HAL
open science

Modélisation de la cinétique de la dégradation thermique du matériau bois : application à l'analyse du comportement au feu des structures en bois

Mourad Khelifa

To cite this version:

Mourad Khelifa. Modélisation de la cinétique de la dégradation thermique du matériau bois : application à l'analyse du comportement au feu des structures en bois. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2020. tel-03180550

HAL Id: tel-03180550

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03180550v1

Submitted on 25 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à **D**iriger des **R**echerches

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

ÉCOLE DOCTORALE SIMPPÉ

Présentée par KHELIFA Mourad

Modélisation de la cinétique de la dégradation thermique du matériau bois. Application à l'analyse du comportement au feu des structures en bois

Sous le parrainage du Pr. ROGAUME Yann

Soutenue le 08 décembre 2020

Membres du jury :

M. BOULET Pascal,	Pr.,	Université de Lorraine,	Président
M. HALLER Peer,	Pr.,	Université de Technologie de Dresden,	Rapporteur
Mme. DUQUESNE Sophie,	Pr.,	Université Lille 1,	Rapporteur
M. TORERO Jose,	Pr.,	Université Collège de Londres,	Rapporteur
Mme. RETRAINT Delphine,	Pr.,	Université de Technologie de Troyes,	Examinateur
M. OUDJENE Marc,	Pr.,	Université Laval,	Examinateur
M. EL GANAOUI Mohammed,	Pr.,	Université de Lorraine,	Examinateur
M. ROGAUME Yann,	Pr.,	Université de Lorraine,	Examinateur

Titre : Modélisation de la cinétique de la décomposition thermique du matériau bois. Application à l'analyse du comportement au feu des structures en bois

Résumé : Depuis plusieurs années, j'ai contribué au développement de méthodologies de simulation numérique permettant de prédire la résistance des structures en bois sous l'effet de différentes sollicitations dans des conditions particulières. Il s'agit notamment de conditions combinées des charges mécaniques avec des variations extrêmes de température comme dans le cas d'un incendie. Ces modèles doivent devenir prédictifs afin de proposer des préconisations techniques pour faciliter le dimensionnement des structures en bois.

Pour améliorer la prédictivité des modèles numériques et pour modéliser au mieux la dégradation thermique de la pyrolyse, il est nécessaire d'appliquer des modèles cinétiques avancés, basés sur l'approche multi-échelle et formulés à partir de lois d'*Arrhenius*. Ces modèles sont peu et rarement appliqués dans la littérature pour analyser le comportement au feu du matériau bois. Ils sont en outre largement développés pour étudier le comportement des biomasses sous hautes températures pour de la valorisation énergétique. Ainsi, nos travaux ont pour objectifs de contribuer de façon innovante à la simulation du comportement au feu du matériau bois en développant une approche théorique à l'échelle de la microparticule en vue d'une modélisation macroscopique des phénomènes couplés : thermiques, chimiques, physiques et mécaniques.

L'application des modèles cinétiques nécessite le choix des mécanismes réactionnels et la détermination des paramètres cinétiques mis en jeu lors de la dégradation thermique du bois et de ses constituants. La richesse et la diversité des résultats disponibles dans la littérature rendent compte de la difficulté à expliquer ces cinétiques complexes. Cette étude se propose d'identifier les paramètres cinétiques des modèles de pyrolyse choisis par une technique d'optimisation sur des tests réalisés par l'analyse thermogravimétrique (ATG) sur des particules en bois. Une fois les paramètres optimums déterminés, ils seront intégrés dans le modèle numérique pour simuler des cas d'incendie réel sur des éprouvettes en bois de petite et de grande échelle. Nous avons également développé une plateforme de test incendie pour des structures de taille opérationnelle. Les résultats expérimentaux et issus de la modélisation sont ainsi comparés au fur et à mesure du développement afin d'optimiser les travaux.

Mots clés : comportement au feu, tests d'incendie, bois, modélisation, cinétique, pyrolyse, ATG.

Title : Application of kinetic pyrolysis models to the analysis of timber structures under fire

Abstract : I have been working on the development of numerical methods to predict the performance of timber structures under different loading conditions. These include combined mechanical loads and extreme temperatures.

To improve the reliability of the numerical models and to best capture the thermal degradation due to pyrolysis, it is necessary to apply advanced kinetic models, based on the multiscale approach and *Arrhenius*' laws. These models are rarely applied in the literature to analyze the fire behavior of wood as a material. But, they are widely developed to study the behavior of biomass under high temperatures for energy recovery. My research aims therefore to contribute in an innovative way to the simulation of the fire behavior of wood as a material by developing a theoretical approach at the microscale scale with a view to formulate a macroscopic model encompassing the coupled thermo-chemico-mechanical phenomena.

The application of kinetic models requires the identification of the reaction mechanisms and the determination of the kinetic parameters involved during the thermal degradation of wood and its constituents. The diversity of the results available in the literature accounts for the difficulty in explaining this complex kinetics. This study aims to identify the kinetic parameters of the pyrolysis models chosen by an optimization technique on tests carried out by thermogravimetric analysis (TGA) on wood samples. Once the optimum parameters have been determined, they will be integrated into the numerical model to simulate real fire scenarios on small and large-scale timber structures. A testing protocol has already been developed for structures of practical size.

Keywords : fire, Thermogravimetric tests, timber, pyrolysis, kinetic models.

Remerciements

Mener à terme ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est une tâche ardue et souvent très décourageante. Je tiens donc à associer à l'aboutissement de ce travail toutes les personnes qui m'ont permis de le réaliser et celles qui m'ont apporté leur soutien.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Pr. ROGAUME Yann qui m'a fait l'honneur de parrainer et de diriger ce travail. Je le remercie pour son apport technique et le temps qu'il a passé à corriger le présent manuscrit.

Je tiens à remercier mes collègues, Pr. EL GANAOUI Med et Pr. OUDJENE Marc, qui m'ont apporté aussi bien techniquement que personnellement. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour l'encadrement et le soutien qu'ils ont su m'apporter tout le long de ces années de travail en commun sur différents projets.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury. J'exprime ma gratitude au Pr. DUQUESNE Sophie, Pr. HALLER Peer et Pr. TORERO Jose pour avoir rapporter ce travail, au Pr. BOULET Pascal pour avoir présider le jury et aux autres membres (Pr. RETRAINT Delphine, Pr. OUDJENE Marc, Pr. EL GANAOUI Mohammed et Pr. ROGAUME Yann) pour avoir accepter d'examiner ce travail.

Sans le travail de mes quatre doctorants Diem, Mengya, Trong et Imane, ce mémoire ne pourrait exister. Qu'ils trouvent dans ces lignes l'expression de mes remerciements les plus sincères et chaleureux.

De toutes ces années passées au LERMaB je ne peux oublier de remercier tous mes collègues du Laboratoire et de l'école qui eux aussi ont contribué directement ou indirectement au bon déroulement de mes activités de recherche.

Enfin, un grand merci à toute ma famille qui a elle aussi participé à la réussite de ce projet.

Table des matières

Introduction **12**

1 Parcours professionnel, bilan d'activités et projets de recherche **17**

1.1 Curriculum Vitæ 17

1.1.1 Activités professionnelles 17

1.1.2 Formations 17

1.1.3 Activités d'enseignement 18

1.1.4 Responsabilités administratives 18

1.1.5 Activités de recherche 18

1.1.6 Rayonnement et animation scientifique 19

1.1.7 Bilan des activités de recherche 21

1.2 Activités d'enseignement 21

1.2.1 Présentation synthétique 21

1.2.2 Vision globale et déroulement 22

1.3 Responsabilités administratives 23

1.3.1 Ordre chronologique des responsabilités 23

1.3.2 Principales activités administratives en LP 24

1.4 Activités de recherche 25

1.4.1 Présentation de l'activité de recherche 25

1.4.2 Poursuite des travaux en cours 27

1.4.3 Encadrements de Masters 2 Recherche 29

1.4.4 Encadrement de post-doc et/ou projets de recherche 33

1.4.5 Co-encadrement de thèses de Doctorat 33

1.5 Projets de recherche 36

1.5.1 Renforcement des structures bois 38

1.5.2 Résistance au feu des assemblages bois 40

1.5.3 Valorisation des bétons légers à base du bois 43

1.6 Publications et productions scientifiques 44

1.6.1 Ouvrage 44
1.6.2 Articles de revues 45
1.6.3 Conférences internationales avec actes 49
1.6.4 Conférences nationales avec actes 52

2 Modélisation du comportement au feu des structures en bois 53
2.1 Introduction 53
2.2 Modèles thermomécaniques simplifiés 57
2.2.1 Introduction 57
2.2.2 Modèles thermiques simplifiés 58
2.2.3 Modèles thermomécaniques 63
2.2.4 Modélisation du couplage thermomécanique 68
2.2.5 Simulations des tests d'incendie 70
2.2.6 Conclusion 80
2.3 Modèles cinétiques de la pyrolyse 82
2.3.1 Introduction 82
2.3.2 Cinétique de la pyrolyse du bois 83
2.3.3 Modèles de la pyrolyse du bois 92
2.3.4 Conclusion 100
2.4 Caractéristion expérimentale de la pyrolyse d'une particule de bois 101
2.4.1 Introduction 101
2.4.2 Tests de l'analyse thermogravimétrique 102
2.4.3 Procédure d'identification de la cinétique 107
2.4.4 Analyse cinétique et validation du modèle de pyrolyse 108
2.4.5 Conclusion 112
2.5 Applications et validation des modèles cinétiques de la pyrolyse 112
2.5.1 Résistance au feu des panneaux de coffrage bois-ciment 112
2.5.2 Résistance au feu des panneaux en aggloméré de lin 118
2.5.3 Résistance au feu des assemblages réalisés par tourillons en bois densifié 133
2.5.4 Conclusion 134
2.6 Synthèse 135

Conclusion générale 141
Bibliographie 147

Introduction

Ce document retrace 12 années de recherche dans le domaine de la mécanique, du génie-civil et de la construction bois, et n'évoque ni les travaux de DEA en conception mécanique et ingénierie simultanée ni ceux de Doctorat qui ont concernés le domaine de la simulation numérique de la mécanique de l'endommagement. Ainsi, le parcours professionnel qui me conduit aujourd'hui à la présentation de ce présent mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches ne fut pas un cheminement linéaire. Ce pendant un lien existe entre les travaux de recherche avant et après ma thèse de Doctorat, ce lien consiste à adapter des lois de comportement initialement développées en amont sur le matériau acier pour être appliquées ensuite sur le matériau bois. J'ai pu ainsi participer dès mon arrivée au Lermab en 2008 avec mon collègue Dr. Oudjene Marc à la mise en place et au développement d'une procédure de calcul permettant d'analyser le comportement mécanique du matériau bois sous différentes sollicitations comme en témoignent mes premières publications sur le bois.

Cette activité de recherche fut ensuite enrichie : (1) par son application à l'analyse des structures en bois renforcées par des composites. Les poutres en bois sont souvent sollicitées par des attaques d'insectes, du fluage et du vieillissement, dont les conséquences sont souvent désastreuses. La réduction de la section résistante des poutres en bois et l'amorçage des fissures par traction transverse qui caractérisent le bois restent des questions de première importance auxquelles il faut apporter des solutions pour assurer la sécurité des usagers. Le renforcement par des matériaux composites collés aux surfaces offre une solution intéressante et économique mais malheureusement la modélisation de ce comportement n'a pas suffisamment étudié et présenté dans la littérature ; (2) par le couplage du comportement mécanique du matériau bois avec l'effet de la température. Si le comportement mécanique du bois est assez bien connu, celui de sa résistance au feu s'avère plus difficile et complexe. Cet axe de recherche est initié en 2014 par le lancement de la thèse de Thi Van Diem sous la direction du Pr. M. El Ganaoui Mohammed. Dans cet axe de recherche, on voit très peu de modélisations tridimensionnelles et d'applications sur des problèmes industriels. Le recours à la simulation numérique reste indispensable si l'on souhaite comprendre les mécanismes de rupture des structures en bois et améliorer ainsi la prédictivité des modèles de calcul existants ; et (3) par la convergence et la collaboration avec l'équipe du Pr. Rogaume Yann sur la modélisation de la cinétique de la décomposition thermique des structures bois sous des conditions d'incendie en utilisant des modèles de la pyrolyse. C'est autour de ce dernier thème de recherche que j'ai choisi

de rédiger mon mémoire d'habilitation et que je souhaite poursuivre mes travaux.

Dans un premier temps, ce mémoire résume l'ensemble de mes travaux pédagogiques et de recherches ainsi que les diverses activités annexes necéssaires au bon déroulement et à la cohérence des travaux réalisés depuis mon recrutement en septembre 2008 en tant que Maître de conférences à l'Université de Lorraine. En effet, outre l'enseignement, le métier d'enseignant-chercheur est une mission d'investissement dans des tâches académiques, des projets de recherche et le rayonnement scientifique.

Le plan académique porte sur la maitrise des aspects liés à la pédagogique et à la recherche. La qualité de l'enseignement se mesure par la richesse de son contenu, sa diversité, sa mise à jour selon les exigences de la veille technologique scientifique et technique qui consiste à s'informer de façon permanente et systématique sur les techniques les plus récentes avec l'ambition de mettre à disposition des étudiants des outils numériques, et à des entreprises des compétences humaines de nature à les aider dans leur mission quotidienne d'amélioration de leur compétitivité dans un environnement plus que jamais concurrentiel. La qualité de la recherche, quant à elle, passe par la reconnaissance des travaux réalisés par la communauté scientifique aux niveaux national et international. Cette reconnaissance est souvent témoignée par le nombre de publications dans des revues et des journaux de rang A, et le nombre d'actes dans des conférences et des congrès à comité de lecture.

Pour une bonne évolution de l'activité recherche, il est nécessaire qu'elle soit en phase avec la politique de développement national et régional avec une ouverture sur l'international. La mise en œuvre de la recherche passe nécessairement par l'accompagnement et l'encadrement des élèves ingénieurs, des masters, des doctorants et des post-doctorants dans leur recherche à partir de la définition de la problématique et de l'état de l'art sur le sujet, et tout au long de la phase de traitement du problème jusqu'à la proposition d'une réponse finale. Actuellement, je participe au co-encadrement de deux thèses et de deux post-doctorants avec les échéances suivantes : thèses de M. Tran T.-T (mars 2021) et Melle. El Houjeyri I. (décembre 2020), et post-docs de M. Thi V.D. (juin 2019) et de M. Tran V.D (janvier 2020).

Mes travaux de recherche m'ont permis d'établir des projets, des collaborations et des réseaux de partenariat, avec des universitaires aux niveaux national et international, et avec des industriels de la filière bois. Ces projets se font souvent sous forme de contrats recherche-développement. A ce jour, je suis impliqué dans 6 contrats : 3 projets financés par le Labex Arbre de 2014 à 2017 impliquant trois laboratoires (IJL, LEFOB et LERMAB) ; 1 projet financé par l'ICÉEL de 2016 à 2017 en partenariat avec le LEMTA ; 1 projet Interreg VB(NWE348) en cours de réalisation (2016-2019) impliquant plusieurs

partenaires universitaires des pays de l'Europe du nord et des organisations professionnelles de la construction bois et 1 projet de thèse (de 2020 à 2023) financé en partie par l'ADEME et avec trois partenaires industriels fabricants d'appareils de chauffage domestique au bois : Fonte Flamme, Chazelles et Supra.

Ce mémoire présente une contribution à la compréhension et à la modélisation de la cinétique de la décomposition thermique du matériau bois en cas d'incendie. Dans ce contexte, depuis plusieurs années, l'approche multi-échelle reste la plus utilisée. Elle présente l'avantage d'augmenter la puissance et la fiabilité des outils de la simulation et de diminuer l'incertitude.

Les nombreuses réactions physico-chimiques développées au cours des phases de séchage, de la pyrolyse et de la combustion sont décrites par plusieurs paramètres cinétiques qui sont difficiles à identifier. Dans cette étude, une technique de caractérisation et d'optimisation de ces paramètres cinétiques a été développée et confrontée aux données des tests. Le travail proposé est aussi relatif à la modélisation du comportement mécanique du matériau bois sous des conditions d'incendie.

Selon l'approche réglementaire EC5[1], la résistance au feu d'une section en bois est basée sur l'estimation de la section résiduelle de bois après une durée d'exposition au feu. La section résiduelle est obtenue en déduisant l'épaisseur de la couche du charbon de la section initiale de l'élément en bois. Cette hypothèse se heurte à la complexité des phénomènes de pyrolyse et de combustion car la résistance au feu selon EC5[1] est directement liée à l'évolution de l'épaisseur de la couche consumée au cours de l'exposition au feu. Dans la réglementation actuelle, le feu est caractérisé par un niveau de températures ce qui ne correspond pas à la réalité pour le cas des structures en bois, où les flux de chaleur émis et reçus étant plus pertinents. 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.

En résumé, ce mémoire constitue une synthèse des travaux de recherche réalisés durant une dizaine d'années sur le comportement thermomécanique du matériau bois sous des conditions d'incendie réel. Ces recherches sont motivées par la nécessité d'améliorer la connaissance des mécanismes de la dégradation thermique du matériau bois et de développer des modèles prédictifs permettant de maîtriser les risques associés aux incendies dans la construction bois.

Ce document est organisé en deux chapitres :

- Le **premier chapitre** est consacré à la description de mes activités d'enseignement, de mes responsabilités administratives et de ma recherche. On retrouve une présentation synthétique de mon curriculum vitæ, et une synthèse de mes activités

d'enseignement et de recherche menées depuis mon recrutement en septembre 2008. Il se termine par une présentation des travaux en cours de réalisation, pour lesquels les financements et les collaborations sont en cours, et de mon futur projet recherche.

– Le **second chapitre** constitue mon mémoire d'habilitation à diriger des recherches où l'accent est mis sur l'intérêt de travailler sur la modélisation du comportement au feu des structures en bois. La thèse de M. Thi V.-D soutenue en 2017, les deux thèses en cours de M. Tran T.-T et de Melle. El Houjeyri I, les post-docs de M. Thi V.-D et de M. Tran V.D s'inscrivent pleinement dans les objectifs et le contenu de ce chapitre. Le mémoire se termine par une conclusion et des perspectives à court, à moyen et à long termes.

Chapitre 1

Parcours professionnel, bilan d'activités et projets de recherche

1.1 Curriculum Vitæ

KHELIFA Mourad
49 ans, Marié, une fille
LERMB/ENSTIB - 27 rue Philippe SÉGUIN - 88051 Épinal
E-mail : mourad.khelifa@univ-lorraine.fr
Tél. : 03 72 74 96 18

1.1.1 Activités professionnelles

Depuis 09/2008 :	Maître de Conférences en 60ème section à l'Université de Lorraine.
2006-2008 :	Ingénieur structures, B2i, Ile de France.
2005-2006 :	Post-Doc au CNRS, ENSAM de Metz.
2004-2005 :	ATER à l'Université de Technologie de Troyes (UTT).
2002-2004 :	Enseignant-vacataire à l'UTT.

1.1.2 Formations

2004 : Doctorat de l'Université de Technologie de Troyes (UTT).
Spécialité : Systèmes Mécaniques et Matériaux.

2001 : Diplôme d'Étude Approfondie (UTT),
Diplôme cohabilité avec l'Université de Technologie de Compiégne (UTC).
Filière : Conception Mécanique et Ingénierie Simultanée.

1999 : Magister en Génie-Civil, Université de Tizi-Ouzou, Algérie.

1996 : Ingénieur en Génie-Civil, Université de Tizi-Ouzou, Algérie.

1.1.3 Activités d'enseignement

Mes travaux d'enseignement au sein de l'ENSTIB recouvrent divers domaines disciplinaires appliqués à la construction, tels que celui de la résistance des matériaux, de la mécanique des milieux continus, des méthodes numériques et des Eurocodes appliqués aux différentes structures béton, acier et bois. Ils se partagent principalement entre deux formations : Licence Professionnelle et Ingénieur.

1.1.4 Responsabilités administratives

Depuis la mise en place de la nouvelle maquette pédagogique en 2014 à l'ENSTIB, j'ai pris la responsabilité de l'Unité d'Enseignement UE 9.7 destinée aux élèves de 3ème année ingénieurs. Cette UE met l'accent sur la diversité des possibilités de calculs offertes par les Eurocodes (1, 2, 3 et 5) et sur leurs modalités respectives de mises en œuvre.

De 2009 à 2013, j'étais responsable de la Licence Professionnelle Construction Bois (LPCB). Cette tâche consistait à organiser les interventions dans les différents modules (recrutement de vacataires, gestion des emplois du temps, organisation des jurys de soutenances et de délibérations, recherche et organisation de projets tutorés, gestion des stages, ...). Lors de cette responsabilité, j'ai préparé la création et le lancement d'un nouveau parcours "Réalisation-Conduite des travaux" en LPCB, qui s'intègre très bien sur le plan local. L'évolution croissante du nombre de candidatures à ce nouveau parcours de formation démontre l'attractivité de la formation en LPCB qui résulte notamment de son adossement à la structure de formation des ingénieurs ENSTIB. Par ailleurs, je me suis occupé au printemps 2012 de la rédaction et du montage du dossier AERES d'évaluation des licences professionnelles Construction Bois en renouvellement - Vague C (2013-2017).

1.1.5 Activités de recherche

Mes travaux de recherche au sein du LERMAB s'inscrivent dans les thèmes de recherche de l'axe 3 "Énergétique, Mécanique, Construction Bois". Ils sont axés principalement sur l'étude du comportement thermomécanique du matériau bois. On y trouvera en particulier le développement de nouveaux outils numériques permettant l'évaluation des performances thermomécaniques des structures bois sous l'effet combiné des charges mécaniques et des variations de température.

1.1.6 Rayonnement et animation scientifique

- 2017-2021 : Bénéficiaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR).
- 2016-2019 : Membre du projet européen Interreg VB (Ref. NWE348) "Towards Adhesive Free Timber Buldings".

  Partenaires universitaires des pays de l'Europe du nord : Allemagne, Luxembourg, Grande Bretagne, France, Belgique, Suisse, Ireland et plusieurs industriels du secteur bois lamellé-collé ainsi que des organisations professionnelles et pouvoirs publics (Leader Partner : Université de Liverpool).

  Ce projet est dédié à la construction bois et porte sur le développement de nouveaux produits d'assemblage des lamelles en bois, sans adhésifs, par des tourillons en bois densifié.
- 2016-2019 : **Invitations dans des universités étrangères**
  - Séjour de deux semaines (26/11/2018 au 07/12/2018) à l'école d'ingénieurs sino-française de Nanjing, Chine.
  - Séjour de trois semaines (26/10/2019 au 17/11/2019) à l'école d'ingénieurs sino-française de Nanjing, Chine.
  - Invitation d'une semaine (mars 2018) à l'Université d'Ulster, Irlande du Nord.
- Participé à la mise en place d'une convention recherche de type "MoU : Memorandum of Understanding" entre l'Université de Lorraine (représentée par le LERMAB) et l'Université d'Ulster en Irlande du Nord (représentée par le centre de recherche FireSERT).
- 03-10 mars 2018 : J'ai effectué une mission de prospection à l'Université d'Ulster pour l'organisation et la mise en place de la mobilité étudiante dans le cadre des Missions Erasmus+. La mission se concrétise par la signature d'un accord Erasmus.
- Depuis 2018 : En plus de mon service d'enseignement assuré à l'école, j'ai été amené à effectuer deux semaines (26/11/2018 au 07/12/2018) et trois semaines (26/10/2019 au 17/11/2019) d'enseignement sur la mécanique générale à l'école d'ingénieurs sino-française de Nanjing en Chine. Créée par l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM) et l'Université de Science et Technologie de Nanjing (NJUST), l'ENI-Nanjing est accréditée "Institut sino-français de coopération universitaire" par le Ministère de l'éducation chinois (MoE).

  L'objectif des missions est d'apporter une contribution à l'acquisition d'une culture scientifique de base permettant une meilleure compréhension des lois du mouvement et la maîtrise dans le maniement des outils de la mécanique.
- Juillet 2018 : Expertise d'un dossier de demande de financement soumis au Conseil de la Recherche du Chili.

Proposal Title : Numerical and experimental characterization of the timber-steel interaction in structures.

- Membre du comité d'organisation de l'ICOME 17 "International Conference on Materials & Energy". July 06-09, 2017 Tianjin, China.
- Membre du comité d'organisation de l'ICOME 16 "International Conference on Materials & Energy" à La Rochelle, 17-20 mai 2016.
- Membre du Comité d'Organisation de l'International congress for applied mechanics. 9ième journées d'études techniques, JET'2016. 3,4 et 5 mai 2016, Hammamet-Tunisie.
- Co-organisateur d'un séminaire Franco-Polonais en Mécanique (18-19 Mai 2015) à Besançon.
- Conférence invitée au 23ème French Polish Seminar in Mechanics - 18 and 19 May 2015, Besançon. Thème : Numerical analysis of the thermal behaviour of Laminated Veneer Lumber panels in fire.
- Mars 2014 : Expertise d'un dossier de demande de thèse pour allocation ministérielle au LERMAB.
- 2014-2017 : Co-encadrement d'une thèse en cotutelle avec l'Université de Monastir en Tunisie.
- Membre du projet de recherche (2016-2017) : ICÉEL (Institut Carnot Énergie et Environnement en Lorraine) intitulé Opti-Bois (Optimisation d'un dispositif pilote de poêle à bois) en partenariat avec deux laboratoires LEMTA (Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée) et LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés).
- Coordinateur des 3 projets de recherche :
  1. FEM-FIRE(2016-2017) : Finite Element Modelling of FIRE resistance of timber composite panels. Financé par le Labex Arbre.
  2. STRU-RETROF(2015-2016) : STRUctural RETROFitting of CFRP strengthened Timber Beams. Projet incitatif à caractère transversal financé par le Labex Arbre. Partenaires : LERMAB(EA 4370)-LERFOB.
  3. POP-FOAMS(2014-2015) : mechanical Performance OPtimisation of tannin-based carbon FOAMS. Financé par le Labex Arbre. Partenaires : LERMAB(EA 4370)-IJL(Institut Jean Lamour).
- 04 collaborations internationales avec : School of Engineering and Information Technology of Canberra Australia,Centre de recherche FireSERT de l'Université d'Ulster en Irlande du Nord ; l'Université de Monastir en Tunisie et l'Université de Tizi-Ouzou en Algérie.

– Expertise auprès de diverses revues internationales : Construction & Building Materials, Ceramics International, Mechanics & Industry, Journal of Materials : Design and Applications, Composite Structures, Automation in Construction, Advances in Mechanical Engineering, Engineering Structures.

1.1.7 Bilan des activités de recherche

Le bilan de mes activités de recherche peut-être résumé comme suit :

– 42 publications dans des revues internationales dont 1 ouvrage. Parmi les publications de revues internationales 10 sont en collaboration avec un partenaire à l'étranger en Australie (School of Engineering and Information Technology, Canberra), 11 avec l'Institut Jean Lamour de l'Université de Lorraine, 01 publication avec LERFoB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois), 01 publication avec l'Université de Tizi-Ouzou (Algérie) ;
– 27 actes de conférences internationales ;
– 08 conférences nationales ;
– 02 conférences invitées ;
– 05 projets de recherche ;
– 04 collaborations internationales ;
– 06 thèses co-encadrées, dont 4 soutenues ;
– 07 stages de master 2 recherche ;
– 02 post-doctorals.

1.2 Activités d'enseignement

1.2.1 Présentation synthétique

J'ai dispensé mes premiers enseignements durant la préparation de ma thèse de Doctorat à l'Université de Technologie de Troyes (UTT). J'ai été vacataire de mars 2002 à juillet 2004 puis ATER à temps partiel d'octobre 2004 à août 2005. Au cours de ces quatre années, j'ai effectué de nombreux enseignements qui ont tous été réalisés à l'UTT. J'ai participé aux enseignements de 1er et 2ème cycles universitaires dans plusieurs matiéres : Mécanique des milieux continus, Mécanique générale, Statique, Cinématique, Dynamique, Résistance des Matériaux, Méthodes numériques.

Mes enseignements à l'ENSTIB, depuis septembre 2008 en tant que Maître de conférences, se partagent entre deux formations : Licence Professionnelle LP et Ingénieur. Ils recouvrent diverses matières : la résistance des matériaux, la mécanique des milieux continus, dyna-

		2018-2019			2019-2020		
Nom du module	Niveau	CM	TD	TP	CM	TD	TP
Homogénéisation mécanique	LPBC	2	-	16	2	-	16
Résistance des matériaux	LPBC	12	12	36	12	18	20
Mécanique	LPBA	4	-	6	-	-	-
Mécanique du bois	1AI(FA)	-	8	-	-	8	-
	1AI(FI)	-	24	-	-	16	-
Méthode des éléments finis	2AI(FI)	10	4	8	10	30	8
	2AI(FA)	-	4	-	-	10	-
Dynamique des structures	2AI(FI)	10	18	40	10	30	40
	2AI(FA)	-	8	-	-	10	-
EC3. Structures en acier	3AI	8	16	-	8	16	-
EC2. Structures en béton armé	3AI	6	16	-	6	14	-
Mécanique générale (en **Chine**)	ING	15	31.5	-	30	36	-
Heures totales		**67**	**141.5**	**106**	**78**	**188**	**84**

TABLE 1.1 – Récapitulatif des enseignements des années 2018-2019 et 2019-2020.

mique des structures, méthode des éléments finis, Eurocodes (EC1, EC2, EC3, EC5 et EC8) appliqués aux différentes structures béton, acier et bois.

En ce qui concerne le volume horaire, il change chaque année universitaire mais il est globalement équilibré autour de 50% pour les Cours Magistraux (CM), 30% pour les Travaux Dirigés (TD) et 20% pour les Travaux Pratiques (TP). Le volume annuel moyen est autour de 200 heures (Équivalent TD).Un récapitulatif des enseignements des deux dernières années est renseigné dans le tableau 1.1.

1.2.2 Vision globale et déroulement

Le niveau des élèves en Licence et en cycle ingénieurs et leur exigence à la fois sur le fond théorique des enseignements et sur l'applicabilité industrielle m'ont donné l'opportunité d'innover en permanence sur ces deux aspects. Par ailleurs, je profite de mes cours pour partager avec mes étudiants ma passion pour la recherche et leur montrer que l'approche du chercheur pour résoudre les différents problèmes est très complémentaire avec l'approche ingénieur, et que le couplage des deux leur permettra de proposer des solutions innovantes et robustes.

Mon ouvrage intitulé "Résistance Des Matériaux. Cours et exercices", édité par l'Édition Casteilla en 2010 est un cours pratique de RDM. Il permet de comprendre simplement les principes de base du dimensionnement des systèmes isostatiques et hyperstatiques, souvent appliqués dans le domaine de la construction.

Au fur et à mesure de mes interventions, j'ai contribué également sous différentes

formes à l'adaptation de nouveaux cours en cycle d'ingénieurs imposés par la nouvelle maquette pédagogique et aux évolutions des enseignements gardés de l'ancienne maquette. J'ai proposé plusieurs nouveaux cours, de nouveaux projets en Licence Professionnelle et en cycle ingénieurs. A chaque fois, je m'attache à les bâtir autour d'applications pratiques et je fournis aux étudiants des projets de construction réels proposés par des cabinets d'architectes.

Depuis la mise en place de la nouvelle maquette pédagogique à l'ENSTIB, en 2015, j'ai pris la responsabilité de l'Unité d'Enseignement UE9.7 destinée aux élèves ingénieurs de 3ème année. Cette UE a pour objectif d'initier les élèves ingénieurs au calcul de différentes structures classiques en Génie-Civil (béton armé, charpente métallique et structures en bois) en respectant les textes réglementaires spécifiques à chaque type de construction. L'UE met l'accent sur la diversité des possibilités de calcul offertes par les Eurocodes (2, 3 et 5) et sur leurs modalités respectives de mise en pratique. J'ai rédigé son contenu et j'ai pris en charge la coordination pédagogique entre différents intervenants.

En plus de mes enseignements à l'école, j'ai été amené à aider à la préparation des étudiants aux concours du professorat de l'enseignement professionnel dans le cadre de l'ESPE de Lorraine sur le site d'Épinal. L'ESPE de Lorraine assure, pour la filière Bois, une préparation nationale au concours interne du CAPLP2 Génie Industriel option Bois. Cette formation se déroule à I'ENSTIB.

Chaque année, je participe également à l'encadrement des Projets de Fin d'Etudes (PFE) pour les ingénieurs et des projets tuteurés (TUT) en Licence. Les sujets sont divers (expérimentation, simulation numérique, analyses thermique et mécanique, renforcement des structures bois, dimensionnement des maisons à ossature bois).

1.3 Responsabilités administratives

1.3.1 Ordre chronologique des responsabilités

Actuellement et depuis la mise en place de la nouvelle maquette pédagogique en 2014, j'assure la responsabilité de l'Unité d'Enseignement UE 9.7 des élèves de 3ème année ingénieurs, qui met l'accent sur les différentes possibilités de calcul offertes par les Eurocodes 1, 2, 3 et 5, et la coordination pédagogique entre différents intervenants extérieurs. L'UE 9.7 attire un nombre important d'étudiants. Soit un effectif de 40 étudiants qui représente 50% des étudiants en 3ème année et 100% des élèves inscrits en Option Construction.

Depuis septembre 2018, j'ai pris la responsabilité de l'UE 7.1 des élèves de 2ème année

ingénieurs. L'objectif de ce cours est d'introduire la dynamique des structures élémentaire, de maîtriser les notions de la théorie de la dynamique en vue de dimensionner les structures et d'appréhender les grandeurs élémentaires de la dynamique des structures. Ce cours introduit également l'application de la méthode des éléments finis à l'analyse des structures.

Après ma titularisation en septembre 2009, j'ai assuré la responsabilité de la Licence Professionnelle Construction Bois LPCB de 2009 à 2013. Les effectifs des promotions, par parcours, étaient de 20 étudiants en moyenne. Soit un total de 40 étudiants. Cette tâche consistait à : organiser les recrutement des étudiants et des vacataires, gérer les emplois du temps, programmer les jurys de soutenances, encadrer les projets tutorés en partenariat avec les professionnels du bâtiment, visiter des stages en entreprises,... Au printemps 2012, j'ai constitué le dossier d'habilitation de la licence, et la formation a été habilité de 2013 à 2017 avec une mention A.

1.3.2 Principales activités administratives en LP

- 2009 à 2013 : Responsable des deux parcours en LPCB (Conception Structures, Réalisation-Conduite des travaux).
- En terme de fonctionnement, je me suis impliqué dans la gestion et l'évolution des formations en licence professionnelle construction bois. J'ai contribué à la mise en place et à l'élancement d'un nouveau parcours "Réalisation-Conduite des travaux" en 2009.
- Je suis donc en charge de l'organisation d'un nouveau parcours "Réalisation-Conduite des travaux" en LP, de la mise en place des enseignements spécifiques à chaque parcours, de l'intégration de nouveaux intervenants, de l'organisation des stages d'entreprise, de l'adaptation des enseignements (aux besoins des professionnels), de l'organisation des jurys de soutenances (projets tuteurés et stages), de la gestion des notes, du suivi et de l'encadrement des étudiants.
- Un point fort de mon activité concerne la création et l'animation d'un nouveau parcours en LP qui s'intègre parfaitement sur le plan local.
- J'ai participé à plusieurs groupes de réflexion concernant les évolutions et la restructuration des enseignements du parcours, notamment avec les professionnels spécialisés dans la construction bois. Dans une certaine mesure, j'ai réussi à faire évoluer et adapter les enseignements dispensés en LPCB d'une année à une autre.
- En 2012 : Chargé de la rédaction et du montage du dossier AERES d'évaluation des licences professionnelles Construction Bois en renouvellement-Vague C. La demande d'habilitation de la LP Construction Bois a été renouvelé pour la période de 2013 à

2017 avec une mention très bien.

- Chargé de la réorganisation de la nouvelle maquette pédagogique pour la licence Construction Bois avec deux parcours (Conception-Structures, Réalisation Conduite des Travaux).
- Chargé de la rédaction d'une demande de création d'une nouvelle Licence Professionnelle Construction bois par apprentissage et de la mise en place des enseignements (généraux, techniques et professionnels) spécifiques à chaque parcours.

1.4 Activités de recherche

1.4.1 Présentation de l'activité de recherche

Mes travaux de recherche sont axés essentiellement sur l'étude du comportement thermomécanique du matériau bois. Les recherches menées ont porté à la fois sur la mise au point de modèles numériques avancés. On y trouvera en particulier :

1. L'utilisation de la technologie de la fibre de carbone pour la réparation et le renforcement des poutres en bois. Cette technique est innovante et moins répandue dans le domaine de la construction bois comparées aux structures traditionnelles en béton armé òu des bandes du composite sont collées sur leur surfaces tendues dans l'objectif de réparer et d'améliorer leur capacité portante en flexion. En plus des charges permanentes et d'exploitations, les éléments bois sont souvent soumis à des attaques d'insectes et les effets du fluage et du vieillissement, dont les conséquences peuvent être désastreuses. La réduction de la section résistance des poutres en flexion et l'amorçage des fissures par traction transverse que présentent les structures bois restent des questions de première importance auxquelles il faut apporter des solutions pour assurer la sécurité des usagers. Le renforcement d'éléments structuraux par matériaux composites collés offre une solution intéressante et économique, mais malheureusement la caractérisation numérique du comportement des poutres bois renforcées n'a pas encore été clairement établie. Les études réalisées dans le renforcement des structures bois par la fibre de carbone visent à développer une méthode numérique permettant de simuler le comportement de plusieurs composants qui agissent en interaction : la fibre de carbone, les adhésifs ainsi que les interfaces de contact bois-adhésif-fibre. Diverses simulations sur des éprouvettes en bois massif (avec et sans aboutages) à grandes échelles pour différentes essences (épicéa, Douglass et chêne) avec diverses configurations de renforcement ont été analysées et discutées. Les résultats des simulations sont confrontés à ceux des expériences. Les

résultats issus de ce thème de recherche ont donné lieu à plusieurs publications dans des revues internationales et des congrès internationaux avec actes ce qui témoigne indéniablement de la qualité du travail que nous avons fourni durant ces années au LERMAB [2, 3].

2. La modélisation numérique du comportement thermomécanique des assemblages bois réalisés par organes métalliques. Depuis quelques années, on assiste à l'utilisation croissante du bois dans la construction. Si le comportement du bois est assez bien connu, celui des structures bois comportant des assemblages s'avère plus difficile et cruciale pour déterminer la résistance réelle des structures. En effet, dans la majorité des cas la ruine des structures bois est causée principalement par la défaillance de ces assemblages. Il s'agit donc de répondre à ce besoin industriel. Actuellement, l'Eurocode 5 ne permet pas une modélisation complète des assemblages rencontrés dans la construction bois à cause notamment de la diversité des organes et la complexité des modes de rupture du bois. La simulation numérique par éléments finis permet de comprendre les mécanismes de rupture mis en jeu et d'optimiser les paramètres gouvernant le comportement non-linéaire des assemblages bois. Cependant, on voit très peu de modélisations tridimensionnelles et d'applications sur des problèmes industriels. Cet axe de recherche demeure donc important et le recours à la simulation numérique est indispensable si l'on souhaite comprendre les mécanismes de rupture des assemblages et améliorer ainsi la précision et la robustesse des modèles de calcul existants. Des paramètres supplémentaires ont une influence sur le comportement du bois et des assemblages. Parmi ceux-ci, l'évaluation du comportement des assemblages sous l'effet de la température (conditions hivernales très froides, conditions estivales très chaudes ou même conditions extrêmes de type incendie) exigent la connaissance de la distribution de la température dans les pièces de bois et l'influence des organes métalliques sur la modification des caractéristiques mécaniques et thermiques du bois. Peu de travaux ont été menés dans ce domaine et les préconisations normatives actuelles ne sont pas les plus adaptées.

3. La maîtrise de la résistance au feu des structures bois : le bois est le seul matériau de construction de nature biologique issu d'espèces végétales vivaces et cultivables. Il offre de nombreuses possibilités de réalisations et d'expressions architecturales comparé aux deux autres matériaux conventionnels (le béton et l'acier) utilisés dans le domaine de la construction. De plus, il est en phase avec l'évolution des exigences en matière d'environnement et d'économie d'énergie, ce qui justifie le recours à l'utilisation du bois dans les constructions durables telles les maisons passives. L'utilisation croissante du matériau bois dans le domaine de la construction nécessite donc un

haut niveau de connaissance et de maîtrise du comportement 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. Cependant, un frein important au développement de l'utilisation du bois dans la construction est lié à la combustibilité du matériau, qui suscite des interrogations quant à la sécurité des structures en bois vis-à-vis du feu. La connaissance de la résistance au feu des structures reste primordiale pour la maîtrise des risques en situation d'incendie. En terme de sécurité incendie, les constructions bois doivent garantir la stabilité de l'ouvrage pour une durée suffisante dans l'objectif d'évacuer les usagers du bâtiment et de faire intervenir les pompiers afin de sécuriser le milieu environnant et empêcher la propagation de l'incendie. De nombreuses recherches ont montré que le matériau bois présente un comportement thermique intéressant dans un milieu exposé au feu car il se réduit en section de façon maitrisable, ce qui permet d'évaluer la résistance des structures bois et de prédire les risques de rupture. Cependant, ces éléments sont pour la plupart empiriques et les calculs de résistance peu avancés. Par manque de méthodes précises d'analyse de la tenue au feu des structures bois, le matériau bois se trouve pénalisé aux niveaux de la conception et du dimensionnement. La réglementation européenne, présentée dans Eurocode 5-1.2 [1], appliquée au dimensionnement des structures en bois exposées au feu, traite la diffusion de la température dans l'épaisseur de la section ainsi que la formation du charbon au cours d'exposition au feu de façon limitée et imprécise, parce que la modélisation complète prenant en compte les phénomènes physicochimiques et mécaniques est très complexe. Le bois est le matériau de construction pour lequel les travaux relatifs aux propriétés physico-thermiques en situation d'incendie sont les moins nombreux. Le développement de modèles généralisés demande un travail de recherche basé d'une part sur l'exploitation des résultats des tests réels d'incendie à petites et grandes échelles et d'autre part sur l'analyse par simulation numérique qui nécessite une bonne maîtrise des paramètres d'entrée. Notre travail répond à cet objectif. Il s'agit de développer une procédure numérique qui permet de prédire le comportement thermomécanique des structures bois exposées à de hautes températures.

1.4.2 Poursuite des travaux en cours

Persuadé de l'intérêt de cette approche numérique, exploitant les résultats des tests disponibles dans la littérature sur plusieurs cas réels, je souhaite poursuivre ces recherches en les orientant à la fois vers :

1. Le développement de nouveaux outils numériques intégrants des modèles de comportement avancés spécifiques au matériau bois, qui permettant l'évaluation des performances thermomécaniques des structures bois (assemblages, parois, poutres, ...) sous l'effet combiné des charges mécaniques et des variations de température. Le modèle disponible actuellement arrive à maturité et est prêt à être exploité sur des structures bois à grande échelle, notamment les assemblages par connecteurs métalliques, très répandus dans la construction ou dans la rénovation des structures bois (bâtiments, hangars, ponts, passerelles, ...). L'ambition pour cet outil est donc de l'appliquer sur le transfert vers des objectifs bien identifiés : changement des propriétés du bois induit par les variations de température (jusqu'à 100°C) et l'humidité, comportement mécanique à haute températures (supérieures à 300°C) pour l'étude de la sécurité incendie.

   L'intégration d'une loi de comportement thermomécanique du matériau bois dans le code Abaqus[4] passe par deux étapes :

   – En ce qui concerne la modélisation numérique du comportement au feu des parois multicouches et l'influence des propriétés physico-thermiques (la conductivité thermique, la densité et la masse volumique du matériau bois) sur la résistance globale de la structure en bois, on ne retrouve pas des études numériques avancées et appliquées sur l'analyse thermique des structures bois au feu basées sur la méthode des éléments finis. Notre travail est justement dédié à cet aspect. Il s'agit d'intégrer une loi thermique dans Abaqus[4] via une routine Umatht tenant compte de la variation de la conductivité thermique, de la densité et de la masse volumique du matériau bois en fonction de la température.
   – La modélisation numérique du comportement mécanique du matériau bois est réalisée par le développement d'une routine Umat. En particulier, nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement élastoplastique du matériau bois couplé à l'endommagement. Une modélisation basée sur la thermodynamique des processus irréversibles avec variables d'état est utilisée pour traduire le couplage entre l'élasticité, la plasticité et l'endommagement. Les aspects théoriques et numériques de cette formulation mécanique sont décrits en détail dans la thèse de Thi V.D.[5]. L'intégration numérique du modèle couplé par un schéma implicite itératif combinant la technique du retour radial avec la réduction du nombre des équations est abordée. L'identification du modèle est réalisée sur des données expérimentales obtenues sur des essais de compression et de flexion. Des comparaisons avec les résultats expérimentaux publiés dans la littérature sont réalisées et discutées.

2. La validation des modèles éléments finis est faite sur l'analyse du comportement thermomécanique des assemblages bois réalisés par des organes métalliques et des tourillons dans des conditions extrêmes d'incendie. Le modèle ainsi validé est utilisé pour mener une étude sur la distributions des champs de températures et la formation de la couche du charbon en vue de mieux comprendre l'évolution de la résistance au feu des structures bois au cours de l'incendie.

3. La modélisation de la cinétique de décomposition thermique du matériau bois en cas d'incendie. Les incendies sont des phénomènes complexes et difficiles à étudier, mettant en jeu une multitude de réactions chimiques. Dans ce domaine, un enjeu fort des recherches actuelles consiste à représenter numériquement la décomposition de la dégradation thermique du matériau bois par le développement de modèles de pyrolyse plus performants. La technique la plus utilisée est formée d'une loi de variation de la vitesse de forme "Arrhenius" couplée à une fonction de conversion de la masse pour chaque composant étudié en phase condensée et d'un mécanisme réactionnel organisant les réactions entre elles. Les nombreuses réactions développées au cours des phases de séchage, de la pyrolyse et de la combustion sont décrites par plusieurs paramètres cinétiques qui sont difficiles à déterminer. Il apparait alors primordial de développer une technique de caractérisation de ces paramètres cinétiques responsables de la dégradation thermique du matériau bois à partir des données expérimentales.

Les deux thèmes (1) et (2) sont analysés et présentés en détail dans les travaux de thèse de thèse de Thi V.D. soutenue en décembre 2017[5]. La loi thermique, utilisée dans cette thèse, est très basique dite de l'ingénieur inspirée de l'approche réglementaire EC5[1]. Elle est basée sur la discrétisation de l'équation standard de la chaleur. Les travaux de THI Van Diem ont abouti à l'enrichissement du logiciel Abaqus[4] de deux nouvelles routines Umatht et Umat et ses recherches ont donné lieu à plusieurs publications (voir la section publications et productions scientifiques) ce qui témoigne indéniablement de la qualité du travail réalisé dans cette thèse. C'est autour de ces trois grands thèmes (1), (2) et (3) décrits ci-dessus que j'ai choisi de rédiger mon mémoire d'habilitation.

1.4.3 Encadrements de Masters 2 Recherche

1. **Master de HOULI Nadia**

   Durée du stage 4 mois (04/2019-07/2019).

   Sujet : Analyse du renforcement des poutres en bois par des composites.

   Établissement d'origine : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (Tunisie).

Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
Pourcentage d'encadrement : 100%.
Résumé : Le renforcement des structures bois par un composite offre une solution économique, mais malheureusement la caractérisation expérimentale de la résistance mécanique des ces structures renforcées n'a pas suffisamment élaborée. Ce stage vise à répondre à cet objectif.

2. **Master de BEN AMMAR Dalenda**
Durée du stage 6 mois (03/2017-09/2017).
Sujet : Modélisation des flux de chaleur dans un poêle à bois.
Établissement d'origine : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).
Financement : Laboratoire d'Excellence ARBRE.
Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
Pourcentage d'encadrement : 100%.
Résumé : Les travaux d'optimisation de l'efficacité énergétique des appareils de chauffage au bois, en particulier des poêles à bois passent par l'analyse des flux d'énergie dans la chambre de combustion et dans le combustible, l'analyse cinétique des températures au sein d'une bûche et de sa perte de masse permet de mieux caractériser les mécanismes de dégradation du combustible. L'objectif étant de construire un modèle élément finis de la dégradation et des flux thermiques au sein de cette bûche.

3. **Master de NGUYEN Danh Linh**
Durée du stage 6 mois (04/2016-09/2016).
Sujet : Modélisation numérique du comportement hygrothermique des éléments en bois contrecollés exposés au feu.
Établissement d'origine : Université des Sciences et Technologies de Lille 1.
Financement : Laboratoire d'Excellence ARBRE.
Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
Pourcentage d'encadrement : 100%.
Résumé : L'enjeu principal de ce stage de Master est l'élaboration d'un modèle de combustion du bois tenant compte de la réalité physique pour simuler fidèlement le comportement des structures en bois en situation d'incendie. Le champ d'application a pour objectif une meilleure prédiction du comportement d'éléments structuraux contrecollés types CLT, BLC, BMR, etc. Dans ce stage nous proposons, l'extension d'un modèle thermique existant au comportement hygrothermique pour prendre en compte l'effet retardateur généré par la teneur hygrométrique et par la couche de charbon.

4. **Master de HADDAG Ahcene**

   Durée du stage 6 mois (04/2015-09/2015).

   Sujet : Modélisation du comportement des assemblages bois sous charges cycliques.

   Établissement d'origine : Faculté des Sciences et Technologies (FST de l'Université de Lorraine).

   Financement : Labex ARBRE.

   Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.

   Pourcentage d'encadrement : 100%.

   Résumé : Le comportement global d'un assemblage dépend directement des propriétés mécaniques des organes métalliques et de l'essence du bois utilisé. Un modèle numérique, par éléments finis, a été développé au LERMAB pour simuler le comportement des structures et assemblages bois sous charges statiques. L'objectif de ce stage est d'étendre le modèle existant pour simuler le comportement cyclique du bois et assemblages. Le stage comporte une partie expérimentale et une partie identification des paramètres matériaux et modélisation des assemblages.

5. **Master de LAHOUAR Mohamed Amine**

   Durée du stage 6 mois (03/2014-08/2014).

   Sujet : Caractérisations expérimentale et numérique des poutres bois renforcées par la fibre de carbone.

   Établissement d'origine : École Centrale de Nantes.

   Financement : Labex ARBRE.

   Partenaires : LERMAB (EA 4370) et LERFoB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois - UMR 1092).

   Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.

   Pourcentage d'encadrement : 100%.

   Résumé : La réduction de la section résistance des poutres en flexion et l'amorçage des fissures par traction transverse que présentent les structures bois restent des questions de première importance auxquelles il faut apporter des solutions pour assurer la sécurité des usagers. L'une des solutions les plus utilisées étant le renforcement par des fibres de carbone. Malgré, l'intérêt économique que présente ce procédé de renforcement sa caractérisation expérimentale reste la moins étudiée dans la littérature. Le travail proposé dans ce stage vise à développer deux techniques de caractérisation des poutres bois renforcées. D'une part, il s'agit de contribuer à l'établissement de cette technique de renforcement des poutres bois par des essais expérimentaux et d'autre part de développer une procédure numérique dans l'objectif de simuler des structures bois renforcées par la fibre de carbone.

6. **Master de DELGADO SANCHEZ Clara**
   Durée du stage 6 mois (05/2014-11/2014).
   Title : Caractérisations expérimentale et numérique du comportement mécanique des mousses solides à base de tannins.
   Établissement d'origine : Université de Huelva (Espagne).
   Financement : Labex ARBRE.
   Partenaires : LERMAB (EA 4370) et IJL (UMR CNRS 7198).
   Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
   Pourcentage d'encadrement : 40%.
   Résumé : Les mousses solides à base de tannins présentent une conductivité thermique proche de celle du polystyrène expansé et de la laine de verre. De plus, elles sont d'excellents isolants phoniques de par leurs qualités d'amortissement des sons. Dans ce contexte particulier, les matériaux cellulaires biosourcés se présentent comme une solution économique et technologique intéressante. Néanmoins, les propriétés finales de ces matériaux ne peuvent être totalement maîtrisées lors de leur élaboration. Le besoin d'optimiser les performances et d'améliorer la sécurité nécessite une bonne connaissance des relations entre propriétés mécaniques et microstructure. L'objectif de ce stage est la compréhension des mécanismes qui interviennent lors de la déformation de mousses, et le développement d'un outil de modélisation capable de prédire le comportement local des mousses à base de tannins.

7. **Master de VILA LOPERENA Nerea**
   Durée du stage 6 mois (10/2013-03/2014).
   Sujet : Résistance des assemblages bois au feu.
   Établissement d'origine : Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone (ETSECCPB, Espagne).
   Financement : ce stage est financé dans le cadre bilatéral Erasmus entre l'Ecole de Mines de Nancy et l'Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone.
   Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
   Pourcentage d'encadrement : 100%.
   Résumé : Les travaux proposés dans ce stage sont relatifs au comportement thermomécanique des assemblages bois réalisés par organes métalliques. La ruine des structures bois est souvent causée principalement par la défaillance de ces connections. Il s'agit donc de répondre à ce besoin industriel qui consiste à étudier le comportement thermomécanique des assemblages bois-métal. L'objectif de cette étude est de fournir des outils techniques et numériques permettant la prédiction du comportement des assemblages sous l'effet de hautes températures et de proposer des

préconisations techniques pour leur dimensionnement.

1.4.4 Encadrement de post-doc et/ou projets de recherche

1. **Post-doc de TRAN Van Dang**
   Durée du contrat : juillet 2019-janvier 2020.
   Sujet : Caractérisation expérimentale du comportement au feu des assemblages bois réalisés par des tourillons en bois densifié.
   Financement : projet européen Interreg VB (Ref. NWE348).
   Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
   Pourcentage d'encadrement : 70%.
   Résumé : Le travail consiste à réaliser des tests d'incendie réel sur des assemblages bois formés par des tourillons en bois densifié sur des poutres en forme de L. Les résultats des tests d'incendie permettront d'obtenir des données expérimentales qui serviront à la validation des procédures numériques développées dans la thèse de TRAN Trong Tuan en cours de réalisation.
2. **Post-doc de THI Van Diem**
   Durée du contrat : janvier 2017-juin 2019.
   Sujet : Modélisation du comportement au feu de nouveaux assemblages innovants en bois densifié.
   Financement : projet européen Interreg VB (Ref. NWE348).
   Lieu du stage : LERMAB, 27 Rue Philippe Séguin, 88026 Épinal.
   Pourcentage d'encadrement : 70%.
   Résumé : L'utilisation d'un nouveau type d'assemblage par tourillons densifiés dans les structures en bois nécessite plusieurs vérifications vis-à-vis de différentes sollicitations dont les variations thermomécaniques. Ainsi, dans le cadre de ce post-doctoral, l'objectif sera de caractériser le comportement des assemblages des lamelles en bois par tourillons densifiées dans des conditions d'incendie. Pour ce faire, nous proposons deux approches séparées et complémentaire : l'expérimentation et la modélisation numérique.

1.4.5 Co-encadrement de thèses de Doctorat

Thèses en cours

1. **Thèse de TRAN Trong Tuan** : 04/2017-03/2020.
   Sujet : Comportement au feu des structures bois assemblées par des tourillons en bois densifié.

Financement : Bourse du gouvernement Vietnamien.
Directeur de thèse : Pr. Rogaume Y.
Pourcentage d'encadrement : 50%.
Résumé : Dans le cadre d'un projet européen, un nouvel assemblage par tourillons densifiés permettant d'assembler des lamelles en bois est en cours de validation au niveau structurel. Ce type d'assemblage possède l'avantage de ne pas utiliser de colles et de permettre de fabriquer des structures de grandes dimensions ne comportant que du bois. L'utilisation de ce type d'assemblages nécessite une multitude de vérifications de dimensionnement et de comportement à des sollicitations diverses dont les variations thermomécaniques. Ainsi, dans le cadre de ce travail de thèse, l'objectif sera de caractériser le comportement des assemblages lamelles de bois par tourillons densifiées soumises à des contraintes thermo-hydriques importantes, notamment lors d'incendie. Pour ce faire, nous proposons une approche couplée par expérimentations et par modélisation numérique. Les expérimentations permettront dans un premier temps d'acquérir les données de base pour développer le modèle. La modélisation numérique permettra ensuite de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'incendie de ces types de structures pour en améliorer les performances. Cela permettra en outre de réduire le nombre d'essais couteux. Le modèle sera validé par des mesures de températures à différentes profondeurs dans la section des lamelles, mais aussi au sein des tourillons densifiés.

2. **Thèse de EL HOUJEYRI Imane** : 2017-2020.
Sujet : Expérimentation et étude des produits d'ingénierie bois sans colle, assemblés par des tourillons en bois densifié.
Financement : projet européen Interreg VB (Ref. NWE348).
Directeur de thèse : Dr/HDR. Oudjene M.
Pourcentage d'encadrement : 50%.
Résumé : Dans le cadre du projet européen, nous visons à développer et à démontrer la viabilité de nouveaux produits constructifs sans colle en vue de leur utilisation dans la construction bois. Malgré les avantages qu'offre cette technologie, la viabilité de ce type d'assemblages, par tourillons en bois densifié, n'est pas encore tout à fait démontrée pour des applications structurelles à grande échelle. Le comportement en conditions de service, la durabilité, les performances sismiques et la sécurité incendie sont autant de paramètres non maîtrisés et qui conditionnent la commercialisation et l'utilisation de ces nouveaux systèmes en construction. Ce projet de thèse vise à développer des technologies et des méthodologies expérimentales et numériques permettant d'étudier et d'analyser la viabilité de ces nouveaux systèmes d'assemblages

réalisés par tourillons en bois densifié en vue d'un usage structurel.

Thèses soutenues

1. **Thèse de LI Mengya** : 01/2016-01/2019.

   Sujet : Caractérisation expérimentale et modélisation des panneaux composites bois-ciment.

   Directeur de thèse : Pr. El Ganaoui M.

   Pourcentage d'encadrement : 50%.

   Résumé : Dans le cas de la construction durable, de nouveaux panneaux à base des fibres de bois sont de plus en plus développés pour leur intérêt environnemental. En général, la fabrication de ce type de panneaux favorise la valorisation des sous-produits d'autres filières économiques comme l'utilisation de déchets des industries du bois. Des études scientifiques ont contribué au développement de ces matériaux bois-bétons. Elles visent à comprendre le comportement de ces matériaux sous différentes sollicitations. Ainsi, les propriétés thermomécaniques, hydriques et acoustiques ont été explorées. Cependant, certains besoins scientifiques et difficultés techniques liés à la caractérisation expérimentale et à la modélisation mécanique des panneaux bois-béton limitent la généralisation de leur utilisation massive dans le secteur du bâtiment. Il faudra notamment pouvoir répondre aux exigences croissantes de la règlementation thermique dans la construction. C'est dans cet objectif que se situe ce travail de thèse.

2. **Thèse de THI Van Diem** : 10/2014-09/2017.

   Sujet : Modélisation du comportement au feu des structures en bois.

   Financement : Allocations de recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur.

   Directeur de thèse : Pr. El Ganaoui M.

   Pourcentage d'encadrement : 50%.

   Résumé : Le travail proposé dans cette thèse est relatif à la caractérisation de la résistance au feu des structures en bois. Si le comportement du bois est assez bien connu, celui des structures exposées au feu s'avère plus difficile et cruciale pour déterminer leur performance réelle. L'objectif général de ce travail de thèse consiste donc à déterminer et à modéliser le comportement thermomécanique des structures bois soumis à de hautes températures (conditions d'incendie). La modélisation de ces structures complexes en cas d'incendie nécessite la connaissance de la variation des propriétés physiques des matériaux (densité, chaleur spécifique et conductivité thermique) en fonction de la température, et l'identification des différents paramètres cinétiques intervenants lors des étapes de la pyrolyse et de la combustion.

3. **Thèse de MNASRI Faiza** : 2014-2017.

Sujet : Modélisation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes : application aux milieux fibreux et l'isolation des bâtiments.
Projet de thèse est en cotutelle entre l'Université de Lorraine et l'Université de Monastir en Tunisie.
Directeur de thèse : Pr. El Ganaoui M.
Pourcentage d'encadrement : 25%.
Résumé : La plupart des matériaux utilisés dans la construction possèdent une structure poreuse à l'intérieur de laquelle l'eau sous forme liquide ou vapeur peut être stockée ou restituée au milieu environnant. L'humidité constitue donc l'une des principales causes des dommages que subissent les bâtiments. Les simulations numériques permettent d'étudier la performance hygrothermique, en tenant compte de la diffusion combinée de la chaleur, de l'air et de l'humidité, des enveloppes de bâtiments offrant la possibilité d'en améliorer la conception. La recherche menée dans cette étude a pour but de proposer des outils de modélisation pour prédire le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiment à base des panneaux poreux formés d'un composite bois-ciment.

4. **Thèse de VIGUIER Joffrey** : 2012-2015.
Sujet : Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique.
Projet de thèse : ANR Clameb.
Titre du projet : Classement mécanique non destructif du bois.
Directeur de thèse : Pr. Bleron L.
Pourcentage d'encadrement : 33%.
Résumé : La maitrise des propriétés mécaniques du bois résineux est indispensable pour généraliser ses applications dans la construction. Le programme scientifique de cette thèse s'inscrit dans cet objectif et qui s'intéresse particulièrement à l'effet de l'orientation des fibres à travers un modèle numérique permettant d'évaluer les principaux paramètres mécaniques caractérisants le sciage. Les résultats des tests sont comparés à ceux des simulations utilisant une mesure de masse volumique locale obtenue grâce à un scanner à rayons X.

1.5 Projets de recherche

Les travaux de recherche que j'ai menés au LERMAB, depuis mon recrutement en septembre 2008 en tant que Maître de conférences à l'Université de Lorraine, s'inscrivent pleinement dans les thématiques de recherche de l'axe 3 "Énergétique, Mécanique, Construc-

tion Bois". Les thèmes de recherche repris au sein de cet axe concernent les domaines suivants : la fabrication et la production, la mécanique des assemblages et des structures, les transferts couplés chaleur masse dans les enveloppes, l'efficacité énergétique, la qualité de l'air et le confort dans les bâtiments.

Les thématiques de recherche de l'axe 3 sont réparties en trois familles et sont abordées sous les deux aspects expérimental et modélisation. Avec mes collègues de la thématique "Fabrication et Production" dirigée par le Professeur MEAUSOONE Pierre-Jean, nous avons caractérisé le comportement des poutres bois renforcées par la fibre de carbone par deux techniques différentes et complémentaires (expérimentale et numérique). La procédure numérique développée est appliquée avec succès sur l'analyse du renforcement des structures bois assemblées par entures multiples (aboutage). Avec le Professeur EL GANAOUI Mohammed, responsable de l'axe 3 et de la thématique "Transferts couplés et enveloppes", dans la thèse de Melle MNASRI Faiza, nous avons développé une technique numérique permettant de modéliser les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes. Des applications aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments ont été simulées. Sous la direction du Pr. M. El Ganaoui, j'ai participé également au co-encadrement de deux autres thèses. Une sur la modélisation du comportement au feu des structures bois (thèse de THI Van Diem) et l'autre sur l'analyse des panneaux bois-ciment (thèse de LI Mengya). Avec mon collègue Dr. OUDJENE Marc de la thématique "Mécanique et structures bois", j'ai développé des lois de comportement spécifiques au matériau bois. Les lois mécanique et thermique sont intégrées dans le code Abaqus[4]. Les procédures numériques sont validées et appliquées à la simulation de plusieurs cas réels : assemblages des structures bois, poutres bois en flexion, structures mixtes (bois-métal, bois-béton), renforcement des structures bois par la fibre de carbone, comportement au feu des assemblages et des parois multicouches... Mon travail de recherche sur la sécurité incendie en ce qui concerne le comportement des résineux vis-à-vis du feu est supervisé par le Professeur ROGAUME Yann, Directeur Adjoint du LERMAB et responsable de l'axe 2 "Valorisation Chimique, Énergie et Procédés". Un modèle de simulation du comportement au feu des bois résineux est développé et appliqué à la simulation des parois à ossatures bois sous des conditions d'un feu réel. Le travail de collaboration avec mes collègues des axes 2 et 3 sur différents thèmes a donné lieu à plusieurs publications dans de revues internationales.

J'envisage de poursuivre mes activités de recherche autour de **trois thèmes** : **(1)** le renforcement des structures bois ; **(2)** le comportement au feu des assemblages bois et **(3)** la valorisation des bétons légers à base des déchets du bois dans la construction, avec un positionnement stratégique original. Il s'agit de travailler essentiellement sur différentes

espèces du bois régional en vue de son utilisation dans le secteur de la construction. Les travaux en cours pour lesquels les financements et les collaborations sont en ordre de marche et les travaux futurs envisagés seront présentés et discutés ci-dessous.

1.5.1 Renforcement des structures bois

Contexte et objectifs du projet

Les poutres en bois, les anciennes en particulier, sont souvent soumises à des sollicitations complexes telles que les attaques d'insectes et les effets du fluage et du vieillissement, dont les conséquences peuvent être désastreuses. La réduction de la section résistante des poutres en flexion et l'amorçage des fissures par traction transverse restent des questions de première importance auxquelles il faut apporter des solutions pour assurer la sécurité des usagers. L'utilisation des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des structures offre une solution intéressante et économique. Des laminés en PRF (Polymères Renforcés de Fibres) sont collés sur les zones tendues dans l'objectif de réparer et d'améliorer leur comportement en flexion. Cependant la caractérisation expérimentale du comportement des poutres bois renforcées n'a pas encore été clairement établie.

Le travail envisagé dans le cadre de ce projet vise à développer deux techniques de caractérisation des poutres bois renforcées en flexion. D'une part, il s'agit de contribuer à l'établissement de cette technique de renforcement des poutres bois par des essais expérimentaux et d'autre part de développer une procédure numérique pour simuler des structures bois renforcées par la fibre de carbone. Une campagne expérimentale sera réalisée sur des poutres en bois massif pour différentes essences locales, d'échelle représentative ; diverses configurations de renforcement seront appliquées sur ces éprouvettes, qui seront ensuite testées en flexion à quatre points en dalle d'essais. Pour la simulation numérique, un modèle éléments finis sera développé et validé sur des tests expérimentaux issus de ce projet. En outre, l'expertise technique et scientifique du LERFOB, en utilisant CT-scanner de la plateforme Xylosciences, sera impliquée dans la prédiction de la rigidité des poutres en bois avant la réalisation réelle des essais mécaniques.

Sur ce thème, une collaboration avec le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB-UMR 1092) et en partenariat avec Julien RUELLE, responsable de la Plateforme Xylosciences a été déjà initiée dans le cadre d'un projet de recherche intitulé STRU-RETROF : "STRUctural RETROFitting of CFRP-strengthened Timber Beams".

Techniques de caractérisation

La caractérisation du comportement mécanique des poutres en bois renforcées s'effectue de deux méthodes complémentaires :

1. Méthode non-destructive : grâce à la technique de tomographie X utilisée par l'équipe du LERFOB, il est possible de localiser très finement toute hétérogénéité, singularité, vide ou inclusion présents dans chaque poutre en bois, ainsi que de vérifier le positionnement des nœuds et de prévoir des systèmes de renforcements plus appropriés avant de procéder à des essais mécaniques destructifs. Cette technique est donc d'une grande utilité pour élaborer un système de renforcement plus adapté. Elle permet également la reconstruction en 3D du système mécanique global par collection de données suivant de multiples orientations. Le modèle (3D) reconstitué sera traité et analysé par la méthode des éléments finis.
2. Méthode destructive : une fois les poutres en bois sont analysées par la tomographie en rayon X, l'équipe du LERMAB s'en charge de réaliser des tests de flexion à quatre points sur des poutres bois avec différentes essences disponibles en Lorraine, à grandes échelle, dans l'objectif de caractériser le renforcement des structures bois par la fibre de carbone.

En plus de l'analyse expérimentale, ce projet vise à développer parallèlement une procédure numérique permettant de simuler le comportement flexionnel des poutres en bois renforcées par CFRP en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats des tests serviront comme une base de données pour la validation des modèles numériques.

Résultats marquants et perspectives

Le caractère interdisciplinaire envisagé dans le cadre de ce projet est justifié du fait que les deux équipes partenaires ont acquis avec les moyens d'essais expérimentaux dont elles sont munies une solide compétence en terme d'expérimentations de structures en vraie grandeur.

Le programme scientifique de ce projet répond d'une part à un enjeu stratégique pour LERMAB et LERFOB et d'autre part il vise à mettre au point des outils techniques et numériques à destination des professionnels permettant la prédiction du comportement en flexion des poutres en bois massif renforcées par la fibre de carbone et de proposer des préconisations techniques pour leur dimensionnement. La maitrise des techniques de renforcement aidera les entreprises à optimiser les pratiques de restauration des structures bois avec des gains de temps. Plusieurs papiers en rapport avec ce thème ont été publiés (voir la partie publications).

Faire appliquer les deux techniques expérimentales de caractérisation (destructive et non-destructive) sur des structures en bois à grandes échelles et développer parallèlement une procédure numérique pour simuler des structures renforcées par d'autres fibres végétales

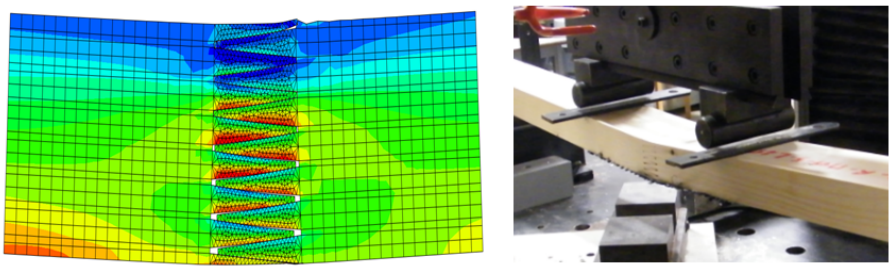


FIGURE 1.1 – Modes de rupture des poutres assemblées par entures multiples.

(lin ou chanvre). La fibre de lin est une fibre végétale extraite des tiges de la plante de lin. Elle est caractérisée par sa longueur élevée qui peut atteindre 25mm et par sa bonne résistance mécanique. La fibre de chanvre intéresse les industriels pour sa grande rigidité et son intérêt économique. Elle est utilisée dans le textile et dans le renforcement des composites. Elle peut se substituer à la fibre de verre et d'autres matériaux synthétiques utilisées principalement dans des composites agglomérés (pièces autos, matériaux de construction...).

L'utilisation de la fibre végétale dans un procédé de renforcement présente deux avantages : (1) sa facilité de mise en application : elle adhère facilement au bois qui est lui-même issu d'une espèce végétale ; (2) et un intérêt économique : la fibre végétale est très disponible et son coût de revient est largement inférieur à celui de la fibre de carbone. L'emploi de cette fibre dans le renforcement des structures en bois restera marginal tant que les problèmes scientifiques limitant son introduction ne seront pas solutionnés. Il faudra en particulier tester expérimentalement sa résistance maximale à la traction et son adhérence au cisaillement à l'interface bois-fibre dans des conditions climatiques extrêmes. C'est dans cet objectif que se situe ce thème de recherche. Il s'agit principalement de quantifier l'apport mécanique du renforcement des ossatures à base du bois local réalisé par des fibres végétales en fonction des résines utilisées et de différentes configurations de renforcement employées afin d'aboutir à une configuration optimale en terme de coût et d'efficacité.

La figure 1.1 compare la rupture numérique à celle de l'expérience. Le modèle numérique prédit la zone de l'amorçage des fissures. Les résultats de cette étude ont été publiés dans [3].

1.5.2 Résistance au feu des assemblages bois

Contexte et objectif général

Les travaux proposés dans ce thème sont relatifs au comportement thermomécanique des assemblages bois réalisés par organes métalliques. Depuis quelques années, on assiste à l'utilisation croissante du bois dans la construction. Le comportement mécanique des

assemblages bois est assez étudié et présenté dans la littérature, ce qui n'est pas le cas de son comportement au feu. Dans la majorité des cas la ruine des structures bois est causée principalement par la défaillance de ces assemblages. Il s'agit donc de répondre à ce besoin industriel qui consiste à étudier le comportement thermomécanique des assemblages bois-métal.

Actuellement, l'Eurocode 5[1] ne permet pas une modélisation complète des assemblages rencontrés dans la construction bois à cause notamment de la diversité des organes et la complexité des modes de rupture du bois. La simulation numérique par éléments finis permet de comprendre les mécanismes de rupture mis en jeu et d'optimiser les paramètres gouvernant le comportement non-linéaire des assemblages bois. Cependant, on voit très peu de modélisations tridimensionnelles et d'applications sur des problèmes industriels. Cet axe de recherche demeure donc important et le recours à la simulation numérique est indispensable si l'on souhaite comprendre les mécanismes de rupture des assemblages et améliorer ainsi la prédictivité des modèles de calcul existants.

Des paramètres supplémentaires ont une influence sur le comportement du bois et des assemblages. Parmi ceux-ci, l'évaluation du comportement des assemblages sous l'effet de la température (conditions hivernales très froides ou conditions extrêmes de type incendie) exige la connaissance de la distribution de la température dans les pièces de bois et l'influence des organes métalliques sur la modification des caractéristiques mécaniques et thermiques du bois. Peu de travaux ont été menés dans ce domaine et les préconisations normatives actuelles ne sont pas les plus adaptées.

Le programme de recherche a pour objectif de développer des méthodologies de simulation numérique par éléments finis permettant de prédire le comportement des assemblages sous l'effet combiné des charges mécaniques et des variations de température. L'extension des bases théoriques, le développement d'approches originales peuvent être mis en place aujourd'hui par le développement des outils numériques. L'objectif principal est de fournir les outils puissants d'analyse numérique, à destination des professionnels, permettant la prédiction du comportement des assemblages sous l'effet des variations extrêmes des températures et de proposer des préconisations techniques pour faciliter leur dimensionnement.

Dans la thèse de THI Van Diem[5], les procédures numériques développées (Umatht et Umat) ont été appliquées et validées sur plusieurs tests d'incendie divers et variés. Les tests ont été effectués selon la courbe d'un feu standard définie par la norme ISO 834-1[6]. Les résultats des simulations confirment la nécessité d'utiliser les modèles cinétiques qui prennent en compte la dégradation thermique (le séchage, la pyrolyse et la combustion des gaz émis à l'étape de la pyrolyse) du matériau bois au cours de son exposition au

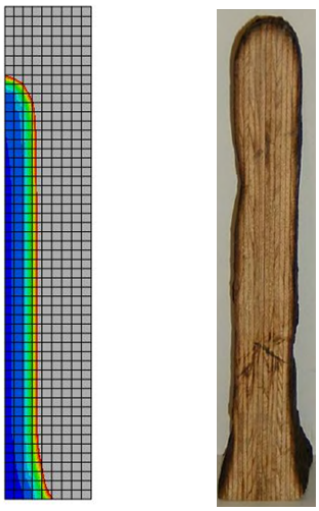


FIGURE 1.2 – Formation de la couche du charbon dans un test d'incendie.

feu comparés aux modèles basés sur l'approche réglementaire EC5[1], qui consistent à résoudre l'équation standard de la chaleur en tenant compte de l'évolution des propriétés thermo-physiques (la densité, la chaleur spécifique et la conductivité thermique) du bois en fonction de la température [7, 8]. Toutefois, l'application des modèles cinétiques reste difficile tant que les paramètres cinétiques d'entrée ne sont pas correctement déterminés. Il est donc nécessaire d'effectuer de l'analyse thermogravimétrique/Thermobalance (ATG) sur des échantillons en bois. Les travaux relatifs à l'identification des paramètres cinétiques utilisant plusieurs modèles en situation d'incendie sont peu ou rarement disponibles dans la littérature. Notre étude répond aussi bien à cet objectif : il s'agit de caractériser l'évolution de ces caractéristiques dans des conditions d'incendie réel. Les coefficients cinétiques mesurés seront ensuite utilisés comme des paramètres d'entrée pour les simulations. Ce travail devra être complété par des essais utilisant des flux de chaleur plus importants, variant de 50 à 150 kW/m^2, qui semblent plus proches des cas d'incendie réel.

La figure 1.2 compare la formation du charbon d'un échantillon en bois prédite par la simulation à celle d'un test d'incendie réel réalisé par Menis A. (2012) dans [9] . Les résultats des simulations ont été publiés dans [8].

Convergence avec d'autres équipes

Le projet proposé ici profitera de notre expérience en modélisation pour être appliquée à d'autres problématiques rencontrées par l'équipe du Professeur ROGAUME Yann, responsable de l'équipe "Valorisation Chimique, Énergie et Procédés". L'action de ce thème s'inscrit aussi bien dans les activités transversales entre les axes du LERMAB et pourra être appliquée à la modélisation de la combustion d'une bûche dans un appareil de chauf-

fage. Il s'agit en particulier de caractériser et d'optimiser un foyer pilote instrumenté déjà au LERMAB par l'équipe de l'axe 2. Dans ce contexte, un projet de recherche ICÉEL (Institut Carnot Énergie et Environnement en Lorraine) intitulé Opti-Bois (Optimisation d'un dispositif pilote de poêle à bois) en partenariat avec deux laboratoires LEMTA (Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée) et LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés) a été démarré en septembre 2016 et financé pour une durée d'un an.

Poursuite des travaux en cours

Le modèle élément fini disponible actuellement au LERMAB, est prêt à être exploité sur des structures bois à grande échelle. J'ai pu intégrer ces outils numériques dans le cadre du projet INTERREG V B NWE (North-West Europe, intitulé "TOWARDS ADHESIVE FREE TIMBER BUILDINGS", 2017 à 2020). Ce projet a pour objectif de développer de nouveaux produits en bois lamellé-collé sans adhésifs, assemblés par des tourillons en bois densifié. Je poursuivrai ceux-ci à travers notamment le co-encadrement et le lancement d'une thèse de Doctorat de TRAN Trong Tuan qui a commencé en mars 2017.

Ce type d'assemblage possède l'avantage de ne pas utiliser de colles et de permettre de fabriquer des structures de grandes dimensions ne comportant que du bois. Il s'agit de caractériser le comportement au feu des assemblages lamelles de bois par tourillons densifiées soumises à des contraintes hydro-thermiques très élevées. Pour ce faire, une approche couplée par expérimentation et par modélisation numérique est proposée. Les expérimentations permettront dans un premier temps d'acquérir les données de base pour développer le modèle élément fini. La modélisation numérique permettra de comprendre le comportement au feu de ce type d'assemblages dans l'objectif d'améliorer ses performances. Cela permettra de réduire le nombre de tests en laboratoire qui sont souvent très onéreux. Le modèle sera validé par des mesures de températures à différentes profondeurs dans la section des lamelles et au sein des tourillons densifiés.

Le modèle numérique pourra alors être utilisé pour estimer le comportement au feu des structures en bois plus complexes et fournir des données de base pour le dimensionnement de bâtiments complets à plusieurs étages. Les résultats pourront également servir de base pour amender les textes réglementaires tels ceux de l'Eurocode 5 [1].

1.5.3 Valorisation des bétons légers à base du bois

Ce projet vise à étudier le comportement de différentes biomasses régionales dans la fabrication des panneaux composites bois-ciment. Il offre ainsi des possibilités sérieuses de valorisation des biomasses locales dans le domaine de la construction, mais aussi des

avantages socio-économiques liés à l'amélioration du confort thermique du bâtiment et au développement d'une nouvelle technique de construction qui peut intéresser les professionnels du bâtiment.

Le secteur de la construction porte un intérêt croissant à l'utilisation des matériaux composites à base de bois en raison de leur contribution dans la régulation du climat intérieur. De nombreuses recherches ont montré que le comportement hygroscopique des matériaux d'origine végétale permet de réguler l'humidité ambiante. Actuellement, les bâtiments consomment de l'énergie en grande quantité et représentent un quart des émissions de dioxyde de carbone. Pour améliorer le confort des usagers et réduire l'impact environnemental, le secteur de la construction doit donc innover, d'où l'intérêt de développer l'écoconstruction.

Dans la construction durable, les matériaux utilisés doivent être plus performants. Ainsi, de nouveaux matériaux à base du bois sont de plus en plus développés pour leur intérêt environnemental et leurs performances thermique et phonique. La fabrication des panneaux béton à base des fibres du bois en est un exemple et favorise la valorisation des sous-produits d'autres filières économiques comme l'utilisation de déchets des industries du bois. Des études scientifiques ont contribué au développement de ces matériaux bois-ciment [10]. Elles visent à comprendre le comportement de ces matériaux sous différentes sollicitations. Ainsi, les propriétés thermomécaniques, hydriques et acoustiques ont été explorées. Cependant, certains besoins scientifiques et difficultés techniques liés à la caractérisation expérimentale et à la modélisation mécanique des panneaux bois-béton limitent la généralisation de leur utilisation massive dans le secteur du bâtiment.

L'intérêt principal de ce projet est l'élaboration d'un nouveau panneau composite bois-ciment à base des déchets du bois local en vue de son utilisation massive dans le secteur de la construction. Ce thème de recherche s'inscrit dans le prolongement des travaux de thèse de Melle LI Mengya soutenue en décembre 2018 [11]. Cette thèse ouvre une vraie piste de recherche qui vise à étudier le comportement de différentes biomasses régionales dans la fabrication des panneaux composites bois-ciment.

1.6 Publications et productions scientifiques

1.6.1 Ouvrage

1. **Khelifa M.** *Résistance Des Matériaux. Cours et exercices.*
   ISBN : 978.2.7135.3181.1, Édition Casteilla, (2010).Cet ouvrage permet de comprendre simplement les principes de calcul des structures en génie civil. Son axe

pédagogique résume de manière synthétique les aspects théoriques et pratiques utilisés en RDM. Il rassemble des formules utiles pour une résolution rapide des problèmes de structures et contient plusieurs exemples corrigés. Les méthodes analytiques, les plus utilisées en calcul des systèmes isostatiques et hyperstatiques, sont développées en détail. Un livre extrêmement utile pour toute personne effectuant des calculs de structures. Il s'adresse aux ingénieurs et aux techniciens en génie civil.

1.6.2 Articles de revues

1. El Houjeyri I., Thi V. D., Oudjene M., Ottenhaus L.-M., **Khelifa M.**, Rogaume Y. Coupled nonlinear-damage finite element analysis and design of novel engineered wood products made of oak hardwood. European Journal of Wood and Wood Products, 2020. https ://doi.org/10.1007/s00107-020-01617-7
2. **Khelifa M.**, Oudjene M., Ben Elechi S., Rahim M. FE stress analysis and prediction of the pull-out of FRP rods glued into glulam timber. Wood Material Science & Engineering. 2020. DOI : 10.1080/17480272.2020.1776769
3. Bui T.A., Oudjene M., Lardeur P., **Khelifa M.**, Rogaume Y. Towards experimental and numerical assessment of the vibrational serviceability comfort of adhesive free laminated timber beams and CLT panels assembled using compressed wood dowels. Engineering Structures 213 (2020) 110586.
4. Li M., Nicolas V., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Fierro V., Celzard A. Modelling the hygrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. Industrial Crops & Products 142 (2019) 111784.
5. El-Houjeyri I., Thi V-D., Oudjene M., **Khelifa M.**, Rogaume Y., Sotayo A., Guan Z. Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels. Construction and Building Materials 222 (2019) 288-299.
6. Li M., **Khelifa M.**, Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. Composite Structures 209 (2019) 13-22.
7. Li M., Khennane A., Brandelet B., El Ganaoui M., **Khelifa M.**, Rogaume Y. Modelling of heat transfer through permanent formwork panels exposed to high temperatures. Construction and Building Materials 185 (2018) 166-174.
8. Thi V.D., **Khelifa M.**, Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall. International Journal of Thermal Sciences 132 (2018) 96-103.

9. Tran T.T., Thi V.D., **Khelifa M.**, Oudjene M., Rogaume Y. A constitutive numerical modelling of hybrid-based timber beams with partial composite action. Construction and Building Materials 178 (2018) 462-472.
10. Oudjene M., Meghlat E.M., Ait-Aider H., Lardeur P., **Khelifa M.**, Batoz J-L. Finite element modelling of the nonlinear load-slip behaviour of full-scale timber-to-concrete composite T-shaped beams. Composite Structures 196 (2018) 117-126.
11. **Khelifa M.**, Fierro V, Macutkevic J and Celzard A. Nanoindentation of flexible graphite : Experimental versus simulation studies. Advanced Materials Science (2018), Vol. 3(2) : 1-11.
12. Tran T-T., **Khelifa M.**, Nadjai A., Oudjene M., Rogaume Y. Modelling of fire performance of Cross Laminated Timber panels. Journal of Physics : Conf. Series 1107 (2018) 032002. **doi** : 10.1088/1742-6596/1107/3/032002
13. Thi V.D., **Khelifa M.**, Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Finite element analysis of heat transfer through timber elements exposed to fire. Engineering Structures 143 (2017) 11-21.
14. Letellier M., Delgado-Sanchez C., **Khelifa M.**, Fierro V., Celzard A. Mechanical properties of model vitreous carbon foams.
    Carbon 116 (2017) 562-57.
15. Oudjene M., Tran V.D., **Khelifa M.** Cyclic and monotonic responses of double shear single dowelled timber connections made of hardwood species : Experimental investigations. Construction and Building Materials 132 (2017) 188-195.
16. Li M., **Khelifa M.**, El Ganaoui M. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. International Journal of Sustainable Built Environment (2017) 6, 587-596
17. Mnasri F., El Ganaoui M., **Khelifa M.**, Gabsi S. An example of feasibility study of eco materials production chain and bio-based products for eco-construction/renovation in the named greater region (Belgium, France, Luxembourg). Energy Procedia 139(2017) 167-172.
18. Li M., Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M. Modelling of timber I-beams in bending. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. Vol. 5, No. 6 (2017).
19. Li M., Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M. Analysis of flexural behavior of wood-concrete beams. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. Vol :11, No :3, 2017.

20. Thi V.D., Li M., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Finite element modeling of heat and moisture transfer in porous material. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol :11, No :4, 2017.
21. **Khelifa M.**, Celzard A., Oudjene M., Ruelle J. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. International Journal of Adhesion & Adhesives 68 (2016) 283-297.
22. Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Finite element modelling of the pyrolysis of wet wood subjected to fire. Fire Safety Journal 81(2016)85-96.
23. **Khelifa M.**, Khennane A., El Ganaoui M., Celzard A. Numerical damage prediction in dowel connections of wooden structures, Materials and Structures.
    Materials and Structures (2016) 49 :1829-1840.
24. **Khelifa M.**, Khennane A., El Ganaoui M., Celzard A. Erratum to : Numerical damage prediction in dowel connections of wooden structures. Materials and Structures (2016) 49 :1841-1842.
25. **Khelifa M.**, Auchet S., Méausoone P-J., Celzard A. Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers.
    Engineering Structures 101 (2015)364-375.
26. **Khelifa M.**, Lahouar M.A., Celzard A. Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015, Vol.29, No.19, 2104-2116.
27. **Khelifa M.**, Fierro V., Celzard A. FE simulation of repaired timber beams under tensile load using CFRP patches. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015, Vol. 29, No.3, 158-170.
28. Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Numerical analysis of laminated veneer lumber panels in fire. Applied Mechanics and Materials Vol. 784 (2015) pp 104-110.
29. **Khelifa M.**, Thi V.D. FE analysis of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced timber beams. Applied Mechanics and Materials Vol. 784 (2015) pp 419-426.
30. **Khelifa M.**, Khennane A., El Ganaoui M., Celzard A. Numerical modelling of 3D dowelled timber joints using advanced fully coupled hydro-mechanical constitutive equations. Mechanics & Industry 16, 501 (2015).
31. **Khelifa M.**, Khennane A., El Ganaoui M., Rogaume Y. Analysis of the behaviour of multiple dowel timber connections in fire. Fire Safety Journal 68(2014)119-128.

32. **Khelifa M.**, Fierro V., Celzard A. Finite element simulation of nanoindentation tests using a macroscopic Computational model. Journal of Mechanical Science and Technology 05/2014 28(8) :3209-3217.
33. **Khelifa M.**, Celzard A. Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. Composite Structures 111 (2014) 393-400.
34. **Khelifa M.**, Vila Loperena N., Bleron L., Khennane A. Analysis of CFRP strengthened timber beams. Journal of Adhesion Science and Technology, (2014) Vol. 28, No. 1, 1-14.
35. Khennane A., **Khelifa M.**, Bleron L., Viguier J. Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures. Mechanics of Materials 68 (2014) 228-236.
36. **Khelifa M.**, Khennane A. Numerical analysis of the cutting forces in timber. ASCE Journal of Engineering Mechanics, (2014) 140(3), 523-530.
37. Bentayeb F., Tavakoli-Gheynania I., El Ganaouia M., Boualia B.,**Khelifa M.** Modelling of nonlinear wooden columns reinforced by carbon fiber. Mechanics & Industry, (2013), Vol. 14, Issue 03, pp. 219-225.
38. Oudjene M., **Khelifa M.**, Segovia C. and Pizzi A. Application of Numerical Modelling to Dowel-Welded Wood Joints. Journal of Adhesion Science and Technology (2010) 24, pp. 359-370.
39. Oudjene M. and **Khelifa M.** Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction. Materials & Design, Vol. 30 (2009), Issue 10, pp. 4081-4087.
40. Oudjene M. and **Khelifa M.** Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings. Construction and Building Materials, Vol. 23 (2009), Issue 11, pp. 3359-3366.
41. **Khelifa M.** and Oudjene M. Numerical damage prediction in deep-drawing of sheet metals. Journal of Materials Processing Technology. pp. 71-76, 200, (2008).
42. **Khelifa M.**, Oudjene M. and Khennane A. Fracture in sheet metal forming : effect of ductile damage evolution. Journal of Computers & Structures. Vol. 85 (2007), Issues 3-4, pp. 205-212.
43. **Khelifa M.**, Saanouni K. et Cherouat A. Prévision de l'endommagement ductile. Application à l'emboutissage de tôles minces. Mécanique & Industrie. Vol. 7 (2007), Nos. 5-6.
44. **Khelifa M.**, Saanouni K., Gahbiche M. A. et Dogui A., Plasticité anisotrope couplée à un endommagement ductile isotrope. Application au gonflement hydraulique de

tôles minces. European Journal of Computational Mechanics, Vol. 15 (2006), Issue 7-8, pp.891-908.

45. **Khelifa M.**, Badreddine H., Belamri N., Gahbiche M. A., Saanouni K., Cherouat A. and Dogui A. Effect of anisotropic plastic flow on the ductile damage evolution in sheet metal forming. Application to the circular bulging test.
International Jounal of Forming Processes. No2, Vol.8, (2005).

46. Saanouni K., Belamri N., **Khelifa M.**, Badreddine H. and Cherouat A. Finite anisotropic plastic flow with ductile damage for sheet metal forming simulation. Computational Fluid and Solid Mechanics (2003), Vol. 1, pp. 611-614.

1.6.3 Conférences internationales avec actes

1. El Houjeyri I., Oudjene M., **Khelifa M.**, Rogaume Y., Sotayo A., Guan Z. Structural performance of double shear softwood and hardwood timber-to-timber joints assembled through densified wood dowels. WCTE 2018. World Conference on Timber Engineering. August 20-23, 2018. Seoul, Republic of Korea.

2. Bui T.A., Oudjene M., Lardeur P., **Khelifa M.**, Rogaume Y. Vibration performance of adhesive free multi-layered timber beams assembled through compressed wood dowels. WCTE 2018. World Conference on Timber Engineering. August 20-23, 2018. Seoul, Republic of Korea.

3. Meghlat E-M., Oudjene M., Ait-Aider H., Lardeur P., **Khelifa M.**, Batoz J-L. Experimental and numerical investigations on the structural behaviour of timber-to-concrete T-shaped beams connected with SFS screws. WCTE 2018. World Conference on Timber Engineering. August 20-23, 2018. Seoul, Republic of Korea.

4. Tran T.T., **Khelifa M.**, Nadjai A., Oudjene M. and Rogaume Y. Modelling of fire performance of Cross Laminated Timber (CLT) panels. 3rd ESFSS / European Symposium on Fire Safety Science. September 12-14, 2018 at the University of Lorraine, in Nancy, France.

5. Thi V.D., Li M., El Ganaoui M., **Khelifa M.**, Rogaume Y. Numerical modeling of the pyrolysis of timber structures subjected to fire. ICOME'17 : International Conference on Materials & Energy. July 06-09, 2017 Tianjin, China.

6. Li M., Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M. Modelling of timber I-beams in bending. 1st International Conference on Timber Structures and Engineering. 13-15 June 2017. New Forest, UK.

7. Li M., Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M. Analysis of flexural behavior of wood-concrete beams. ICWSET 2017 : 19th International Conference on Wood Science, Engineering and Technology. March, 29-30, 2017. Paris, France.
8. Thi V.D., Li M., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Finite element modeling of heat and moisture transfer in porous material. ICWSET 2017 : 19th International Conference on Wood Science, Engineering and Technology. March, 29-30, 2017. Paris, France.
9. **Khelifa M.** Numerical analysis of damage evolution of 3D timber-steel hybrid beams in bending. WCTE 2016-World Conference on Timber Engineering, August 22-25, 2016, Vienne, Austria.
10. Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Modelling of heat transfer in timber exposed to fire. WCTE 2016-World Conference on Timber Engineering, August 22-25, 2016, Vienne, Austria.
11. Thi V.D., Mnasri F., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Numerical analysis of heat and moisture transfer in porous material. ICOME'2016-International Conference On Materials & Energy, 17-20 May, 2016, La Rochelle, France.
12. Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les parois à ossatures bois.
    International congress for applied mechanics. 9ième journées d'études techniques, JET'2016. 3,4 et 5 mai 2016, Hammamet-Tunisie.
13. **Khelifa M.**, Rogaume Y. FE analysis of CFRP-strengthened timber finger-joint. ICCS18 - 18th International Conference on Composite Structures.
    Lisbon, Portugal, 15-18 June 2015.
14. **Khelifa M.**, Fierro V., Celzard A., Letellier M., Delgado Sánchez C. FE analysis of carbon foam under multiple compressive loading. ICCS18-18th International Conference on Composite Structures.
    Lisbon, Portugal, 15-18 June 2015.
15. Thi V.D., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Rogaume Y. Numerical analysis of laminated veneer lumber panels in fire. ICDM2-The Second International Conference on Damage Mechanics.
    University of Technology of Troyes, France 8-11 July 2015.
16. **Khelifa M.**, Thi V.D. FE analysis of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced timber beams. ICDM2-The Second International Conference on Damage Mechanics.
    University of Technology of Troyes, France 8-11 July 2015.

17. Mnasri F, El Ganaoui M., **Khelifa M.**, Gabsi S., An example of feasibility study of eco-materials production chain and bio-based products for eco-construction/ renovation in the named great region (Belgium, France, Luxembourg). Proceedings of ICOME'15. International Conference on Materials & Energy. May 19-22, 2015, Tetouan, Morocco.

18. **Khelifa M.**, Rogaume Y. Numerical modeling of the behaviour of CFRP confined timber post. 1st International Conference on Mechanics of Composites, Stony Brook University, USA, 8-12 June 2014.

19. **Khelifa M.**, Rogaume Y. Modélisation numérique du comportement thermomécanique des assemblages bois. VIIIèmes Journées d'Etudes Techniques-JET'2014. The International congress for applied mechanics, 28-30 avril 2014, Marrakech-Maroc.

20. **Khelifa M.**, El Ganauoi M., Simulation numérique du renforcement des poteaux en bois par la fibre de carbone. 11ème congrès de Mécanique. Vol 1 : Mécanique des Solides p113-115. Agadir (Maroc) du 23 au 26 Avril 2013.

21. **Khelifa M.**, Oudjene M., Experimental and numerical analyses of single double shear dowel-type timber joints, WCTE2010. World Conference on Timber Engineering, Italy, June 20-24, 2010.

22. **Khelifa M.**, Oudjene M., Auchet S. et Méausoone P-J., Modélisation numérique du comportement non-linéaire des assemblages bois par broches métalliques. VIèmes Journées d'Etudes Techniques 2010. The International congress for applied mechanics. Marrakech-Maroc, 05 au 07 mai 2010.

23. **Khelifa M.**, Belamri N., Saanouni K. and Cherouat A. Anisotropic elastoplastic behavior fully coupled with isotropic ductile damage for sheet metal forming. The seventh international conference on Computation Structures Technology(CST'2004), Lisbon, 7-9 September 2004.

24. Belamri N., **Khelifa M.**, Saanouni K., Cherouat A. and Autesserre P. Sheet metal blancking simulation using a coupled anisotropic plastic flow damage modelling. 7th International Conference ESAFORM'2004, Trondheim, Norway, April 28-30, 2004.

25. **Khelifa M.**, Badreddine H., Belamri N., Gahbiche M. A., Saanouni K., Cherouat A. and Dogui A. Influence de l'anisotropie plastique sur l'endommagement isotrope de tôles minces. Application au gonflement hydraulique. Actes des Quatrièmes Journées Scientifiques et Techniques en Mécanique et Matériaux (JSTMM'02), Monastir-Tunisie, 25-26 Octobre 2002.

1.6.4 Conférences nationales avec actes

1. Thi V.D., **Khelifa M.**, Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Modélisation du comportement hygrothermique du bois exposé au feu. 25ème congrès de la Société Française de Thermique SFT. Marseille, 30 mai-02juin 2017.
2. Thi V.D., Nguyen D.L., **Khelifa M.**, Oudjene M., Rogaume Y. Modélisation numérique du comportement du bois exposé au feu. CSMA 2017 : 13ème Colloque National en Calcul des Structures. 15-19 Mai 2017, Presqu'île de Giens (Var).
3. Li M., Nicolas V., **Khelifa M.**, El Ganaoui M., Celzard A. Modélisation des transferts hygrothermiques dans une paroi de bâtiment bio-sourcée. XIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes. 22-24 mai 2017, LUSAC Saint-Lô, France.
4. **Khelifa M.**, Bleron L., El-Ganaoui M. Modélisation numérique du comportement hydromécanique du matériau bois. Application à la résistance d'un assemblage par tige. Congrès Français de la Mécanique (CFM'2013), Bordeaux du 26 au 30 Août 2013.
5. Bleron L., **Khelifa M.**, Vila Loperena N., Simulation numérique du comportement thermo-hydro-mécanique des assemblages bois réalisés avec des organes métalliques. Congrès Français de la Mécanique (CFM'2013), Bordeaux du 26 au 30 Août 2013.
6. Bentayeb F., **Khelifa M.** Analyses numérique et expérimentale du comportement des poteaux en bois renforcés par des fibres de carbone. Congrès Français de la Mécanique (CFM'2013), Bordeaux du 26 au 30 Août 2013.
7. **Khelifa M.**, Bogard F., Saanouni K. and Guo Y.Q. Prévision de l'endommagement dans l'emboutissage de tôles minces par la méthode incrémentale et la méthode inverse. Congrès Français de la Mécanique (CFM'2005), Troyes du 28 Août au 02 Septembre 2005.
8. **Khelifa M.**, Saanouni K., Gahbiche M. A., Cherouat A. and Dogui A. Elastoplasticité anisotrope avec endommagement. Application au gonflement hydraulique de tôles minces. Congrès Français de la Mécanique (CFM'2005), Troyes du 28 Août au 02 Septembre 2005.

Chapitre 2

Modélisation du comportement au feu des structures en bois

2.1 Introduction

Depuis plusieurs années, l'axe de recherche 3 "Énergétique, Mécanique, Construction Bois" du LERMAB hébergé sur le site d'Épinal à l'ENSTIB, en cohérence avec son environnement pédagogique et industriel, joue un rôle d'interface entre la recherche et les industries de la filière bois, développant des recherches fondamentales et appliquées sur le matériau bois et de ses dérivées au travers de nombreuses collaborations avec différents centres de transfert technologique tels le Critt Bois et le CETELOR dans le cadre du pôle de compétitivité Fibres-Energivie. Les nouveaux matériaux développés autour du bois et ses dérivées offrent un bon rapport épaisseur/performance thermique. Dans ce contexte particulier, le matériau bois se présente comme une solution pertinente dans le domaine de la construction.

Le bois est un matériau de construction de nature biologique issu d'espèce végétale vivace, l'arbre. Il offre de nombreuses possibilités de réalisations et d'expressions architecturales comparé aux matériaux traditionnels tels que le béton et l'acier. De plus, il est en phase avec l'évolution des exigences en matière d'environnement et d'économie d'énergie, ce qui justifie son utilisation dans la construction durable comme les maisons passives. L'utilisation croissante du matériau bois dans le domaine de la construction nécessite donc un haut niveau de connaissance et de maîtrise du comportement des structures en bois sous hautes températures. Ainsi, il est 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 [1, 12–14].

Les travaux présentés dans ce mémoire sont relatifs à la caractérisation et à la modélisation

du comportement thermomécanique du matériau bois. Si le comportement mécanique du bois est assez bien connu et présenté dans la littérature, celui des structures bois en cas d'incendie s'avère plus difficile pour estimer sa résistance. En effet, dans la majorité des cas la ruine de ces structures est liée aux phénomènes de pyrolyse et de combustion du matériau lui-même [7, 8]. La combustibilité de ce matériau le distingue, en particulier, des deux autres matériaux (le béton et l'acier) les plus utilisés dans la construction, ce qui engendre un comportement différent en cas d'incendie. Dans ce contexte, de nombreux pays dans le monde se soucient de la résistance au feu des structures en bois, car la propagation du feu est fortement dépendante des matériaux combustibles utilisés dans la conception des parois de bâtiment [1, 8]. Les normes réglementaires, rapportées dans [1], établies dans la majorité de ces pays, sont conçues pour que les structures restent stables pendant un temps donné d'exposition au feu. Elles ont été développées pour des matériaux non combustibles dont le comportement en température change brutalement en fonction des niveaux atteints. Ces préconisations normatives permettent : (1) de faciliter l'intervention des professionnels de l'incendie et des sapeurs-pompiers dans le but de minimiser les dommages humains et matériels qui peuvent être causés par la propagation rapide d'un feu ; et (2) d'évacuer les usagers du bâtiment en toute sécurité.

Bien que le matériau bois soit combustible, les structures en bois résistent d'une manière remarquable au feu comme en témoignent de nombreuses études [1, 7, 8, 12–14]. La couche du charbon qui se forme à la surface exposée au feu, au début de l'incendie, joue un rôle d'isolant qui permet de freiner la propagation du feu vers la section centrale de l'élément où le bois reste sain. Ainsi, la formation de la couche de charbon permet aussi de réduire le flux de chaleur entrant. D'un point de vue mécanique, le charbon ne présente aucune résistance, ce qui se traduit par une perte de la section résistante de l'élément en bois. Par ailleurs, pour que la combustion du bois puisse se développer il faut qu'elle soit alimentée en oxygène, ce qui explique son développement en surface exposée seulement.

La résistance au feu d'une section en bois, selon l'approche réglementaire EC5 [1], est basée sur l'estimation de la section résiduelle de l'élément en bois après une durée connue d'exposition au feu. La section résiduelle est obtenue en déduisant de la section initiale de l'élément en bois l'épaisseur de la couche du charbon. La dégradation thermique des propriétés mécaniques du bois selon EC5 [1] est directement prise en compte en majorant l'épaisseur de la couche consumée. En l'absence de données expérimentales réalisées sur des bois de différentes essences soumis à des feux de différents types et puissances, cette hypothèse se heurte à la complexité du phénomène de combustion, et elle ne reflète pas le comportement réel au feu du matériau bois, car la majorité des données des tests utilisées ont été réalisés à l'échelle du laboratoire dans des fours sur des échantillons de petites

tailles [9]. Les informations collectées lors d'un test d'incendie réel d'un bâtiment sont peu disponibles dans la littérature [9, 15]. La réalisation d'un test d'incendie à grande échelle reste très onéreuse. Elle s'effectue souvent en présence des sapeurs-pompiers, et elle nécessite de prévoir des installations complexes.

Un frein important au développement de l'utilisation du matériau bois dans la construction est lié : (1) à sa combustibilité, qui suscite des interrogations quant à la sécurité des structures en bois vis-à-vis du feu ; et (2) au manque de données expérimentales [5, 7, 8]. C'est notamment le cas pour la construction d'immeubles de grande hauteur à plusieurs étages ou des ERP (Établissements recevant du public). En outre, les recherches réalisées dans ce domaine sont pour la plupart empiriques et les modèles analytiques et numériques sont simples, rares et peu avancés [5, 9, 15]. Par manque de méthodes précises d'analyse de la résistance au feu des structures bois, ce matériau se trouve pénalisé au niveau de la conception et du dimensionnement. La réglementation européenne, présentée dans EC5 [1], appliquée au dimensionnement des structures en bois exposées au feu, traite la diffusion de la température dans l'épaisseur de la section ainsi que la formation du charbon au cours d'exposition au feu de façon limitée et imprécise, en raison du manque de données scientifiques.

Le bois est le matériau de construction pour lequel les travaux relatifs aux propriétés physico-thermiques en situation d'incendie sont les moins nombreux. Cela est dû à la complexité d'obtenir ces données, en particulier, dans les plages de températures au-dessus de 100°C. Le développement de modèles généralisés demande un travail de recherche basé d'une part sur l'exploitation des résultats des tests réels d'incendie à petite et grande échelles et d'autre part sur l'analyse par simulation numérique qui nécessite une bonne maîtrise des paramètres d'entrée. Notre étude répond donc à cet objectif. Ce point a notamment été développé dans les travaux de thèse de Thi V.D. [5]. Il a traité en détail les aspects théoriques et numériques liés au modèle éléments finis. Sur le plan théorique, il a formulé le couplage thermomécanique. La loi thermique intègre les trois modes du transfert de chaleur la conduction, le rayonnement et la convection. La loi mécanique est modélisée dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles utilisant la notion des variables d'état. Elle tient compte du couplage fort entre le comportent élastique, plastique et l'endommagement. Il a implémenté la modélisation dans le code Abaqus [4]. Ces travaux ont abouti à l'enrichissement du logiciel Abaqus [4] avec deux nouvelles routines Umat et Umatht. Ses recherches ont donné lieu à 18 publications dont 9 articles dans des revues internationales et 9 articles dans des congrès avec actes ce qui témoigne indéniablement de l'intérêt que présente ce domaine de recherche dans le monde.

Cependant, certains verrous scientifiques liés à la justification de l'application de l'ap-

proche réglementaire EC5 [1] à l'analyse du comportement au feu du matériau bois de différentes essences limitent sérieusement son utilisation dans la phase de combustion pour des niveaux de températures supérieurs à 400°C. Ces problèmes sont abordés et discutés dans la thèse de Thi V.D. [5]. Pour modéliser au mieux les différentes phases de la dégradation thermique (séchage, pyrolyse et combustion) du matériau bois, il est nécessaire d'appliquer d'autres modèles cinétiques plus avancés, basés sur l'approche multi-échelle formulée à partir des lois d'*Arrhenius*. C'est dans cet objectif que se situe la première partie de ce chapitre.

L'application de la loi cinétique ainsi que le mécanisme réactionnel de la dégradation thermique du bois nécessite l'identification de plusieurs paramètres cinétiques. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à cet aspect. Une technique de caractérisation et d'optimisation de ces paramètres cinétiques a été développée et confrontée aux données des tests. L'identification est faite sur la confrontation des courbes de la perte de masse et de la vitesse de perte de masse, réalisées par l'analyse thermogravimétrique (ATG) à différentes vitesses de chauffe, avec celles de la modélisation.

Le travail proposé est aussi relatif à la modélisation du comportement mécanique du matériau bois sous des conditions d'incendie. Le couplage thermomécanique est décrit dans la dernière partie de ce chapitre. Des comparaisons entre l'expérience et la présente méthodologie sont réalisées sur des applications multicouches qui sont très fréquentes et plus difficiles à modéliser. Cette partie se termine par une conclusion générale formulée à partir des connaissances et des enseignements acquis pendant le développement de ce mémoire ; par des perspectives et des axes de travail qui peuvent améliorer ce thème de recherche.

Le contenu de ce chapitre est organisé en **quatre grandes parties** comme suit :

- La **première partie** porte sur la description des modèles thermiques simplifiés les plus utilisés dans la littérature. Après un rappel sur le calcul des caractéristiques physiques (conductivité, densité et chaleur spécifique), je présente la technique d'implémentation des lois thermique et mécanique via les routines Umatht et Umat dans le code Abaqus [4], puis des exemples permettant de valider ces approches. Ces modèles dits de l'ingénieur manquent de précision comme nous l'avons démontré dans la thèse de Thi V.D. [5]. À titre d'exemple, la conductivité thermique baisse lentement après 450°C ; ce qui n'est pas le cas pour EC5[1] où la conductivité augmente sensiblement à partir de ce niveau de température. En outre l'évolution de la chaleur spécifique présente un saut très important vers 100°C pour prendre en compte l'étape de séchage, ce qui n'est pas pleinement justifié. Pour améliorer la prédictive des modèles numériques, nous avons développé parallèlement des modèles

de pyrolyse décrivant avec précision la cinétique du bois lors d'un incendie.

- La **deuxième partie** présente le choix de trois modèles de pyrolyse du bois à l'échelle de la particule en vue de sa modélisation macroscopique, à petite et à grande échelle. L'application de ces modèles nécessite l'identification des mécanismes réactionnels et la détermination des paramètres cinétiques mis en jeu lors de la dégradation thermique du bois et de ses constituants. La richesse et la diversité des résultats disponibles dans la littérature rendent compte de la difficulté à expliquer ces cinétiques complexes. Cette étude se propose d'identifier les paramètres cinétiques des modèles de pyrolyse choisis par une technique d'optimisation.
- La **troisième partie** présente la procédure d'identification des paramètres cinétiques des particules en bois réalisés par l'analyse thermogravimétrique. En restituant les résultats d'une étude bibliographique poussée, nous avons fait le choix de déterminer les constantes cinétiques de trois pseudo-composants du bois en respectant les valeurs des plages indiquées dans la littérature. Une fois les paramètres optimums déterminés, ils seront intégrés dans le modèle numérique pour simuler des cas d'incendie réel sur des éprouvettes en bois de petite et de grande échelle.
- La **dernière partie** est consacrée à la validation des modèles cinétiques sur plusieurs tests d'incendie. Les résultats des simulations, en terme de températures, sont souvent comparés aux valeurs mesurées par les tests. Cette étude se propose de contribuer de façon innovante à la simulation du comportement au feu du matériau bois en développant une approche théorique à l'échelle de la particule en vue d'une modélisation macroscopique des phénomènes couplés : thermiques, chimiques, physiques et mécaniques.

2.2 Modèles thermomécaniques simplifiés

2.2.1 Introduction

Dans le cadre de la sécurité incendie, les produits de la construction doivent être testés sous des conditions d'incendie réel. A l'échelle de laboratoire, les tests d'incendie sont souvent réalisés conformément à la norme ISO 834-1 [6]. Dans ce contexte, la démarche d'ingénierie de la sécurité incendie permet d'estimer le niveau de sécurité des produits de bâtiment en limitant les niveaux de températures à ne pas dépasser. Les tests de résistance au feu sont contraignants et très couteux aux industriels ce qui pénalise l'utilisation massive du matériau bois dans la construction. De plus, le bois est le matériau de construction pour lequel les informations sur ce sujet sont les moins disponibles dans

la littérature. A ce titre, un programme de recherche a été lancé en 2014 dans le cadre de la thèse de Thi V.D. [5] dont l'objectif est de mettre au point un outil numérique d'analyse du comportement au feu des structures en bois. Le modèle thermomécanique développé prend en compte l'évolution des propriétés physico-thermiques et mécanique du bois en fonction de la température. Ce modèle s'appuie sur les différentes approches les plus utilisées dans la littérature [1, 12–14]. En se basant sur les résultats rapportés dans la thèse Thi V.D. [5] sur le calcul des profils de températures et des épaisseurs des couches du charbon, le modèle élément fini permet d'évaluer les performances au feu des structures en bois.

Le modèle thermomécanique tridimensionnel ainsi défini intègre le calcul des profils de températures dans un modèle mécanique non-linéaire à travers des coefficients de réduction des propriétés des matériaux en fonction de la température conformément à l'approche EC5 [1]. Le bois est considéré orthotrope transverse. L'écoulement plastique est décrit par les critères quadratiques de Hill (1948) [16]et de Hoffman (1967) [17]. L'identification des paramètres du modèle est réalisée sur des données expérimentales obtenues sur des tests réels d'incendie disponibles dans la littérature. A ce titre, plusieurs comparaisons avec différentes applications sont réalisées. Le modèle éléments finis reproduit avec précision la distribution du champ de température dans l'épaisseur des panneaux en bois, la formation du charbon ainsi que l'évolution de la résistance mécanique au cours de l'exposition au feu.

2.2.2 Modèles thermiques simplifiés

Pour analyser le transfert de chaleur dans l'épaisseur d'un élément en bois exposé à un incendie, les trois modes de transfert de chaleur doivent être considérés, à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement. Dans un four d'essais 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.

L'évolution du gradient de température dans un échantillon en bois est décrite par l'équation différentielle :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right] + Q''_r \tag{2.1}$$

$T[K]$ étant la température ; $\lambda\,[W/(m.K)]$ étant la conductivité thermique ; $\rho\,[kg/m^3]$ étant la masse volumique ; $c_p\,[J/(kg.K)]$ étant la chaleur spécifique ; $t[s]$ représente le temps d'exposition au feu ; $x[m]$ étant la position du point matériel considéré ; $Q''_r\,[W/m^3]$

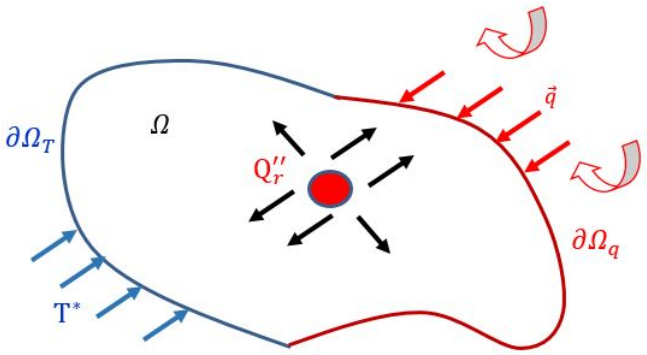


FIGURE 2.1 – Conditions aux limites d'un problème thermique.

est la source de chaleur due aux réactions complexes produites lors de la dégradation thermique du bois.

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. Soit un corps Ω et de frontière $\partial\Omega$ soumis à (figure 2.1) :

- 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 $\partial\Omega = \partial\Omega_q \cup \partial\Omega_T$

Les conditions aux limites et initiales d'un problème thermique sont :

- La température initiale à l'instant $t = 0$ est décrite par : $T(x,t)|_{t=0} = T_0$;
- La température imposée T^* sur la surface $\partial\Omega_T$ est définie par les conditions aux limites de type Dirichlet : $T(x,t) = T^*(x,t)$;
- Les conditions aux limites de type Neumann données par le flux de chaleur $\vec{q}$ sur la surface $\partial\Omega_q$ sont : $\vec{q} = -\lambda\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}$

La résolution de l'équation du transfert de chaleur, équation (2.1), nécessite l'indentification des propriétés thermo-physiques (la conductivité thermique λ, la densité relative ρ et la chaleur spécifique c_p) du matériau bois :

1. Conductivité thermique λ

   Le calcul de la valeur de la conductivité thermique du bois à différentes températures est complexe. La présence du gradient de température provoque la migration de l'eau et son évaporation à la surface exposée, entraînant un état non stationnaire du taux d'humidité [18]. La conductivité thermique du bois dépend de plusieurs facteurs : la densité, le taux d'humidité, la teneur en eau, la direction des fibres et la température.

   La conductivité thermique λ d'un échantillon en bois résineux dépend de son orientation par rapport aux directions d'orthotropie représentées sur la figure 2.2. Les

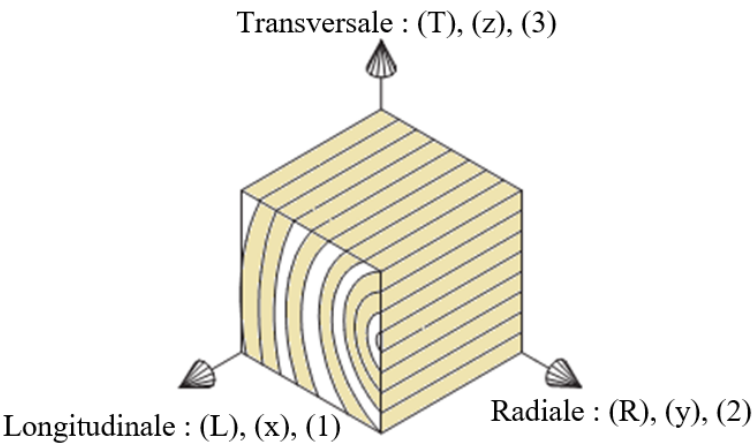


FIGURE 2.2 – Directions d'orthotropie d'un bois.

mesures expérimentales montrent que les conductivités dans la direction radiale (R) et transversale (T) sont très proches. En revanche, la valeur de la conductivité dans la direction longitudinale (L), confondue avec le sens des fibres, est nettement supérieure (de 1.5 à 2.8 fois plus importante) à celle enregistrée dans le plan transversal du tronc d'arbre [5]. A une température ambiante d'environ 20°C, le bois présente une conductivité qui varie entre 0.12 à $0.25W/(m.K)$. Le bois est donc un bon isolant et un mauvais conducteur thermique. La conductivité thermique λ d'un bois résineux est représentée sur la figure 2.3.

2. Chaleur spécifique c_p
   La chaleur spécifique c_p correspond à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse pour élever sa température de 1K. Elle est la moins bien connue et maitrisée par sa difficulté à être mesurée par l'expérience comparée aux deux autres propriétés thermiques (la conductivité thermique λ et la densité relative ρ). La chaleur spécifique c_p d'un bois résineux est illustrée sur la figure 2.4. L'évolution de la chaleur spécifique c_p, selon l'approche réglementaire EC5 [1], présente un saut allant de $c_p = 1770J/(kg.K)$(à T=99°C) à $c_p = 13500J/(kg.K)$ (à T=120°C). Ce saut est introduit pour prendre en compte l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau lors de la phase de séchage. Ce saut est différent de celui proposé par Knudson [12], et il n'est pas défini par Fredlund [13] et Janssens [14].

3. Densité relative ρ/ρ_0
   La diminution de la masse volumique d'un bois résineux en fonction de la température est réalisée par plusieurs auteurs (figure 2.5). Quantitativement, la courbe de perte de masse proposée par EC5 [1] est similaire à celles proposées par Knudson [12], Fredlund [13] et Janssens [14]. La perte de masse s'effectue en trois étapes :

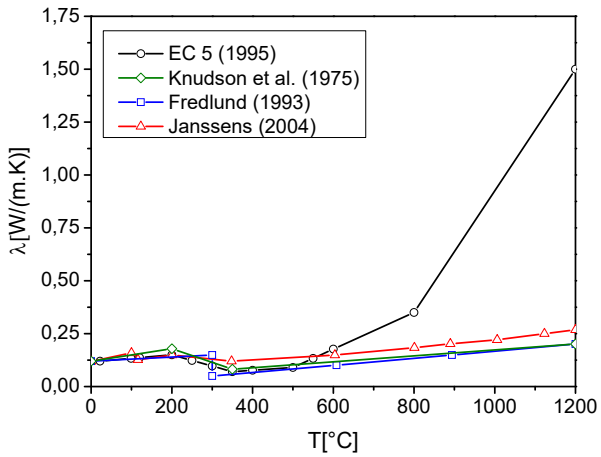


FIGURE 2.3 – Conductivité thermique λ d'un résineux.

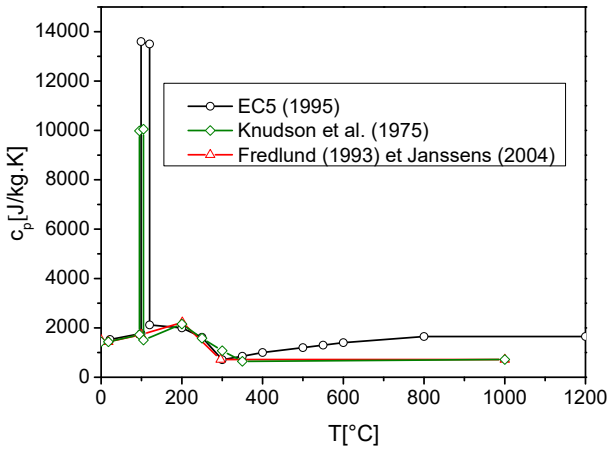


FIGURE 2.4 – Chaleur spécifique c_p d'un résineux.

- Pour des températures inférieures à 200°C, la modification de la masse volumique du bois est très faible ;
- Entre 200°C et 350°C, le bois se pyrolyse et par conséquent, la dégradation de constituants chimiques engendre une diminution d'environ 75% de la masse volumique (à T> 350°C) ;
- Au-delà de 350°C, le bois se carbonise et sa masse volumique varie très peu. Le rapport ρ/ρ_0 s'annule à des températures supérieures à 800°C selon EC5 [1].

Les différentes relations de λ, ρ et c_p adoptées dans cette étude sont illustrées sur les figures 2.3, 2.4 et 2.5. La figure 2.3 montre l'évolution de la conductivité λ en fonction de la température. Selon EC5 [1], au-delà d'un niveau de températures T=500°C, λ commence à augmenter rapidement. Elle passe de $\lambda = 0.09W/(m.K)$ pour T=500°C à une valeur de $\lambda = 1.5W/(m.K)$ (T=1200°C). Une fois la couche du charbon est formée à T=300°C, sa conductivité devient six fois plus faible que celle d'un bois sain. Ce qui se

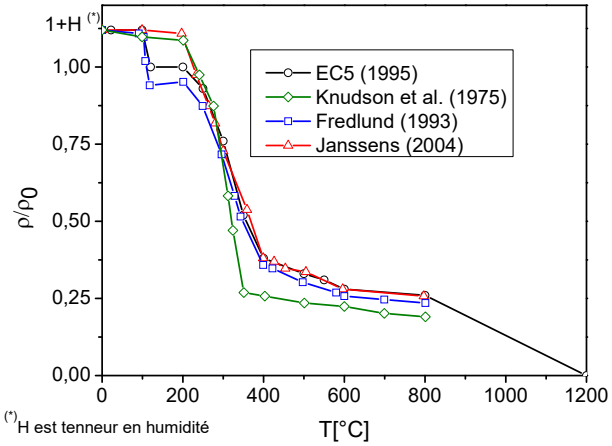


FIGURE 2.5 – Densité relative ρ/ρ_0 d'un résineux.

traduit par une diminution de la valeur de λ contrairement à une augmentation affichée par EC5 [1]. Le comportement réel est à l'inverse des valeurs suggérées par l'approche EC5 [1]. L'hypothèse adoptée par EC5 [1] est faite pour tenir compte de la combustion des gaz et de l'accroissement d'un transfert de chaleur dû aux fissurations apparues sur les surfaces exposées au feu. Les autres auteurs Knudson [12], Fredlund [13] et Janssens [14] donnent une autre évolution de λ comparée à EC5 [1]. La figure 2.4 montre l'évolution de c_p pendant l'exposition au feu. A une température d'environ 100°C, selon EC5 [1], la chaleur spécifique présente un saut allant de $c_p = 1770 J/(kg.K)$ (T=100°C) à $c_p = 13500 J/(kg.K)$ (T=120°C). Ce saut est introduit pour prendre en compte l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau lors de la phase de séchage. Ce saut n'est pas le même pour le cas de l'approximation proposée par Knudson [12]. Il n'est pas introduit par Fredlund [13] et Janssens [14]. La figure 2.5 montre la variation de la densité relative ρ/ρ_0 en fonction de la température. A des températures inférieures à 100°C, le rapport ρ/ρ_0 est de l'ordre 1+H (H étant le taux d'humidité). A T=100°C, ce rapport se réduit à 1 (H tend vers 0). Ce qui correspond à l'évaporation de l'eau. Ce rapport se stabilise jusqu'à T=220°C. Sa valeur commence à chuter rapidement entre T=220°C et T=380°C. A partir de ce niveau de températures, le bois a perdu 75% de sa masse initiale. Au-delà de 800°C, le rapport ρ/ρ_0 s'annule selon EC5 [1].

Étant donné le nombre de paramètres nécessaires à la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur, le terme lié à la dégradation thermique du matériau bois Q''_r $[W/m^3]$ de l'équation (2.1) n'est pas pris en compte explicitement dans les calculs. Il est intégré de manière implicite par une adaptation des propriétés thermo-physiques (λ, c_p et ρ). Ce qui se traduit par l'augmentation de la valeur de λ (figure 2.3) à des températures supérieures à 300°C dans les phases de la pyrolyse et de la combustion.

Dans l'étape de la combustion à des températures T> 800°C, l'approche EC5 [1] affiche un saut important de λ. Elle passe de $\lambda = 0.34W/(m.K)$ pour T= 800°C à une valeur de $\lambda = 1.5W/(m.K)$ à T=1200°C. Soit une augmentation de l'ordre de 23%. Les quatre approches de l'ingénieur représentées sur les figures 2.3, 2.4 et 2.5 intègrent implicitement le mécanisme de la dégradation thermique du bois induit par la décomposition chimique du matériau, la libération de gaz et la formation du charbon dans les expressions de λ. Cette hypothèse simplificatrice n'est pas justifiée par les observations expérimentales. D'où l'intérêt de reformuler la loi thermique par des modèles cinétiques de pyrolyse.

2.2.3 Modèles thermomécaniques

Le comportement mécanique du matériau bois à température ambiante est relativement connu et maitrisé [5], ce qui n'est pas le cas lorsque les températures sont très élevées. La connaissance de l'évolution des propriétés mécaniques du bois en fonction de la température est donc nécessaire pour évaluer sa résistance mécanique dans des conditions extrêmes d'incendie. Dans cette section, on s'intéresse à la présentation synthétique d'un état de l'art sur l'évolution du module d'élasticité et de la résistance mécanique d'un bois en fonction de la température.

La variation du module d'Young du matériau bois a fait l'objet de plusieurs recherches [1, 19, 23–27]. Dias de Moraes P. [19] présente l'évolution des MOE et des raideurs en flexion à travers les isothermes des éprouvettes en *Pinus sylvestris* L, testées par l'analyse thermomécanique (TMA). Les échantillons, mesurant $20 \times 20 \times 360mm$, ont été usinés selon la norme NF B 51-008 1987 et ils présentaient une masse volumique moyenne de $\rho_0 = 543kg/m^3$ avec un coefficient de variation (c.o.v) de $3,6\%$ et une humidité initiale de $7,9\%$. Les valeurs mesurées du MOE en mode isotherme pour des paliers de températures entre 25 à 240°C sont représentées sur la figure 2.6. De 25 à 90°C, le MOE normalisé augmente, atteignant un maximum d'environ 13% supérieur à ceux obtenus à 25°C pour une température de 60 à 90°C. Selon Kollmann et Cote [28], ce comportement peut-être dû au retrait lié au séchage du bois. Le retrait induit des variations dimensionnelles importantes dans les directions tangentielle et radiale. Ces variations se traduisent par une réduction de l'inertie de la section transversale de l'éprouvette et par l'augmentation du MOE. La valeur du MOE diminue significativement à partir de 100°C. En dessous de 200°C, le MOE est fortement affecté par l'augmentation de la température. Entre 200 et 250°C, le MOE normalisé varie de 87 à 61% de sa valeur à 25°C. Selon plusieurs auteurs (Schaffer [20], Back et Salmen [21]), ce comportement peut-être attribué au ramollissement et à la dégradation des polymères du bois.

Le comportement de la raideur en flexion normalisée en fonction de la température est

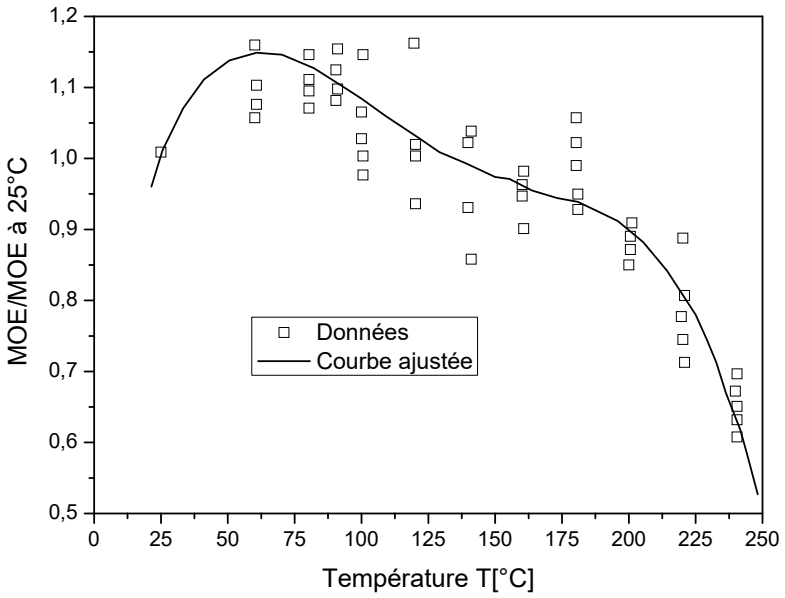


FIGURE 2.6 – Évolution du MOE normalisé [19].

illustré sur la figure 2.7. Les comportements du MOE et de la raideur en flexion à travers les isothermes (figures 2.6 et 2.7) présentent les mêmes tendances et leur différence peut-être expliquée par les variations dimensionnelles des éprouvettes, dues à l'humidité et à la dégradation thermique. Avec l'augmentation de la température, le bois humide se dilate (expansion thermique) et il se rétrécit à cause de la perte d'eau (séchage). Sur des échantillons avec une teneur en eau de 3 et 4%, Simpson et Tenwood [22] ont observé un rétrécissement plus important que l'expansion thermique, diminuant ainsi la raideur en flexion des éprouvettes.

Selon Schaffer [23], en tension le module d'élasticité (MOE) d'un bois sec décroit linéairement jusqu'à une température inférieure à 200°C (figure 2.8). Au-delà de cette température, le module d'Young diminue d'une façon non-linéaire. Au début de la pyrolyse à des températures d'environ 290°C, la perte de rigidité d'un bois sec est de l'ordre de 90%. Un comportement thermomécanique différent est observé sur un bois présentant un taux d'humidité de 12%. Pour ce dernier, à des températures inférieures à 190°C, le module d'élasticité varié d'une façon identique à un bois sec, passé cette limite, il chute rapidement jusqu'à 20% de sa valeur initiale à T=250°C. Thomas [24] remarque une réduction plus importante des propriétés élastiques d'un bois en compression à différents niveaux de températures (figure 2.9). Le module d'Young reste constant jusqu'à 60°C. Au-delà, il diminue linéairement entre 60°C et 120°C pour atteindre environ 30% de sa valeur initiale. Le module MOE en tension et en compression tend vers zéro à des températures

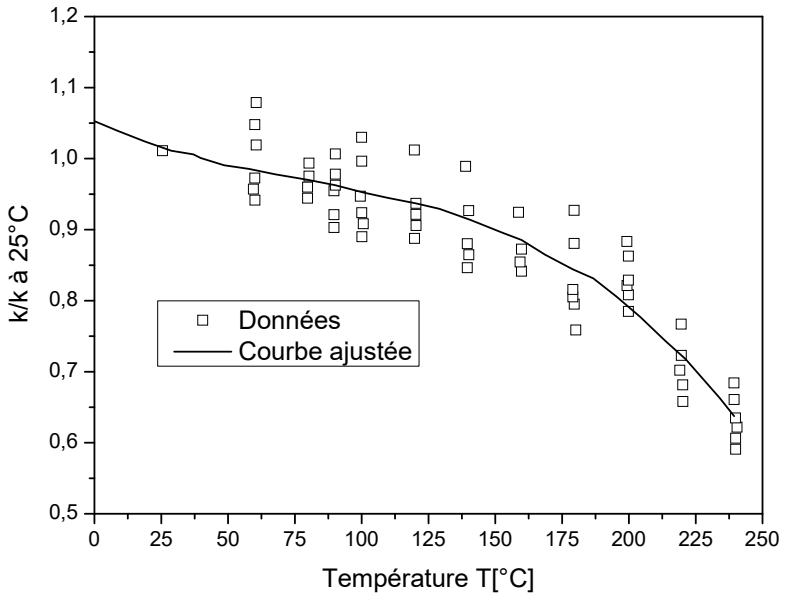


FIGURE 2.7 – Évolution de la raideur en flexion normalisée [19].

supérieures à 300°C. Nubissie [25] défini la variation du module d'élasticité initial en tension par une courbe bilinéaire. Entre 20°C et 250°C, MOE diminue linéairement jusqu'à 60% de sa valeur initiale. Passé 250°C, la réduction de MOE est rapide et il s'annule à T=300°C. Östman [26] a étudié la variation du module d'élasticité d'un bois d'épicéa en fonctions de la teneur en eau et de la température. Un adoucissement du matériau est enregistré avec l'augmentation de la teneur en eau. Pour une température constante, MOE se réduit de 25% entre 0% et 29% de teneur en eau. A des températures inférieures à 200°C, MOE enregistre une faible diminution. Au-delà de 250°C, le module se réduit à 53% de sa valeur initiale. König et Walleij [27] présentent la variation de MOE d'un bois, sollicité en traction ou en compression, en fonction de la température. La variation de MOE s'effectue en deux phases linéaires. En tension, le module d'Young diminue linéairement et il se réduit de 50% de sa valeur initiale à T=100°C. Une autre phase linéaire de réduction est observée entre 100°C et 300°C. Au-delà de 300°C, le module d'Young s'annule. En compression, le module d'élasticité baisse de 65% à T=100°C comparé à un bois en tension. Entre 100°C et 300°C, le bois en compression se porte comme un bois en tension. Le modèle de réduction proposé par la norme EC5 [1] est inspiré de celui-ci.

Les courbes obtenues montrent clairement que le module d'élasticité d'un bois tendu est moins affecté que celui d'un bois comprimé. La variabilité des résultats expérimentaux peut-être expliquée par les différentes essences utilisées par les auteurs. Les modèles de réduction illustrées sur les figures 2.8 et 2.9 considèrent que le module d'élasticité est nul

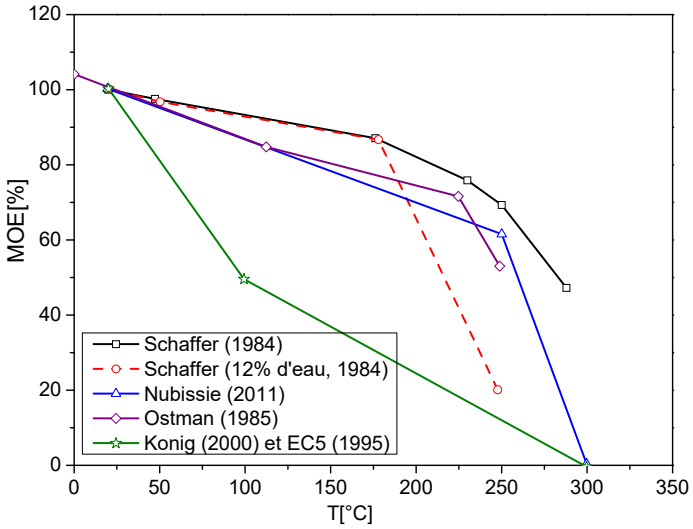


FIGURE 2.8 – Réduction du module d'élasticité en tension.

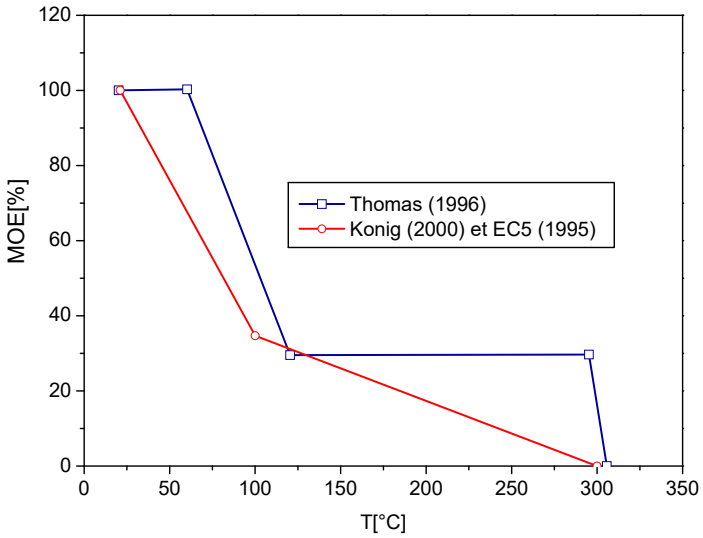


FIGURE 2.9 – Réduction du module d'élasticité en compression.

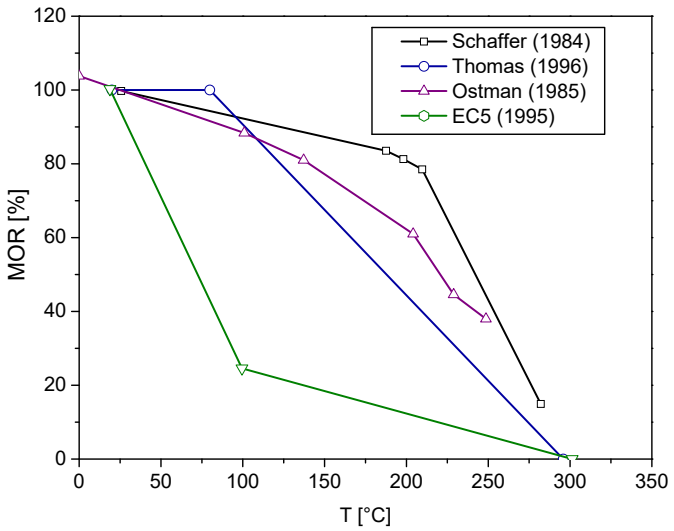


FIGURE 2.10 – Réduction de la résistance mécanique en tension.

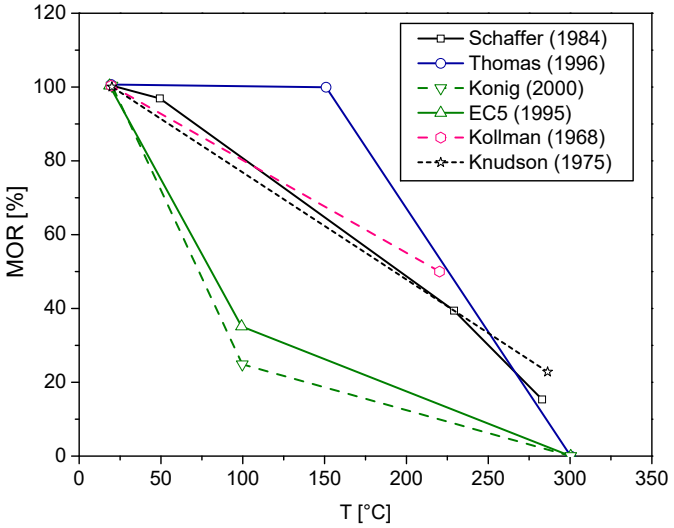


FIGURE 2.11 – Réduction de la résistance mécanique en compression.

à une température d'environ 300°C qui correspond au début de la formation du charbon. Plus d'informations sur ce thème sont rapportées dans la thèse de Thi V.D. [5].

Différents modèles décrivant l'évolution de la résistance mécanique (MOR) d'un bois en tension et en compression sont représentés sur les figures 2.10 et 2.11. Les auteurs s'accordent que la résistance mécanique d'un bois s'annule à l'étape de la carbonisation qui correspond à la formation du charbon à partir d'un niveau de températures d'environ 300°C. La variabilité des résultats des modèles peut être due au choix des essences utilisées dans les expériences et aux difficultés liées à la caractérisation de celles-ci.

Les modèles représentés sur les figures 2.10 et 2.11 montrent que la réduction de la résistance en tension et en compression suit une courbe bilinéaire. Pour le modèle

utilisé par la norme EC 5 [1], la réduction de la résistance mécanique en compression est composée de deux parties linéaires. Elle varie linéairement jusqu'à 100°C, qui correspond à l'évaporation de l'eau du bois (étape de séchage du bois), suivie d'une autre partie linéaire jusqu'à 300°C ayant une pente légèrement supérieure (début de l'étape de carbonisation). A T=100°C, la résistance en compression est d'environ 22% de sa valeur initiale. Elle s'annule à 300°C où le bois se transforme totalement en charbon. Les modèles préconisés par la norme sont donc simples et basiques, mais qui permettent d'assurer la sécurité au feu des structures en bois.

L'étude bibliographique présentée dans cette section montre que de nombreux travaux de recherche ont été réalisés sur l'influence de la température sur les propriétés mécaniques du matériau bois. Les résultats des tests montrent une grande variabilité. Cette caractéristique spécifique au matériau bois met en évidence la nécessité d'une caractérisation plus précise de ses propriétés mécaniques (MOE et MOR) afin de modéliser plus fidèlement son comportement structurel.

2.2.4 Modélisation du couplage thermomécanique

La vérification du comportement au feu des structures en bois résineux selon la norme EC5 [1] suggère que :

1. les valeurs locales en termes de module d'élasticité (MOE) et de résistance mécanique (MOR) pour les bois résineux en traction et en compression soient multipliées par des facteurs de réduction dépendants de la température conformément à la figure 2.12 et 2.13.
2. la même réduction de résistance, illustrée par la figure 2.13 pour une compression parallèle au fil, peut être appliquée pour le cas d'une compression perpendiculaire au fil.
3. idem pour le cas du cisaillement dont les deux composantes de contraintes sont perpendiculaires au fil (définissant le cisaillement roulant), le même facteur de réduction de résistance peut être appliqué.

La modélisation du comportement thermomécanique d'un bois résineux dans le code Abaqus [4] 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_θ.
- une fois les valeurs de K_θ sont déterminées, on procède à l'analyse mécanique.

La revue bibliographique montre une grande dispersion des valeurs de K_θ qui est due en grande partie aux différentes essences utilisées lors des tests thermomécaniques et à

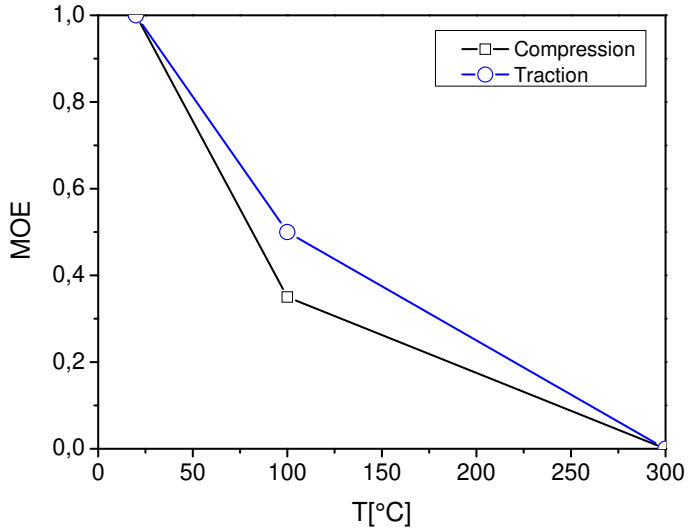


FIGURE 2.12 – Facteur de réduction pour le module d'élasticité parallèle au fil.

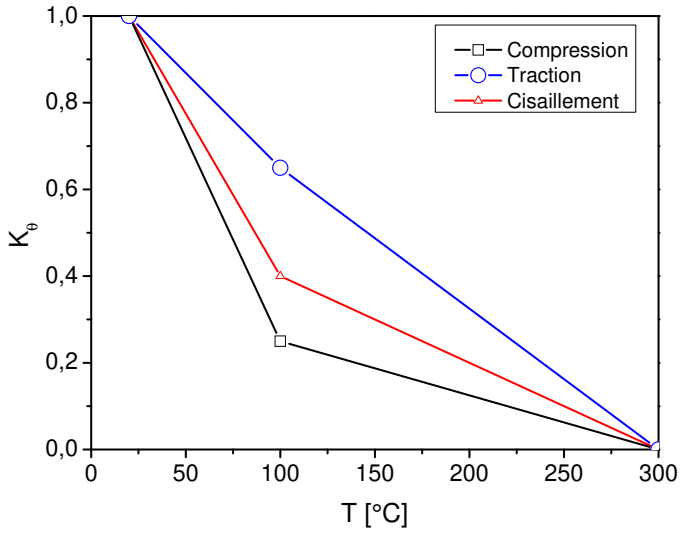


FIGURE 2.13 – Facteur de réduction K_θ pour la résistance parallèle au fil.

l'hétérogénéité du matériau bois issu d'une espèce végétale avec une grande variabilité.

En général, le choix du coefficient réducteur K_θ 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°C) où le comportement est totalement mécanique. Selon l'EC5 [1], à une température T=100°C, K_θ 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_θ plus difficile. Dans la suite de ce travail, toutes les simulations ont été réalisées en adoptant K_θ défini pour la tension selon l'approche réglementaire EC5 [1], 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 zone de tension pour l'ensemble des exemples traités dans la thèse de Thi V.D.[5].

Étant donné l'objectif principal de cette étude étant l'analyse du comportement au feu des structures bois en appliquant les modèles de pyrolyse les plus avancés, la loi de comportement élasto-plastique du matériau bois n'est pas abordée en détail dans ce mémoire. Pour plus d'informations sur l'avancement en cours de nos travaux de recherche sur le comportement mécanique du matériau bois, le lecteur peut se référer à notre dernier papier publié récemment dans [29].

L'intégration des lois thermique et mécanique dans Abaqus [4] via les routines Umatht et Umat nécessitent l'identification des paramètres physiques (conductivité, chaleur spécifique et densité), des propriétés élastiques (modules d'Young, coefficients de Poisson et modules de cisaillement) et plastiques (limite d'élasticité et variables d'écrouissage isotrope). Le couplage est réalisé en introduisant les variations des caractéristiques mécaniques du matériau bois définies dans EC5 [1] et illustrées sur les figures 2.12 et 2.13. Les aspects numériques de la modélisation thermomécanique et les stratégies d'implémentation sont développés en détail dans la thèse de Thi V.D. [5].

2.2.5 Simulations des tests d'incendie

Dans cette section, nous mettons en application les procédures de calcul Umatht et Umat, implémentées dans le code Abaqus [4]. L'objectif est de montrer les aptitudes de l'approche couplée thermomécanique à prédire la résistance au feu des structures multicouches en bois. Dans un premier temps, la procédure Umatht est appliquée à la simulation d'un test d'incendie réalisé à l'échelle de laboratoire pour prédire les profils de températures et la formation de la couche du charbon au cours de l'exposition au feu. En dernier, le couplage thermomécanique est réalisé, en appliquant à la fois les deux routines

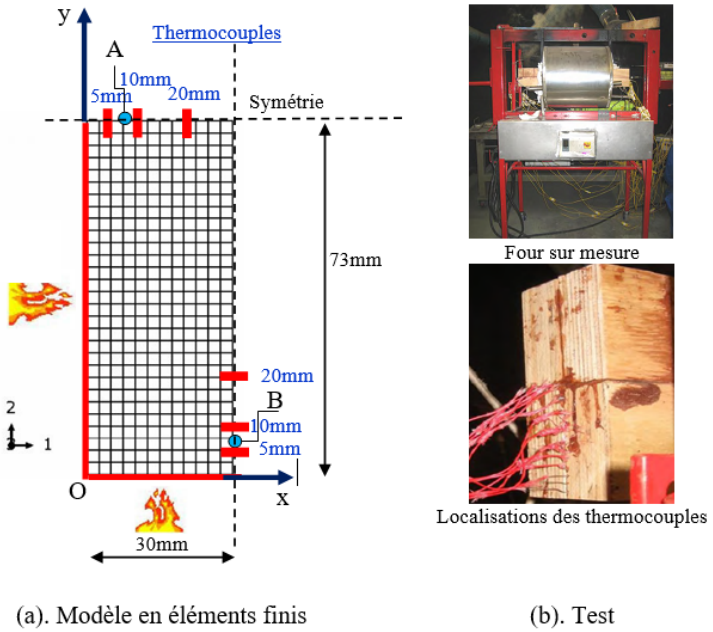


FIGURE 2.14 – Test d'incendie d'un échantillon en LVL dans un four.

(Umaht et Umat), sur la simulation d'un cas réel disponible dans la littérature. Les tests d'incendie sont tirés de la thèse de Menis A. [9] et réalisés conformément à la norme ISO 834-1 [6].

Analyse thermique d'un échantillon en LVL

Les spécimens en lamibois (Laminated Veneer Lumber, LVL) sont de 60mm d'épaisseur, de 146mm de largeur et de 1000mm de longueur. Ils sont constitués des lamelles en pinus radiata (de 2 à 3mm d'épaisseur) assemblées par une colle phénol-formaldéhyde (figure 2.14). Les valeurs initiales de la densité et de l'humidité des échantillons testés sont respectivement, $\rho_0 = 570kg/m^3$ et $H = 12\%$. Les tests d'incendie sont réalisés sur des petites éprouvettes en LVL dans un four au laboratoire "Fire Engineering Laboratory of the University of Canterbury en Nouvelle Zélande" par Menis A. (2012) [9]. Les thermocouples de type K sont placés, sur les axes de symétrie, à des profondeurs de 5, 10 et 20mm des surfaces exposées au feu (figure 2.14) selon les deux directions horizontale (x) et verticale (y).

La figure 2.15 montre l'évolution de la température dans le four au cours de l'exposition au feu. Pour la modélisation numérique, nous avons utilisé la courbe ISO 834-1 [6]. Les coefficients de convection et d'émissivité pris dans l'ensemble des simulations qui suivent sont $h_c = 25W/(m^2.K)$ et $\varepsilon = 0.8$.

En raison de symétrie seul un quart de l'échantillon a été discrétisé par un maillage de 348 éléments plans DC2D4 [4], comme l'illustre la figure 2.14. Les profils de températures

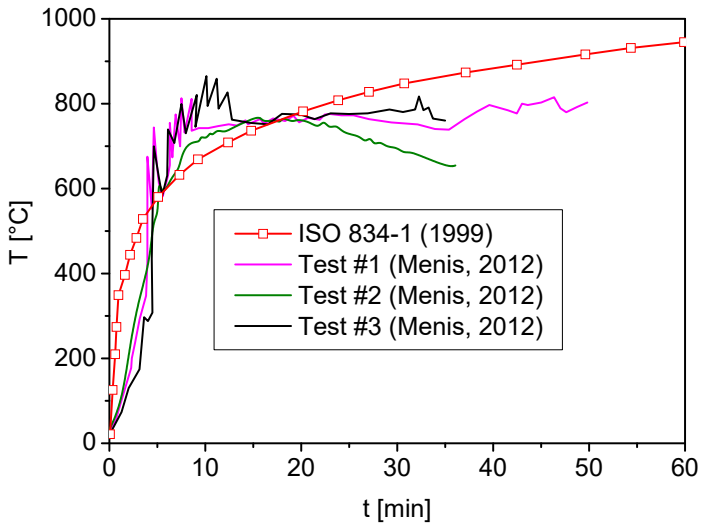
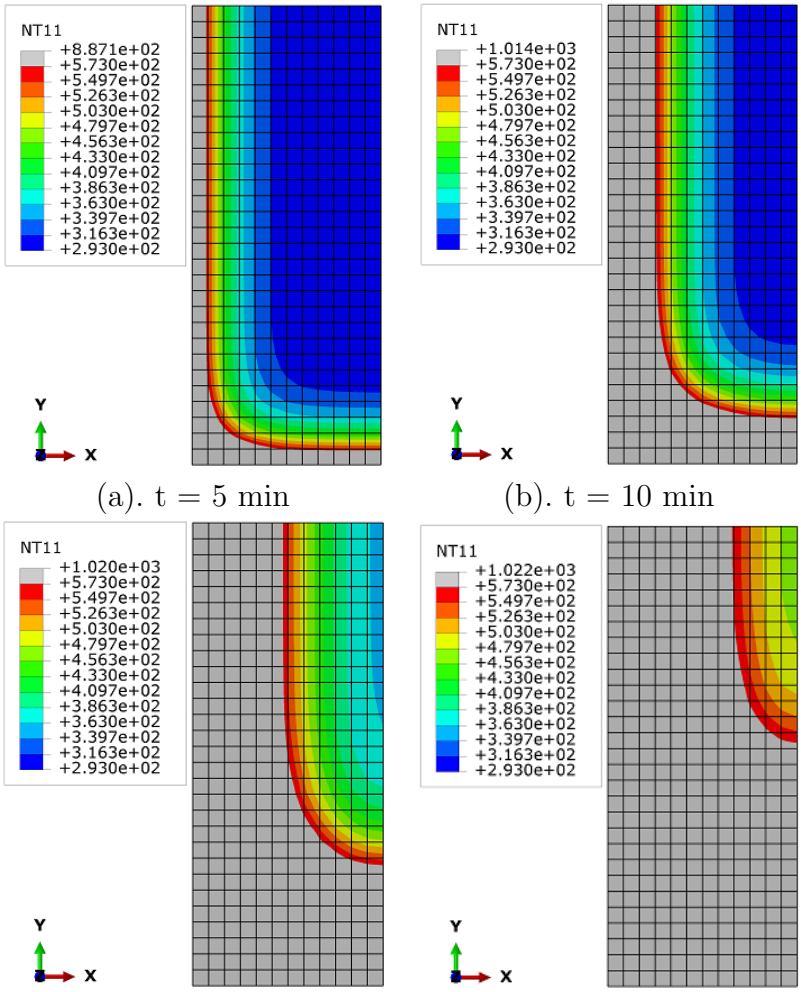


FIGURE 2.15 – Températures mesurées dans le four.

obtenus par la simulation à différents temps d'exposition au feu 5, 10, 20 et 30 min sont donnés sur la figure 2.16. La couche du charbon se forme au-delà de T=300°C et elle est représentée en gris. La zone du bois sain est présentée en bleu. Entre le charbon et le bois sain, on distingue les zones de pyrolyse (rouge, jaune et vert) et de séchage (turquoise). La combinaison des deux chargements thermiques suivant les directions x et y (figure 2.14) à l'angle droit de l'échantillon augmente le niveau de températures et la forme de la section transversale résiduelle de l'échantillon en LVL devient progressivement non-rectangulaire dans cette zone. A un temps d'exposition au feu t=30min, la hauteur de la couche du charbon suivant l'axe horizontal est inférieure à celle observée le long de l'axe vertical (figure 2.16). Si on considère deux points A et B suivants les axes x et y, de sorte $X_A = Y_B$ (figure 2.14). Le point B est plus proche des deux facettes exposées au feu, comparé au point A. Le point B se chauffe avant le point A et la hauteur du charbon devient plus importante sur l'axe vertical. Pour cette raison, la distribution et l'évolution de la couche du charbon dans le four ne sont pas uniformes durant l'exposition au feu de l'échantillon en LVL (figure 2.16).

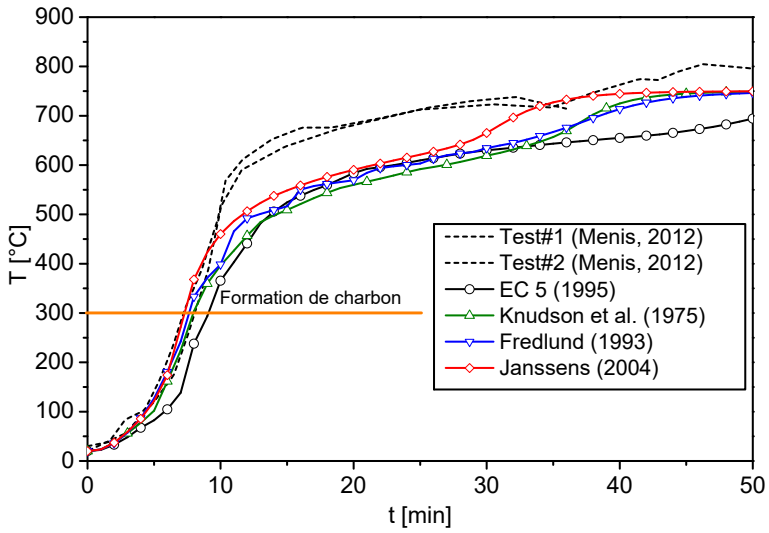
Les figures 2.17 et 2.18 montrent l'évolution de la température en fonction du temps à différentes positions des thermocouples (5 et 20 mm) le long des directions horizontale et verticale, respectivement (figure 2.14). Les résultats des simulations obtenus par les 4 approches EC5 [1], Knudson et al. [12], Fredlund [13] et Janssens [14] sont comparés à l'expérience. Qualitativement les résultats des simulations sont en adéquation avec ceux des tests. Le modèle EC5 [1] affiche clairement un écart de retard par rapport à l'expérience comparé aux autres approches. Il est dû à la présence d'un pic important de la chaleur spécifique $c_p = 13600 J/(kg.K)$ à une température d'environ T=100°C (figure 2.4).



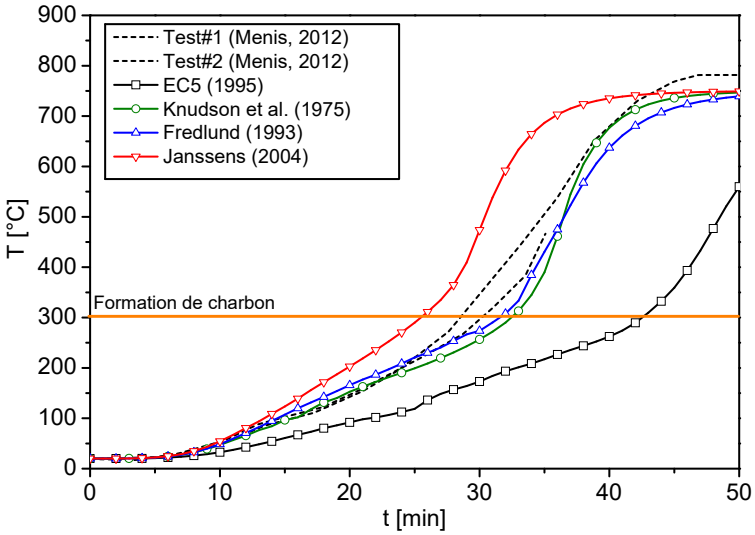
(a). t = 5 min (b). t = 10 min

(c). t = 20 min (d). t = 30 min

FIGURE 2.16 – Formation de la couche de charbon à différents temps (T[K]).



(a). Thermocouple à 5mm



(b). Thermocouple à 20mm

FIGURE 2.17 – Evolution de la température suivant la direction horizontale (x).

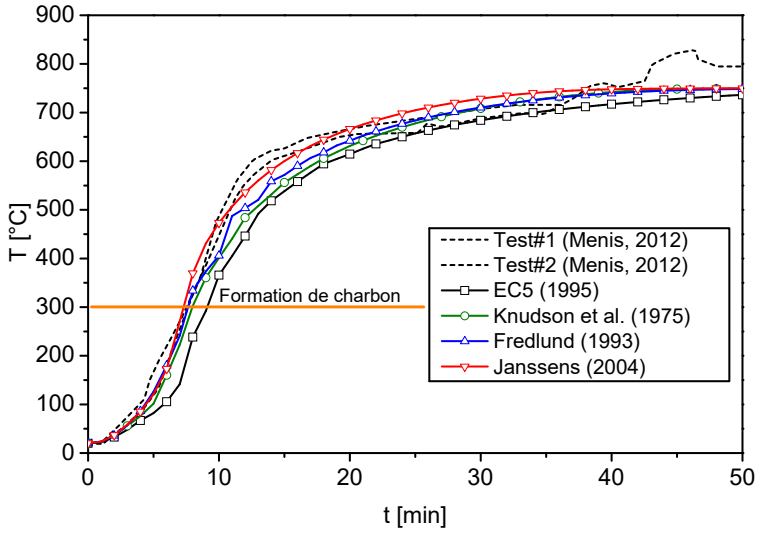
A un temps d'exposition au feu t < 3min, la température se stabilise autour de valeur ambiante T=20°C (figure 2.18a). Au-delà de cette limite, elle progresse lentement jusqu'à T=100°C. Cette zone correspond à la phase de séchage du matériau bois. Au-delà de cette étape, les températures augmentent rapidement pour atteindre des niveaux de températures très élevées T=500°C à un temps d'exposition d'environ t = 20min et T=750°C à t = 40min. Notons que les mêmes remarques peuvent être faites sur l'ensemble des résultats des simulations. Sur l'ensemble des simulations, les résultats obtenus par l'approche réglementaire EC5 [1] sont moins précis que les autres approches comparés à l'expérience, et les courbes EC5 [1] se placent souvent au-dessous de celles obtenues par les trois approches (Knudson et al. [12], Fredlund [13] et Janssens [14]) et l'expérience. Cela démontre que l'approche EC5 [1] est plus sécurisante.

Au-delà de l'étape de séchage (T>100°C), les simulations affichent clairement un écart important entre les valeurs prédites et celles mesurées ce qui démontre que les modèles standards utilisés ne décrivent pas correctement l'étape de la pyrolyse. D'où la nécessité de faire recours aux modèles cinétiques pour améliorer la qualité des résultats.

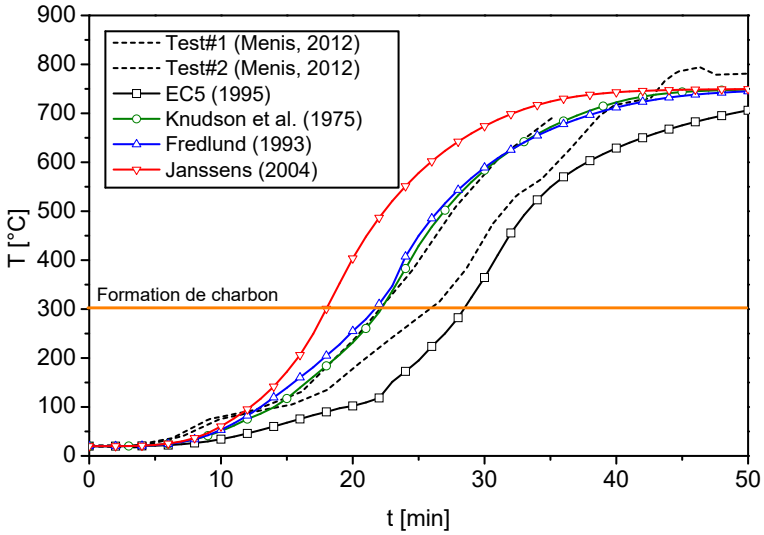
L'évolution de l'épaisseur de la couche du charbon selon deux directions perpendiculaires (x et y) est représentée sur la figure 2.19. Les résultats des simulations montrent que l'évolution de la carbonisation est non-linéaire et la vitesse de combustion n'est pas constante.

Comme l'approche EC5 [1] présente un retard sur l'évolution des températures comparée aux autres approches et à l'expérience (figures 2.17 et 2.18), elle sous-estime la vitesse moyenne de carbonisation (figure 2.19 et tableau 2.1). Ce décalage, comme expliqué précédemment, est dû en grande partie au pic important de la chaleur spécifique c_p, enregistrée à une température d'environ 100°C, qui nécessite une grande quantité d'énergie pour l'évaporation de l'eau dans la phase de séchage. Bien que l'EC5 [1] considère une forte augmentation de la conductivité thermique λ à partir de 800°C (figure 2.3), l'influence de cette valeur dans cet exemple n'est pas encore observable pendant les premières 30 minutes d'exposition car les températures prédites par l'EC5 [1] n'atteignent pas encore ce niveau de température (figures 2.17 et 2.18).

Le tableau 2.1 récapitule les valeurs des vitesses de carbonisation $\beta_x = X_c/t$ et $\beta_y = Y_c/t$ à un temps d'exposition au feu t = 30min. Par manque des données expérimentales, les épaisseurs de charbon formé à un temps d'exposition au feu t=30min sont évaluées uniquement par les simulations. Les valeurs des vitesses de carbonisation sont différentes selon les directions des flux de chaleur.



(a). Thermocouple à 5mm

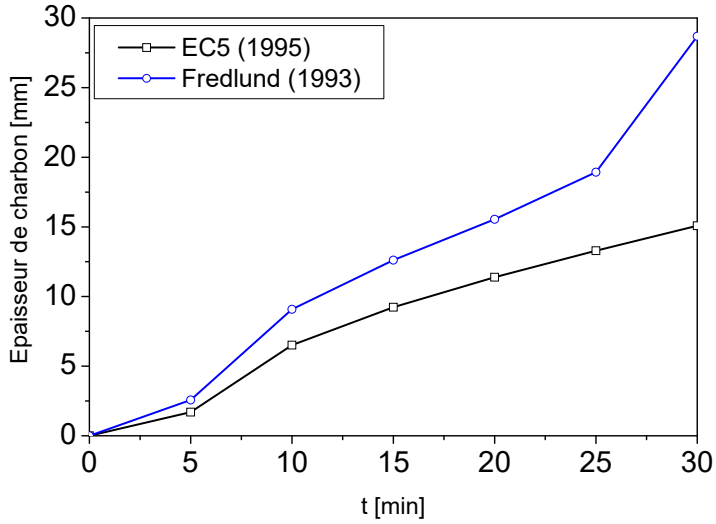


(b). Thermocouple à 20mm

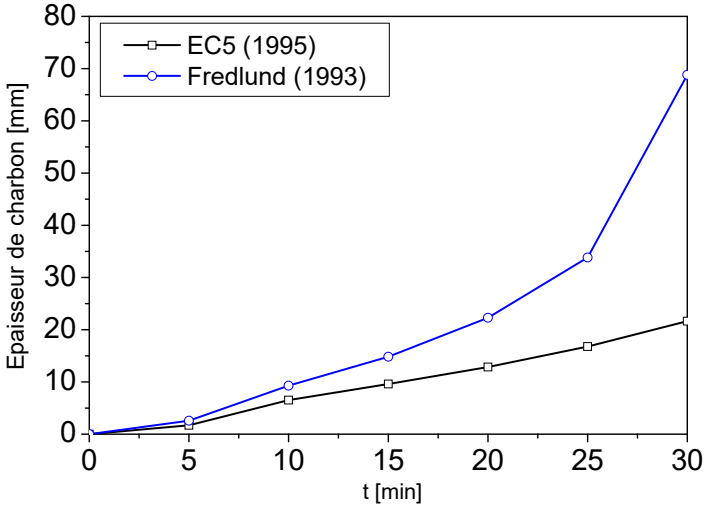
FIGURE 2.18 – Evolution de la température suivant la direction verticale (y).

	X_c [mm]	Y_c [mm]	Vitesse de carbonisation [mm/min]
EC5 [1]	15.1	21.6	$\beta_x = 0.5$; $\beta_y = 0.72$
Knudson et al. [12]	22.3	50	$\beta_x = 0.74$; $\beta_y = 1.67$
Fredlund [13]	28.7	68.8	$\beta_x = 0.96$; $\beta_y = 2.28$
Janssens [14]	30.	73	$\beta_x = 1.$; $\beta_y = 2.43$

TABLE 2.1 – Vitesses de carbonisation suivant deux les directions (t=30min).



(a). Direction horizontale (x)



(b). Direction verticale (y)

FIGURE 2.19 – Evolution de l'épaisseur de la couche de charbon (y).

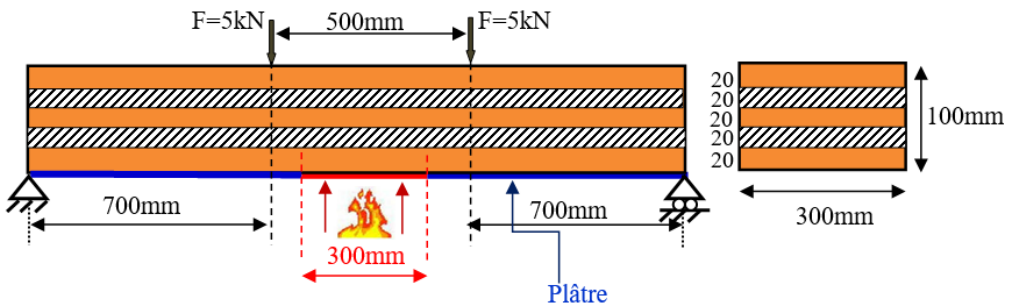


FIGURE 2.20 – Poutre en CLT exposée à un flux de chaleur constant [30].

Analyse thermomécanique d'une poutre en CLT

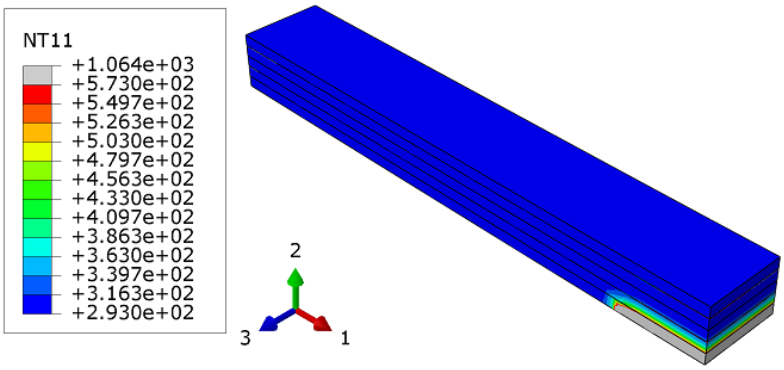
Les panneaux de bois lamellé-croisé (Cross-Laminated Timber, CLT) sont largement utilisés dans la construction des bâtiments multi-étages. Le CLT est reconnu pour sa grande résistance mécanique, son bon comportement au feu, ses performances thermiques et acoustiques. Les panneaux CLT consistent en plusieurs couches de planches de bois d'œuvre empilées perpendiculairement (à 90°) et reliées entre elles par un adhésif structural. La section transversale d'un panneau CLT comporte au moins 3 couches orthogonales (figure 2.20).

Un test de flexion à 4 points d'une poutre en CLT exposée à un flux de chaleur constant ($q = 27.7 \pm 2.5kW/m^2$) a été réalisé par Lineham S.A. et al. (2016) et présenté dans [30]. Seule une partie de la facette inférieure de la poutre est exposée au flux. L'autre partie est protégée par du plâtre. Les dimensions de la poutre sont données dans la figure 2.20.

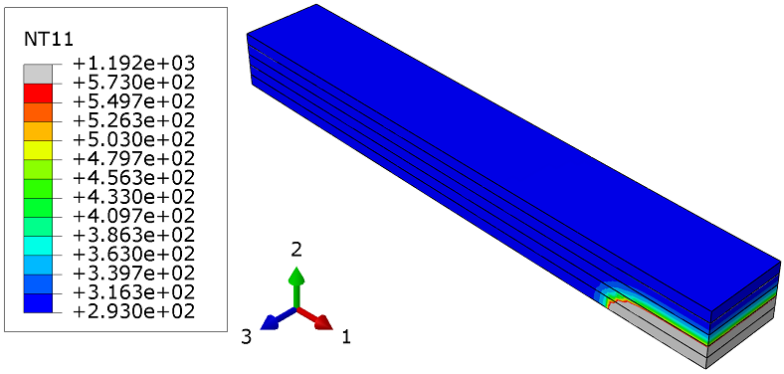
Le maillage du modèle numérique est composé de 6700 éléments de type C3D8T et la densité initiale du CLT prise dans les calculs est d'environ $\rho_0 = 457kg/m^3$. Les constantes mécaniques du matériau CLT utilisées dans la simulation sont celles définies dans la thèse de Thi V.D. [5]. Les coefficients d'absorptivité et de convection nécessaires à l'analyse thermique sont $\alpha = 0.7$ et $h_c = 10W/(m^2.K)$.

Les profils de température à différents temps d'exposition au feu sont donnés sur les figures 2.21. Un arrondi se forme au bord de la plaque de plâtre et la diffusion de la température devient non uniforme. La couche du charbon augmente en fonction du temps d'exposition au feu. La section transversale se réduit dans la zone exposée au feu et la position de l'axe neutre se déplace vers le haut.

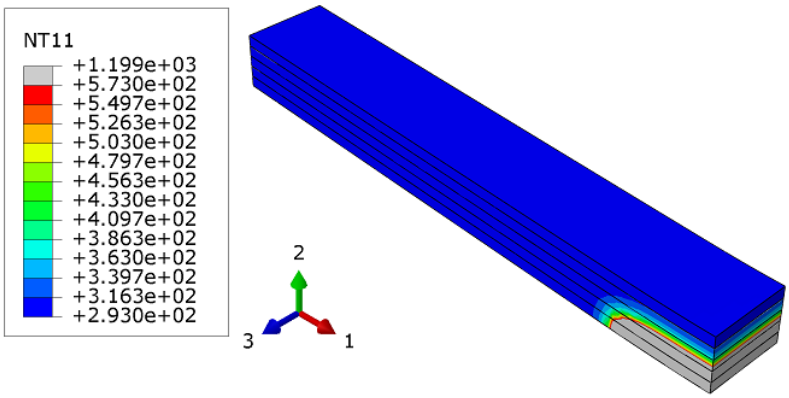
Les simulations ont été menées, en utilisant les propriétés physiques d'un bois résineux définies par l'approche EC5 [1]. Les résultats obtenus, en termes de flèche au centre de la poutre, sont comparés à l'expérience (figure 2.22). L'évolution de la flèche se fait en trois étapes : (1) à une température ambiante T=20°C, le chargement est purement mécanique et les températures restent constantes ; (2) à un temps d'exposition t>2min, la flèche



(a). t = 30 min



(b). t = 60 min



(c). t = 80 min

FIGURE 2.21 – Profils de températures T[K] à différents instants.

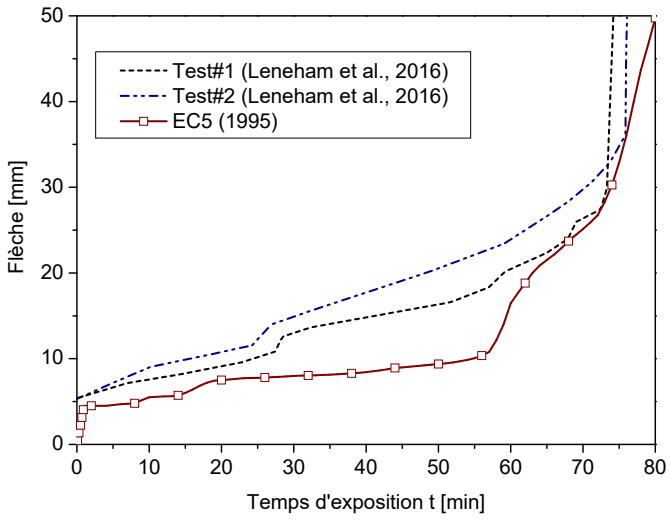


FIGURE 2.22 – Evolution de la flèche au centre de la poutre.

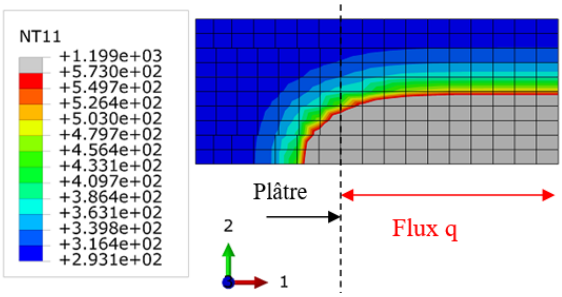
évolue progressivement (la section transversale est capable de reprendre les efforts qui lui sont exercés) ; (3) à t>56min, la valeur de la flèche augmente rapidement et la rupture de la poutre s'amorce. L'écart entre les valeurs numériques et expérimentales est probablement dû au fait que l'approche réglementaire EC5 [1] utilise dans l'analyse thermomécanique des coefficients de réduction identifiés à partir d'un test au feu standard ISO 834-1 [6]. Ce qui n'est pas le cas pour cet essai où le chargement thermique se fait par un flux constant.

La figure 2.23 compare la rupture numérique à celle de l'expérience. La diffusion thermique est bidirectionnelle comme le montre l'observation expérimentale. Notons que dans le cas d'un incendie réel on observe plus cette configuration que celle décrite par un test au feu standard ISO 834-1 [6].

2.2.6 Conclusion

Une méthodologie de prévision du comportement thermomécanique du matériau bois a été proposée et appliquée à la simulation de plusieurs tests d'incendie. La procédure de calcul a été formulée à partir des approches, simples dites de l'ingénieur, les plus utilisées dans la littérature. Les résultats des simulations obtenus sont moins précis comparés aux tests. Cependant, certains points d'amélioration sont nécessaires afin d'enrichir la méthodologie incrémentale et de mettre à disposition de l'ingénieur un véritable outil de simulation prédictif :

– L'application des modèles thermiques simplifiés à l'analyse du comportement thermomécanique du matériau bois montre que ces derniers sont moins prédictifs dans le cas des tests à l'échelle de laboratoire (échantillon LVL dans un four) et réelle



(a). Numérique

(b). Expérimentale

FIGURE 2.23 – Modes de ruptures de la poutre en flexion.

(poutre CLT en flexion à 4 points) sous un incendie standard ISO 834-1 [6].

- Leur application sous d'autres chargements thermiques non-standards mais plus proches du réel, ou sur des échantillons à l'échelle de laboratoire, reste à étudier pour être validée.
- Le couplage thermomécanique est réalisé selon l'approche réglementaire EC5 [1] relatif à la résistance au feu des structures en bois, en appliquant le facteur de réduction K_θ sur la résistance mécanique d'un résineux. L'application et l'intégration de cette technique de couplage dans un code d'éléments finis reste simple. Le choix du coefficient de réduction K_θ est très aléatoire comme l'indique l'étude bibliographique. Ainsi, cette approche peut être utilisée pour des cas simples, mais n'est pas appropriée pour une démarche scientifique ou prédictive.
- Les simulations relèvent une dispersion des prédictions confrontées aux mesures expérimentales à des températures supérieures à 100°C, correspondant à la fin de la phase de séchage. Rappelons que ces modèles ne tiennent pas compte de façon explicite des phases de la dégradation thermique du matériau bois (séchage, pyrolyse et combustion). Il est donc souhaitable d'améliorer ce point en appliquant des modèles cinétiques complets pour modéliser au mieux le comportement au feu des structures en bois. C'est dans cet objectif que se situe la deuxième partie de ce chapitre et la suite de mes travaux.

2.3 Modèles cinétiques de la pyrolyse

2.3.1 Introduction

Le feu est une source d'énergie extrêmement forte qui peut être dévastatrice si elle n'est pas maitrisée. Pour minimiser les risques associés au feu, la nécessité de la maîtrise des mécanismes de démarrage, de développement et d'entretien des incendies demeure incontournable. Dans ce contexte, parmi les processus mis en œuvre, la description de la cinétique de la dégradation thermique du matériau bois est celle qui joue le rôle le plus important. Ainsi, un enjeu fort des recherches actuelles consiste à développer des modèles de pyrolyse représentant au mieux la dégradation thermique du bois sous l'effet d'un flux de chaleur.

La pyrolyse du bois désigne la décomposition physique et chimique des matières organiques sous l'action thermique, en absence d'oxygène. Comprendre cette phase de transformation passe nécessairement par le choix et la définition des mécanismes réactionnels de ses constituants majeurs (cellulose, hémicelluloses et lignine) et l'identification des paramètres cinétiques mis en jeu lors de la décomposition thermique du bois. Les modèles de pyrolyse disponibles dans la littérature confirment la difficulté et la complexité à expliquer ces cinétiques. Ainsi, cette étude se propose de contribuer à la compréhension de la cinétique de la dégradation thermique du bois dans des conditions d'incendie. En restituant les informations d'une étude bibliographique sur ce thème, nous avons fait le choix de retenir une approche analytique représentant séparément les différents mécanismes réactionnels des trois constituants la cellulose, les hémicelluloses et la lignine du bois.

Sur ce même thème de recherche, des travaux ont été menés par notre équipe depuis le lancement de la première thèse de Thi V.D. [5] en 2014 sur le comportement au feu des structures en bois. Ce travail permet : (1) de comprendre les phénomènes mis en jeu lors d'un incendie et de caractériser le comportement au feu des structures en bois ; (2) de développer des codes prédictifs pour l'ingénierie de la sécurité incendie. Le modèle numérique, basé sur les modèles thermiques simplifiés, disponible actuellement n'est pas assez robuste pour qu'il soit appliqué à l'analyse du comportement au feu des structures bois à grande échelle, comme montré précédemment dans la première partie de ce chapitre. Pour enrichir cette méthodologie, j'ai pu intégrer des modèles de pyrolyse dans le cadre d'un projet européen en cours de réalisation (2017 à 2020) : Interreg AFTB "Towards adhesive free timber builidings". Je poursuivrai ceux-ci à travers notamment le co-encadrement de deux thèses de Doctorat de M. TRAN Trong Tuan et de Melle. EL HOUJEYRI Imane lancées en 2017.

Cette section est organisée en trois grandes parties principales :

Bois	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine
Hêtre	0.48	0.28	0.24
Chêne	0.35	0.40	0.25
Pin	0.50	0.27	0.23
Peuplier	0.48	0.30	0.22

TABLE 2.2 – Pourcentage massique des constituants du bois.

- Un état de l'art sur l'étude de la pyrolyse des matériaux ligno-cellulosiques a été effectué. Cette étude bibliographique apporte un argument de plus à notre choix de modèle de pyrolyse.
- En s'appuyant sur les résultats des tests de l'analyse thermogravimétrique (ATG) et du cône calorimètre réalisés en interne, nous avons montré d'un point de vue qualitatif les différentes étapes de la pyrolyse d'un bois normal et d'un bois densifié.
- L'identification des paramètres cinétiques du modèle de la pyrolyse choisi est faite à base de la confrontation des résultats des simulations à ceux des tests de l'ATG et du cône calorimètre en utilisant des techniques d'optimisation.
- Le modèle de pyrolyse sélectionné est ensuite inséré dans le logiciel Abaqus [4] pour être appliqué à l'analyse du comportement thermomécanique des structures en bois à grande échelle. La section se termine par une conclusion et des perspectives qui peuvent améliorer les procédures numériques d'optimisation développées dans cette étude.

2.3.2 Cinétique de la pyrolyse du bois

La connaissance des cinétiques de la décomposition thermique du matériau bois sont essentielles pour modéliser au mieux son comportement au feu qui a lien fort avec la pyrolyse. D'un point de vue chimique, le bois est constitué d'une structure moléculaire complexe formée à partir d'un enchaînement de plusieurs polymères. Il est composé de trois fractions de bio-polymères qui sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Le tableau 2.2 résume la composition massique des constituants principaux de quelques bois [31].

La matrice que compose le bois est formée d'une armature constituée de la cellulose et des hémicelluloses, et le tout est cimenté par la lignine. D'où la complexité des réactions chimiques lors de l'étape de la pyrolyse du bois.

La majorité des études [32, 34–47] portant sur la pyrolyse du bois montrent clairement que le bois se transforme en un résidu solide, appelé le char, et des volatiles. Parmi ces volatiles, on retrouve une fraction condensée à une température ambiante, appelée *Tar* ou

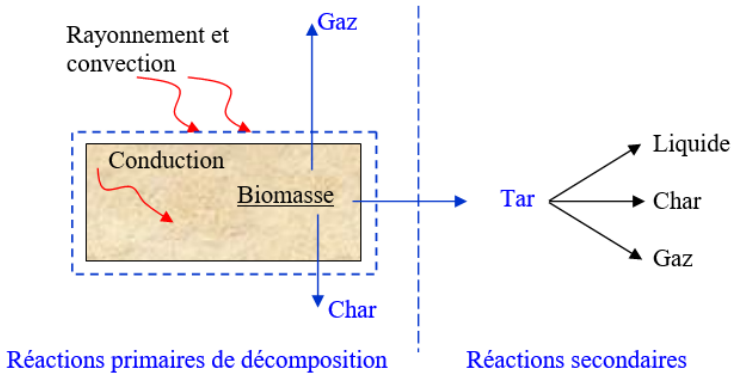


FIGURE 2.24 – Pyrolyse d'une particule de biomasse.

goudrons, et une fraction non-condensée composée de gaz légers (H_2, CO, CO_2 et CH_4). Selon Souza-Santos [48], le goudron est formé de différents cycles organiques lourds et de molécules inorganiques. Il s'échappe de la matrice solide du combustible sous forme gazeuse et liquide. De Jong et al [49] ont mesuré à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) les gaz sortant lors de la pyrolyse de bois et ont constaté la présence de gaz légers en grande quantité et d'autres gaz tels l'ammoniac et le phénol en petites quantités. D'où l'intérêt de représenter séparément les matières volatiles en gaz et en *Tar*.

La figure 2.24, rapportée par Basu dans [50], donne un schéma simplifié décrivant les étapes de la pyrolyse d'une particule de biomasse. Le transfert de thermique s'effectue par convection et rayonnement entre la biomasse et le milieu réactionnel. Un transfert de chaleur par conduction s'effectue à l'intérieur de la biomasse. Selon Basu [50], deux réactions de pyrolyse sont distinguées : une réaction primaire qui conduit à la formation de trois fractions le char, le gaz (non condensable) et les vapeurs (goudron) ; une réaction secondaire qui fait intervenir des réactions homogènes et hétérogènes sur les produits de la pyrolyse primaire, comme le craquage des goudrons et les réactions hétérogènes entre le résidu (char) et le gaz. Dans ce qui suit le terme pyrolyse englobe toutes les réactions.

Il existe deux types de pyrolyse, lente et rapide, et la différence se situe souvent au niveau de la vitesse de chauffe des particules du combustible. Selon Souza-Santos [48], une pyrolyse est lente lorsque la vitesse de chauffe est inférieure à 10K/s. Elle est considérée rapide lorsque la vitesse de chauffe est supérieure à 10^3K/s.

La majorité des études portant sur la pyrolyse du matériau bois établissent clairement que 95% des réactions de thermolyse surviennent entre 200 et 400°C [51]. Comprendre ces transformations passe nécessairement par l'identification des mécanismes réactionnels et la connaissance de la cinétique mis en jeu lors de la dégradation thermique du matériau bois. Le transfert couplé de chaleur et de masse par réactions chimiques est suffisam-

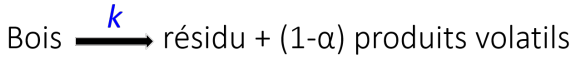


FIGURE 2.25 – Mécanisme à une seule réaction k.

ment étudié et présenté dans la littérature, cependant, à notre opinion, il existe peu de modèles décrivant ces mêmes processus de décomposition des trois constituants (cellulose, hémicelluloses et lignine) séparément à des températures comprises entre 200 et 300°C [51] et au-delà de la phase de pyrolyse pour les cas d'un bois normal et d'un bois densifié. Les techniques les plus utilisées à l'échelle micro et macro particule [52], pour l'étude de la pyrolyse du bois, sont l'analyse thermique gravimétrique (ATG) et la mesure par calorimétrie à balayage. Les mesures faites sur un bois par gravimétrie et calorimétrie présentent généralement trois pics, ce qui a orienté les premières recherches vers un mécanisme de la pyrolyse du bois formulé à partir de la superposition des mécanismes réactionnels des trois constituants la cellulose, les hémicelluloses et la lignine.

Les modèles cinétiques décrivant la pyrolyse de la biomasse sont souvent formulés à partir de trois différentes méthodes [53] : mécanisme à une seule réaction chimique ; mécanisme à plusieurs réactions chimiques ou avec la méthode basée sur la distribution des énergies d'activation.

Mécanismes à une seule réaction chimique

La pyrolyse du bois est décrite par une réaction chimique unique irréversible d'ordre 1, qui transforme le solide en résidu (char) et en volatils, figure 2.25.

La vitesse de perte de masse du solide initial $\frac{d\alpha}{dt}$ est fonction de la température $T[K]$ et est calculée par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T).f(\alpha) \tag{2.2}$$

La constante de vitesse de réaction $k(T)$ est déterminée selon la loi d'*Arrhenius* :

$$k(T) = A.e^{-\frac{E}{RT}} \tag{2.3}$$

où $A[s^{-1}]$, $E[kJ.mol^{-1}]$ et $R = 8.314 J.K^{-1}.mol^{-1}$ sont respectivement la fréquence ou facteur pré-exponentiel, l'énergie d'activation et la constante des gaz parfaits. $f(\alpha)$ est calculée par :

$$f(\alpha) = (1-\alpha)^n \; ; \qquad \alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty} \tag{2.4}$$

n étant l'ordre de la réaction, α désigne l'avancement de la réaction, m_0 représente la

Auteurs	Bois	$T[K]$	$A[s^{-1}]$	$E[kJ.mol^{-1}]$
Thurner et Mann [34]	Chêne	573-673	2.47×10^6	106.5
Gordon et Knight [55]	Bois dur	677-822	1.483×10^6	89.52
Ward et Braslaw [56]	Cerise	538-593	11.9×10^{11}	173.7
Wagenaar et al [57]	Pin	553-873	1.4×10^{10}	150.
Di Blasi et Branca [58]	Hêtre	573-708	3.6×10^8	141.

TABLE 2.3 – Paramètres cinétiques pour un mécanisme à une seule réaction.

masse initiale, m la masse à l'instant actuel et m_∞ la masse à l'instant final.

Les méthodes les plus employées dans la littérature pour le calcul des paramètres cinétiques (E et A) sont soient les méthodes intégrales basées sur les données de perte de masse ou les méthodes différentielles basées sur les données de perte de masse et de vitesse de masse. Le principe consiste à déterminer expérimentalement la constante de vitesse à partir de l'équation 2.3 et de reporter ensuite la valeur sous forme d'un graphe $\ln(k(T)) = f(1/T) = \ln(A) - \frac{E}{RT}$.

Quelques valeurs des constantes cinétiques (E et A) de différentes espèces, rapportées par Branca et Di Blasi dans [54] pour un mécanisme à une seule réaction, sont récapitulées dans le tableau 2.3. Les valeurs obtenues sont très dispersées ; ce qui rend la caractérisation de la cinétique de la pyrolyse du bois plus difficile. Avec ce type de mécanisme, l'avantage étant la simplicité de calcul.

Mécanismes à plusieurs réactions chimiques

Ces modèles cinétiques consistent à estimer la pyrolyse de la particule en bois par des réactions primaires et secondaires, et divisent les produits en char (résidu solide), gaz et *Tar*. Ils sont plus élaborés et plus riches comparés aux modèles cinétiques à une seule réaction.

1. **Cinétique de la dégradation des celluloses**

   Mécanisme de Broido

   Ce modèle de Broido et Weinstein [59] est le premier mécanisme multi-réactionnel utilisé pour décrire la pyrolyse de la cellulose. Entre 200 et 280°C, une première réaction endothermique se produit, qui aboutit à la formation de l'anhydro-cellulose (déshydratation intermoléculaire). Au-delà de 280°C, les molécules seront dégradées par une réaction exothermique en charbon et volatils. Parallèlement se produit une réaction de dépolymérisation endothermique produisant du *Tar* (figure 2.26). Pour le modèle de Broido [59], Agarwal [60] a proposé les constantes cinétiques montrées dans le tableau 2.4.

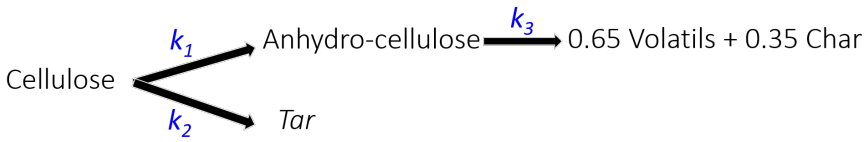


FIGURE 2.26 – Mécanisme de dégradation de la cellulose selon Broido [59].

Réaction (k_i)	$A_i[min^{-1}]$	$E_i[kJ.mol^{-1}]$
k_1	4.7×10^{11}	152.8
k_2	6.6×10^{16}	206.8
k_3	2.16×10^{17}	210.4

TABLE 2.4 – Paramètres cinétiques déterminés par Agarwal [60].

Mécanisme de Shafizadeh

Shafizadeh et al. [61] ont proposé un modèle légèrement modifié comparé à celui de de Broido [59], figure2.27. La réaction initiale aboutit à la formation d'une cellulose active caractérisée par un degré de polymérisation environ 10 fois plus faible que la cellulose initiale. Pour ce modèle, Bradbury et al [62] ont proposé un jeu des paramètres cinétiques regroupé dans le tableau 2.5.

Mécanisme de Broido-Shafizadeh

Varhegyi et al. [63] proposent d'éliminer les étapes intérimaires (formation de l'anhydrocellulose et de la cellulose active). Ce mécanisme, représenté sur la figure 2.28, est souvent proposé comme une interprétation la plus adaptée à la décomposition thermique de la cellulose. Les constantes proposées par Varhegyi [63] sont récapitulées dans le tableau 2.6.

2. **Cinétique de la dégradation des hémicelluloses**

Peu de travaux ont porté sur l'étude de la pyrolyse des hémicelluloses comparé à la cellulose. La dégradation des hémicelluloses se situe généralement entre 200 et 300°C selon Varhegyi et al [64]. A haute température, la pyrolyse du xylane produit principalement des volatils, les rendements en charbon (solide) variant entre 10 et 20% en fonction de la vitesse de chauffe (Shafizadeh and McGinnis [65] ; Williams and Besler [66]). Zeriouh and Belkbir [67] affirment que la vitesse de perte de masse

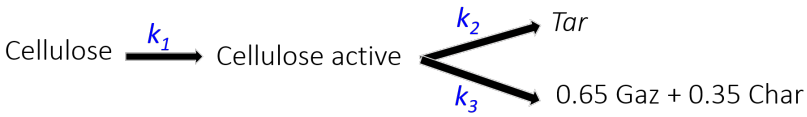


FIGURE 2.27 – Mécanisme de dégradation de la cellulose selon Shafizadeh [61].

Réaction (k_i)	$A_i[min^{-1}]$	$E_i[kJ.mol^{-1}]$
k_1	1.7×10^{21}	242.8
k_2	1.9×10^{16}	197.9
k_3	7.9×10^{11}	153.1

TABLE 2.5 – Paramètres cinétiques déterminés par Bradbury [62].

FIGURE 2.28 – Mécanisme de dégradation de la cellulose selon Shafizadeh [61].

est maximale dans la plage de températures allant de 250 à 280°C, accompagnée d'une production de la majorité des volatils. Pour le cas du matériau bois, c'est surtout la décomposition des celluloses qui prédomine. Quelques valeurs des constantes cinétiques de dégradation des hémicelluloses selon un schéma multi-réactionnel sont résumées dans le tableau 2.7.

3. **Cinétique de la dégradation des lignines**

   Dans la littérature, la pyrolyse de la lignine est relativement peu explorée et peu comprise [51, 73] comparée à celle de la cellulose et des hémicelluloses. Des trois principaux composants du bois, la lignine serait celui qui commence à se dégrader aux plus basses températures, entre 110 à 200°C, et une dégradation réelle n'interviendrait qu'au-delà de 400°C [51]. Le mécanisme de dégradation de la lignine est décrit souvent par une réaction unique irréversible d'ordre 1. Le tableau 2.8 donne quelques valeurs moyennes des paramètres cinétiques couramment utilisées dans la simulation de la dégradation ce polymère. La diversité des valeurs des paramètres cinétiques présentées sur le tableau 2.8 s'explique par les conditions opératoires, en particulier la vitesse de chauffe qui a un fort impact sur les énergies d'activation [66, 76].

4. **Enthalpies des réactions de pyrolyse**

   La différence d'enthalpie entre l'enthalpie des produits H_p et l'enthalpie des réactifs H_r est un paramètre important dans la modélisation de la pyrolyse du bois. Si la

Réaction (k_i)	$A_i[s^{-1}]$	$E_i[kJ.mol^{-1}]$
k_1	1.0×10^{18}	238.
k_2	$1.0 \times 10^{9.4}$	147.

TABLE 2.6 – Paramètres cinétiques déterminés par Varhegyi [63].

Conditions opératoires	$E[kJ.mol^{-1}]$
ATG : 195-225°C, 4°C/min	62.8
ATG : 225-265°C, 4°C/min	108.8

Ramiah [68]

Conditions	Schéma réactionnel	Paramètres
220-400°C, 5°C/min	$A \rightarrow B_1 + gaz$ $B_1 \rightarrow ash$ 2e cinétique non identifiée	$E = 45.2kJ.mol^{-1}$ $A = 14.4s^{-1}$

Sefain et al. [69]

Conditions	Schéma réactionnel	$E_i[kJ.mol^{-1}]$; $A_i[s^{-1}]$
300°C, 5°C/min	$A \xrightarrow{1} G$, $A \xrightarrow{2_a} C$	$E_1 = 72.4$; $A_1 = 3.3 \times 10^6$
300°C, 20°C/min		$E_{2a} = 174.1$; $A_{2a} = 1.1 \times 10^{14}$
300°C, 80°C/min		$E_{2b} = 172.$; $A_{2b} = 2.5 \times 10^{13}$

Koufopanos et al. [70]

Conditions	Schéma réactionnel	$E_i[kJ.mol^{-1}]$; $A_i[s^{-1}]$
$T < 350°C$, 10°C/min	$A \xrightarrow{1} 0.43G_1+0.56S_1$ $0.43G_1+0.56S_1 \xrightarrow{2} 0.65\,G_2+0.44\,S_2$	$E_1 = 193.$; $A_1 = 7.94 \times 10^{16}$
$T < 350°C$, 80°C/min		$E_2 = 95$; $A_2 = 5.01 \times 10^6$

Varhegyi et al. [64]

Conditions	Schéma réactionnel	$E_i[kJ.mol^{-1}]$; $A_i[s^{-1}]$
200-340°C, 40°C/min	$A \xrightarrow{k_1} G_1$, $A \xrightarrow{k_2} B$, $B \xrightarrow{k_3} G_2$, $B \xrightarrow{k_4} C$	$E_1 = 91.2$; $A_1 = 3.31 \times 10^6$
200-340°C, 70°C/min		$E_2 = 66.2$; $A_2 = 1.74 \times 10^4$
		$E_3 = 52.8$; $A_3 = 58.7$
		$E_4 = 56.1$; $A_4 = 3.43 \times 10^2$

Di Blasi et Lanzetta [71]

Conditions	Schéma réactionnel	$E_i[kJ.mol^{-1}]$; $A_i[s^{-1}]$
200-700°C, 20°C/min	$A \xrightarrow{k_1} S + V \xrightarrow{k_2} C$	$E_1 = 168.$; $A_1 = 2.53 \times 10^{15}$ $E_2 = 104.$; $A_2 = 2.01 \times 10^7$

Fisher et al. [72]

TABLE 2.7 – Paramètres cinétiques des hémicelluloses.

Auteurs	$A[s^{-1}]$	$E[kJ.mol^{-1}]$
Ramiah [68]	NC	80.
Koufopanos et al. [70]	8.6×10^8	137.1
Bilbao et al. [74]	$3. \times 10^9$	113.
Williams et Besler [66]	2.77×10^7	124.3
Orfão et Figueiredo [75]	1.56×10^{-2}	18.1

TABLE 2.8 – Paramètres cinétiques de lignine isolée de différents bois.

différence d'enthalpie $\Delta H = H_p - H_r$ est négative, la réaction sera exothermique (la chaleur libérée conduit à une augmentation de température du milieu). Si $\Delta H > 0$, la réaction sera endothermique (le milieu cède de l'énergie thermique aux réactifs). La mesure par l'analyse thermique différentielle (ATD) de la dégradation thermique des hémicelluloses réalisée par Shimizu et al (1968) dans [77] montre que les principales réactions de la pyrolyse du bois ont lieu entre 200 et 300°C, figure 2.29. Sous atmosphère oxydante (A), deux réactions exothermiques prennent places à 215°C et à 271°C, et une réaction endothermique à 234°C. Sous azote (B), le premier pic à 215°C n'existait pas. Sous vide (C), un pic fortement endothermique, dû à une forte absorption de chaleur par les produits volatils générés pendant le processus de la pyrolyse, est observé à 249°C. Beall et al [78] trouvent, avec la méthode extractive, une valeur exothermique de $-3kJ/kg$ pour les hémicelluloses de résineux et une valeur endothermique de $38kJ/kg$ pour les hémicelluloses de feuillus. Les valeurs pour la lignine sont purement exothermiques et elles s'échelonnent entre -183 et $-430kJ/kg$. Alves et Figueirido [79] utilisent une valeur de $-233kJ/kg$ pour les hémicelluloses et la lignine, et une valeur de $322kJ/kg$ pour la cellulose. Selon Rousset [76], le manque de précisions sur le calcul de la différence d'enthalpie dans la littérature est souvent attribué aux conditions expérimentales (taille de l'échantillon, nature de l'atmosphère, présence d'impuretés, etc.).

Méthode basée sur la distribution des énergies d'activation

La méthode consiste à associer à chaque gaz produit lors de la pyrolyse un ensemble de réactions du premier ordre en considérant que les énergies d'activation de cet ensemble soient représentées par une distribution de type gaussienne. Dans un premier temps, elle a été appliquée à la pyrolyse du charbon, puis récemment à la pyrolyse de biomasse [49, 83, 84]. Dans la suite de ce travail, nous adopterons le mécanisme multi-réactionnel pour établir les cinétiques de pyrolyse de bois.

Basée sur l'étude bibliographique de la cinétique de dégradation thermique des trois

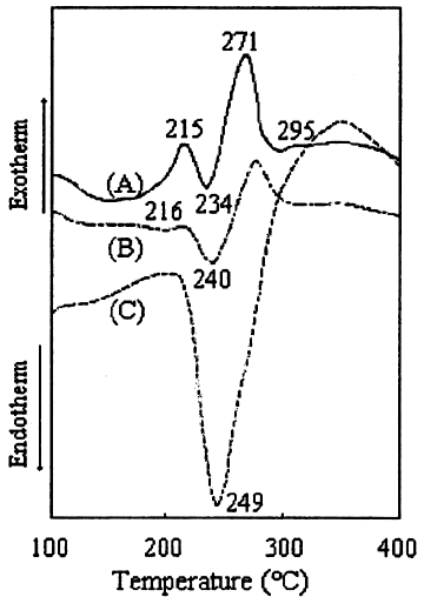


FIGURE 2.29 – ATD de la dégradation thermique des hémicelluloses [77].

principaux constituants (la cellulose, les hémicelluloses et la lignine), nous retiendrons pour la modélisation de la cinétique globale du matériau bois les éléments suivants :

- des énergies d'activation E variant de 90 à $300kJ/mol$ pour la cellulose, de 125 à $260kJ/mol$ pour les hémicelluloses et de 15 à $125kJ/mol$ pour la lignine ;
- la dégradation thermique de la cellulose, représentée par deux réactions, a été caractérisée entre 250 et 360°C. Les courbes montrent que la réaction de dépolymérisation est plus rapide que la réaction de déshydratation. Cette donnée confirme la possibilité de représenter la décomposition de la cellulose par un mécanisme à une seule réaction chimique (Varhegyi et al. 1994[63]) ;
- la décomposition thermique de les hémicelluloses est souvent représentée par un mécanisme multi-réactionnel ;
- une décomposition des lignines peut-être modélisée par une seule réaction ;
- une grande dispersion des valeurs de la chaleur de pyrolyse des trois constituants du bois. Dans la suite de cette étude, on utilisera cette information pour ajuster les valeurs de l'enthalpie des réactions dans la modélisation de la pyrolyse ;
- les modèles de la dégradation des trois constituants principaux (la cellulose, les hémicelluloses et la lignine) ne peuvent pas être appliqués directement au bois, mais ils permettent de donner des ordres de grandeur des valeurs des paramètres cinétiques à introduire dans les simulations.

2.3.3 Modèles de la pyrolyse du bois

Le bois est un matériau combustible dans une gamme de température que l'on rencontre couramment dans un incendie, comme l'illustre la figure 2.29. Comme tout combustible, sa dégradation se déroule souvent en trois étapes successives : le séchage, la pyrolyse et la combustion. La modélisation de ces phénomènes nécessite la prise en compte de la cinétique de la décomposition, mais aussi la variation des caractéristiques physico-mécaniques en fonction de la température [80–82]. La dégradation thermique du matériau bois est décrite par plusieurs auteurs [32, 36, 38–41, 44, 45], et elle s'effectue selon les étapes suivantes :

1. Phase de séchage
   Le bois est de nature hygroscopique. L'élévation de la température ambiante entraine nécessairement le séchage du bois. Ce mécanisme commence par la perte de l'eau libre présente dans les interstices des fibres puis par 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 correspond à l'état anhydre du matériau bois. Le séchage du bois s'effectue à des températures allant de 80 à 110°C. A ce niveau de températures, l'eau migre vers l'extérieur par capillarité et s'évapore au niveau des arêtes et des fissures du matériau. Le transfert de masse s'effectue de la zone la plus humide vers la zone la plus sèche. Au cours du séchage, l'évolution de la température interne du bois est fortement ralentie et a tendance à rester stable aux alentours de 100°C. 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'accroit progressivement en fonction des conditions extérieures [33].

2. Phase de pyrolyse
   Pour un matériau cellulosique, la pyrolyse se traduit par la décomposition chimique du matériau, la libération de gaz et la formation d'une couche du charbon [34, 35, 37, 39, 42, 43, 47]. 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 dégradation du matériau. A des températures variant de 150 à 200°C, les gaz causés par la pyrolyse se composent d'environ 70% de dioxyde de carbone incombustible CO_2 et monoxyde de carbone CO combustible et toxique. A plus de 200°C, le gaz combustible se libère de plus en plus vite et la proportion de CO_2 décroît. Après inflammation des gaz, la température à la surface s'accroît rapidement. Le bois se

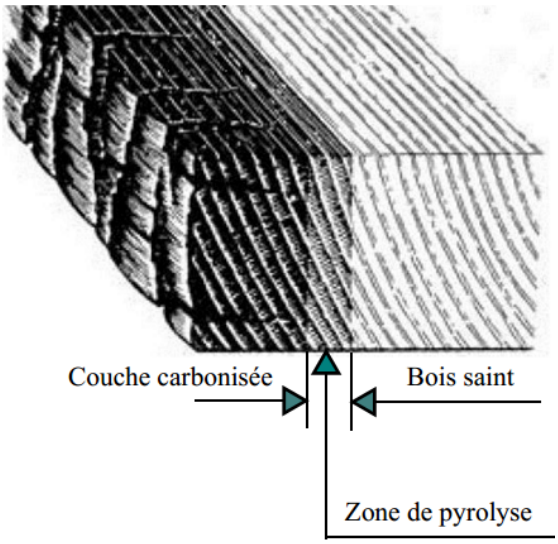


FIGURE 2.30 – Front de pyrolyse d'un bois.

transforme en charbon à des températures d'environ 300°C. C'est entre 200 et 350°C, que le bois perd environ 75% de sa masse initiale. La masse formée du charbon est en moyenne de 20% de la masse initiale du bois. Durant cette phase, 20% des gaz émis par la dégradation du bois sont inflammables. La conductivité thermique du charbon est environ six fois inférieure à celle d'un bois sain. Le charbon se comporte donc comme un isolant, ce qui ralentit la propagation de la chaleur et donc du feu dans les structures bois [33].

3. Phase de combustion
   La combustion correspond à l'inflammation des gaz émis pendant la pyrolyse. A ce stade, la température à la surface exposée au feu augmente fortement. Au-delà de 500°C, la quantité du gaz diminue et celle de charbon augmente. Au-dessus de 800°C, les gaz émis sont principalement composés de CO et H_2 [5].

La coupe d'un front de pyrolyse d'un bois est constituée de trois couches (figure 2.30) :
- La couche de charbon, correspond à la partie du bois exposée au feu ;
- La couche de pyrolyse d'une épaisseur d'environ 3 mm, est la partie où le bois est altéré chimiquement sans qu'il soit complètement décomposé ;
- La couche du bois sain, est la partie non atteinte par la température.

Modèle de pyrolyse de shen

Un modèle (1D) 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 dans [46]. Le mécanisme de pyrolyse de ce modèle est représenté schématiquement sur la figure 2.31. La

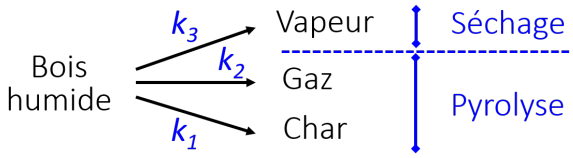


FIGURE 2.31 – Modèle de pyrolyse pour un bois humide.

figure 2.31 montre que la dégradation thermique du bois humide se fait par trois réactions parallèles. Le bois se transforme en vapeur dans l'étape de séchage et en charbon et gaz dans l'étape de pyrolyse.

Dans le travail de thèse de Thi V.D. [5, 7, 10], des modèles éléments finis(2D) et (3D) ont été formulés et développés à partir du modèle (1D) proposé par Shen et al [46].

Dans un test au feu, l'échange de 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.

Pour un bois humide, Shen et al [46] décrivent l'évolution du gradient de température par :

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[T\left(\rho_w c_w + \rho_c c_c + \rho_l c_l\right)\right] = \frac{\partial}{\partial x}\left[\alpha q''_e - q''_{loss} - \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x}\right] + Q''_r \tag{2.5}$$

Les équations de conservation de masse sont :

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -(k_1 + k_2)\rho_w\,;\ \frac{\partial \rho_c}{\partial t} = k_1 \rho_w\ ;\ \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = k_2 \rho_w\,;\ \frac{\partial \rho_l}{\partial t} = -k_3 \rho_l\,;\ \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = k_3 \rho_l \tag{2.6}$$

Les indices w, c, g, l et v désignent respectivement le bois, le char, le gaz, le liquide et la vapeur. $T[K]$ est la température actuelle ; $t[s]$ désigne le temps ; $\rho_i[kg/m^3]$ et $c_i[J/(kg.K)]$ sont respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique du composant (i) et $\lambda_s[W/(m.K)]$ est la conductivité thermique du solide (s). $\alpha = 0.95$ représente l'absorptivité ; $q''_e[W/m^2]$ étant le flux de chaleur externe ; $q''_{loss}[W/m^2]$ désigne le flux de chaleur perdu et il se calcule par :

$$q''_{loss} = \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) + h_c(T - T_0) \tag{2.7}$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$ étant la constante de Stefan-Boltzmann ; $\varepsilon = 0.78$ désigne l'émissivité ; $h_c = 10 W/m^2$ est le coefficient de transfert de chaleur par convection et $T_0[K]$ représente la température initiale.

$Q''_r[W/m^3]$ étant la source de chaleur due aux réactions complexes produites lors de la

Réaction	$A_i[s^{-1}]$	$E_i[kJ/mol]$	$\Delta h_i^0[kJ/kg]$
k_1	7.38×10^5	106.5	-420
k_2	1.44×10^4	88.6	-420
k_3	5.13×10^{10}	88	-2440

TABLE 2.9 – Paramètres du modèle de Shen [46].

	C_w	C_c	C_g	C_l	C_v
$C_p[kJ/(kg.K)]$	1.95	1.39	2.40	4.18	1.58

TABLE 2.10 – Valeurs de la chaleur spécifique du bois humide [46].

dégradation thermique du bois, et elle s'exprime par [46] :

$$\begin{aligned} Q_r'' = & k_1\rho_w\left[\Delta h_c^0 + (C_c - C_w)(T - T_0)\right] + k_2\rho_w\left[\Delta h_g^0 + (C_g - C_w)(T - T_0)\right] \\ & + k_3\rho_l\left[\Delta h_v^0 + (C_v - C_l)(T - T_0)\right] \end{aligned} \tag{2.8}$$

$\Delta h_i^0[J/kg]$ sont les énergies de réactions standards, elles sont proposées par Shen et al [46] et récapitulées dans le tableau 2.9.

La conductivité thermique équivalente du solide $\lambda_s[W/(m.K)]$ se calcule par [46] :

$$\lambda_s = \eta\lambda_c + (1-\eta)\lambda_w\,;\ \eta = \frac{\rho_c}{\rho_w + \rho_c}\,;\ \lambda_c = 0.105\,;\ \lambda_w = 0.166 + 0.369X \tag{2.9}$$

X étant le taux d'humidité.

Les valeurs de la chaleur spécifique, utilisées par Shen et al [46], sont données dans le tableau 2.10. Pour la validation de ce modèle de pyrolyse, les auteurs Shen et al [46] ont testés plusieurs essences : le chêne de Mongolie, le bouleau blanc, l'épicéa, le pin blanc et le mélèze.

Modèle de pyrolyse de Grioui

Selon Grioui et al. [85], la dégradation thermique d'une particule en bois s'effectue en quatre réactions chimiques (k_1, k_2, k_3 et k_4) comme le montre la figure 2.32. Le bois est constitué de trois pseudo-composants A_1, A_2 et A_3. Les fractions massiques sont respectivement α_1 pour le pseudo-composant A_1, α_2 pour A_2 et α_3 pour A_3, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$. Les deux premiers pseudo-composants A_1 et A_2 se dégradent en une seule réaction. Ils produisent respectivement des gaz (G_1) et (G_2) et un solide résidu, le char (C_2). La décomposition thermique de A_3 se fait en deux étapes. La première étape produit un solide intermédiaire (B) et un gaz (G_3). Dans une seconde étape, (B) se transforme en char (C_3) et en gaz (G_4). Les fractions massiques (β) du produit intermédiaire (B) et celles du charbon solide non dégradable (γ_2) et (γ_3) dépendent de la température [85]. Les quatre

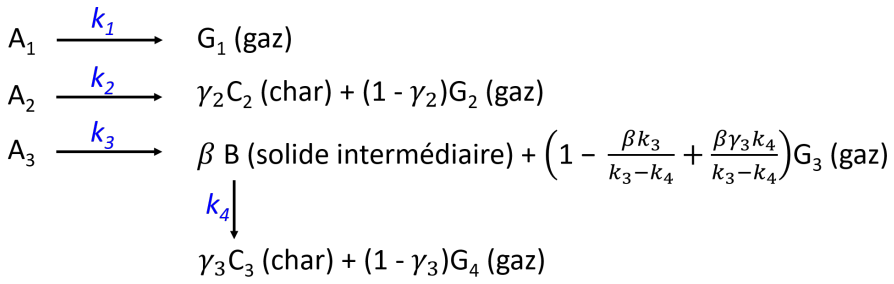


FIGURE 2.32 – Modèle cinétique de Grioui et al [85].

réactions qui constituent le schéma cinétique, figure 2.32, sont toutes décrites par des lois de type *Arrhenius*.

En considérant que l'échantillon mis dans la thermo-balance est homogène, on peut développer le bilan de matière pour chaque pseudo-composant et résidu comme suit [85] :

$$\begin{array}{l} \frac{dm_{A_1}}{dt} = -k_1 m_{A_1};\ \frac{dm_{A_2}}{dt} = -k_2 m_{A_2};\ \frac{dm_{A_3}}{dt} = -k_3 m_{A_3}\ ; \\ \frac{dm_{C_2}}{dt} = \gamma_2 k_2 m_{A_2};\ \frac{dm_B}{dt} = \beta k_3 m_{A_3} - k_4 m_B;\ \frac{dm_{C_3}}{dt} = \gamma_3 k_4 m_B \end{array} \tag{2.10}$$

où k_1, k_2, k_3 et k_4 sont des taux constants des quatre réactions ; m_{A_1}, m_{A_2}, m_{A_3}, m_{C_2}, m_B et m_{C_3} représentent les masses des constituants A_1, A_2, A_3, C_2, B etC_3, respectivement. Dans ce cas, la masse totale $m(t)$ de l'échantillon à l'instant (t) s'exprime par :

$$m(t) = m_{A_1}(t) + m_{A_2}(t) + m_{A_3}(t) + m_{C_2}(t) + m_{C_3}(t) + m_B(t) \tag{2.11}$$

La résolution analytique des équations de la balance conduit à l'expression suivante [85] :

$$\begin{array}{l} \frac{m(t)}{m_{A_0}} = \alpha_2\gamma_2 + \alpha_3\gamma_3\beta + \alpha_1 e^{-k_1 t} + \alpha_2(1-\gamma_2)e^{-k_2 t} \\ \qquad +\alpha_3\left(1 - \frac{\beta k_3}{k_3-k_4} + \frac{\beta\gamma_3 k_4}{k_3-k_4}\right)e^{-k_3 t} + \frac{\alpha_3\beta k_3}{k_3-k_4}(1-\gamma_3)e^{-k_4 t} \end{array} \tag{2.12}$$

où m_{A_0} est la masse des particules de bois séchées à $423K$.

L'équation 2.12 montre que la masse de l'échantillon au cours de la pyrolyse, à une température fixe dans une atmosphère inerte, dépend de 10 paramètres cinétiques (α_1, α_2, α_3, γ_2, γ_3, β, k_1, k_2, k_3 et k_4). Des courbes expérimentales, il est difficile de déterminer l'ensemble des paramètres sans effectuer d'analyse séquentielle [85]. Pour le calcul de ces parmètres à partir des tests, Grioui et al [85] ont examiné par l'ATG l'évolution de perte de masse d'un bois d'olivier pendant la carbonisation entre 298 et $1173K$, avec une vitesse de chauffe lente de $1.5K/min$.

Les taux des 4 réactions $k_{i,i=1,4}$ dépendent de la température T, et ils s'expriment par la loi d'*Arrhenius* comme suit [85] :

Réaction (i)	Référence : $E_{0i}[kJ.mol^{-1}]$	$E_{0i}[kJ.mol^{-1}]$	$k_{0i}[s^{-1}]$
(1)	$84 < E_{0i} \leq 140$: [34, 35, 38, 87, 88]	105.89	3.5×10^7
(2)	$73 < E_{0i} \leq 121$: [34, 35, 38, 87, 88]	106.78	3.72×10^6
(3)	$112 < E_{0i} \leq 133$: [34, 87, 88]	169.56	7.23×10^{11}
(4)	$80 < E_{0i} \leq 108$: [88, 89]	51.04	3.4×10^{-1}

TABLE 2.11 – Valeurs de k_{0i} et E_{0i} estimées par Grioui et al. [85].

$$k_i = k_{0i} e^{-\frac{E_{0i}}{RT}} \tag{2.13}$$

où $k_{0i}[s^{-1}]$, $E_{0i}[kJ.mol^{-1}]$ et $R = 8.314 J.K^{-1}.mol^{-1}$ sont respectivement les facteurs pré-exponentiels, les énergie d'activation et la constante des gaz parfaits. Les valeurs des paramètres k_{0i} et E_{0i} proposés par Grioui et al. [85] sont résumées dans le tableau 2.11. Selon les auteurs, le choix d'une valeur plus importante de E_{03} (tableau 2.11) est dû au fait qu'il est difficile de séparer la décomposition du pseudo-composant A_3 de celle des autres composants (A_2 en particulier [54]) dans des conditions isothermes. La valeur inférieure estimée de E_{04} comparée à littérature [88, 89] peut être due à la faible vitesse de transformation relative dans la plage de température étudiée (498-643K) qui correspond à un transport par diffusion d'une molécule fortement absorbée ou un réarrangement interne de structure chimique riche en carbone [85].

Les autres paramètres cinétiques déterminés par Grioui et al dans [85] sont :

- indépendants de la température : $\alpha_1 = 0.16$, $\alpha_2 = 0.24$ et $\alpha_3 = 0.6$;
- dépendants de la température : $\gamma_2 = 0.42$ ($T \geq 523K$) ; $\beta = -2.4 \times 10^{-3}T + 1.9252$ et $\gamma_3 = 3.8 \times 10^{-3}T - 1.5807$.

Ce modèle a été appliqué dans la thèse de Girods P.[90] et a fourni de très bons résultats.

Modèle de combustion de Branca et Di Blasi

Un modèle cinétique de combustion de bois a été proposé et développé par Branca et Di Blasi dans [91]. Le schéma cinétique est constitué de quatre étapes en série comme l'illustre la figure 2.33. Lors des réactions chimiques (k_1 à k_4), le solide bois vierge est désigné par A. Il se transforme ensuite en trois résidus carbonisés B, C et D. E représente les cendres produites à la fin du processus de combustion. Les quantités V_1, V_2, V_3 et V_4 représentent les espèces volatiles. α, β et γ sont coefficients stœchiométriques ; δ désigne la teneur en cendres (tous les coefficients sont des fractions massiques du solide vierge à l'état sec). Du point de vue chimique, les deux premières réactions k_1 et k_2 peuvent être associées à la dégradation des hémicelluloses et de la cellulose, respectivement. La troisième réaction k_3

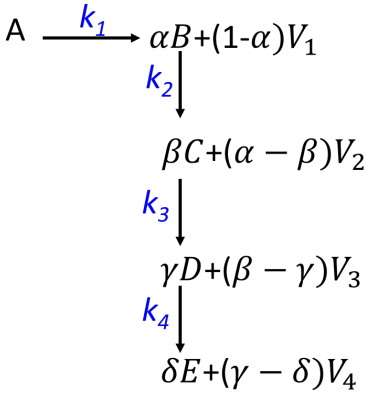


FIGURE 2.33 – Modèle de cinétique de Branca et Di Blasi [91].

constitue la dernière étape du processus de dévolatilisation (décomposition de la lignine) et le début de la combustion du charbon. La quatrième réaction k_4 décrit la combustion du charbon.

Les vitesses de réactions (R_1, R_2 et R_3) sont, déterminées par la loi d'*Arrhenius*, en fonction de la température T et proportionnelles aux fractions massiques des composants solides [91] :

$$R_1 = -k_1 Y_A; \quad R_2 = -k_2 Y_B; \quad R_3 = -k_3 Y_C; \quad k_{i,i=1,3} = A_i e^{-\frac{E_i}{RT}} \tag{2.14}$$

A_i et E_i sont respectivement le facteur pré-exponentiel d'*Arrhenius* et l'énergie d'activation du composant solide (i), et R étant la constante des gaz parfaits.

Selon Di Blasi et al [92], les modèles globaux en une seule étape de combustion de charbon relient le taux des solides transformés à la pression partielle d'oxygène, via un exposant empirique, et la surface des pores disponible au volume des réactions. Ces hypothèses sont également adoptées pour ce modèle où une loi de puissance simple d'exposant n est appliquée pour le calcul de la vitesse de réaction R_4. Etant donné le débit d'air utilisé dans les tests est relativement élevé, on peut supposer que la fraction massique d'oxygène reste constante pendant le processus de réaction. Par conséquent, sa contribution est intégrée dans l'expression du facteur pré-exponentiel [91, 92]. Ces hypothèses permettent d'exprimer R_4 sous la forme suivante [91] :

$$R_4 = -k_4 Y_D^n; \quad k_4 = A_4 e^{-\frac{E_4}{RT}} \tag{2.15}$$

Les équations 2.14 et 2.15 du modèle de combustion montrent que les paramètres cinétiques à déterminer sont les facteurs pré-exponentiels (A_1, A_2, A_3 et A_4) ; les énergies d'activation (E_1, E_2, E_3 et E_4) ; les coefficients stœchiométriques (α, β et γ) et l'exposant

Paramètres	Sapin de Douglas	Hêtre
$E_1[kJ/mol]$	106	106
$A_1[s^{-1}]$	5.74×10^7	6.29×10^7
$E_2[kJ/mol]$	226	226
$A_2[s^{-1}]$	1.14×10^{18}	8.60×10^{17}
$E_3[kJ/mol]$	114	114
$A_3[s^{-1}]$	2.43×10^6	7.83×10^6
$E_4[kJ/mol]$	183	183
$A_4[s^{-1}]$	1.45×10^{11}	1.10×10^{12}
n	1.54	1.54

TABLE 2.12 – Paramètres cinétiques proposés par Branca et Di Blasi [91].

	α		β		γ	
Vitesse $[K/min]$	Douglas	Hêtre	Douglas	Hêtre	Douglas	Hêtre
5	0.750	0.660	0.323	0.245	0.176	0.130
10	0.740	0.650	0.326	0.252	0.160	0.129
20	0.735	0.580	0.327	0.255	0.158	0.128
40	0.710	0.56	0.328	0.256	0.130	0.098

TABLE 2.13 – Coefficients stœchiométriques proposés par Branca et Di Blasi [91].

n (δ étant la teneur en cendres).

Dans le travail de Branca et Di Blasi [91], des courbes de perte de masse des deux essences de bois, le sapin de Douglas et le hêtre , ont été mesurées par l'ATG avec différentes vitesses de chauffe comprises entre 5 et 40 K/min et à une température finale de $873K$. Les paramètres cinétiques proposés par les auteurs [91] sont rassemblés dans les tableaux 2.12 et 2.13.

Modèle cinétique de Broström

Un modèle cinétique de décomposition et d'oxydation d'un combustible cellulosique a été proposé et développé par Broström et al. (2012) dans [97]. Les courbes mesurées de l'ATG ont été prédites par un schéma cinétique constitué de cinq réactions chimiques parallèles, consistant en trois réactions (k_1, k_2 et k_3) de décomposition des trois pseudo-composants hémicelluloses, cellulose et lignine et de deux réactions supplémentaires d'oxydation (k_4 et k_5) décrivant l'étape de combustion comme l'illustre la figure 2.34. Les quantités de volatiles (V_1, V_2 et V_3) dues à la pyrolyse du solide (S) sont générées par trois réactions de décomposition cinétique (k_1, k_2 et k_3). Les deux autres réactions d'oxydation du combustible (k_4 et k_5) qui succèdent décrivent l'étape de combustion, et elles génèrent les quantités de volatiles (V_4 et V_5). Le terme "pseudo-composant" est utilisé car il est impossible en analyse cinétique d'éviter le chevauchement entre différents composants dans

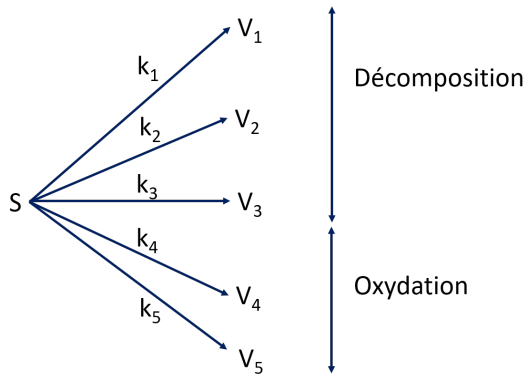


FIGURE 2.34 – Modèle cinétique de Broström [97].

les courbes de perte de poids mesurées expérimentalement par l'ATG [98].

L'application de ce modèle cinétique, dans cette étude, se limite à l'identification des paramètres cinétiques des trois réactions des pseudo-composants hémicelluloses, cellulose et lignine [98]. L'étape d'oxydation du charbon n'est pas prise en compte dans l'analyse des courbes de l'ATG obtenues sous un flux d'azote.

Les paramètres cinétiques sont estimés par la solution numérique des équations de conservation de masse et l'application d'une méthode directe pour la minimisation de la fonction-objectif, qui prend en compte les données intégrales (TG) et différentielles (DTG), en suivant la méthode déjà décrite précédemment par Branca et Di Blasi dans [91]. Les vitesses de réactions sont calculées par la loi d'*Arrhenius* :

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = -A_i e^{-\frac{E_i}{RT}} \upsilon_i \; ; \quad i = 1, ..., 5 \tag{2.16}$$

A_i sont les facteurs pré-exponentiels ; E_i sont les énergies d'activation et les coefficients stœchiométriques υ_i sont les fractions massiques initiales des substances volatiles générées.

Les paramètres à estimer pour l'étape de la décomposition cinétique sont les énergies d'activation (E_1, E_2 et E_3), les facteurs pré-exponentiels (A_1, A_2 et A_3), les coefficients stœchiométriques (υ_1, υ_2 et υ_3). Soit un total de 9 paramètres.

2.3.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons souligné la richesse et la variabilité des résultats de la littérature qui témoignent de la difficulté à caractériser les cinétiques complexes de la pyrolyse du bois et de ses trois constituants (hémicelluloses, cellulose et lignine). Afin d'observer pour le bois une additivité des réponses de chacun de ses composants, nous avons fait le choix de retenir quatre modèles cinétiques : de Shen [46], de Grioui [85], de Branca et Di Blasi [91] et de Broström [97], et de les caractériser séparément.

Le modèle de pyrolyse de Shen [46] a évoqué de façon plus ou moins détaillée la dégradation thermique d'un bois humide par un réseau de réactions parallèles. Il traite séparément les phases de séchage et de pyrolyse. Le modèle de Grioui [85] décompose le bois en trois pseudo-composants. La décomposition thermique des pseudo-composants s'effectue par différentes réactions parallèles. Le modèle de combustion de Branca et Di Blasi [91] évoque la décomposition cinétique du matériau bois par plusieurs réactions successives en série, ce qui n'est pas le cas du modèle de Broström [97] où les réactions chimiques s'effectuent en parallèle. Ce dernier présente séparément les cinétiques de pyrolyse et de combustion.

Dans la suite de cette étude, nous utiliserons les trois modèles de pyrolyse (de Shen [46], de Grioui [85] et de Broström [97]) décrits dans cette partie pour modéliser la cinétique de la décomposition thermique du matériau bois sous hautes températures.

L'analyse thermogravimetrique (ATG) est utilisée, dans cette étude, pour identifier les constantes cinétiques des modèles de pyrolyse. Cette technique consiste à suivre l'évolution de la perte de masse des particules de bois durant sa dégradation réalisée selon une loi de chauffe définie par des paliers de température en fonction du temps (mode isotherme) ou par une loi déterminée par élévation constante de la vitesse de chauffe. La section, qui suivra, est consacrée à la présentation des tests de l'ATG réalisés sur des particules des bois locaux, choisis pour être analyser dans le cadre d'un projet européen VB(NWE348), en cours de réalisation (2016-2019).

2.4 Caractéristion expérimentale de la pyrolyse d'une particule de bois

2.4.1 Introduction

L'une des méthodes les plus utilisées pour l'étude de la pyrolyse d'une particule de bois est l'analyse thermogravimétrique (ATG).Elle consiste à mesurer, in situ, les variations de la perte de masse subies par l'échantillon en fonction de la température et de la nature de l'atmosphère gazeuse dans laquelle se déroule l'expérience. Dans cette étude, l'ATG est employée pour identifier les étapes de la dégradation thermique de deux bois d'épicéa (normal et densifié) à de faibles vitesses de chauffe. Les tests de la pyrolyse ont été réalisés sous atmosphère inerte d'azote.

Cette section vise à caractériser la cinétique de la pyrolyse d'une particule de bois par l'utilisation d'un thermogramme. Les résultats issus de ce procédé expérimental permettent de déterminer les constantes cinétiques des modèles de pyrolyse formulés à partir

de la loi d'*Arrhenius*, et présentés dans la section précédente. Ainsi, une campagne de caractérisation expérimentale de la dégradation thermique du bois densifié et non densifié a été effectuée dans l'objectif d'obtenir une identification plus précise des valeurs des énergies d'activation et des cinétiques de réactions.

Dans cette section, nous étudions et comparons la conversion thermochimique d'un bois normal et d'un bois densifié de même espèce. Le bois densifié est obtenu par des tests de compression où le bois normal perd environ 70% de son volume initial. Les pores sont supposés totalement éliminés dans ce cas.

Une campagne de caractérisation de la dégradation thermique des deux bois d'épicéa a été réalisée afin d'obtenir une identification précise des énergies et cinétiques de réactions. Pour l'ensemble des tests effectués, les échantillons ont été chauffés avec trois différentes vitesses (30, 40 et 50°C/min) de la température ambiante (environ 20°C) jusqu'à 600°C et 800°C. Chaque test est réalisé au moins deux fois pour vérifier la reproductibilité du comportement de la décomposition thermochimique.

Des tests ont également été réalisés en mode isotherme et ont été conduits en atmosphère neutre (Argon). Les échantillons sont constitués de copeaux de taille inférieure à 4mm et de masse variant de 30 à 50mg. Pour chaque vitesse de chauffe, le protocole expérimental évolue en trois étapes : il commence par une montée de 20°C jusqu'à 600°C (ou 800°C selon le cas) ; une fois la température limite ciblée atteinte, le chargement s'effectue sous forme de palier horizontal. Dans cette phase, la température environnante est relativement proche de celle du four. Le refroidissement du réacteur à la fin de chaque test fait chuter le niveau de température. Cette dernière étape n'est pas abordée dans cette étude.

Les résultats de l'ATG des différents essais sous différentes conditions opératoires sont présentés sous forme de thermogrammes TG-DTG. Les courbes TG désignent la variation de la masse du bois solide en fonction de la température. Les courbes DTG permettent de suivre les vitesses de perte en masse.

2.4.2 Tests de l'analyse thermogravimétrique

Le principe de la technique de mesure de la variation de la masse d'un échantillon subissant un régime de température sous atmosphère contrôlée est illustré sur la figure 2.35. La thermobalance permet de mesurer la perte de masse en fonction du temps et/ou de la température.

Plusieurs essais isothermes, à température linéairement croissante dans le temps, ont été effectués, et conduits systématiquement en atmosphère neutre (Argon). Le bois d'épicéa local est utilisé comme matière première. Les copeaux de bois densifiés sont com-

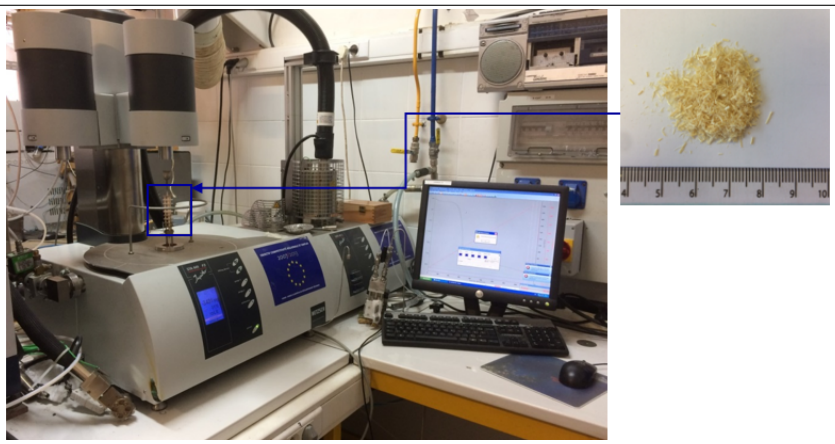


FIGURE 2.35 – Dispositif expérimental de l'ATG.

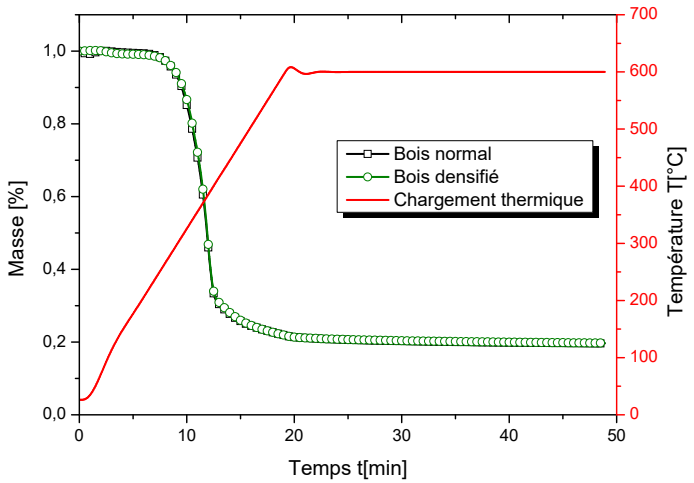
primés 48 heures avant d'être coupés en particules. L'échantillon est constitué de copeaux de bois densifié et non densifié retenus par les mailles d'un tamis de 0,5mm à 1mm (figure 2.35).

Pour analyser la dégradation thermique de chacun des constituants du bois densifié et non densifié, le chargement thermique isotherme est réalisé jusqu'à 600°C et 800°C pendant un temps d'environ 50min de palier avec trois différentes vitesses de chauffe (30°C/min, 40°C/min et 50°C/min). Chaque test est réalisé au moins deux fois pour vérifier à la fois la reproductibilité du comportement et l'homogénéité des échantillons. Les courbes obtenues servent ensuite à l'étude de la cinétique de pyrolyse. Cette étape est importante pour valider le protocole expérimental. Les différentes conditions opératoires sont représentées sur les figures 2.36. Ces figures 2.36 affichent clairement les points suivants :

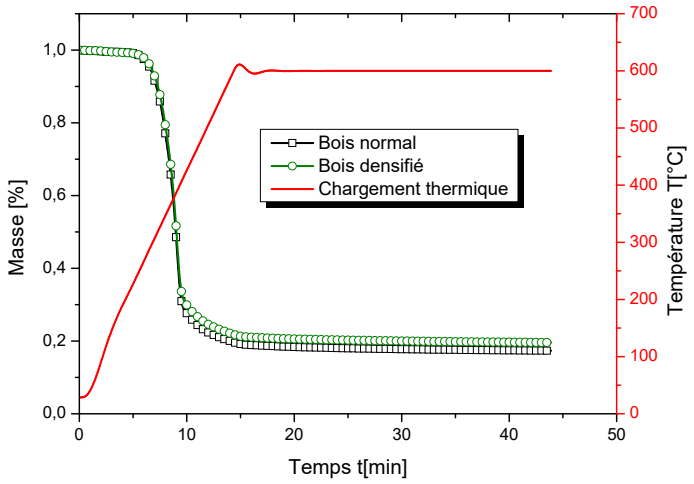
- De la température ambiante de 20°C à 260°C, environ 7% de la masse initiale est perdue. Cette perte correspond à la déshydratation des particules de bois ;
- Entre 260°C et 340°C, une perte de masse d'environ 41% est enregistrée ;
- Entre 340°C et 400°C, une perte de masse d'environ 70% est observée ;
- Une perte de masse assez lente d'environ 15% est observée au-delà de 400°C. A T=600°C, l'échantillon a perdu environ 85% de sa masse initiale, et la quantité finale de résidu est d'environ 15% (de la masse initiale de l'échantillon).

Afin d'étudier l'influence de la vitesse de chauffe sur les caractéristiques de la pyrolyse d'une particule en bois densifié brulée jusqu'à 600°C, les résultats de la perte de masse en fonction de la température sont récapitulés sur la figure 2.37. La variation de la vitesse de chauffe n'affecte pas l'évolution de la perte de masse. La même remarque a été faite par Fateh et al. (2013) dans [94].

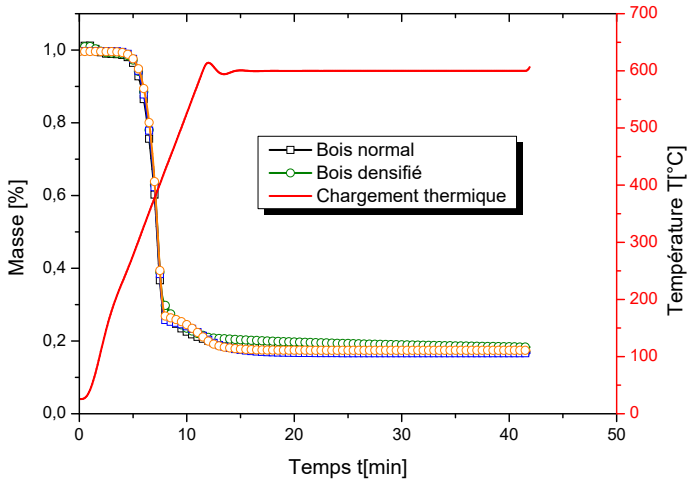
Les figures 2.38 montrent l'évolution de la vitesse de la perte masse (DTG) en fonction



(a). Vitesse de chauffe 30°C/min



(b). Vitesse de chauffe 40°C/min



(c). Vitesse de chauffe 50°C/min

FIGURE 2.36 – Chargements thermiques à différentes vitesses de chauffe.

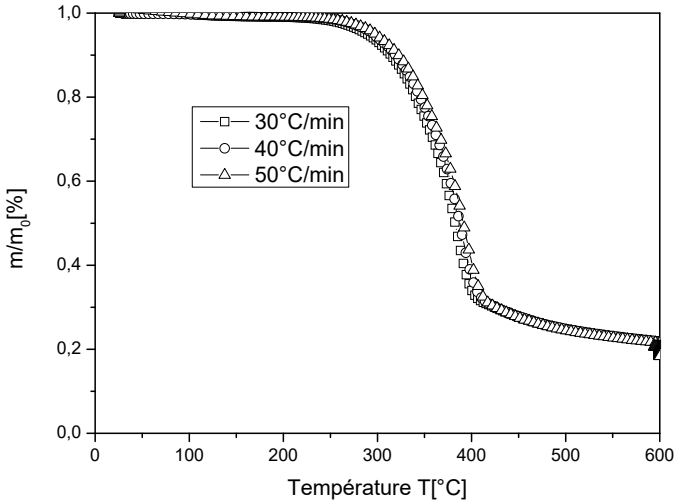


FIGURE 2.37 – Effets de la vitesse de chauffe sur la perte de masse.

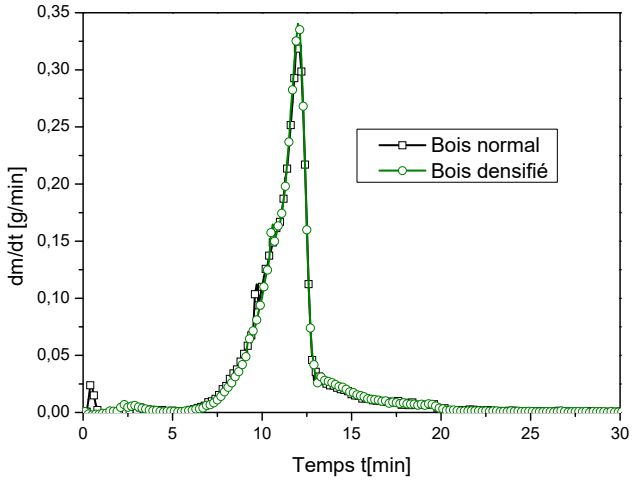
du temps à différentes vitesses de chauffage sous atmosphère inerte. A partir des courbes DTG, on peut noter :

- La hauteur du pic des courbes DTG augmente avec l'augmentation de la vitesse de chauffe (figure 2.39)
- La dégradation thermique s'amorce à une température d'environ 260°C.
- Le pic maximum des courbes DTG est obtenu à T=400°C (figure 2.39). Au-delà de cette limite, la valeur de celui-ci chute brutalement et elle s'annule à 600°C.

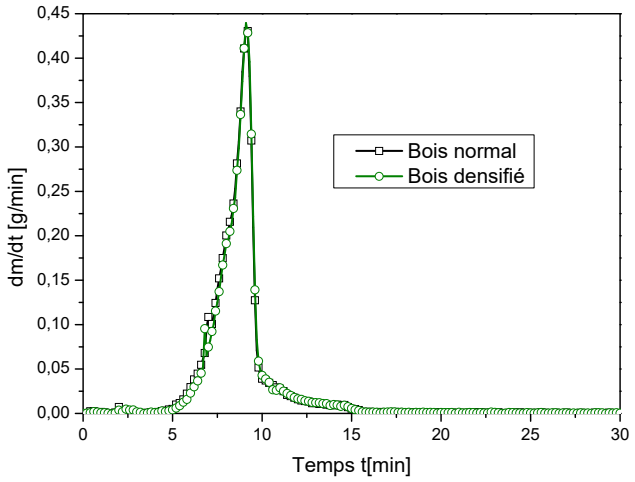
La figure 2.39 montre l'effet de la vitesse de chauffe sur la vitesse de la perte de masse pendant la dégradation thermique d'un bois densifié. Plus la valeur de la vitesse de chauffe est importante plus le pic des courbes DTG est important.

L'analyse thermogravimétrique montre que les résultats obtenus pour les particules en bois densifié et normal sont pratiquement les mêmes. Cela est dû au fait que les tests de l'ATG sont effectués sur de petites particules où l'effet de conduction est négligeable. Ainsi, seule la cinétique est prise en compte, ce qui donne des résultats identiques. La structure chimique du bois n'ayant pas été modifiée par la densification.

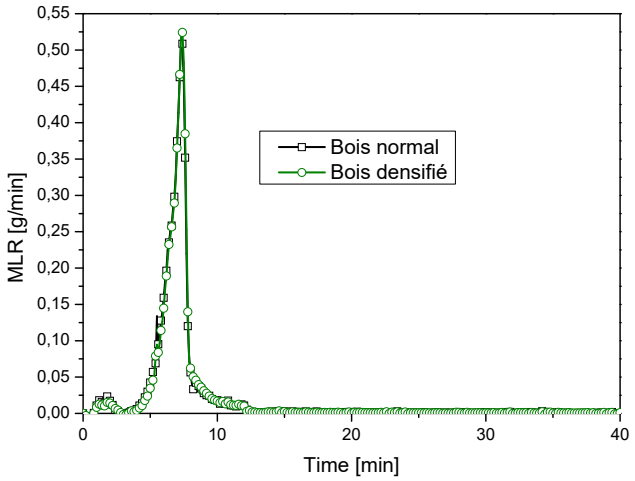
Les résultats de la dégradation thermique d'une particule en bois d'épicéa exposée à 800°C ne sont pas abordés dans cette étude car ils ne présentent pas de différences notables et significatives comparés à ceux présentés précédemment, réalisés sur une particule d'épicéa exposée à 600°C.



(a). Vitesse de chauffe 30°C/min



(b). Vitesse de chauffe 40°C/min



(c). Vitesse de chauffe 50°C/min

FIGURE 2.38 – Courbes DTG d'une particule en bois brulée jusqu'à 600°C.

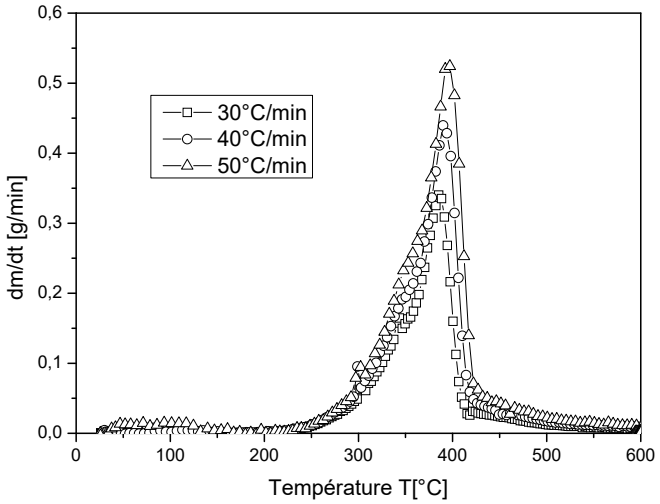


FIGURE 2.39 – Effets de la vitesse de chauffe sur la vitesse de la perte de masse.

2.4.3 Procédure d'identification de la cinétique

Dans cette section, le modèle cinétique de pyrolyse décrivant la dégradation thermique des particules en bois présenté par Grioui et al. (2006) [85] est adopté. Comme mentionné précédemment l'application du modèle de pyrolyse de Grioui et al. [85] (équation 2.12) nécessite d'identifier 10 paramètres (α_1, α_2, α_3, γ_2, γ_3, β, k_1, k_2, k_3 et k_4) à partir des mesures expérimentales.

A partir des courbes TG et DTG, données sur les figures 2.36 et 2.38, il n'est pas facile d'estimer les 10 paramètres de modèle sans effectuer une analyse séquentielle [85]. La procédure d'identification des constantes du modèle, adoptée dans cette étude, s'effectue selon les étapes suivantes :

1. Fractions massiques : α_1, α_2 et α_3
   La figure2.39 montre clairement que le pic des courbes DTG enregistré par une vitesse de chauffe de 50°C/min est plus élevé que celui obtenu par les deux autres vitesses de chauffe (30 et 40°C/min). Cela indique que la fraction massique α_3 de A_3 est supérieure à (α_1+α_2) des pseudo-composants A_1 et A_2. Les paramètres utilisés dans la simulation sont :

$$\alpha_1 = 0.15\,;\ \alpha_2 = 0.21\,;\ \alpha_3 = 0.64\ avec:\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1. \tag{2.17}$$

2. Paramètres : γ_2, γ_3 et β

Ces paramètres sont estimés par les expressions suivantes :

$$\gamma_2 = 0.502 \quad si \quad T \geq 250°C \tag{2.18}$$

$$\gamma_3 = 3.8 \times 10^{-3}T - 1.58 \tag{2.19}$$

$$\beta = 2.78 \times 10^{-3}T + 1.93 \tag{2.20}$$

3. Paramètres des réactions : k_1, k_2, k_3 et k_4
   La loi d'*Arrhenius* du premier ordre est utilisée pour déterminer les paramètres cinétiques des 4 réactions chimiques. Les paramètres k_1, k_2, k_3 et k_4 dépendent de la température (équation 2.13) ainsi leurs quantités sont extrapolées à partir de la comparaison des valeurs calculées par le modèle à celles mesurées par l'ATG (figure 2.40).

2.4.4 Analyse cinétique et validation du modèle de pyrolyse

La première étape du processus de modélisation consiste simplement à examiner graphiquement les données et à essayer de reconnaître les tendances. Dans cette étude, nous nous limiterons à la méthode la plus standard d'ajustement de courbes et d'estimation des paramètres : la méthode des moindres carrés. L'idée d'utiliser cette technique est d'additionner ces distances verticales et de minimiser l'erreur totale. En pratique, nous ajustons les erreurs pour les garder positives et pour éviter d'éventuelles difficultés de différenciation (dues aux valeurs absolues), qui seront nécessaires pour la minimisation.

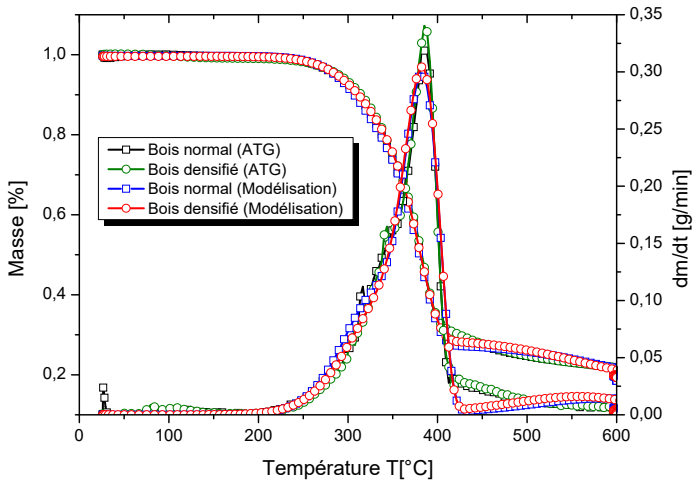
Pour minimiser les erreurs entre les données mesurées par l'ATG et les valeurs prédites par le modèle, la méthode consiste à calculer la fonction d'erreur totale des moindres carrés E_{MC} :

$$E_{MC} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\left[\Delta y_{num} - \Delta y_{\exp}\right]^2 \tag{2.21}$$

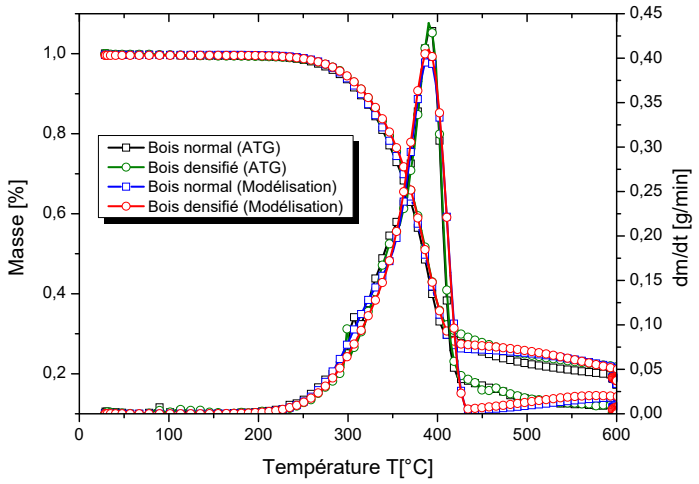
n étant le nombre de mesures effectué ; y_{num} désignent les valeurs prédites par le modèle et $y_{\exp}$ représentent les valeurs mesurées expérimentalement.

Les résultats des simulations obtenus par les paramètres cinétiques (α_1, α_2, α_3, γ_2, γ_3 et β) calculés par les équations 2.17 à 2.20 et les paramètres optimisés (k_1, k_2, k_3 et k_4) par la méthode des moindres carrés (équation 2.21) sont comparés à l'expérience (figures 2.40).

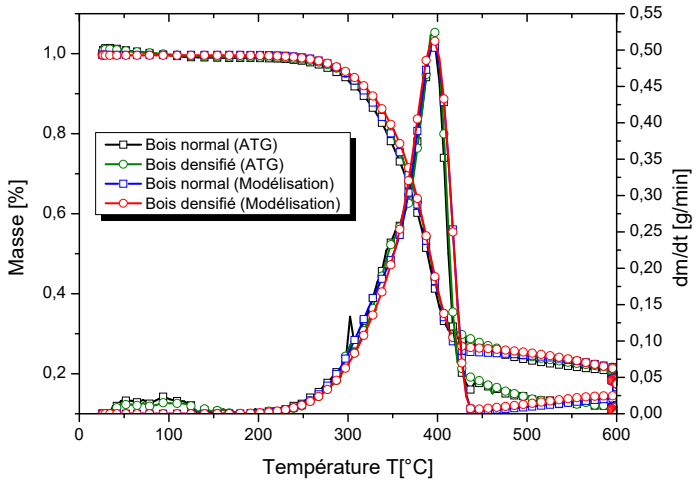
Les figures 2.40 montrent que le schéma cinétique de Grioui et al. [85] décrit d'une manière satisfaisante la perte et la vitesse de masse des deux bois d'épicéa (normal et densifié) en fonction du temps de séjour. Le modèle cinétique est capable d'afficher cor-



(a). Vitesse de chauffe 30°C/min



(b). Vitesse de chauffe 40°C/min



(c). Vitesse de chauffe 50°C/min

FIGURE 2.40 – Comparaison des tests ATG avec le modèle cinétique.

	$E_{0i}[kJ.mol^{-1}]$		$k_{0i}[s^{-1}]$	
Réactions	Bois normal	Bois densifié	Bois normal	Bois densifié
k_1	98.24	89.43	1.07×10^7	1.44×10^6
k_2	73.47	72.61	1.88×10^2	2.44×10^2
k_3	149.32	152.31	2.03×10^{10}	3.56×10^{10}
k_4	82.06	108.	1.9×10^3	1.87×10^3

TABLE 2.14 – Paramètres cinétiques des réactions de pyrolyse.

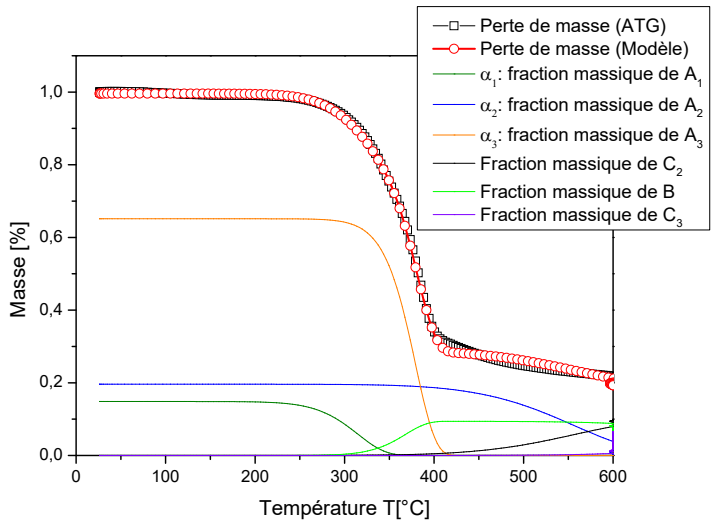
		$E_{0i}[kJ.mol^{-1}]$	
Réaction (i)	Références	Bois normal	Bois dendifié
(1)	$84 < E_{0i} \leq 140$: [34, 35, 38, 87, 88]	98.24	89.43
(2)	$73 < E_{0i} \leq 121$: [34, 35, 38, 87, 88]	73.47	72.61
(3)	$112 < E_{0i} \leq 133$: [34, 87, 88]	149.32	152.31
(4)	$80 < E_{0i} \leq 108$: [88, 89]	82.06	108.

TABLE 2.15 – Energies d'activation des réactions de pyrolyse.

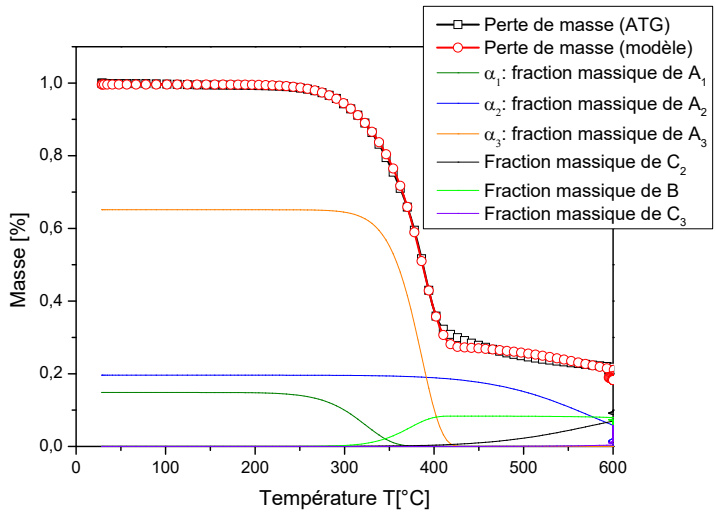
rectement le pic, le début et la fin des courbes DTG. On peut alors conclure que les paramètres cinétiques du modèle de pyrolyse sont correctement identifiés. Les valeurs optimales identifiées des réactions de pyrolyse (k_1, k_2, k_3 et k_4) utilisées dans les simulations sont récapitulées dans le tableau 2.14.

Les figures 2.41 représentent les comparaisons entre les évolutions de la masse totale expérimentale et de la masse totale calculée par le modèle, respectivement pour les vitesses de chauffe 30°C/min, 40°C/min et 50°C/min. Sont aussi représentées, les masses calculées par le modèle pour chaque constituant. Les figures 2.41 montrent que les fractions massiques initiales (α_1, α_2 et α_3) des trois pseudo-composants (A_1, A_2 et A_3) se décomposent séparément à différentes températures. La perte de masse du pseudo-composant A_1 (fraction massique α_1) s'effectue en premier lieu à 260°C, celle du pseudo-composant A_3 (fraction massique α_3) à 340°C et en dernier lieu celle du pseudo-composant A_2 (fraction massique α_2) s'effectue à une température d'environ 400°C. La fraction massique du solide intermédiaire B s'amorce à partir de 300°C. Les évolutions des fractions de l'ensemble des constituants sont conformes à celles indiquées dans la littérature.

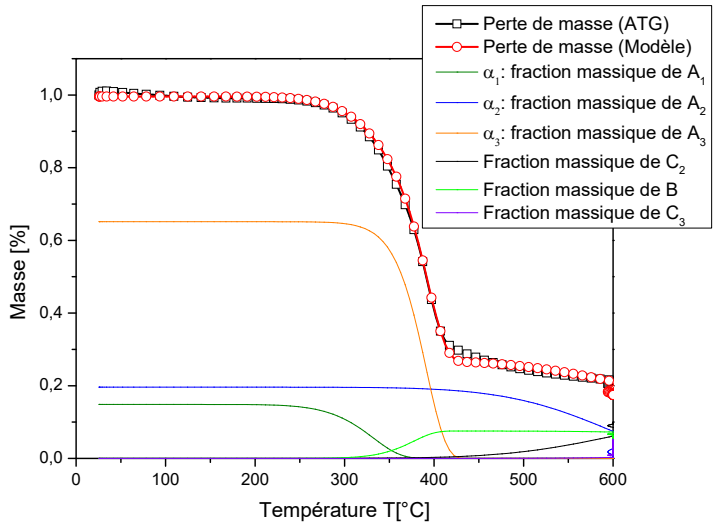
Le tableau 2.15 compare les valeurs estimées des énergies d'activation des réactions de pyrolyse avec celles publiées dans la littérature. Toutes les valeurs estimées de E_{0i} sont situées dans les gammes des valeurs disponibles dans la littérature, ce qui permet de dire que les paramètres cinétiques sont correctement identifiés dans ce travail. Les différences observées peuvent être attribuées aux conditions expérimentales, aux caractéristiques des échantillons ou au traitement des données.



(a). Vitesse de chauffe 30°C/min



(b). Vitesse de chauffe 40°C/min



(c). Vitesse de chauffe 50°C/min

FIGURE 2.41 – Evolution de la perte de masse d'un bois densifié par le modèle cinétique.

2.4.5 Conclusion

Dans cette étude, un modèle de pyrolyse d'une particule en bois (normal et densifié) a été présenté et appliqué à l'analyse de l'évolution de la perte de masse et sa vitesse sous trois différentes vitesses de chauffe (30, 40 et 50°C/min). Les valeurs mesurées sont obtenues à partir d'expériences thermogravimétriques isothermes.

Les paramètres cinétiques (énergies d'activation et facteurs pré-exponentiels) de toutes les réactions chimiques sont décrits par la loi d'*Arrhenius* du premier ordre et ont été estimés en utilisant la méthode des moindres carrés. La comparaison des courbes TG et DTG prédites à celles mesurées par l'ATG montre un bon accord. De plus, les comparaisons des valeurs des énergies d'activation avec celles rapportées dans la littérature ont été bien approchées, ce qui valide le modèle de pyrolyse choisi.

Les cinétiques déterminées dans cette partie seront intégrées au modèle global éléments finis, et appliquées à la simulation des structures en bois à grande échelle dans des conditions d'un incendie réel.

2.5 Applications et validation des modèles cinétiques de la pyrolyse

2.5.1 Résistance au feu des panneaux de coffrage bois-ciment

Un frein au développement de l'utilisation des panneaux de coffrage bois-ciment dans la construction est lié principalement à la présence des fibres combustibles du bois [10, 11]. La figure 2.42 montre un panneau de façade de la tour Grenfell à Londres exposé à un véritable incendie le 14 juin 2017, qui a malheureusement fait plus de 80 morts. Ainsi, l'emploi de ces matériaux composites bois-ciment dans la construction restera marginal tant que le problème de sécurité incendie ne sera pas résolu. C'est dans cet objectif que se situe le travail de thèse de Melle Mengya LI [11]. Il s'agit de caractériser le comportement au feu des panneaux de coffrage bois-ciment à travers la combinaison de l'expérience et de la modélisation numérique.

Le test d'incendie est réalisé au Lermab sur des petites éprouvettes exposées à un panneau rayonnant de puissance d'environ $1.6kW$. Un modèle thermique formulé à partir du modèle thermique cinétique à une seule dimension (1D) développé initialement par Shen et al [46], en utilisant la méthode des différences finies, pour décrire la pyrolyse d'un bois humide a été modifié et améliorer dans ce travail pour être appliquer à la simulation des problèmes en (2D) et (3D) par la méthode des éléments finis. Pour calibrer les constantes

FIGURE 2.42 – Dégâts d'incendie de la tour Grenfell à Londres.

du modèle numérique, les résultats des simulations sont comparés à l'expérience et publiés dans [10].

1. **Tests de carbonisation**

   Les essais de carbonisation des échantillons en bois-ciment ont été réalisés sur des éprouvettes de dimensions $35\times200\times75mm$ (figure 2.43). L'éprouvette est exposée à un panneau rayonnant infra-rouge en céramique composé de 4 émetteurs plats de $12\times12cm$. La puissance totale du panneau est d'environ $1600W$ ($4\times400W$). L'éprouvette est placée verticalement à $5cm$ de distance de la plaque chauffante. Le flux maximum imposé est de $6kW/m^2$. Cinq thermocouples sont placés à différentes positions (5, 10, 15, 20 et $25mm$) de la surface exposée. Un contour en panneau de particules est rajouté au dispositif expérimental pour éviter les courants d'air qui pourraient perturber le flux rayonnant par un autre flux supplémentaire de type convectif.

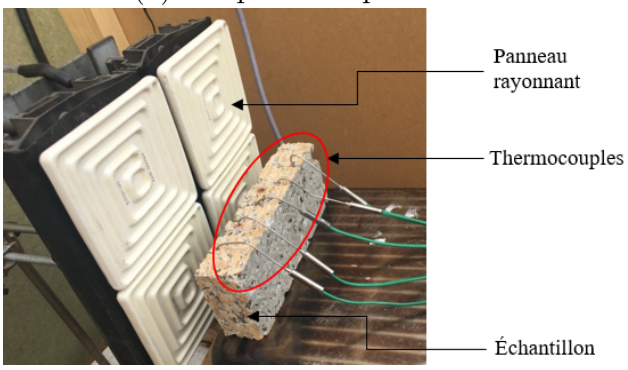
   Les valeurs mesurées de la masse et de la température au cours de l'exposition au flux de chaleur constant uniforme de $6kW/m^2$ ont été enregistrées toutes les $30s$, respectivement, par une balance placée sous l'échantillon (figure 2.43a) et par un module d'acquisition de données portatif lié à des thermocouples (figure 2.43b).

   Selon les auteurs Ghazi et al [93], le ciment commence à se décomposer à des températures supérieures à $600°C$. Les températures des tests de carbonisation réalisés dans cette étude ne dépassent pas $550°C$. Plus d'informations sur les mesures expérimentales et les conditions opératoires sont données en détail dans [10, 11].

2. **Modélisation des tests de carbonisation**

   Le modèle numérique du test de carbonisation et les conditions aux limites sont illustrés sur la figure 2.44. Une éprouvette en bois-ciment de forme rectangulaire $35\times200\times75mm$ a été exposée à un flux de chaleur de $6kW/m^2$ durant $40min$. Les positions des cinq thermocouples par rapport à la surface exposée au flux sont

(a). Dispositif expérimental



(b). Positions des thermocouples

FIGURE 2.43 – Tests de carbonisation.

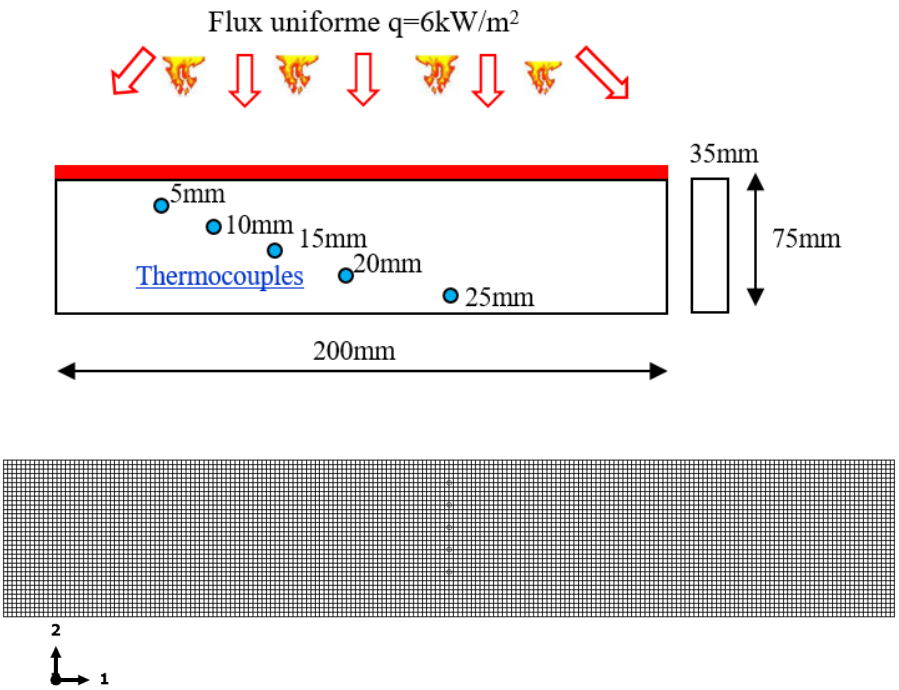


FIGURE 2.44 – Modèle élément fini du test de carbonisation.

indiquées sur la figure 2.43b. Le maillage est constitué de 7000 éléments DC2D4 (élément quadrilatéral à 4 nœuds, appliqué à l'analyse des transferts thermiques des problèmes en 2D). Les paramètres du modèle cinétique utilisés dans les simulations sont donnés en détail dans [10, 11].

3. **Confrontation des résultats de la simulation à l'expérience**

   Les courbes représentées sur la figure 2.45 montrent l'évolution de la densité relative de chaque composant après les réactions chimiques dues aux mécanismes de séchage et de la pyrolyse. La densité relative du liquide s'annule à des températures T=160°C qui correspond au séchage du bois. A des températures T $>$ 300°C, la densité relative du bois commence à baisser progressivement et elle s'annule à des températures proches de 420°C où le bois est totalement carbonisé. En revanche, les quantités du charbon et de gaz se forment à des températures d'environ T=300°C, elles augmentent séparément et progressivement, et elles se stabilisent à T=420°C. La densité relative du ciment reste quasiment constante au cours de l'exposition au flux de chaleur.

   Les profils de températures obtenus par la simulation à différents temps d'exposition au flux (5, 20 et 40min) sont donnés sur les figures 2.46. La couche du charbon se forme au-delà de T=300°C et elle est représentée en gris. La zone du composite sain est présentée en bleu. Entre le charbon et le composite bois-ciment sain, on distingue les zones de pyrolyse (rouge, jaune et vert) et de séchage (turquoise).

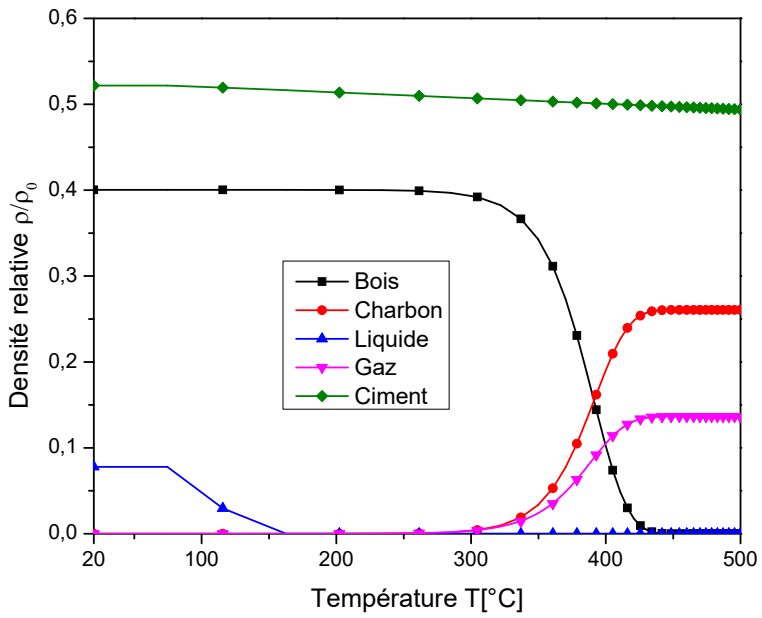


FIGURE 2.45 – Évolution de la densité de chaque composant.

L'épaisseur du charbon s'accroit avec le temps d'exposition. La couche du charbon n'est pas rectangulaire. Des arrondis se forment aux angles du spécimen au cours de l'exposition au flux. Ceci peut être dû à l'effet d'un flux convectif correspondant à l'échange et au déplacement de l'air entre les surfaces de l'échantillon avec le milieu environnant pendant le déroulement de l'essai.

La figure 2.47 montre l'évolution de la température en fonction du temps à différentes positions des thermocouples (5, 10, 15, 20 et 25 mm) de la surface exposée au flux. Les courbes des simulations se composent souvent d'un petit plateau de séchage suivi d'une évolution progressive de la température. Certains paramètres du modèle thermique sont choisis dans des plages de températures très variantes ; ce qui explique l'écart entre les valeurs calculées et mesurées à différentes positions des thermocouples. Qualitativement, les résultats des simulations sont en adéquation avec ceux des tests.

La figure 2.48 compare l'épaisseur de la couche du charbon prédite à celle de l'expérience. Les résultats montrent que l'évolution de la carbonisation est non-linéaire au cours de l'exposition à un flux de chaleur constant. L'erreur entre les valeurs mesurées et calculées à un temps d'exposition t=40min est d'environ 4.3%.

L'application du modèle de pyrolyse de Shen [46] à la simulation du test de carbonisation montre que le modèle éléments finis est capable de prédire l'évolution des profils de températures et l'épaisseur de la couche du charbon d'un panneau de

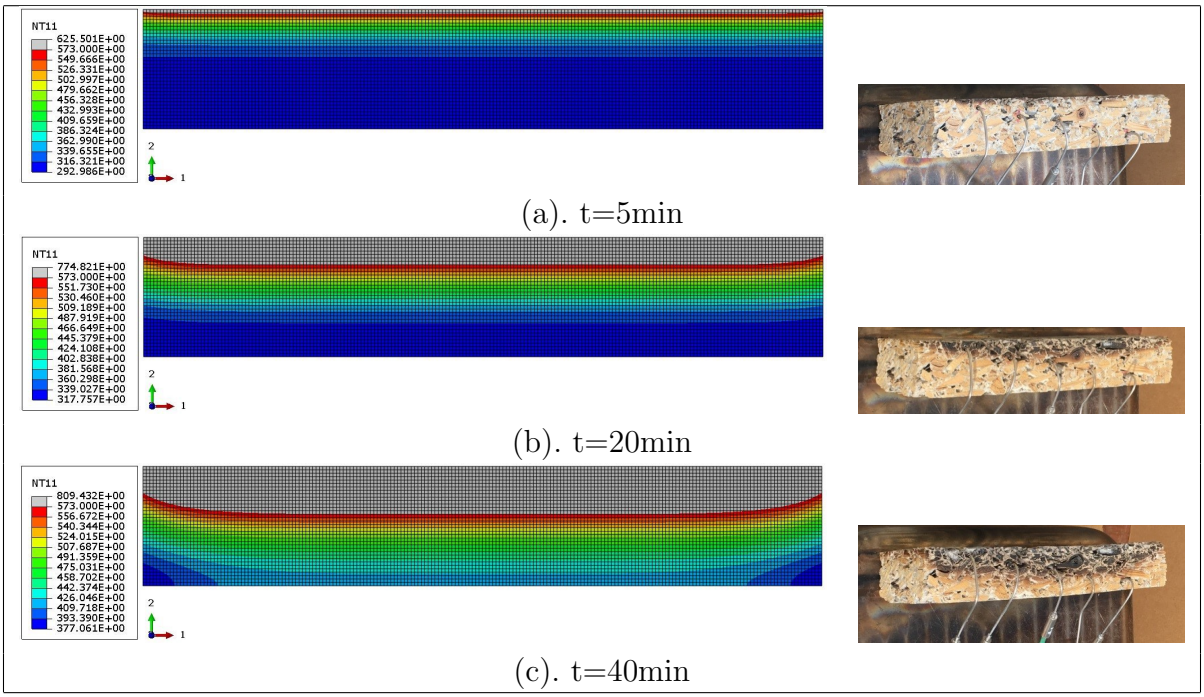


FIGURE 2.46 – Formation de la couche du charbon à différents temps (T[K]).

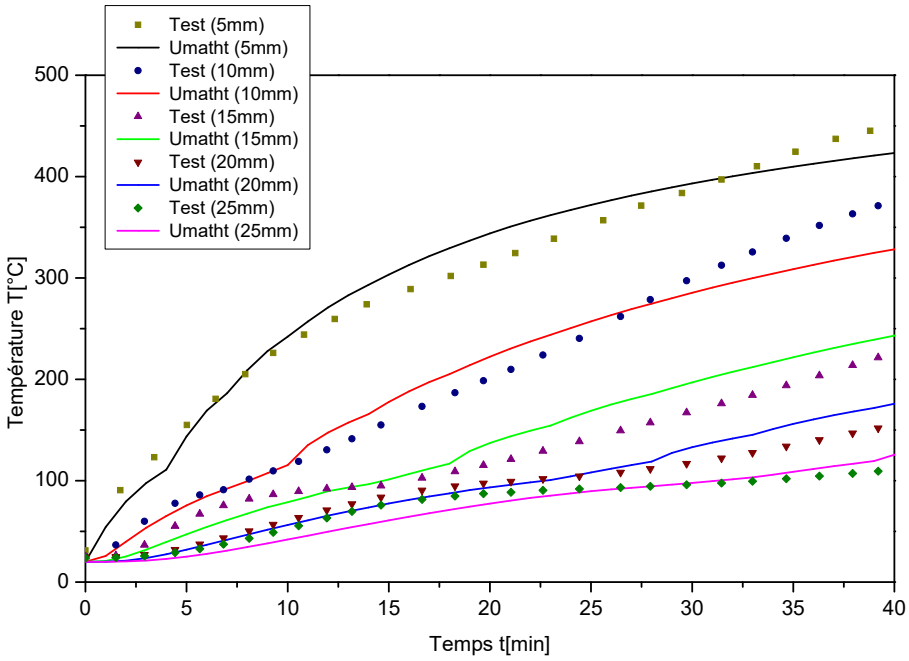


FIGURE 2.47 – Évolution de la température à différentes positions des thermocouples.

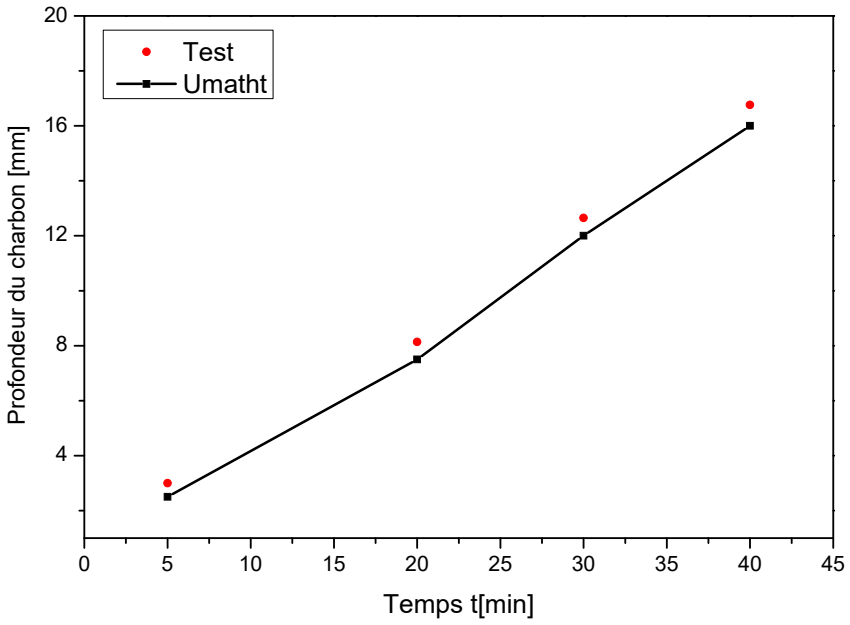


FIGURE 2.48 – Évolution de de l'épaisseur de la couche de charbon.

coffrage bois-ciment exposé à un flux de chaleur constant.

4. **Conclusion partielle**

   Dans cette étude, une analyse thermique des panneaux de coffrage bois-ciment à hautes températures a été réalisée en appliquant le modèle cinétique de Shen et al. [46]. La loi thermique est intégrée dans le logiciel Abaqus/standard [4] via la routine Umatht.

   L'identification des paramètres du modèle de pyrolyse est réalisée sur des données expérimentales obtenues sur des tests de carbonisation réalisés en interne sur des éprouvettes bois-ciment exposées à un flux de chaleur uniforme q=$6kW/m^2$, produit par un panneau rayonnant. Qualitativement, les résultats des simulations sont en bon accord avec ceux des tests. Le modèle numérique est capable de reproduire avec précision la distribution des profils de températures et la formation du charbon dans l'épaisseur des panneaux composites au cours de l'exposition à un flux de chaleur uniforme.

2.5.2 Résistance au feu des panneaux en aggloméré de lin

Dans cette partie, la procédure d'identification présentée précédemment et les routines de calcul (Umat et Umatht) implémentées dans le code Abaqus [4] sont appliquées à l'analyse du comportement au feu de plusieurs exemples.

La méthodologie numérique développée s'appuie sur les tests disponibles dans la littérature. Les résultats des tests réalisés sur un aggloméré de lin sont tirés des travaux publiés dans [95, 96]. Les tests de l'ATG servent pour l'identification des paramètres cinétiques des modèles de pyrolyse retenus dans cette étude. Une fois que ces paramètres sont identifiés sur des particules en bois, ils seront ensuite intégrés dans un modèle numérique complet pour simuler un test d'incendie d'un échantillon à petite échelle réalisé dans un four. Enfin un autre test réalisé sur un panneau en aggloméré de lin à grande échelle dans des conditions d'un incendie naturel sera simulé pour appréhender les aptitudes des procédures numériques présentées dans ce mémoire.

1. **Analyse cinétique des tests de la thermogravimétrie**

   Les tests analysés ici sont issus des travaux de thèse de Cueff G. [95] effectués au laboratoire de l'université de Bordeaux. Les essais de l'ATG sont réalisés sur des particules en aggloméré de lin. Deux teneurs en eau (6% et 10%) ont été testées. Un chargement thermique de 300°C avec une vitesse de montée en température de 100°C/min était appliqué sur la face exposée de l'échantillon. La combustion des gaz de pyrolyse n'est pas observée lors des tests.

   Les figures 2.49 et 2.50 comparent les résultats des simulations à ceux de l'ATG. Les valeurs des courbes des simulations sont estimées séparément par le modèle de Grioui et al. [85] et de Broström et al. [97]. Notons que dans cette étude les tests de l'ATG sont légèrement ajustés pour identifier facilement les paramètres cinétiques des modèles de pyrolyse choisis (Grioui et al. [85] et Broström et al. [97]). Les courbes représentant l'évolution de la perte de masse évoluent selon les étapes suivantes :

   – De la température ambiante de 20°C jusqu'à 100°C, environ 20% de la masse initiale est perdue. Cette perte correspond à la phase de séchage des particules de l'aggloméré de lin ;
   – Entre 100 et 190°C, la masse reste constante. Au-delà de cette limite, il y a perte de masse ;
   – Entre 190 et 300°C, une perte de masse d'environ 40% est observée ;
   – Une perte de masse assez lente est observée au-delà de 400°C. A T=485°C, l'échantillon a perdu environ 81% de sa masse initiale, et la quantité finale de résidu est d'environ 19% de la masse initiale de l'échantillon.

   Les figures 2.49 et 2.50 affichent les fractions massiques de l'ensemble des pseudo-composants proposés par Grioui et al. [85]. Pour une teneur en eau de 6%, les courbes illustrant l'évolution des fractions massiques initiales (α_1, α_2 et α_3) des trois pseudo-composants (A_1, A_2 et A_3) montrent que la dégradation thermique de chaque constituant s'amorce séparément à différents niveaux de température. La

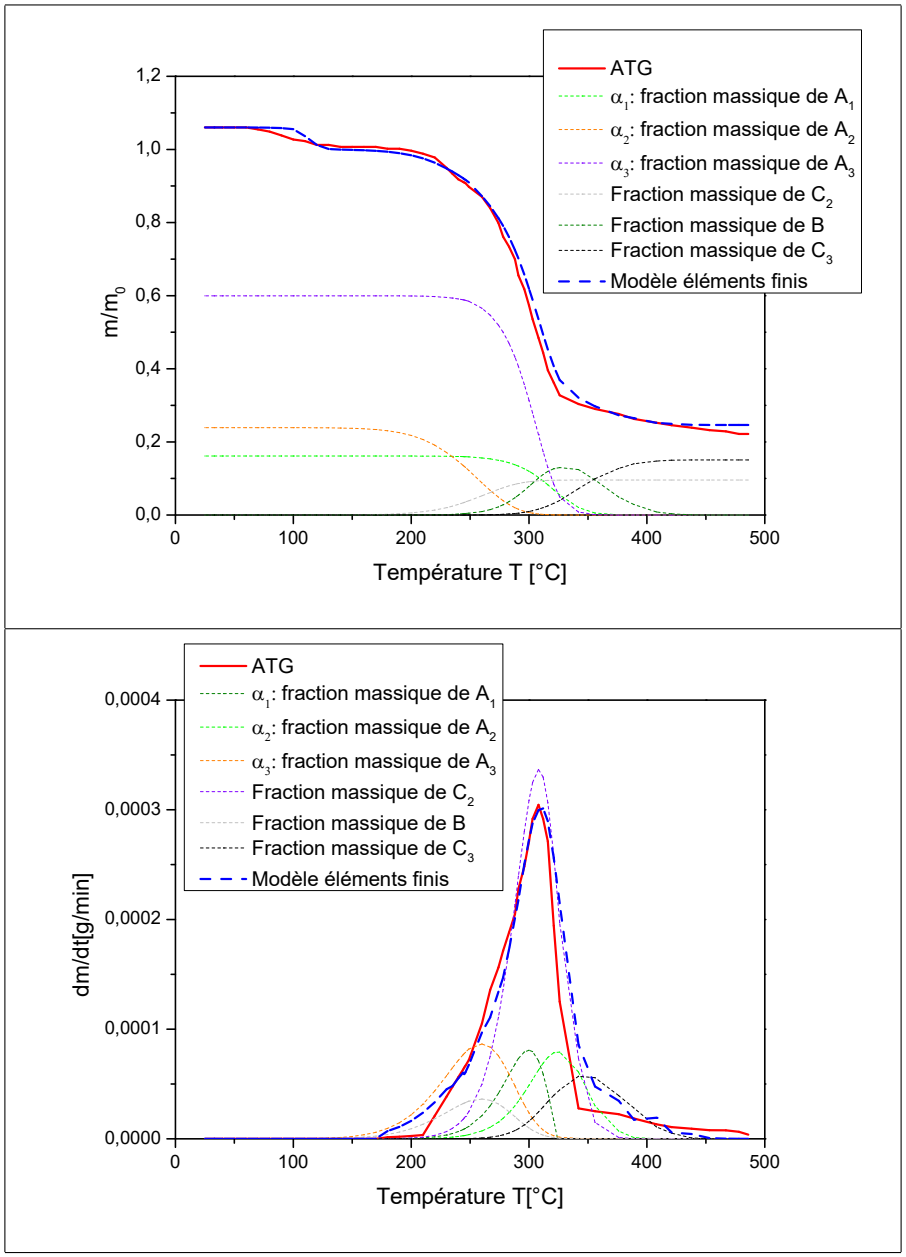


FIGURE 2.49 – Analyse cinétique des courbes de l'ATG (teneur en eau de 6%) par le modèle de Grioui et al. [85].

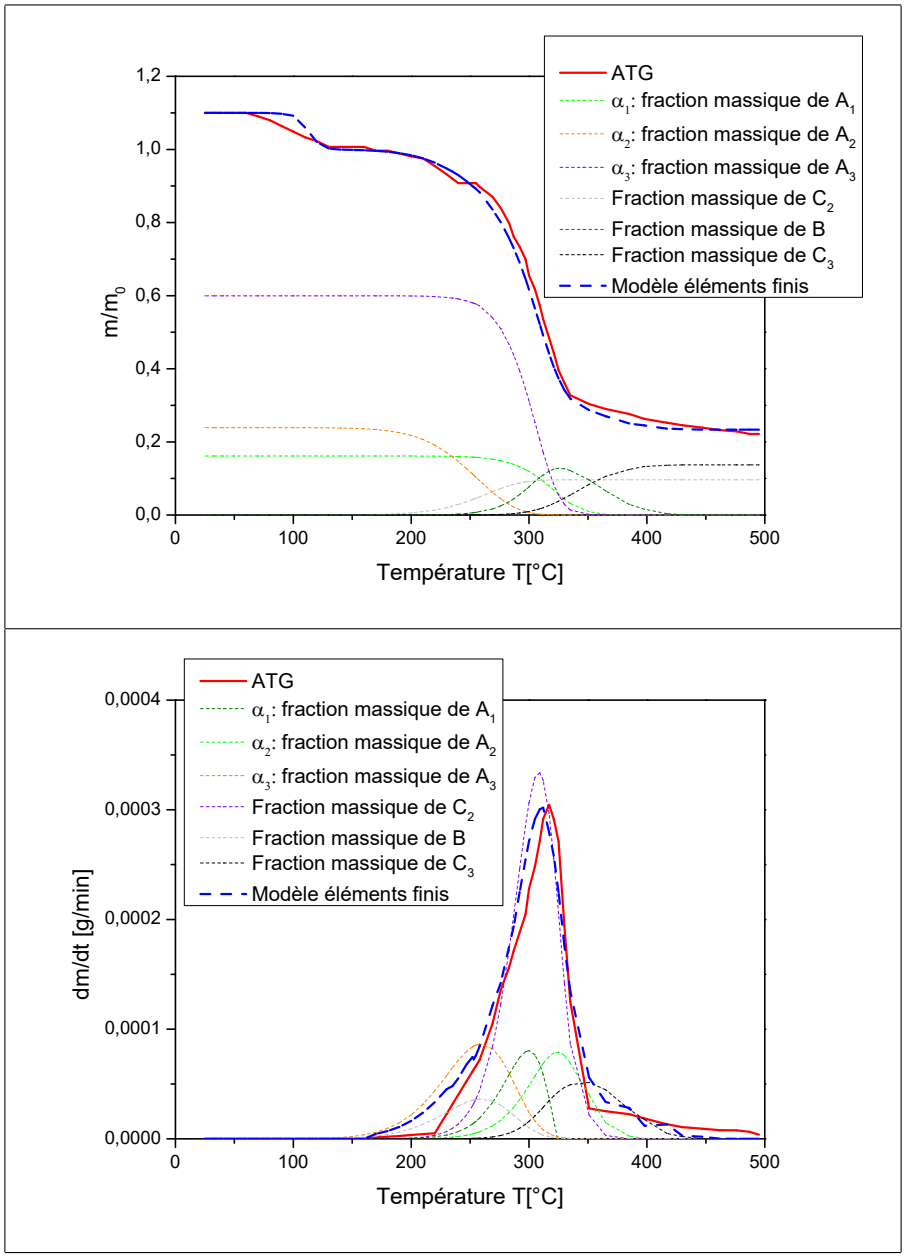


FIGURE 2.50 – Analyse cinétique des courbes de l'ATG (teneur en eau de 10%) par le modèle de Grioui et al. [85].

Réaction (i)	k_1	k_2	k_3	k_4
$k_{0i}[s^{-1}]$	1.76×10^9	6.2×10^4	9.24×10^{10}	1.33
$E_{0i}[kJ/mol]$	138.1	79.59	153.28	39.35
Paramètres	$\alpha_1 = 0.161$	$\alpha_2 = 0.239$	$\alpha_3 = 0.6$	
	$\gamma_2 = 0.42$	$\beta = -0.0027T + 1.925$	$\gamma_3 = 0.0038T - 1.581$	

TABLE 2.16 – Paramètres cinétiques de Grioui et al. [85].

Réaction (i)	k_1	k_2	k_3
$A_i[s^{-1}]$	1.29×10^3	8.27×10^{14}	0.407
$E_i[kJ/mol]$	68.35	197.34	40.12
Fractions massiques	$\upsilon_1 = 0.403$	$\upsilon_2 = 0.264$	$\upsilon_3 = 0.122$

TABLE 2.17 – Paramètres cinétiques de Broström et al. [97].

perte de masse du pseudo-composant A_2 (fraction massique α_2) s'effectue en premier lieu à 170°C, celle du pseudo-composant A_3 (fraction massique α_3) à 240°C et en dernier lieu celle du pseudo-composant A_2 (fraction massique α_2) s'effectue à une température de 170°C. La fraction massique du solide intermédiaire B s'amorce à partir de 300°C.

Les paramètres cinétiques optimisés utilisés dans les simulations sont récapitulés dans le tableau 2.16. La valeur de $E_{03} = 153,28kJ/mol$ plus élevée estimée ici peut être due à la difficulté dans le cas des conditions isothermes de séparer la décomposition du pseudo composant A_3 de celle des autres composants (notamment de celle de A_2) selon les auteurs [85, 91]. Selon Grioui et al. [85], la valeur de $E_{04} = 39,35kJ/mol$ estimée inférieure à celles de la littérature $(80 - 108kJ/mol)$ [88, 89] peut être dû à la vitesse lente de la transformation relative dans la plage de température étudiée ou un réarrangement interne de la structure chimique riche en carbone.

Les résultats des simulations obtenus par le modèle de pyrolyse présenté par Broström et al. (2012) dans [97] sont illustrés sur les figures 2.51 et 2.52. Les mêmes remarques faites sur les figures 2.49 et 2.50 peuvent être formuler en appliquant ce modèle. Les paramètres cinétiques optimisés et utilisés dans les simulations sont récapitulés dans le tableau 2.17. Qualitativement, les valeurs calculées par les deux modèles de pyrolyse (Grioui et al. [85] et de Broström et al. [97]) retenus dans cette étude sont très proches des valeurs mesurées. Pour le cas de l'aggloméré de lin, la différence entre les valeurs calculées et mesurées peut être due au fait que le modèle ne tient pas compte des constantes physiques de la colle qui peut se décomposer à d'autres niveaux de température que la biomasse (le lin).

2. **Test au feu d'un échantillon à petite échelle réalisé dans un four**

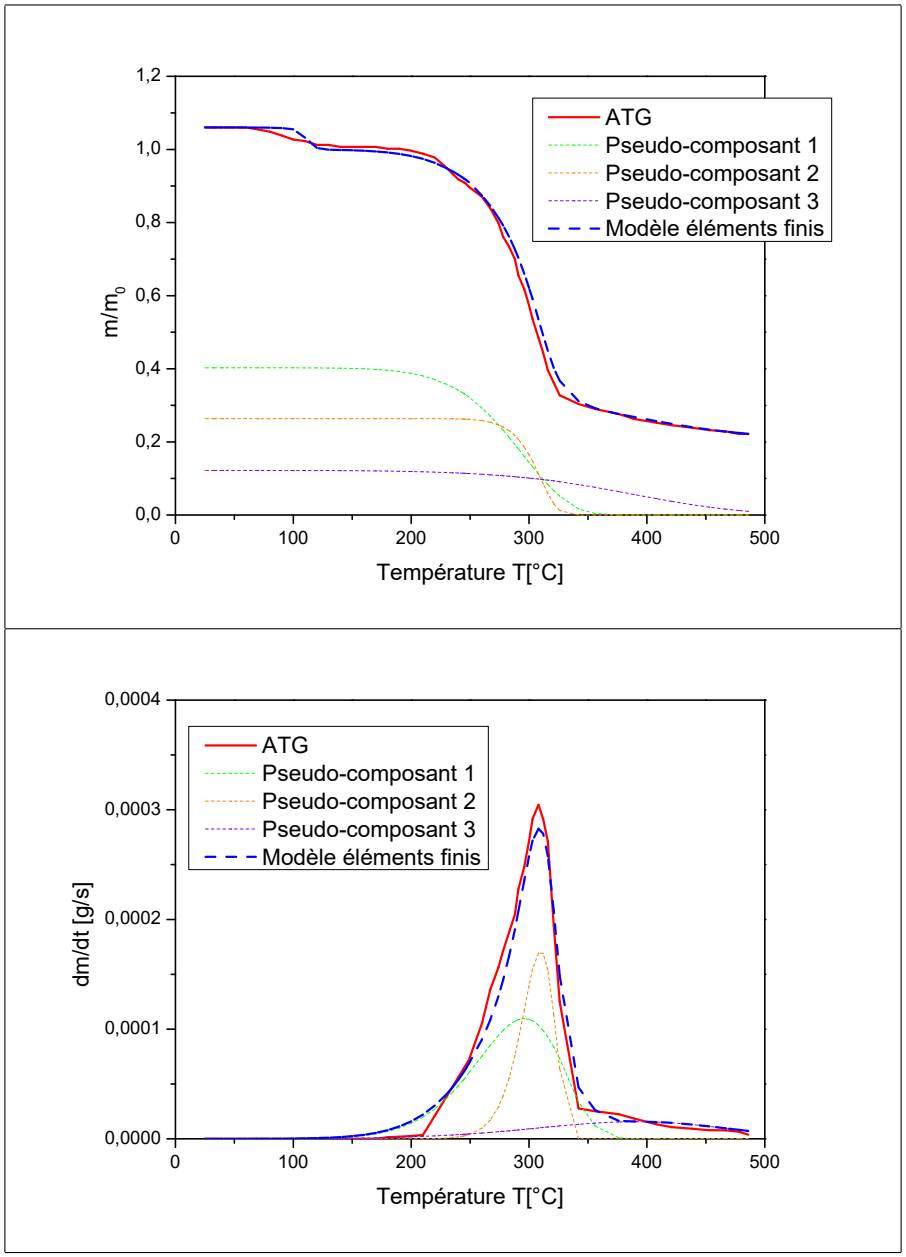


FIGURE 2.51 – Analyse cinétique des courbes de l'ATG (teneur en eau de 6%) par le modèle de Broström et al. [97].

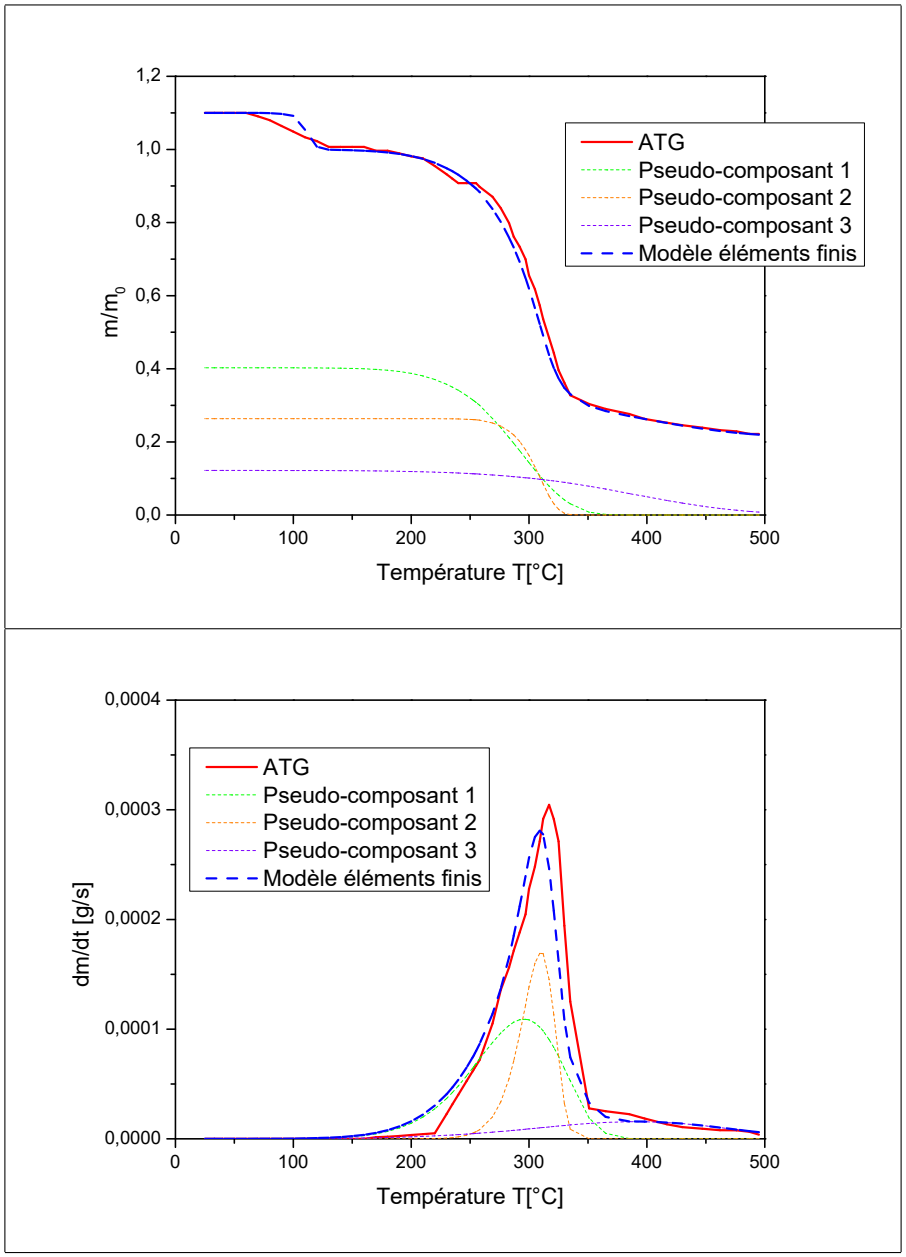
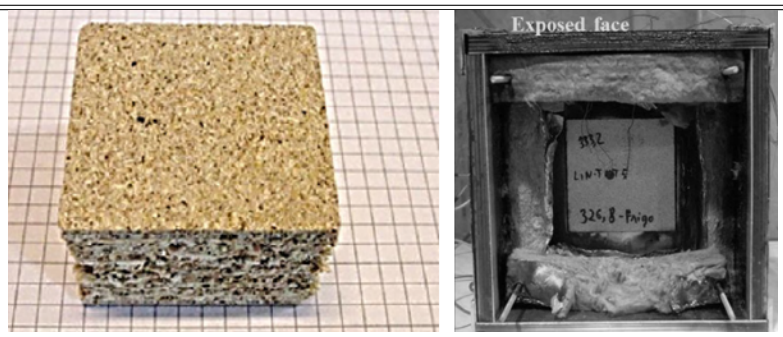
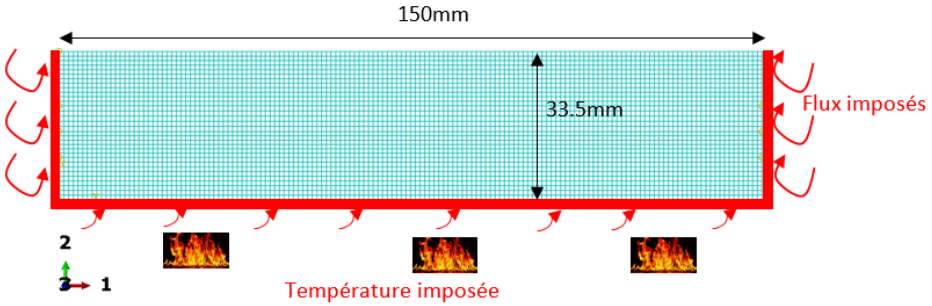


FIGURE 2.52 – Analyse cinétique des courbes de l'ATG (teneur en eau de 10%) par le modèle de Broström et al. [97].



(a). Echantillon et dispositif expérimental [95, 96]



(b). Maillage et conditions aux limites

FIGURE 2.53 – Modèle numérique d'un échantillon à petite échelle.

Les tests réalisés dans un four sont simulés en 2D représentant l'épaisseur du panneau d'aggloméré (figure 2.53a). Le modèle élément fini est réalisé sur des échantillons d'aggloméré de lin de dimensions $150 \times 150 \times 33.5mm^3$. Le maillage est composé de 4800 éléments de type DC2DA (élément linéaire quadrilatéral de transfert thermique à 4 nœuds).

La température mesurée à $2mm$ de la face exposée est utilisée comme condition aux limites de type Dirichlet (figure 2.53b). Cette même hypothèse est utilisée par les auteurs Cueff G. et al. (2018) dans [96]. Des flux de chaleurs de convection de rayonnement sont appliqués à toutes les faces de l'échantillon (condition aux limites de type Neumann). Les valeurs des coefficients de transfert convectif et de l'émissivité sont respectivement : $h_c = 7W/(m^2.K)$ et $\varepsilon = 0.9$. Les paramètres physiques utilisés dans les simulations sont : $\rho = 373.kg/m^3$; $c_p = 1636.J/(kg.K)$ et $\lambda = 0.123W/(m.K)$. Le chargement thermique appliqué à la surface exposée est représenté sur la figure 2.54.

Les figures 2.55 affichent la distribution des profils de température à différents instants. Les iso-valeurs des profils sont réparties uniformément dans l'épaisseur de l'échantillon. A une température T=290°C (figure 2.55a), aucune couche de charbon n'est observée. Une première couche se forme à une température d'environ T=320°C (figure 2.55b). L'épaisseur de la couche de charbon augmente avec le ni-

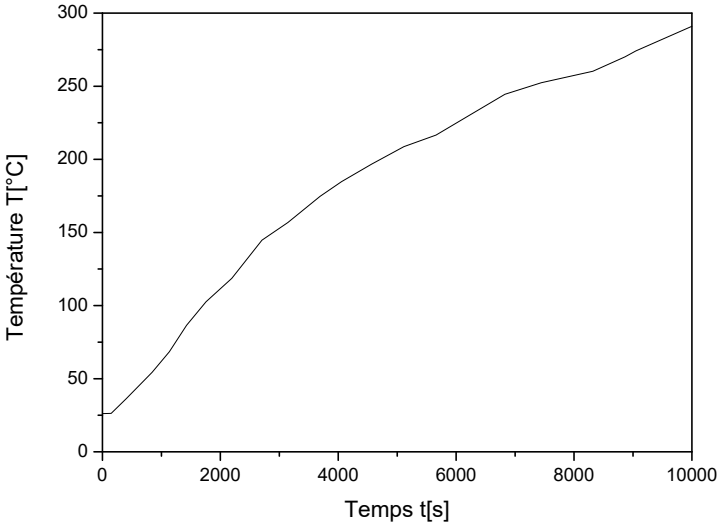


FIGURE 2.54 – Température imposée à la surface exposée.

veau de température.

Les températures calculées pour des teneurs en eau de 6% et 10% à deux différentes positions des thermocouples (11 et 16.5mm par rapport à la surface exposée) sont illustrées sur les figures 2.56 et 2.57 , et comparées aux valeurs mesurées. Pour un aggloméré de lin ayant une teneur en eau de 10%, le transfert thermique est relativement bien simulé (figure 2.56). Les tendances des courbes (allures, formes et pentes) sont correctement représentées. Les niveaux de températures enregistrés à des profondeurs plus éloignées de la surface exposée sont moins importants que ceux des thermocouples les plus proches de la surface exposée au feu. Les courbes des profils de températures évoluent en deux étapes : elles affichent en premier lieu un petit palier correspondant à la température ambiante du four. Après un laps de temps, les températures évoluent progressivement d'une façon non-linéaire. Les prédictions données par les modèles de pyrolyse de Grioui et al. [85] et de Broström et al. [97] sont les mêmes. L'écart entre les valeurs mesurées et celles prédites par les modèles de pyrolyse est dû en partie aux erreurs d'ajustement effectuées en amont sur les résultats de l'ATG. Pour l'ensemble des simulations, l'approche réglementaire EC 5 [1] sous-estime le niveau de température à cause de son aspect sécuritaire.

3. **Test au feu d'un panneau en aggloméré de lin à grande échelle**
   Dans cette section, une analyse thermomécanique du matériau constitué à partir d'un aggloméré de lin est réalisée. Le modèle ainsi développé permet de simuler en plus des profils de température les déplacements du panneau lors de l'exposition au

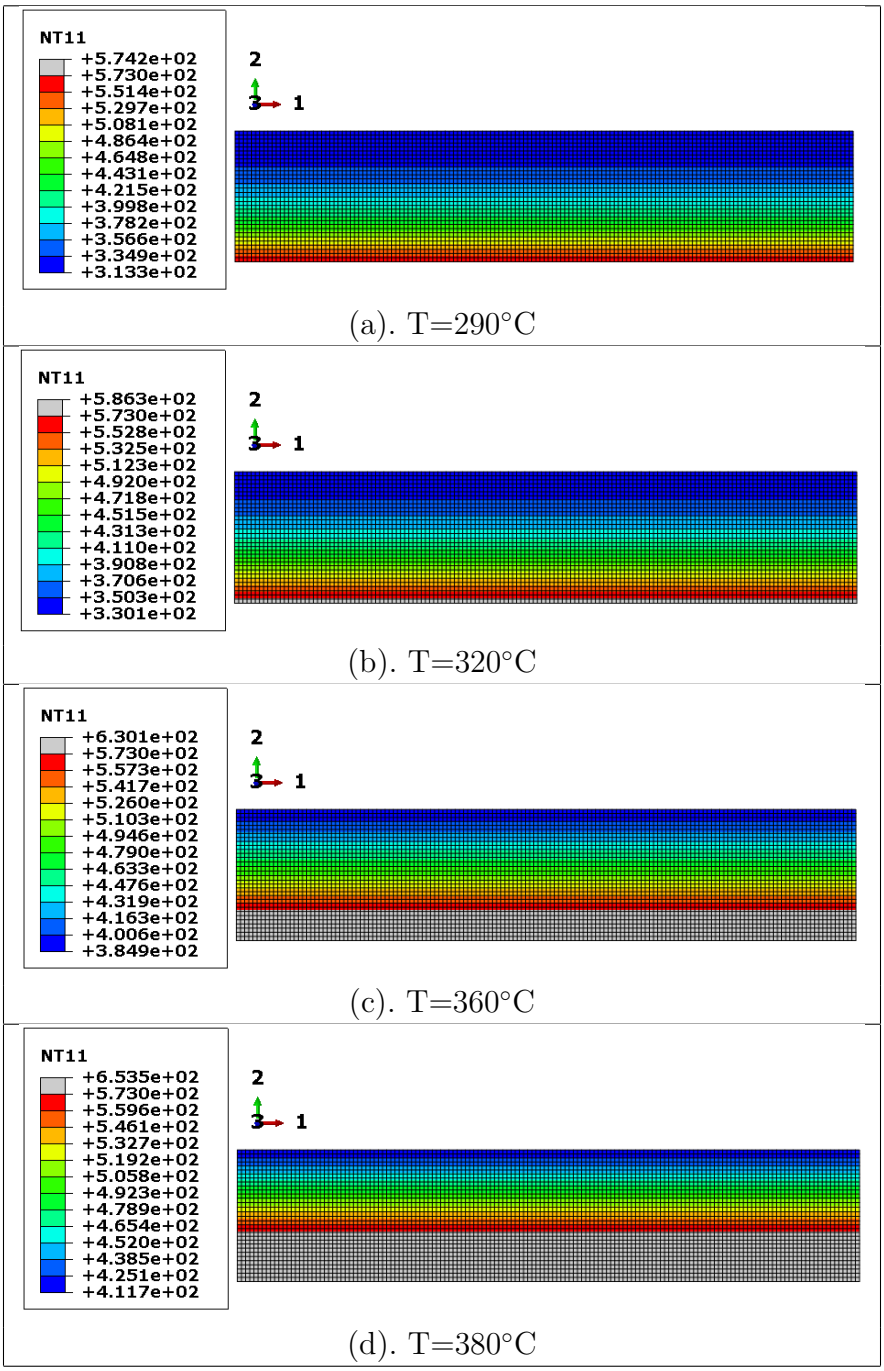


FIGURE 2.55 – Distribution des profils de température (T[K], teneur en eau de 6%).

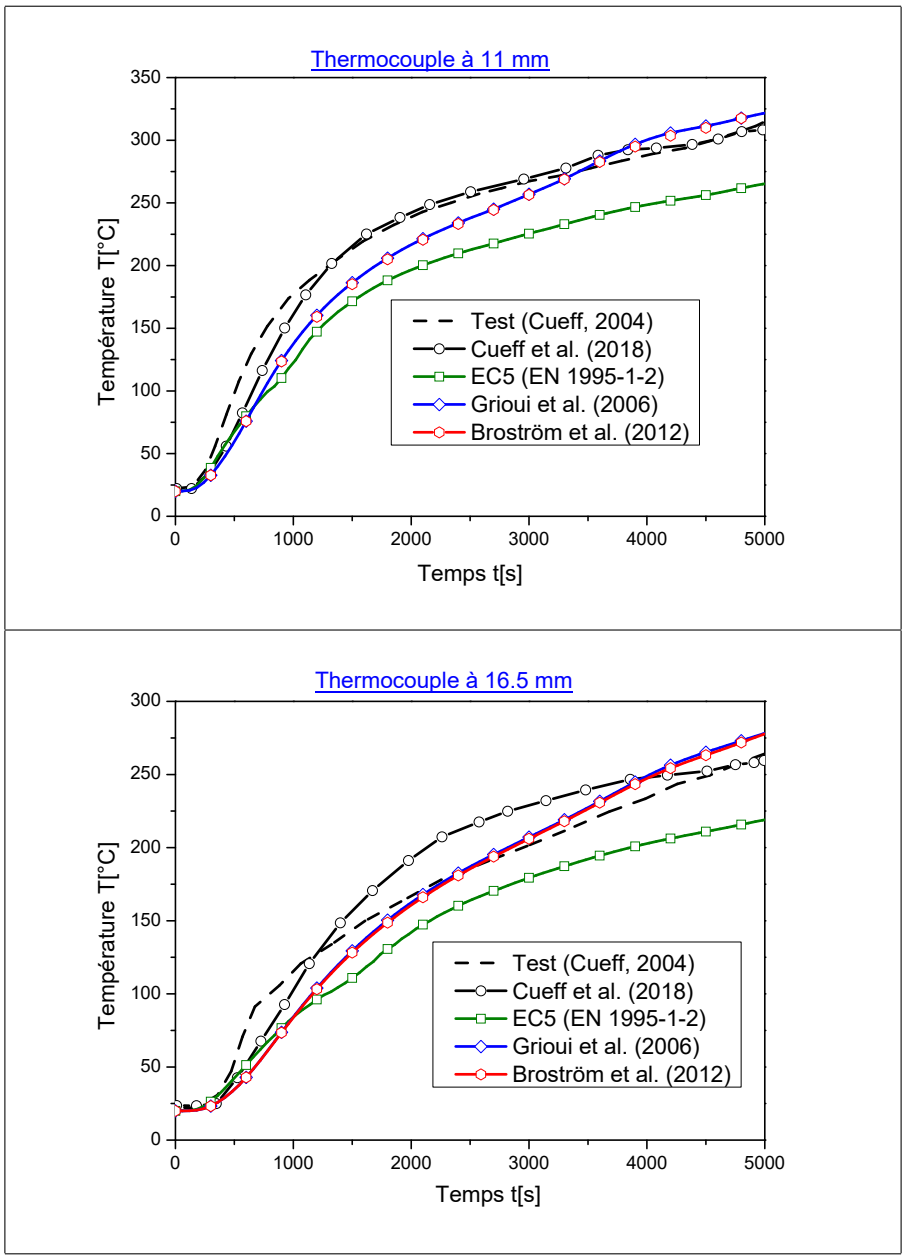


FIGURE 2.56 – Evolution des profils de température (teneur en eau de 6%).

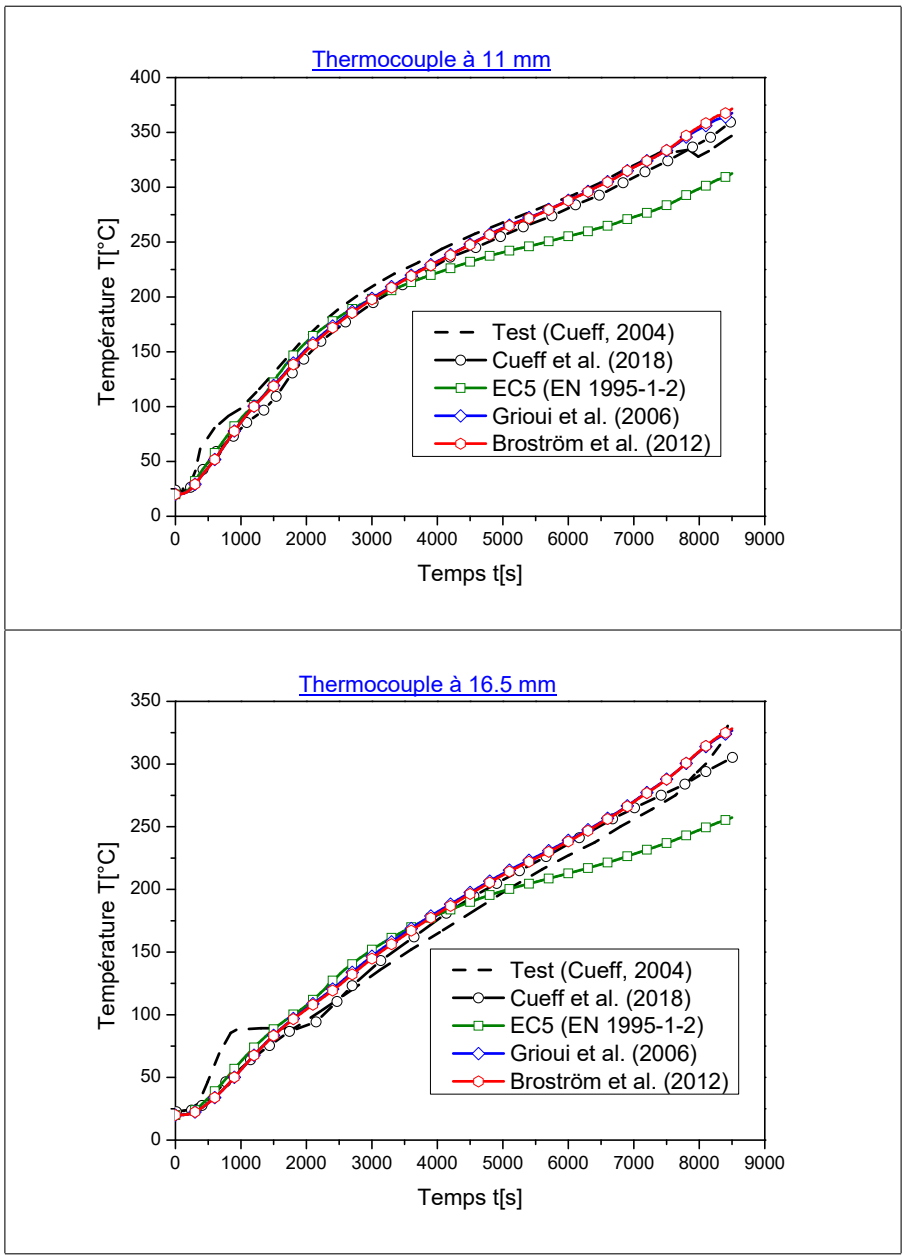


FIGURE 2.57 – Evolution des profils de température (teneur en eau de 10%).

Modules d'Young $[MPa]$	Coefficients de Poisson
$E_1 = E_2 = 650\,;\, E_3 = 22.2$	$\nu_{12} = 0.24\,;\, \nu_{13} = \nu_{23} = 0.019$

TABLE 2.18 – Propriétés élastiques de l'aggloméré de lin à 20°C [95, 96].

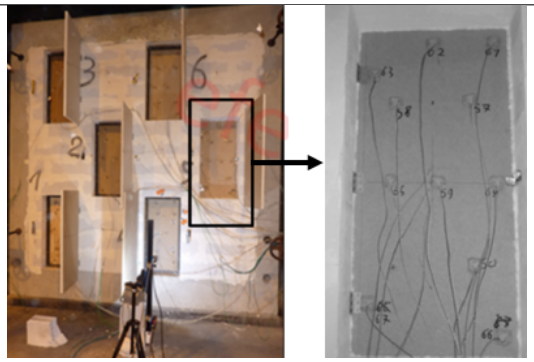
feu. Il prend en compte l'impact des réactions de pyrolyse du bois sur la rigidité du matériau en affectant ses propriétés mécaniques en fonction de l'évolution de la température.

La modélisation thermique est assurée par la procédure Umatht et celle de la mécanique par la routine Umat, les deux implémentées dans la plateforme d'Abaqus [4]. Le lecteur peut trouver plus de détails sur la stratégie de développements des deux routines dans la thèse de Thi [5]. A chaque pas de temps, les coefficients de réduction suggérées par l'approche EC 5 [1] présentés dans la section couplage thermomécanique sont évalués pour affecter les propriétés mécaniques en fonction de la température.

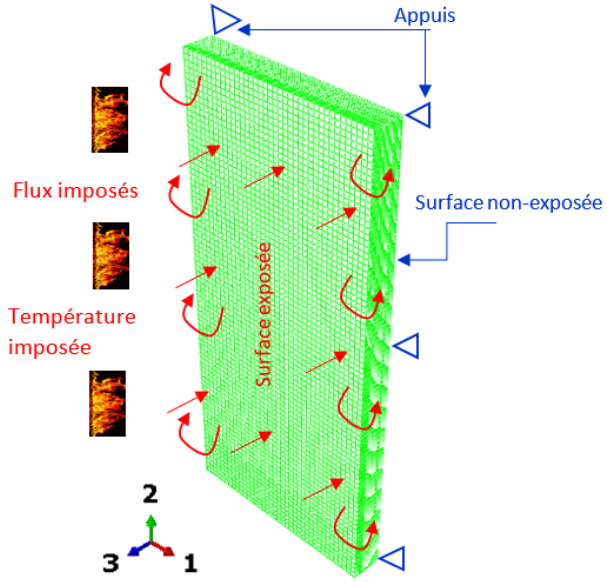
L'exemple simulé concerne un panneau en aggloméré de lin formant un bloc-porte utilisé dans la fabrication de portes coupe-feu présenté et analysé dans [95, 96]. Le panneau en aggloméré de lin étant de 1000 mm de longueur, de 465 mm de largeur et de 33.5 mm d'épaisseur. Le test d'incendie tiré de la thése de Cueff [95] est réalisé conformément à la norme ISO 834-1 [6], et est simulé en 3D comme le montre la figure 2.58b. Le maillage est composé de 63080 éléments de type DC3D8 (élément solide linéaire à 8 nœuds). La température imposée et les conditions aux limites sont illustrées sur la figure 2.58b. L'évolution de la température d'un feu standard [6] utilisé dans les simulations est illustrée sur la figure 2.59. Les coefficients de convection (h_c) et de rayonnement (de l'émissivité ε) utilisés dans les simulations sont ceux proposés dans EC 5 [1] : $h_c = 25W/(m^2.K)$ et $\varepsilon = 0.8$. Les propriétés mécaniques du matériau d'aggloméré de lin sont tirées de la thèse de Cueff [95] et résumées dans le tableau 2.18.

Le profil de températures obtenu par la simulation à l'instant final d'exposition au feu t=28min est donné sur la figure 2.60. La couche du charbon se forme au-delà de T=300°C et elle est représentée en gris. La zone du bois sain est présentée en bleu. Entre le charbon et le bois sain, on distingue les zones de pyrolyse (rouge, jaune et vert) et de séchage (turquoise).

La figure 2.61 montre l'évolution de la flèche au centre du panneau durant l'incendie. On remarque que l'essai a été arrêté après un temps d'environ 28 min, et la flèche calculée approche celle mesurée avec une bonne précision sur la première partie de la courbe (pour un temps d'exposition t<10min). Au-delà, les résultats



(a). Vues de la face non-exposée au feu [95, 96]



(b). Modèle éléments finis en 3D

FIGURE 2.58 – Test d'incendie d'un panneau de bloc-porte.

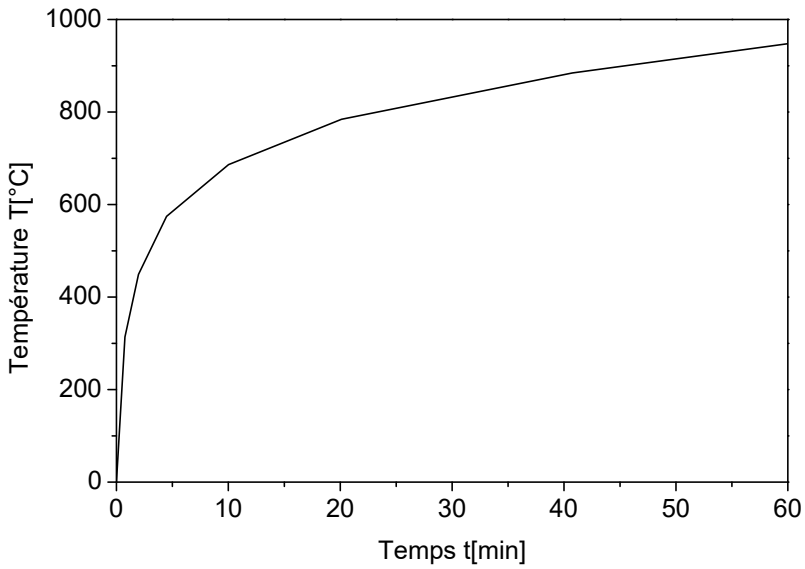


FIGURE 2.59 – Température d'un feu standard [6].

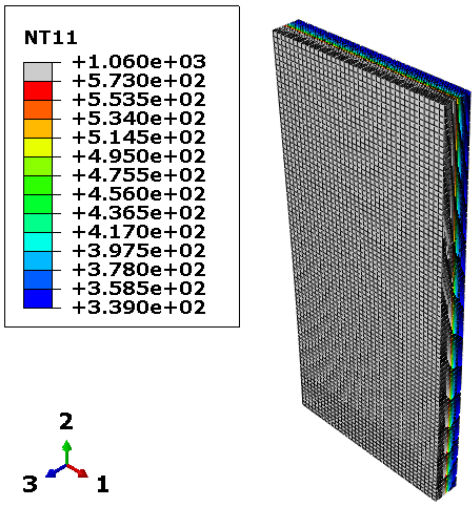


FIGURE 2.60 – Formation de la couche du charbon à l'instant final (T[K]).

des simulations affichent un écart important comparés aux tests expérimentaux. Les modèles cinétiques de Grioui et al. [85] et de Broström et al. [97] conduisent aux mêmes valeurs de déplacement. Le modèle basé sur l'approche réglementaire EC 5 [1] surestiment la flèche comparé aux autres approches. L'évolution de la flèche numérique se fait progressivement et elle reste quasiment linéaire ce qui n'est pas le cas pour les tests. La flèche expérimentale est linéaire jusqu'à un temps d'exposition d'environ 10 min. A partir de cette limite le comportement devient non linéaire. L'écart entre les résultats des valeurs calculées et mesurées peut être dû à plusieurs raisons : (1) au fait que l'étape de l'identification des paramètres cinétiques est réalisée sur de petites particules (ATG) et la validation de l'analyse thermique est réalisée sur un échantillon à petite échelle dans un four conçu au laboratoire ; (2) la réponse expérimentale est obtenue dans des plages de températures supérieures à celles de la phase de pyrolyse (à un temps supérieur à 3 min, la température dépasse 500°C, voir la figure 2.59 de la température d'un feu standard [6]) et (3) l'erreur peut être fortement attribuée au faite que le chargement thermique imposé suit l'équation d'évolution de la température d'un feu standard [6] ce qui n'est facile à reproduire expérimentalement au laboratoire. Pour améliorer la qualité des résultats des prédictions, il important de connaitre l'évolution de la température imposée (incluant l'effet de conduction, du rayonnement et de convection) à la surface exposée.

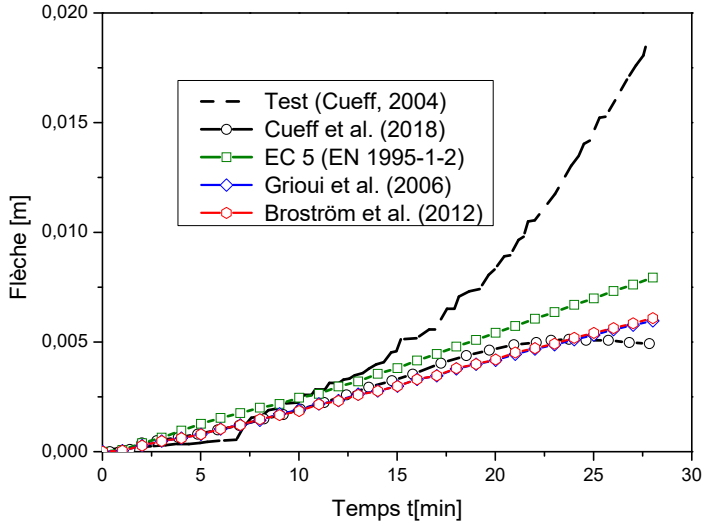


FIGURE 2.61 – Comportement thermomécanique d'un panneau en aggloméré de lin.

2.5.3 Résistance au feu des assemblages réalisés par tourillons en bois densifié

Dans le cadre de la thèse de Tran T.T., lancée en mars 2017 et financée en partie par un projet européen Interreg AFTB en cours de finalisation, un nouveau système d'assemblage par tourillons en bois densifié permettant d'assembler des lamelles en bois est en cours de validation au niveau structurel (figure 2.62). L'objectif visé est d'utiliser des tourillons en bois densifié comme moyen de substitution au collage et à l'utilisation des organes en acier. L'introduction de cet assemblage dans la construction nécessite la connaissance de son comportement au feu. Pour ce faire, nous proposons de caractériser un assemblage de poutres en bois sous forme de "L" réalisé par des tourillons en bois densifié moyennant deux techniques complémentaires : expérimentale par des tests réels d'incendie et numérique. Les tests permettront d'acquérir les données d'entrée pour informer les constantes du modèle thermomécanique. La modélisation permettra ensuite de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'exposition au feu pour en améliorer les performances de ce nouvel système d'assemblage. La modélisation permettra en outre de réduire le nombre de tests d'incendie très onéreux. En dernier, le modèle éléments finis sera validé par des mesures de températures à différentes profondeurs dans la section des lamelles et au sein des tourillons densifiés.

Les tests d'incendie sont en cours de traitement et de réalisation (figure 2.63). Une fois achevés, ils seront simulés moyennant les procédures Umat et Umatht présentées dans ce mémoire. Pour cette raison, les tests ne sont pas encore abordés et analysés dans cette

FIGURE 2.62 – Assemblage par tourillons en bois densifié.

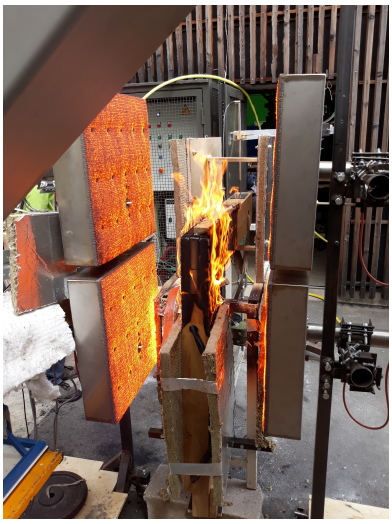


FIGURE 2.63 – Test d'incendie d'un assemblage par tourillons en bois densifié.

section.

2.5.4 Conclusion

Ce travail consiste en l'élaboration d'un modèle éléments finis tridimensionnel décrivant le comportement thermo-mécanique des structures en bois soumises à de hautes températures (cas d'incendie). Le modèle numérique est intégré dans le code logiciel Abaqus [4] via les routines utilisateur (Umat et Umatht), et appliqué à l'analyse du comportement au feu des panneaux multicouches utilisés dans la construction. Le comportement au feu est décrit par l'approche réglementaire EC5 [1] et trois différents modèles cinétiques (Shen et al. [46], Griou et al. [85] et de Broström et al. [97]) présentés précédemment. En dernier, les résultats des simulations sont comparés à l'expérience afin d'évaluer les aptitudes et les performances des modèles de pyrolyse choisis dans cette étude.

Les tendances des valeurs prédites sont satisfaisantes et encourageantes. Le modèle numérique permet de retranscrire fidèlement les transferts thermomécaniques au sein du matériau bois et d'estimer l'évolution des profils de température dans l'épaisseur de

l'élément. Les déplacements mécaniques d'un panneau à base de bois lors d'un essai de résistance au feu ont également été analysés. Ce modèle a été ensuite appliqué et validé sur différents exemples dans des conditions extrêmes d'incendie. On observe cependant peu d'écart entre les valeurs calculées et mesurées. Nous pouvons ainsi affirmer que le modèle éléments finis développé dans cette étude est capable de prédire le comportement au feu du matériau bois.

2.6 Synthèse

La réglementation française sur la sécurité incendie vise à assurer au premier lieu la protection des usagers et si possible ensuite les biens immobiliers et matériels. Ainsi, la construction civile et industrielle se trouve régie par plusieurs règles et textes législatifs et normatifs. Les règles sont formulées en grande partie à partir des données mesurées. Dans ce cas, les informations empiriques se traduisent souvent par des solutions types et des calculs simples. A ce titre, on peut affirmer que la réglementation française actuelle en matière de sécurité incendie est conservatrice, et basée sur des données peu précises.

Quant à la science de l'ingénierie de la sécurité incendie, elle offre plus de choix dans la conception et la réalisation des ouvrages. Son concept est fondé sur des données scientifiques, des règles et rapports d'experts, et sur les effets de l'incendie sur le comportement des humains afin de :

- minimiser les pertes de vies humaines ;
- protéger au mieux les biens immobiliers, l'environnement et les patrimoines ;
- permettre aux pompiers et aux sauveteurs d'accéder sans risque de sur-accident ;
- quantifier en permanence les risques, le danger et les effets de l'incendie ;
- évaluer analytiquement les dangers pour réduire et limiter les conséquences de l'incendie.

Pour l'application de l'approche de l'ingénierie de la sécurité incendie, il est important de disposer en amont des informations concernant l'ensemble des éléments de construction de l'ouvrage quelles que soient les actions thermomécaniques et humaines appliquées. Si certaines informations ne sont pas accessibles, il est possible de faire recours à l'application d'un jugement d'expert tenant compte des coefficients de sécurité pour compenser au mieux une éventuelle erreur dans l'estimation afin d'évaluer correctement le niveau de sécurité de l'ouvrage. L'ingénierie de la sécurité incendie s'appuie aussi bien sur l'exploitation des critères de performances normalisés qui aident à renseigner les objectifs de sécurité incendie.

Les tests réels d'incendie et les travaux de recherche portant sur le comportement

au feu de l'enveloppe des bâtiments, disponibles dans la littérature, ne permettent pas toujours l'acquisition de connaissances nécessaires à l'évaluation de la résistance au feu d'une structure avec une bonne précision, d'où la nécessité d'effectuer des simulations plus avancées pour justifier la sécurité des immeubles vis-à-vis de l'incendie. Le bois est le matériau de construction pour lequel les travaux relatifs à la caractérisation des propriétés physicomécaniques et à la modélisation numérique par éléments finis sont les moins nombreux, comparé aux autres matériaux traditionnels les plus utilisés dans la construction (le béton et l'acier). De plus par rapport aux autres matériaux de construction, le comportement au feu du bois est totalement différent, celui-ci étant combustible. La diversité des essences de bois et la grande difficulté de l'identification des caractéristiques physicomécaniques du matériau bois sous hautes températures rendent difficile la synthèse des informations, des connaissances et le développement de modèles numériques généralisés.

Quelques études ont porté sur l'analyse du comportement au feu des structures en bois à tailles réelles en appliquant les modèles simplifiés de type ingénieur décrits dans la première partie de ce chapitre notamment celui défini par l'approche réglementaire EC5[1]. Ces modèles ne prennent pas en compte la cinétique de la dégradation thermique du matériau bois lors de la phase de pyrolyse. Les modèles simplifiés se traduisent sous forme de courbes d'évolutions des propriétés physico-thermiques (conductivité λ, densité ρ et chaleur spécifique c_p) du matériau bois pour simuler les phénomènes de pyrolyse et de combustion. Cela permet d'utiliser les modèles développés pour d'autres matériaux non-combustibles en ajustant les propriétés thermiques avec des valeurs fausses. De plus, ces évaluations du comportement au feu des structures en bois ont été réalisées sous actions thermiques conventionnelles et n'ont pas fait l'objet d'études de modélisations numériques très avancées.

De plus l'application de ces modèles à l'analyse des cas réels d'incendie montrent que le comportement global n'est pas suffisamment bien corrélé à cause de la variabilité des différentes valeurs des constantes (λ, ρ et c_p) suggérées par la norme EC5[1] et de nombreux auteurs [12–14]. Ces constantes sont tirées à partir des mesures des tests expérimentaux réalisés sur des bois résineux et dans des conditions expérimentales complètement différentes. Ces modèles sont plus faciles à intégrer dans un logiciel de calcul mais ils restent moins prédictifs. D'où la nécessité d'étudier les modèles de pyrolyse décrivant la cinétique de la décomposition thermique du matériau bois via les transformations chimiques lors de la phase de pyrolyse. Ils font donc l'objet de cette étude.

Les modèles de pyrolyse sont nombreux dans la littérature et ont été développés principalement pour des applications énergétiques. Leur application nécessite l'identification de plusieurs paramètres cinétiques à partir des tests expérimentaux réalisés sur de petites

éprouvettes. Une fois que ces constantes cinétiques sont déterminées les modèles sont conçus pour pouvoir estimer avec plus de précisions la résistance au feu des structures en bois, comparés aux modèles simplifiés.

L'introduction de l'approche de l'ingénierie à la sécurité incendie pour le calcul des structures en bois exposées au feu requiert la mise en place des procédures de modélisations numériques avancées capables de reproduire la cinétique de la dégradation thermique afin de reproduire avec fidélité le comportement réel d'un incendie. Dans ce contexte, la présente étude consiste en la détermination d'un modèle cinétique thermomécanique tridimensionnel plus performant pour décrire le comportement du matériau bois dans des conditions d'incendie réel. L'identification des paramètres cinétiques des modèles choisis a été faite sur la simulation des tests de l'ATG réalisés sur des particules en bois. Les mesures des tests d'incendie réel réalisées sur des éprouvettes de grande taille constituées du même bois ont été confrontées à la simulation pour servir de validation aux modèles numériques développés dans cette étude. Les résultats des simulations obtenus par les différents modèles retenus dans cette étude permettent d'éclairer le lecteur sur les aptitudes et les performances de chaque modèle. Cette méthode peut s'appliquer à étudier de façon très précise les essences de bois particulières, les matériaux composites et multicouches.

L'objectif principal de ce travail a consisté à développer une méthodologie numérique permettant de prédire la résistance au feu des structures en bois. Des modèles cinétiques permettant de prendre en compte la dégradation thermique du matériau bois lors de la phase de pyrolyse et la variation des propriétés physico-mécaniques en fonction de la température ont été intégrés dans le code Abaqus [4] et appliqués à la simulation de plusieurs cas d'incendie.

Sur la base d'une étude bibliographique de la cinétique de la dégradation du matériau bois, les valeurs des énergies d'activations et des facteurs pré-exponentiels de toutes les réactions chimiques de la pyrolyse, décrites par la loi d'*Arrhenius*, ont pu être estimées avec plus de précision. Trois différents modèles cinétiques ont été couplés à un modèle mécanique afin de reproduire le comportement du matériau bois dans des conditions d'incendie. Le couplage thermomécanique est réalisé par les coefficients de réduction suggérés par l'approche réglementaire EC 5 [1]. Le modèle mécanique est quant à lui orthotrope, et il est présenté en détail dans notre travail publié récemment [29].

Pour renseigner les constantes nécessaires aux modèles numériques, différents tests expérimentaux ont été réalisés et simulés. Les paramètres cinétiques de la réaction de pyrolyse ont été calculés grâce à une analyse thermogravimétrie (ATG) réalisée sous différentes conditions opératoires (vitesses de chauffe, atmosphères, ...).

Concernant l'analyse thermique, les prédictions sont encourageantes comparées aux valeurs mesurées. Le modèle thermique permet de retranscrire le comportement thermique des matériaux composites bois-ciment et de l'aggloméré de lin. Ainsi, ces modélisations par éléments finis ont été validées en comparant les profils de température à différentes profondeurs de la surface de l'élément exposée au feu à ceux des tests d'incendie. Pour le cas de l'aggloméré de lin, des simulations à différentes teneurs en eau ont été réalisées. Certaines simulations affichent un écart entre les valeurs de température prédites et mesurées. Ces écarts s'expliquent par la complexité de décrire les réactions de la pyrolyse avec les modèles cinétiques et par le manque de données sur ce matériau qui n'a pas été caractérisé finement dans notre laboratoire. Il apparait ainsi important de réaliser nous-même en interne des tests d'incendie sur des cas réels pour évaluer avec certitude les aptitudes de la méthodologie développée. Ce point est en cours de développement dans la thèse de Tran T.T.

Concernant le couplage thermomécanique, les déplacements prédits sont relativement proches de ceux mesurés au centre de la face non-exposée du panneau d'aggloméré de lin à grande échelle pour de petits déplacements (inférieurs à $2.5mm$). Dans cette partie de la courbe, la température n'affecte pas considérablement le comportement mécanique des panneaux en aggloméré de lin. Au-delà, la réponse globale en terme de flèche affiche clairement une différence entre les valeurs estimées et mesurées. Pour améliorer la qualité des résultats des simulations, il nous semble important d'effectuer en premier lieu une analyse thermique avec des paramètres cinétiques correctement identifiés. Ce point montre la pertinence de notre approche prenant en compte tous les éléments. Une fois cette étape réalisée et validée en comparant les profils de températures à ceux des tests, on peut procéder en second lieu à l'analyse mécanique. Notons que le modèle mécanique développé au LERMAB a fait l'objet de plusieurs publications dans des revues de rang A. Les modèles couplés (thermique et mécanique) développés pourront ensuite être exploités sur des structures en bois à grande échelle exposées au feu, afin d'améliorer le couplage thermomécanique et ainsi faire évoluer l'approche proposée par l'EC 5 [1].

Sur la base des résultats présentés et discutés dans ce mémoire, il semble pertinent de poursuivre le développement de cette méthodologie numérique visant à prédire le comportement au feu des structures en bois. Pour cela, différentes perspectives sont envisagées :

- Élargir la base de données sur des bois à analyser afin de les caractériser moyennant les moyens expérimentaux existants en interne ;
- Choisir deux essences distinctes (résineux et feuillus) avec différentes teneurs en eau pour étudier l'effet de l'humidité dans la phase de séchage qui servira à améliorer la modélisation de cette étape ;

- Etudier le comportement au feu d'un bois de structure (épicéa) et d'un feuillus (hêtre) en vue de son utilisation dans la construction. Les tests au feu peuvent nous renseigner si les résineux et les feuillus, stockés dans les mêmes conditions opératoires, réagissent de la même façon vis-à-vis de l'incendie. Rappelons que l'approche EC 5 [1] se limite au cas des résineux ;
- Pour cela, nous devons continuer de travailler avec notre approche multi-échelle :

1. Tests à l'**échelle de la particule**
   - Analyser la cinétique de différentes essences par la technique de la thermogravimétrie ;
   - Tester différents modes opératoires avec différentes vitesses de chauffe ;
   - Caractériser les paramètres cinétiques des modèles de pyrolyse à partir des données de l'ATG.
2. Tests à **petite échelle**
   - Analyser le comportement au feu d'éprouvettes de petites tailles dans un four pour des températures inférieures à 400°C ;
   - Faire varier le flux de chaleur ;
   - Evaluer les profils de température à différentes positions de la surface exposée au flux ;
   - Valider les modèles cinétiques à partir des tests à petite échelle ;
   - Simuler les tests à petite échelle par le logiciel Abaqus [4] en utilisant les paramètres cinétiques calculés à l'échelle de la particule par la technique de l'ATG ;
   - Comparer les profils de température prédits à ceux des tests réalisés dans le four pour ajuster les paramètres cinétiques tirés de l'analyse thermogravimétrie.
3. Tests à **grande échelle**
   - Analyser le comportement au feu des éprouvettes de grandes tailles sous différentes charges mécaniques ;
   - Etudier le comportement au feu des poutres en flexion, des assemblages bois-bois et bois-métal, des poutres mixtes bois-béton et bois-acier, ...
   - Réaliser les tests sous l'action thermique d'un feu standard définie par la norme ISO 834-1[6] ;
   - Intégrer d'autres actions thermiques de type flux maitrisés ;
   - Simuler les différents cas par le code Abaqus [4] pour prédire les déformations ;
   - Comparer les résultats des prédictions à ceux des tests.

L'aboutissement des perspectives soulignées ci-dessus permettra de mettre à disposition des ingénieurs de la sécurité incendie un outil d'analyse très puissant. Il sera alors possible d'utiliser le modèle thermomécanique développé dans le cas d'études de vérification de la résistance au feu des structures en bois plus complexes et plus variées.

Une autre piste de développement est l'introduction de l'effet de la combustion dans les modèles de pyrolyse. Pour des niveaux de températures plus élevés les modèles développés dans ce mémoire ne seront pas capables de reproduire le comportement au feu avec succès. Dans ce contexte, une thèse sur la modélisation de la combustion de bois bûches en foyers domestiques (sous la direction du Pr. Y. Rogaume) commencera à partir de septembre 2020. L'objectif principal de ce travail de thèse consiste à développer une démarche de modélisation qui prenne en compte l'ensemble du phénomène de combustion, depuis la pyrolyse du bois sous l'effet de la température jusqu'à l'évacuation des fumées en prenant en compte l'ensemble des réactions et des phénomènes. Cet outil permettra ensuite de valider différentes conceptions de chambres de combustion pour améliorer les performances des appareils. Il pourra également être appliqué au dimensionnement de la résistance au feu des structures en bois.

Conclusion générale

Ce document retrace l'ensemble de mes activités d'enseignement et de recherche réalisées durant une dizaine d'années. Il est organisé en deux grands chapitres. Le premier chapitre rappelle mon parcours professionnel, mon bilan d'activités et mes projets de recherche depuis mon recrutement en septembre 2008 en tant que Maître de conférences à l'Université de Lorraine. Les travaux présentés dans le deuxième chapitre concernent la dégradation thermique du matériau bois sous hautes températures et s'inscrivent dans un contexte d'amélioration des connaissances sur la modélisation du comportement au feu des structures en bois et dans l'objectif d'améliorer la sécurité incendie de celles-ci.

Mes travaux de recherche se déroulent au sein du LERMAB et s'inscrivent dans les thèmes de recherche repris au sein de l'axe 3 "Énergétique, Mécanique, Construction Bois". Mon domaine de compétences porte sur la modélisation numérique par éléments finis des structures bois. Mes activités de recherche sur la modélisation théorique et numérique en mécanique des solides ainsi que mon expérience industrielle dans le bâtiment m'ont facilité l'intégration dans l'équipe et constituent un acquis important pour développer le matériau bois mais aussi pour aborder d'autres thématiques transversales développées par d'autres équipes au LERMAB et dans d'autres laboratoires.

Mon activité recherche est axée principalement sur l'étude du comportement thermomécanique du matériau bois. Les recherches menées ont porté à la fois sur la mise en œuvre de modèles numériques avancés afin de simuler le comportement des structures bois dans des conditions normales (à température ambiante) et d'incendie, et sur les formulations théoriques et numériques mises en pratique ainsi que sur les choix que nous avons été amenés à faire entre plusieurs approches, qu'ils soient fondés sur des données scientifiques issues de la littérature ou des problèmes spécifiques aux ouvrages en bois selon les cas.

Mon métier d'enseignant-chercheur me passionne pour ces diverses raisons :

1. Durant mes interventions, j'essaie de partager avec mes étudiants ma passion pour la recherche. En effet, je leur montre que le chercheur apporte des solutions aux problèmes des entreprises, tout en créant de nouvelles approches pour la communauté scientifique. La recherche est une activité qui profite aux trois partenaires :

l'entreprise, l'école et le laboratoire. Je les motive également à découvrir nos diverses activités de recherche au LERMAB. Par ailleurs, j'alimente mes cours souvent avec les derniers résultats issus de la recherche, soit à partir de mes activités à travers les thèses et les collaborations, soit à partir de la veille bibliographique. Je propose aussi des Projets de Fin d'Etudes (PFE) en rapport avec mes encadrements de thèses, par exemple sur la modélisation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans les parois des bâtiments à ossature bois. Le principal objectif de l'étude est de pouvoir se doter d'un outil numérique permettant de modéliser les transferts thermiques à travers l'épaisseur d'une paroi d'une maison à ossatures bois. Des sujets sur le comportement au feu des structures bois en rapport avec les travaux de thèse de M. THI Van Diem. L'objectif de l'étude est de comprendre et de modéliser la résistance des structures bois au feu. Il s'agit de proposer une approche numérique permettant de simuler le comportement réel d'un assemblage avec effet de hautes températures. J'encourage également les étudiants en fin de cycle ingénieur à intégrer le master recherche ou une thèse de doctorat.

2. En tant qu'enseignant-chercheur, je me dois de créer un lien fort entre la formation et les professionnels du bâtiment. Pour ce faire, j'intègre dans mes cours des illustrations concrètes des concepts étudiés afin de montrer aux étudiants que les problèmes traités en cours sont d'actualité chez les industriels. De plus, je fais intervenir régulièrement dans mes cours des professionnels et j'organise pour les élèves quelques visites chaque année chez nos partenaires industriels. Un exemple qui illustre ce point : en tant que responsable de l'UE 9.7, j'attribue deux-tiers de son volume horaire aux professionnels du bâtiment. Un autre exemple animé dans mon cours est le dimensionnement des fondations, un professionnel présente en premier le concept et les types de fondations. Ensuite, je présente le dimensionnement et le plan du ferraillage des fondations selon l'Eurocode 2.

3. Pour la majeure partie de mes cours, je développe des cas pratiques sur lesquels les étudiants travaillent en binômes en début de séance pour apporter des solutions. L'objectif est de leur montrer, à partir de cas simples, les différentes problématiques à résoudre pour leur permettre de formaliser des approches de résolution et leur faire toucher du doigt la complexité des problèmes et la nécessité de s'appuyer sur des concepts et outils numériques pour aboutir à des solutions rapides et efficaces. Un exemple de ce type est le dimensionnement analytique des éléments structuraux (poutre, poteau, solive, panne, lisse et le contreventement) selon la réglementation en vigueur et de comparer ensuite les résultats analytiques aux résultats des simulations issus de logiciels du commerce (Melody, RoBoBat, MdBat, RDM6). A l'issu de ce

cours, les étudiants doivent-être capables d'informer correctement les logiciels et d'expliquer le faible écart entre la solution analytique et le résultat numérique.

4. Le fait d'intervenir dans différents modules d'une même maquette pédagogique m'a permis de constater que les étudiants ont du mal à utiliser les compétences acquises dans un module pour résoudre une problématique posée dans un autre module ou dans un projet ou un stage. Afin de remédier à ce cloisonnement, j'essaye depuis un certain nombre d'années de prendre le temps nécessaire pour bien expliquer comment les différents modules s'imbriquent dans une vision globale et que par exemple le cours sur la résistance des matériaux n'est pas déconnecté des cours sur les Eurocodes 2, 3 et 5. Dans ce sens, je fais travailler les élèves sur le dimensionnement des structures en utilisant la RDM et les codes de calcul. Les solutions obtenues par les deux méthodes seront ensuite comparées et discutées. L'objectif de cet exercice est de montrer aux étudiants que la contrainte de calcul donnée par les codes de calculs est tirée de la RDM.

Mes diverses expériences effectuées dans l'enseignement supérieur sont positives et enrichissantes. Pour mes enseignements futurs, j'espère pouvoir garder la capacité à créer des cours, des TD et des TP afin que l'enseignement dispensé aux futurs diplômés en licences et en cycle ingénieurs corresponde aux besoins des industriels. En tant qu'enseignant-chercheur, il me semble important de tisser un lien fort avec les professionnels de la construction bois afin que notre formation soit bien adaptée pour intégrer rapidement et efficacement les jeunes diplômés dans différentes entreprises de la construction bois.

Plusieurs thèmes ont émergé au cours de mes années de recherche comme il a été rapporté en détail dans la section "projets de recherche". Ces thèmes s'inscrivent en grande partie dans les objectifs repris par l'axe 3 du laboratoire "Energétique, Mécanique, Construction Bois". Les projets de publication sont souvent abordés sous les deux aspects expérimental et numérique. Plus récemment mon travail de recherche sur la sécurité incendie en ce qui concerne le comportement au feu des structures en bois m'a rapproché des thématiques développées par l'axe 2 "Valorisation Chimique, Énergie et Procédés". Le caractère interdisciplinaire envisagé dans le cadre de ce projet transversal entre les deux axes 2 et 3 est justifié du fait que les deux équipes ont acquis avec les moyens d'essais expérimentaux de l'axe 2 et des outils de simulation de l'axe 3 une solide compétence en terme d'analyse des structures en bois à petite échelle (cas de l'étude de la pyrolyse d'une particule en bois par l'appareil de l'ATG) et à grande échelle (utilisation des panneaux rayonnants pour la réalisation des tests d'incendie réel). La convergence avec l'axe 2 a permet l'aboutissement et la réalisation des travaux présentés dans ce mémoire sur la sécurité incendie.

Dans le contexte d'amélioration des connaissances sur la modélisation des incendies, une approche numérique multi-échelle a été développée, dans le deuxième chapitre, permettant de diminuer l'incertitude et d'augmenter la robustesse, la fiabilité et la performance des codes de simulation disponibles dans le commerce. Cependant, cette approche induit des inconvénients qui sont abordés dans cette étude. Ils concernent principalement la caractérisation des paramètres cinétiques responsables de la dégradation thermique du matériau bois dans la phase de la pyrolyse et le choix d'un modèle cinétique le plus approprié pour reproduire avec fidélité le comportement des structures en bois en cas d'incendie.

Les perspectives à ce travail ne manquent pas. Une des principales que je me fixe à court terme est d'appliquer ces modèles cinétiques sur des tests d'incendie réel réalisés sur des bois de structures (résineux et feuillus). Les modèles cinétiques doivent être correctement identifiés pour être optimisés. La réglementation EC 5 [1] appliquée aux résineux est généralisée au cas des feuillus, ce qui n'est pas pleinement justifié par les observations expérimentales. Il est donc souhaitable d'évaluer la performance des bois de feuillus en cas d'incendie en appliquant les modèles cinétiques pour comparer leur résistance au feu à celles des résineux. En cas de différences notables entre les natures de bois, il est important d'améliorer la norme actuelle rapportée dans [1] sur cet aspect en vue de favoriser l'utilisation des feuillus dans la construction.

Un autre domaine d'application qui n'est pas suffisamment exploré dans la littérature est celui des travaux d'optimisation de l'efficacité énergétique des appareils de chauffage au bois, en particulier des poêles à bois, qui nécessite l'analyse des flux de chaleur dans la chambre de combustion et dans le combustible. Dans ce cas, l'analyse cinétique des températures au sein d'une bûche et l'évolution de sa perte de masse en fonction de la température permettent de caractériser au mieux les mécanismes de décomposition thermique du combustible. L'objectif étant de construire un modèle éléments finis capable de prédire la dégradation thermique de la bûche exposée à un flux de chaleur afin d'optimiser la forme du poêle, de petite à moyenne puissance. Le défi consiste à maitriser la consommation du flux de chaleur engendré par la combustion de la bûche. Un projet de thèse portant sur ce thème, impliquant deux équipes celle du Pr. Rogaume Yann et du Pr. Boulet Pascal de LEMTA (Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée), sera lancé très prochainement.

Je développe également plusieurs projets de recherche impliquant des universités étrangères :

1. Collaboration avec l'**Université d'Ulster** en **Irlande du Nord**

   Le centre de centre de recherche sur la sécurité incendie FireSERT, rattaché à l'Université d'Ulster, dispose des moyens matériels, humains et d'un savoir-faire pour analyser le comportement au feu des bâtiments à plusieurs étages. La plupart des expertises ont été réalisées sur des structures à base des matériaux conventionnels l'acier et/ou le béton. Dans ce partenariat, il s'agit d'étudier le comportement des structures bois-métal dans des conditions d'incendie. Ces structures présentent plusieurs avantages : mécaniques (stabilité dimensionnelle, résistance, grande portée), économiques (légèreté, facilités de transport et de fabrication) et environnementaux (matière première optimisée, fabrication peu énergivore, faible volume, améliore la qualité de l'air : pas de colle). L'objectif principal de ce thème de recherche étant de développer des outils numériques pour l'analyse du comportement au feu des structures mixtes bois-métal dans le but d'améliorer leur sécurité incendie et d'augmenter leur tenue au feu afin d'évacuer les usagers dans de meilleurs conditions. Dans ce contexte l'expertise du FireSERT en terme d'expérimentations des structures à grandes tailles, étape indispensable pour une recherche en Ingénierie Structurale, servira à la validation des modèles numériques.

   Une convention de recherche MoU entre nos deux établissement LERMAB (représenté par le Directeur-Adjoint, Pr. Rogaume Yann) et le FireSERT (représenté par son Directeur, Pr. Nadjai Ali) a été signée en 2018 pour faciliter la communication, les déplacements, l'échange des résultats d'expertises et de données dans le respect de la propriété intellectuelle.

2. Collaboration avec l'**Université de Nouvelle-Galles du Sud de Canberra** en **Australie**

   Le sujet de thèse de Melle Mengya LI [11], soutenu en 2019 portant sur la caractérisation expérimentale et la modélisation des panneaux de coffrage fabriqués à base d'un composite bois-ciment, a fait l'objet de plusieurs publications dans des revues internationales, ce qui justifier l'intérêt de poursuivre le développement de ce type de matériau bois-ciment afin de l'introduire facilement dans la construction durable. Ces publications ont été réalisées en collaboration avec Dr. Khennane Amar (Post graduate Research Coordinator at School of Engineering and Information Technology). Les freins liés au développement de ces nouveaux matériaux sont de plusieurs types : absence de norme (réglementation), variabilité des essences des fibres de bois, difficultés de caractérisation, etc. La compétence, l'expérience et les moyens matériels et humains de l'Université de Nouvelle-Galles du Sud de Can-

berra dans le développement des matériaux composites utilisés dans la construction aidera à caractériser et à améliorer les performances phoniques, acoustiques et mécaniques de ces matériaux bois-ciment dans l'objectif d'accroitre leur utilisation dans l'écoconstruction.

Une demande de financement sur ce thème de recherche a été déposée récemment au conseil australien de recherche via la plateforme RMS "Research Management System".

3. Collaboration avec l'**Université de Laval** à **Québec**

   La production de l'aluminium représente un enjeu économique majeur pour le Québec et contribuent activement à son développement économique. Le Canada est un grand producteur d'aluminium du fait notamment que l'énergie nécessaire à sa production est la plus verte au monde grâce à l'hydroélectricité. On estime qu'environ 90% de la production canadienne est réalisée au Québec. D'ailleurs, cet intérêt a conduit les pouvoirs publics à renforcer les stratégies de développement de toute la filière industrielle de la transformation de l'aluminium, incluant les applications dans plusieurs domaines. Ces différentes stratégies de développement devraient être exploitées davantage dans les prochaines années dans les différents contextes actuels à la croisée des enjeux économiques et du développement durable. D'ailleurs les projets de recherche se mettent en place, notamment au REGAL (Centre de Recherche sur l'aluminium) de l'université Laval pour l'utilisation de l'aluminium dans les éléments et assemblages structuraux du bâtiments et ouvrages d'art (ponts et passerelles). Ainsi, les grands défis à relever s'articulent autour du comportement vibratoire, dû à la légèreté du matériau, et de celui lié à la résistance au feu à cause des mauvaises performances de l'aluminium lorsqu'il est exposé au feu. L'une des solutions envisagées étant la protection de l'aluminium par le matériau bois dans l'objectif d'améliorer le comportement au feu des structures en aluminium.

   Ce projet de collaboration avec l'équipe du Pr. Oudjene Marc de l'Université de Laval vise à développer des structures mixtes bois-aluminium en vue de leur utilisation dans la construction, dans l'objectif que celles-ci se substituent à celles des structures hybrides bois-acier les plus utilisées dans le commerce.

Mon investissement pour la recherche devrait me permettre de m'impliquer plus amplement dans des projets transversaux et multidisciplinaires, de pouvoir améliorer ma production scientifique à travers notamment des publications communes avec d'autres équipes, et d'établir de nouvelles collaborations nationales et internationales qui sont nécessaires pour l'évolution et l'épanouissement de ma carrière professionnelle.

Bibliographie

[1] Eurocode 5 - Design of timber structures. Part 1-2 : General - Structural fire design. CEN 2004 (European Committee for Standardization), EN 1995-1-2, Brussels, Belgium.

[2] Khelifa M. and Celzard A. Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. Composite Structures 111 (2014) 393-400.

[3] Khelifa M., Oudjene M., Ruelle J. and Celzard A. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. International Journal of Adhesion & Adhesives 68 (2016) 283-297.

[4] Abaqus. Theory Manual. Version 6.11. Providence, RI : Dassault Systèmes Simulia Corp., 2011.

[5] Thi V.D. Modélisation du comportement au feu des structures en bois. PhD Thesis. University of Lorraine, France 2017.

[6] ISO 834-1. Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1 : General requirements. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.

[7] Thi V.D., Khelifa M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Finite element modelling of the pyrolysis of wet wood subjected to fire. Fire Safety Journal 81(2016)85-96.

[8] Thi V.D., Khelifa M., Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Finite element analysis of heat transfer through timber elements exposed to fire. Engineering Structures 143 (2017) 11-21.

[9] Menis A. Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) elements. PhD Thesis, Università degli studi di Cagliari, Italy 2012.

[10] Li M., Khennane A., Brandelet B., El Ganaoui M., Khelifa M., and Rogaume Y. Modelling of heat transfer through permanent formwork panels exposed to high temperatures. Construction and Building Materials 185 (2018) 166-174.

[11] Li M. Caractérisation expérimentale et modélisation des panneaux composites bois-ciment. PhD Thesis. University of Lorraine, France 2018.

[12] Knudson R.M, Schniewind A.P. Performance of structural wood members exposed to fire. Forest Prod J 25(2) (1975) 23-32.

[13] Fredlund B. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. Fire Safety J 20 (1993) 39-69.

[14] Janssens ML. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. Fire Mater 28 (2004) 199-207.

[15] Frangi A., Bochicchio G., Ceccotti A., Lauriola M.P. Natural full-scale fire test on a 3 storey XLam timber building. Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Curran Associates, Inc., 2-5th June 2008.

[16] Hill R. A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals. Royal Soc Lond Proc 1948 ; 281.

[17] Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials. Journal of Composite Materials 1 (1967) 200-206.

[18] White R.H. and Schaffer E.L. Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab. Wood and fiber. 13 :1 (1981) 17-38.

[19] Dias de Moraes P. Influence de la température sur les assemblages bois. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2003.

[20] Schaffer EL. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir. Journal of testing and evaluation. 1 :4 (1973) 319-329.

[21] Back E.L. and Salem N.L. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. Tappi Journal. 65 :7 (1982) 107-110.

[22] Simpson W. and Tenwolde A. Physical properties and moisture relations of wood. In : Wood Handbook-Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (1999) 1-24.

[23] Schaffer EL. Structural fire design : Wood. Rap tech. US Department of Agriculture, Forest service, Forest Products Laboratory, 1984.

[24] Thomas GC. Fire resistance of light timber framed walls and floors. PhD thesis, University of Canterbury, 1996.

[25] Nubissie A. Dynamical behavior of a wooden beam under mechanical loading and fire. Materials and Design n°32 (2011) 1331-1336.

[26] Östman B.A.L. Wood tensile strength at temperatures and moisture contents simulating fire conditions. Wood Science and Technology n°19 (1985) 103-116.

[27] König J., Walleij L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2 : A deign model for standard fire exposure. Rap. Tech. 10001001, Stockholm, 2000.

[28] Kollmann F., Cote W. Principles of wood science and technology. Spring Ed. 1968.

[29] Tran T.T., Thi V.D., Khelifa M., Oudjene M., Rogaume Y. A constitutive numerical modelling of hybrid-based timber beams with partial composite action. Construction and Building Materials 178 (2018) 462-472.

[30] Lineham S.A., Thomson D., Bartlett A.I., Bisby L.A., Hadden R. M. Structural response offire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads. Fire Safety Journal 85 (2016) 23-24.

[31] Ahmed Hared I. Optimisation d'un procédé de pyrolyse en four tournant : application à la production de charbons actifs. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

[32] Havens J, Hashemi H, Brown L, Welker R. A mathematical model of thermal decomposition of wood. Combust Sci Technol 5(1972)91-8.

[33] Deglise X. et Donnot A. Bois énergie - Propriétés et voies de valorisation. Techniques de l'ingénieur. Réf : BE8535 V2, 2017.

[34] Thurner F. and Mann U. Kinetic investigation of wood pyrolysis. Ind Eng Chem Process Des Dev 20 (1981) 482-8.

[35] Chan WR., Kelbon M., Krieger BB. Modeling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle. Fuel 64 (1985) 1505-13.

[36] Alves SS. and Figueiredo JL. A model for pyrolysis of wet wood. Chem Eng Sci 44 (1989) 2861-9.

[37] Di Blasi C. Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis. Combust Sci Technol 90 (1993) 1121-32.

[38] Bilbao R., Mastral JF., Ceamanous J., Aldea ME. Modeling of the pyrolysis of wet wood. J Anal Appl Pyrol 36 (1996) 81-97.

[39] Kansa EJ., Perlee HE., Chaiken RF. Mathematical model of wood pyrolysis including internal forced convection. Combust Flame 29 (1997) 311-24.

[40] Larfeldt J., Leckner B., Melaaen MC. Modeling and measurements of the pyrolysis of large wood particles. Fuel 79 (2000) 1637-43.

[41] Bryden KM. Modeling thermally thick pyrolysis of wood. Biomass Bioenergy 22 (2002) 41-53.

[42] Bellais M., Davidssonb KO., Liliedahla T., Sjostroma K., Pettersson JBC. Pyrolysis of large wood particles : a study of shrinkage importance in simulation. Fuel 82 (2003) 1541-8.

[43] Bryden KM. and Hagge MJ. Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle. Fuel 82 (2003) 1633-44.

[44] Galgano A. and Di Blasi C. Modeling the propagation of drying and decomposition fronts in wood. Combust Flame 139 (2004) 16-27.

[45] Moghtaderi B. The state-of-the-art in pyrolysis modeling of lignocellulosic solid fuels. Fire Mater 30 (2006) 1-34.

[46] Shen D.K., Fang M.X., Luo Z.Y., Cen K.F. Modeling pyrolysis of wet wood under external heat flux. Fire Safety J 42 (2007) 210-217.

[47] Park WC., Atreya A., Howard R. Baum. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. Combust Flame 157 (2010) 481-494.

[48] Souza-Santos M.L. Solid Fuels Combustion and Gasification : Modeling, Simulation, and Equipment Operations (CRC Press), 2004.

[49] De Jong W., Pirone A., Wojtowicz M.A. Pyrolysis of miscanthus giganteus and wood pellets : Tg-ftir analysis and reaction kinetics. Fuel 82 (2003) 1139-1147.

[50] Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction : Practical Design and Theory. Academic Press, 2013.

[51] Rousset P., Turner I., Donnot A., Perre P. Choix d'un modèle de pyrolyse ménagée du bois à l'échelle de la microparticule en vue de la modélisation macroscopique. Ann. For. Sci. 63 (2006) 213-229.

[52] Simmons G.M. and Gentry M. Particule size limitations due to heat transfert in determining pyrolysis kinetics of biomass. J. Anal. Appl. Pyrolysis 10 (1986) 117-127.

[53] Di Blasi C. Comparison of semi-global mechanisms for primary pyrolysis of Lignocellulosic fuels. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 47 (1998) 43-64.

[54] Branca C. and Di Blasi C. Kinetics of the isothermal degradation of wood in the temperature range 528-708 k. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 47 (1998) 43-64.

[55] Gordon W.C. and Knight J.A. Biotechnol. Bioeng. Symp. 14 :15, 1984.

[56] Ward S.M. and Braslaw J. Experimental weight loss kinetics of wood pyrolysis under vacuum. Combustion and Flamme 66 (1985) 261-269.

[57] Wagenaar B.M., Prins W., Van Swaaij W.P.M. Fuel Proc. Techn. 36 :291, 1994.

[58] Di Blasi C. and Branca C. Kinetics of primary product formation from wood pyrolysis. Ind. Eng. Chem. Res 40 :5547, 2001.

[59] Broido A. and Weinstein M., Low temperature isothermal pyrolysis of cellulose. Combust. Sci. Technol. 3 (1971) 285-296.

[60] Agarwal R.K. Can. J. Chem. Eng., 61 (1985) 261-269.

[61] Shafizadeh F. and Bradbury A.G.W. Thermal degradation of cellulose in Air and Nitrogen at low temperature, J. Appl. Polym. Sci. 23 (1979) 1431-1441.

[62] Bradbury A.G.W., Sakai Y., Shafizadeh F. A kinetic model for pyrolysis of cellulose. J. Appl. Polym. Sci. 23 (1979) 3271-3280, (1979).

[63] Varhegyi G., Jakab E., Antal M.J. Is the Broido-Shafizadeh model for cellulose pyrolysis is true ? Energy Fuel 8 (1994) 1335-1352.

[64] Varhegyi G., Antal M. J., Székely T., Szabó P. Kinetics of the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and sugar cane bagasse. Energy & Fuel 3 (1989) 329-335.

[65] Shafizadeh F. and McGinnis. Chemical composition and thermal analysis of cottonwood. Carbohydrate Research 16 (1971) 273-277.

[66] Williams P. T. and Besler S. Pyrolysis of rice husks in a thermogravimetric analyzer and static batch reactor. Fuel 72(2) (1993) 151-159.

[67] Zeriouh A. and Belkbir L. Etude dilatométrique de la pyrolyse du xylane en régime non isotherme. Thermochimica Acta 351(12) (2000) 171-175.

[68] Ramiah M.V. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose and lignin. J. Appl. Polym. Sci. 14 (1970) 1323-1337.

[69] Sefain M.Z. and El-Kalyoubi S.F., Shukry N. Thermal behavior of holo and hemicellulose obtained from rice straw and bagasse. J. Polym. Sci. 23 (1985) 1569-1577.

[70] Koufopanos C.A., Mashio G., Lucchesi A. Kinetic modelling of the pyrolysis of biomass and biomass component. Can. J. Chem. Eng. 67 (1989) 75-84.

[71] Di Blasi C. and Lanzetta M. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert Atmosphere. J. Anal. Appl. Pyrolysis 40-41 (1997) 287-303.

[72] Fisher T., Hajaligol, M., Waymack, B., Kellogg, D. Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials. J. Anal. Appl. Pyrolysis 62 (2002) 331-349.

[73] Jakab E., Faix, O., Till, F., and Szekely, T. Thermogravimetry/mass spectrometry study of lignins within the scope of an international round robin test. J. Anal. Appl. Pyrolysis 35 (1995) 167-179.

[74] Bilbao R., Millera A., Arauzo J. Kinetics of weight loss by thermal decomposition of xylan and lignin. Influence of experimental conditions. Thermochimica Acta 143 (1989) 137-148.

[75] Orfão J.J.M. and Figueiredo J.L. A simplified method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments, Thermochim. Acta 380 (2001) 67-78.

[76] Rousset P. Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température : de la microparticule au bois massif. PhD Thesis, École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF) de Nancy, 2004.

[77] Shimizu K., Teratani F. Miyazaki K. Effect of the Thermal Treatment on Wood Hemicelluloses. II. The Change of Xylan by Heating. Mokuzai Gakkaishi, 14 :7 (1968)317

[78] Beall F.C. Differentiel calometric analysis of wood and wood components. Wood Science & Technology 5 (1971) 159-175.

[79] Alves S.S. and Figueirido J.L. Kinetics of cellulose pyrolysis modelled by three consecutive first-order reactions. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 17 (1989) 37-46.

[80] Torero J. The SFPE handbook of Fire Protection Engineering. Fourth edition. SFPE-NFPA, ISBN-10 : 0-87765-821-8, pp 2-260, 2008.

[81] Torero J. Scaling up fire. Proceedings of the Combustion Institute, 34 (2013) 99-124.

[82] Lautenberger C. A. Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids. PhD Thesis, University of California, Berkeley 2007.

[83] Rostami A.A., Hajaligol M.R., Wrenn S.E. A biomass pyrolysis sub-model for cfd applications. Fuel 83 (2004) 1519-1525.

[84] Burnham A.K. and Braun R.L. Global kinetic analysis of complex materials. Energy and Fuels 13 (1999) 1-22.

[85] Grioui N., Halouani K., Zoulalian A., Halouani F. Thermogravimetric analysis and kinetics modeling of isothermal carbonization of olive wood in inert atmosphere. Thermochimica Acta 440 (2006) 23-30.

[86] Peters B. and Bruch C. Drying and pyrolysis of wood particles : experiments and simulation. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 70 (2003) 233-250.

[87] Front R., Marcilla A., Verdu E., Devessa J. Ind. Eng. Chem. Res. 29 (1990) 1846.

[88] Grönli M.G. and Melaaen M.C. Energy Fuels 14 (2000) 791.

[89] Liden A.G., Berruti F., Sott D.S. Chem. Eng. Commun. 65 (1988) 207.

[90] Girods P. Procédé multi-étagé de valorisation de déchets bois type panneaux de particules. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2008.

[91] Branca C. and Di Blasi C. Global interinsic kinetics of wood oxidation. Fuel 83 (2004) 81-87.

[92] Di Blasi C, Buonanno F, Branca C. Carbon 37 (1999) 1227.

[93] Ghazi Wakili K., Hugi E., Karvonen L., Schnewlin P., Winnefeld F. Thermal behaviour of autoclaved aerated concrete exposed to fire. Cem. Concr. Compos. 62 (2015) 52-8.

[94] Fateh T., Rogaume T., Luche J., Richard F., Jabouille F. Modeling of the thermal decomposition of a treated plywood from thermo-gravimetry and Fourier-transformed infrared spectroscopy experimental analysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 101 (2013) 35-44.

[95] Cueff G. Développement d'un modèle thermomécanique du comportement sous agressions thermiques de matériaux cellulosiques. Application à l'étude de résistance au feu de panneaux de bloc-porte en aggloméré de bois. Thèse de Doctorat de l'université de Bordeaux 2004.

[96] Cueff G., Mindeguia J.-C., Dréan V., Breysse D., Auguin G. Experimental and numerical study of the thermomechanical behaviour of wood-based panels exposed to fire. Construction and Building Materials 160 (2018) 668-678.

[97] Broström M., Nordin A., Pommer L., Branca C., Di Blasi C. Influence of torrefaction on the devolatilization and oxidation kinetics of wood. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 96 (2012) 100-109.

[98] Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Prog. Energy Combust. 34 (2008) 47-90.