

# THÈSE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

**Centre de Recherche** : Centre de Recherche en Énergie

**Structure de Recherche** : Équipe de Modélisation et Simulation en Mécanique  
et Energétique

**Discipline** : Physique

**Spécialité** : Mécanique et Energétique

Présentée et soutenue le 16/07/2021 par :

**Amal MOURABIT**

## ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DU BOIS SOUS L'ACTION DU FEU

### JURY

<b>Bennasser BAHRAR</b>	PES, Université Hassan II, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique-Mohammedia	Président
<b>Kamal GEURAOUI</b>	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Rapporteur/ Examineur
<b>Ahmed MZERD</b>	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Rapporteur/ Examineur
<b>Mohamed DRIOUICH</b>	PH, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté Polydisciplinaire - Béni Mellal	Rapporteur/ Examineur
<b>Mohammed TAIBI</b>	PH, Université Hassan II, Faculté des Sciences Ain Chok-Casablanca	Examineur
<b>Ilham ABERDANE</b>	PA, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Invitée
<b>Mohammed CHERRAJ</b>	PH, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Directeur de Thèse

Année Universitaire : 2020/2021

## **Remerciements**

---

Ce travail a été réalisé au sein de l'Equipe de Modélisation et Simulation en Mécanique et Energétique (MSME) au Département de Physique de la Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V.

Mes premiers mots de reconnaissance vont vers le **Directeur de thèse Mr. Mohammed CHERRAJ**, Professeur de l'enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat et responsable de l'équipe de Modélisation et Simulation en Mécanique et Energétique (MSME) qui m'a accueilli dans cette équipe, et a bien voulu se consacrer à mon encadrement tout au long de mon parcours. Le temps de recherche me restera sûrement inoubliable avec des savoir-faire que j'avais pu apprendre au niveau professionnel ainsi qu'au niveau humain.

Je remercie vivement **Mr. Kamal GUERAOUI**, Professeur de l'enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, en qualité de **rapporteur et examinateur pour tout l'intérêt** qu'il a accordé à mon travail.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait **Mr. Bennasser BARRAR**, Professeur de l'enseignement supérieur à l'ENSET de Mohammedia, qui a accepté la **présidence** du jury, malgré ses multiples occupations et engagements.

Aussi, mes remerciements s'adressent à vivement **Mr. Ahmed MZERD**, Professeur de l'enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, en qualité de **rapporteur et examinateur**, pour avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je suis également très reconnaissante envers **Mr. Mohamed DRIOUICH**, Professeur d'Habilité à la Faculté poly disciplinaire, Béni Mellal, Université Sultan Moulay Slimane, en qualité de **rapporteur et examinateur**, pour avoir accepté de faire partie de ce jury.

Ma reconnaissance va également à l'endroit de **Mr. Mohammed TAIBI**, Professeur d'Habilité à la Faculté des Sciences de Aïn-Chock à Casablanca, en qualité d'**examineur**, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et d'avoir consacré une partie de son temps à l'analyse de mon projet.

Je remercie vivement **Mme. Ilham ABERDANE**, Professeur assistante à la Faculté des Sciences de Rabat, qui a bien voulu être associée à ce travail, en qualité d'**Invitée**.

Je tiens également à remercier toute l'équipe MSME : Samir MEN-LA-YAKHAF et AZEDDIN ECHCHIKHI pour le temps qu'ils ont consacré à m'aider pour la prise en main des moyens expérimentaux et à répondre à mes questions.

Je souhaite également remercier tous mes collègues de travail pour leurs discussions enrichissantes et leurs soutiens au cours de ces années.

J'adresse aussi mes remerciements à toute ma grande famille surtout ma mère qui m'a soutenue et encouragée tout au long de mes études. Finalement, toute ma profonde gratitude va à ma petite famille, mes petites filles jumelles Israa, Maissaa et mon fils Ahmed Reda, qui sont ma source de motivation et me comblent de bonheur.

## **Résumé**

---

L'étude de la Sécurité Incendie est une approche globale qui permet d'estimer le niveau de sécurité des ouvrages pour différents scénarios. L'évaluation de ces derniers dépend de la qualité des modèles intégrés pour décrire le comportement humain, l'évolution de l'incendie, des champs thermiques et de la réponse mécanique de l'ouvrage. Sur ce dernier point, la prise en compte du comportement des liaisons de même que de leur évolution en fonction des champs thermiques est un facteur important. Parmi les matériaux de construction, le bois est celui pour lequel les investigations sur ce sujet sont les moins nombreuses.

Le modèle thermomécanique ainsi défini intègre les champs de températures dans un modèle mécanique non-linéaire à travers des coefficients de réduction des propriétés des matériaux en fonction de la température. Le bois est considéré orthotrope transverse. La validation du modèle est réalisée à l'aide d'essais. Elle est faite en trois étapes. La première est la validation du modèle mécanique à froid. La deuxième étape est la comparaison et la validation des températures simulées avec celles mesurées lors d'essais de résistance au feu. Enfin, la dernière étape réside en la confrontation des durées de résistance au feu simulées et expérimentales.

Dans le cadre de cette étude, nous avons pris le cas du bois existant au Maroc, pour identifier le type ayant une bonne résistance thermomécanique.

**Mots clés : Modélisation, non-linéaire, assemblage, structure bois, incendie, champs de Températures, résistance thermomécanique.**

## ***Abstract***

---

The fire safety study is a global approach which makes it possible to estimate the level of safety of building structure types for different scenarios. The evaluation of the latter depends on the quality of the integrated models to describe the human behavior, the evolution of the fire, the thermal fields and the mechanical response of the structure. On this last point, taking into account the behavior of the connections as well as their evolution according to the thermal fields is an important factor. Among construction materials, wood is the one for which investigations on this subject are the least numerous.

The thermomechanical model thus defined integrates the temperature fields in a non-linear mechanical model through reduction coefficients of the properties of materials as a function of temperature. The wood is considered transverse orthotropic. The validation of the model is carried out using tests. It is done in three steps. The first is the validation of the cold mechanical model. The second step is the comparison and validation of the simulated temperatures with those measured during fire resistance tests.

Finally, the last step consists in comparing the durations of simulated and experimental fire resistance. As part of this study, we took the case of existing wood in Morocco, to identify the type with good thermomechanical resistance.

***Key words:* Modeling, simulated, assembly, wood structure, fire, temperature fields, thermomechanical resistance.**

## ***LISTE DES PUBLICATIONS***

---

- 1) **A. Mourabit, K. Gueraoui, M. Cherraj, A. Echchikhi, S. Men-La-Yakhaf and M. Taibi;** experimental and theoretical analyses of the thermal behavior of wood used in morocco as construction item, **JP Journal of Heat and Mass Transfer,2021.**
- 2) **A. Mourabit, K. Gueraoui, M. Cherraj, S. Men-La-Yakhaf and M. Taibi ;**the thermal behavior of wood under fire exposure modeling, **JP Journal of Heat and Mass Transfer,2021.**

## ***LISTE DES COMMUNICATIONS***

---

- 1) Des Journées des Doctoriales organisées par la Faculté des Sciences de Rabat.
- 2) Conférence du Professeur Sébatien BALIBAR, intitulée : « Après la COP21, comment amplifier la lutte contre le changement climatique ».
- 3) Formation scientifique sur le Rôle des Secteurs militaires face aux Catastrophes Naturelles.

# ***TABLE DES MATIÈRES***

---

Liste des publications .....	5
Liste des communications .....	6
Liste des symboles utilisés.....	10
Liste des Tableaux .....	11
Liste des Figures .....	12
Introduction générale.....	14
Chapitre I : Généralités .....	16
Introduction.....	16
1. Généralités sur le feu .....	16
1.1 Introduction.....	16
1.2 Notions de combustion .....	17
1.2.1 Le feu .....	17
1.2.2 Energie d'activation.....	18
1.2.3 Combustion .....	19
1.3 Facteurs affectant la vitesse de combustion.....	20
1.3.1 Etat de division de la matière.....	20
1.3.2 Disposition de la matière.....	20
1.3.3 Autres facteurs .....	20
1.4 Les causes et les étapes des incendies.....	20
1.4.1 Les causes des incendies .....	20
1.4.2 Les causes thermiques.....	20
1.4.3 Les causes mécaniques.....	21
1.4.4 Les causes électriques .....	21
1.4.5 Les causes physiques.....	22
1.4.6 Les causes chimiques.....	23
1.4.7 Les causes biologiques .....	23
1.4.8 Dégâts résultants d'un incendie .....	25
1.4.9 Phénomènes thermiques et progressions rapides du feu .....	27
2. Généralités sur le comportement au feu .....	29
2.1 Réaction au feu.....	30
2.1.1 Définition .....	30
2.1.2 Classification.....	30

2.1.3	Classement Euroclasse (Européen) .....	32
2.2	Résistance au feu.....	34
2.2.1	Définition .....	34
2.2.2	Classification.....	35
3.	Généralités sur le bois et les produits dérivés .....	38
3.1	Le matériau bois .....	38
3.1.1	Les produits dérivés du bois .....	40
3.1.2	L'eau et le bois.....	42
4.	Le comportement du bois exposé au feu.....	44
4.1	Dégradation du bois sous l'influence de la chaleur, la pyrolyse .....	44
	Conclusion .....	47
	Chapitre II : Modélisation numérique et mathématique du comportement thermique et rhéologique du bios sous l'effet du feu .....	48
	Introduction.....	48
1.	Modélisation de la dégradation thermique du bois.....	48
1.1	Dégradation thermique du bois .....	48
1.2	Vitesse de carbonisation .....	51
1.3	Evolution des propriétés du bois modèles de transfert de chaleur.....	52
1.3.1	Densité.....	53
1.3.2	Chaleur spécifique .....	54
2.	Modèles de transfert de chaleur .....	55
3.	Équation de diffusion de la chaleur.....	56
4.	Modélisation du comportement thermomécanique .....	57
5.	Conditions initiales et conditions aux limites.....	59
6.	Méthode de résolution.....	60
6.1	Maillage .....	61
6.2	Discrétisation des équations du problème .....	62
6.2.1	Conservation d'énergie .....	62
6.2.2	Conservation de la masse.....	63
7.	Résultats et interprétations.....	68
	Conclusion .....	75
	Chapitre III : Etude expérimentale du comportement du bois sous l'effet du feu .....	76
	Introduction.....	76
1.	Principes de l'EXAO .....	77

1.1	Les éléments de l'EXAO .....	78
1.1.1	Capteurs .....	79
1.1.2	Interface .....	80
1.1.3	Ordinateur .....	82
1.1.4	Le logiciel d'acquisition Microlab-EXAO .....	82
1.2	Présentation de l'essai .....	85
1.3	Description de l'étude expérimentale.....	85
2.	Résultats et discussion .....	87
	Conclusion .....	92
	Conclusion générale .....	93
	Bibliographies.....	95

## ***LISTE DES SYMBOLES UTILISÉS***

---

$T$	Température [K] ;
$C_c$	Chaleur spécifique du charbon [J/(kg.K)] ;
$K_c$	Constant de la cinétique de la dégradation thermique du charbon [1/s] ;
$\rho_b$	Masse volumique du bois [kg/m <sup>3</sup> ] ;
$K_g$	Constant de la Cinétique de la dégradation thermique du gaz [1/s] ;
$\rho_l$	Masse volumique du liquide [kg/m <sup>3</sup> ] ;
$K_l$	Constant de la Cinétique de la dégradation thermique du liquide [1/s] ;
$\lambda$	Conductivité thermique [W/ (m.K)] ;
$\rho_v$	Masse volumique du vapeur [kg/m <sup>3</sup> ] ;
$K_v$	Constant de la cinétique de la dégradation thermique de la vapeur [1/s] ;
$\Delta h_c^0$	Énergies de réaction standard du bois [J/kg] ;
$\Delta h_g^0$	Énergies de réaction standard du gaz [J/kg] ;
$\Delta h_l^0$	Énergies de réaction standard du liquide [J/kg] ;
$C_g$	Chaleur spécifique du gaz [J/ (kg. K)] ;
$C_b$	Chaleur spécifique du bois [J/ (kg. K)] ;
$Q_r$	Débit volumique (W.m <sup>-3</sup> ) ;
$\rho_c$	Masse volumique du charbon [kg/m <sup>3</sup> ].

## ***LISTE DES TABLEAUX***

---

<b>Tableau 1:</b> Classement en matière de réaction au feu.....	31
<b>Tableau 2:</b> Classement M Français et les Euroclasses .....	33
<b>Tableau 3:</b> Tableau de synthèse.....	36
<b>Tableau 4:</b> Résistance au feu des planchers, poutres et poteaux en bois.....	37
<b>Tableau 5:</b> Paramètres du modèle de pyrolyse de Shen [22].....	68
<b>Tableau 6:</b> Type d'échantillon étudiés.....	87

## ***LISTE DES FIGURES***

---

Figure 1: Triangle du feu.....	18
Figure 2: Début de l'incendie. ....	24
Figure 3:Le développement des incendies.....	25
Figure 4: Etapes de développement d'un incendie.....	26
Figure 5: Croissance.....	27
Figure 6: Phases de développement d'un incendie [4].....	29
Figure 7: Structure du matériau bois : a) Matériau bois et directions principales de la structure, b) assemblage de fibres, c) structure multi-couches de la paroi cellulaire [7].....	39
Figure 8: Structure macroscopique du bois [8]. ....	40
Figure 9:Procédé de fabrication de panneaux de particules (www.sanopan.com).....	42
Figure 10: Principe de stockage de l'eau dans les cellules du bois[11].....	43
Figure 11: Zones de dégradation en fonction de la température.....	45
Figure 12: Zones de dégradation dans une coupe de bois pour des températures élevées .....	46
Figure 13: Front de pyrolyse dans le bois.....	50
Figure 14: Zones de dégradation dans une coupe de bois pour des températures élevées. ....	50
Figure 15: Profondeurs de carbonisation unidimensionnelle et fictive.....	52
Figure 16: Evolution de la conductivité d'un résineux (humidité initiale à 12%) en fonction de la température .....	53
Figure 17: Evolution de la densité en fonction de la température. ....	54
Figure 18: Evolution de la chaleur spécifique du bois en fonction de la température. ....	54
Figure 19: Modèle de pyrolyse pour un bois humide [22].....	55
Figure 20: Conditions aux limites d'un problème thermique. ....	59
Figure 21: Maillage .....	61
Figure 22: Organigramme.....	67
Figure 23: Profile de température en fonction de l'axe y et du temps.....	68
Figure 24: Profile de température en fonction de l'axe x et du temps.....	69
Figure 25: Profile de température en fonction de l'axe z et du temps.....	69
Figure 26: Profile de température en fonction du temps.....	70
Figure 27: Profile de masse volumique de liquide en fonction du temps.....	71
Figure 28: Profile de masse volumique du bois en fonction du temps.....	71
Figure 29: Profile de masse volumique du gaz en fonction du temps.....	72
Figure 30: Profile de masse volumique de vapeur en fonction du temps.....	73
Figure 31: Profile de l'élasticité longitudinale du bois en fonction de la température.....	73
Figure 32: Profile de l'élasticité radiale du bois en fonction de la température.....	74
Figure 33: Profile de l'élasticité tangentielle du bois en fonction de la température.....	74
Figure 34: Montage de base pour l'EXAO avec connexion entre les composantes [1]. ....	77
Figure 35: Principe et composants du système [5]. ....	78
Figure 36: Schéma de fonctionnement des capteurs.....	79
Figure 37: Interface de l'EXAO.....	81
Figure 38: Circuit de l'interface EXAO. ....	82
Figure 39: Logiciel Microlab-EXAO. ....	83
Figure 40: Exemple de création d'un capteur virtuel.....	84

Figure 41: Logiciel Microlab-EXAO en mode graphique.....	84
Figure 42: Source de chaleur (fer à souder). .....	85
Figure 43: Montage des essais expérimentaux.....	86
Figure 44 : thermistance. ....	86
Figure 45:Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Cèdre. ....	88
Figure 46:Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois: Frêne.....	88
Figure 47: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Sapin rouge.....	89
Figure 48: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Chêne.....	89
Figure 49: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Hêtre.....	89
Figure 50: Comparaison de l'évolution du profil de la température en fonction du temps suivant les directions x, y et z pour cinq échantillons.....	90
Figure 51: Comparaison des profils de la température issus de l'étude numérique et expérimentale en fonction du temps dans les trois directions x, y et z pour le bois : Hêtre. ....	91

## ***INTRODUCTION GENERALE***

---

Dans notre société moderne, l'incendie reste un risque permanent qui doit être pris en compte lors de la construction ou la réhabilitation des bâtiments. Ainsi, depuis de nombreuses années, des règlements de conception des structures soit en béton, acier, bois ou mixte sont proposés aux concepteurs afin de limiter autant que possible ce risque.

La manière la plus efficace de lutte contre les effets d'un incendie et d'éviter son déclenchement ainsi que sa propagation c'est l'application et le respect des normes et des mesures de sécurité incendie selon la réglementation Marocaine en matières de sécurité incendie qui a pour but d'assurer la protection des personnes et, dans une certaine mesure, des biens.

Pour avoir une construction qui respecte les normes et les mesures de sécurité incendie selon la réglementation, il est nécessaire de connaître le comportement au feu de tous les matériaux et les éléments de construction. Puisque le bois offre de nombreuses possibilités de réalisations et d'expressions architecturales comparé aux matériaux conventionnels tels que le (béton et l'acier utilisés dans la construction). De plus, il est en phase avec l'évolution des exigences en matière d'environnement et d'économie d'énergie, ce qui justifié le recours à son utilisation dans les constructions. Aussi en cas d'incendie, une structure bois est également préférable : la combustion du bois dégage peu de fumées toxiques, et la vitesse de combustion relativement faible réduit le risque de ruine du bâtiment avant la fin de son évacuation. L'utilisation croissante du matériau bois dans le domaine de la construction nécessite cependant un haut niveau de connaissance et de maîtrise du comportement au feu des structures en bois. Il est ainsi important de s'intéresser à la caractérisation des propriétés intrinsèques mécaniques et physico-thermiques du matériau bois pour garantir la fiabilité et la stabilité des structures en bois.

Dans la littérature, il y a de nombreuses études analytiques, numériques et expérimentales sur le comportement thermique du bois. D.K. Shen 2007[22] a modélisé la pyrolyse du bois humide sous flux de chaleur externe. Une étude de Menis 2012 sur la résistance au feu des éléments en bois de placage stratifié (LVL) et en bois lamellé-croisé

(XLAM). D'autres études sont réalisées par A.Tribot (2019)[19], B. D. Krezovic (2017) [20], S. Schnabl (2011)[26] et V.D. Thi (2016) [24], qui portent sur l'analyse numérique par éléments finis de la pyrolyse du bois humide soumis au feu.

La thèse est organisée en trois chapitres, en plus d'une introduction et une conclusion générale. Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique, pour rappelons les notions sur le feu et les critères du comportement au feu (réaction et résistance) et présentons les différents types de classification ainsi la dégradation du bois sous l'influence de la chaleur (feu). Aussi un historique de sa mise en œuvre est présenté. Au même titre qu'une explication des différentes étapes de la dégradation du bois à savoir la pyrolyse, et les principaux paramètres qui peuvent influencer le phénomène de la combustion.

Le deuxième chapitre est divisé en trois grandes parties. Dans la première partie, on présente le modèle mathématique gouvernant le comportement thermique du bois sous action du feu (pyrolyse) le plus adapté au matériau utilisé. Pour cela, il y a besoin de maîtriser d'une part le comportement mécanique linéaire élastique orthotrope et non-linéaire et d'autre part l'évolution de ses propriétés thermo-physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité) en fonction de la température et en particulier les phénomènes de la dégradation thermique qui sont très complexes. Dans la seconde partie, nous avons établi les équations algébriques des équations obtenues qui sont résolues par la méthode des volumes finis et la méthode de Rang-Kutta d'ordre 2. Le chapitre se termine par la description d'un résultat avec leur interprétation de courbes réalisées.

Le troisième chapitre présente dans un premier temps ce matériau, qui est utilisé dans le domaine de la construction au Maroc, ses produits dérivés ainsi que son comportement thermique. Dans un second temps, nous allons faire le point sur la modélisation numérique déjà réalisée sur la simulation du comportement de matériaux cellulosiques à haute température. La concordance entre les résultats expérimentaux et numériques montre une approche relative entre les conditions de l'expérience et les hypothèses de simulation.

A la fin une conclusion générale est présentée, où seront rappelés les objectifs fixés et les résultats obtenus.

# ***CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS***

---

## **Introduction**

Le bois est un matériau composite naturel complexe. La compréhension de ses caractéristiques reste relativement incomplète. Sa forte anisotropie en fait un matériau difficile à appréhender dont les propriétés générales sont fortement dépendantes de sa structure interne. De plus, son caractère combustible rend son étude difficile à haute température.

Ce chapitre présente un état non exhaustif, mais suffisamment fourni, des connaissances bibliographiques actuelles sur le bois et plus particulièrement sur son comportement lors d'une agression thermique. Nous allons dans un premier temps présenter des généralités sur le feu et le comportement au feu. Dans un second temps, nous allons analyser le matériau et les produits dérivés du bois dans leurs généralités ainsi que leur comportement sous l'influence de la chaleur.

## **1. Généralités sur le feu**

### **1.1 Introduction**

Un incendie est un feu violent et destructeur pour les activités humaines ou la nature. L'incendie est une réaction de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace, il peut se déclarer lorsque trois éléments au moins sont présents, à savoir l'oxygène, une source d'inflammation et un matériau combustible. L'oxygène est toujours présent. La source d'inflammation est souvent à l'origine de l'incendie. Souvent causée par l'homme, consciemment ou par accident. Le troisième facteur, le matériau combustible, est le seul qui soit contrôlable. En effet, sans matériau combustible, il ne peut y avoir d'incendie. Afin de limiter les risques d'incendie, il faut qu'un bâtiment soit construit ou aménagé avec le moins possible de produits combustibles.

Un incendie peut se développer si des produits combustibles sont présents. Il est donc primordial de savoir quel est le comportement au feu de tous les matériaux utilisés.

La contribution au feu d'un matériau est en grande partie déterminée par la vitesse de propagation de l'incendie et la durée de combustion du matériau.

## 1.2 Notions de combustion

### 1.2.1 Le feu

#### 1.2.1.1 Définition

Le feu est la manifestation visible de la combinaison d'un corps combustible avec un corps comburant, en présence d'une énergie d'activation.

Cette combinaison s'appelle une combustion.

La combustion est une réaction exothermique (dégageant de la chaleur) entre l'oxygène de certaines substances (solides, liquides ou gazeuses) dites combustibles et l'air étant le comburant.

#### 1.2.1.2 Terminologie feu et incendie

Un feu est une combustion. On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de combustion contrôlée. Dans le domaine de l'incendie il devient une combustion incontrôlée. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un incendie [1].

#### 1.2.1.3 Triangle du feu

Pour qu'un feu (une combustion) prenne naissance, trois conditions doivent être réunies simultanément :

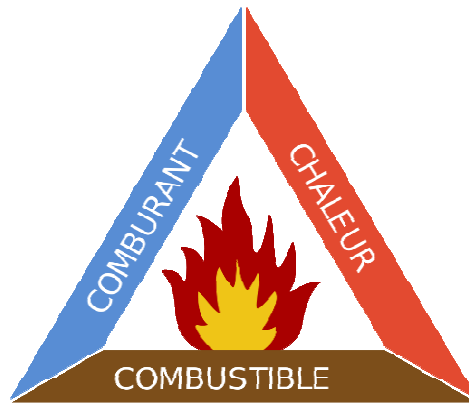
✓ Présence d'un combustible : matière inflammable solide : (bois, charbon, papier...),

Liquide : (essence, alcools...) ; gazeux : (butane, propane...).

✓ Présence d'un comburant : corps, qui se combinant avec le combustible, permet la combustion (oxygène, air, peroxyde...).

✓ Source d'inflammation : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (Flamme, étincelle, décharge, électrique... etc.).

Traditionnellement, le phénomène du feu est schématiquement représenté par le triangle du feu [2], dans ses trois côtés figurent respectivement le combustible, le comburant et l'énergie d'activation.



**Figure 1: Triangle du feu**

Ces trois éléments sont simultanément nécessaires à la création et au maintien du phénomène. La soustraction de l'un d'eux et d'un seul entraîne l'extinction. C'est ce que l'on constate en supprimant soit le combustible, soit le comburant, soit l'énergie (par refroidissement par exemple).

### 1.2.2 Energie d'activation

L'énergie d'activation est l'énergie nécessaire pour déclencher la combustion. Elle peut être :

- Thermique : Feux nus... ;
- Chimique : Action de l'oxygène sur certains éléments ;
- Biologique: Bactéries (fermentation) ;
- Mécanique : Frottement ;
- Electrique : Electricité ;
- Dynamique : Isolement, mauvais contacts, électricité statique : frottement.

## 1.2.3 Combustion

### 1.2.3.1 Combustion des gaz

Lors d'un incendie, il n'y a que les gaz qui brûlent, que ce soient des gaz de distillation provenant de corps chauffés à l'état solide ou des vapeurs de liquides inflammables.

Le mélange «gaz combustibles » avec l'oxygène de l'air est inflammable à deux conditions :

- L'énergie d'activation soit suffisamment élevée ;
- La concentration du mélange soit comprise entre certaines limites.

### 1.2.3.2 Combustion des liquides

Sauf cas rares, ce sont les vapeurs inflammables dégagées par les liquides qui brûlent.

### 1.2.3.3 Combustion des solides

On distingue deux types de combustion des solides, caractérisé par leur vitesse de réaction :

- ✓La combustion vive et la combustion lente ;
- ✓La combustion spontanée.

#### 1.2.3.3.1 Combustion vive et combustion lente

La combustion vive est une réaction qui entraîne un dégagement important de calories avec une forte élévation de température et une émission de flammes.

La combustion lente est une réaction qui entraîne un faible dégagement de calories avec peu d'élévation de température et une absence de flammes.

#### 1.2.3.3.2 Combustion spontanée

La combustion spontanée a lieu sans cause apparente d'échauffement. Elle concerne de chiffons gras, les stockages de charbon etc.

## **1.3 Facteurs affectant la vitesse de combustion**

### **1.3.1 Etat de division de la matière**

Pour une même masse, la vitesse de combustion est en fonction du rapport surface/volume du combustible (un tas de copeaux brûle plus vite qu'une bûche).

### **1.3.2 Disposition de la matière**

La vitesse de propagation dépend :

- Des facteurs géométriques (épaisseur, surface, forme, etc..) ;
- Des dispositions dans l'espace (position horizontale, verticale).

### **1.3.3 Autres facteurs**

- Température ;
- Humidité de l'air ;
- Teneur en oxygène.

## **1.4 Les causes et les étapes des incendies**

### **1.4.1 Les causes des incendies**

Le feu prend naissance dans de très nombreuses conditions et pour des causes que l'on peut répartir comme suit : causes thermiques, mécaniques, électriques, physiques, chimiques et biologiques.

### **1.4.2 Les causes thermiques**

Le classement sur une base scientifique des nombreuses causes possibles d'incendie ne doit pas nous faire oublier qu'en fait la plupart des sinistres ont pour origine le contact de

matières combustibles avec une flamme ou une source de chaleur extérieure en présence d'oxygène.

Les conditions d'inflammabilité et de combustion mettent alors en jeu un certain nombre de principes physiques et chimiques qui sont, au surplus, valables pour tous les incendies, quelle qu'en soit la cause. Par exemple, un chalumeau oxyhydrique ou une lampe à souder, approché d'un panneau de bois ordinaire, ne s'enflammera au bout de quelques instants que si la flamme est parallèle à la surface du bois; cette source de chaleur, bien que d'une température élevée, ne dégage pas assez de calories efficaces pour enflammer le matériau, s'il est présenté perpendiculairement à la flamme.

D'autre part, tout corps peut brûler s'il est soumis à certaines conditions (division, forte température, contact d'un autre corps qui présente pour lui une affinité).

### 1.4.3 Les causes mécaniques

L'énergie mécanique peut se transformer en chaleur (loi de joule). C'est ainsi que le frottement de deux corps fournit de la chaleur susceptible d'enflammer les corps combustibles.

Les anciens tiraient déjà « le feu sacré » du bois en le frottant avec un corps dur et le silex a été longtemps la source unique du feu domestique.

Ce phénomène présente des dangers dans l'industrie en raison de l'importance de l'énergie mécanique déployée; aussi répand-on sur les axes et les supports de l'huile minérale qui donne un film d'une épaisseur égale à celle d'une molécule, film qui crée une surface entre les parties métalliques, s'opposant aux frottements et par conséquent à l'échauffement.

### 1.4.4 Les causes électriques

#### 1.4.4.1 Electricité dynamique

Si nous faisons passer un courant électrique dans un fil métallique, celui-ci s'échauffe et, suivant sa nature, donne de la lumière. Quand deux fils métalliques sont parcourus par un

courant électrique et qu'ils sont mis en contact, une étincelle jaillit qui peut mettre le feu aux corps combustibles placés à proximité. Il en est de même si un objet métallique quelconque touche un conducteur sous tension. On conçoit aisément que les installations électriques non conformes aux règles de l'art soient des causes d'incendie, d'autant que l'électricité sous sa forme dynamique est utilisée à peu près partout.

#### 1.4.4.2 Electricité statique

Cette forme d'énergie, qui est moins connue, repose pourtant sur certaines parties des masses qui portent habituellement très peu d'attention jusqu'au moment où elle provoque un accident. Or il a été démontré que tous les corps peuvent se charger d'électricité positive ou négative, cette charge peut provenir :

- D'un déplacement rapide (pour un solide) ;
- De la friction de deux corps (une courroie sur sa poulie produit l'effet « corona » dont l'importance est loin d'être négligeable) ;
- Du frottement, dans l'air ou sur une paroi, d'un liquide ou d'un solide finement pulvérisé. C'est le cas, par exemple, des hydrocarbures transportés dans des citernes métalliques et c'est pour amener cette électricité statique à la terre qu'une chaîne métallique est suspendue à l'arrière du camion et touche le sol.

#### 1.4.5 Les causes physiques

La plupart des phénomènes physiques susceptibles de produire de la chaleur et par la suite provoquer un incendie sont des transformations d'énergie sous une forme quelconque en énergie calorifique. Pratiquement, dans la plupart des cas nous n'avons rencontré que des causes mécaniques.

On peut cependant y ajouter des phénomènes d'optique, la chaleur solaire d'un foyer pouvant donner lieu à une concentration des rayons calorifiques par le jeu d'une lentille ou d'un miroir. C'est ainsi, qu'un vase formant loupe est à l'origine de nombreux feux de mansarde, qu'une concentration des rayons solaires par une lentille peut enflammer une feuille de papier.

Employant ce procédé en l'an 215 av JC, Archimède tint en échec pendant deux ans, devant Syracuse, qu'elle assiégeait, l'armée de Marcellus. Au moyen de « miroirs ardents », il enflammait, dit-on, les vaisseaux des romains.

Les techniciens des armes modernes ont perfectionné le procédé et c'est dans la désintégration de la matière que les bombes atomiques trouvent la chaleur rayonnante qui se chiffre par millions de degrés centigrades dont les effets terribles ont été éprouvés à Hiroshima et Nagasaki.

#### **1.4.6 Les causes chimiques**

La manipulation de certains corps, en laboratoire ou dans l'industrie, doit s'effectuer avec les plus grandes précautions en raison des réactions violentes qu'ils produisent, soit au contact de l'air ou de l'eau, soit par combinaison chimique, de nombreux corps étant incompatibles.

#### **1.4.7 Les causes biologiques**

Si le public admet facilement le danger des produits chimiques, qu'il manipule en général avec précaution, il comprend moins bien les raisons pour lesquelles des végétaux desséchés, placés dans certaines conditions, s'enflamment spontanément, en particulier s'ils conservent un peu d'humidité. Ce fait s'observe dans les tas de fumier, les déchets provenant des tanneries, le foin mis en tas imparfaitement séché. Il s'explique simplement par l'action des ferments, des bactéries.

Selon les experts, les incendies d'origine électrique sont plutôt dus aux développements d'échauffements ponctuels accidentels, en particulier au niveau des connexions, ces phénomènes se restent en effet quasiment indétectables.

Après les actes volontaires, on estime que le non-respect de l'interdiction de fumer et les incidents d'origine électrique constituent la majeure partie des risques de départ d'incendie.

#### 1.4.7.1 Les étapes de développement d'incendie



**Figure 2: Début de l'incendie.**

L'épaisse fumée noire est produite par la combustion du goudron.

Une partie des principaux dangers auxquels s'expose une personne proche d'un incendie sont liés à la chaleur élevée. Même en dehors des flammes, on s'expose au risque de brûlure due principalement aux fumées chaudes, mais aussi au rayonnement infrarouge, au contact avec des objets chauffés, à l'air chauffé, ou bien aux vapeurs d'eau produites par l'arrosage.

Les autres risques sont essentiellement respiratoires. En effet le feu consomme le dioxygène de l'air, indispensable à la survie et peut donc entraîner une asphyxie que l'on nomme risque anoxie. En outre le feu dégage des fines particules (communément appelées fumée) qui peuvent venir brûler l'intérieur des poumons, et souvent des gaz toxiques pouvant provoquer des empoisonnements monoxyde de carbone. À titre d'exemple, les matières plastiques contenues dans un volume génèrent 200 000 m<sup>3</sup> de fumée à un rythme de 20 à 30 mètres cubes par seconde.

### 1.4.8 Dégâts résultants d'un incendie

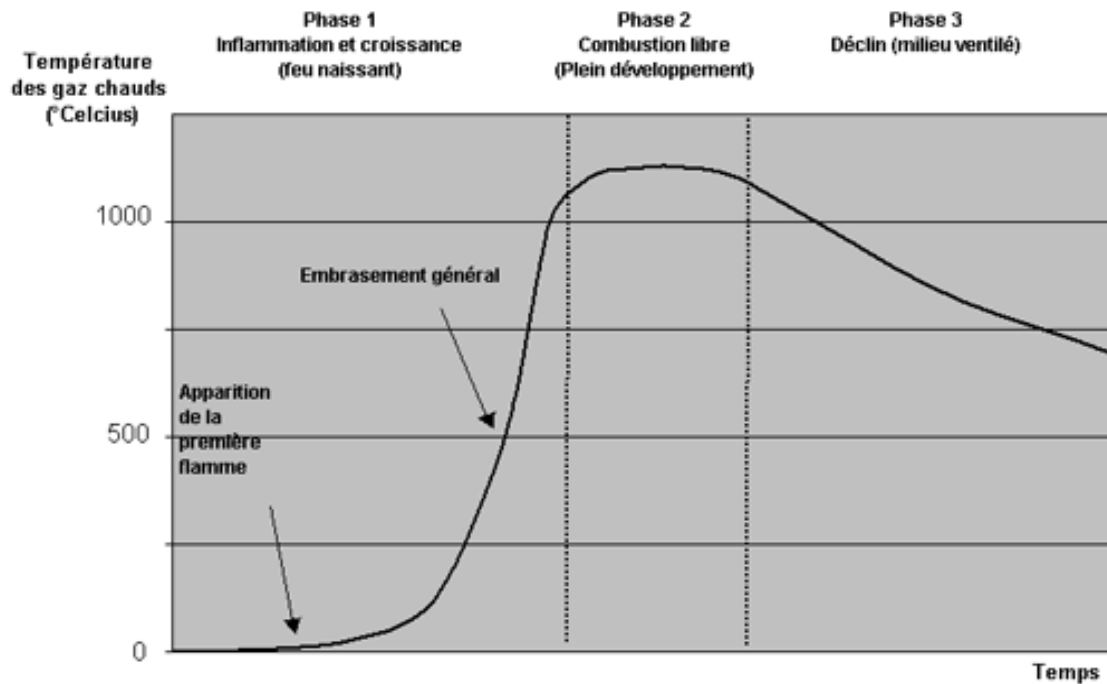
Lors d'un incendie, les dégâts ne sont pas uniquement causés par le feu lui-même. Tout d'abord, les suies dues à la combustion peuvent voyager bien plus loin que les limites du feu lui-même. Il n'est pas rare en effet que les suies d'incendie se propagent à d'autres pièces, voire à d'autres bâtiments. Ces suies sont extrêmement volatiles et pénètrent partout, y compris dans tous les appareils électroniques exposés ce qui peut, en cas de non traitement, mener à un nouvel incendie dans le futur.

#### 1.4.8.1 Développement d'un incendie



**Figure 3:Le développement des incendies.**

Un incendie se développe en plusieurs phases au cours desquelles sa température va s'élever. En fonction de son environnement, il va s'étendre et puis décliner.



**Figure 4: Etapes de développement d'un incendie.**

#### 1.4.8.2 Éclosion

La rencontre des éléments du triangle du feu, c'est-à-dire un combustible, un comburant (en général le dioxygène de l'air) et une énergie d'activation (chaleur, flamme nue, étincelle) suffisante vont permettre à la combustion de s'amorcer.

À ce stade, le dégagement de chaleur est modéré, les fumées peu abondantes (appelée parfois à tort aérosol, ce terme désignant en fait un mélange liquide/gaz alors que la fumée est un mélange solide/gaz).

### 1.4.8.3 Croissance



**Figure 5: Croissance**

La combustion produit de la chaleur (réaction exothermique), le feu entretient et accroît l'énergie d'activation. Si le combustible et le comburant sont disponibles en quantités suffisantes, l'incendie s'étend de manière exponentielle. On estime que pour éteindre un feu sec naissant, il faut :

- Un verre d'eau durant la première minute ;
- Un seau d'eau au cours de la deuxième minute ;
- Une citerne d'eau au bout de la troisième minute.

Dans le cas d'un feu dans un volume clos (par exemple un feu d'habitation), on estime que la température de l'air atteint 600 °C au bout de cinq minutes, dans une cage d'escalier, elle peut atteindre 1 200 °C dans le même temps.

### 1.4.9 Phénomènes thermiques et progressions rapides du feu

Dans certaines conditions, il peut se produire une progression rapide du feu (PRF) par des accidents thermiques. Le principal facteur favorisant l'apparition de ces phénomènes est le flux d'air alimentant le feu :

- Feu alimenté en air (ex : dans local semi ouvert) : **Embrassement généralisé éclair** ;
- Feu carencé en air (ex : dans un local clos) puis apport d'air en ouvrant subitement par exemple une porte : **Explosion de fumées**.

Cependant, les phénomènes sont plus complexes. Les Anglo-saxons distinguent deux types d'explosion de fumées, le backdraft et les modes d'explosion, et envisagent la possibilité d'une explosion avec un feu alimenté (High pressure backdraft).

Ces phénomènes peuvent se produire pour des volumes très réduits, comme par exemple un conteneur de poubelles métallique.

#### 1.4.9.1 Feu constitué

C'est le moment où le feu est au plus fort de lui-même. À ce moment-là, il ne peut plus croître et va suivre ensuite sa phase de déclin.

#### 1.4.9.2 Déclin

Le déclin se fait lorsque le feu cesse de croître. Le feu va progressivement baisser en intensité puis entrer en combustion lente jusqu'à ce qu'il manque de combustible et s'éteigne.

#### 1.4.9.3 Récapitulatif sur le développement d'un incendie

Un incendie comporte une phase de développement où la température s'élève, puis une phase de décroissance où cette température diminue [3].

Les caractéristiques d'un incendie réel sont montrées sur la figure (6) et comportent :

➤ **Une phase couvrante (démarrage)**

Feu couvant à très basse température avec une durée souvent difficile à estimer. Cette phase n'est pas montrée sur la figure (2).

➤ **Une phase de croissance appelée « pré-flashover » (développement rapide)**

La durée de cette phase dépend principalement des caractéristiques du compartiment.

Le feu reste localisé jusqu'à une généralisation probable du feu.

➤ **Une phase d'embrasement**

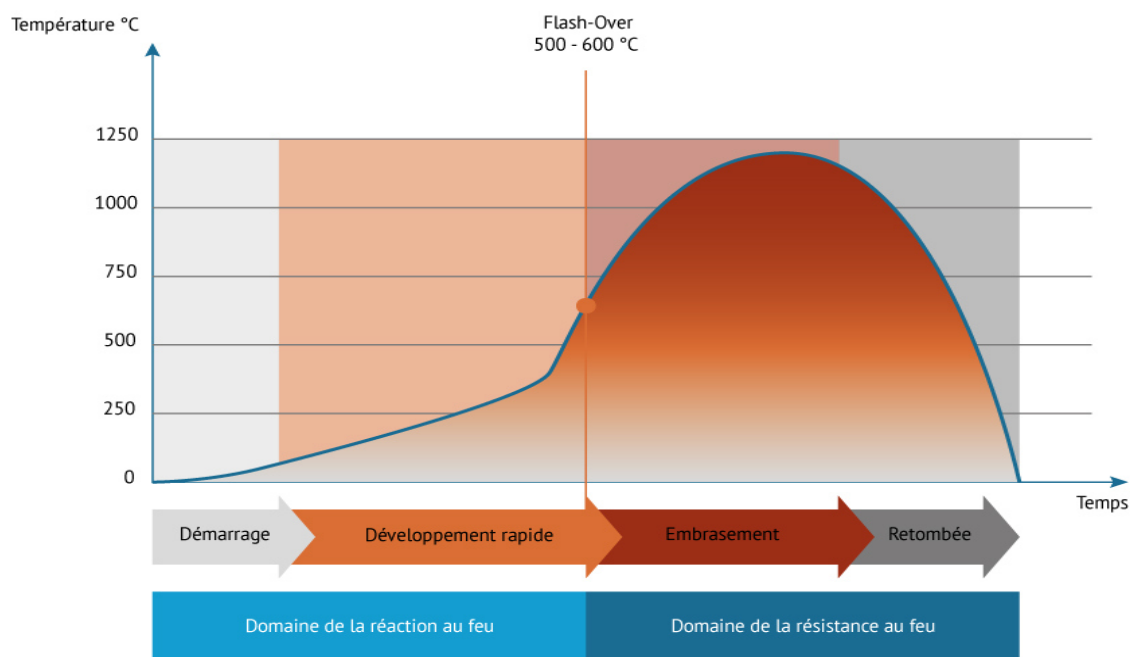
Il est composé en deux étapes :

Une étape de « **flashover** » (**feu généralisé**) : C'est un feu généralisé. Cette étape est généralement très courte.

Une étape de « **post flashover** » : Cette phase correspond à un feu généralisé dont la durée dépend de la charge calorifique et de la ventilation.

➤ **Une phase décroissante (Retombée)**

Le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles aient complètement brûlé.



**Les différentes phases du développement d'un incendie**

**Figure 6: Phases de développement d'un incendie [4].**

## 2. Généralités sur le comportement au feu

Le comportement au feu des matériaux et des éléments de construction en cas d'incendie est estimé en fonction des différents critères à la suite d'essais réalisés en laboratoires agréés. Donc avant de vous présenter l'ensemble des justifications de structures existantes, il est important de rappeler qu'il est possible de caractériser un matériau par deux propriétés bien distinctes autrement dit, deux critères qui sont la réaction au feu et la résistance au feu.

## 2.1 Réaction au feu

### 2.1.1 Définition

Cette notion n'intéresse que les matériaux de construction.

La réaction au feu d'un matériau exprime son aptitude à s'enflammer, à contribuer au démarrage et à la propagation d'un incendie. On détermine la réaction au feu des matériaux de construction (matières ou produits qui permettent de préparer les éléments gros et second œuvre d'une construction : pierre, brique, plâtre, acier, verre etc.) par des essais qui consistent à soumettre les produits à des sollicitations thermiques. On évalue ainsi leur comportement au feu par rapport à des critères de performance qui portent sur leur inflammabilité et combustibilité.

### 2.1.2 Classification

#### 2.1.2.1 Classement M (français)

Les résultats des divers essais évalués par des organismes agréés permettent de classer les matériaux en cinq catégories qui définissent la réaction au feu des matériaux : ils vont de  $M_0$  pour l'ininflammable à  $M_4$  pour désigner les matériaux les plus inflammables jusqu'à leurs propensions à la propagation du feu. Cette classification établie par le CSTB (centre scientifique et technique du bâtiment) abouti à un procès-verbal qui est établi pour une durée de cinq ans.

$M_0$  : Incombustible par exemple (pierre, béton, acier, verre, ardoises, tuiles, plâtre, céramique, etc.).

$M_1$  : Non inflammable ;

$M_2$  : Difficilement inflammable ;

$M_3$  : Moyennement inflammable ;

$M_4$  : Facilement inflammable.

### 2.1.2.2 Réaction au feu de quelques matériaux courants

Le tableau suivant présente quelques exemples pratiques de classement en matière de réaction au feu.

**Tableau 1: Classement en matière de réaction au feu.**

Classement	Comportement	Matériaux
M0	Incombustible	Acier, pierre, plâtre, béton, brique, ciment, armée, zinc, etc.
M1	Ininflammable	Bois ignifugé, plaques de plâtre cartonné, etc.
M2	Difficilement inflammable	Matériaux composites, laine, etc.
M3	Moyennement inflammable	Bois (suivant épaisseur), feutre, etc.
M4	Facilement inflammable	Bois, plastique, carton, papier, polypropylène.

On peut, dans certains cas, améliorer la réaction au feu d'un matériau, par ignifugation.

C'est un procédé qui, chimiquement, permet de diminuer l'inflammabilité d'un matériau ou de diminuer la vitesse de propagation de la flamme à sa surface. Mais l'ignifugation ne diminue pas la combustion.

Autrement dit, un matériau combustible classé de M1 à M4 ne pourra pas, par ignifugation, être classé M0.

De plus, le traitement par ignifugation augmente la teneur en produits halogènes des gaz de combustion, notamment en chlore ce qui en augmente la toxicité.

Un matériau est classé M0 s'il répond aux conditions suivantes :

- Pas d'inflammation effective à l'essai par rayonnement ou bien il répond aux conditions du classement M1 au brûleur électrique ;
- Son pouvoir calorifique supérieur (PCS) est inférieur ou égal à 2,5MJ/Kg (600 Kcal /Kg).

Ce système va disparaître petit à petit du fait de la mise en application du système de classification européenne appelé : **Euroclasse**.

### 2.1.3 Classement Euroclasse (Européen)

Norme de référence européenne, les Euroclasses intègrent un système de classement en sept catégories d'exigence : A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B, C, D, E, F.

Les classes A<sub>1</sub> à F remplacent M<sub>0</sub> à M<sub>4</sub> pour les produits qui ne requièrent pas d'essai pour une classification.

Les Euroclasses tiennent donc aussi compte de deux autres critères essentiels (après tests en laboratoire) :

- L'opacité des fumées (quantité et vitesse) notée S pour Smoke :
  - S<sub>1</sub> : Faible quantité/vitesse ;
  - S<sub>2</sub> : Moyenne quantité/ vitesse ;
  - S<sub>3</sub> : Haute quantité ;
- Les gouttelettes et débris enflammés noté d pour droplets :
  - D<sub>0</sub> : Aucun débris ;
  - D<sub>1</sub> : Aucun débris dont enflamment dure plus de 10 secondes ;
  - D<sub>2</sub> : Ni D<sub>0</sub> ni D<sub>1</sub>.

Pour les produits conformes à une norme produit européenne harmonisée, le classement de réaction au feu doit s'exprimer selon les Euroclasse.

Pour les autres produits (par exemple pour les plafonds, les isolants, les panneaux à base de bois, les revêtements du sol, les carreaux de plâtre etc.), le choix laissé aux industriels de faire évaluer par un laboratoire agréé soit le classement M, soit l'Euroclasses.

Certains produits sont classés conventionnellement A1 sans essais préalables :

- Verre ;
- Brique ;
- Plâtre armé de fibres de verre et plâtre ;
- Béton et mortier de ciment et chaux ;
- Vermiculite ;
- Amiante, ciment ;

- Pierre, ardoise ;
- Fer, fonte, acier, aluminium, cuivre, zinc, plomb ;
- Produits céramique.

**Tableau 2: Classement M Français et les Euroclasses.**

Euroclasses			Classement
A1	3	4	Incombustible
A2	S1	D0	M0
A2	S1	D1	M1
A2	S2	D0	
	S3	D1	
B	S1	D0	
	S2	D1	
	S3	8	
C	S1	9	M2
	S2	10	
	S3	12	
D	S1	13	M3
D	S2	14	M4 (non gouttant)
	S3	15	
Toutes les classes autres que E, D2 et F			M4

Le système des Euroclasses de réaction au feu partage les matériaux de construction en deux familles :

- Les sols ;
- Les autres produits.

Il est construit autour de trois niveaux de sollicitation thermique représentatifs de diverses phases de développement du feu :

- Attaque ponctuelle par une petite flamme (pour les deux familles de produits) ;
- Feu pleinement développé dans une pièce voisine (pour les revêtements du sol) ou sollicitation thermique par un objet en feu (pour les deux familles de produits) ;
- Feu pleinement développé dans la pièce (pour les deux familles).

Il s'appuie sur des essais dont les résultats permettent de ranger les produits dans sept Euroclasses :

- Classes A1, A1FL, A2 et A2FL pour les produits peu ou pas combustibles ;
- Classe B ou BFL : pour les produits dont la contribution au « flash over » est très limitée ;
- Classe C ou CFL pour les produits dont la contribution au flash over est limitée ;
- Classe D ou DFL pour ceux dont la contribution au flash over est significative ;
- Les classes E, EFL, F et FFL sont réservées aux produits combustibles dont la contribution à l'embrassement généralisé est très importante.

(L'indice FL signifie « floor » et s'applique donc aux matériaux destinés aux sols).

## **2.2 Résistance au feu**

### **2.2.1 Définition**

La résistance au feu correspond à la durée pendant laquelle les éléments de construction continuent à remplir leurs fonctions malgré l'action d'un incendie. Il concerne donc les éléments porteurs (poteaux, poutres, structures de toitures, planchers), avec de plus les éléments des séparations ou de protection (cloisons, portes, plafonds, conduits, clapets, ventilateurs de désenfumage).

La résistance au feu des éléments de construction se décompose selon la résistance mécanique, l'étanchéité aux flammes et aux gaz et l'isolation thermique.

## 2.2.2 Classification

### 2.2.2.1 Classement français

La résistance au feu est répartie en trois catégories :

- **SF** (Stable au Feu) : L'élément de construction conserve ses capacités de portance et d'auto-portance pendant le temps indiqué c'est-à-dire il garde ses caractéristiques mécaniques ;
- **PF** (Pare-Flammes) : L'élément est stable au feu et évite, durant le temps indiqué, la propagation du côté non exposé au feu, des gaz de combustion et des fumées c'est-à-dire il respecte un critère supplémentaire d'étanchéité aux flammes et gaz et n'émet pas de gaz inflammables ;
- **CF** (Coupe-feu) : L'élément est pare-flammes et permet d'éviter la propagation de la chaleur du côté non sinistré. C'est l'échauffement de la face non exposée au feu pendant le temps indiqué c'est-à-dire il respecte un critère supplémentaire d'isolation thermique.

La résistance au feu permet de justifier que les éléments de construction ont une certaine capacité à conserver leur rôle d'isolation (PF ou CF) ou de stabilité (SF). Afin d'assurer le temps nécessaire à l'évacuation, au sauvetage et à la lutte contre l'incendie. On évalue ainsi ces trois catégories suivant quatre critères distincts :

-**La résistance mécanique** : La résistance mécanique d'un élément est respectée si ce dernier continue à remplir sa fonction. On vérifie si ce dernier permet la stabilité de la structure ainsi que sa tenue propre.

-**L'isolation thermique** : Le critère est respecté si l'élément étudié ne dépasse pas 180°C en un point précis et 140°C sur l'ensemble de sa surface (porte par exemple).

Les critères SF, PF et CF sont notés en fractions d'heures ( $\frac{1}{4}$  h,  $\frac{1}{2}$  h,  $\frac{3}{4}$ h, 1h, 1h $\frac{1}{2}$ , 2h, 3h, 4h et 6h). La détermination du degré de résistance au feu s'effectue au moyen d'essais conventionnels.

Exemple : « SF 2h » (stable au feu pendant deux heures).

-**L'étanchéité aux flammes** : L'étanchéité au feu est satisfaisante lorsque l'élément ne s'enflamme pas pendant la durée exigée.

**-L'absence d'émission de gaz inflammables** : Etude réalisée sur la face non exposée aux flammes.

On peut ainsi établir un tableau récapitulatif montrant les catégories SF, PF, et CF ainsi que les critères permettant de définir cette catégorie (Tableau).

**Tableau 3: Tableau de synthèse**

Critères	Résistance mécanique	Isolation thermique	Etanchéité aux Flamme	Absence d'émission de Gaz inflammables
SF	X			
PF	X		X	X
CF	X	X	X	X

### 2.2.2.2 Classement Européen

Le classement de la résistance au feu tend à disparaître au profit de la vérification harmonisée entre les pays européens.

Le classement Européen de la résistance au feu est toutefois semblable à notre classement au niveau des différents contrôles même si les appellations changent.

**R** : Facteur caractérisant la capacité portante d'un élément. On vérifiera son aptitude à conserver sa stabilité structurale pendant l'incendie.

**E** : Test d'étanchéité au feu en vérifiant l'aptitude d'un élément à résister à une exposition au feu sur un de ses côtés sans qu'il y ait transmission sur le côté non exposé.

**I** : Etude de l'isolation thermique de l'élément afin de savoir s'il peut résister à une exposition au feu sur un seul côté sans qu'il le transmette par transfert de chaleur important vers le côté non exposé. Pour cela il faut que la température sur la face non exposée ne dépasse pas les 140°C (ou 180°C en un point).

Ces lettres sont suivies de deux ou trois chiffres donnant le temps de résistance en minutes.

Exemple : REI 120 (coupe-feu pendant 120 minutes).

**Tableau 4: Résistance au feu des planchers, poutres et poteaux en bois.**

<b>Planchers traditionnels en bois</b>	
<p><i>Plancher à solives en bois de type traditionnel (4X3m) avec hourdis en augets constitués de débris de briques liés au plâtre, et bacula revêtu de 15mm de plâtre. Solive en sapin de 8X23 cm. Entraxe des solives : 33cm. Portée libre : 4m. Surcharge totale : 3t (250kg/m<sup>2</sup>).</i></p> <p><i>Nota : lorsqu'on a recours à la mise en place d'un faux plafond pour donner à un plancher un certain degré coupe-feu, on doit porter particulièrement son attention sur son mode de fixation (suspente, clous, etc.), dont la résistance au feu fonctionne bien souvent le résultat recherché.</i></p>	CF 2H
<b>Poutre en bois lamellé-collé</b>	
<p><i>Poutre en bois lamellé-collé de sélection 65X21.6cm, longueur 3.6m, supportant une charge de 9.5 tonnes. Constituée de planches de sapin de 20 mm assemblées sous presse à l'aide de colle résorcine-formol.</i></p>	SF 1h
<b>Poteaux en bois-poteaux en bois massif-poteau en chêne-poteau nu</b>	
<p><i>Poteau en chêne nu, section 15X15cm, hauteur 2.30m, charge 10t (profondeur moyenne carbonisée en fin d'essai : 23 mm)</i></p>	SF ½ h
<p><i>Influence d'une protection en plâtre :</i></p> <p><i>-Poteau identique, recouvert d'un enduit en plâtre de 1cm posé sur grillage (profondeur moyenne carbonisée en fin d'essai : 25 mm).</i></p>	SF 1h
<p><i>-Poteau identique, recouvert d'un enduit en plâtre de 2 cm posé sur grillage (profondeur moyenne carbonisée en fin d'essai : 18 mm).</i></p>	SF 1h30
<b>Poteau en pin</b>	
<p><i>Poteau en pin massif, section 18X20 cm, hauteur 2.275m, charge 18t (profondeur carbonisée en fin d'essai : 2.5 à 3 cm selon les faces).</i></p>	SF ½ h
<b>Poteaux en bois lamellé-collé</b>	
<p><i>Poteau sapin lamellé-collé (à base de mélanine ou à base d'urée-formol) :10 planches de 20 mm, section 20X18 cm, hauteur 2.275m, charge 18t (profondeur carbonisée en fin d'essai : 3à 3.7cm selon les faces)</i></p>	SF ½ h

## 3. Généralités sur le bois et les produits dérivés

### 3.1 Le matériau bois

Le bois est un composite polymère complexe dont les propriétés générales sont fortement dépendantes de sa structure interne. Sa composition microscopique fortement hétérogène permet d'expliquer en partie son comportement à l'échelle macroscopique. D'un point de vue microscopique, le bois est composé d'une multitude de cellules qui constituent la base unitaire du matériau. L'assemblage de ces cellules parallèlement les unes aux autres permet la formation de la structure macroscopique.

La structure microscopique d'une cellule consiste en un assemblage élaboré de différents composants dont les proportions varient en fonction de l'essence du bois et des conditions de pousse de l'arbre.

Une composition moyenne des composants du bois peut être la suivante [5] :

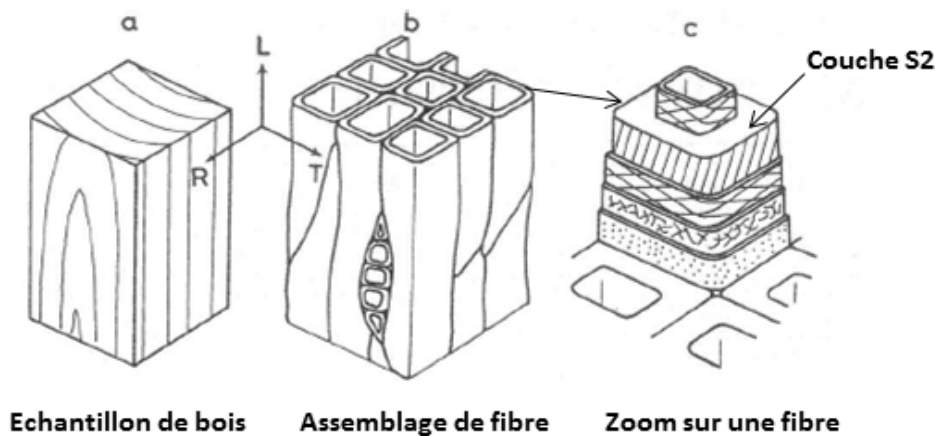
- La cellulose, présente à environ 43 % en termes de masse, est le constituant majoritaire. Cette cellulose forme les micro-fibrilles qui entrent dans la composition de la paroi cellulaire et forment les renforts du composite cellulosique
- L'hémicellulose, présente à environ 30 %, permet de réguler le taux d'humidité du bois en se liant aux molécules d'eau. Ce composé joue en partie le rôle de la matrice du composite.
- La lignine, présente à environ 27 %, permet de réguler le taux d'humidité via des propriétés hydrophobes.

Le rôle principal de la lignine est de lier les cellules entre elles. C'est l'élément principal de la matrice du composite bois.

En réalité, la composition d'un matériau cellulosique ne se réduit pas à ces trois composants. Un faible pourcentage de composants appelés « extractibles » et des pectines sont également présents dans le bois (3 % à 7 %). Ces extractibles auront différents rôles tels que la protection du bois contre les attaques fongicides ou l'apport de nutriments. Les pectines, principalement présentes dans la première épaisseur du mur cellulosique, assureront une certaine cohésion des cellules [5].

D'un point de vue structurel, nous observons sur la figure que les cellules du bois se divisent en couches, chacune différenciée par l'orientation de leurs micro-fibrilles de cellulose, le tout étant noyé dans la matrice de lignine et d'hémicellulose. Nous remarquons que la couche S2 est l'épaisseur principale de la paroi cellulaire. Cette couche joue le rôle le

plus important dans les performances du bois d'un point de vue mécanique du fait de l'orientation longitudinale de ses micro-fibrilles.



**Figure 7: Structure du matériau bois : a) Matériau bois et directions principales de la structure, b) assemblage de fibres, c) structure multi-couche de la paroi cellulaire [7].**

Concernant la structure macroscopique du bois, ou structure brute, nous pouvons distinguer quatre zones qui sont directement visibles à l'œil nu comme schématisé sur la figure 7 :

- L'écorce est la partie externe du bois, composée de deux couches intérieure et extérieure. Elle sert à protéger l'arbre contre les attaques de son environnement telles que les champignons, le climat ou les blessures ;
- Le bois d'aubier est composé des cellules vivantes de l'arbre. C'est dans cette zone qu'a lieu la fabrication de nouvelles cellules au sein du cambium, en périphérie de l'écorce, ce qui permet la croissance de l'arbre ;
- Le bois de cœur est quant à lui composé de cellules mortes. Cette partie centrale est plus compacte que les autres et sa concentration en « extractibles » est plus importante que dans le bois d'aubier.

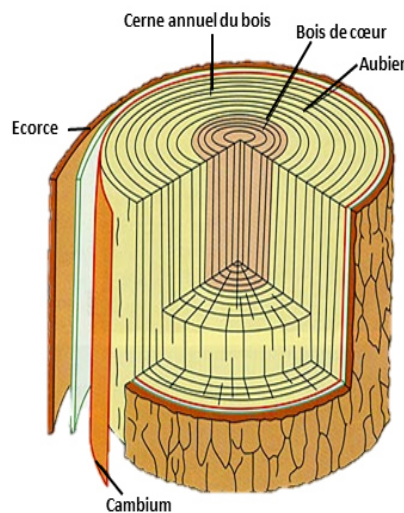
Cette couche représente 85 % de l'épaisseur cellulaire. Le reste de la paroi est composé de la paroi primaire, des couches S1 et S3 et de la couche verruqueuse.

Ce qui lui donne une couleur plus sombre. Ses caractéristiques en font un bois de meilleure qualité (mécaniquement et contre les attaques extérieures).

La moelle représente le centre de l'arbre. Elle est composée des tissus formés durant la première année de croissance de l'arbre.

La description de la structure macroscopique du bois doit en plus tenir compte de la croissance annuelle de l'arbre ainsi que des canaux permettant le transport des nutriments et de l'eau libre dans la direction radiale (du centre de l'arbre vers l'écorce). Dans le cas de bois résineux (sapin, pin maritime...), il faut également ajouter à cette structure des canaux permettant le stockage de résine.

D'un point de vue général, les propriétés physiques et mécaniques du bois seront directement dépendantes de cette structure microscopique et macroscopique. Une forte variabilité pourra donc être observée suivant les différentes espèces de bois étudiées ainsi que pour un même échantillon en fonction de l'échelle et des directions d'études de celui-ci.



**Figure 8:Structure macroscopique du bois [8].**

### 3.1.1 Les produits dérivés du bois

La composition des panneaux de particules de bois ou de fibres varie en fonction du fabricant et de l'application finale à laquelle ils sont destinés. À titre d'exemple nous pouvons donner la composition d'un panneau de particules de bois de masse volumique égale à  $670 \text{ kg/m}^3$  [9] :

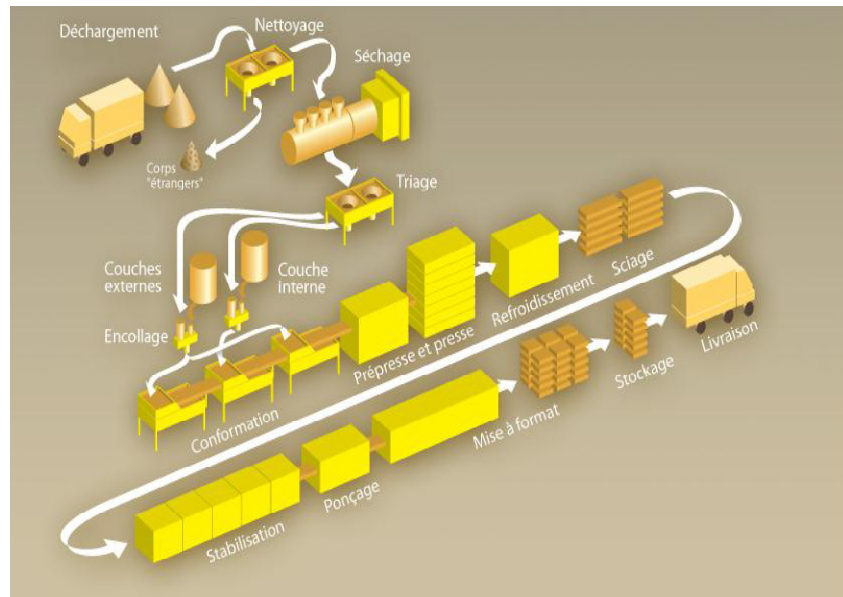
- 85 % de bois de provenance variable : exploitation forestière, valorisation de matières premières secondaires (bois de scierie, déchets industriels et produits bois en fin de vie) ;
- 7 % d'eau pour des conditions de stockage standard, soit une température autour de  $20 \text{ °C}$  et une humidité relative de l'air de 65 % ;
- 8 % de colle Urée Formaldéhyde (UF) ;

– Un faible pourcentage de substances dangereuses (hexamine).

Les dimensions des particules de bois utilisées pour la fabrication d'un panneau d'aggloméré sont variables selon le produit. Elles peuvent être de l'ordre de quelques millimètres carrés jusqu'à quelques centimètres carrés. Dans le cas de panneau MDF, la constitution est légèrement différente de celle d'un panneau de particules agglomérées. Les fibres de bois utilisées sont de plus petites dimensions ce qui implique une utilisation plus importante de colle. Le pourcentage de bois est alors autour de 83 % pour un taux de colle urée formaldéhyde d'environ 11 % en termes de masse du panneau, auxquels il faut ajouter environ 6 % d'eau.

Selon l'usage du produit, les pourcentages de colle et de bois peuvent varier afin de prendre en compte l'ajout d'additifs tels que les agents ignifugeants ou hydrofuges[10].

Dans le cas de panneaux de particules, la matière première est généralement transformée dans des défibreurs à sec qui débitent les copeaux de bois aux dimensions voulues pour la surface et l'âme du produit. Les particules sont ensuite tamisées pour obtenir différents matelas en fonction des dimensions de particules. Les particules tamisées sont séchées. La résine ainsi que les agents additifs sont en suite appliqués par pulvérisation sur les particules de bois. La formation du matelas du panneau se fait alors dans une confirmatrice où sont successivement étendues la première couche de surface (particules plus fines), la couche de l'âme (particules plus grosses) et la deuxième couche de surface. Le pressage à chaud, où l'on compacte le matelas à un niveau donné de densité et d'épaisseur, permet dépolymériser la résine UF. Les panneaux sont ensuite transférés dans une zone de refroidissement puis stockés quelque temps dans une aire de maturation. En fonction de la qualité du produit fini et de son usage final, des étapes de finition sont effectuées (taille, ponçage, inspection, laminage ou peinture).



**Figure 9: Procédé de fabrication de panneaux de particules ([www.sanopan.com](http://www.sanopan.com))**

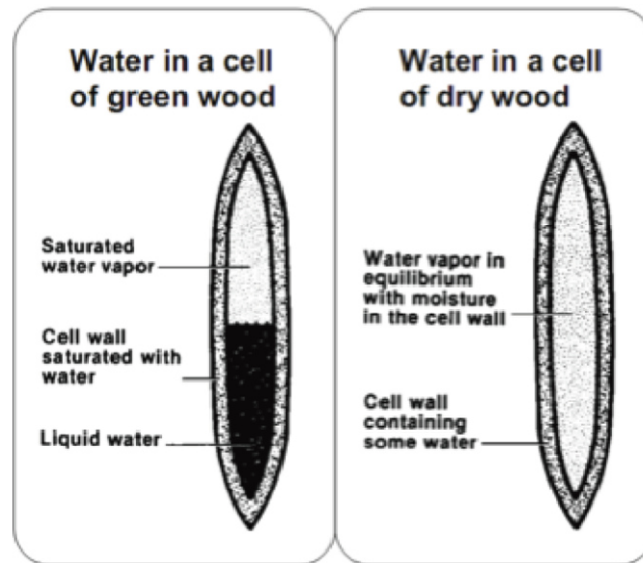
### 3.1.2 L'eau et le bois

Le bois est un matériau hygroscopique c'est-à-dire qu'il absorbe une partie de l'humidité de son environnement. La teneur en eau du bois est dépendante de sa structure interne mais aussi de son environnement direct.

À l'état naturel, l'eau est présente dans le bois sous quatre formes (figure 10) :

- L'eau de constitution qui entre dans la composition des molécules du bois ;
- L'eau liée qui est nommée ainsi car liée aux parois des cellules du bois à l'aide de liaison de type pont hydrogène. Cette eau est présente dans les différentes épaisseurs de la paroi cellulaire ;
- L'eau libre liquide qui est présente dans les espaces vides des cellules ou cavités, tels que le lumen (centre de la cellule). Ce type d'eau apparait lorsque la teneur en eau massique dépasse le point de saturation des fibres (PSF) soit autour de 30 %. Sa quantité peut être très variable et dépend de la porosité du matériau, des forces capillaires qui entrent en jeu et de l'environnement extérieur. Cela peut représenter jusqu'à 70 % du volume d'eau présent dans le bois. Un bois très vert peut atteindre une teneur en eau massique de 200 % ;

– la vapeur d’eau qui peut être présente dans les vides cellulaires non saturés en eau libre.



**Figure 10: Principe de stockage de l’eau dans les cellules du bois[11].**

La teneur en eau massique du bois, appelée  $W$ , est décrite par la part d’eau que le bois peut absorber lorsqu’il est placé dans certaines conditions de température et d’humidité relative, et qu’il atteint un équilibre avec son environnement. Ce paramètre décrit donc la part d’eau liée et d’eau libre dans le bois. L’équation 1.1 permet d’obtenir la teneur en eau du bois en fonction de la masse initiale et de la masse anhydre après séchage en étuve ( $T_{103} \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Le bois est considéré anhydre lorsque seule l’eau de constitution du matériau reste présente. L’écart de masse entre deux pesées successives espacées de 2h doit alors être inférieur à 0,1%.

$$W = \frac{\text{masse}_{ini} - \text{masse}_{sec}}{\text{masse}_{sec}} \times 100\%$$

Lors du séchage du bois suite à une modification des conditions extérieures (variation de la température ou de l’humidité relative de l’air), la variation de la teneur en eau du matériau suit un procédé établi. L’eau libre est la première à migrer vers l’extérieur du matériau car les forces capillaires sont plus faibles que les ponts hydrogènes. Le pourcentage d’eau liée est maximum jusqu’à ce que le point de saturation des fibres soit atteint, puis il diminue lorsque le séchage continue en dessous de ce point.

Si les conditions le permettent, par exemple à haute température, l'eau de constitution peut être extraite du matériau entraînant sa dégradation et la formation de charbon de bois.

D'un point de vue mécanique, la variation de la teneur en eau liée du bois est aussi impactant sur la structure du matériau. Une augmentation de cette teneur en eau se caractérise par un gonflement de la paroi cellulaire lorsque l'eau se lie aux molécules de cellulose et d'hémicellulose. À l'inverse, lors du séchage du bois, le départ de l'eau liée provoque une réduction de la section (retrait), des distorsions et la formation de zones de craquage [11]. À l'extrême, si l'eau de constitution est retirée du matériau, il y a alors une forte réduction des propriétés mécaniques du matériau suite à la formation de charbon de bois. La variation de la teneur en eau libre n'a en revanche pas d'impact sur le comportement mécanique du matériau [12].

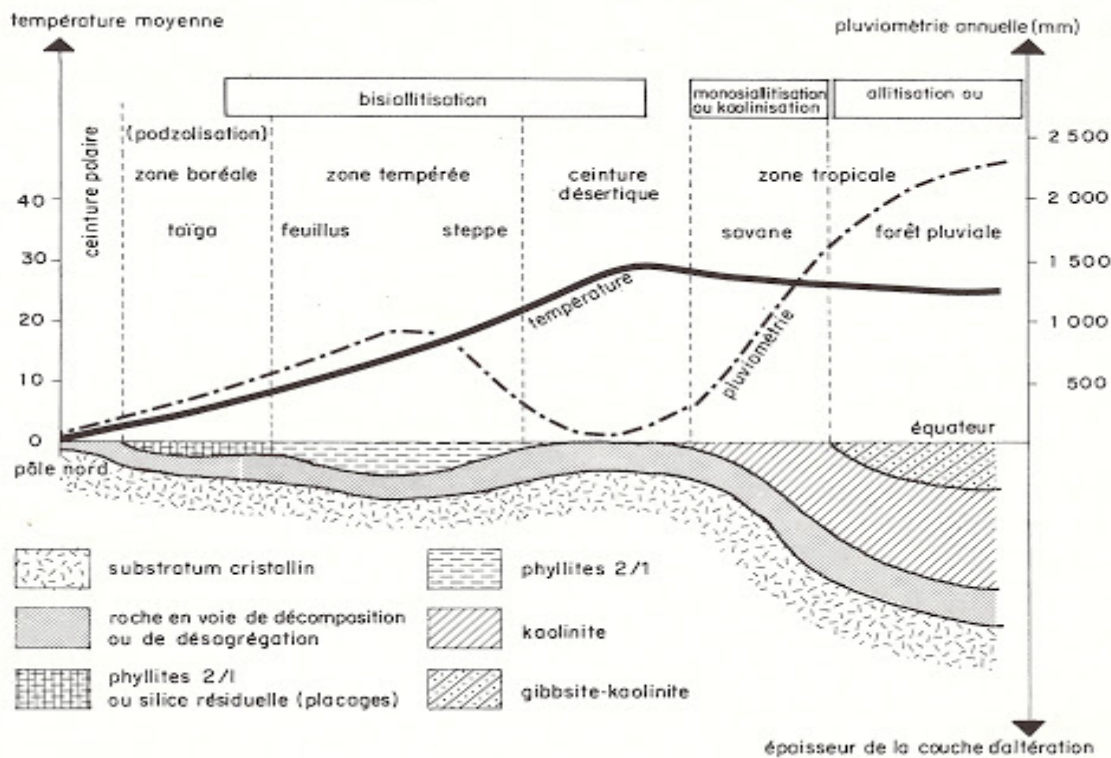
Les performances mécaniques des structures bois diminuent sous une exposition au feu. Le bois voit diminuer sa section car il se transforme en charbon à une vitesse qui dépend de l'humidité, du flux de chaleur et de la densité. De même sous l'effet de la chaleur, les propriétés thermomécaniques du bois varient.

## **4. Le comportement du bois exposé au feu**

### **4.1 Dégradation du bois sous l'influence de la chaleur, la pyrolyse**

Lorsqu'il est exposé au feu, le bois se dégrade sous l'effet d'une décomposition chimique qui transforme ses constituants en gaz volatils laissant des résidus de carbonisation. Une combustion spontanée en surface du bois peut survenir pour des températures de 300°C à 430 °C mais aussi lors d'une exposition prolongée à une température approximant les 150°C.

D'autre part l'importance de la dégradation thermique dépend de la température et de la durée d'exposition.



**Figure 11: Zones de dégradation en fonction de la température.**

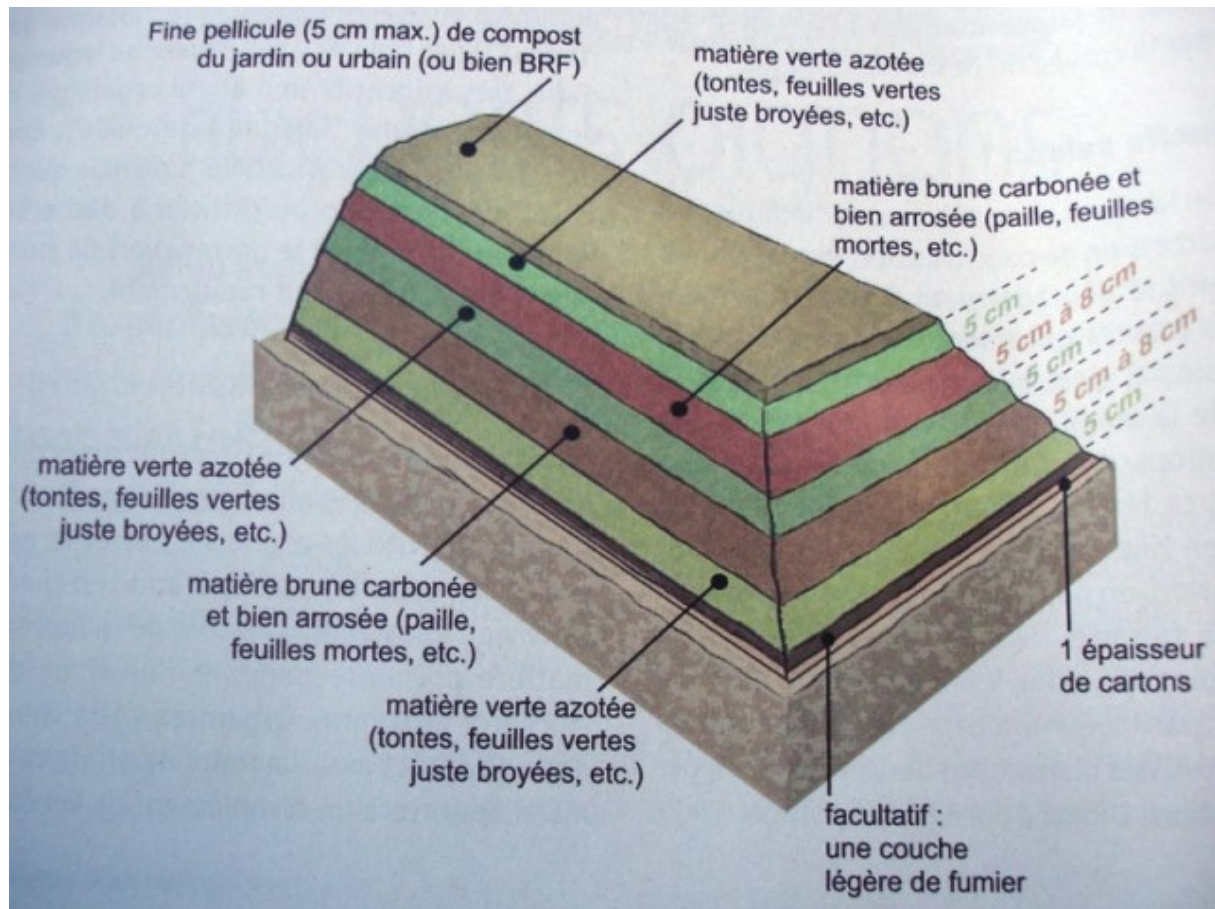
Pour des températures inférieures à 100°C (zone 1), l'effet instantané de la chaleur sur les caractéristiques du bois est réversible. De plus l'exposition prolongée à des températures supérieures à 65°C fait apparaître des altérations rémanentes des caractéristiques mécaniques.

Le bois subit une perte rapide de son eau libre puis de son eau liée lorsque la température de celui-ci atteint 100°C. La température augmente peu tant que l'eau ne s'est pas totalement évaporée. Une rapide augmentation de la température engendre une perte lente de poids solide jusqu'à 240 °C par le phénomène de pyrolyse (zone 2). À partir de températures avoisinant les 300°C (zone 3) la pyrolyse du bois dégage des gaz inflammables. A cette température, le bois est considéré comme étant carbonisé. Les couches de carbonisation se superposent donc par conduction de la température dans le bois.

La combustion du bois libre, entre 150°C et 200°C des gaz composés de dioxyde de carbone incombustible et de monoxyde de carbone combustible. Au-dessus de 200°C, la teneur en CO augmente. La combustion des gaz accroît l'augmentation de température. Dès lors que la température atteint 500°C, la production de charbon augmente au détriment de celle des gaz (zone 4).

Par conséquent lors d'une exposition à une chaleur intense prolongée, le bois se dégrade en charbon de bois, en gaz non inflammables (vapeur d'eau et CO<sub>2</sub>) puis en gaz combustibles (CO, H<sub>2</sub> et hydrocarbures).

La figure 12 présente la coupe d'une section de bois ayant subi une exposition au feu. Différentes parties sont identifiées : une couche carbonisée, une couche de bois pyrolyse (environ 5 mm) et le cœur de la section intact.



**Figure 12: Zones de dégradation dans une coupe de bois pour des températures élevées**

La température au sein du cœur de la section reste très basse par rapport à celle de la surface. Ce phénomène est lié non seulement à la faible conductivité de la couche de charbon (plus faible que celle du bois) mais aussi à la présence du front de vapeur à la limite de la couche pyrolyse annihilant l'augmentation trop importante dans le bois non atteint.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'essentiel pour commencer une étude du comportement du bois sous l'effet du feu, ainsi une caractérisation de ce phénomène selon les normes mondiales, par la suite nous présenterons une modélisation numérique et mathématique du comportement thermique et rhéologique de cette étude en prenant en considérations ces normes.

# ***CHAPITRE II : MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET MATHÉMATIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE ET RHÉOLOGIQUE DU BIOS SOUS L'EFFET DU FEU***

---

## **Introduction**

Des matériaux utilisés dans la construction (l'acier, Le bois et le béton) perdent leurs caractéristiques mécaniques sous actions thermiques, mais le bois est le seul dont la dégradation sous actions thermiques est la plus visible à l'œil nu. C'est un matériau fortement orthotrope, sensible à l'humidité et à la température, Ainsi, pour généraliser l'intégration du matériau bois dans différentes structures en Génie-Civil, il est nécessaire de connaître sa résistance au feu. Pour cela, il y a besoin de maîtriser d'une part le comportement mécanique linéaire élastique orthotrope et non-linéaire d'autre part l'évolution de ses propriétés thermo-physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité) en fonction de la température et en particulier les phénomènes de la dégradation thermique qui sont très complexes. Ce chapitre s'inscrit dans ces objectifs et il est divisé en trois grandes parties. Dans la première partie, on présente le modèle mathématique gouvernant le comportement thermique du bois sous action du feu (pyrolyse) le plus adapté au matériau utilisé. Dans la seconde partie, nous allons établir les équations algébriques de ses équations obtenues qui sont résolues par la méthode des volumes finis et la méthode de Rang-Kutta d'ordre 2. Le chapitre se termine par la description d'un résultat avec une interprétation des courbes réalisées.

## **1. Modélisation de la dégradation thermique du bois**

### **1.1 Dégradation thermique du bois**

Le bois est un matériau combustible dans une gamme de température que l'on rencontre couramment dans un incendie. Comme tout solide combustible, sa dégradation se fait en plusieurs phases :

- Phase de séchage :

Le bois est de nature hygroscopique. L'élévation de la température ambiante entraîne nécessairement le séchage du bois par évaporation de l'eau. Ce mécanisme se déroule en

deux étapes : il commence par la perte de l'eau libre présente dans les interstices des fibres puis celle de l'eau liée. Lorsque l'eau libre est retirée et si l'équilibre hygroscopique n'est pas atteint, l'eau liée commence à s'évaporer. Le retrait de l'eau liée amène à l'état anhydre du matériau bois. Le séchage du bois s'effectue à des températures allant de 80°C à 110°C. A ce niveau de température, l'eau migre vers l'extérieur par capillarité et évaporation principalement au niveau des arêtes et des fissures. Le transfert de masse s'effectue de la zone plus humide vers la zone plus sèche.

Durant la phase de séchage, l'évolution de la température interne du bois est fortement ralentie. Le séchage correspond à une réaction endothermique où la chaleur est absorbée par la transformation de l'eau liquide en vapeur. Lorsque le matériau devient localement anhydre, sa température s'accroît progressivement.

- Phase de pyrolyse :

Le mécanisme de pyrolyse, pour un matériau ligno-cellulosique, se traduit par la décomposition chimique du matériau, la libération de gaz et la formation d'une couche de charbon [30], [35] et [40].

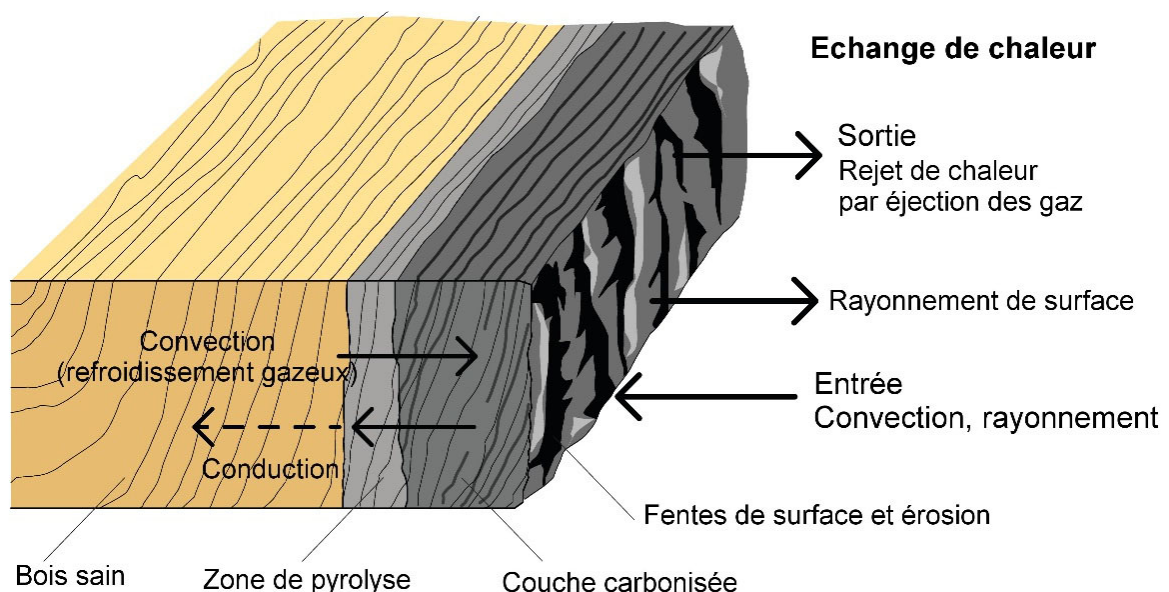
Une fois que l'eau libre et l'eau liée sont totalement retirées, en phase de séchage, la température en surface du matériau augmente rapidement. A des températures d'environ 180°C, le mécanisme de pyrolyse s'amorce et cause la modification des constituants du bois. Le niveau de températures responsable de la pyrolyse du bois est différent selon les auteurs [21], [22] et [32]. A des températures variant de 150°C à 200°C, les gaz causés par la pyrolyse se composent d'environ 70% de dioxyde de carbone incombustible (CO<sub>2</sub>) et monoxyde de carbone (CO) combustible et toxique. A plus de 200°C, le gaz combustible se libère de plus en plus et la proportion de CO<sub>2</sub> décroît. Après inflammation des gaz, la température à la surface s'accroît rapidement. Le bois se transforme en charbon à des températures d'environ 300°C. C'est entre 250°C et 350°C, que le bois perd environ 60% de sa masse initiale. La masse formée du charbon est en moyenne de 20% à 25% de la masse initiale du bois. Durant cette phase, une grande quantité des gaz émis par la dégradation du bois est inflammable.

La conductivité thermique du charbon est environ six fois inférieure à celle d'un bois massif. Le charbon se comporte donc comme un isolant, ce qui crée une couche de protection et ralentit la propagation de la chaleur.

- Phase de combustion :

La combustion correspond à l'inflammation des gaz émis par la pyrolyse. A ce stade, la température à la surface exposée au feu augmente fortement. Au-delà de 500°C, la quantité de gaz produit est très faible et celle de charbon augmente. Cependant, il y a toujours au sein du bois une phase de pyrolyse très active (température de 250°C à 300°C) qui produit des gaz. Pour s'évacuer, ces gaz traversent la couche de charbon et empêchent celui-ci d'être en contact avec l'oxygène de l'air. Apparaissent ensuite des brèches dans le charbon. Dans ces brèches, les gaz issus de la pyrolyse sont évacués alors que les autres surfaces de charbon peuvent être en contact avec de l'oxygène et brûlent lentement.

Ainsi, lors d'un incendie, toutes les phases se déroulent dans le même temps, dans les zones différentes du bois.



**Figure 13: Front de pyrolyse dans le bois.**

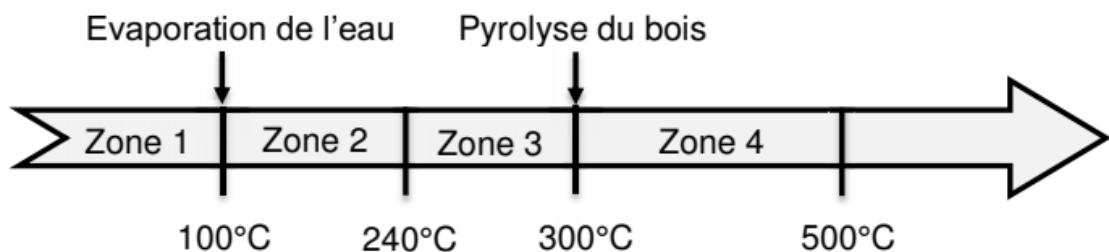
Dans la figure 13 présente la section d'un bois exposé au feu. La coupe est composée en différentes zones :

- Une partie extérieure du bois qu'est carbonisée;

- Une couche d'une épaisseur d'environ 5 mm qu'est pyrolyse c'est-à-dire que le bois est altéré chimiquement par le feu mais n'est pas encore complètement décomposé;
- Le cœur de la section qu'est constitué de bois intact.

## 1.2 Vitesse de carbonisation

La carbonisation du bois diminue de façon considérable ses performances mécaniques tandis que le bois sous cette couche de charbon conserve ses propriétés d'origine. Il est donc essentiel de connaître la vitesse de propagation de la couche carbonisée au travers s'une section de bois afin d'en estimer une durée de stabilité au feu. Tout bois pyrolyse peut être considéré comme du charbon du fait de l'altération de ses propriétés. La vitesse de carbonisation ou vitesse de combustion  $\beta$  correspond donc à l'épaisseur de charbon formé en une minute par la chaleur. Ce paramètre dépend de la masse volumique du bois, de l'intensité du flux de chaleur externe et de la teneur en humidité. La valeur de  $\beta$  varie entre 0,5 et 1 mm/min selon les essences, le type de produits et de la géométrie de la section. De plus lorsque la section résiduelle est inférieure à 40-60 mm, la vitesse  $\beta$  augmente.

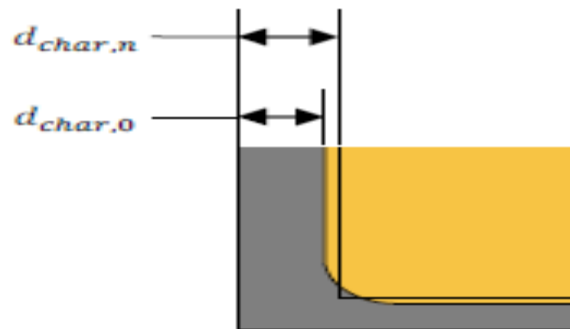


**Figure 14 : Zones de dégradation dans une coupe de bois pour des températures élevées.**

L'Eurocode 5 (EN 1995-1-2) donne deux types de vitesse :

- $\beta_0$  (vitesse unidimensionnelle), utilisée dans le cas de sections larges exposées au feu sur une seule face ;
- $\beta_n$  (fictive), utilisée dans le cas de sections réduites exposées au feu sur plusieurs faces. Cette vitesse prend en compte l'effet des arrondis en coin.

Ces valeurs correspondent à des profondeurs de carbonisation respectivement de  $d_{char,0}$  et  $d_{char,n}$  mesurées suivant la figure 15.



**Figure 15: Profondeur de carbonisation unidimensionnelle et fictive.**

### 1.3 Evolution des propriétés du bois modèles de transfert de chaleur

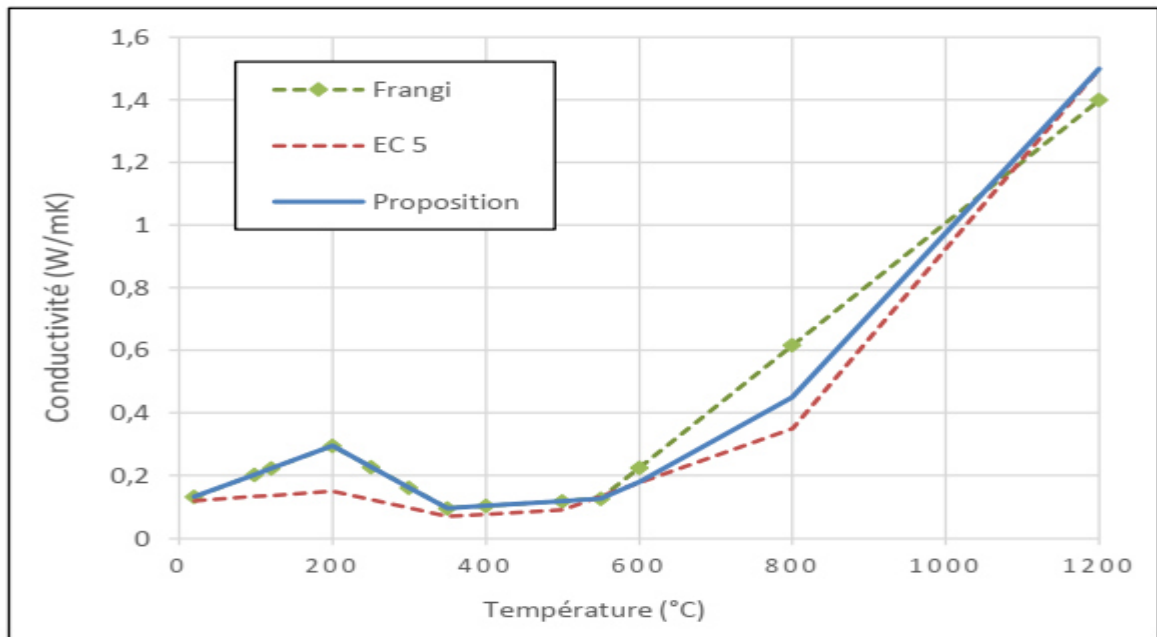
La réponse thermique du bois exposé au feu est régie par l'équation de diffusion de chaleur [5] qui prend en compte les données thermo-physiques : conductivité, chaleur spécifique et densité. De même le comportement mécanique dépend de propriétés mécaniques : modules d'élasticité, limites élastiques. La définition de ces propriétés comme données d'entrée est donc nécessaire à l'analyse thermomécanique.

#### 1.1.1. Conductivité thermique

La conductivité est définie en rapport avec l'orthotrope matérielle du bois. Cependant les valeurs en direction radiale et tangentielle sont très proches. Ainsi une valeur moyenne est fréquemment retenue en considérant l'hypothèse d'isotropie perpendiculaire. La conductivité longitudinale est quant à elle deux fois plus élevée.

La figure 16 donne l'évolution de la conductivité en fonction de la température (à une humidité initiale de 12%) selon l'annexe de l'Eurocode 5, FRANGI (2001) et selon une nouvelle proposition qui tend davantage vers la conductivité réelle. Cette dernière prend les valeurs de conductivité proposées par FRANGI jusqu'à 550°C et de l'Eurocode 5 pour des températures plus élevées. La croissance rapide de la courbe à partir de 800°C correspond à l'augmentation des échanges thermiques, dans la couche de carbonisation, due à la convection et au rayonnement au travers des fissures.

Pour des températures inférieures à 300°C, les valeurs de conductivité sont celles du bois tandis qu'au-dessus de 300°C, elles correspondent à celles du charbon.

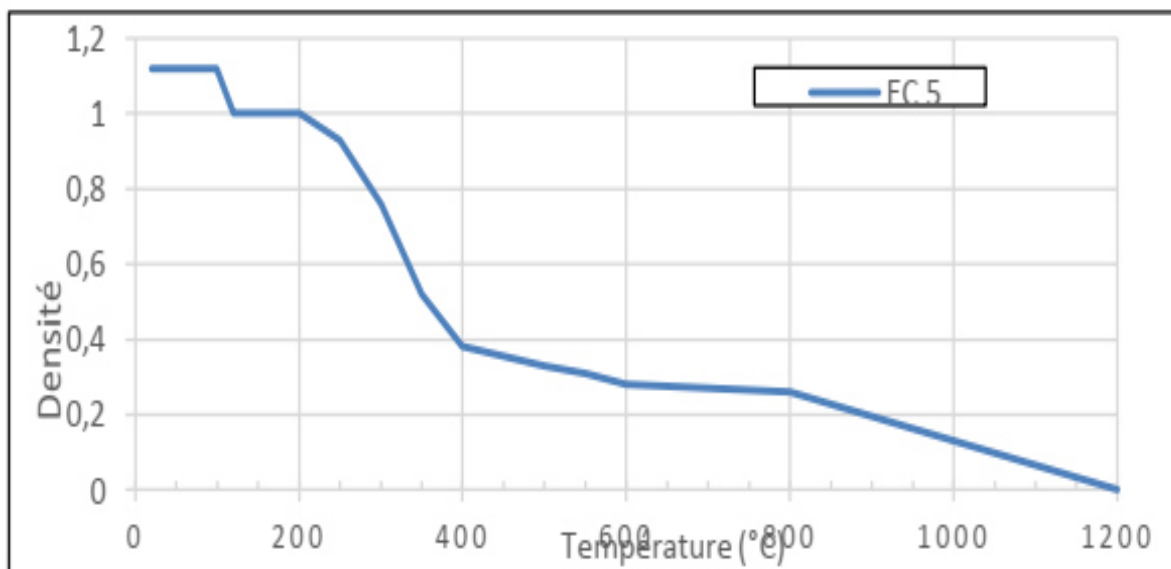


**Figure 16: Evolution de la conductivité d'un résineux (humidité initiale à 12%) en fonction de la température**

### 1.3.1 Densité

La densité, tout comme l'humidité du bois est un paramètre influant sur la vitesse de carbonisation et donc sur le gradient de température dans la section. La teneur en eau ralentit l'élévation de la température du bois car elle fait varier sa densité.

Cependant cette densité vient à diminuer lorsque le bois est exposé au feu du fait de l'évaporation et de la carbonisation. L'Eurocode 5 donne l'évolution de la densité en fonction de la température que nous prenons en compte dans l'analyse thermique (figure 17). Jusqu'à 200°C, la densité varie peu. Entre 200°C et 350°C, la pyrolyse du bois dégrade les constituants chimiques ; ce qui se traduit par une chute de la densité de près de 60%. Au-delà de 300°C, le charbon prend la place du bois (densité trois fois plus faible). La densité est considérée nulle à 1200°C (combustion totale). D'autre part, le saut de densité entre 99 et 120°C correspond à l'évaporation de l'eau, d'où la variation de 1,12 à 1 sur la figure.

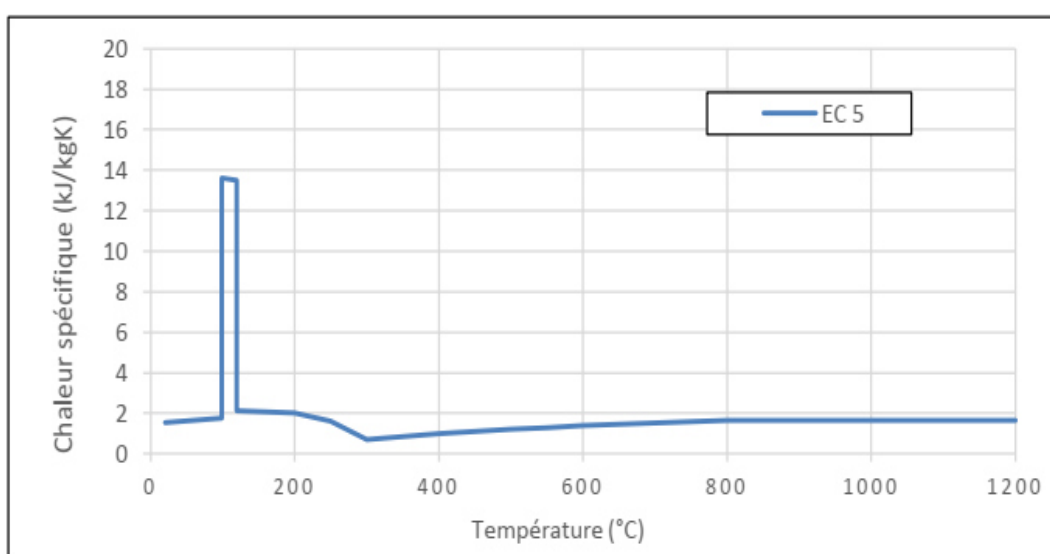


**Figure 17: Evolution de la densité en fonction de la température.**

La masse volumique à 12% du LVL de pin radait est considéré égale à  $570 \text{ kg/m}^3$  à température ambiante. Ainsi la masse volumique anhydre est de  $450 \text{ kg/m}^3$ .

### 1.3.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est considérée dans le respect des valeurs données dans l'Eurocode 5 (figure 18). L'augmentation brutale de la chaleur spécifique entre  $99^\circ\text{C}$  et  $120^\circ\text{C}$  correspond à l'évaporation de l'humidité contenue dans le bois.



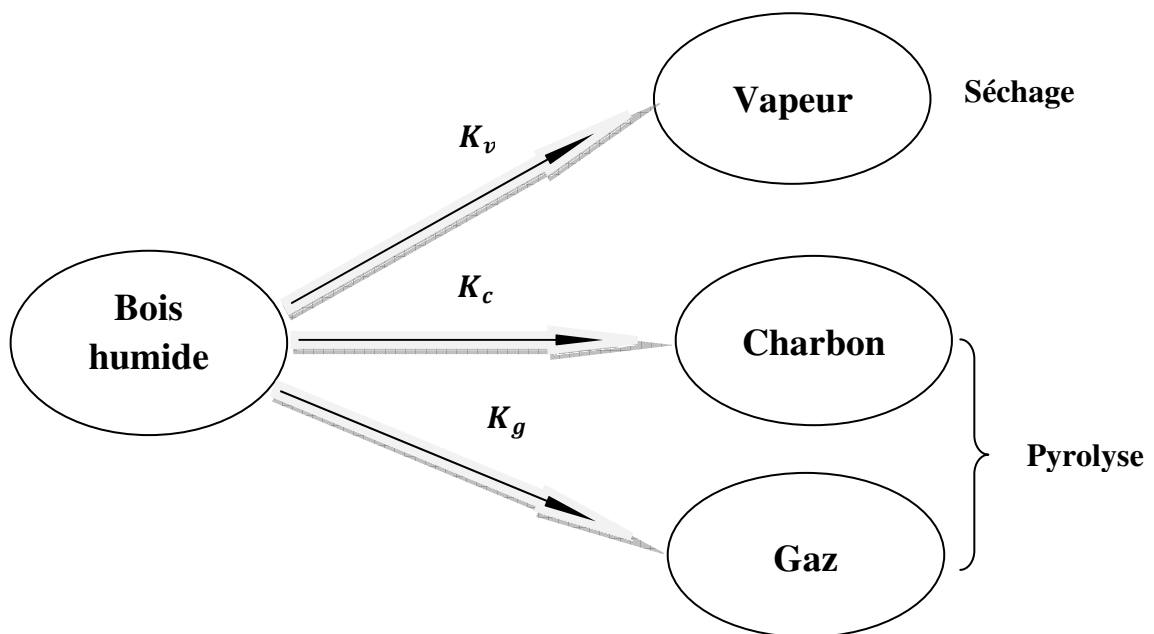
**Figure 18: Evolution de la chaleur spécifique du bois en fonction de la température.**

## 2. Modèles de transfert de chaleur

La modélisation de ces phénomènes nécessite la prise en compte de la cinétique de dégradation, mais aussi de la variation des caractéristiques physiques en fonction de la température.

Dans un essai au feu, l'échange de la chaleur entre les surfaces extérieures de l'échantillon et l'environnement se fait par convection et rayonnement, tandis que le transfert de chaleur qui se produit à l'intérieur de l'élément se fait par conduction. Un modèle de pyrolyse pour un bois humide prenant en compte la dégradation séparée en trois parties charbon, gaz et vapeur est proposé par Shen et al [22].

Le mécanisme de pyrolyse de ce modèle est représenté schématiquement sur la figure 19, la dégradation thermique du bois humide se fait par trois réactions parallèles. Le bois humide se transforme en vapeur dans l'étape de séchage et en charbon et en gaz dans l'étape de la pyrolyse, nous basons sur l'approche réglementaire utilisée dans l'Eurocode 5 [41] qui consiste à résoudre l'équation de la chaleur en simplifiant les phénomènes de séchage, pyrolyse et combustion par une adaptation des propriétés physiques ( $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $C_p$ ).



**Figure 19: Modèle de pyrolyse pour un bois humide [22].**

### 3. Équation de diffusion de la chaleur

Le modèle qui permet de retranscrire un transfert thermique au sein d'un matériau cellulosique en prenant en compte la vaporisation de l'eau et les réactions de dégradation thermique, à savoir la pyrolyse du bois et la combustion des gaz de pyrolyse ainsi que la modification des propriétés physiques induite par ces réactions de dégradation. Dans ce modèle, seul les aspects énergétiques et la modification des propriétés thermiques du matériau sont pris en compte. Le bilan thermique au sein d'un solide est effectué par la résolution de l'équation (2.1), aussi appelée Loi de Fourier [101].

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_p \cdot T) + \text{div}(q) = Q_r \\ q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec :

$\rho$ : Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) ;

$C_p$ : Chaleur spécifique (J/kg.K) ;

T : Température (K) ;

t : Temps (s) ;

q : Source volumique de chaleur (W/m<sup>3</sup>) ;

$Q_r$ : Source de chaleur (W/m<sup>3</sup>) ;

$\lambda$ : Conductivité thermique (W/m.K).

L'évolution du gradient de température dans un échantillon en bois peut être décrite par l'équation différentielle suivant [22] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(T(\rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l)) = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q_r \quad (2.2)$$

Les équations de conservation de masse sont [22] :

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} = -(K_c + K_g)\rho_b \quad (\text{b : bois}) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = K_c \rho_b \quad (\text{c : charbon}) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = K_g \rho_b \quad (\text{g : gaz}) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} = -K_v \rho_l \quad (\text{l : liquide}) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = K_v \rho_l \quad (\text{v : vapeur}) \quad (2.7)$$

Dans ce modèle, la source de chaleur due aux réactions de la dégradation thermique,  $Q_r$  se décompose en deux termes : le premier terme  $S_{endot}$  représente la résultante des réactions endothermiques dues à l'énergie consommée pour la transformation de phase et le second terme  $S_{exot}$  désigne les réactions exothermiques dues à l'énergie libérée lors de la transformation de phase :

$$Q_r = S_{endot} + S_{exot}$$

$$S_{endot} = K_c \rho_b [\Delta h_c^0 + (C_c - C_b)(T - T_0)] + K_g \rho_b [\Delta h_g^0 + (C_g - C_b)(T - T_0)] \\ + K_l \rho_b [\Delta h_l^0 + (C_l - C_b)(T - T_0)]$$

$$S_{exot} = K_c \rho_l [\Delta h_c^0 + (C_c - C_l)(T - T_0)] + K_g \rho_l [\Delta h_g^0 + (C_g - C_l)(T - T_0)]$$

#### 4. Modélisation du comportement thermomécanique

La revue bibliographique montre une grande dispersion des valeurs de  $k_\theta$  qui est due en grande partie aux différentes essences utilisées lors des tests thermomécaniques et à l'hétérogénéité du matériau bois issu d'une espèce végétale avec une grande variabilité.

En général, le choix du coefficient réducteur  $k_\theta$  suggère d'utiliser trois approximations linéaires différentes selon le type de sollicitations (traction, compression ou cisaillement). Ces approximations donnent  $k_\theta = 1$  à une température ambiante ( $T=20^\circ\text{C}$ ) où le comportement est totalement mécanique. Selon l'EC5 [41], à une température  $T=100^\circ\text{C}$ ,  $k_\theta$  qui s'applique pour la réduction du module d'Young varie entre 0,35 à 0,5. Pour la même température, il varie de 0,25 à 0,65 pour le cas de la réduction de la résistance mécanique. Cette variabilité rend le choix de la valeur de  $k_\theta$  plus difficile. Dans la suite de ce travail,

toutes les simulations ont été réalisées en adoptant  $k_\theta$  défini pour la tension selon l'approche réglementaire EC5 [41], la plus utilisée pour le dimensionnement des structures en bois. Ce choix est motivé par le fait que les surfaces exposées au feu se trouvent plus souvent en tension pour l'ensemble des exemples traités dans le cadre de cette thèse. Pour l'effet de ce coefficient de réduction  $k_\theta$  sur le comportement thermo-mécanique, il est conseillé de faire une étude paramétrique. Ce point n'est pas abordé dans cette étude.

L'implémentation du comportement thermomécanique d'un bois résineux dans le code ABAQUS [57] se fait selon les deux étapes suivantes :

- L'analyse thermique se fait en premier lieu à chaque instant  $t_{n+1}$ . Connaissant la température  $T_{n+1}$ , on calcule le coefficient de réduction  $k_\theta$  ;
- Une fois que les valeurs de  $k_\theta$  sont déterminées, on procède à l'analyse mécanique. L'intégration des lois mécanique et thermique dans ABAQUS [57] nécessitent l'identification des propriétés élastiques (modules d'Young, coefficients de Poisson et modules de cisaillement), plastiques (résistances et variables d'écrouissage isotrope), d'endommagement et les paramètres physiques (conductivité, chaleur spécifique et masse volumique).

L'approximation proposée pour le calcul du module d'élasticité  $E_i$  et de la résistance mécanique  $f_i$  s'écrit :

$$\begin{cases} E_i = E_{0i} k_\theta^E(T) \\ f_i = f_{0i} k_\theta^f(T) \end{cases} \quad (2.8)$$

$E_{0i}$  et  $f_{0i}$  sont respectivement le module d'élasticité et la résistance mécanique initiaux, suivant la direction (i), déterminés à une température ambiante  $T=20^\circ\text{C}$  ;  $k_\theta^E(T)$  et  $k_\theta^f(T)$  sont les fonctions de réduction du module d'élasticité et de la résistance mécanique, respectivement.

La variation du module d'Young du matériau bois a fait l'objet de plusieurs recherches [41],[42],[50] et [57]. Selon Schaffer [50], le module d'élasticité d'un bois sec décroît linéairement à des températures **élevées** est modélisé, d'après Guitard, par des équations liées à la masse volumique et l'élasticité dans les trois directions (radiale (**R**), longitudinale (**L**) et tangentielle (**T**)) par les équations suivante :

$$E_L = 13100 + 41700(\rho_w - \rho_{0w})$$

$$E_R = 1000 + 2370(\rho_w - \rho_{0w})$$

$$E_T = 636 + 1970(\rho_w - \rho_{0w})$$

Avec  $\rho_{0w}$  : la masse volumique initiale du bois.

## 5. Conditions initiales et conditions aux limites

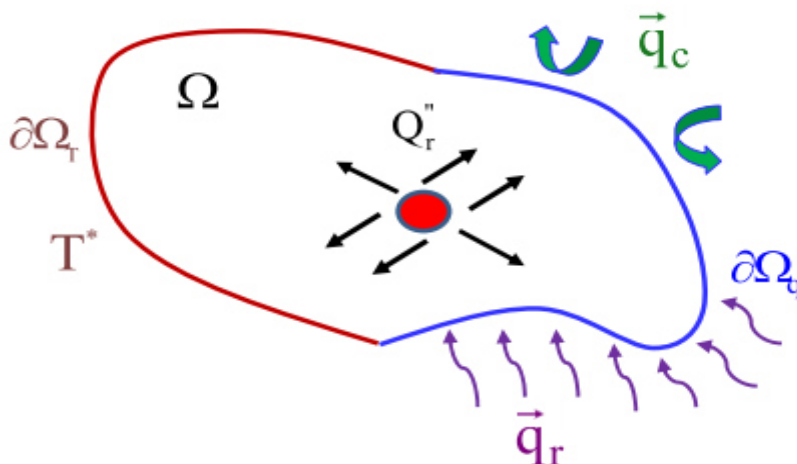
Soit un corps  $\Omega$ , de masse volumique  $\rho$ , de chaleur spécifique  $C_p$ , de conductivité thermique  $\lambda$  et de frontière  $\partial\Omega$ . Ce solide est soumis à (Figure 20) :

- Une source de chaleur  $Q_r''$ ;
- Un flux  $\vec{q}$  sur la frontière  $\partial\Omega_q$ ;
- Une température imposée  $T^*$  sur la frontière  $\partial\Omega_T$ , avec :

$$\partial\Omega = \partial\Omega_q \cup \partial\Omega_T \text{ et } \partial\Omega_q \cap \partial\Omega_T = \emptyset$$

La résolution de l'équation différentielle d'un problème de diffusion de chaleur nécessite la définition de la température initiale et des conditions aux limites du problème. La distribution de température initiale dans un échantillon en bois à l'instant  $t = 0$  est décrite par :

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0(x, y, z)$$



**Figure 20: Conditions aux limites d'un problème thermique.**

La température imposée  $T^*$  sur la surface  $\partial\Omega_T$  est définie par les conditions aux limites de type Dirichlet :

$$T(x, y, z, t) = T^*(x, y, z, t) \text{ sur } \partial\Omega_T$$

Les conditions aux limites de type Neumann données par le flux de chaleur sont :

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \text{ sur } \partial\Omega_T$$

L'échange thermique du milieu environnant avec les surfaces extérieures de l'échantillon exposé au feu s'effectue soit par convection, ou par rayonnement ou par la combinaison des deux mécanismes, et qui peut être exprimé moyennant les conditions aux limites suivantes :

$$\vec{q} = \vec{q}_r = \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \vec{n} \quad (\text{rayonnement})$$

$$\vec{q} = \vec{q}_c = h_c (T - T_\infty) \vec{n} \quad (\text{convection})$$

$$\vec{q} = \vec{q}_r + \vec{q}_c = \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \vec{n} + h_c (T - T_\infty) \vec{n} \quad (\text{combinaison})$$

$\vec{n}$  représente la normale à la surface de l'échantillon testé et elle est dirigée vers l'extérieur ;  $\vec{q}_r$  [W/m<sup>2</sup>] et  $\vec{q}_c$  [W/m<sup>2</sup>] sont respectivement les flux de chaleur causés par le rayonnement et la convection ;  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>] est le coefficient de transfert de chaleur par convection ;  $T_\infty$  [K] représente la température ambiante ;  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{K}^4)$  étant la constante de Stefan-Boltzmann ;  $\varepsilon$  est l'émissivité.

## 6. Méthode de résolution

Dans la présente simulation, nous avons opté à l'utilisation de la méthode des volumes finis et la méthode de Runge-Kutta d'ordre 2 implicite. La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation bien adaptée à la résolution numérique des équations de conservation de grandeurs extensives. Cette méthode possède diverses propriétés telles que la conservation locale des flux, le respect du principe du maximum, la possibilité de l'appliquer à des maillages quelconques (maillages structurés ou non structurés) qui la rendent attractive. Un autre avantage de cette méthode est qu'elle conduit à des schémas numériques robustes. Cela explique pourquoi cette méthode est largement employée dans

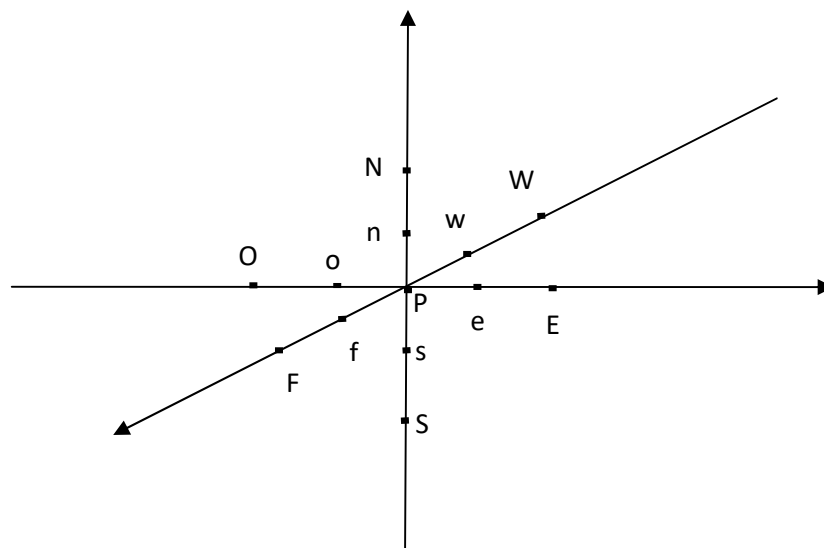
divers domaines : la mécanique des fluides, le transfert de chaleur et de masse, la simulation de réservoirs dans le génie pétrolier... .

Ces méthodes nécessitent deux étapes : maillage et discrétisation.

## 6.1 Maillage

A trois dimensions, le domaine est subdivisé en un nombre fini de volumes de contrôle qui sont constitués d'éléments de volume régulier.

Le maillage a la forme suivante :



**Figure 21: Maillage**

Où : P est le nœud principal,  $i$  l'indice de discrétisation suivant l'axe de "x",  $j$  l'indice de discrétisation suivant l'axe des "y".  $k$  l'indice de discrétisation suivant l'axe de "z".

Le temps sera indexé par l'indice "n". En général, les lettres E, O, N et S représentent respectivement l'Est, l'Ouest, le Nord et le Sud.

Les segments [PE] , [PF] et [PN] valent respectivement  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$ .

Par la suite, nous allons adopter les maillages suivants :

$$x(i) = (i - 1)\Delta x$$

$$y(j) = (j - 1)\Delta y$$

$$z(k) = (k - 1)\Delta z$$

## 6.2 Discrétisation des équations du problème

### 6.2.1 Conservation d'énergie

- En intégrant l'équation (2.2) suivant le volume de contrôle ( $dx dy dz$ ) et le long de l'intervalle de temps de longueur  $dt$ , il vient :

$$\begin{aligned} & \int \int \int \frac{\partial}{\partial t} (T(\rho_b c_b + \rho_c c_c \\ & \quad + \rho_l c_l)) dt dx dy dz \\ & = \int \int \int \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy dz dt + \iiint \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dy dx dz dt \\ & \quad + \int \int \int \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz dx dy dt + \int \int \int Q_r dt dx dy dz \end{aligned}$$

En calculant terme à terme, les intégrales de l'équation ci-dessus, conduisent à :

$$A = \int \int \int \frac{\partial}{\partial t} (T(\rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l)) dt dx dy dz$$

$$A = [[T(\rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l)]_p^{t+\Delta t} - [T(\rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l)]_p^t] \Delta x \Delta y \Delta z$$

Et :

$$B = \lambda \int \int \int \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy dz dt = \lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_\theta \right]^{t+\Delta t} \Delta t \Delta y \Delta z$$

$$\text{Or} \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e = \frac{T_E - T_P}{\Delta x} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_\theta = \frac{T_P - T_O}{\Delta x}$$

$$\text{D'où} \quad B = \lambda [T_E - 2T_P + T_O]^{t+\Delta t} \frac{\Delta t \Delta y \Delta z}{\Delta x}$$

$$\text{De même} \quad C = \lambda [T_N - 2T_P + T_S]^{t+\Delta t} \frac{\Delta t \Delta x \Delta z}{\Delta y}$$

$$D = \lambda [T_W - 2T_P + T_F]^{t+\Delta t} \frac{\Delta t \Delta x \Delta y}{\Delta z}$$

Finalement :

$$E = Q_r \Big|_p^t \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z$$

D'où :

$$\begin{aligned}
& (T_p^{t+\Delta t}(\rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l) - T_p^t(\rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l)) \Delta x \Delta y \Delta z \\
& = \lambda [T_E - 2T_p + T_\theta]^{t+\Delta t} \frac{\Delta t \Delta y \Delta z}{\Delta x} + \lambda [T_N - 2T_p + T_s]^{t+\Delta t} \frac{\Delta t \Delta x \Delta z}{\Delta y} + \lambda [T_F \\
& - 2T_p + T_b]^{t+\Delta t} \frac{\Delta t \Delta x \Delta y}{\Delta z} + Q_{rp}^t \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z
\end{aligned}$$

On pose :

$$f_p = \rho_b c_b + \rho_c c_c + \rho_l c_l$$

D'où :

$$\begin{aligned}
T_p^{t+\Delta t} (f_p \Delta x \Delta y \Delta z + 2\lambda \frac{\Delta t \Delta y \Delta z}{\Delta x} + 2\lambda \frac{\Delta t \Delta x \Delta z}{\Delta y} + 2\lambda \frac{\Delta t \Delta x \Delta y}{\Delta z}) & = T_p^t (f_p \Delta x \Delta y \Delta z + \lambda [T_E + \\
T_\theta] \frac{\Delta t \Delta y \Delta z}{\Delta x} + \lambda [T_N - T_s] \frac{\Delta t \Delta x \Delta z}{\Delta y} + \lambda [T_F + T_b] \frac{\Delta t \Delta x \Delta y}{\Delta z}) & + Q_{rp}^t \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z \\
f_{pt} & = f_p^t \Delta x \Delta y \Delta z + 2\lambda \Delta t \left[ \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} + \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \right]
\end{aligned}$$

Cette équation peut être mise sous forme d'équations algébriques par la méthode de Gauss-Seidel suivante :

$$T_{(i,j,k)}^{n+1} = \frac{\{ [T_{(i,j,k)}^n f_{p(i,j,k)}^n \Delta x \Delta y \Delta z + \lambda [T_{(i+1,j,k)}^n + T_{(i-1,j,k)}^n] \frac{\Delta t \Delta y \Delta z}{\Delta x} + \lambda [T_{(i,j+1,k)}^n + T_{(i,j-1,k)}^n] \frac{\Delta t \Delta x \Delta z}{\Delta y} + \lambda [T_{(i,j,k+1)}^n + T_{(i,j,k-1)}^n] \frac{\Delta t \Delta x \Delta y}{\Delta z} + Q_{r(i,j,k)}^n \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z \}}{f_{pt(i,j,k)}^n}$$

## 6.2.2 Conservation de la masse

Carl Runge (1856-1927) et Martin Kutta (1867-1944) ont proposé en 1895 de résoudre le problème de Cauchy. Les méthodes de Runge-Kutta présentent l'avantage d'avoir des ordres de plus en plus élevés tout en évitant le calcul des dérivées requises pour les méthodes de Taylor[116].

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial t} = f(y, t) \\ y(t = 0) = y_0 \end{cases}$$

D'après la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2 cette équation s'écrit :

$$Y^{k+1} = Y^k + \Delta t \cdot f(Y^{k+\frac{1}{2}}, t)$$

Or :

$$Y^{k+1/2} = Y^k + \frac{\Delta t}{2} \cdot f(Y^k, t)$$

On discrétise les différentes équations de la conservation de masse par la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2.

- Equation (2.3) de la conservation de masse de Bois :

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} = f(\rho_b, t)$$

Avec :

$$f(\rho_b, t) = -(K_c + K_g)\rho_b$$

D'après la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2 cette équation s'écrit :

$$\rho_b^{k+1} = \rho_b^k + \Delta t \cdot f(\rho_b^{k+\frac{1}{2}}, t)$$

Or :

$$\rho_b^{k+1/2} = \rho_b^k + \frac{\Delta t}{2} f(\rho_b^k, t)$$

- Equation (2.4) de la conservation de masse du Charbon :

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = f(\rho_c, t)$$

Avec :

$$f(\rho_c, t) = K_c \rho_b$$

D'après la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2 cette équation s'écrit :

$$\rho_c^{k+1} = \rho_c^k + \Delta t \cdot f(\rho_c^{k+\frac{1}{2}}, t)$$

Or :

$$\rho_c^{k+1/2} = \rho_c^k + \frac{\Delta t}{2} f(\rho_c^k, t)$$

- Equation (2.5) de la conservation de masse du Gaz:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = f(\rho_g, t)$$

Avec :

$$f(\rho_g, t) = K_g \rho_b$$

D'après la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2 cette équation s'écrit :

$$\rho_g^{k+1} = \rho_g^k + \Delta t \cdot f(\rho_g^{k+\frac{1}{2}}, t)$$

Or :

$$\rho_g^{k+1/2} = \rho_g^k + \frac{\Delta t}{2} f(\rho_g^k, t)$$

- Equation (2.6) de la conservation de masse du liquide:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} = f(\rho_l, t)$$

Avec :

$$f(\rho_l, t) = -K_v \rho_l$$

D'après la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2 cette équation s'écrit :

$$\rho_l^{k+1} = \rho_l^k + \Delta t \cdot f(\rho_l^{k+\frac{1}{2}}, t)$$

Or :

$$\rho_l^{k+1/2} = \rho_l^k + \frac{\Delta t}{2} f(\rho_l^k, t)$$

- Equation (2.7) de la conservation de masse de vapeur:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = f(\rho_v, t)$$

Avec :

$$f(\rho_v, t) = K_v \rho_l$$

D'après la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2 cette équation s'écrit :

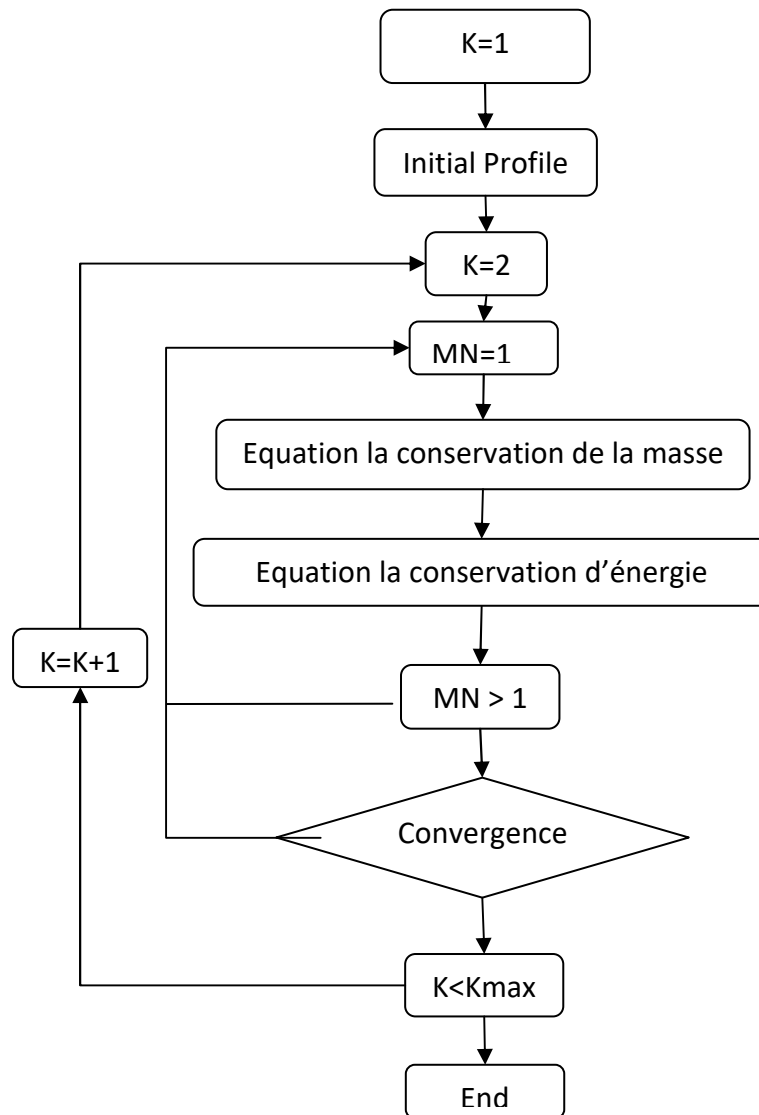
$$\rho_v^{k+1} = \rho_v^k + \Delta t \cdot f(\rho_v^{k+\frac{1}{2}}, t)$$

Or :

$$\rho_v^{k+1/2} = \rho_v^k + \frac{\Delta t}{2} f(\rho_v^k, t)$$

Nous avons obtenu dans cette partie un système des équations qui n'admettent pas de solutions analytiques d'où l'application des méthodes numériques s'avère obligatoire. Nous avons opté pour l'utilisation de la méthode des volumes finis et la méthode de Runge-Kutta implicite à l'ordre 2. Toutes les équations sont discrétisées selon un schéma centré dans l'espace et retardé dans le temps.

Les calculs sont amorcés à l'aide d'un profil initial qui satisfait aux conditions aux limites. L'utilisation de ces valeurs permet la détermination des profils de la température, les équations de conservation de masse en chaque étape de la dégradation. L'ensemble des équations algébriques sera résolu à l'aide d'un code numérique en Fortran, le processus itératif est répété jusqu'à la convergence de la solution [23] et [24]. Les différentes étapes de résolution sont résumées dans l'organigramme suivant :



**Figure 22: Organigramme**

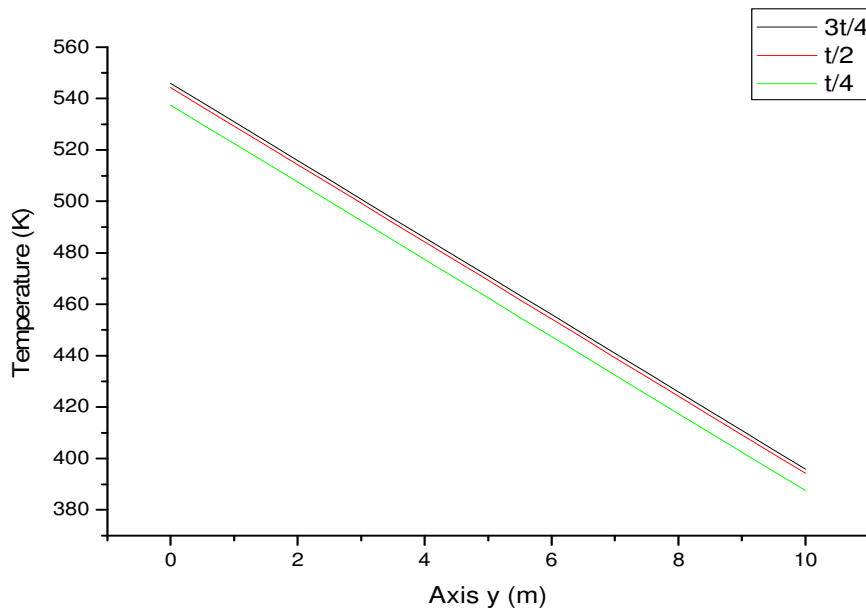
Des simulations réalisées de manière préliminaire, notamment dans le cadre de l'étude de la sensibilité du modèle, ont souligné l'interdépendance des valeurs des paramètres physique choisis et des conditions initiales. Différents jeux des données peuvent être utilisés afin de représenter le comportement thermique du bois sous action du feu (pyrolyse). Ainsi, une étude bibliographique a été entreprise pour estimer les valeurs des paramètres utilisés. Le Tableau 5, désigne les données obtenues par expérimentation, par la littérature et par les modèles numériques et analyse inverse.

**Tableau 5: Paramètres du modèle de pyrolyse de Shen [22].**

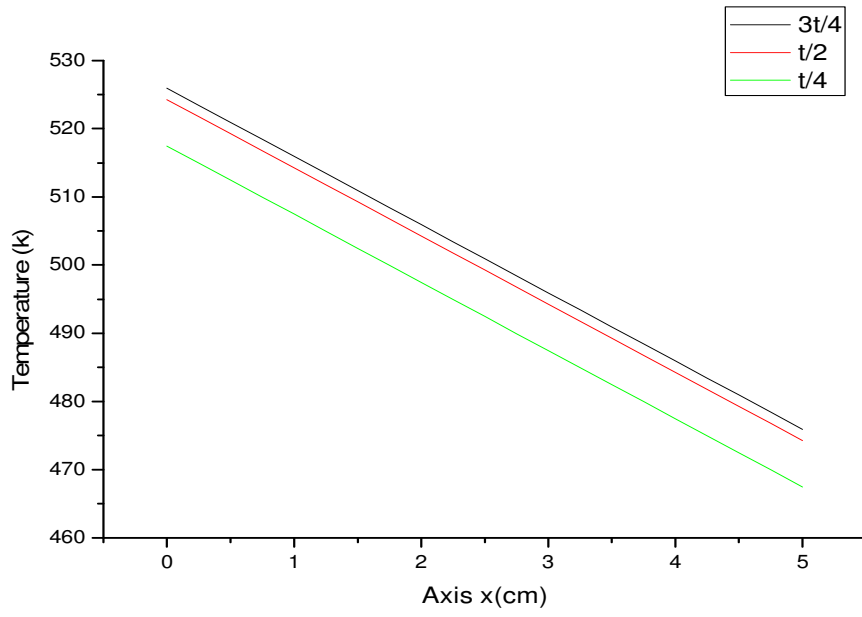
$c_b$ [J/(kg.K)]	$c_c$ [J/(kg.K)]	$c_l$ [J/(kg.K)]	$\lambda$ W/(m.K)	$T_0$ [K]	$C_g$ J/(kg.K)
1950	1390	4180	2.75	298	2400

## 7. Résultats et interprétations

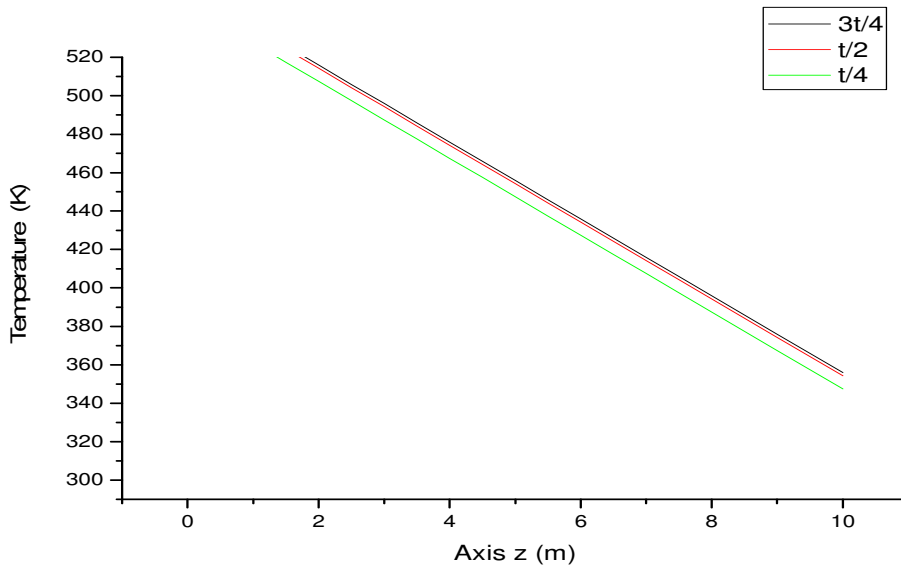
Nous examinons dans cette partie, les variations de la température et la masse volumique en chaque étape de la dégradation. Afin de valider le modèle numérique utilisé, on a entrepris une étude comparative avec les travaux d'autres auteurs.



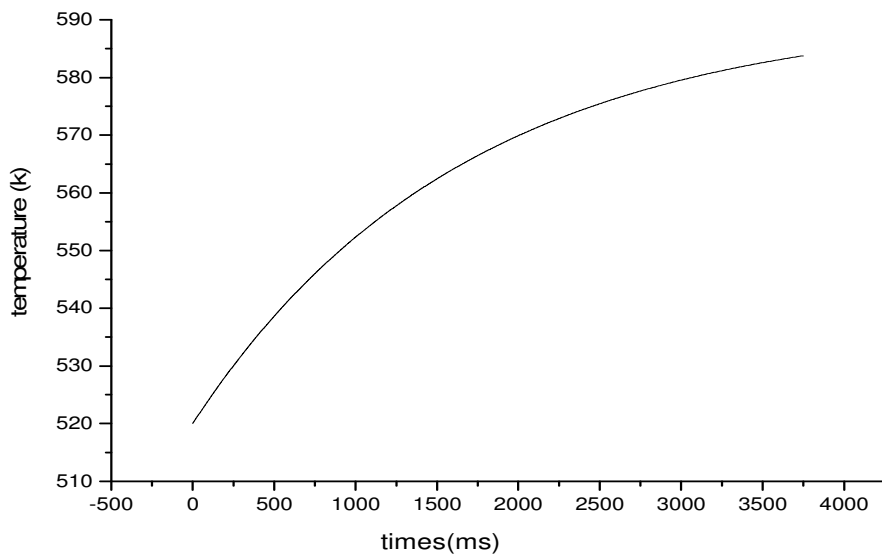
**Figure 23: Profile de température en fonction de l'axe y et du temps.**



**Figure 24: Profile de température en fonction de l'axe x et du temps.**

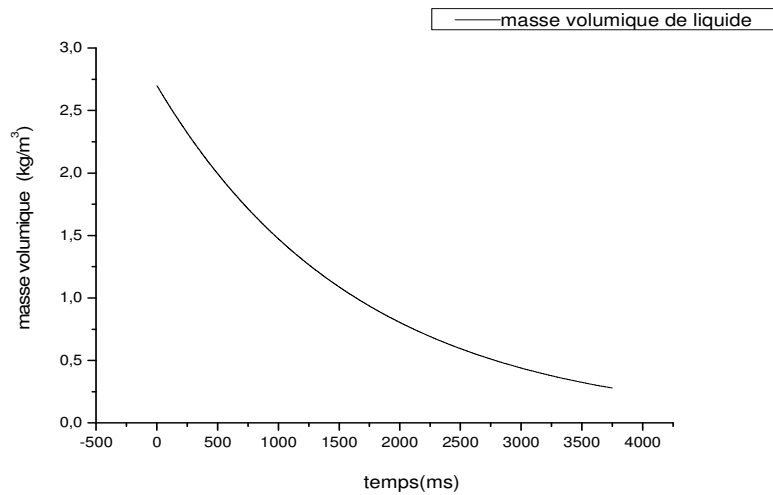


**Figure 25: Profile de température en fonction de l'axe z et du temps.**



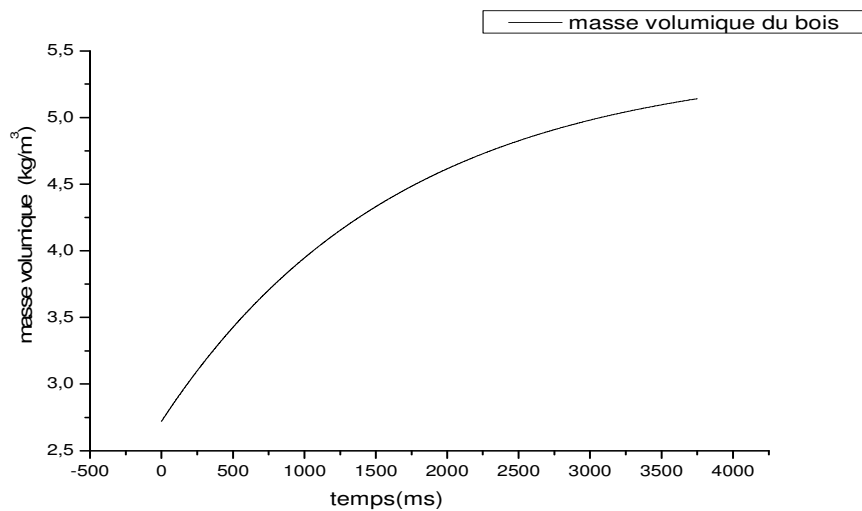
**Figure 26: Profile de température en fonction du temps.**

Dans ces figures(23),(24),(25)et(26) nous présentons les variations de la température en fonction des axes x, y et z et du temps, nous remarquons une diminution de la température par rapport à l'espace ce qui correspond à la première phase de séchage. L'élément en bois commence à brûler progressivement sans dégager de fumée. Après évaporation de l'eau à une température d'environ 100°C, les températures évoluent rapidement pour atteindre un niveau très élevé en fonction du temps. La seule explication possible en accord avec la littérature est la présence de réactions exothermiques influencées par différents facteurs tels que l'épaisseur ou la température de palier. Pour un bois humide, l'exo-thermicité des réactions commenceraient à des températures plus basses, l'eau occasionnant un meilleur transport de la chaleur vers l'intérieur jouant ainsi le rôle de catalyseur en activant les réactions d'hydrolyse (Bonhke 1993). Ces résultats est qualitativement semblable à ceux obtenus par d'autres auteurs travaillant dans des conditions similaires [81], [83], [84] et [85].



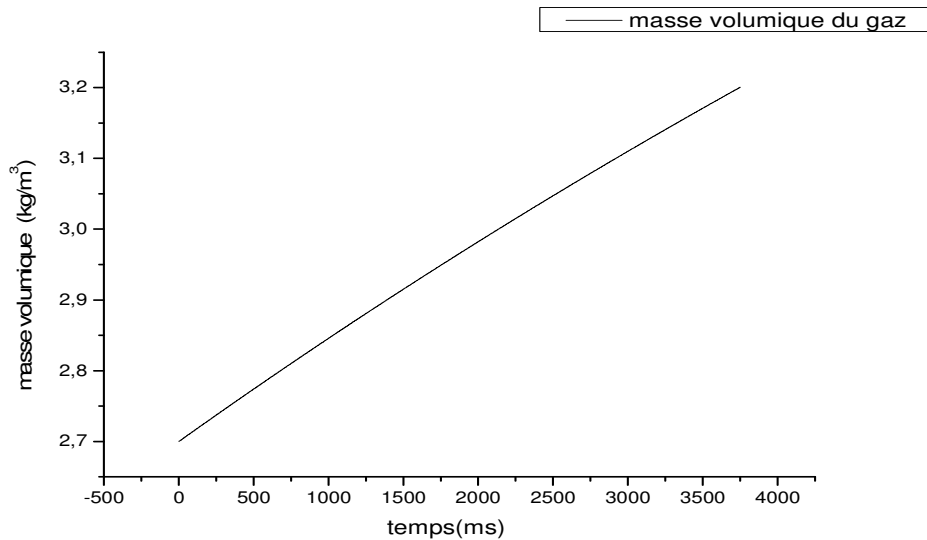
**Figure 27: Profile de masse volumique de liquide en fonction du temps.**

Nous présentons dans cette figure(27) la variation de masse volumique de liquide en fonction du temps, on remarque que cette grandeur diminue au cours du temps, car le séchage du bois provoque une vaporisation des liquides, ce qui montre la diminution de la quantité d'eau. Nous obtenons des résultats qualitativement similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [83], [84] et [85].



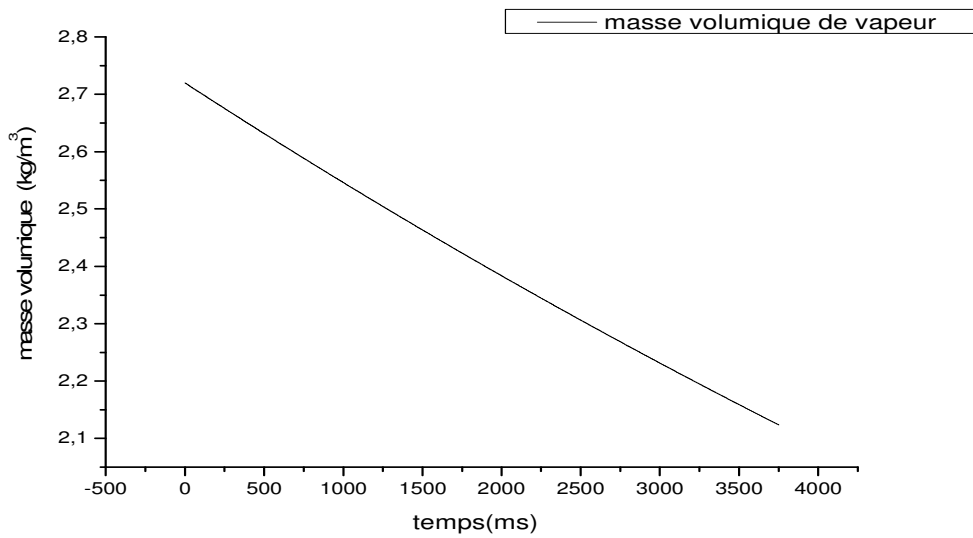
**Figure 28: Profile de masse volumique du bois en fonction du temps.**

Nous illustrons sur cette figure (28) la variation de la densité du bois en fonction du temps, nous constatons que cette quantité augmente avec le temps, cette augmentation est due à la dégradation de la matière organique dans le bios .Ce résultat est qualitativement semblable à ceux obtenus par d'autres auteurs travaillant dans des conditions similaires [81], [83], [84] et [85].



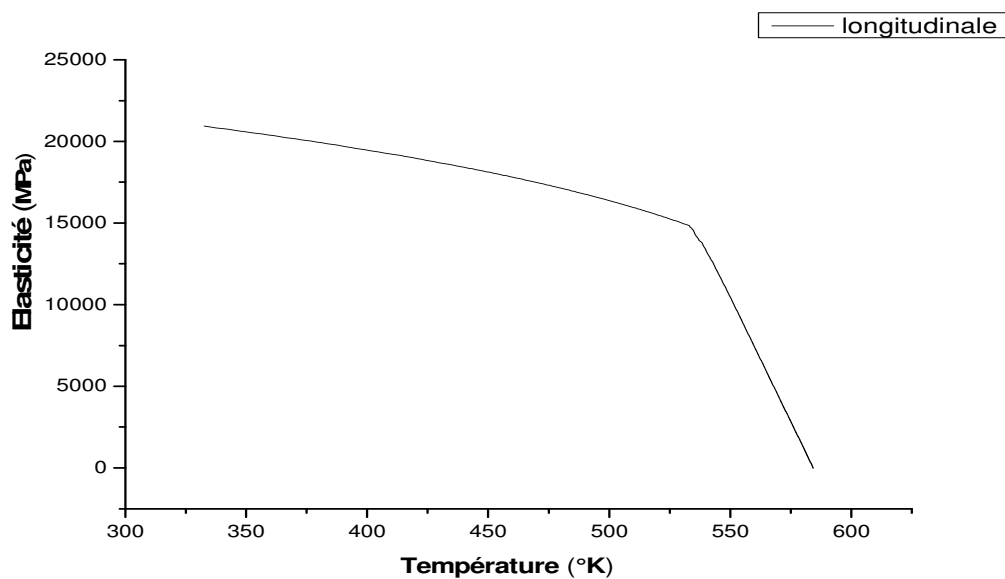
**Figure 29: Profile de masse volumique du gaz en fonction du temps.**

Nous illustrons dans cette figure(29) la variation de la masse volumique du gaz en fonction du temps, on remarque que cette grandeur augmente au cours du temps, cette augmentation est due à la dégradation de la matière organique du bois. Nous obtenons des résultats qualitativement similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [83], [84] et [85].

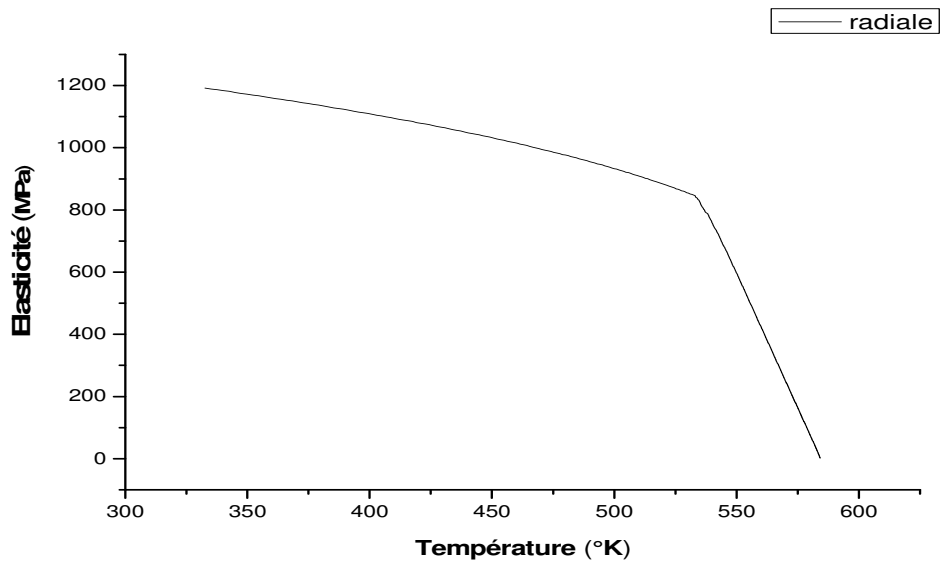


**Figure 30: Profile de masse volumique de vapeur en fonction du temps.**

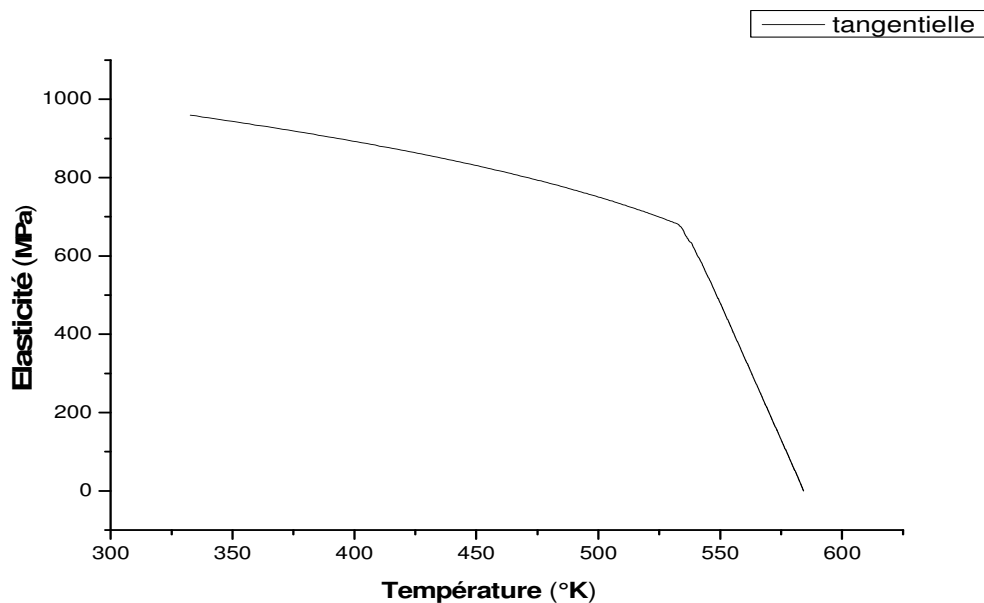
Nous illustrons dans cette figure (30) la variation de la masse volumique de vapeur en fonction du temps, on remarque que cette grandeur diminue au cours du temps, cette diminution est due à la vaporisation de la quantité d'eau contenue dans le bois. Ce résultat est qualitativement semblable à ceux obtenus par d'autres auteurs travaillant dans des conditions similaires [81], [83], [84] et [85].



**Figure 31: Profile de l'élasticité longitudinale du bois en fonction de la température.**



**Figure 32: Profile de l'élasticité radiale du bois en fonction de la température.**



**Figure 33: Profile de l'élasticité tangentielle du bois en fonction de la température.**

Nous présentons dans ces figures(31, 32 et 33) les variations de l'élasticité tangentielle, radiale et longitudinale en fonction de la température, on remarque que cette grandeur diminue au cours de l'augmentation de la température, Les résultats obtenus sur les échantillons à 8 % de teneur en eau donnent un comportement différent des échantillons secs. Deux phases de déformation sont observées, une première phase de dilatation

thermique puis une phase de retrait. La phase de dilatation thermique se situe entre 300 °K et 540 °K et correspond à une expansion du matériau, nous observons la seconde phase de retrait avec une augmentation de vitesse de déformation thermique qui peut s'expliquer par le début de la dégradation thermique du matériau (pyrolyse).

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux phénomènes physiques qui gouvernent un comportement thermomécanique du matériau bois. La loi mécanique est modélisée dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. Elle tient compte du couplage entre le comportement élastique orthotrope, l'écoulement plastique anisotrope à l'écrouissage non linéaire isotrope couplé à l'endommagement isotrope. L'écoulement plastique est décrit par deux critères de plasticité (Hill (1948) et Hoffman (1967)). La loi thermique est décrite par l'équation standard de la chaleur qui nécessite la connaissance : de la variation de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la masse volumique en fonction de la température ; de la dégradation thermique du bois au cours des phases de séchage, de pyrolyse et de combustion. En particulier, nous nous sommes intéressés à l'étude de deux différents types de modèles thermiques (simplifiés et cinétiques). En dernier, le couplage thermomécanique est réalisé, selon l'approche réglementaire EC5 [41] relatif à la résistance au feu des structures en bois, en appliquant le facteur de réduction  $K_q$  sur la résistance mécanique d'un bois résineux. Le chapitre 3 sera consacré à l'intégration numérique des équations constitutives du modèle thermomécanique décrit en détail dans ce chapitre.

## ***CHAPITRE III : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT DU BOIS SOUS L'EFFET DU FEU***

---

### **Introduction**

Du fait qu'il soit de nature biologique issu d'espèces végétales vivaces (les arbres), le bois présente plusieurs caractéristiques avantageuses comme la faible consommation d'énergie nécessaire à sa mise en œuvre, et ses caractères renouvelable et recyclable qui lui permettent de s'adapter aux domaines d'applications les plus disparates.

Comparé aux matériaux conventionnels tels que le béton et l'acier utilisés dans la construction, le bois, qui est un matériau naturel souple et léger, possède de nombreuses qualités qui ont font un excellent matériau de construction, une multitude des possibilités de réalisations et d'expressions architecturales.

Son utilisation présente des avantages écologiques, esthétiques, techniques et économiques, ce qui justifie son exploitation dans les constructions durables. Ce matériau offre notamment un bon rapport épaisseur/performances thermique et mécanique. L'utilisation croissante du bois dans le domaine de la construction nécessite la connaissance du comportement de ses structures au feu. Il est ainsi important de s'intéresser à la caractérisation des propriétés intrinsèques mécaniques et physico-thermiques du matériau bois pour garantir la fiabilité et la stabilité des structures en bois.

Pour répondre aux exigences de la réglementation thermique relative au comportement au feu du bois dans le domaine de la sécurité incendie marocaine, il faut connaître le comportement au feu du bois. Dans ce cas, on doit étudier la réaction et la résistance au feu du bois en se basant sur des observations expérimentales réalisées uniquement sur les matériaux du bois qui sont les plus utilisés dans la construction au Maroc comme le Frêne, Sapin rouge, Hêtre, chêne et le Cèdre.

## 1. Principes de l'EXAO

Depuis l'apparition des ordinateurs sur le marché, ils sont devenus de plus en plus présents dans notre société. Ils constituent clairement une composante essentielle, et l'un des rôles du milieu de l'éducation est de trouver le moyen d'en faire bon usage. En effet, il existe plusieurs applications pédagogiques disponibles sur l'ordinateur utilisées par les étudiants. On s'intéresse ici à l'EXAO.

L'Expérimentation Assistée par Ordinateur (EXAO) existe depuis plus de 40 ans (NONNON et LAURENCELLE, 1972) [1]. L'EXAO est un environnement d'apprentissage constitué principalement d'un ordinateur, d'un logiciel spécialisé, d'une interface électronique d'acquisition et de capteurs (NONNON, 1986) [1]. Lors d'une expérimentation, le ou les capteurs (ex : luminosité, température, pression, etc.) mesurent la variation de grandeurs physiques. Un signal électrique est envoyé à l'interface d'acquisition qui convertit le signal pour le transmettre à l'ordinateur. Un logiciel traite le signal et affiche les mesures à l'écran notamment sous forme de graphiques.

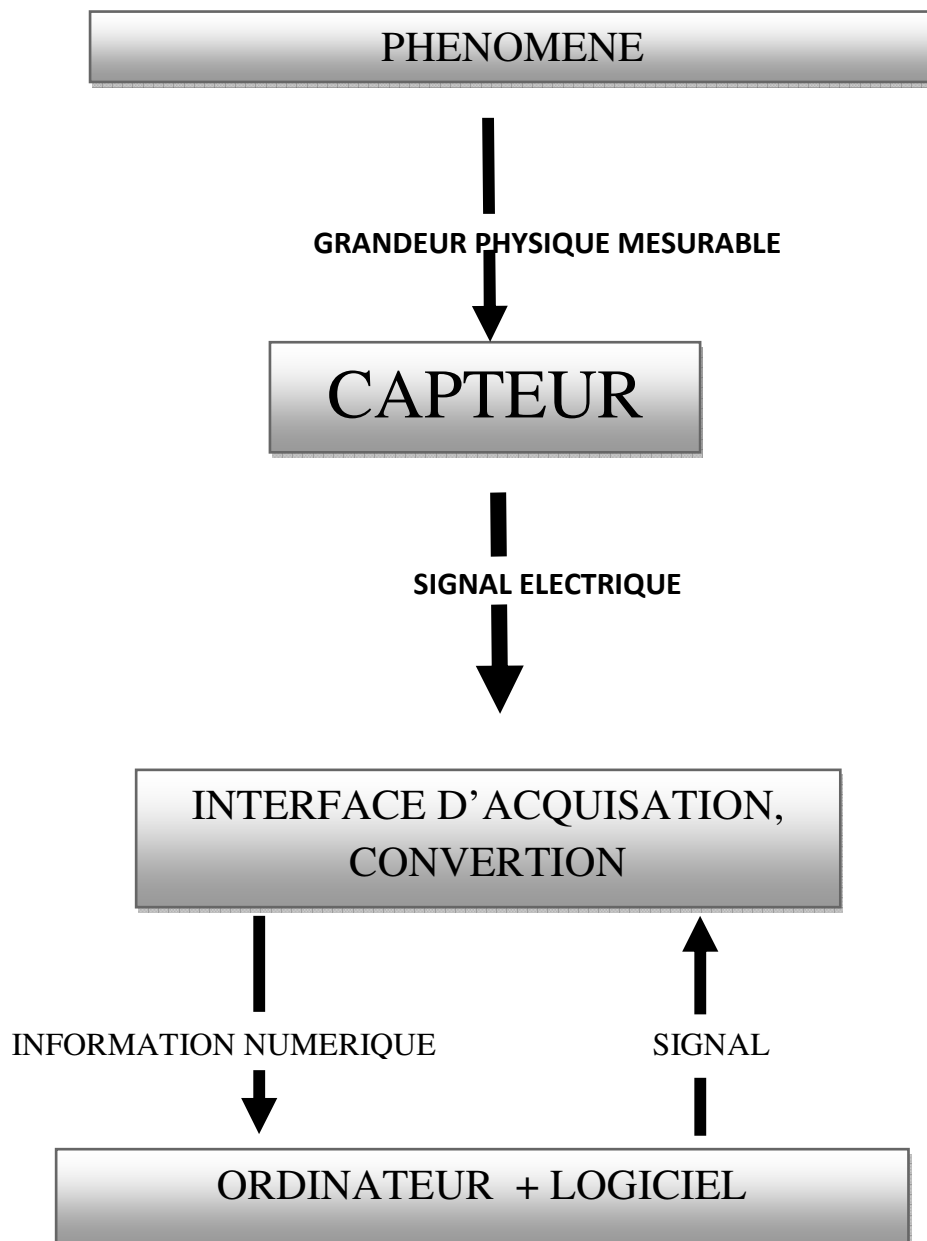
EXAO ne diffère pas fondamentalement de l'expérimentation telle qu'elle était menée classiquement [1], avec divers instruments de mesures et appareils de laboratoire, mais l'incorporation de l'ordinateur dans une chaîne de mesure apporte de nombreux avantages. L'acquisition des données peut être automatisée, les résultats des mesures peuvent être sauvegardés aisément et traités par divers outils logiciels. La présentation des résultats sous forme graphique est considérablement simplifiée ; ce qui facilite l'analyse et l'exploitation pédagogique. De plus, on peut suivre des phénomènes rapides ou longs qui prennent plusieurs jours d'acquisition.



**Figure 34: Montage de base pour l'EXAO avec connexion entre les composantes [1].**

## 1.1 Les éléments de l'EXAO

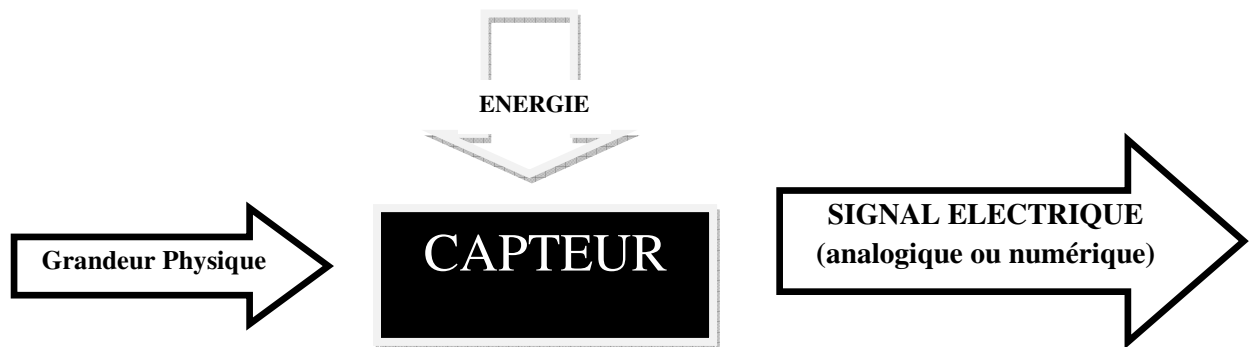
En physique, chaque élément important de la chaîne de mesure automatisée peut être envisagée comme objet d'étude. DUREY dit que l'EXAO permet également de faire des explorations systématiques et des comparaisons : en chimie par exemple, comparer des propriétés sur des échantillons différents [3].



**Figure 35: Principe et composants du système [5].**

### 1.1.1 Capteurs

Un capteur mesure les variations d'une grandeur physique provenant d'un phénomène et produit un signal électrique analogique dont la valeur est proportionnelle à celle du paramètre mesuré. Il transforme une grandeur physique en une grandeur normée, généralement électrique, soit détection avec contacte ou sans (par radiation, pression, etc.), qui peut être interprétée par un dispositif de contrôle commande [2].



**Figure 36: Schéma de fonctionnement des capteurs**

#### 1.1.1.1 Types des capteurs

- Capteurs actifs : Ce sont des capteurs que l'on pourrait modéliser par des générateurs. Ainsi, ils génèrent soit un courant, soit une tension en fonction de l'intensité du phénomène physique mesurée. Ce sont des composants qui permettent d'augmenter la puissance d'un signal (tension, courant, ou les deux).
- Capteurs passifs : Ce sont des capteurs qui ne se basent pas sur l'importation de l'énergie extérieure pour fonctionner. Ainsi, ces derniers sont modélisables par une impédance, Autrement dit, la variation du phénomène physique étudié (mesurée) engendre une variation d'impédance.

#### 1.1.1.2 Caractéristiques des capteurs

Un capteur est caractérisé par plusieurs critères :

- Sa rapidité : Temps de réaction du capteur qui est lié à sa bande passante ;
- Sa linéarité : Représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure ;

- Sa sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée ;
- Son étendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur ;
- Sa résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur ;
- Son domaine de mesure ;
- Sa stabilité.

### 1.1.1.3 Exemple des capteurs utilisés

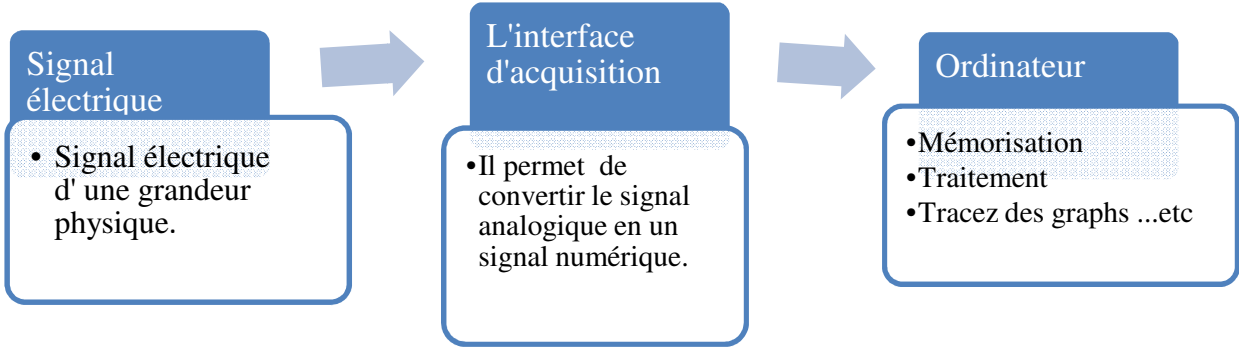
Dans le cadre de montage des expériences pratique nous présentons les capteurs qu'ai fabriqués par EXAO :

- Electrode de CLARK (oxymètre) ;
- Thermomètre ;
- Débitmètres ;
- Electrode sélectives (ions) ;
- Amplificateur différentiel ;
- Dynamomètres (différentes gammes) ;
- Capteurs de pression (absolu, différentiel) ;
- Hygromètre ;
- Luxmètre ;
- PH-mètre ;
- Conductimètres ;
- Capteurs CCD.

### 1.1.2 Interface

L'interface est l'appareil qui fait le lien entre les capteurs et l'ordinateur, il se présente souvent sous forme d'une carte enfichable, ou d'un petit appareil qui se branche à l'ordinateur. L'interface peut traduire ou régulariser le signal, selon le capteur et le système utilisé [2].

La conversion s'effectue à l'aide d'un CAN « Convertisseur Analogique-Numérique ». Ce dernier est considéré comme un dispositif électronique qui permet la conversion d'un signal analogique en un signal numérique. Ce CAN peut aussi traiter les signaux analogiques et numériques [2].



**Figure 37: Interface de l'EXAO.**



**Figure 38: Circuit de l'interface EXAO.**

Avec :

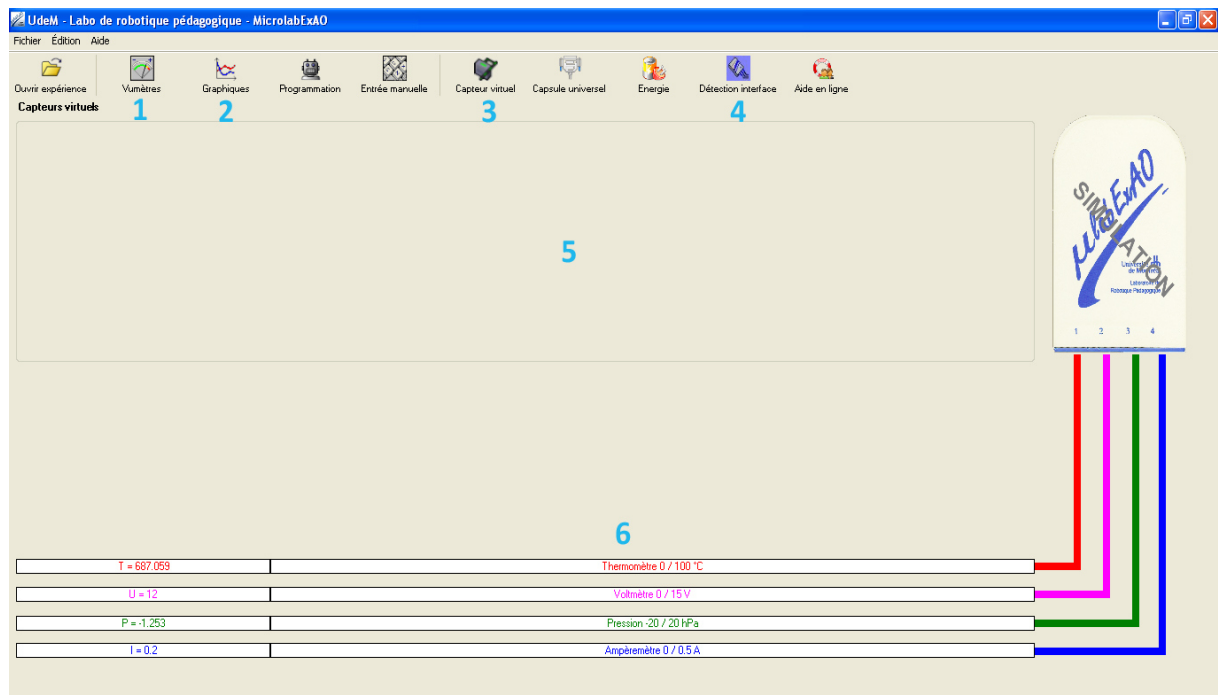
- 1-Porte série.
- 2-Alimentation.
- 3-Entré des capteurs.
- 4 -Capsule qui relie l'interface au capteur.

### 1.1.3 Ordinateur

Il permet de mémoriser et de traiter les mesures grâce à des logiciels dédiés. Ces derniers permettent d'effectuer de façon automatique de nombreux calculs : dérivation, intégration, modélisation, lissage, intégration d'équations différentielles, analyse spectrale, ce calculs fait par le logiciel d'acquisition Microlab-EXAO [4].

### 1.1.4 Le logiciel d'acquisition Microlab-EXAO

Le logiciel Microlab permet de mémoriser l'acquisition de quatre capteurs en effectuant de façon automatique un traitement rapide et fiable : dérivation, intégration, modélisation, lissage, intégration d'équations différentielles. Ainsi, il peut créer des capteurs virtuels qui sont en fonction des capteurs utilisés. Au surplus nous pouvons varier la vitesse d'acquisition pour arriver à bien analyser les phénomènes rapides ou lentes. Sans oublier que grâce au logiciel Microlab, nous pouvons calibrer les capteurs, afficher les courbes d'acquisition ou étalonnage et de sauvegarder l'expérience sous des formats compatibles [1].



**Figure 39: Logiciel Microlab-EXAO.**

- **1-Vumètres** : affiche les valeurs acquies dans l'aiguille et ajustée selon la valeur de départ désiré ;
- **2-Graphiques** : pour démarrer l'acquisition sous forme graphique au temps ;
- **3-Capteur virtuel** : création d'un capteur virtuel ;
- **4-Détection de l'interface** : permet de lancer la détection de l'interface si elle n'est pas ;
- **5-Capteur virtuelle** : zone des capteurs virtuelle crée ;
- **6-Zone de capteur** utilisée à l'interface.

**Création du capteur virtuel :**

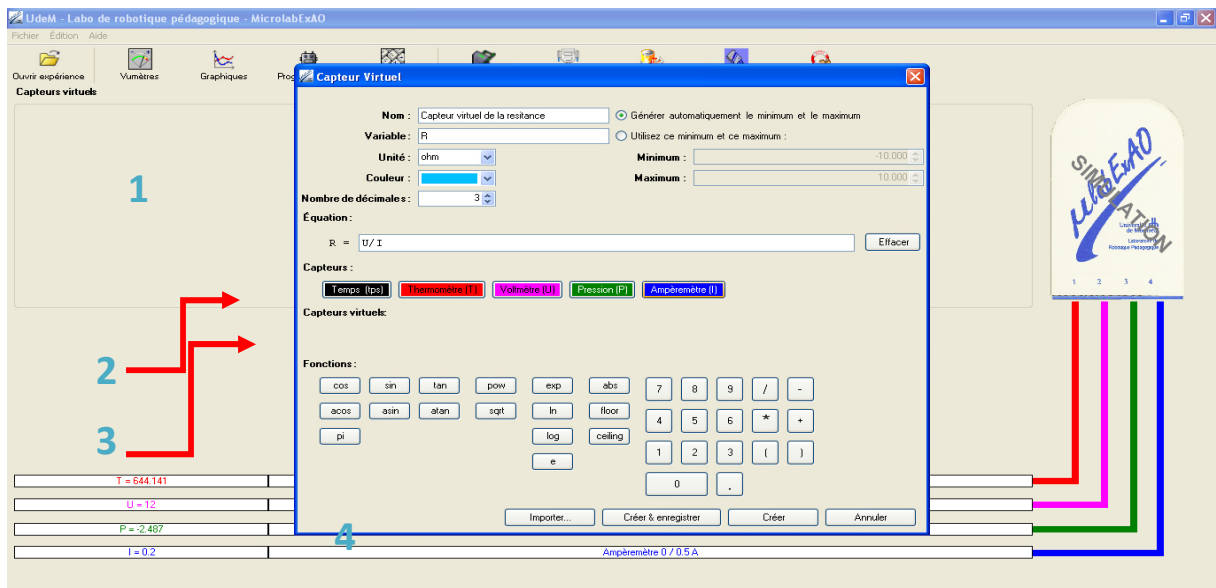


Figure 40: Exemple de création d'un capteur virtuel.

- 1-Information sur le capteur (variable, nom, unité...);
- 2-L'équation qui peut dépendre des capteurs réels;
- 3-Les capteurs réels utilisés;
- 4-Fonction usuelles.

Vue graphique :



Figure 41: Logiciel Microlab-EXAO en mode graphique.

## 1.2 Présentation de l'essai

Dans le but de valider notre modèle, des essais à l'échelle du produit ont été réalisés concernant la résistance au feu. Nous confrontons ici la simulation du comportement thermique pour les cinq types du bois les plus utilisés au Maroc comme éléments et matériaux de construction.

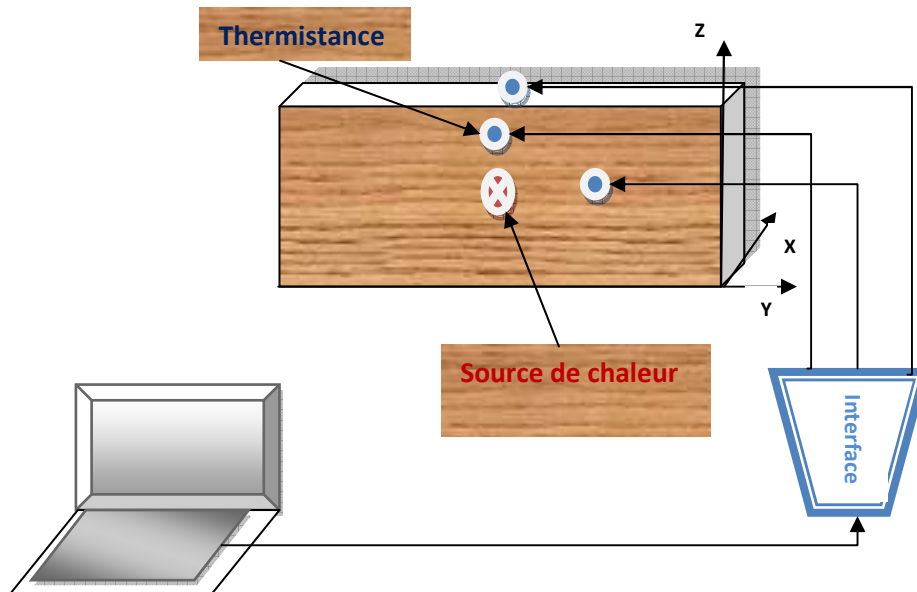
## 1.3 Description de l'étude expérimentale

L'essai a été réalisé sur cinq échantillons du bois de dimensions 100 x 40 mm x ép. (ép. = épaisseur allant de 20 mm). L'élévation de température se fait par un fer à souder qu'on a adopté comme source de chaleur, cette outil chauffant fourni un flux de chaleur constant (figure 42) ce qui donne un chargement thermique conventionnel.



**Figure 42: Source de chaleur (fer à souder).**

L'échantillon était instrumenté à l'aide de thermocouples dans toutes les faces (Figure 43), lié par le matériel EXAO qui se comporte d'un ordinateur associé à une interface et différents capteurs. Il permet de mesurer en temps réel des variations de divers paramètres sur des individus, des cellules, des matériaux. Dans notre étude nous exploitons l'EXAO pour avoir le profil de la température dans différentes positions d'un échantillon de bois. La prise de mesure se fait par des thermistances (capteurs de températures) et les résultats obtenus sur ordinateur de la température sont représentées sous forme de courbe en fonction du temps.



**Figure 43: Montage des essais expérimentaux.**

Afin d'assurer le suivi et la traçabilité de la gestion de température d'un matériau sous l'effet d'une source de chaleur. Une **thermistance** est l'un des principaux capteurs de température utilisés en électronique basé sur la variation de la [résistance électrique](#) en fonction de la température (figure 44). Notre expérience nécessite 3 thermistances qui sont placées sur la même distance de la source «  $Dx = Dy = Dz$  » afin de capter la température dans différentes directions de l'échantillon.



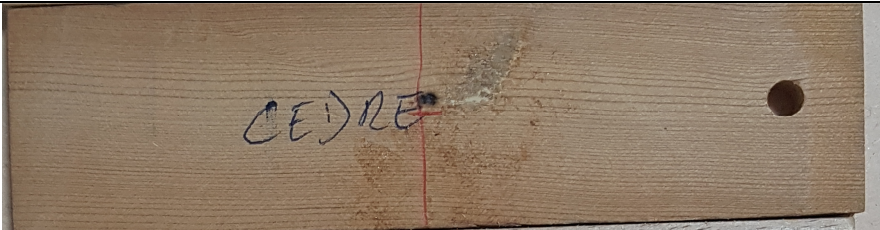
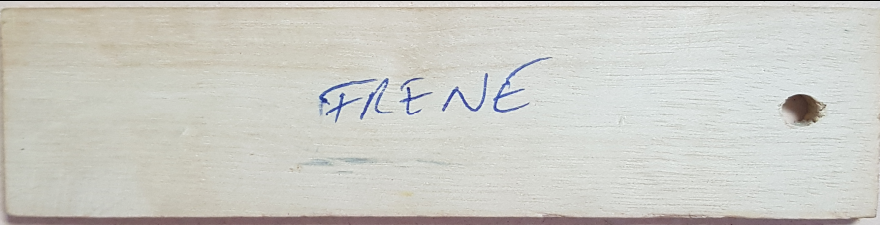
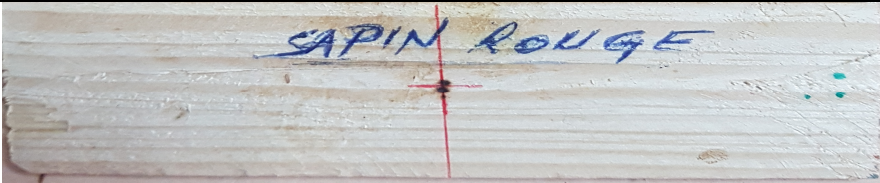
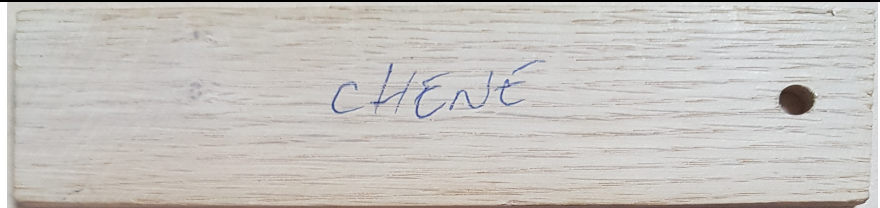
**Figure 44 : thermistance.**

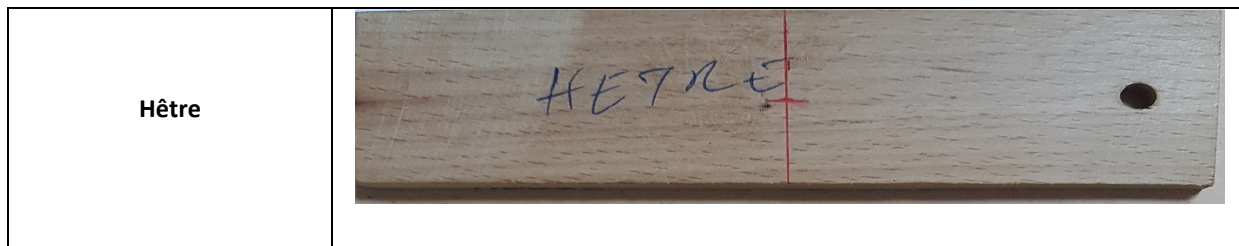
En [informatique](#) et en [électronique](#), une interface est un dispositif qui permet des échanges et interactions entre différents acteurs. Une [interface en informatique](#) est un arrangement de conception logicielle pour permettre le [couplage](#) de composants.

## 2. Résultats et discussion

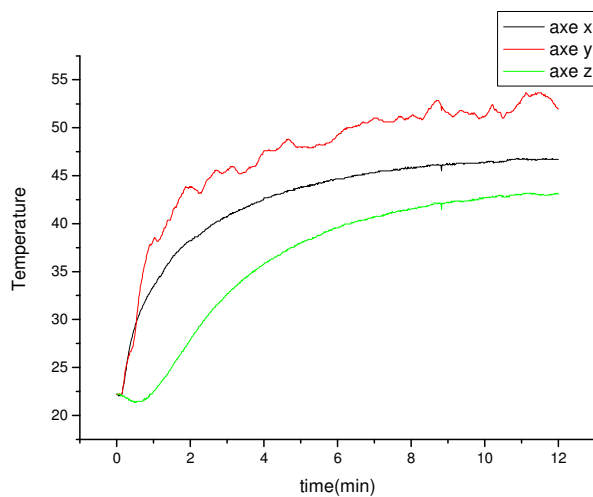
Les résultats de simulation sont présentés en termes de températures, et sont comparés aux mesures expérimentales. La déformée du maillage et les isothermes obtenus à 12 minutes de simulation (soit le temps de ruine de l'échantillon obtenu lors de l'essai) sont représentés sur le tableau et les Figures-après:

**Tableau 6:Types d'échantillons étudiés.**

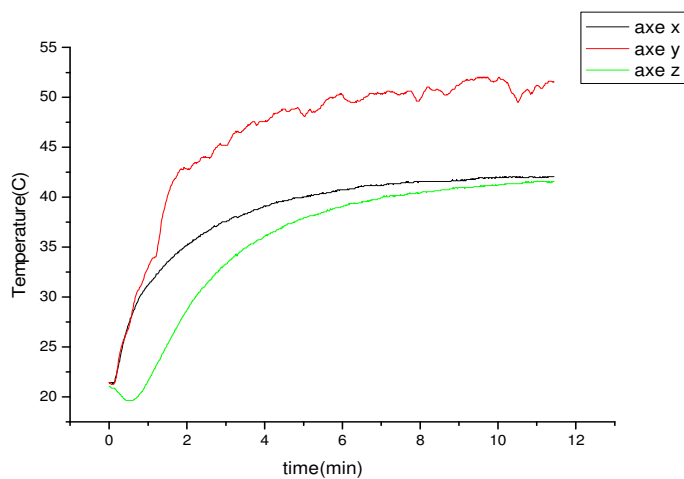
Type d'échantillon	Photo d'échantillon
Cèdre	
Frêne	
Sapin rouge	
Chêne	



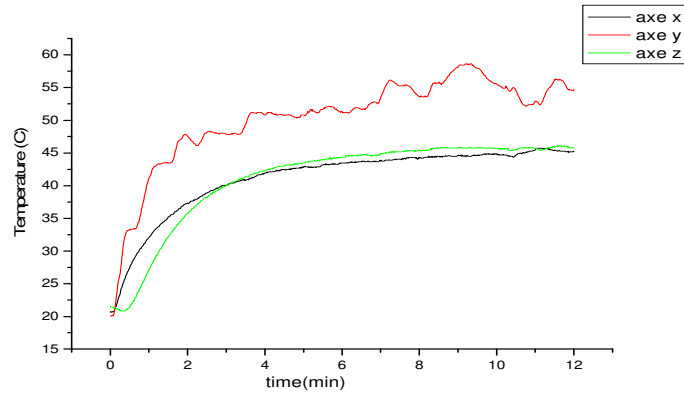
Résultats et interprétations :



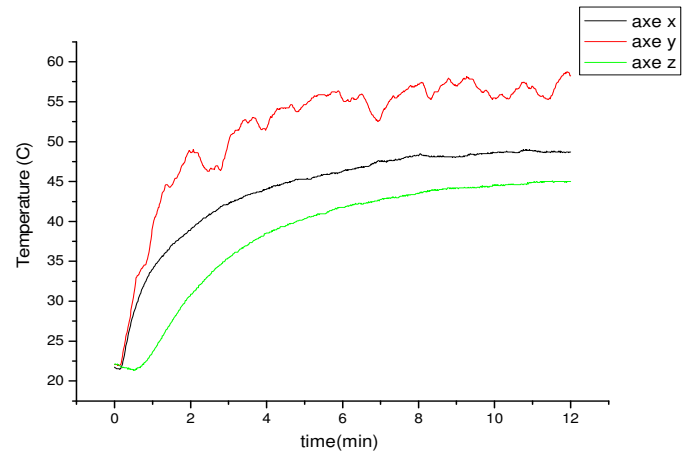
**Figure 45: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Cèdre.**



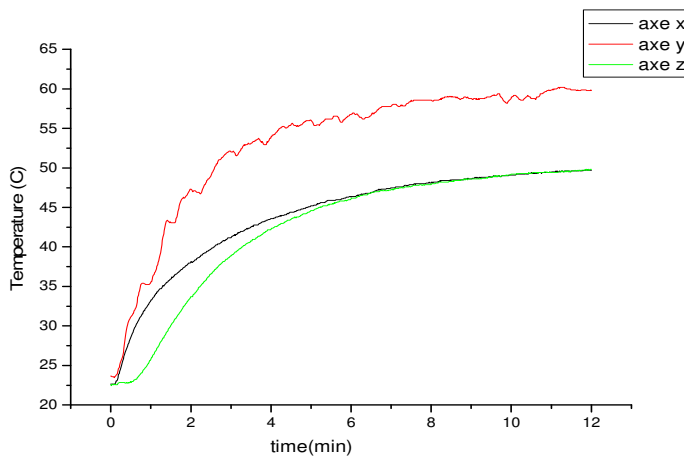
**Figure 46: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois: Frêne.**



**Figure 47: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Sapin rouge.**

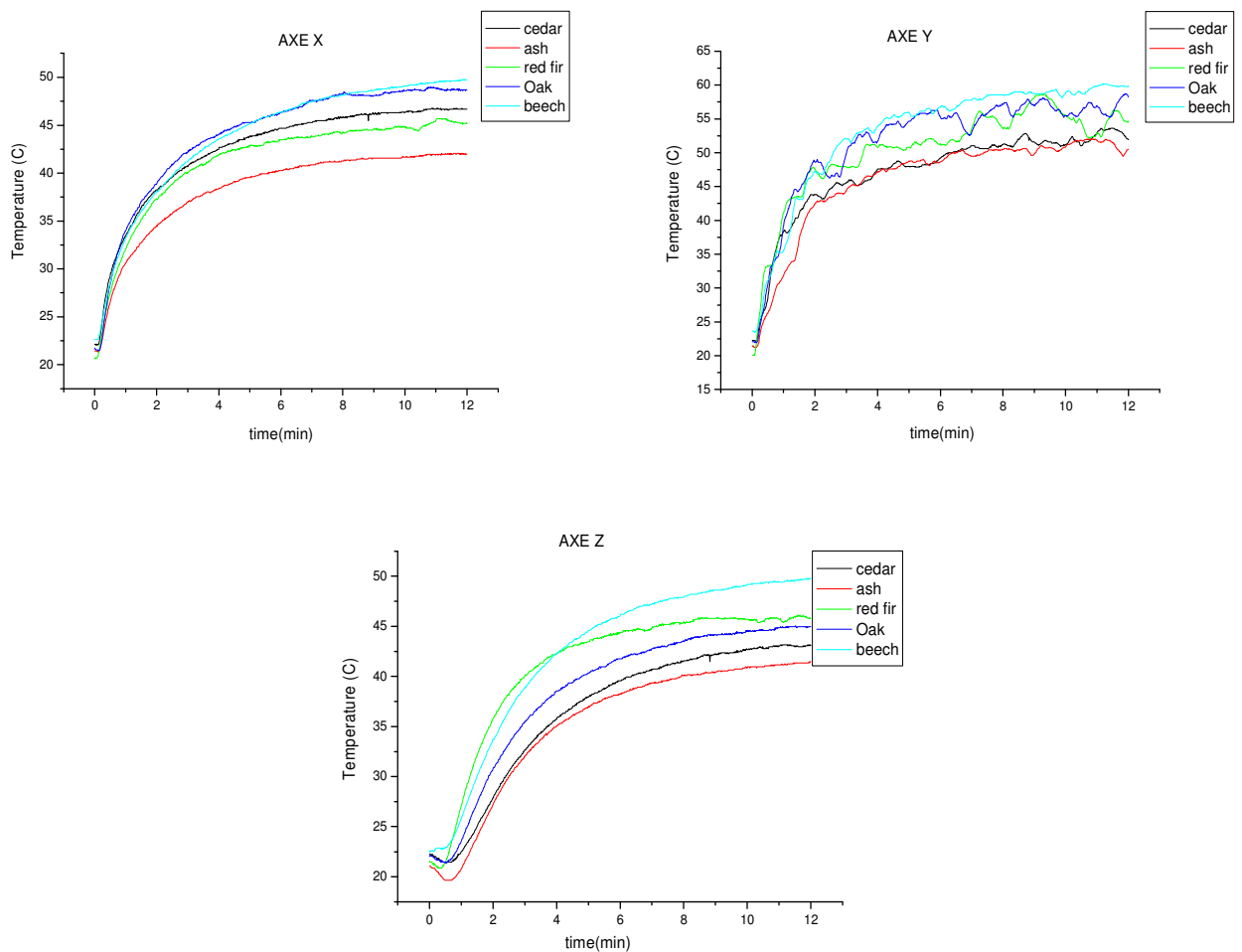


**Figure 48: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Chêne.**



**Figure 49: Profil de la température en fonction du temps suivant les trois directions pour le bois : Hêtre.**

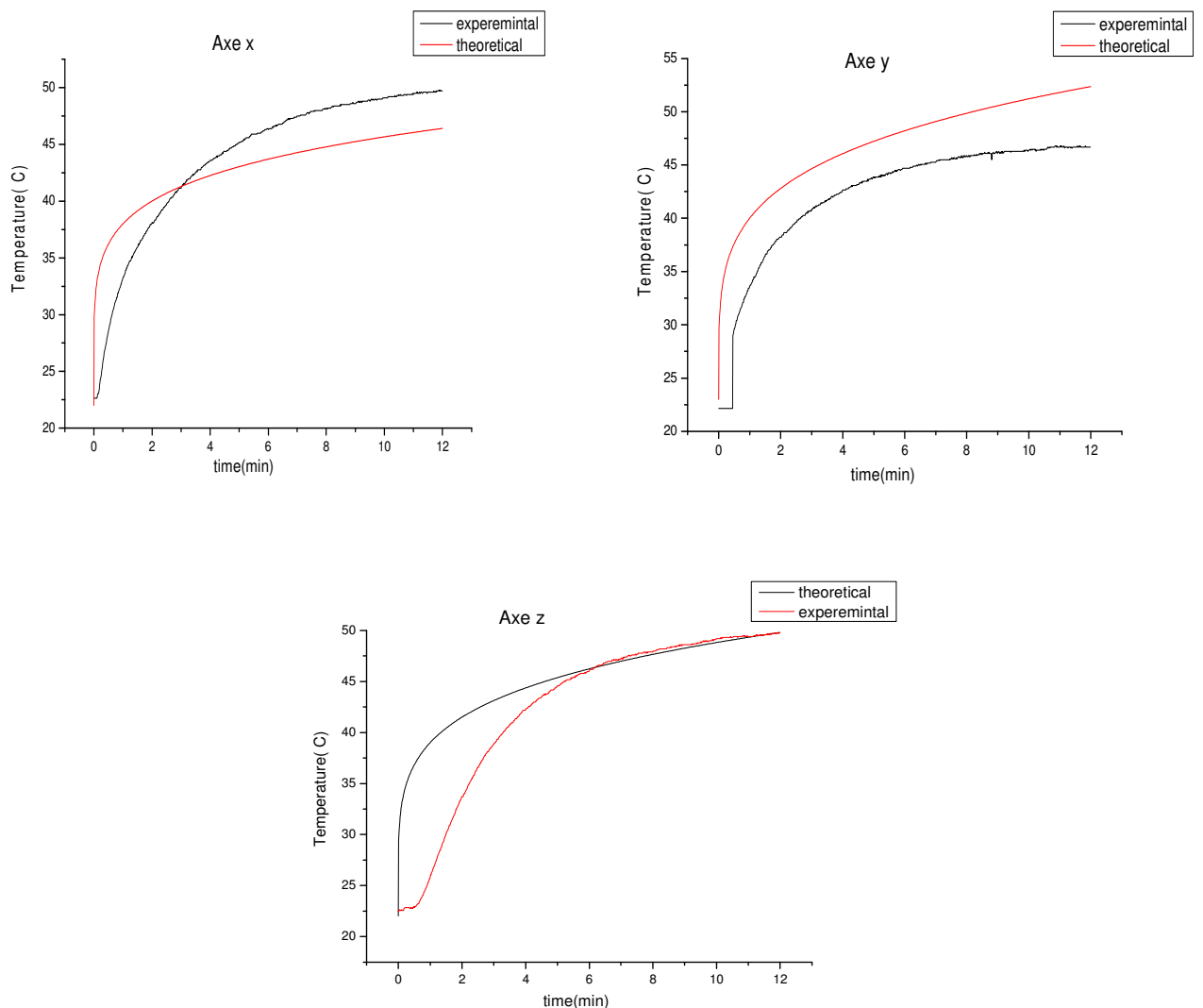
L'évolution de la température en fonction du temps et suivant les trois directions de l'espace a été visualisée sur les figures (45, 46, 47, 48 et 49). Nous constatons une augmentation nette de la température au fur et à mesure que le temps s'écoule. Cette augmentation trouve son explication dans le fait que c'est la première phase de séchage, auquel bois commence à brûler progressivement sans dégager de fumée. On note aussi que cette phase nécessite une alimentation continue en combustible (charge d'incendie constamment renouvelée).



**Figure 50: Comparaison de l'évolution du profil de la température en fonction du temps suivant les directions x, y et z pour cinq échantillons.**

D'autre part, l'interprétation des résultats de la figure 50, montre que le bois Hêtre est le plus résistant à la chaleur. On constate aussi que les températures captées suivant la direction Y sont plus significatives que dans les deux autres directions Z et X. Ceci peut être

expliqué par le fait que la propagation de la chaleur est plus favorisée dans la direction des fibres (ici direction y).



**Figure 51: Comparaison des profils de la température issus de l'étude numérique et expérimentale en fonction du temps dans les trois directions x, y et z pour le bois : Hêtre.**

Sur la figure 51, nous avons illustré l'évolution de la température en fonction du temps et suivant trois directions pour le bois « Hêtre ». La comparaison des résultats issus de la simulation numérique et de l'expérience montre un petit écart entre les deux courbes. Cet écart peut être expliqué par le fait que dans l'expérience, beaucoup de facteurs peuvent entrer en jeu pour influencer la réaction exothermique. Parmi d'autres, les facteurs sont tels que l'épaisseur du bois et la température. Ce qui joue sur la qualité des résultats de l'expérience.

## Conclusion

L'étude thermique de certains matériaux de construction comme le bois, est complexe du fait de la dégradation thermique de la matière et les répercussions qu'elle peut induire d'un point de vue thermique et mécanique (modification des propriétés du matériau). Cela est d'autant plus vrai pour des matériaux ligno-cellulosiques, où l'évaporation de l'eau, la pyrolyse du bois et la dégradation des propriétés physiques et mécaniques en fonction de la température doivent être convenablement prises en compte.

Ces phénomènes et leurs caractéristiques sont souvent peu documentés pour les produits dérivés du bois. Les premiers résultats de simulation thermomécaniques présentés ici apparaissent éloignés des mesures faites lors d'un essai en four de résistance au feu. Le modèle thermique proposé doit faire l'objet d'améliorations afin de reproduire convenablement le transfert thermique dans l'ensemble de l'échantillon et non pas uniquement sur la face non exposée. Il faut notamment mieux prendre en compte les phénomènes liés à la consommation d'énergie induite par l'évaporation de l'eau. Un des défis de ces travaux consiste à simuler ces phénomènes de manière physique avec un calcul des sources de chaleur en fonction de l'avancement des réactions de dégradation thermique (pyrolyse) qui ont lieu dans le matériau.

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

---

Le matériau bois est en phase avec l'évolution des exigences en matière d'environnement et d'économie d'énergie, ce qui justifie son utilisation massive dans les bâtiments durables et les maisons passives. Grâce à son faible poids propre, à ses performances thermiques et mécanique, et sa facilité de transformation qui ne demande pas beaucoup d'énergie, il offre des possibilités de réalisations architecturales plus complexes et plus esthétiques comparé aux matériaux conventionnels (le béton et l'acier). Malgré la disponibilité de plusieurs travaux dans la littérature, concernant l'influence de la température sur les propriétés mécaniques et la combustion du bois, de nombreux points restent peu étudiés et analysés jusqu'à présent.

L'objectif principal de cette thèse a consisté à développer un outil numérique permettant de prédire le comportement thermomécanique du bois lors d'un essai de résistance au feu. Un modèle numérique permettant de prendre en compte les particularités de la dégradation thermique des matériaux celluloseux a donc été conçu, capable notamment de simuler les réactions de vaporisation de l'eau, de pyrolyse du bois et de combustion des gaz de pyrolyse tout en prenant en compte la variation des propriétés thermiques et mécaniques du matériau en fonction de la température. Sur la base d'une étude bibliographique (chapitre 1), les paramètres nécessaires à la modélisation du comportement thermomécanique du bois ont pu être établis. Deux modèles numériques, un modèle thermique et un modèle mécanique, ont ainsi été développés dans le but de représenter le comportement macroscopique du bois à haute température.

Le modèle thermique (isotrope) prend en compte dans une certaine mesure l'impact des réactions de vaporisation et de dégradation thermique (pyrolyse et combustion des gaz de pyrolyse) du matériau par l'intermédiaire de réactions thermiquement activées et par l'application de sources de chaleur volumiques (chapitre 2). Une loi des mélanges est utilisée pour calculer l'évolution des propriétés thermiques en fonction de l'avancement des réactions de vaporisation et de pyrolyse. Cette loi des mélanges est basée sur les propriétés thermiques mesurées à température ambiante et sur les proportions initiales d'eau et de bois et le taux de production de charbon de bois.

Pour fournir les paramètres nécessaires aux modèles numériques développés, différents programmes expérimentaux ont été réalisés (chapitre 3). Les propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et variation de la température) ont été mesurées via des essais de source plane tandis que les propriétés mécaniques (modules d'élasticité et contraintes à la rupture) ont été obtenues par mesure de champs sans contact grâce à un modèle mathématique.

Concernant les résultats des modélisations, le modèle thermique permet de retranscrire correctement les transferts thermiques au sein du bois et de retrouver la perte de masse mesurée lors d'un essai. Ce modèle ne prend pas en compte les transferts de masse des phases liquide et gazeuse au sein du bois, la modification structurale de la face exposée (fissuration et chute de charbon de bois) ainsi que l'évolution des propriétés thermiques du charbon de bois en fonction de la température.

Nous montrons ainsi dans ce dernier chapitre que le modèle thermique développé permet d'obtenir de bonnes tendances au niveau du transfert thermique tandis que les propriétés thermiques proposées donnent une meilleure tendance pour la température au niveau de la face non-exposée du matériau. Ce point constitue l'une des principales voies d'amélioration de notre modèle thermique.

## ***BIBLIOGRAPHIES***

---

- [1] Cours de protection contre l'incendie destiné aux préventionnistes incendie, <http://www.aresu.be/>, HelidAresu de Seui.
- [2] Soban. Fiche 1 d'observation le triangle du feu et les principes d'extinction 2004.
- [3] Loïc Thomas Guy Archambaut. Sécurité incendie Collection Mémentos acier. Nouvelle édition 2005.
- [4] Jean-François Denoël. Sécurité incendie et constructions en béton Choix du béton, FEBELCEM Fédération de l'industrie cimentière belge.
- [5] VUORINEN T., « Structure and chemistry of wood, lecture 6: wood extractives », 2009.
- [6] HUGHES M., « Puu 28 500, Introduction wood properties and wood product: Wood – Water relationship », 2009.
- [7] GRIL J. et NORIMOTO M., «Wood bending using microwave heating », Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 24, no. 4, p. 203, 1989.
- [8] PASSAS R., « Cellule de veille technologique de Grenoble INP Pagora, École internationale du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux », 2008.
- [9] FCBA, « Fiche fabricant, déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF-P-01-010 », 2009.
- [10] FINSA MEDILAND, « Fiche produit, Panneau M.D.F. standard », 2008.
- [11] BOWYER J.L., SHMULSKY R. et HAYGREEN J.G., Forest products and wood science: an introduction. Wiley - Blackwell, 5 éd., 2007.
- [12] GUITARD D., Mécanique du matériau bois et composites. Nabla, Cepadues éd., 1987.
- [13] E. E. Thybring, L. G. Thygesen and I. Burgert, Hydroxyl accessibility in wood cell walls as affected by drying and rewetting procedures, Cellulose 24 (2017),2375-2384.
- [14] W. Gan, C. Chen, Z. Wang, et al., Dense, self-formed char layer enables a fire retardant wood structural material, Adv. Funct. Mater, 29 (2019).
- [15] M. Frey, L. Schneider, T. Masania, T. Keplinger and I. Burgert, Delignified Wood-Polymer Interpenetrating Composites Exceeding the Rule of Mixtures, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019.

- [16] W. Gan, C. Chen, H.-T. Kim, et al., Single-digit-micrometer thickness wood speaker, *Nat. Commun.* 10 (2019), 5084.
- [17] J. Song, C. Chen, S. Zhu, et al., Processing bulk natural wood into a high performance structural material, *Nature* 554 (2018), 224-228.
- [18] X. Li, Y. J. Shang, Z. L. Chen, X. F. Chen, Y. Niu, M. Yang and Y. Zhang, Study of spontaneous combustion mechanism and heat stability of sulfide minerals powder based on thermal analysis, *Powder Technology* 309 (2017), 68 -73.
- [19] A. Tribot, G. Amer, M. A. Alio, H. de Baynast, C. Delattre, A. Pons, J.-D. Mathias, J.-M. Callois, Ch. Vial, P. Michaud, et al., Wood-lignin: Supply, The Thermal Behavior of Wood under Fire Exposure Modelling 15 extraction processes and use as bio-based material, *Eur. Polym. J.* 112 (2019), 228-240. doi: 10.1016/j.eurpolymj,2019,01.007.
- [20] B. D. Krezovic, M. G. Miljkovic, S. T. Stojanovic, S. J. Najman, J. M. Filipovic and S. Lj. Tomic, Structural, thermal, mechanical, swelling, drug release, antibacterial and cytotoxic properties of P(HEA/IA)/PVP semi-IPN hydrogels, *Chem. Eng. Res. Des.* 121 (2017), 368-380.
- [21] O. Atmani, B. Abbès, F. Abbès, Y. M. Li and S. Batkam, Identification of a thermo-elastovisco-plastic behavior law for the simulation of thermoforming of high impact polystyrene, *AIP Conference Proceedings*, 2018, 120003-1-120003-6.
- [22] D. K. Shen, M. X. Fang, Z. Y. Luo and K. F. Cen, Modeling pyrolysis of wet wood under external heat flux, *Fire Safety Journal* 42 (2007), 210-217.
- [23] A. Menis, Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross Laminated Timber (XLAM) elements, Ph. D. Thesis, Università degli studi di Cagliari, Italy, 2012.
- [24] V. D. Thi, M. Khelifa, M. El Ganaoui and Y. Rogaume, Finite element modeling of the pyrolysis of wet wood subjected to fire, *Fire Safety J.* 81 (2016), 85-91.
- [25] C. D. Blasi, Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis, *Combust Sci. Tech.* 90 (1993), 315-40.
- [26] S. Schnabl, I. Planinc, G. Turk and S. Srpčič, Fire analysis of timber composite beams with interlayer slip, *Fire Safety J.* 44 (2009), 770-8.
- [27] A. Menis, Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross Laminated Timber (XLAM) elements, Italy: Università degli studi di Cagliari, 2012.

- [28] C. Erchinger, A. Frangi and M. Fontana, Fire design of steel-to-timber dowelled connections, *Eng. Struct.* 32 (2010), 580-9.
- [29] R. Bilbao, J. F. Mastral, J. Ceamanous and M. E. Aldea, Modeling of the pyrolysis of wet wood, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 36 (1996), 81-97.
- [30] R. M. Knudson and A. P. Schniewind, Performance of structural wood members exposed to fire, *Forest Prod. J.* 25(2) (1975), 23-32.
- [31] B. Fredlund, Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire, *Fire Safety J.* 20 (1993), 39-69.
- [32] A. Frangi and M. Fontana, Charring rates and temperature profiles of wood sections, *Fire Mater* 27(2) (2003), 91-102.
- [33] S. Schnabl, G. Turk and I. Planinc, Buckling of timber columns exposed to fire, *Fire Saf. J.* 46(7) (2011), 431-9.
- [34] P. Keerthan and M. Mahendran, Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions, *Fire Safety J.* 53 (2012), 105-19.
- [35] S. Men-la-yakhaf, K. Gueraoui and M. Driouich, Numerical and mathematical modeling of reactive mass transfer and heat storage installations of argan waste, *Advanced Studies in Theoretical Physics* 8(10) (2014), 485-498.
- [36] S. Men-la-yakhaf, K. Gueraoui, A. Maaouni and M. Driouich, Numerical and mathematical modeling of reactive mass transfer and heat storage installations of argan waste, *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 8(1) (2014), 236-240.
- [37] R. Bilbao, J. F. Mastral, J. Ceamanous and M. E. Aldea, Modeling of the pyrolysis of wet wood, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 36 (1996), 81-97.
- [38] D. K. Shen, M. X. Fang, Z. Y. Luo and K. F. Cen, Modeling pyrolysis of wet wood under external heat flux, *Fire Safety Journal* 42 (2007), 210-217.
- [39] B. Moghtaderi, The state-of-the-art in pyrolysis modeling of lingo cellulosic solid fuels *Fire and Materials* 30 (2006), 1-34.
- [40] J. Larfeldt, B. Leckner and M. C. Melaaen, Modeling and measurements of the pyrolysis of large wood particles, *Fuel* 79 (2000), 1637-43.
- [41] S. S. Alves and J. L. Figueiredo, A model for pyrolysis of wetwood, *Chemical Engineering Science* 44 (1989), 2861-9.

- [42] A. Galgano and C. Di Blasi, Modeling the propagation of drying and decomposition fronts in wood, *Combustion and Flame* 139 (2004), 16-27.
- [43] J. Norén, – Load-bearing Capacity of Nailed Joints Exposed to Fire – *Fire and Materials* – Mai- Juin – Volume 20, n°3, p. 133-145. 1996.
- [44] P. Lalancette, « Conception et développement d’un environnement informatisé d’expérimentations contrôlées et assistées à distance par ordinateur (ExAO) », Université de Montréal, Canada, 2014.
- [45] A. Caron, « Évaluation d’outils pédagogiques utilisant l’expérimentation assistée par ordinateur (ExAO) afin d’illustrer un concept scientifique. », Cégep Marie-Victorin, Canada, 2007. <https://core.ac.uk/download/pdf/52960798.pdf>
- [46] [A. Marcotte, « Les apports de l’expérimentation assistée par ordinateur (ExAO) en pédagogie par projet en Sciences de la nature au collégial », Université de Montréal ,Canada,2004. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/6757/these.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [47] J. Jalvy, J. Pottecher, et G. Verollet, « EXAO ?De quois’agitil ? », p.6 <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000857/file/b69p137.pdf>
- [48] K. COLLINET, « les tics peuvent-elles contribuer au développement de la pensée expérimentale , L’exemple de l’enseignement des sciences de la vie et de la terre dans le secondaire », Mémoire présenté en vue de l’obtention du DESS Ingénierie des médias pour l’éducation, Université de Poitiers, 2002.
- [49] C. ABDELGHANI, « la thermodynamique», cour de deuxième ans de université Mohamad 5(Année Universitaire 2018-2019)..
- [50] L. FATIHA, «CH1 : Transfer thermique et ses principe», cour de troisième ans université Mohamad 5(Année Universitaire 2019-2020).
- [51] J.YVER « Transfer thermique », cours de deuxième ans de Ecole des Mines Nancy .  
<file:///C:/Users/pc/Downloads/thermique.pdf>
- [52] Cours de Transferts thermique de monsieur Yves Jannot« 1-GENERALITES SUR les transferts de chaleur. 2-transfert de chaleur par conduction en régime permanent »<file:///C:/Users/pc/Downloads/thermique.pdf>.
- [53] Les transferts thermiques,  
[http://spc.emde.free.fr/fichiers/terminale/Chapitre\\_23.pdf](http://spc.emde.free.fr/fichiers/terminale/Chapitre_23.pdf).