b) Arbre ; c) Aiguilles et fruit de pin d'Alep*

La composition chimique de cette espèce est donnée dans le tableau suivant :

	Cellulose	Lignine	Hémicellulose	Extractibles
Pinus pinaster	38,3 ± 0,4	38,9 ± 0,4	5,1 ± 0,1	13,1 ± 0,2

Tableau III.1 : *Analyse constitutionnelle (%) de Pinus pinaster (d'après Barboni et coll., 2010 et Leroy et coll., 2009)*

Quant aux constituants chimiques identifiés dans les huiles essentielles des aiguilles de pin d'Alep (d'après N.Sadou et coll [28]), ils sont au nombre de 16, ce sont principalement le β-caryophyllène, l'α-pinène et le β-myrcène. Les composés mineurs sont représentés par l'α-terpinolène, l'α-caryophyllène, la Sabinène et le β-pinène. Les pourcentages de ces composés varient d'un site à l'autre, le tableau III.2 donne les valeurs obtenues sur des huiles extraites par hydrodistillation à partir d'aiguilles récoltées sur site de la forêt du lac Mellah dans le Parc National d'El Kala, caractérisée par un climat humide (site 1) et la forêt Zaarouria à Souk Ahras caractérisée par un climat subaride (site 2). L'analyse des huiles a été faite à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse (CG/SM). Le rendement moyen de l'opération de distillation (0,81%) de l'huile essentielle des aiguilles récoltées dans le site 1 est supérieur à celui (0,3%) du site 2. Le rendement étant exprimé par le rapport entre la masse de l'huile essentielle obtenue et la masse de la matière végétale utilisée.

Temps de rétention Tr (min)	***Composé***	***(%)***	
		Site 1	***Site 2***
3.18	α-thugène	-	0.63
3.72	α-pinène	24,41	21,01
4.74	β-pinène	2.13	-
4.79	Sabinène	3.42	8.21
5.24	β-myrcène	19.38	9.3
5.45	3-carène	1.33	2.17
4.17	α-terpinène	-	0.56
5.85	Terpinène4-acétate	0,40	-
6.09	Limonène	1.35	1.59
6.31	α-phelandrène	0.66	0.94
6.78	β-cis-ocimène	1.13	1.18
7.07	γ-terpinène	6.69	1.02
7.97	α-terpinolène	5.27	9.43
13.53	Terpinène 4-ol	0.56	1.28
18.56	α-cubibène	0.46	0.59
21.06	β-caryophyllène	31.89	31.14
22.55	α-caryophyllène	4.76	4.68
26.84	Phényl-éthyl-isovalerate	1.61	3.9

Tableau III.2 : *Composition chimique de l'huile essentielle des aiguilles de Pinus halepensis Mill. [28]*

Rappelons que les aiguilles de pin d'Alep utilisées dans la présente étude sont récoltées dans le site du campus de l'université Mohamed Boudiaf « USTO » Oran et par conséquent on suppose qu'elles sont composées des mêmes éléments avec les proportions les plus proches que celles du site de la forêt du lac Mellah (site 1), étant donné qu'il s'agit d'un même climat humide.

Tous ces éléments constituent les extractibles qui une fois chauffés se combinent pour former des gaz inflammables ou COV. L'importance étant de savoir si les différents mélanges de gaz émis par les végétaux chauffés peuvent s'accumuler dans des conditions inflammables, à savoir dans des concentrations comprises entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI).

III.7 Effet de la température sur les émissions des COV

La température de la végétation joue un rôle important sur les émissions de COV. L'étude de l'émission de COV en fonction de la température pour différentes espèces végétales est alors un élément clé pour la compréhension de l'hypothèse thermochimique.

Le dispositif « pyrolyse flash » a été utilisé par Léo Courty [29] pour l'étude des émissions de COV par les végétaux chauffés. Parmi les espèces de végétations étudiées il y a le pin parasol (*Pinus pinea*) qui est un conifère monoïque de la même famille du pin d'Alep (famille des *Pinacées*). Cette espèce a été étudiée avec une méthode chromatographique allant de 313 à 473K. Quatorze composés sont identifiés. La très grande majorité des composés sont des monoterpènes ou sesquiterpènes.

Le composé majoritaire émis par *Pinus pinea* est le limonène pour toutes les températures. Son évolution en fonction de la température ainsi que celle des COV totaux est représentée sur la Figure III.3.

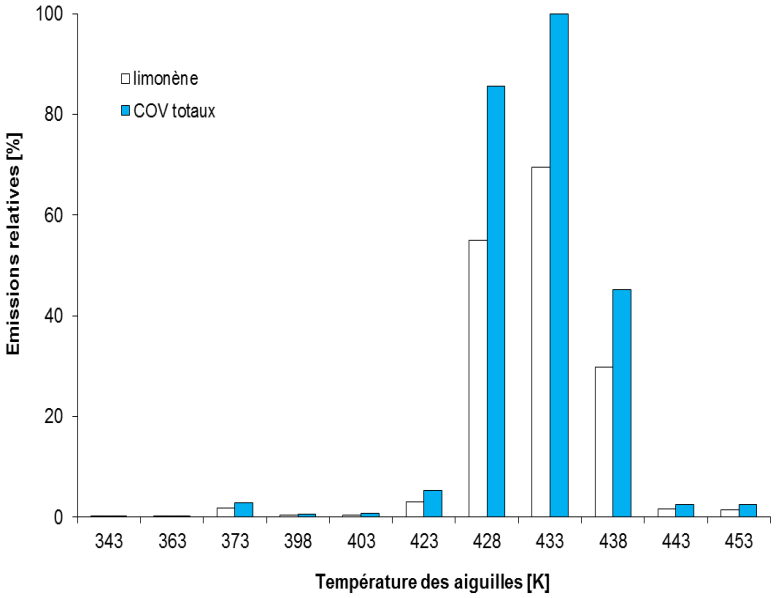

Figure III.3 : *Emissions relatives de COV par des aiguilles de Pinus pinea à différentes températures. (d'après Léo Courty [8])*

La figure III.3, montre clairement que les émissions augmentent avec la température des aiguilles jusqu'à 433 K. Les émissions sont très faibles avant 423 K, même si l'on peut distinguer un très léger pic à 373 K, qui peut s'expliquer par le fait qu'à cette température l'évaporation de l'eau accentue les phénomènes de transport des COV. La diminution des émissions au-delà de la température du pic peut s'expliquer par la dégradation thermique des molécules.

A la température où les émissions sont maximales, i.e. 433 K, de très grandes quantités de limonène, α-pinène et β-caryophyllène sont émises [29], ces trois constituants représentants quasiment 83 % du mélange. La somme de tous les monoterpènes à cette même température dépasse 84 % et celle des sesquiterpènes atteint environ 12 %. Dans la famille des monoterpènes, 3 sont prépondérants.

En résumant les travaux de N.Sadou et coll [28] sur les compositions chimiques des huiles essentielles extraites des aiguilles de pin d'Alep et les travaux de Léo Courty [29] sur les gaz COV émis par les aiguilles de pin chauffées à différentes températures on réalise que les composées monoterpenes de formule $C_{10}H_{16}$ principalement le limonène sont les principaux éléments qui se dégagent avant et pendant la pyrolyse. Ces éléments ont des limites inférieures d'inflammabilité très basses, inférieur à 1% volumique dans l'air [30]. Ils sont pour cette raison beaucoup plus inflammables que les produits typiques de la pyrolyse, tels CO et CH_4 et doivent être pris en compte pour une bonne caractérisation de la végétation.

III.8 Paramètres physique de la végétation

Dans cette partie, sont présentés les protocoles expérimentaux utilisés pour déterminer les principaux paramètres physiques qui influencent la dynamique de combustion et le processus d'inflammation ainsi que les techniques de caractérisations nécessaires pour les obtenir. On décrit en premier lieu la technique de mesure de la masse volumique et le rapport surface volume, puis celle du MEB (microscope électronique à balayage) pour identifier la porosité de nos échantillons, viendra ensuite l'analyse thermique par moyens de DSC (Differential Scanning Calorimetry), ATG (Analyse Thermographique) et Cône calorimètre et ce pour déterminer la chaleur spécifique, la perte de masse et le suivi du processus de dégradation thermique.

III.8.1 Masse volumique

La mesure de la masse volumique d'un matériau poreux suscite l'intérêt des chercheurs dans différents domaines. Dans le domaine des feux de forêts, la quantification de la masse volumique de végétation est l'un des paramètres indispensables pour déterminer les processus d'inflammation et de propagation, en revanche, la mesure de ces paramètres est difficile à effectuer à cause de la forme irrégulière du combustible forestier (aiguilles, tiges, feuilles… etc). Il existe deux types de masse volumique pour un matériau poreux [31].

III.8.1.1 Masse volumique apparente ρ_a (Apparent density)

Elle est définie comme étant le rapport entre la masse du matériau et son volume apparent. Le volume apparent inclut le volume des pores contenus dans le matériau.

III.8.1.2 Méthodes de mesure de la masse volumique apparente ρ_a

A) Mesure dimensionnelle et mesure de masse

La masse est déterminée à l'aide d'une mesure sur balance de grande précision. Le volume apparent est calculé à partir des dimensions de l'échantillon du matériau considéré si ce dernier a une forme régulière (forme géométrique connue et non compliqué par exemple un parallélépipède, un cylindre…etc.) ou d'une forme irrégulière à géométrie [31].

B) Déplacement d'un liquide non mouillant

Généralement le liquide utilisé est de l'eau distillée. Cette méthode est la plus adaptée pour mesurer la masse volumique des matériaux à formes irrégulières. Elle consiste à mesurer le volume du liquide déplacer lors de l'immersion du solide, l'inconvénient de cette méthode est le phénomène de mouillabilité ; si le liquide est forcé dans certains pores par la pression hydrostatique, le déplacement du liquide sera inférieur au volume externe du matériau et la valeur de la densité sera trop élevée, c'est le cas de la végétation, si la mesure n'est pas rapide, elle sera réhydratée et les résultats seront faussés.

Afin d'éviter le phénomène de mouillage, l'échantillon est couvert d'un revêtement qui peut être un film plastique.

III.8.1.3 Masse volumique réelle ρ_R : (true density)

C'est le rapport entre la masse du matériau et son volume réel. La mesure du volume réel du matériau ne prend pas en considération le volume des pores, ni la tortuosité (rugosité) de la surface [31].

III.8.2 Protocole expérimental

Trois méthodes ont été utilisées pour déterminer la masse volumique de la végétation considérée dans la présente étude ; la méthode métrique, pycnométrique, et celle de la confection de pastilles.

III.8.2.1 Méthode pycnométrique

Par cette méthode, on détermine en premier lieu la masse d'eau perdue (m_p) par le pycnomètre lors de l'ajout de la masse de végétation (m_v), connaissant la masse volumique

de l'eau distillée (ρ_{eau}), on peut déduire par la suite le volume d'eau perdu qui est égal au volume de la végétation mise dans le pycnomètre. La rapidité de la mesure est nécessaire afin d'éviter la réhydratation de l'échantillon.

Pour réaliser cette manipulation, les étapes suivantes ont été respectées :

1. Pour la mesure de la masse volumique de la végétation à l'état sec : les aiguilles de pin d'Alep sont séchées pendant 3 minutes aux micro-ondes à 800W**,** puis pesées **;**
2. Pour la végétation humide : les aiguilles de pin fraiches sont pesées directement, leurs masses sont notées par m_v ;

La technique consiste à :

3. Remplir le pycnomètre d'eau distillée et de le peser, sa masse $M_{p,eau}$;
4. Peser le pycnomètre rempli ainsi que la quantité de végétation objet de la mesure sur le même plateau de la balance, soit A1 la masse enregistrée ;
5. Introduire cette même quantité de végétation dans le pycnomètre puis pesage rapide de ce dernier pour éviter l'effet de mouillabilité. On note A2 la masse enregistrée.
6. Calcul de la masse d'eau perdue $(\boldsymbol{m_p})$ suite à l'introduction de la végétation à l'intérieur du pycnomètre.
7. Connaissant la masse volumique de l'eau distillé $\rho_{eau} = 998,3\ kg/m^3$ à 20°C, on déduit le volume de la végétation introduite V_v qui équivalent au volume d'eau perdu V_p suivant l'équation ci-dessous.

$$\rho_{eau} = \frac{m_p}{V_p} = \frac{m_p}{V_v} \qquad \text{(III.4)}$$

$$V_v = \frac{m_p}{\rho_{eau}} \qquad \text{(III.5)}$$

La masse volumique est donc :

$$\rho_v = \frac{m_v}{V_v} \qquad \text{(III.6)}$$

III.8.2.2 Méthode métrique

Dans cette méthode, les dimensions des échantillons sont mesurées directement avec des instruments métriques (pied à coulisse, règle et autres). Les végétations utilisées ont des formes géométriques bien déterminées et par conséquent l'estimation par calcul avec une précision acceptable de leurs volumes respectifs est possible.

A) Cas des aiguilles de pin d'Alep

Les aiguilles de pin d'Alep sont longues et fines, ont une forme irrégulière, leurs longueur et épaisseur changent d'une aiguille à l'autre, d'un arbre à autre et d'un sol à autre.

La section de l'aiguille de pin d'Alep est assimilée à des demi-ellipses, son diamètre et son épaisseur sont considéré comme étant le petit et le grand axe.

Le diamètre et l'épaisseur des aiguilles ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse digital au centième (On mesure le diamètre et l'épaisseur en trois positions du brin). Une centaine de répétitions ont été réalisées.

On enlève la base et la pointe des aiguilles de sorte que la longueur du brin d'aiguille est de 5 cm. La figure III.6 schématise la forme de l'aiguille de pin d'Alep.

Figure III.4 : *schéma de l'aiguille de pin d'Alep*

Le volume est calculé suivant l'équation *(III.7) :*

$$V = \pi \frac{D}{4} e\, L \qquad \text{(III.7)}$$

Les aiguilles sont pesées ainsi leurs masses volumiques sont déterminées selon l'équation (III.6)

III.8.2.3 Méthode de la pastille

L'échantillon de la végétation considérée est finement broyé dans un mixeur, la poudre obtenue est ensuite tamisée avec un tamis métallique de maille 1mm x 1mm, les particules issues du tamisage ont une forme granulaire homogène, ces particules sont pressées à différentes pressions dans un moule métallique cylindrique de diamètre intérieur 13mm à l'aide d'une presse hydraulique manuelle de capacité 10 tonnes/m^2 (10bars), le produit extrait après démoulage est sous forme d'une pastille cylindrique pleine.

Le principe de mesures consiste à faire varier manuellement la pression de compression de 2 à 5 bars, pour un même échantillon dans le but de déterminer l'influence de la pression sur le compactage et par conséquent sur la porosité.

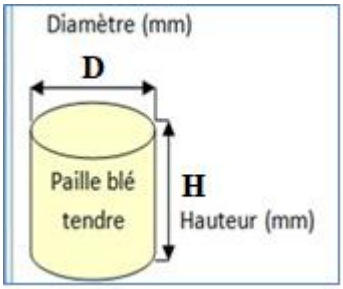

Figure III.5 : *Forme d'une pastille après démoulage*

Le volume est :

$$V = \pi \frac{D^2}{4} H \qquad \text{(III.8)}$$

Les masses des pastilles sont pesées ainsi leurs masses volumiques sont déterminées selon l'équation *(III.6)*

III.8.3 Rapport surface-volume et masse volumique

L'un des paramètres importants qui influe sur la dynamique de combustion d'un matériau est sa géométrie qui est décrite par le rapport surface/ volume, plus ce rapport augmente, plus la surface d'échange avec le milieu augmente c'est-à-dire les échanges d'énergie par transfert thermique et de matière (transferts de masse par évaporation) sont rapides [32], [33].

Dans le cas de combustible épais tel que les branches, la combustion est lente, avec une faible vitesse de propagation du feu, par contre les combustibles fins (aiguilles, herbe, feuilles) sont caractérisés par une combustion rapide ce qui implique une vitesse de propagation du feu élevée [33].

III.8.4 La porosité

On distingue deux types de porosité pour un échantillon de végétation :

III.8.4.1 Pores Intérieurs à la végétation

Ce sont les pores qui composent la structure interne même de la végétation, pour visualiser ces pores dans différente types de végétations étudiés, on a recours à l'utilisation du microscope électronique à balayage (MEB).

Dans le cadre de ce présent travail, les échantillons ont été caractérisés par le MEB type "*JEOL*, JSM-*6610LA"* au niveau du Laboratoire de Microscope Electronique et Sciences des Matériaux LMESM, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB). Il est piloté par ordinateur grâce à un logiciel d'exploitation.

Le but de cette mesure est de visualiser les différentes formes de pores et de voir leur répartition surfacique dans la végétation (aiguilles) afin de comprendre le processus d'évaporation d'eau, d'émission des COV, le processus d'inflammation ainsi que de comparer la variation du diamètre de pores en fonction de la technique de séchage.

L'analyse au MEB a été réalisée sur les aiguilles de pin d'Alep à l'état frais et sec. Le séchage a eu lieu dans un micro-ondes pendant 3 min et dans une chambre climatique pendant une heure à 60°C et 0% d'humidité relative.

III.8.4.2 Porosité extérieur à la végétation (porosité de l'échantillon)

On définit la porosité α d'un échantillon de produit comme étant le rapport entre le volume réellement occupé par la matière et le volume total de l'échantillon.

$$\alpha = \frac{V_m}{V_{total}} = \frac{m}{\rho\, s\, e} \qquad \text{(III.9)}$$

α : porosité sans unité

m : la masse en Kg

s : la surface en m²

e : épaisseur de la végétation en m

ρ : la masse volumique en kg/m³

V_m : volume réel matière en m³

V_{total} : volume total de l'échantillon en m³

III.8.5 Analyse thermique

Cette analyse est importante pour comprendre le processus de dégradation thermique des végétations étudiées, le but est de voir leur comportement à haute température autrement dit pendant leurs combustions et ce en variant la température sous un environnement contrôlé, (allant de la température ambiante jusqu'à 400°C pour le pin d'Alep.

III.8.5.1 Analyse Thermogravimétrie ATG

C'est une analyse quantitative permettant de déterminer la température de dégradation (T_d) d'un composé, ainsi de mesurer la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température appliqué pendant le traitement ou en fonction de temps dans une atmosphère contrôlée. La variation de la masse lors du traitement thermique permet d'étudier les phénomènes physico-chimiques du matériau analysé.

Son principe consiste à faire chauffer un échantillon de la température ambiante jusqu'à 1200°C (la température finale dépend de type d'appareil et des conditions considérées par le laboratoire) dans un four. Un thermocouple près du porte échantillon et relié à l'ordinateur mesure cette température. Le porte échantillon est relié par une tige à une microbalance permettant le suivi et l'enregistrement de la perte de masse.

L'ATG est une méthode rapide pour se renseigner sur la décomposition des matériaux, cependant elle ne permet pas d'identifier la nature des produits de décomposition gazeux dégagés. Cette technique est souvent couplée à une autre technique d'analyse soit ATD, DSC ou spectromètre de masse afin d'obtenir des informations complémentaires.

III.8.5.2 Differential Scanning Calorimetry « DSC »

C'est une technique d'analyse thermique qui permet de mesurer les changements d'énergie (enthalpies) qui se produisent lorsqu'un échantillon est soumis à un flux de chaleur, soit chauffé, refroidi ou tenue isothermique, ainsi que de déterminer la température de transition de phase.

L'un des avantages de la DSC est que l'encapsulation de l'échantillon et la mesure sont faciles. Son principe consiste à mesurer la différence de température entre un récipient où l'échantillon est mis et une référence (qui est vide), les deux creusets sont soumis dans un four au même programme de température (par exemple une vitesse de chauffage standard de (10 °C / min), des thermocouples mesurent la différence de température entre les deux récipients, les mesures sont traitées pour être converties en flux de chaleur.

La variation de la courbe de température dépend de la nature du processus de transformation qui peut être endothermique (absorbe de la chaleur) ou exothermique (cède de la chaleur) qui se caractérise par un pic dont la surface est proportionnelle à l'enthalpie de transformation, la figure III.7 illustre les processus de transformation.

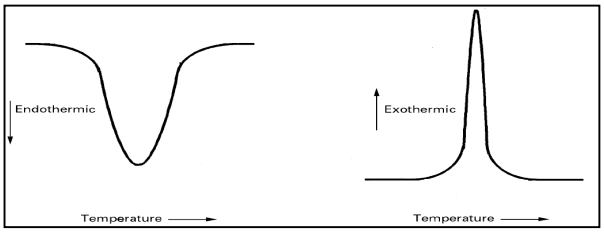

Figure III.6 : *Processus de transformation endothermique et exothermique*

III.8.5.3 La DSC couplée à l'ATG

Les analyses thermogravimétriques et calorimétriques ont été réalisées sous air pour un programme de température allant de la température ambiante jusqu'à 400°C pour le pin d'Alep et pour une vitesse de chauffage égale à 10°C/min. L'appareil utilisé est un analyseur thermogravimétrique couplée à la DSC LINSEIS.STA.PT 1600**,** du Laboratoire de Chimie de l'université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, le four contient deux plaques chauffantes qui couvrent une tige a deux creusets (ports échantillons) en Alumine avec capacité atteignant 1600°C. La micro-balance permet la mesure de la variation de poids des échantillons allant de 5 à 25 g. Les résultats sont traités par le logiciel TA Linseis Software.

III.8.5.4 Cône calorimètre

Le cône calorimètre utilisé dans cette étude est réalisé au niveau du laboratoire LEPM inspiré du cône calorimètre conçu selon la norme ASTM E 1354-1, il permet de visualiser le processus d'inflammation du matériau étudié, ainsi de déterminer le temps d'inflammation et de résidence de la flamme.

Le flux de chaleur radiative du cône est assuré par une résistance électrique d'une puissance de 3000 W. La mesure des paramètres tel que le temps d'inflammation, la variation de température, la température d'inflammation ainsi que le flux émis par le cône sont assurés par les instruments suivantes :

1. Flux mètres de 200 kW/m^2 disposant de capteur de flux thermique refroidi à l'eau de type Huksflux SBG 01 fonctionnant dans la plage $0 - 200 kW/m^2$ pour la mesure des flux thermiques.

2. Centrale d'acquisition de marque « Graphtek »
3. Thermocouples type K pouvant mesurer jusqu'à 1200°C.
4. Récepteur Flux mètre type LI-19
5. Chronomètre
6. Caméra numérique

Ces deux derniers appareils ont été utilisés pour déterminer le temps d'inflammation, de résidence de la flamme et pour visualiser les processus de combustion.

III.9 Résultats des Mesures des masses volumiques

La masse volumique de l'espèce étudiée est déterminée pour des échantillons à l'état vert et sec. Les échantillons humides d'aiguilles de pins d'Alep ont été cueillis le jour même des expériences.

Pour ce qui est des échantillons secs, les aiguilles de pin d'Alep ont été séchées dans un micro-onde domestique à une puissance de 800 W pendant 3mn,

III.9.1 Par méthode métrique

Le tableau III.3 contient les résultats des mesures dimensionnelles effectuées sur les aiguilles de pin ainsi que leurs masses volumiques avec des valeurs moyennes.

Etat des aiguilles	e_{moy} (mm)	D_{moy} (mm)	V (mm^3)	Masse (g)	ρ_{moy} (kg/m^3)	ρ (Kg/m^3) Littérature [2]
Humide	0,52	1.18	16,31	0.020	1219 ± 98	
Sec	0,51	0.69	13,85	0.010	707 ± 96	787 ± 19

Tableau III.3 : *Masse volumique moyenne (ρmoy) des aiguilles de pin d'Alep frais et sec*

III.9.2 Méthode pycnométrique

La mesure de la masse volumique par pycnomètre, pour une aiguille de pin est pratiquement impossible en raison de son volume qui est très petit et par conséquent ne peut être quantifié à partir de la masse d'eau perdue du pycnomètre comme spécifié précédemment, pour ce faire, plusieurs aiguilles du pin ont été introduites dans le pycnomètre, ainsi, la masse d'eau perdue m_p a pu être calculée. Les résultats des masses volumiques obtenues par cette pratique sont donnés dans le tableau III.4

Espèce de végétation / Aiguilles de pin d'Alep	ρ_{moy} (Kg/m^3) Mesurée	ρ (Kg/m^3) Littérature [12]
Humides	1087 ±3	
Sèches	680 ±33	787

Tableau III.4 : *masse volumique moyenne (ρmoy) des aiguilles de pin d'Alep fraiche et sèche (méthode pycnométrique)*

On remarque que les résultats obtenus par la méthode métrique dans le cas du pin d'Alep sec sont en accord avec la littérature, comme on remarque aussi qu'il y'a une petite différence des résultats entre les méthodes, cette différence peut être expliquée par l'erreur commise lors des mesures des diamètres et des épaisseurs,

On conclut que la mesure par pycnomètre est plus précise à condition qu'elle soit rapide pour éviter l'absorption d'eau par l'échantillon.

III.10 Les rapports surface /volume

Le rapport surface volume des végétations sèches et humides est déterminé à partir des équations. Les valeurs moyennes de ce rapport sont représentées pour chaque espèce étudiée dans le tableau (III.5) dans le cas de leurs états naturels et dans le tableau (III.6) à l'état de pastilles pour les aiguilles de pin d'Alep.

Type de végétation	Rapport surface /volume (m^{-1})	
	Humide	Sèche
Aiguilles du pin d'Alep	6958	7341

Tableau III.5 : *Rapport surface /volume moyen (m^(-1)) (état naturel)*

Pastille	Rapport surface volume (m^{-1})
Aiguilles de Pin d'Alep (à 3 bars)	303

Tableau III.6 : *Rapport surface / volume du pin d'Alep (m^(-1)) (état de pastilles)*

Le rapport surface/volume obtenu de 7341 m^{-1} est en accord avec les résultats donnés dans la littérature [12]. Les aiguilles de Pin d'Alep ont le plus grand rapport surface/volume à l'état humide et sec et donc leurs échanges d'énergie et de matière avec la phase gazeuse sont rapides.

III.11 Caractérisation par Microscope Electronique à Balayage « MEB »

Le microscope électronique à balayage a été utilisé pour caractériser les pores internes à la structure de l'espèce de végétation étudiée. La taille des pores ainsi que leur distribution surfacique sont des paramètres déterminent dans l'étude de la dégradation thermique. En effet, ils permettent l'absorption de l'oxygène contenu dans l'air et par conséquent accélèrent la réaction de combustion qui donne naissance à la flamme. Aussi ils permettent une évaporation rapide de l'eau contenue dans la végétation.

Des échantillons humides et secs ont été observés dans le but de voir l'effet du séchage sur le comportement de ces pores. Les photos exposées dans les figures III.7, III.8, III.9, III.10 et III.11 montrent la distribution des pores et leurs tailles pour les différentes végétations étudiées.

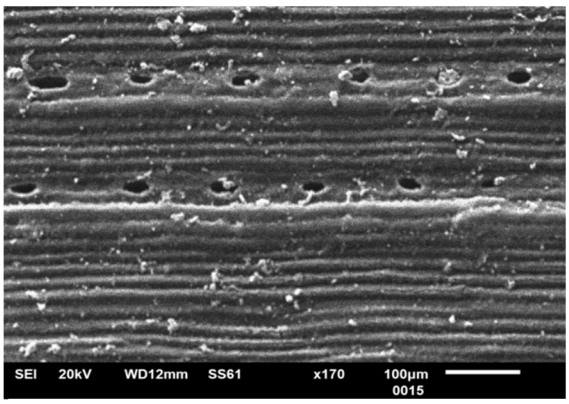

Figure III.7 : *Distribution des pores sur une surface d'aiguille de pin d'Alep frais (humide)*

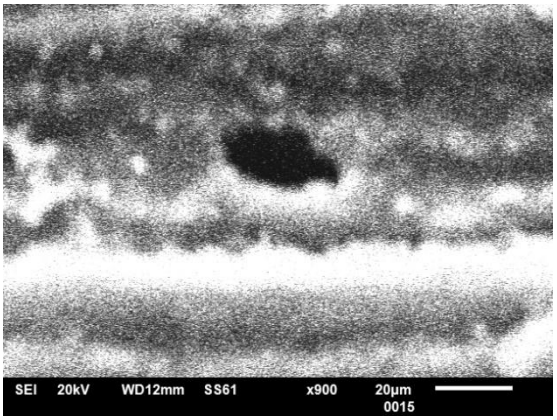

Figure III.8 : *Taille d'un pore sur une aiguille de pin d'Alep frais (humide)*

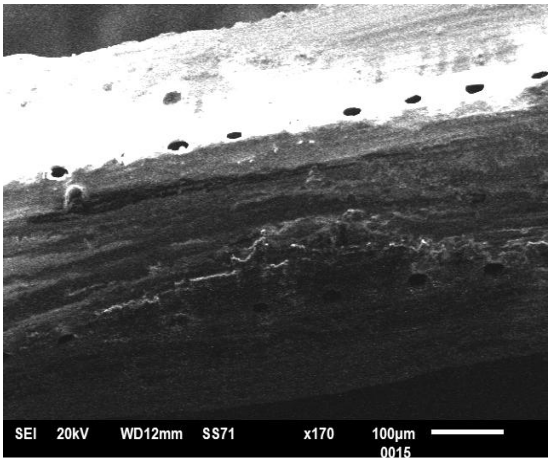

Figure III.9 : *Distribution des pores sur une surface d'aiguille de pin d'Alep séchée pendant 3mn dans le micro-onde.*

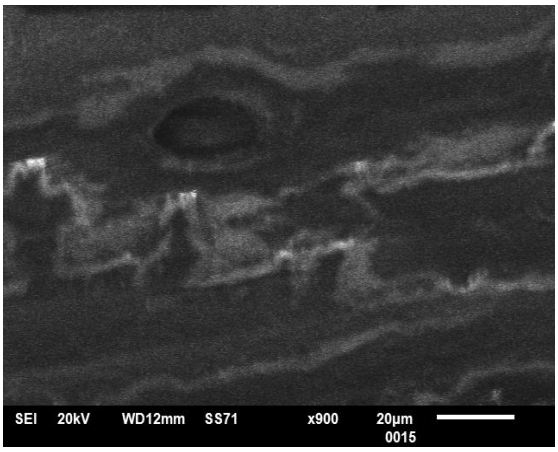

Figure III.10 : *Taille d'un pore sur une aiguille de pin d'Alep séchée pendant 3mn dans le micro onde.*

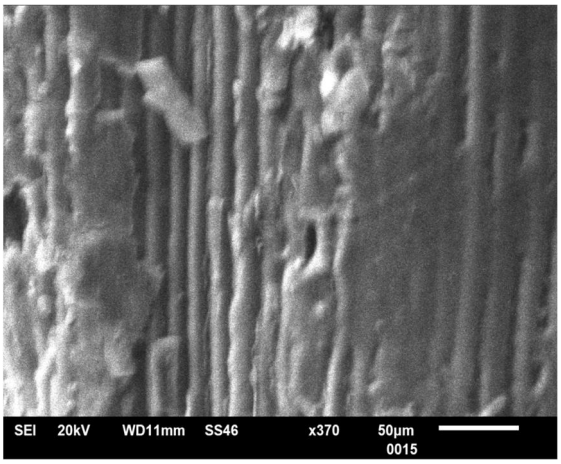

Figure III.11 : *Taille d'un pore sur une aiguille de pin d'Alep séchée dans une chambre climatique*

On constate que la taille du pore n'est pas affectée par le séchage au micro-onde, on voit que la taille du pore est réduite.

D'après les images, les aiguilles de pin d'Alep contiennent très peu de pores de petites tailles, qui sont alignés parallèlement. Le tableau (III.7) porte les indications sur l'effet du séchage et du procédé de séchage sur la taille d'un pore. D1 et D2 dans le tableau sont le grand et le petit diamètre du pore respectivement (forme elliptique).

Aiguille de pin d'Alep	D1 (μm)	D2 (μm)
Frais	27.05	12.94
Séché 3mn micro-onde	25,88	12.94
Séché 1h chambre climatique	17.64	6.66

Tableau III.7 : *Diamètres des pores (effet du procédé du séchage sur la taille des pores)*

On remarque que les pores se rétrécissent et se contractent sous l'effet de la déshydratation et de la chaleur, ce phénomène est plus accentué dans le cas du séchage dans la chambre climatique. On attribue ceci au fait que le séchage par micro-onde est rapide et par conséquent la végétation n'a pas suffisamment de temps pour fermer ses pores à cause des ondes électromagnétiques de l'appareil qui attaquent directement l'eau libre situer aux alentours des pores, contrairement à la chambre climatique, cette dernière génère un flux thermique convectif continue pendant un temps suffisamment long sur la végétation dans ce cas, la végétation est encore vivante et elle réagit au stress thermique exercé en fermant ses pores, donc c'est un phénomène de stress thermique qui pousse l'aiguille à changer sa structure.

III.12 Détermination de la chaleur spécifique Cp par l'analyse ATG/DSC

Le but de cette analyse est de mesurer la variation de la chaleur spécifique en fonction de la température [33].

L'appareil utilisé pour cette mesure donne les variations du signal électrique en μV en fonction de la température et non pas directement le Cp en fonction de la température en raison de la non disponibilité de la sensibilité de l'appareil.

Le signal mesuré est donné par :

$$\tilde{A} = S.m.Cp.V \qquad \text{(III.10)}$$

$\tilde{A}$: Le Signale HDSC (µV)
S : sensibilité (µV /W)
Cp: La chaleur spécifique (J/g K)
m: La masse (g)
V: Vitesse du chauffage (K/ s)

De l'équation (III.16) la sensibilité est :

$$S = \frac{\tilde{A}}{m\ Cp\ V} \qquad \text{(III.11)}$$

Afin d'estimer cette sensibilité, on utilise la valeur de Cp à 27 °C qui est de 1827 J/Kg K [31]. Dans cette formule, la masse et la tension du signal sont tirés des résultats obtenus de l'analyse de l'échantillon à 27 °C.

En remplaçant les paramètres par leurs valeurs dans l'équation (III.11), on trouve une sensibilité S = 23446 µV/W.

En divisant le signal par la sensibilité, on trouve les valeurs du flux reçu par l'échantillon en W

$$\phi = \frac{\tilde{A}}{S} \qquad \text{(III.12)}$$

Par conséquent, le Cp est donné par :

$$Cp = \frac{\phi}{V\ m} \qquad \text{(III.13)}$$

III.13 Discussion des résultats

Lorsqu'une biomasse est soumise à un flux thermique, la matière organique commence à se dégrader, chaque composant se dégrade dans une gamme de température bien définie.

La figure III.12, représente les variations de la perte de masse et de la tension du signal en fonction de la température.

La première phase (entre 0 et 209 °C) est caractérisée par l'émission des composés volatils, 22 % de la masse initiale de l'échantillon est perdue. Dans la gamme des températures comprises entre 209 et 333 °C, on constate sur la courbe du signal, l'existence d'un pic endothermique causé par la dégradation de la cellulose en dehydrocellulose qui se traduit par une rigidité de la végétation, à ce stade, la perte de masse de 39.3 %.

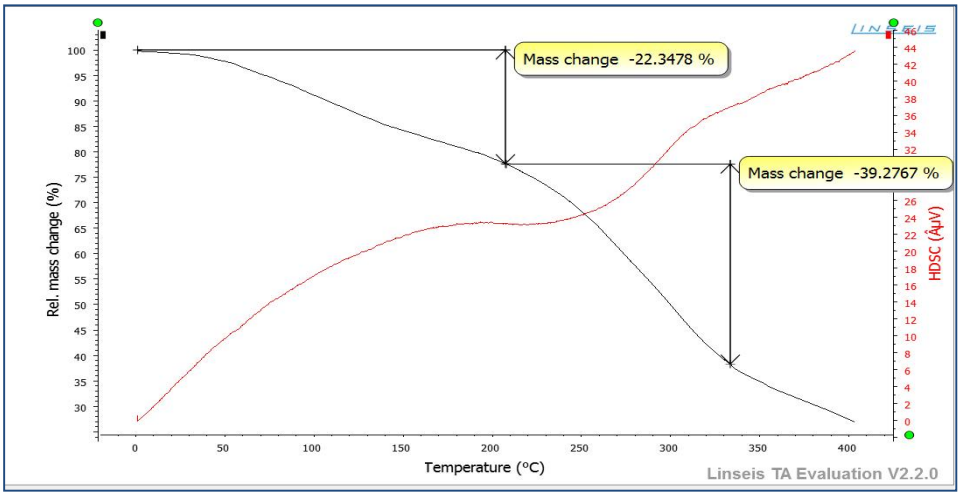

Figure III.12 : *Perte de masse en fonction de la température et du signal (Aiguilles de pin d'Alep sèches)*

En ce qui concerne les échantillons des aiguilles de pin fraiches, la perte de masse et tension du signal en fonction de la température sont illustrés sur la figure III.13.

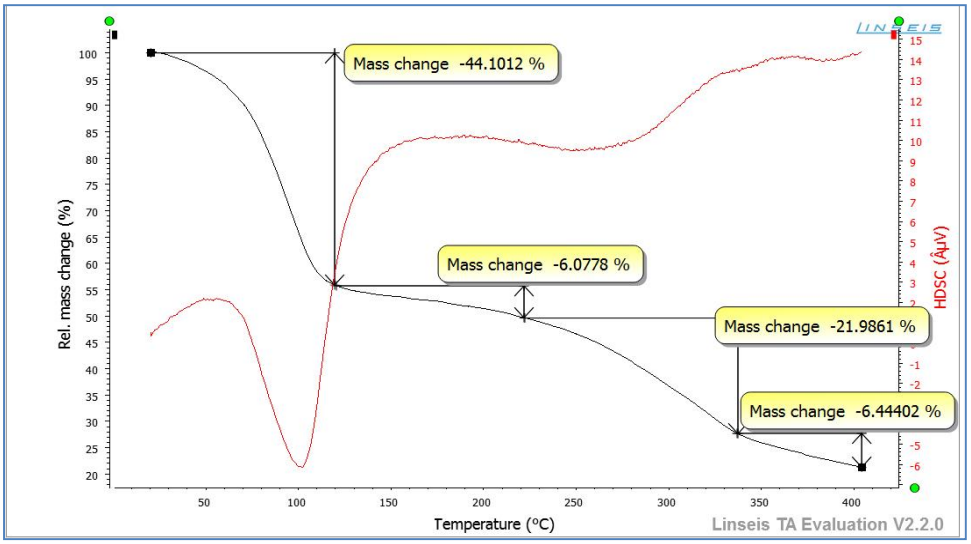

Figure III.13 : *Perte de masse et tension du signal en fonction de la température (Aiguilles de pin fraiches)*

La courbe du signal indique l'existence d'un pic endothermique. Ce dernier est causé par l'évaporation de l'eau à une température avoisinant les 100°C accompagnée d'un dégagement d'une petite quantité de COV (une transition de phase liquide/gaz), la perte de masse correspondante à cette phase est de 44 % . Ce processus se poursuit pour des températures comprises entre 120 et 220°C, engendrant une perte masse de 6 % qui correspond à une certaine rigidité de la végétation (il ne reste que la phase solide après l'évaporation de l'eau). A partir de 220 °C, la déshydratation de la cellulose débute et continue jusqu'à une température de 338 °C. Durant ce processus, 22 % de la masse végétale est perdue. Entre 338 °C et 404 °C, deux transformations se produisent simultanément, la dehydrocellulose qui se décompose en formant des charbons, de l'eau, du monoxyde et dioxyde de carbone, du méthane et de l'éthane et la décomposition de la cellulose non déshydratée pour former de levoglucosan (représentée par la crête qui suit le pic exothermique), cette phase correspond à une perte de masse de 6.5%.

La variation de la chaleur spécifique en fonction de la température est déterminée à partir de la conversion des données de la tension du signal en termes de flux suivant l'équation (III.12). La correspondance du flux en température est tirée de l'enregistrement des données fournies par l'appareil et de l'équation (III.13).

Pour les aiguilles de pin d'Alep, la variation du C_p en fonction de la température est représentée sur la figure III.14.

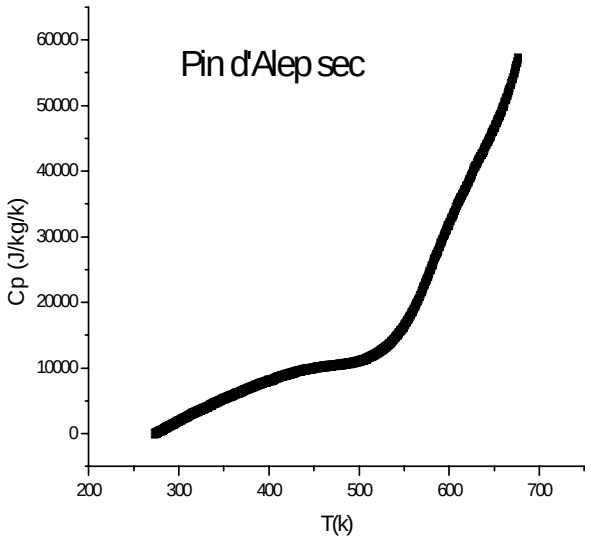

Figure III.14 : *Variation de Cp en fonction de la température des aiguilles de pin sèches*

III.14 Modélisation

Le but de cette opération est de comparer les résultats de simulation du temps d'inflammation des aiguilles du pin d'Alep obtenus en introduisant les paramètres, masse volumique, chaleur spécifique et rapport surface/volume dans le code de calcul avec ceux de l'expérience.

L'expérience est réalisée à l'aide du cône calorimètre décrit, où la végétation est soumise à un flux thermique externe pendant un temps suffisant pour assurer son inflammation. Les détails de l'expérience sont donnés dans la référence [21].

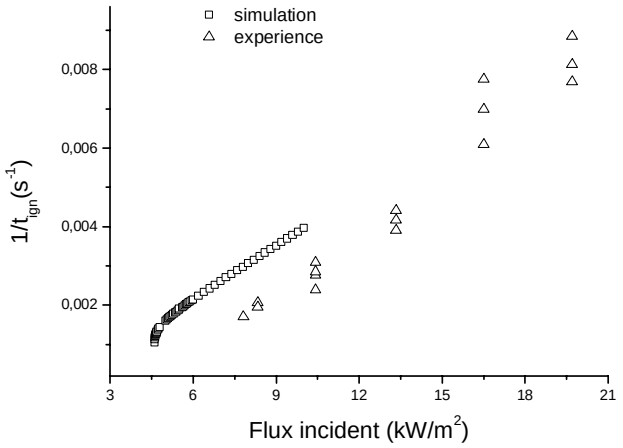

Figure III.15 : *L'inverse du temps d'inflammation en fonction du flux simulation et expérience*

La figure III.19 illustre les résultats obtenus par simulation et expérimentalement exprimant l'inverse du temps d'allumage en fonction du flux incident. Le modèle n'arrive pas à reproduire les données expérimentales, du fait que plusieurs phénomènes accompagnant l'inflammation sont négligés. Dans ce modèle, le taux d'émission des gaz n'est pas pris en compte. Le modèle suppose que la température d'inflammation est celle de la surface de l'échantillon alors que d'après la théorie d'inflammation [13], la température d'inflammation c'est la température du gaz. De plus, le model utilise le Cp à 27 °C, mais en réalité et selon les résultats obtenus par la mesure de la chaleur spécifique par la « DSC », on voit bien que ce paramètre augmente en augmentant la température, d'après l'équation (III.20), quand le *Cp* augmente le *dT* diminue, donc on va atteindre l'inflammabilité après un temps beaucoup plus long.

$$c_p^c = \frac{q''_{eff}\, S\, dt}{m_{sec} dT} \qquad \text{(III.14)}$$

CONCLUSION

Différents essais ont été réalisés sur la dégradation de deux espèces de végétation différentes. A travers ces essais, il a été possible de constater et de visualiser des comportements qui différent selon la variété de l'espèce, selon le degré de porosité, le taux d'humidité et en fonction du flux reçu. Toutes ces observations nous ont permis de comprendre une partie des phénomènes de l'incendie à petite échelle.

Sur le plan des résultats, les courbes tracées à partir des mesures directes de temps et de température vont faire l'objet d'une discussion plus approfondie avec les doctorants du laboratoire « LEPM » qui travaillent sur la simulation des feux de forêts.

Différents essais ont été réalisés sur différents types de végétation pour mesurer des paramètres essentiels à l'étude du processus de l'inflammation et de la propagation des feux de forêts. Les résultats obtenus ont montré que ces paramètres varient en fonction de la température, de l'état de la végétation sèche ou humide et de la nature de la végétation. La chaleur spécifique d'une espèce augmente pendant sa dégradation thermique, cette considération n'est pas prise en compte dans les modèles de calcul utilisés. Il est donc de notre devoir de mener plusieurs et différentes expériences pour rendre ce logiciel plus fiable.

Références Bibliographiques (Ch.III)

[1] V. Leroy, Contribution à la modélisation des feux de forêt: Cinétique de dégradation thermique et cinétique de combustion des végétaux, Thèse de doctorat, Université de Corse, 2007.

[2] N. D. Burrows, Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. International Journal of Wildland Fire, 2001.

[3] S. McAllister and D. R. Weise, Effect of season on ignition of live wildlandfuels using the forced ignition and flame spread test appartus, vol. 185. Combust. Sci. Technol, 2017. https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1206086

[4] T. Barboni, Contribution de méthodes de la chimie analytique à l'amélioration de la qualité de fruits et à la détermination de mécanismes (EGE) et de risques d'incendie. Université de Corse, 2006. https://tel.archives-ouvertes.fr

[5] M.Esch, D.Hofmann, R.Wùnsch, R.Maier, M.Kuze, M.Schosnig, K.O.Groeneveld.K.O, Nuclear Instrument Method ,Physics Research. 109-110, 328-331, 1996.

[6] R.C. Peterssen, The chemical composition of wood, American Chemical Society, 1984.

[7] G.M. Byram, Combustion of forest fuels In: Davis K.P. New York: Ed Forest fire: Control and use, McGraw-Hill, 1959.

[8] F. Kifani-Sahban, L. Belkbir, A. Zoulalian, Etude de la pyrolyse lente de l'Eucalyptus marocain par analyse thermique,Thermochimica Acta, vol.284, 341-349 , 1996.

[9] A. Raimo, E. Kuoppala, P. Oesch, Formation of the main degradation compound groups from wood and its components during pyrolysis, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol.36, 137-148, 1996.

[10] A.P. Dimitrakopoulos, Thermogravimetric analysis of Mediterranean plant species, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2001. https://doi.org/10.1016/S0165- 2370(00)00164-9

[11] N. Margossain, Risque chimique. Paris : Ed. Dunod, 2002.

[12] P. Bartoli, Feux de forêt: amélioration de la connaissance du couplage combustible flamme. 2011.

[13] C. Di Blasi, Modelling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis, Progress in Energy and Combustion Science, vol.34, 47-90, 2008.

[14] V. Leroy, D.Cancellieri, E.Leoni, Relation between forest fuels composition and energy emitted during their thermal degradation, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 96(1). 2009. https://doi.org/10.1007/s10973-008-9587-9.

[15] E.Romagnoli, Dynamique de combustion des végétaux et analyse des fumées émises, effet de l'échelle et du système. Université Pascal Paoli, 2014. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127945

[16] Lobert and Warnatz, Emissions from the combustion process in: Vegetation, P.J. Crutzen, Goldammer. UK: Wiley, Chichester, 1993.

[17] S.Owen, C.Boissard, A.Strett, S.C.Duckham, O.Csiky, C.N.Hewitt, Screening of 18 Mediterranean plant species for volatile organic compound emissions. Atmospheric Environnement, vol. 31. 1997. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00078.

[18] T.Barboni, N.Chiaramoni, BTEX Emissions During Prescribed Burning in Function of Combustion Stage and Distance From Flame Front. Combustion Science and Technology ,

vol. 182. 2010. https://doi.org/10.1080/00102201003660199

[19] B.Benkoussa , J.L.Consalvi , B.Porterie , N.Dardoy , J.C Loraud , Modelling thermal degrdation of woody fuel particles . International Journal of Thermal Sciences , 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.016

[20] M.J.Spearpoint , J.G.Quintiere , Predicting the Piloted Ignition of wood in the Cone Calorimeter Using an Intergral Model - Effect of Species , Grain Orientation and Heat Flux, Fire Safety Journal, vol. 36(4), 2001. https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00055 -2

[21] F.Z.Sabi, S.M.Terrah , O.Mosbah , A.Dilem , N.Hamamous , A.Sahila , O.Harrouz , H. Boutchiche , F.Chaib , N.Zekri .N, A.Kaiss , J-P.Clerc , O.Rahli , F.Giroud , D.X.Viegas , Ignition/non ignition phase transition : A new critical heat flux estimation method . Fire Safety Journal, 2020. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103257

[22] V.Tihay, P.Gillard, Pyrolysis gases released during the thermal decomposition of three Mediterranean species, vol. 88. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010. https ://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.04.002

[23] J.M.Lober, J.Warnatz, Emissions from the combustion process in vegetation, P.J. Crutzen, Goldammer. UK: Wiley, Chichester, 1993.

[24] A.Tewarson , Generation of Heat and Chemical Compound in Fires . The National Fire Protection Association Press, 2002.

[25] E.Pastor , Y.Perz , A.Algueda , M.Miralles , E.Planas , Pile burning of cutting debris instands of hazel (Corylusavellana): An experimental study of smouldering combustion towards the validation of a burning protocol, Fire Safety Journal, vol.45, 2010. https://doi .org/10.1016/j.firesaf.2009.10.003

[26] C. Chandler, P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, D. Williams, Fire in Forestry.Volume1. Forest fire behavior and effects . Volume 2. Forest fire management and organization . John Wiley & Sons, Inc, 1983.

[27] A. Lhuiller-Marchand, «Propagation des feux de végétation: expérimentations à l' échelle du laboratoire et validation d'un propagateur », Université de Lorraine, 2016.

[28] N.Sadou , R.Seridi , A.Djahoudi , Y.Hadef , Composition chimique et activité antibactérienne des Huiles essentielles des aiguilles de Pinus halepensis Mill. du Nord Est Algérien, vol. 30. Sci Technol, 2015.

[29] L. Courty , Etude de l'émission et des propriétés de combustion des composés organiques volatils potentiellement impliqués dans les feux de forêts accélérés, Thèse de doctorat, E.N.S.M.A France, 2012

[30] L.Courty , K.Chetehouna , L.Lemée , C.Fernandez -Pello , J-P.Garo , Biogenic volatile organic compounds emissions at high temperatures of common plants from mediterranean regions affected by forest fires, Journal of Fire sciences ., vol. 32. 2014. https://doi.org/10.1177/0734904114536128

[31] J.Van Keulen, Density of porous solids, Mat. Constr, vol. 6. 1973. https://doi.org/10.1007/BF02479031

[32] P.Adapaa, L.Tabila, G.Schoenaub, Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. Biosystems Engineering, 2009. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.022

[33] H. Boutchiche, F.Z. Sabi, O. Mosbah, A. Sahila, S.M. Terrah, N. Zekri, Study of the Physical Properties of Pinus Halepensis of Oran. Application to the Flammability, 2e éd., vol . 4. Algerian Journal of Research and Technology, 2020. http://www.univusto.dz/AJRT/

CHAPITRE IV

Effet de l'Humidité sur la Propagation du Feu

Introduction

La vitesse à laquelle un incendie se développera dépend de la vitesse à laquelle la flamme peut se propager à partir du point d'allumage pour impliquer une zone de plus en plus grande de matériaux combustibles.

La propagation de la flamme peut être considérée comme un front d'allumage progressif dans lequel le bord d'attaque de la flamme agit à la fois comme source de chaleur (pour élever le combustible devant le front de flamme jusqu'au point de feu) et comme source d'allumage en tant que flamme pilote. Le front de flamme représente une frontière formelle, désignée par Williams [1] sous le nom de « surface d'initialisation du feu », qui se situe entre les deux états extrêmes du combustible non brûlé et brûlant. Par conséquent, la vitesse de propagation peut dépendre autant des propriétés physiques du matériau que de sa composition chimique.

Parmi les divers facteurs connus pour être significatifs dans la détermination du taux de propagation à travers les combustibles solides il y a la présence de retardant dans la composition chimique du combustible tel que la teneur en humidité contenue dans ce combustible et l'orientation de la surface par rapport au vent [2].

Le présent chapitre est destiné à l'étude du comportement d'un feu de surface dans des litières d'aiguilles mortes et vivantes de pin d'Alep. L'étude concerne l'influence de la teneur en eau et de la pente sur la dynamique du feu.

IV.1 Combustibilité

La combustibilité est la propriété qu'a un végétal ou un ensemble de végétaux à propager le feu. Cette notion intervient à une échelle plus grande que l'inflammabilité ; en effet la combustibilité caractérise plutôt une formation végétale entière avec les différentes strates qui la composent [3].

Les paramètres souvent utilisés pour décrire la combustibilité sont de deux ordres :

- La puissance du front de flamme,
- La vitesse de propagation du front de flamme.

Ces grandeurs ne sont bien entendu pas indépendantes. En effet la puissance du front de flamme est ainsi définie par l'équation de Byram [4] :

$$P = m.V.C \qquad \text{(IV.1)}$$

Où :

P est la puissance linéaire (W.m)

m : la masse du combustible (g)

V : la vitesse de propagation (m/s)

C : le pouvoir calorifique du combustible végétal (J/g)

Mais la distinction entre puissance et vitesse de propagation permet de bien comprendre la notion de combustibilité. En effet un incendie peut être peu intense mais se propager rapidement (feu courant) ou au contraire progresser lentement et dégager un flux énergétique considérable. Dans les deux cas la formation végétale est dite très combustible, mais les forces de lutte sont confrontées à des incendies de natures très différentes.

Les aiguilles de pin d'Alep ont un pouvoir calorifique supérieur moyen de 5300 cal/g [3]. Ce dernier évolue au cours de l'année, il atteint ses valeurs maximales pendant les mois de Février et Mars. En cela cette essence se situe parmi celles dont le feuillage dégage beaucoup de chaleur en se consumant.

IV.2 Combustibilité des litières

L'étude sur banc thermique de la combustibilité des litières, et notamment de celle du pin d'Alep, permet d'illustrer la notion de vitesse de propagation du feu.

IV.2.1 Méthode de mesure

Un essai sur litière consiste à allumer une ligne de feu selon la largeur d'un rectangle de litière reconstituée et à mesurer les grandeurs de la propagation du feu. Le combustible est prélevé sur le terrain. Il s'agit d'une couche monospécifique de feuilles ou d'aiguilles.

IV.2.2 Les facteurs de la combustibilité

Les principaux facteurs de la combustibilité de la litière de pin d'Alep sont : la charge, la teneur en eau, la structure de la particule et la structure de la couche.

1. La charge : sur le terrain la quantité de litière par unité de surface peut atteindre 12t/ha [3]. Selon toujours cette source, les essais sur banc thermique ont permis de déterminer une masse critique de propagation de 1,8t/ha en deçà de laquelle le front de flamme ne se propage plus de manière régulière.
2. Teneur en eau : Il existe de même un seuil critique de propagation d'environ 25% (définie par rapport à la masse sèche) au-dessus duquel le feu ne se propage plus en ligne continue du fait de la forte humidité du combustible.

3. La structure de la particule : la particule combustible, en l'occurrence l'aiguille de pin, est caractérisée par son rapport surface/volume et sa masse volumique.
4. La structure de la couche : la structure de la couche de litière est conditionnée par la forme des aiguilles qui la constituent. Elle est caractérisée par son tassement ou mieux sa masse volumique.

IV.3 Etude de la propagation de feu de litière

L'effet de la teneur en eau sur le comportement d'un feu de végétation est très souvent résumé à travers la relation qui lie le rapport de vitesse de propagation observée (ROS) avec celle qui serait obtenue si la teneur en eau était réduite à zéro. Très souvent les résultats obtenus sur des feux de terrain ou des essais en laboratoire mettent en évidence une décroissance exponentielle du ROS en fonction de la teneur en eau contenue dans le combustible. D'autres études suggèrent que le domaine de validité de cette loi est limité aux valeurs relativement faibles de la teneur en eau (inférieure à 12%) et montrent que la relation tend par la suite vers une décroissance linéaire [5].

L'objectif de la présente étude est de montrer le rôle de la teneur en eau sur la propagation d'un feu de surface se propageant à travers une litière d'aiguilles de pin d'Alep et en particulier d'étudier la loi d'amortissement de la teneur en eau contenue dans cette végétation sur la vitesse de propagation et la détermination de l'humidité critique au-dessus de laquelle le feu ne se propage plus et ce pour deux situations, sur une surface plane et sur une surface plane inclinée afin de mettre aussi en évidence l'effet de la pente sur la propagation.

IV.3.1 Mode opératoire

IV.3.1.1 Banc litière (Banc thermique)

Ses caractéristiques dimensionnelles sont : Longueur : 88,5 cm ; Largeur : 37,5 cm, il est articulé pour permettre des inclinaisons à différents angles. Il est doté de supports et d'accessoires permettant la fixation des appareils de mesures et de visualisation. Le plateau du banc est rempli de terre pour assurer une homogénéité de surface de déposition aussi pour se rapprocher du cas réel du terrain.

Les équipements associés sont :

- Unité d'acquisition de mesures de marque GRAPHTEC midi-LOGGER GL 840 ;
- Trois Thermocouples type K pouvant mesurer des températures jusqu'à 1200°C avec une précision de ± 2°C ;

- Flux mètres de 10 kW/m2 ± 0.1 de marque Hukseflux SBG 01 pour la mesure des flux thermiques ;
- Récepteur Flux mètre type LI-19 ;
- Un PC pour l'enregistrement des résultats ;
- Thermo-hygromètre pour la mesure de la température et l'humidité du milieu d'une précision de ± 0.5°C et ± 3%HR ;
- Règles graduées au millimètre pour les mesures de distances ;
- Deux caméras numériques ;
- Une règle graduée pour la mesure de la hauteur de la flamme ;
- Briquet à gaz pour initier le départ du feu ;
- Du fils pour délimitation des distances parcourues par le front du feu ;
- Chronomètre.

Figure IV.1 : *Banc thermique d'essai*

Position des barrières	0	1	2	3	4	5	6	7
Distance (mm) ± 0,5 mm	0	135	240	350	455	560	670	775

Tableau IV.1 : *Les distances des barrières par rapport à la première ligne d'allumage de la litière*

IV.3.1.2 Caractéristiques de la végétation

La structure des aiguilles de pin d'Alep utilisées pour les essais est caractérisée par les paramètres physiques illustrés dans le tableau IV.2.

Caractéristique structurelle	Aiguilles vivantes sèches [3]	Aiguilles vivantes (laboratoire LEPM)	Aiguilles mortes (Laboratoire LEPM)
Masse linéique (mg/m)	200	481	240
Masse surfacique (g/m^2)	70		6,80
Masse volumique (Kg/m^3)	750	1087	715,38
Rapport surface/volume (m^{-1})	10400	6958	6490

Tableau IV.2 : *Structure des aiguilles de Pin d'Alep*

IV.3.1.3 Protocole expérimental

- **Préparation de la litière :**

La végétation est répartie sur le plateau de la table d'une manière homogène ; en gardant la même épaisseur du lit de 1 à 1,1cm et la même masse à bruler $m = 150g$ et ce pour toutes les expériences réalisées, par conséquent la charge du lit végétal est conservée à la valeur de 0,5 kg/m^2.

Les essais ont été portés sur de la végétation (aiguilles de pin d'Alep) morte et vivante fraiche, partiellement séchée et totalement séchée. On désigne par la végétation morte celle qui est ramassée du sol, les aiguilles sont de couleur brun et considérées comme séchées naturellement et par la végétation vivante celle cueillis de l'arbre, les aiguilles sont de couleur verte et considérées comme humide dites aussi fraiches. Les échantillons proviennent d'un peuplement de pin d'Alep situé dans le site de l'université « Mohamed Boudiaf- USTO ».

La forme des aiguilles de pin d'Alep ainsi que la structure de la litière sont décrites dans le tableau IV.3 suivant.

Forme de l'aiguille	Structure de la litière	Masse volumique kg/m^3
Très fine, courte et droite	Moyennement tassée	47

Tableau IV.3 : *Structure de la litière*

Les échantillons sont pesés avant d'être étalés sur le plateau, pour les échantillons partiellement et totalement séchés, ils sont pesés avant et après séchage. Deux procédés ont été utilisés pour le séchage, le séchage par convection à l'air chaud dans une chambre climatique et le séchage par micro-ondes dans un four. Dans chaque cas une masse de 150g est prise pour le test. Il est à noter que le temps de maintien des échantillons dans les appareils de séchage (chambre climatique ou four à micro-ondes) détermine le taux d'humidité extrait de la végétation et par conséquent la teneur en eau restante dans celle-ci.

La balance utilisée pour le pesage est de marque KERN EMB 6000-1 d'une capacité de 6kg et d'une précision de ± 0,3g. Le séchage dans la chambre climatique s'est effectué à 60°C et à une humidité de 0%, avec des temps de séchage de 12h, 24h et 43h, la masse *m(t)* à la fin de chaque séchage de l'échantillon est enregistrée. Le tableau IV.4 représente les différentes valeurs de la teneur en eau enregistrée pour chaque temps de séchage.

Temps de séchage (h)	$H_{extraite}$(%)	$H_{restante}$(%)
12	40.83	12,11
24	44.6	6,14
43	48	0 *

Tableau IV.4 : *Les différentes valeurs de la teneur en eau correspondantes à chaque temps de séchage dans la chambre climatique*

* l'humidité restante n'est jamais nulle, la valeur de zéro signifie que la végétation est complètement sèche, même si elle est maintenue plus que 43h dans la chambre climatique il n'y a plus d'extraction d'eau. L'humidité restante doit varier entre 2 et 4%.

Pour ce qui est du séchage au four micro-ondes, les valeurs des teneurs en eau enregistrées sont illustrées dans le tableau IV.5 suivant.

Temps de séchage (s)	$H_{extraite}$(%)	$H_{restante}$(%)
60	36,56	20,84
70	42,2	13,12
75	44,03	10,54
90	46,9	5,71
120	46,73	6,00
150	49,06	1,70
180	49,93	0

Tableau IV.5 : *Les différentes valeurs de la teneur en eau correspondantes à chaque temps de séchage dans la chambre climatique*

IV.3.2 Mesures des paramètres, vitesse de propagation, flux thermique dégagé et température de la flamme.

Pour la mesure de la vitesse de propagation un chronomètre est utilisé pour enregistrer le temps que fait la flamme pour franchir les barrières en fils disposés à des distances plus au moins égales le long du plateau (voir tableau IV.1). Le lit combustible est devisé en sept

portions par ces barrières. Les différentes distances parcourues par le feu sont présentées dans ce même tableau IV.1 L'allumage se fait à partir de l'extrémité du plateau en utilisant une mèche pour activer le feu à l'instant $t = 0$. Trois thermocouples sont disposés parallèlement aux endroits des barrières et dans différentes positions de la table pour le suivi de la température de la flamme durant la propagation. Une caméra numérique fixée à la verticale de la table, une autre caméra numérique est positionnée horizontalement afin de pouvoir suivre le déroulement des expériences et d'examiner les profils du front du feu. La hauteur de la flamme est mesurée à l'aide d'une règle graduée, et le flux dégagé par le front est sauvegardé par le flux mètre via un capteur de flux thermique.

La température et l'humidité ambiante sont enregistrées avant chaque expérience avec un hygromètre.

IV.4 Résultats et Discussion

La propagation du feu et son intensité dépendent principalement des mécanismes de transfert de chaleur au cours de la propagation.

En effet, dans le cas des feux de forêts les trois modes de transfert de chaleur interviennent avec une prépondérance du mode par rayonnement par rapport à la convection et la conduction. L'effet de la conduction est généralement négligé dans ces types de feux. Par contre à l'échelle du laboratoire pour les feux de litières et par conséquent les feux de surface, on constate que la conduction est le mécanisme de transfert le plus dominant car la propagation se fait de proche en proche voisin, c'est à dire l'allumage des sites voisins se produit par contact direct entre la végétation brulée et celles non brulée.

IV.4.1 Effet de l'humidité sur la propagation

Pour une végétation fraiche ou la teneur en eau est assez élevée, pas de propagation de flamme observée, en effet l'énergie fournie par la première ligne de végétation allumée est insuffisante pour assurer l'allumage de la végétation voisine.

La variation de la distance parcourue par la flamme en fonction du temps est présentée sur la Figure IV.2 pour différentes teneurs en eau. Pour les deux techniques de séchage utilisé la distance croit linéairement avec le temps pour les différentes humidités étudiées. La vitesse de propagation est par conséquent déterminée par la pente de chaque droite d'après l'équation (IV.2) :

$$d = v.t \qquad \text{(IV.2)}$$

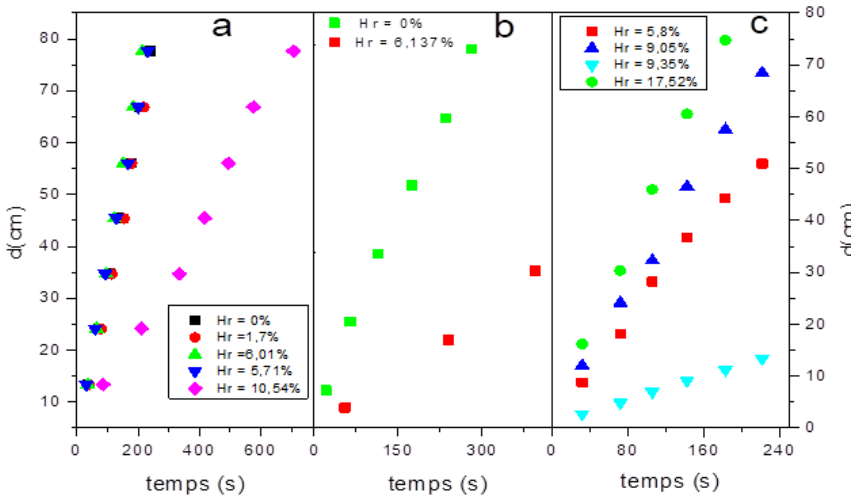

Figure IV.2 : *L'évolution de la vitesse de la propagation pour chaque teneur en eau de la végétation : a) Séchage au Micro-ondes, b) Séchage dans la chambre climatique, c) Végétation morte.*

La figure IV.2.a correspond au séchage par micro-onde, la propagation du feu est assez rapide, les vitesses de propagation sont grandes et proches pour des faibles valeurs d'humidité comprises entre 0% et 6% (ce qui correspond à une végétation complètement séchée). Effectivement, lors de la réalisation des expériences il a été remarqué que pour ce cas la flamme était intense et sa hauteur était importante comparativement aux flammes générées par les litières dont la teneur en humidité des aiguilles est plus élevée. Sa température a atteint 600 °C, et la puissance thermique dégagée a dépassée *10 KW/m*^{2}.

Comme le processus du transfert thermique se fait par contact directe entre le site brulé et le site non brulé et que la végétation est sèche la propagation est par conséquent assez rapide, les vitesses enregistrées d'après les courbes de la figure IV.2-a sont de l'ordre de 0,35 à 0,4 cm/s avec une précision du fit de $R^2 = 0{,}999$.

Le tracé des températures captées par les thermocouples au cours de propagation (figure IV.3) indique bien que le transfert de chaleur se fait par conduction ceci est montré par le fait que le deuxième thermocouple commence à chauffer après le refroidissement du premier et l'échauffement du troisième se fait après le refroidissement du deuxième. La situation aurait été autre si le rayonnement ou la convection intervenaient dans le processus du développement de la flamme.

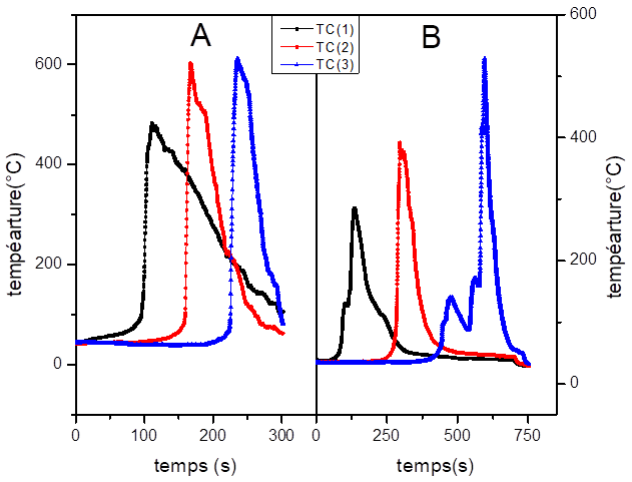

Figure IV.3 : *Profil de température à différentes positions des thermocouples ;*
A) Végétation séchée pendant 3min aux micro-ondes, B) Végétation Séchée pendant 1min 15s

Dans le cas de l'échantillon séché pendant 3min aux micro-ondes (végétation considérée comme totalement séchée), on remarque que la température du premier thermocouple ne diminue pas rapidement et dure jusqu'à l'extinction de la flamme, ceci est dû au fait que quand la flamme dépasse le thermocouple 1 vers le 2 la combustion des sites brulés continue par braise. Comme la vitesse de propagation est grande, la flamme atteint le dernier thermocouple avant l'extinction des braises.

En diminuant le temps de séchage, la teneur en eau de la végétation devient de plus en plus grande, la quantité d'eau restante influe directement sur la qualité et la nature de la flamme en diminuant sa hauteur et son intensité ce qui induit une diminution remarquable de la puissance dégagée par cette dernière et par conséquent, le processus devient plus lent.

La vitesse est de l'ordre de 0,1 cm/s. Le tableau IV.6 illustre les valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme à chaque temps de séchage.

Temps de séchage (s)	Thermocouples			Hauteur de la flamme varie entre (cm)	Flux dégagé (KW/m^2)
	TC1(°C)	TC2(°C)	TC3(°C)		
75	284,8	391,8	529	6 à 11	7,49
90	469,1	345,8	405	11 à 16	7,75
120	380,7	574	619,6	16 à 21	9
150	350	376,1	294	16 à 21	8,92
180	482,3	602,6	612,8	16 à 26	11

Tableau IV.6 : *Valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme à chaque temps de séchage aux micro-ondes*

Les courbes de la figure IV.2.b représentatives du séchage dans la chambre climatique, présentent aussi un comportement linéaire de la distance en fonction du temps et par conséquent on obtient une vitesse constante lors de la propagation.

En comparant ce résultat avec ceux obtenus pour un séchage aux micro-ondes (figure IV.2-a) on remarque que pour des teneurs d'humidités égales, la propagation est plus lente dans le cas du séchage dans la chambre climatique, la flamme est moins intense et sa hauteur est plus basse cela, peut-être expliquait par le fait que la végétation au cours du séchage dans la chambre climatique subit un stress hydrique en raison du temps de séchage qui est long, elle répond à ce phénomène par la fermeture de ses pores. Les aiguilles restent toujours flexibles malgré un séchage de 43h c'est-à-dire qu'elles contiennent toujours de l'eau.

Probablement les conditions de la pression à l'intérieur de l'enceint induisent une perte de quantité de COV ainsi que des huiles essentielles de la végétation, la photo représentée sur la figure IV.4 montre des traces de coulée de liquide d'aspect huileux sur le hublot de la chambre climatique.

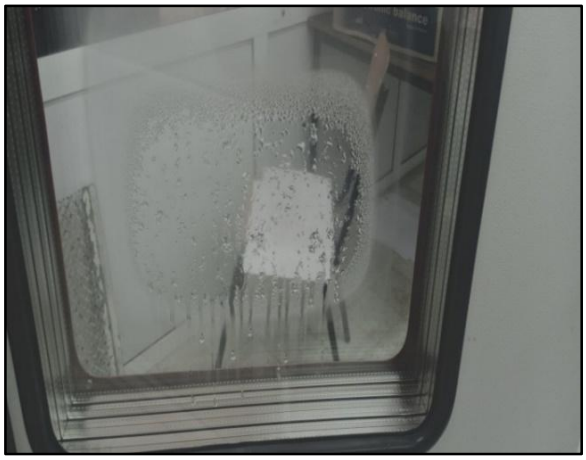

Figure IV.4 : *Liquide d'aspect huileux extrait de la végétation lors du séchage dans la chambre climatique et déposé sur le hublot de l'appareil.*

Temps de séchage (h)	Températures (°C)			Hauteur de la flamme varie entre (cm)	Flux dégagé (KW/m^2)
	TC1(°C)	TC2(°C)	TC3(°C)		
24	-	152.6	111.8	6 à 11	5.28
43	424,3	380,2	526	11 à 16	7,6

Tableau IV.7 : *Les valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme correspondant à chaque temps de séchage dans la chambre climatique*

Afin de faire la distinction entre la végétation morte et vivante, les mêmes essais de propagation ont été réalisés sur de la végétation morte en l'occurrence sur des aiguilles de pin d'Alep. La teneur en eau de cette variété varie entre 6 et 17,5%. Cette variation de la teneur est due au changement des conditions climatiques du milieu environnant marqué par le changement de la température et d'humidité.

Les résultats sur la propagation obtenus pour les aiguilles mortes sont similaires sur le plan de la variation de la distance parcourue par la flamme en fonction du temps, le comportement reste toujours linéaire mais avec des vitesses de propagation différentes bien entendu.

Il est à remarquer qu'il y a eu propagation du feu sur la végétation morte à 17% d'humidité tandis que pour la végétation vivante séchée aux micro-ondes et contenant une teneur en eau de 14% aucune progression de la flamme n'a été observée, ceci peut être expliqué par la nature de l'eau contenue dans chacune de ces deux variétés. En effet, on suppose que l'eau restante dans la végétation morte est de l'eau superficielle libre donc il suffit d'une faible énergie pour l'extraire, par contre celle qui reste dans la végétation vivante est de l'eau liée difficile à extraire et par conséquent joue son rôle de retardant de l'inflammation. Ce résultat peut donner lieu à une caractérisation de la végétation morte.

Le tableau IV.8 représente les valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme dans le cas de la végétation morte.

H (%)	Températures (°C)			Hauteur de la flamme varie entre (cm)	Flux dégagé (KW/m^2)
	TC1(°C)	TC2(°C)	TC3(°C)		
5,8	428,6	435,1	578,6	16 à 21	12,74
9,05	458,8	453,1	565,1	11 à 16	8,77
9,35	439	366,5	569,9	6 à 11, 16	8,17
17,52	549,9	414,2	204,6	6 à 11	7,81

Tableau IV.8 : *Les valeurs moyennes de la hauteur de la flamme, la teneur en eau, le flux dégagé et la température maximale atteinte par la flamme dans le cas de la végétation morte*

IV.4.2 Effet de la pente sur la vitesse de propagation

La structure non homogène de forêts telle que les reliefs et les montagnes impliquent un impact direct sur la vitesse de propagation. L'inclinaison du terrain est l'un des paramètres dominants qui affectent le comportement d'incendie. L'effet de la pente du terrain a fait l'objet de plusieurs études expérimentales et numériques vu leur influence sur la vitesse de propagation et les modes de transfert de chaleur au cours de la propagation.

L'inclinaison est l'un des facteurs qui affectent la propagation du feu [6]. On distingue l'existence de deux types de pentes : i) des pentes descendantes où la vitesse de propagation est décélérée puisque le combustible est situé en dessous de la flamme donc la quantité d'énergie transportée est faible ce qui retarde la propagation. ii) Des pentes ascendantes (montantes) ou les feux propagent plus rapidement, ce type est le plus dangereux [7]. Plusieurs expériences ont été réalisées aux niveaux de laboratoires sur des tables afin de mieux comprendre ce phénomène, le tableau IV.9 récapitule une partie des travaux effectués sur ce paramètre de la pente.

Auteur(s)	Banc expérimental	Intérêt de l'étude
Dupuy [8]	0,59-1,0 m × 1,50-1,70 m représentent la surface de propagation avec des aiguilles de pin.	L'effet de la pente et de la charge sur la propagation.
Dupuy et Maréchal [9]	La surface de Propagation est de 1-4 m × 10 m moyennant des aiguilles de pin	L'influence de la pente sur les transferts de chaleur par rayonnement et convection.
Silvani et al [10]	Propagation se fait sur une surface de 4 m × 10 m en utilisant de la frisure de bois.	L'effet de la pente sur la géométrie du front et des transferts de chaleur.
Mendes-Lopez et al [11]	Le tunnel à feu ou la propagation aura lieu à une surface de 0,7 m × 2 m avec des aiguilles de pin.	Etudier les effets suivants : de la pente, du vent, de la charge et de la teneur en eau sur la vitesse de propagation et les propriétés géométriques du front.
Perez et al [12]	Étude de propagation sur des tables de [0,50 ; 1,00 et 1,25 m] et dans un tunnel à feu pour de la paille.	L'étude consiste à mesurer la propagation pour différentes pentes et vitesses de propagation
André et al [13]	Propagation sur une surface de 1,28-3 m × 2,5-4,6 m utilisant des aiguilles de pin et des frisures de bois.	L'étude de la rotation d'un feu pour différentes pentes.
Boboulos et al [14]	Deux types d'aiguilles de pin pour la propagation	Etudier la propagation en fonction de différentes pentes, vitesses de vent et charges.

Tableau IV.9 : *Extrait des études réalisées en laboratoire sur l'effet de la pente* ***[15]***

Cependant, la connaissance de l'effet de la pente reste inachevée [16].

IV.4.3 Etude expérimentale

L'étude a pour but d'analyser l'effet de la pente ascendante sur la vitesse de propagation de la végétation. Pour cela des aiguilles de pin d'Alep mortes sont utilisées étant donné que la propagation du feu s'est produite sur tous les essais effectués sur ce type de végétation.

Protocole expérimental

Cinq expériences ont été réalisées dans le même jour. Le protocole expérimental est similaire à celui utilisé pour l'étude de la propagation en surface plane horizontale, la seule modification apportée concerne l'inclinaison du plateau de la table. Le paramètre variable dans cette série d'expériences est l'angle d'inclinaison et par conséquent la pente du terrain objet de l'étude. Les paramètres physiques de la végétation maintenus constant sont : la masse de 150g et la teneur en eau de 8,41%.

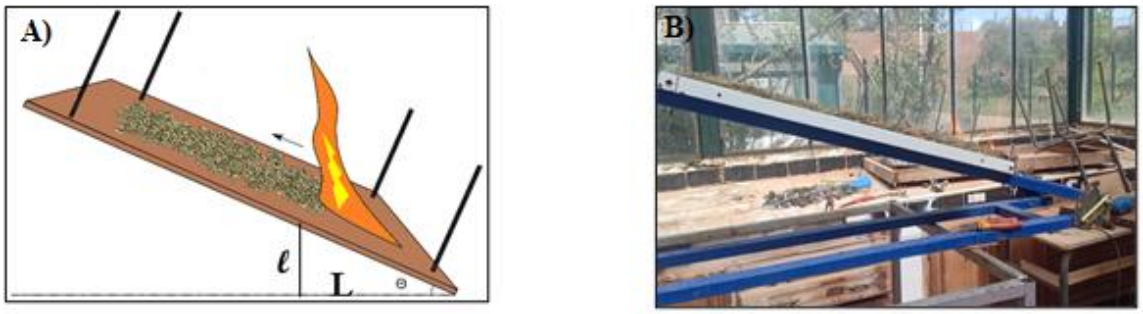

Figure IV.5 : *A) Schéma d'une flamme ascendante sur table inclinée.*
B) Photo de la table d'essai de propagation utilisée

IV.4.4 Résultats et discussions

La courbe de la figure IV.6 présente les distances parcourues d(cm) par le feu en fonction du temps de propagation t(s) à différentes pentes θ (°) pour une végétation morte.

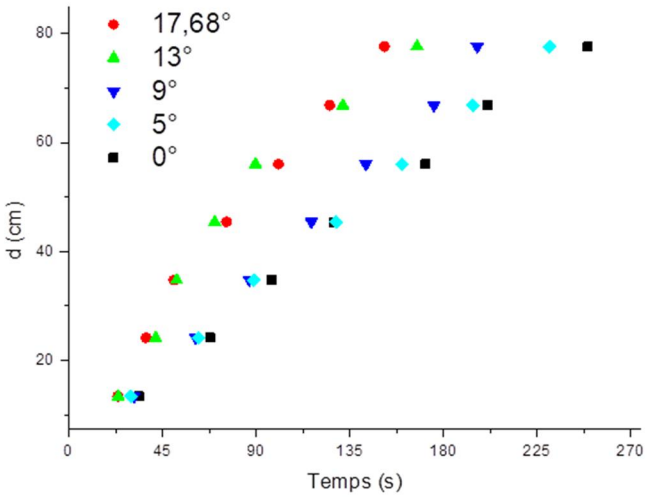

Figure IV.6 : *Le profil des vitesses à chaque angle d'inclinaison de la table de propagation*

La figure IV.6 du profil de la distance parcourue par la flamme en fonction du temps pour différentes pentes montre un comportement linéaire. Ce comportement indique bien que la vitesse de propagation est constante et ce pour tous les angles d'inclinaison. Les résultats de la vitesse sont portés dans le tableau IV.10

Angle (°)	Vitesse (cm/s)	R^2
0	0,302 (9)	0,994
5	0,318 (5)	0,998
9	0,383 (6)	0,998
13	0,44 (4)	0,936
17,68	0,48 (3)	0,983

Tableau IV.10 : *La vitesse de propagation pour chaque pente*

Le tracé de la vitesse en fonction de la pente (figure IV.7) montre que la vitesse varie proportionnellement avec l'angle d'inclinaison ($v \propto \theta$), On constate que la vitesse de propagation varie faiblement de 0,302 à 0,383 cm/s pour des pentes comprises entre 0 et 9°, cela est dû au transfert d'énergie qui se fait par contact direct entre les sites brulés et les sites non brulés.

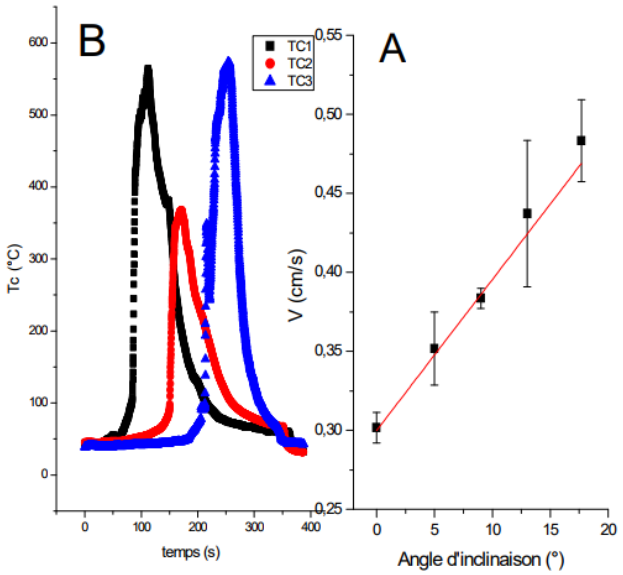

Figure IV.7 : *A) Allure de la vitesse en fonction de la pente.*
B) Température en fonction du temps de passage de la flamme aux endroits des thermocouples

Au-delà de 9°, le comportement reste toujours linéaire tout au long du parcours de la flamme mais la vitesse du front voit une certaine régression, le point à partir duquel la vitesse chute varie avec l'angle d'inclinaison, la chute est plus précoce pour des angles élevé

(voir figure IV.8-a et b), nous attribuons ce phénomène à l'inclinaison de la flamme par rapport au plan de végétation ce qui fait intervenir en plus du transfert de chaleur par conduction les autres modes qui sont la convection et le rayonnement. L'explication exacte de cette régression nécessité la réalisation de plusieurs expériences pour chaque pente ce qui permettra une analyse plus détaillée et plus approfondie.

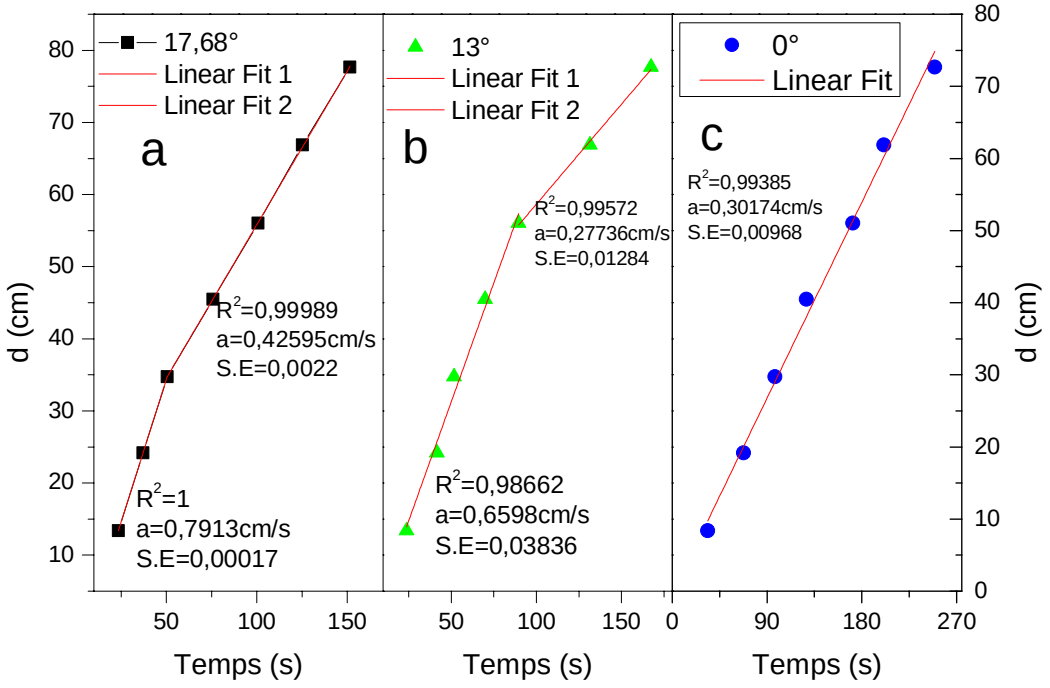

Figure IV.8 : *Le profil des vitesses moyennes pour des pentes avec inclinaisons : a) 18°, b) 13° et c) 0°*

Figure IV.9 : *Photo montrant la propagation de la flamme sur banc d'essai du laboratoire « LEPM » (Vue de dessus)*

Conclusion

Deux paramètres directeurs de la propagation du feu ont été étudiés, l'effet de l'humidité contenue dans la végétation et celui de l'inclinaison du terrain ou la pente du terrain. Les études ont porté sur les feux de litières composées d'aiguilles de pin d'Alep mortes et vivantes avec différents taux d'humidité. Les résultats obtenus suite aux expériences menées ont montrés une humidité critique de non propagation du feu à partir de 14% pour la végétation vivante. La propagation du feu a eu lieu pour la végétation morte même à 17% d'humidité.

Un comportement linéaire a été observé sur le profil de la distance parcourue par le feu en fonction du temps ce qui implique une progression avec une vitesse constante de la flamme. Cette vitesse varie inversement avec la teneur en eau de la végétation, plus l'humidité augmente plus la vitesse diminue jusqu'à l'état de non propagation qui correspond à l'humidité critique.

Sur l'effet de la pente, aussi le comportement linéaire de la vitesse de propagation en fonction de la pente a été observé, cette étude a permis de déterminer une zone une transition de vitesse d'une phase accélérée vers une phase décélérée à de grandes inclinaisons dépassant 9°. Une étude plus détaillée sur ce comportement transitoire fera l'objet d'autres prochaines expériences et d'autres investigations.

Références Bibliographiques (Ch.IV)

[1] F.A.Williams, Mechanisms of fire spread, Intenational Symposium on Combustion, Vol 16, 1281-1294, 1977. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80415-3.

[2] R.Fiedman, Ignition and burning of solids, in Fire Standards and Safety. ASTM STP 614 (ed. A.F.Roberson). pp. 91-111. American Society for Testing and Materials,

Philadelphia.PA, 1977.

[3] D.Alexanderian, E.Rigolot, Sensibilité du Pin d'Alep à l'Incendie, Forêt Méditerranéenne , t. XIII, n° 3, 1992.

[4] Byram.G.M., Combustion of forest fuels In : Davis K.P., Ed Forest fire : Control and use, McGraw-Hill, New York, 1959.

[5] D.Morvan, A.Lamorlette, Effet de la teneur en eau sur la propagation d'un feu de surface à travers une strate de végétation homogène, 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux,

2013, http://hdl.handle.net/2042/52763.

[6] D.X.Viegas, Forest fire propagation, The Royal Society, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Portugal, 356, 2907-2928,(1998).

[7] M.Jonathan, Modélisation et simulations numériques de la propagation de feux de forêts, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1998, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003730.

[8] J.L.Dupuy, Slope and fuel load effects on fire behavior : Laboratory experiments in pine needles fuel beds, International Journal of Wildland Fire, 1995.

[9] Dupuy.J.L. Maréchal J, Slope effect on laboratory fire spread : Contribution of radiation and convection to fuel bed preheating, International Journal of Wildland Fire, 2011.

[10] X.Silvani, F.Morandini, J.L.Dupuy, Effects of slope on fire spread observed through video images and multiple-point thermal measurement, Experimental Thermal and Fluid Science, 2012.

[11] J.M.C.Mendes-Lopes, J.M.P.Ventura, J.M.P.Amaral, Flame characteristics, temperature –time curves, and rate of spread in fires propagating in a bed of pinus pinaster needles, International Journal of Wildland Fire, 2003.

[12] Y.Pérez, E.Pastor, A.Àgueda, E.Planas, Effect of wind and slope when scaling the forest fires rate of spread of laboratory experiments", Fire technology, 2011.

[13] J.C.S.André, J.C.Gonçalves, G.C.Vaz. D.X.Viegas, Angular variation of fire rate of spread, International Journal of Wildland Fire, 2013.

[14] M.Boboulos, M.R.I.Purvis., Wind and slope effects on ros during the fire propagation in east-Mediterranean pine forest litter, Fire Safety Journal, 2009.

[15] A.Marchand, (Thèse Doctorat), Propagation des feux de végétation : expérimentations à l'´échelle du laboratoire et validation d'un propagateur, Université de Lorraine, 2016.

[16] F.Morandini, X.Silvani, L.Rossi, P.A.Santoni, A.Simeoni, J.H.Balbi, J.L.Rossi, T. Marcelli, Fire spread experiment across Mediterranean shrub : Influence of wind on flame front properties, Fire Safety Journal, 2006.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

A travers ces expériences réalisées en majorité dans le laboratoire « LEPM » de l'université « USTO », nous avons présenté dans un premier temps l'intérêt des procédés de séchage et leur influence sur la composition chimique d'une végétation en démontrant que le moyen le plus efficace pour faire sécher une espèce végétal est l'utilisation des micro-ondes L'efficacité des dessiccateurs micro-onde réside dans le temps très réduit de séchage et la sauvegarde de l'essentiel des composants organiques de l'espèce.

Moyennant un cône calorimètre, le système de séchage par micro-ondes et en se basant sur la théorie de transition de phases, l'influence du paramètre « teneur en eau » d'une végétation sur son inflammation a été étudiée. Les résultats obtenus ont montré l'inexistence d'une humidité critique pour l'inflammation, mais plutôt d'un flux critique d'inflammation. Ce résultat est considéré comme important dans les cas des feux de forêt, du fait que même une végétation très humide peut s'enflammer si le flux de chaleur incident dépasse un certain seuil de puissance. L'analyse des résultats des tests exprimant le temps d'inflammation en fonction de la teneur en eau de la végétation a mené également à la détermination d'une humidité caractéristique.

La dégradation thermique du matériau végétal entant que matériau poreux a été étudiée en mesurant sa perte de masse par deux moyens, pendant son exposition à un flux thermique radiatif et en utilisant les analyses thermogravimétriques et calorimétriques (DSC couplée à l'ATG). Les effets des paramètres physiques (humidité, porosité) et thermique (flux thermique) sur le processus de dégradation thermique du matériau ont été mis en évidence.

Des paramètres physiques essentiels à la simulation des feux de deux types de végétations, pin d'Alep et pailles de céréales ont fait l'objet de mesures expérimentales. Les paramètres mesurés sont : les masses volumiques des états humides et secs de ces végétations, les chaleurs spécifiques et la porosité. Les résultats obtenus ont montrés que les valeurs de ces paramètres jusqu'ici utilisés dans le logiciel de simulation du feu de forêt nécessitent des corrections en introduisant les valeurs mesurées issues de l'expérimentation. Les masses volumiques qui sont supposées constantes ne le sont pas en réalité et dépendent de la teneur d'humidité contenue dans la végétation, du mode de séchage, de la porosité, de même pour la chaleur spécifique Cp qui est supposée elle aussi constante, l'expérience a montré qu'elle varie en fonction de la température, sachant que cette dernière croit de manière continue

pendant l'exposition au flux thermique et pendant l'inflammation, la chaleur spécifique évolue donc dans le même sens pendant ces phases et ne reste pas à sa valeur initiale.

La vitesse de propagation du feu en fonction de l'humidité de la végétation ainsi que l'humidité critique de propagation ont été déterminées expérimentalement, en utilisant des tables de végétation.

Enfin, il a été démontré que l'introduction de la chaleur de désorption additionnelle dans le modèle physique de Koo et Pagni pour la détermination numérique du temps d'inflammation de la végétation n'a pratiquement aucune influence sur le comportement de ce temps. La variation de ce temps en fonction de la teneur en eau conserve la linéarité dans les deux cas avec ou sans introduction de cette énergie dans le modèle.Ce comportement linéaire est en désaccord avec les résultats expérimentaux ci-dessus qui montrent un comportement exponentiel.

En conclusion, tous les résultats obtenus sont destinés à améliorer les performances du code de simulation de propagation du feu développé par le laboratoire. Il est donc essentiel de prendre en considération dans les logiciels les vraies valeurs des paramètres physiques de la végétation considérée et de tenir compte des constatations observées.

En perspective

Développer les procédures expérimentales est le seul moyen pour aboutir à une simulation juste et fiable. Dans le domaine des feux qui est très complexe particulièrement celui des feux de végétations, il reste beaucoup de choses à concrétiser. Nous souhaitons participer et contribuer au développement des codes de calculs à travers l'expérimentation en pratiquant des mesures sur les composés organiques volatils (COV) qui sont à l'origine de la naissance des feux et à l'énergie dégagée, ainsi que sur les paramètres déterminants dans l'éclosion et la propagation du feu.

Productions Scientifiques

I- Publications

1- F.Z. Sabi, S.M. Terrah, O. Mosbah, A. Dilem, N. Hamamousse, A. Sahila, O. Harrouz, H. Boutchiche, F. Chaib, N. Zekri, A. Kaiss, J.-P. Clerc, F. Giroud , D.X. Viegas. "Ignition/non-ignition phase transition: A new critical heat flux estimation method", *Fire Safety Journal* 119 (2021) 103257

2- O. Harrouz, F. Frenzel, O. Mosbah, S M. Terrah, F. Z. Sabi, A. Sahila, N. Zekri, F.Kremer, "Investigation on the physical properties of *Eucalyptus* and *Pinus halepensis* essential oils using Dielectric Spectroscopy and GC-MS Spectrometry", *Journal of Applied Spectroscopy*, 88 n°3 (2021) 505.

3- S.M. Terrah, F.Z. Sabi , O. Mosbah, A. Dilem, N. Hamamousse, A. Sahila, O. Harrouz, H. Boutchiche, F. Chaib, N. Zekri, A. Kaiss, J.-P. Clerc, F. Giroud , D.X. Viegas, "Nonexistence of critical fuel moisture content for flammability", *Fire Safety Journal* 111 (2020) 102928

4- H.Boutchiche, F. Z. Sabi, O. Mosbah, A. Sahila, S.M. Terrah, N. Zekri
" Study of the Physical Properties of *Pinus Halepensis* of Oran. Application to the Flammability", *A.J.R.T* 4 n°1 (2020) 8-16.

5- F.Z Sabi, S.M Terrah SM, O.Mosbah, A.Dilem, N.Hamamousse, A.Sahila, O.Harrouz, N.Zekri; A.Kaiss, J-P. Clerc, O.Rahli, F. Giroud, C.Picard, (2018), "Ignition/non ignition phase transition", In Advances in Forest Fire Research 2018, ed D.X Viegas (ADAI/CEIF Coimbra), pp 506-513.

6- S.M Terrah SM, F.Z Sabi, O.Mosbah, A.Dilem, N.Hamamousse, A.Sahila, O.Harrouz, N.Zekri; A.Kaiss, J-P. Clerc, O.Rahli, F. Giroud, C.Picard, (2018), "Is there a critical fuel moisture content for flammability?", In Advances in Forest Fire Research 2018, ed D.X Viegas (ADAI/CEIF Coimbra), pp 522-528

II- Présentations

1- O.Mosbah, S.M Terrah , F.Z Sabi, A.Dilem, N.Hamamousse, A.Sahila, O.Harrouz, N.Zekri, A.Kaiss, J-P. Clerc, O.Rahli, F. Giroud, C.Picard "Effet de la charge sur l'inflammabilité des végétaux (matériaux poreux). Application : Pin d'Alep". International Conference on Renewable Energy and Energy Conversion. 11-13 Nov 2019, USTO, Algeria

2- N.Hamamousse, N.Zekri, A.Kaiss, A.Sahila, O.Mosbah, H.Boutchiche, F.Chaib, Y.Hammane, S.M Terrah, F.Z Sabi, J-P. Clerc, A.Chikhaoui, O.Rahli, M.Ghamnia, F. Giroud "Fuel drying methods comparison and their effect on ignition and combustion properties of *Pinus helepensis*". 6th International Fire Behavior and Fuels Conference. April 29th - May 3th,2019, Marseille-France.

3- F.Z. Sabi, S.M. Terrah , O.Mosbah, A.Dilem, N.Hamamousse, A.Sahila, O.Harrouz, N.Zekri, A.Kaiss, J-P. Clerc, O.Rahli, F. Giroud, C.Picard, “Ignition/Non ignition Phase Transition” . International Conference on Forest Fire ResearchVIII, 12 -15 Nov, 2018 Coimbra, Portugal.

4- S.M. Terrah , F.Z. Sabi, O.Mosbah, A.Dilem, N.Hamamousse, A.Sahila, O.Harrouz, N.Zekri, A.Kaiss, J-P. Clerc, O.Rahli, F. Giroud, C.Picard, “On the existence of critical and characteristic fuel moisture content for flamability”. International Conference on Forest Fire ResearchVIII, 12 -15 Nov, 2018 Coimbra, Portugal.

5- F.Z. Sabi, S.M Terrah, Zekri “Transfert de Chaleur et flux critique d’inflammation”. Workshop LAAR’17 sur la physique du rayonnement et ses applications, 13-14 Nov 2017 Oran, Algeria.

6- N.Zekri, F.Z.Sabi, M.Terrah, L.Belhadji, A.Dilem, N.Hamamousse, A.Bendjaballah, A.Kaiss, J-P. Clerc, “Simulation des feux de forêt en Algérie; effet de l'humidité et des COVs”. Journée de sensibilisation sur la biodiversité 22 mai 2017, USTO Algérie