



Etude expérimentale et numérique du comportement au feu de végétaux

Jean-Baptiste Tramoni

► To cite this version:

Jean-Baptiste Tramoni. Etude expérimentale et numérique du comportement au feu de végétaux. Sciences de la Terre. Université Pascal Paoli, 2018. Français. NNT : 2018CORT0002 . tel-03448838

HAL Id: tel-03448838

<https://theses.hal.science/tel-03448838>

Submitted on 25 Nov 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.

Thèse présentée pour l'obtention du grade de
DOCTEUR EN COMBUSTION
Mention : Energétique, Génie des Procédés

Soutenue publiquement par
Jean-Baptiste TRAMONI

le 26 Mars 2018

Etude expérimentale et numérique du comportement au feu de végétaux

Directeur(s) :

M Paul-Antoine Santoni, Professeur, Université de Corse
M Frederic Morandini, Ingénieur de recherche, Université de Corse

Rapporteurs :

M Dominique Morvan, Professeur, Aix-Marseille Université
M Pascal Boulet, Professeur, Université de Lorraine

Jury

M Dominique Morvan, Professeur, Aix-Marseille Université
M Pascal Boulet, Professeur, Université de Lorraine
M Olivier Vauquelin, Professeur, Aix-Marseille Université
Mme Anne Ganteaume, Chargée de Recherche, IRSTEA
Mme Virginie Tihay-Felicelli, Maitre de Conférence, Université de Corse
Mme Lucile Rossi, Maitre de Conférence HDR, Université de Corse
M Paul-Antoine Santoni, Professeur, Université de Corse
M Frederic Morandini, Ingénieur de recherche, Université de Corse

A ma grand-mère Micheline

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire des Sciences pour l'Environnement- Unité Mixte de Recherche associée au CNRS 6134. Je tiens à remercier Monsieur Paul-Antoine Bisgambiglia, Professeur à l'Université de Corse et Directeur de l'UMR pour m'avoir accueillie au sein de ce laboratoire.

Je remercie chaleureusement Monsieur Paul Antoine Santoni, Professeur à l'Université de Corse et Directeur scientifique de ma thèse pour sa patience, sa rigueur, ses conseils, sa grande disponibilité et la minutie de ses relectures tout au long de ce travail de thèse.

J'exprime tout ma reconnaissance à Monsieur Frédéric Morandini, Ingénieur de Recherche à l'Université de Corse, et co-directeur scientifique de ma thèse pour son aide précieuse, ses encouragements, ses conseils et son implication au cours de cette thèse.

Je suis très honoré que Messieurs Pascal Boulet et Dominique Morvan aient accepté d'être rapporteurs pour ce travail de thèse. Je tiens à les remercier pour l'attention qu'ils témoignent pour ce travail. Je remercie également Monsieur Olivier Vauquelin et Madame Anne Ganteaume qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury.

Je tiens à remercier Mesdames Virginie Tihay-Felicilli et Lucile Rossi, Maitres de Conférence à l'Université de Corse, pour avoir accepté de juger ce travail et pour les soutiens et conseils apportés tout au long de cette thèse.

Que Madame Yolanda Perez-Ramirez trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour son aide et ses conseils et discussions constructifs concernant les études numériques réalisées au cours de cette thèse.

Je tiens à remercier les membres de l'équipe Feux de forêt de l'Université de Corse pour leur aide et gentillesse dont ils ont fait preuve à mon égard depuis mon arrivée au laboratoire.

Remerciements

Merci à Batti Fillipi, Frédéric Bosseur et Antoine Campana pour leur aide, leurs conseils et le temps qu'ils m'ont accordés sur la prise en main et le lancement des calculs numériques sur les différents serveurs de calculs utilisés.

Merci également à Antoine Pieri pour son aide, sa gentillesse, sa bonne humeur et sa disponibilité lors de la préparation des dispositifs expérimentaux liés à la thèse et des travaux pratiques réalisés au cours de mon monitorat.

Une pensée particulière à mes amis et collègues doctorants : Audrey, Briac, Gauthier, La team Aout, Lara, Tom, Vito, Wani, ainsi que tous les occupants du Bâtiment 018, la team des Géologue et tous les amis de l'extérieur : La team Michels, Jesus, Luc, et plein d'autres, avec qui j'ai passés de très bons moments à Corte et qui ont rendu la déroulement de la thèse plus agréable.

Merci à tout le personnel du SPE et de l'université : Andréa, Hélène, Ingrid, Johan, Julie, Laetitia, Laeti, Marianne, Nelly, Stéphanie pour leur bonne humeur, leurs conseils et les moments de détente passés à la pause-café depuis mon arrivé à l'université.

Enfin, j'exprime ma plus profonde gratitude à ma famille pour son soutien permanent au cours de ces années d'études et de thèse.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES FIGURES	8
TABLE DES TABLEAUX.....	13
NOMENCLATURE.....	14
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.....	17
1.1. ORIGINALITE DE L'APPROCHE	18
1.2. APPROCHES EXPERIMENTALES POUR L'ETUDE DE LA COMBUSTION D'ARBUSTES.....	19
1.2.1. Combustion d'individus	19
1.2.2. Caractérisation structurelle du combustible	20
1.2.3. Méthodes d'allumage.....	21
1.3. REACTION AU FEU DES VEGETAUX : <i>FLAMMABILITY</i>	21
1.3.1. Temps nécessaire à l'allumage : <i>Ignitability</i>	23
1.3.2. Capacité d'un combustible à auto-entretenir sa combustion : <i>Sustainability</i>	23
1.3.3. Intensité et rapidité de la combustion : <i>Combustibility</i>	24
1.3.4. Taux de consommation de combustible : <i>Consummability</i>	24
1.4. MODELISATION ET ETUDES NUMERIQUES DES INCENDIES DE VEGETATION	25
1.4.1. Modèles de propagation d'incendie	25
1.4.2. Test des modèles physiques détaillés	26
1.4.3. Simulation de la combustion d'individus	26
1.5. STRUCTURE DU MANUSCRIT DE THESE	27
CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODE	29
2.1. CONDITIONNEMENT ET CARACTERISATION DE LA VEGETATION	29
2.1.1. Conditionnement des échantillons de ciste	30

Table des matières

2.1.2.	<i>Caractérisation des échantillons de ciste</i>	32
2.2.	COMPORTEMENT AU FEU D'UN ARBUSTE DE CISTE	35
2.2.1.	<i>Calorimétrie à consommation d'oxygène</i>	35
2.2.2.	<i>Protocole expérimental</i>	40
2.3.	EXPERIENCES DE PROPAGATION DE FEU DANS DES LITIERES D'AIGUILLES DE PIN	42
2.3.1.	<i>Configuration expérimentale</i>	42
2.3.2.	<i>Principaux résultats pour les expériences de propagation</i>	44
2.4.	ETUDE DE L'ÉCOULEMENT DANS LA HOTTE DU LSHR	47
2.5.	PRESENTATION DES SERVEURS DE CALCULS	50
CHAPITRE 3.	TEST DE PERFORMANCE DE WFDS	52
3.1.	INTRODUCTION.....	52
3.2.	PRESENTATION DE WFDS ET DES MODIFICATIONS APORTEES	52
3.3.	DIMENSIONNEMENT DU DOMAINE DE CALCUL SANS COMBUSTION	57
3.3.1.	<i>Etude de l'écoulement dans la hotte en modélisant l'ensemble du laboratoire</i>	57
3.3.2.	<i>Etude de l'écoulement en limitant le domaine de calcul à la hotte (LSHR)</i>	62
3.4.	ETUDE PRELIMINAIRE DANS LE CAS DE LA COMBUSTION.....	64
3.4.1.	<i>Calculs préliminaires relatifs au maillage pour les propagations</i>	65
3.4.2.	<i>Dimensionnement de l'allumage</i>	67
3.4.3.	<i>Analyse de sensibilité au maillage</i>	69
3.5.	CONFRONTATION DES PUISSANCES PREDITES PAR WFDS ET DES PUISSANCES MEASUREES POUR DES FEUX SE PROPAGEANT DANS DES LITIERES	73
3.5.1.	<i>Simulation des propagations à plat</i>	76
3.5.2.	<i>Simulation des propagations avec une pente de 20 degrés</i>	79
3.6.	CONCLUSION.....	86
CHAPITRE 4.	COMPORTEMENT AU FEU D'UN BUISSON	88
4.1.	INTRODUCTION.....	88
4.2.	RESULTATS DES METHODES DE CONDITIONNEMENT.....	88
4.3.	RESULTATS DE CARACTERISATION DES CISTES	94
4.3.1.	<i>Répartition massique des différentes classes de particules</i>	95
4.3.2.	<i>Fraction massique des différentes classes de particules suivant la hauteur</i>	96
4.3.3.	<i>Répartition massique d'une même classe de particules suivant la hauteur</i>	100
4.3.4.	<i>Composition des cistes l'été</i>	104
4.4.	RESULTATS DES ESSAIS DE COMPORTEMENT AU FEU D'UN BUISSON	106
4.4.1.	<i>Le critère ignitability</i>	108
4.4.2.	<i>Le critère combustibility</i>	110
4.4.3.	<i>Le critère sustainability</i>	117
4.4.4.	<i>Le critère consumability</i>	118

Table des matières

4.4.5.	<i>Etude statistique de la réaction au feu des cistes.....</i>	122
4.5.	CONCLUSION.....	127
CHAPITRE 5.	SIMULATION DE LA COMBUSTION D'UN ARBUSTE AVEC WFDS. CONFRONTATION MODELE-EXPERIENCE	129
5.1.	INTRODUCTION.....	129
5.2.	SIMULATION DE LA COMBUSTION D'UN ARBUSTE AVEC WFDS.....	129
5.2.1.	<i>Modèle numérique de buisson.....</i>	129
5.2.2.	<i>Simulation de la combustion de cistes secs avec WFDS.....</i>	132
5.2.3.	<i>Simulation de la combustion de cistes humides avec WFDS.....</i>	135
5.3.	ANALYSE DE SENSIBILITE DU CODE WFDS AUX PRINCIPAUX PARAMETRES D'ENTREE.....	141
5.3.1.	<i>Influence de la fraction rayonnée.....</i>	142
5.3.2.	<i>Influence du coefficient de trainée.....</i>	143
5.3.3.	<i>Influence de la capacité calorifique des charbons.....</i>	145
5.3.4.	<i>Influence de la fraction des résidus charbonneux et de leur enthalpie de combustion.....</i>	146
5.3.5.	<i>Influence des paramètres du modèle de dessiccation.....</i>	149
5.3.6.	<i>Influence des paramètres de la loi de pyrolyse.....</i>	151
5.3.7.	<i>Influence des paramètres de la loi de dégradation des résidus charbonneux.....</i>	154
5.4.	ANALYSE DE SENSIBILITE GLOBALE DES PARAMETRES DES TERMES SOURCES.....	160
5.5.	CONCLUSION.....	169
CONCLUSION.....		170
BIBLIOGRAPHIE.....		174
ANNEXES.....		182
A.1.	PRESENTATION DU CISTE DE MONTPELLIER.....	182
A.2.	COURBES DE CORRESPONDANCE DES TENEURS EN EAU.....	183
A.3	CARACTERISATION DES PANNEAUX RADIANTS.....	186
B.1.	COURBES DE VITESSES AUX POSITIONS D'INTERET A, B, D ET E.....	191
B.2.	DETERMINATION DU TEMPS NECESSAIRE POUR ATTEINDRE LE REGIME D'ECOULEMENT ETABLI.....	194
C.	CALCUL DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES CISTES.....	195
D.1.	CALCUL DE LA FRACTION RADIATIVE χ_{rad} POUR LES BRULAGES DE CISTES.....	196
D.2.	ANALYSE DE SENSIBILITE AU MAILLAGE DE L'ECOULEMENT NON REACTIF ET DU FLUX PRODUITS PAR LES PANNEAUX RADIANTS.....	199
D.3.	CALCUL PRELIMINAIRE DE LA TAILLE DES MAILLES POUR SIMULER LE BRULAGE DES CISTES.....	203
RESUME.....		204
ABSTRACT :.....		206

Liste des figures

FIGURE 2-1 : TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE CISTES AU COURS DE L'ANNEE.....	29
FIGURE 2-2 : LIEUX DE PRELEVEMENT	30
FIGURE 2-3 : STRUCTURE DE DECOUPE DU CISTE POUR LA CARACTERISATION : A) VUE DE FACE, B) VUE DE DESSUS	33
FIGURE 2-4 : DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES : A) MISE A L'ETUVE DES BARQUETTES, B) QUANTITE DE PARTICULES POUR UN CISTE	34
FIGURE 2-5 : SEPARATION DES FLEURS (A GAUCHE) ET DES FEUILLES (A DROITE) POUR LES CISTES D'ETE.....	34
FIGURE 2-6 : SCHEMA DU CALORIMETRE ET DE SES CAPTEURS	36
FIGURE 2-7 : PHOTOS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL A) AVANT LA COMBUSTION B) DURANT LA COMBUSTION	41
FIGURE 2-8 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL A) VUE DE COTE B) VUE DU DESSUS	42
FIGURE 2-9: CONFIGURATION EXPERIMENTALE DES FEUX DE LITIERES	43
FIGURE 2-10 : PHOTOS D'UN TEST A) A PLAT ET B) EN PENTE.....	45
FIGURE 2-11 : HRR AU COURS DU TEMPS POUR LES TROIS CHARGES DE LITIERE POUR LES PROPAGATIONS A PLAT ET PHASES DE COMBUSTIONS ASSOCIEES A LA CHARGE 0.9 KG/M ²	46
FIGURE 2-12 : HRR AU COURS DU TEMPS POUR LES TROIS CHARGES DE LITIERE ET POUR UNE PENTE DE 20°	47
FIGURE 2-13 : MESURE DES VITESSES DE L'ECOULEMENT DANS LA HOTTE.....	48
FIGURE 2-14 : VITESSE ET DEVIATION STANDARD MESUREE EN FONCTION DE LA HAUTEUR AU-DESSUS DU POINT A	49
FIGURE 2-15 : VITESSE ET DEVIATION STANDARD MESUREE EN FONCTION DE LA HAUTEUR AU-DESSUS DU POINT C	50
FIGURE 3-1 : LABORATOIRE EXPERIMENTAL INCLUANT LE LSHR ET LES OUVERTURES	58
FIGURE 3-2 : MOYENNE TEMPORELLE DU MODULE DE LA VITESSE ET DEVIATION STANDARD AU-DESSUS DE LA POSITION C POUR LE GRAND DOMAINE DE CALCUL (LABORATOIRE) ET POUR LES DIFFERENTS MAILLAGES	60
FIGURE 3-3 : MOYENNE TEMPORELLE DE LA VITESSE SUIVANT LA HAUTEUR DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUE (MAILLAGE 1) AU-DESSUS DE LA POSITION C.....	60
FIGURE 3-4 : MESURE DE RESOLUTION DE LA TURBULENCE MOYENNE AVEC DEVIATION STANDARD POUR LES DIFFERENTS MAILLAGES	62
FIGURE 3-5 : DOMAINES DE CALCUL LIMITE AU LSHR (A GAUCHE) ET DOMAINE DU LABORATOIRE DE REFERENCE REDECOUPE (A DROITE)	63
FIGURE 3-6 : SIMULATION DE LA VITESSE DANS LA HOTTE DU LSHR : COMPARAISON ENTRE LE GRAND DOMAINE DE CALCUL ET LE DOMAINE LIMITE A LA HOTTE AU POINT C : A) MODULE DE LA VITESSE, B) COMPOSANTE U, C) COMPOSANTE V, D) COMPOSANTE W.	64
FIGURE 3-7 : HRR A L'ALLUMAGE POUR LES CHARGES DE COMBUSTIBLE DE 0.6, 0.9 ET 1.2 KG/M ²	67

Liste des figures

FIGURE 3-8 : INFLUENCE DU TEMPS D'ALLUMAGE SUR LA FORME DU FRONT DE FLAMME POUR UNE CHARGE DE COMBUSTIBLE DE 0.9 KG/M ² : A) ALLUMAGE NUMERIQUE REALISE APRES LA STABILISATION DE L'ECOULEMENT, B) ALLUMAGE NUMERIQUE REALISE AVANT LA STABILISATION DE L'ECOULEMENT	69
FIGURE 3-9 : HRR NUMERIQUE AU COURS DU TEMPS POUR LA CHARGE DE 0.6 KG/M ² POUR DIFFERENTES TAILLES DE MAILLES	72
FIGURE 3-10 : HRR NUMERIQUE AU COURS DU TEMPS POUR LA CHARGE DE 0.9 KG/M ² POUR DIFFERENTES TAILLES DE MAILLES	72
FIGURE 3-11 : HRR NUMERIQUE AU COURS DU TEMPS POUR LA CHARGE DE 1.2 KG/M ² POUR DIFFERENTES TAILLES DE MAILLES	73
FIGURE 3-12 : HRR PREDITS DES GAZ, DES CHAR ET TOTAL POUR UNE PROPAGATION A PLAT AVEC UNE CHARGE DE 0.9 KG/M ²	74
FIGURE 3-13 : PHOTO DU FRONT DE FLAMME EXPERIMENTAL ET IMAGE NUMERIQUE POUR LES CAS A PLAT	74
FIGURE 3-14 : HRR PREDITS DES GAZ, DES CHAR ET TOTAL POUR UNE PROPAGATION EN PENTE AVEC UNE CHARGE DE 0.9 KG/M ² ...	75
FIGURE 3-15 : PHOTO DU FRONT DE FLAMME EXPERIMENTAL ET IMAGE NUMERIQUE POUR LES CAS EN PENTE	75
FIGURE 3-16 : HRR PREDITS ET EXPERIMENTAUX POUR LES PROPAGATIONS A PLAT. GAUCHE : HRR EXPERIMENTAL ET DEVIATION STANDARD ASSOCIEE ET HRR PREDIT. DROITE : HRR PREDIT ET HRR EXPERIMENTAL LE PLUS PROCHE. A) ET B) CHARGE 0.6 KG/M ² , C) ET D) CHARGE 0.9 KG/M ² ET E) ET F) CHARGE 1.2 KG/M ²	76
FIGURE 3-17 : DIFFERENCE INSTANTANEE ENTRE LE HRR TOTAL EXPERIMENTAL ET PREDIT POUR LA CHARGE DE 0.6 KG/M ² AU COURS DU TEMPS	78
FIGURE 3-18 : HRR ET MLR PREDITS ET EXPERIMENTAUX POUR UNE PROPAGATION AVEC UNE CHARGE DE 1.2 KG/M ²	79
FIGURE 3-19 : HRR PREDITS ET EXPERIMENTAUX POUR LES PROPAGATIONS EN PENTE. GAUCHE : HRR EXPERIMENTAL ET DEVIATION STANDARD ASSOCIEE ET HRR PREDIT. DROITE : HRR PREDIT ET HRR EXPERIMENTAL LE PLUS PROCHE. A) ET B) CHARGE 0.6 KG/M ² , C) ET D) CHARGE 0.9 KG/M ² ET E) ET F) CHARGE 1.2 KG/M ²	80
FIGURE 3-20 : HRR PREDIT ET EXPERIMENTAL POUR LES PROPAGATIONS EN PENTE AVEC UNE CHARGE DE 0.9 KG/M ² . A) MC = 5 % B) MC=8%.....	81
FIGURE 3-21 : HRR ET MLR PREDITS ET EXPERIMENTAUX POUR UNE PROPAGATION EN PENTE AVEC UNE CHARGE DE 0.9 KG/M ² AVEC MC=8%.....	82
FIGURE 3-22 : HRR ET MLR PREDITS ET EXPERIMENTAUX POUR UNE PROPAGATION EN PENTE AVEC UNE CHARGE DE 1.2 KG/M ²	83
FIGURE 3-23 : HRR TOTAL, HRR GAZ ET HRR CHAR PREDITS EN FONCTION DU TEMPS POUR LA PROPAGATION EN PENTE AVEC UNE CHARGE DE 1.2 KG/M ²	84
FIGURE 3-24 : FRACTION RADIATIVE NUMERIQUE EN FONCTION DU TEMPS POUR UNE PROPAGATION EN PENTE AVEC UNE CHARGE DE 1.2 KG/M ²	85
FIGURE 3-25 : HRR TOTAL, HRR GAZ ET HRR CHAR EN FONCTION DU TEMPS POUR LA PROPAGATION EN PENTE ET LA CHARGE DE 1.2 KG/M ² SANS HOTTE.....	85
FIGURE 4-1 : M_{ck} AU COURS DU TEMPS DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES	90
FIGURE 4-2 : M_{ckr} AU COURS DU TEMPS DES FEUILLES A DIFFERENTES SAISONS	92
FIGURE 4-3 : M_{ckr} AU COURS DU TEMPS DE LA CLASSE DE PARTICULES 0-2 MM A DIFFERENTES SAISONS.....	93
FIGURE 4-4 : M_{ck} ET LEUR TENDANCE AU COURS DU TEMPS DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES POUR LA SECONDE METHODE DE CONDITIONNEMENT	94
FIGURE 4-5 : FRACTION MASSIQUE DES CLASSES DE PARTICULES A UNE HAUTEUR Z	97
FIGURE 4-6 : FRACTION MASSIQUE DES CLASSES DE PARTICULES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DU CISTE 1	98

Liste des figures

FIGURE 4-7 : FRACTION MASSIQUE DES CLASSES DE PARTICULES EN FONCTION DE LA HAUTEUR A) FEUILLES B) 0-2 MM C) 2-4 MM D) 4-6 MM E) 6-25 MM POUR LES TROIS CISTES	100
FIGURE 4-8 : REPARTITION MASSIQUE D'UNE CLASSE DE PARTICULE K SUIVANT LA HAUTEUR	101
FIGURE 4-9 : REPARTITION MASSIQUE DE CHAQUE CLASSE DE PARTICULES EN FONCTION DE LA HAUTEUR ADIMENSIONNEE POUR LE CISTE 1	102
FIGURE 4-10 : REPARTITION MASSIQUE DES CLASSES DE PARTICULES EN FONCTION DE LA HAUTEUR ADIMENSIONNEE A) 0-2 MM B) 2-4 MM C) 4-6 MM D) 2-4 MM E) 6-25 MM	103
FIGURE 4-11 : LITIERE OBSERVEE SOUS LES CISTES DURANT L'ETE.....	106
FIGURE 4-12 : TEMPS D'ALLUMAGE DES CISTES EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DES FEUILLES	109
FIGURE 4-13 : HRR AU COURS DU TEMPS POUR UNE EXPERIENCE TYPE ET APPROXIMATION DU HRR (HRR_{IGN}) ASSOCIE LORS DE LA PHASE DE CROISSANCE DU FEU.....	111
FIGURE 4-14: DIFFERENTS CAS DE COMBUSTION DE CISTES POUR UN TEMPS DE 30 SECONDES APRES L'ALLUMAGE A) $A < 0.2$; B) $0.2 < A < 0.4$; C) $0.4 < A$	112
FIGURE 4-15 : HRR AU COURS DU TEMPS POUR LES TROIS REGIMES DE COMBUSTIBILITY.....	113
FIGURE 4-16 : DIFFERENTES POSITIONS D'ALLUMAGES ASSOCIES A DES COMBUSTIBILITES DIFFERENTES.	114
FIGURE 4-17 : A) COMBUSTION DU CISTE D'HIVER, B) COMBUSTION DU CISTE D'ETE.....	115
FIGURE 4-18 : PIC DE MLR EN FONCTION DU PIC DE HRR POUR DIFFERENTES SAISONS ASSOCIEES A LEUR DROITE DE TENDANCES ET COEFFICIENT DE DETERMINATION R^2	116
FIGURE 4-19 : DUREE DE FLAMME EN FONCTION DU PIC DE HRR	118
FIGURE 4-20 : FRACTIONS MASSIQUES INITIALES ET RESIDUELLES DES CLASSES DE PARTICULES EN FONCTION DE LA HAUTEUR ADIMENSIONNEE Z^*	120
FIGURE 4-21 : FRACTION MASSIQUE RESIDUELLE DES CISTES BRULEES EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DES FEUILLES	121
FIGURE 4-22 : PARAMETRES DE REACTION AU FEU DANS LE PLAN DES COMPOSANTES PRINCIPALES : A) 1 ET 2 B) 1 ET 3.....	123
FIGURE 4-23 : GRAPHE DES INDIVIDUS DANS LE PLAN PRINCIPAL ASSOCIE AUX TYPES DE REACTION AU FEU	126
FIGURE 4-24 : LES DIFFERENTS TYPES DE REACTION AU FEU (FLAMMABILITY) POUR UN CISTE	127
FIGURE 5-1 : GEOMETRIE CARTESIENNE PEU ADAPTEE A LA MODELISATION DU CISTE A) VUE DE COTE B) VUE DE DESSUS.....	130
FIGURE 5-2 : ENVELOPPE DU MODELE NUMERIQUE DE CISTE	131
FIGURE 5-3 : DOMAINE DE CALCUL ASSOCIE AUX EXPERIENCES DE BRULAGE DE CISTE	134
FIGURE 5-4 : COMPARAISON DES HRR PREDITS ET MESURES AU COURS DU TEMPS POUR UN CISTE SECS	135
FIGURE 5-5 : COMPARAISON DES COMBUSTIONS PREDITES ET OBSERVEES POUR UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7% AUX TEMPS DE A) 20s B) 40 s ET C) 60s APRES L'ALLUMAGE	138
FIGURE 5-6 : HRR PREDIT ET MESURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LA COMBUSTION D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%.....	139
FIGURE 5-7 : HRR DES GAZ ET HRR DES RESIDUS CHARBONNEUX PREDITS EN FONCTION DU TEMPS POUR LA COMBUSTION D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%	139
FIGURE 5-8 : MLR PREDITS DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES EN FONCTION DU TEMPS POUR LA COMBUSTION D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%	141

Liste des figures

FIGURE 5-9 : MLR PREDIT ET MESURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LA COMBUSTION D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%.....	141
FIGURE 5-10 : INFLUENCE DE LA FRACTION RADIATIVE χ_{rad} SUR LE HRR PREDIT (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	143
FIGURE 5-11 : INFLUENCE DU COEFFICIENT DE TRAINEE FCd SUR LE HRR PREDIT (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	144
FIGURE 5-12 : MLR DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES AU COURS DU TEMPS POUR $FCd = 0.7$ ET $FCd = 0.375$ (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	145
FIGURE 5-13 : INFLUENCE DE LA CAPACITE CALORIFIQUE DES CHARS $cp, char$ SUR LE HRR PREDIT (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	146
FIGURE 5-14 : INFLUENCE DE LA FRACTION DE RESIDUS CHARBONNEUX χ_{CHAR} SUR LA PREDICTION DU HRR TOTAL ET DU HRR ISSU DE LA COMBUSTION DES CHARBONS (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	148
FIGURE 5-15 : MLR DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES AU COURS DU TEMPS POUR $\chi_{char} = 0.3$ ET $\chi_{char} = 0.24$ (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	149
FIGURE 5-16 : INFLUENCE DE L'ENERGIE D'ACTIVATION $EH2O$ SUR LA PREDICTION DU HRR (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	150
FIGURE 5-17 : INFLUENCE DU FACTEUR PRE-EXPONENTIEL $AH2O$ SUR LA PREDICTION DU HRR (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	151
FIGURE 5-18 : INFLUENCE DU FACTEUR PRE-EXPONENTIEL $Apyr$ SUR LA PREDICTION DU HRR TOTAL (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	152
FIGURE 5-19 : INFLUENCE DE L'ENERGIE D'ACTIVATION $Epyr$ SUR LA PREDICTION DU HRR TOTAL (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	153
FIGURE 5-20 : MLR DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES AU COURS DU TEMPS POUR $Epyr$ ET $Epyr - 20\%$ (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	154
FIGURE 5-21 : INFLUENCE DE L'ENERGIE D'ACTIVATION $Echar$, SUR LA PREDICTION DU HRR ISSUS DE LA COMBUSTION DES CHARBONS (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	155
FIGURE 5-22 : INFLUENCE DE L'ENERGIE D'ACTIVATION $Echar$ SUR LA PREDICTION DU HRR (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	156
FIGURE 5-23 : INFLUENCE DU FACTEUR PRE-EXPONENTIEL $Achar$ SUR LA PREDICTION DU HRR TOTAL (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	157
FIGURE 5-24 : INFLUENCE DU FACTEUR PRE-EXPONENTIEL $Achar$ SUR LA PREDICTION DU HRR ISSUS DE LA COMBUSTION DES CHARBONS (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%)	158
FIGURE 5-25 : HRR TOTAL ET HRR ISSU DE LA COMBUSTION DES CHARBONS AU COUR DU TEMPS POUR $Achar = 430, 150$ ET $Achar = 215 \text{ ms}^{-1}$ (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	159
FIGURE 5-26 : MLR DES DIFFERENTES CLASSES DE PARTICULES AU COURS DU TEMPS POUR $Achar = 430$ ET $Achar = 215 \text{ ms}^{-1}$ (CAS D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%).....	160
FIGURE 5-27 : DIAGRAMME DE PARETO NORMALISE ASSOCIE AU PIC DE HRR	163
FIGURE 5-28 : GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX ASSOCIE AU PIC DE HRR	163

Liste des figures

FIGURE 5-29 : DIAGRAMME DE PARETO NORMALISE ASSOCIE AU PIC DE MLR	164
FIGURE 5-30 : GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX ASSOCIE AU PIC DE MLR.....	164
FIGURE 5-31 : DIAGRAMME DE PARETO NORMALISE ASSOCIE AU TAUX DE CONSOMMATION	166
FIGURE 5-32 : GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX ASSOCIE AU TAUX DE CONSOMMATION.....	166
FIGURE 5-33 : DIAGRAMME DE PARETO NORMALISE ASSOCIE A LA DUREE DE FLAMME	167
FIGURE 5-34 : GRAPHIQUE DES EFFETS PRINCIPAUX ASSOCIE A LA DUREE DE FLAMME.....	168

Table des tableaux

TABLEAU 1-1 : PARAMETRES ASSOCIES AUX CRITERES DE FLAMMABILITY SUIVANT LES AUTEURS.....	22
TABLEAU 2-1 : HAUTEURS DES LITIERES.....	44
TABLEAU 3-1 : TEMPS DE CALCUL POUR LES DIFFERENTS MAILLAGES	63
TABLEAU 3-2 : LONGUEURS CARACTERISTIQUES ET TAILLES DE MAILLES ASSOCIEES	66
TABLEAU 3-3 : PARAMETRES D'ENTREE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES REQUIS PAR WFDS	70
TABLEAU 4-1 : TENEUR EN EAU INITIALE DES FEUILLES ET BRINDILLES DE 0-2 MM DE CISTES	91
TABLEAU 4-2 : DIMENSIONS ET MASSES DES CISTES CARACTERISES.....	95
TABLEAU 4-3: REPARTITION MASSIQUE DES CLASSES DE PARTICULES.....	96
TABLEAU 4-4 : REPARTITION MASSIQUE DES CLASSES DE PARTICULES PRESENTES DANS LES CISTES D'ETE ET MASSES ATTENDUES POUR UN CISTE D'AUTOMNE.....	105
TABLEAU 4-5 : PARAMETRES LIES AUX CRITERES DE REACTION AU FEU ETUDIES.....	107
TABLEAU 4-6 : VALEURS DES PARAMETRES POUR LES ESSAIS DE COMPORTEMENT AU FEU DES CISTES.....	107
TABLEAU 4-7: PLAN (CP1,CP2)	124
TABLEAU 5-1 : DIMENSIONS ET MASSES DES CLASSES DE PARTICULES ASSOCIEES A CHAQUE ETAGE POUR UN CISTE MOYEN DE 1.5 KG	131
TABLEAU 5-2 : VOLUME DES FRUSTRUM ET MASSES VOLUMIQUES APPARENTES DES CLASSES DE PARTICULES SUIVANT LA HAUTEUR	132
TABLEAU 5-3 : PROPRIETES DES CLASSES DE PARTICULES COMPOSANT LES CISTES.....	132
TABLEAU 5-4 : PARAMETRES D'ENTREE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES REQUISES PAR WFDS	133
TABLEAU 5-5 : RECAPITULATIF DES MASSES PERDUES EXPERIMENTALEMENT AVANT ALLUMAGE POUR UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7±2 %	137
TABLEAU 5-6 : CONFRONTATION DES PREDICTIONS DU MODELE ET DES DONNEES EXPERIMENTALES POUR LA COMBUSTION D'UN CISTE AVEC UNE TENEUR EN EAU DES FEUILLES DE 7%	138
TABLEAU 5-7 : FRACTION MASSIQUE DE CHARBONS, NOMBRE D'ATOMES DE CARBONE ET ENTHALPIE DE COMBUSTION DES GAZ UTILISES POUR LES DIFFERENTS CALCULS	147
TABLEAU 5-8 : VALEURS HAUTES ET BASSES DES PARAMETRES	161
TABLEAU 5-9 : PLAN D'EXPERIENCES ET VALEURS DES VARIABLES DE SORTIE.....	161

Nomenclature

A	Coefficient pré-exponentiel des lois d'Arrhenius
c_p	Capacité calorifique
d_x	Taille de maille
E_{char}	Energie d'activation des résidus charbonneux
E_{H_2O}	Energie d'activation de la dessiccation
E_{O_2}	Constante calorifique
E_{pyr}	Energie d'activation de la pyrolyse
F_{CD}	Facteur de coefficient de trainée
h	Hauteur
h_b	Hauteur de la litière
h_c	Coefficient de transfert convectif
h_h	Hauteur de houppier
H	Hauteur du ciste
m	Masse
$\dot{m}$	Débit massique
M	Masse molaire
MC	Teneur en eau sur base sèche
n	Coefficient Stoechiométrique
P	Pression
$\dot{q}$	Débit calorifique
$\dot{q}'$	Intensité linéaire
$\dot{q}_{c,b}'''$	Source de chaleur convective

Nomenclature

$\dot{q}_{r,b}''$	Source de chaleur radiative
R	Vitesse de réaction
t_{ign}	Temps d'allumage
t_{fl}	Durée de flamme
T	Température
V	Volume
X	Fraction massique
z_c	Taille caractéristique du feu
$\emptyset$	Diamètre

Symboles grecs

α	Coefficient de croissance à l'allumage
α_{char}	Fraction d'énergie de l'oxydation des charbons absorbée par le combustible solide
β_{char}	Constante de l'équation d'oxydation des résidus charbonneux
β_e	Compacité de la phase solide
$\gamma(z)$	Fraction massique à l'étage z
Γ	Pourcentage massique
δ_R	Longueur d'extinction
Δh_{char}	Enthalpie de réaction des résidus charbonneux
Δh_{pyr}	Enthalpie de réaction de la pyrolyse
Δh_{vap}	Enthalpie de réaction de la vaporisation
ΔH_c	Enthalpie de combustion
ζ	Répartition massique
η	Taux de consommation
ρ	Masse volumique
ρ_b	Masse volumique apparente
σ_e	Rapport surface-Volume
ϕ	Facteur de consommation

Nomenclature

Φ	Flux radiatif incident
χ	Fraction massique
χ_{rad}	Fraction rayonnée

Indices

b	Brulé
$char$	Résidu charbonneux
e	Element
f	Feuilles
h	Humide
k	Classe de particule
$line$	Linéaire
max	Maximum
r	Résiduel
s	Sec

Exposants

A	Analyseur
r	Résiduel
°	Avant combustion

Chapitre 1. Introduction

Chaque année, des millions d'hectares de végétation sont ravagés par les incendies de végétation à travers la planète. A l'échelle des régions méditerranéennes, les moyens de prévention et de lutte mis en œuvre ces quarante dernières années ont permis de diminuer la fréquence des incendies et l'étendu des surfaces parcourues (San-Miguel-Ayanz et al., 2016). Toutefois les événements tragiques de l'année 2017 avec 108 morts au Portugal et 42 aux Etats-Unis montrent que les feux de végétation constituent une problématique aux effets imprévisibles. Ils provoquent des dégâts importants d'un point de vue humain, économique et écologique. Des aménagements forestiers sont mis en place pour limiter la propagation de ces incendies et ainsi réduire leurs impacts. La technique la plus utilisée consiste à diminuer la charge de combustible afin d'affaiblir la puissance des incendies et de ralentir leur propagation en couplant ces zones à des moyens de lutte. Cependant, ces aménagements sont réalisés à dire d'experts sans fondements scientifiques. Face à ce type de problématique opérationnelle, la communauté scientifique étudie la propagation des incendies de végétation dans le double objectif d'améliorer les connaissances sur leur comportement et de fournir des outils d'aide à la décision. Pour cela, elle développe des approches expérimentales et de modélisation. Si les études expérimentales de terrain présentent l'avantage de s'approcher de l'échelle du phénomène, elles sont cependant coûteuses et peu reproductibles. L'amélioration des ressources de calcul et de la capacité des modèles à capter les processus physiques impliqués dans la combustion permet depuis plusieurs années de limiter ces coûts en réalisant des études numériques. Ces modèles sont toutefois toujours en cours de validation et nécessitent la réalisation d'expériences en laboratoire et sur le terrain pour confronter les prédictions des modèles. Ce chapitre d'introduction présente différents travaux expérimentaux et numériques réalisés sur la dynamique de combustion des incendies de végétation en portant une attention particulière sur la combustion d'arbustes, catégorie de végétation en grande partie concernée par ces feux. Après avoir situé notre approche dans ce contexte, les connaissances sur la combustion et la composition d'individus isolés sont exposés. L'ensemble des critères caractérisant la réaction au feu de végétaux, habituellement dénommé en anglais par le terme *flammability* d'après le

concept introduit par Anderson (1970), est ensuite développé. Enfin, nous présentons les modèles numériques existants et les études relatives à la validation des modèles physiques-détaillés et leur utilisation dans l'étude de la dynamique de combustion d'individus.

1.1. Originalité de l'approche

De nombreuses études ont été réalisées afin de mieux comprendre la dynamique de combustion des incendies de végétation. Ces travaux de recherches ont été réalisés pour de nombreux types de végétations et à différentes échelles. Chaque échelle d'étude permet d'améliorer les connaissances dans un domaine spécifique. L'échelle la plus petite, celle de la matière, permet d'étudier la dégradation thermique des végétaux et d'obtenir leur cinétique de combustion ou de les caractériser chimiquement (Ghetti et al., 1996; Leroy et al., 2006). L'échelle du matériau se concentre quant à elle sur les propriétés du combustible qui est considéré dans son ensemble. Les travaux sont réalisés généralement à l'aide d'un cône calorimètre (Babrauskas, 2006; Bartoli et al., 2011; Tihay et al., 2014) ou d'un FPA (Fire Propagation Apparatus) (Schemel et al., 2008; El Houssami et al., 2016). Ces appareils de mesure permettent d'estimer la puissance calorifique (HRR), la perte de masse, et d'autres grandeurs telles que le coefficient d'extinction des fumées ou la consommation et la production de certains gaz (O_2 , CO_2 et CO). L'échelle du système est similaire à l'échelle du matériau pour des combustibles de taille plus importante. Les flammes obtenues pouvant atteindre une hauteur de l'ordre du mètre. Les études réalisées à cette échelle portent aussi bien sur des combustions statiques que sur des feux en propagation avec un calorimètre grande échelle LSHR (Santoni et al 2010, 2011, Barboni et al 2012 ; Tihay et al. 2012 ; morandini et al 2013). Les grandeurs mesurées sont celles de l'échelle du matériau auxquels peuvent être ajoutées les géométries de flammes, les températures ou les vitesses de propagation (Viegas et al., 2002). Plusieurs configurations peuvent être étudiées en faisant varier certains paramètres environnementaux, tels que le vent ou la pente, qui influencent de façon significative la dynamique de combustion des incendies de végétation en milieu ouvert (Dupuy et al., 2011; Morandini et al., 2002). A cette échelle du système, de nombreuses études ont porté sur la propagation de feux de litières d'aiguilles et feuilles (Guijarro et al., 2002; Curt et al., 2011; Ganteaume et al., 2014) et dans une moindre mesure sur la combustion de buissons (Plucinski, 2010; Santana et Mars, 2014). Enfin, l'échelle du terrain est la plus proche de l'aléa incendie de végétation. Bien que les expériences à cette échelle permettent d'appréhender au mieux le comportement des incendies, celles-ci sont couteuses et difficiles à mettre en œuvre. De plus, certaines grandeurs comme la puissance ne sont pas directement accessibles. Les

études réalisées à cette échelle portent principalement sur des propagations de feu dans des strates de maquis (Viegas et Pita, 2002 ; Morandini et al. 2006; Santoni et al. 2006), d'herbes (Cheney et al., 1993) ou de bois (Cheney et Gould, 1995; Stocks et al. 2004). Bien que les études soient nombreuses pour les différentes échelles, peu d'entre elles portent sur des combustibles naturels et isolés à l'échelle du système, tels que des échantillons d'arbustes entiers (Tachajapong, 2014; Li et al., 2017). Les travaux réalisés, aussi bien expérimentaux que numériques, à cette échelle portent principalement sur des combustibles reconstitués et homogènes (litières). Afin d'acquérir une meilleure compréhension de la dynamique de combustion d'une végétation constituée d'arbustes, il est nécessaire de connaître tout d'abord le comportement d'individus isolés. Ce travail de thèse s'intéressera donc principalement à ce type de combustibles en développant une double approche expérimentale et numérique. La combustion d'arbuste sera étudiée expérimentalement en portant une attention particulière aux principales grandeurs caractérisant la réaction au feu des individus, comme la puissance. L'étude numérique sera réalisée grâce à un modèle détaillé afin d'identifier les contributions des différentes familles de particules constituant l'arbuste dans sa dynamique de combustion. Les travaux issus de la littérature sur ce type de végétaux sont présentés plus en détails dans les sections suivantes.

1.2. Approches expérimentales pour l'étude de la combustion d'arbustes

1.2.1. Combustion d'individus

Peu d'expériences portent sur la combustion d'individus isolés, sans modification de leur propriétés naturelles (structure, densité apparente...) qui influencent leur dégradation thermique (Plucinski et Anderson, 2008; Ganteaume et al., 2014; Li et al., 2017). Les études identifiées sont récentes et portent dans un premier temps sur la combustion de sapins douglas (Babrauskas et al., 2001 et 2006; Mell et al., 2009). L'effet de la teneur en eau sur la combustion des sapins a été étudié sous un calorimètre à grande échelle afin d'obtenir le HRR au cours du temps. Il a été mis en évidence une diminution du pic de HRR (Babrauskas et al., 2001) et de la chaleur effective de combustion (Babrauskas, 2006) avec l'augmentation de la teneur en eau des végétaux. En plus de la teneur en eau, Mell et al. (Mell et al., 2009) ont étudié la combustion de deux tailles d'individus afin de fournir une base de données pour tester le code de calcul WFDS. Les études expérimentales sur les buissons de type maquis sont peu nombreuses et portent sur la chamise (*Adenostoma fasciculatum*) (Tachajapong, 2014; Li et al., 2017). Li et

al. (2017) ont montré que la vitesse de propagation croît lorsque la masse volumique apparente augmente ou que la teneur en eau diminue. La position d'allumage influence également la vitesse de propagation ainsi que le temps d'atteinte du pic de vitesse de perte de masse (MLR). Enfin, il convient de noter que certains auteurs ont étudié la combustion de végétations dont la morphologie est proche de celle des arbustes. Par exemple, (Overholt et al., 2014) ont utilisé de l'herbe haute (*Schizachyrium scoparium*), pour étudier la combustion de touffes d'herbe reconstituées en fonction principalement de la teneur en eau ainsi que de la position d'allumage.

1.2.2. Caractérisation structurelle du combustible

Les végétaux sont des combustibles complexes composés de particules de propriétés différentes (taille, composition). Des études ont mis en évidence l'importance de certaines propriétés structurelles et géométriques des végétaux (masse volumique apparente, rapport surface volume, ...) sur leur dynamique de combustion (McAllister et Finney 2014; Ganteaume et al., 2014). Ainsi, de nombreuses études ont visé à caractériser la végétation. Cette caractérisation porte d'une part sur les propriétés des particules composant le végétal, comme le rapport surface-volume ou la masse volumique (Countryman et Philpot, 1970; Rundel et Parsons, 1979; Papio et Trabaud, 1990; Shen et Fletcher 2015). Elles portent d'autre part sur la répartition massique des tailles de particules, qui a par exemple été étudiée pour plusieurs buissons d'une même espèce (Countryman et Philpot, 1970). L'impact de paramètres tels que l'âge des buissons (Rundel et Parsons, 1979) ou leur hauteur (Li et al., 2017) sur la répartition massique a également été examiné. Enfin, Prince et al. (2014) proposent un modèle de chamise et de genévrier de l'Utah d'après des données mesurées (8 chamises et 22 genévriers) et présentes dans la littérature. Le modèle est basé sur le système de Lindenmayer (Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990) et fournit un modèle de répartition spatiale des classes de particules composants les buissons pour un diamètre de houppier, une hauteur (pour le genévrier) et une masse globale donnée.

1.2.3. Méthodes d'allumage

De nombreuses méthodes d'allumage sont utilisées dans les études de combustion de végétaux. Ces méthodes varient en fonction de l'échelle, du combustible étudié et des objectifs des études. En ce qui concerne l'échelle du matériau, de nombreuses études ont été réalisées grâce au cône calorimètre (Weise et al., 2005; Bartoli et al., 2011; Tihay et al., 2014). Le combustible est soumis à un flux radiatif couplé à un allumage piloté par une étincelle. Les études à cette échelle permettent de connaître le flux critique nécessaire à l'amorçage de la combustion (Delichatsios et al., 1991; Spearpoint et Quintiere 2001). Les méthodes d'allumage à l'échelle du système sont variées. Dans le cas de propagation de feux de litières, l'allumage peut être ponctuel (Plucinski et Watchpole, 2001) ou linéaire suivant le front de flamme désiré (Morandini et al. 2013, Tihay et al., 2012 2014). Dans le cas des expériences de combustion portant sur les individus, l'allumage peut être réalisé par l'intermédiaire d'une source radiative (Overholt et al., 2014) ou ponctuelle telle qu'un bruleur propane (Mell et al., 2009), une flamme pilote (Babrauskas, 2001 et 2006) ou de la végétation morte placée sous le buisson (Li et al. 2017). Des propagations de feux de litières ont également servis à la réalisation de sources d'allumage linéaires (Li et al. 2017). Enfin, Tachajapong et al. (2014) couplent l'utilisation d'un briquet à buche linéaire à propane et d'alcool éthylique vaporisé à l'extrémité de l'individu.

1.3. Réaction au feu des végétaux : *Flammability*

Afin d'étudier la dynamique de combustion de la végétation, Anderson (1970) a introduit le concept de réaction au feu, ou *flammability*. Il définit celle-ci comme une combinaison de trois critères : l'*ignitability*, la *sustainability* et la *combustibility*. Martin et al. (1994) complète cette notion avec un quatrième critère, la *consummability*. De nombreuses études ont été réalisées afin d'étudier la réaction au feu de la végétation mais celles-ci ne se concentrent que sur certains critères et non sur la globalité de la *flammability*. Bien que les résultats obtenus dépendent de l'échelle considérée (Etlinger et Beall, 2005; Madrigal et al., 2013), la réaction au feu de la végétation est généralement étudiée à l'échelle du matériau (Dimitrakopoulos et Papaianou, 2001; Weise et al., 2005) ou à l'échelle du système sous forme de litière (Scarff et Westoby, 2006; Magalhães et Schwilk, 2012; Ganteaume et al., 2014). Lors de ces travaux, l'influence de nombreuses propriétés des combustibles (tels que la teneur en eau, la compacité ou le rapport surface-volume) ont été investiguées. Le Tableau 1-1 recense ci-dessous la liste des paramètres utilisés par différents auteurs pour étudier chaque critère.

Tableau 1-1 : Paramètres associés aux critères de *flammability* suivant les auteurs

Auteur	<i>Ignitability</i>	<i>Sustainability</i>	<i>Combustibility</i>	<i>Consumability</i>
Anderson (1970)	$t_{ign} (s)$	<i>Capacité d'auto entretien</i>	$\frac{m}{\dot{m}_{max}} (s)$	
Martin (1994)	$\frac{t_{ign}}{\Phi}$ (s.m ² /kW)		ROS (cm.s ⁻¹)	$m_r (kg)$
Fonda (2001)	$t_{ign} (s)$	$t_{fl} (s)$ $t_{ember} (s)$ $t_{comb} (s)$	$H_{fl} (cm)$	$\dot{m} (kg/s)$ $\frac{m_b}{m_h} (\%)$
Guijarro (2002)	$t_{ign} (s)$		ROS (cm.s ⁻¹) $\dot{m} (kg/s)$ $H_{fl,max} H_{fl,min} (cm)$	$\frac{m_b}{m_h} (\%)$
Ganteaume (2011)	$t_{ign} (s)$ N_{ign_reussi}	$t_{fl} (s)$	ROS (cm.s ⁻¹) $T_{fl} (°C)$ $H_{fl,max} (cm)$	$\frac{m_b}{m_s} (\%)$
Santana et Mars (2014)	$t_{ign} (s)$ ROS (cm.s ⁻¹)	$t_{fl} (s)$ $t_{T>300°C} (s)$	$T_{max} (°C)$ $H_{fl,max} (cm)$	$\dot{m} (kg/s)$ $\frac{m_r}{m} (\%)$

avec t_{ign} , le temps d'allumage, Φ la densité flux incident, N_{ign} le nombre d'allumages réussis, ROS la vitesse de propagation, t_{fl} , t_{ember} et t_{comb} , respectivement les durées de flamme, de smoldering et de combustion, $t_{T>300°C}$ le temps durant lequel la température dans la zone de combustion est supérieure à 300°C, m la masse initiale de végétal, HRR_{max} la puissance maximale dégagée, H_{fl} la hauteur de flamme, T_{fl} la température de flamme, m_r , m_b , m_s , m_h respectivement les masses résiduelles, brûlées, sèches et humides et $\dot{m}$ le débit de perte de masse.

1.3.1. Temps nécessaire à l'allumage : *Ignitability*

L'*ignitability* a été définie par Anderson (1970) comme étant le temps nécessaire à l'allumage d'un combustible soumis à une source de chaleur. Ce critère est généralement défini par le temps d'allumage de l'échantillon végétal, t_{ign} . Cependant, Martin (1994) et al. ont proposé de lier ce critère à la densité de flux auquel le combustible est soumis, tel que l'*ignitability* corresponde au ratio entre le temps d'allumage et la densité de flux incidente. Ganteaume et al. (2011) ont complété ce critère en prenant en compte le nombre d'allumages réussis.

Plusieurs facteurs influencent l'allumage des végétaux. Par exemple, la teneur en eau, est le paramètre dont l'effet a été principalement analysé lors des études de ce critère (Weise et al., 2005; McAllister et al., 2014a; Picket et al., 2010). Dans le cas d'un allumage par rayonnement, le niveau de la densité de flux auquel est soumis le combustible conditionne également le temps d'allumage (Bartoli et al., 2011; Tihay et al., 2014). Enfin, McAllister et Finney (2014) ont montré l'influence de la géométrie (épaisseur, rapport surface-volume) du combustible (vivant et mort) sur l'allumage dans le cas d'un chauffage convectif à partir d'air chaud (de température comprise entre 500 et 600°C). En plus de sources radiatives et convectives, de nombreuses méthodes d'allumage ont également été utilisées pouvant influencer la réussite de l'allumage (Plucinski et Anderson 2008). Ces méthodes font intervenir généralement des sources ponctuelles comme du coton imbibé d'alcool (Plucinski et Anderson, 2008), des morceaux de bois et d'écorce en feu (Guijarro et al., 2002), des allumettes (Tanskanen, 2002) ou des cigarettes Xanthopoulos et al., 2006).

1.3.2. Capacité d'un combustible à auto-entretenir sa combustion : *Sustainability*

Anderson (1970) définit la *sustainability* comme la capacité d'un combustible à auto-entretenir sa combustion. Dans le cadre de feux à l'échelle du terrain, Martin et al. (1994) complètent cette définition par la capacité du combustible à maintenir la propagation du feu, de chaque particule de combustible à la suivante mais ne lui associe pas de paramètre. La durée de flamme, t_{fl} , est généralement associée à ce critère.

La *sustainability* est liée à la composition chimique du combustible, ainsi qu'à la taille des particules impliquées, sa masse volumique, sa teneur en eau, sa continuité, sa quantité et sa compacité (Martin et al., 1994). Les travaux étudiant ce critère à l'échelle du laboratoire portent principalement sur des litières (feuilles ou aiguilles) et des strates arbustives (Weise et al., 2005;

Plucinski, 2010; Ganteaume et al., 2011, 2014). Marsden-Smedley et al. (2001) ont également montré que les études à grandes échelles permettent une meilleure compréhension de l'effet des conditions environnementales sur ce critère. En effet, pour obtenir les valeurs associées à ce critère dans le cadre de feux réels il faut se placer dans les mêmes configurations, la durée de flamme étant liée également à la topologie du terrain et aux conditions météorologiques (Ganteaume et al., 2011; Fernandes et al., 2008).

1.3.3. Intensité et rapidité de la combustion : *Combustibility*

La *combustibility* est définie par Anderson (1970) comme l'intensité et la rapidité de la combustion. De nombreux paramètres ont été pris en compte dans l'analyse de ce critère. Ainsi, Anderson (1970) propose d'étudier la *combustibility* par le temps spécifique de combustion, définie comme la masse de l'échantillon divisé par la vitesse maximale de combustion. Ce paramètre est cependant peu utilisé au profit des propriétés de la flamme (hauteur ou température) ou de la vitesse de propagation. L'utilisation de la calorimétrie à consommation d'oxygène est cependant rare et, à l'heure actuelle, peu d'études se basent sur la mesure du HRR pour caractériser la *combustibility* (Etlinger et Beall, 2004; White et Zipperer, 2010; Scarff et Westoby 2006).

La structure et la composition du combustible végétal influencent la *combustibility* (Chandler, 1983; Santana 2011). Ainsi, une proportion plus importante de particules mortes ou des feuilles plus fines entraîne une augmentation de l'énergie libérée (Behm 2004). Dans le cadre de litières, une augmentation de la masse volumique apparente diminue la vitesse de propagation (Ganteaume et al., 2014) alors qu'une augmentation de la hauteur du lit entraîne une augmentation de la hauteur de flamme (Ganteaume et al., 2011). Ganteaume et al. (2014) mettent également en évidence que la reconstruction de litières entraîne une diminution de hauteur de flamme et de vitesse de perte de masse pouvant être expliqué par la modification de la compacité et de la composition de la litière.

1.3.4. Taux de consommation de combustible : *Consummability*

Martin et al. (1994) ont défini la *consummability* comme le degré auquel un combustible a été consommé par le feu. Ce critère a principalement été étudié grâce à trois paramètres. La fraction massique brûlée, définie comme le rapport entre la masse brûlée et la masse de combustible humide (Fonda et al., 2001) ainsi que la fraction massique résiduelle (rapport entre la masse

finale et initiale) (Santana et Marrs, 2014 ; Madrigal et al., 2012) ont été utilisées pour définir ce paramètre. La vitesse de perte de masse (MLR) lui a également été associée (Santana et Marrs, 2004). Le taux de consommation de combustible est influencé par la teneur en eau du combustible (Santana et Marrs, 2014; Dahale et al., 2013). Ganteaume et al. (2011) ont également montré que, dans le cas de litières, la reconstruction du combustible affecte le taux de consommation. De plus, la compacité, la masse volumique apparente et la composition de la litière jouent un rôle important sur ce critère (Ganteaume et al. 2014). Il a été également observé (Burrows, 2001) que seules les particules de faibles diamètres ($< 6\text{mm}$) participent activement à la combustion. Ainsi, la *consummability* dépend également du taux de présence des plus grandes tailles de particules.

1.4. Modélisation et études numériques des incendies de végétation

1.4.1. Modèles de propagation d'incendie

Les modèles de propagation d'incendie sont généralement classés en trois catégories : statistiques, empiriques et physiques. Chacune de ces catégories possède un domaine d'utilisation spécifique suivant les phénomènes étudiés et leurs échelles. Les modèles statistiques sont basés sur une approche statistique de la propagation des feux dans des conditions données (McArthur, 1967). Les caractéristiques des incendies sont corrélées aux propriétés des combustibles et de l'environnement. Leur utilisation est généralement limitée aux conditions pour lesquelles ces modèles sont développés. Les modèles empiriques sont des modèles de comportement basés sur une équation globale de conservation de l'énergie (Frandsen, 1971) et sur l'hypothèse que l'énergie transportée vers le combustible imbrûlé est proportionnelle à celle dégagée par la combustion (Rothermel, 1972 ; FARSITE: Finney, 1998; BEHAVE: Andrews, 1986). Ces modèles sont généralement utilisés pour estimer la propagation des incendies de végétation à grande échelle. Ils fournissent des données sur la vitesse de propagation, la position du front de flamme et les paramètres géométriques des flammes à partir des données topologiques du terrain, de la vitesse du vent et certaines caractéristiques du combustible (charge, hauteur, teneur en eau, masse volumique apparente etc.). Les modèles physiques sont basés sur la résolution des équations gouvernant la physique et la chimie de la combustion. Ces modèles peuvent être classés en deux catégories : les modèles physiques simplifiés (Santoni et al., 1998; Koo et al., 2005, Balbi et al. 2007, morandini et al. 2000, 2001, 2002, 2005, Chatelon et al., 2017), qui prennent principalement en compte les

transferts thermiques, et les modèles physiques détaillés (WFDS: Mell et al., 2007; FIRESTAR: Morvan et al., 2001; UoC-R: Zhou et al., 2005) qui modélisent les écoulements réactifs et radiatifs dans un milieu multiphasiques. Les modèles physiques-détaillés peuvent être différenciés suivant les modèles de combustion, de rayonnement et de résolutions de la turbulence (LES, RANS ...) utilisés (Sullivan, 2009). Les modèles physiques-détaillés sont cependant coûteux en ressources informatiques ce qui réduit leur utilisation d'un point de vue spatial.

1.4.2. Test des modèles physiques détaillés

En raison des capacités informatiques grandissantes et de leur aptitude à modéliser la physique, les modèles physiques-détaillés d'incendie sont de plus en plus utilisés. Ceux-ci sont cependant, toujours en cours de test. Ils ont été testés pour différents types de combustibles et à différentes échelles. Récemment, El Houssami et al. (2016) ont testé le modèle ForestFireFOAM sur des expériences réalisées à l'échelle du matériau, au FPA, pour des aiguilles de pins. Les simulations à l'échelle système sont généralement réalisées sur des litières d'herbe (Porterie et al., 2000) ou de maquis (Zhou et al., 2005 et 2007). Enfin ces modèles ont également été testés à l'échelle du terrain dans le cas de feux de prairies (Mell et al., 2007; Morvan et al., 2009) et de garrigue (Morvan et al. 2003 et 2015).

1.4.3. Simulation de la combustion d'individus

Les études portant sur la simulation de la combustion d'arbustes isolés sont rares et se basent sur peu de travaux expérimentaux existants (Li, 2011; Mell et al., 2009; Overholt et al., 2014). Mell et al. (2009) couplent leur étude expérimentale de la combustion du sapin douglas à une étude numérique réalisée avec le code de calcul WFDS. Lors de ces simulations, les particules ayant entièrement pyrolysé sont retirées pour limiter leurs effets sur l'écoulement au sein de l'arbre. Les grandeurs prédites (MLR et flux radiatifs) sont proches de celles mesurées expérimentalement, toutefois la combustion des résidus charbonneux n'était pas modélisée. Overholt et al. (2014) réalisent également des expériences couplées à des simulations avec WFDS. Une analyse de sensibilité sur la teneur en eau, la charge de combustible et le rapport surface-volume a mis en évidence l'impact de la teneur en eau et le faible effet des deux autres paramètres sur la vitesse de propagation. Les expériences réalisées par Li et al. (2011) ont quant à elles servi de base aux simulations réalisées par Dahale et al. (2013 et 2015) puis Padhi et al.

(2016 et 2017). Dahale et al. (2013) ont développé un code de calcul spécifique afin de reproduire les expériences conduites par Li et al. (2011). Dans ce cas, bien que les résultats de vitesses de propagations verticales (au sein de l'échantillon), de durée de combustion et de masse consommée soient en accord avec les résultats obtenus par Li et al. (2011), la vitesse de propagation horizontale est sous-estimée de 34 % et le pic de MLR est surestimé de 44%. L'influence de la teneur en eau et de la masse volumique apparente est ensuite étudiée numériquement par Dahale (2013). Pour cela, deux types de masses volumiques apparentes sont utilisés, une constante et l'autre variant suivant la hauteur. Comme il a été observé expérimentalement, la vitesse de propagation prédite croît lorsque la masse volumique apparente augmente ou que la teneur en eau diminue. Par la suite, les interactions entre deux et trois individus ont été étudiées pour des espacements entre houppiers de 0 à 1 fois leur diamètre à partir du même modèle (Dahale et al., 2015). Puis le code de Dahale et al. (2013) a été repris par Padhi et al. (2016 et 2017) afin de trouver numériquement des corrélations entre la flottabilité, les profils de températures et de vitesses, la hauteur de flamme et la puissance (2016). Il doit être cependant noté qu'aucun allumage n'est réalisé. La vitesse de pyrolyse, la température et la masse du combustible ont été considérée comme constante afin de maintenir une phase de combustion stationnaire. Les travaux de Dahale et al. (2015) ont finalement été repris par Padhi (2017) pour étudier l'influence de l'espacement entre les buissons, de leur taille et de la vitesse du vent pour une masse volumique apparente constante. Padhi et al. (2017) soulignent également la forte influence de la nature de la surface d'allumage sur les résultats observés.

1.5. Structure du manuscrit de thèse

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse vise à améliorer nos connaissances fondamentales sur la dynamique de combustion d'arbustes naturels et isolés tout en apportant des bases à la validation du modèle physique-détaillé WFDS. Le but de ce travail est d'étudier la dynamique de combustion du ciste de Montpellier d'après les critères de réaction au feu définis précédemment. Deux études expérimentales et numériques ont été conduites en parallèle. Il s'agit tout d'abord de caractériser le ciste des points de vue structurel et de sa réaction au feu. Les données de caractérisation ont ensuite servi d'intrant au code WFDS. Ce code a tout d'abord été validé pour la propagation de feux de litières composées d'un seul type de particules à partir de résultats issus d'expériences réalisées par Morandini et al. (2013) et Tihay et al. (2014). Le test du code WFDS pour les arbustes de cistes composés de plusieurs types de particules a

Introduction

ensuite été entrepris. Ces tests ont été complétés par une analyse de sensibilité portant sur les paramètres liés aux lois de dégradations utilisées dans WFDS. Dans le chapitre 2 de ce manuscrit, les méthodologies utilisées pour la caractérisation des arbustes et de leur combustion seront exposées. Dans la dernière partie du chapitre 2, les expériences servant de base à la validation de WFDS pour la combustion de litières d'aiguilles de pin seront également présentées. Le chapitre 3 portera sur la validation de WFDS pour des feux se propageant dans des litières d'aiguilles de pin pour plusieurs charges et deux inclinaisons du banc de combustion. Les résultats de caractérisation et de conditionnement des arbustes de ciste de Montpellier seront ensuite détaillés dans la première partie du chapitre 4, suivi des résultats des expériences de réaction au feu. Les résultats obtenus lors de la simulation de ces expériences suivis d'une analyse de sensibilité des différents paramètres d'entrée du code feront l'objet du chapitre 5. Enfin, le dernier chapitre présentera les conclusions et les perspectives de cette étude.

Chapitre 2. Matériel et méthode

2.1. Conditionnement et caractérisation de la végétation

L'objectif de ces travaux de thèse étant d'étudier le comportement au feu des végétaux dans leur état quasi-naturel, nous nous sommes intéressés à une espèce très présente dans le maquis méditerranéen. Il s'agit du ciste de Montpellier dont la description est fournie dans l'annexe A1. Au cours de l'année, la teneur en eau du ciste subit de très fortes variations (cf. Figure 2-1) ce qui en fait un combustible témoin des périodes à risque d'incendie. Des valeurs de teneur en eau minimale enregistrées (30 %) et de "seuil de dangerosité" (67 %) sont fournies par L'ONF d'après des valeurs mesurées au cours des années (Source ONF : années 2003 et 2009 sur les sites du Salario, de Valle Mala et de Conca).

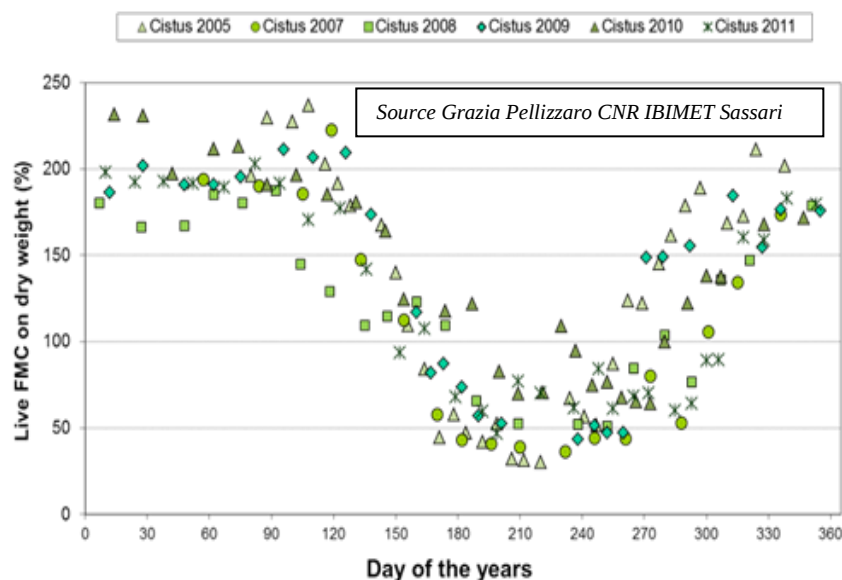


Figure 2-1 : Teneur en eau des feuilles de cistes au cours de l'année

Dans cette partie, nous présentons la méthode utilisée pour conditionner un arbuste de ciste afin que sa teneur en eau soit proche de celle observée lors des conditions estivales. Nous détaillons

également comment caractériser les différentes familles de particules qui le composent afin de pouvoir étudier leur influence sur son comportement au feu.

Les arbustes des cistes ont été récoltés sur le domaine de Saint Jean à Corte (42°17'40.8"N 9°10'09.1"E) (Figure 2-2). Pour chaque prélèvement, nous avons pris soins d'avoir des individus avec des dimensions et des masses aussi proches que possibles. Des tests préliminaires avec le calorimètre grande échelle ont permis de déterminer un gabarit représentatif du maquis moyen et idéalement adapté vis-à-vis du dispositif expérimental. Le gabarit moyen d'un individu correspond à un arbuste de 1.30 m de haut, avec un houppier de 0.6 m de diamètre, pour une masse totale de 2.0 kg. Les données détaillées seront fournies dans le chapitre 4. Plusieurs campagnes de prélèvements ont été réalisées pour : la définition de la méthode de conditionnement ; la caractérisation de la structure d'un individu de ciste moyen ; l'étude du comportement au feu du ciste. La première campagne, concernant le conditionnement, s'est déroulée au cours de l'année 2015 à différents mois (Mai, Juin, Juillet, Aout et Octobre 2015). La deuxième campagne portant sur la caractérisation a été réalisée sur trois échantillons de cistes durant le mois de janvier 2016.



Figure 2-2 : Lieux de prélèvement

2.1.1. Conditionnement des échantillons de ciste

La méthode de conditionnement des cistes avant brûlage a été mise au point pour permettre de contrôler la teneur en eau des échantillons tout en évitant de modifier leur structure. Deux méthodes ont été testées pour faire sécher les échantillons de cistes. Une première méthode a consisté à placer les cistes en étuve à 60°C pour différents temps de séchage. Une seconde méthode plus progressive a consisté à laisser sécher les échantillons de cistes à l'air ambiant en les suspendant dans le laboratoire.

Afin de déterminer le temps de séchage associé à la première méthode permettant d'obtenir une teneur en eau de consigne, différents tests ont été réalisés au préalable de la façon suivante. Les cistes sont prélevés le matin même de la mise à l'étuve. Une cinquantaine de grammes de chaque classe de particules identifiées (cf. section suivante) est dissociée de l'arbuste, pesée avec précision puis mise à l'étuve à 60°C. La masse de chaque classe de particules est ensuite pesée à intervalle de 10 minutes lors de la première heure de séchage, puis à intervalle de 20 minutes durant la deuxième heure et 30 minutes puis 1h pour les heures suivantes. Au bout de 48h, la masse sèche finale de chaque classe de particules est mesurée. Le même protocole a été suivi pour les différents mois de l'étude afin de déterminer en fonction de la teneur en eau initiale, présumée dépendre de la période de l'année (cf. Figure 2-1), le temps de séchage approprié. Concernant la seconde méthode, les cistes étant suspendus dans le laboratoire, nous prélevons à différents temps de séchage (toutes les deux heures durant la journée) une faible masse (17 g en moyenne) pour les différentes classes de particules. Ces faibles quantités sont alors pesées puis mises à l'étuve pendant 48h à une température de 60°C afin d'obtenir les masses humides et sèches et donc leur teneur en eau à l'instant du prélèvement. Bien évidemment, la teneur en eau initiale de chaque classe de particules est mesurée par cette même procédure réalisée au moment du prélèvement des individus.

Ces deux méthodes de conditionnement présentent chacune des avantages et des inconvénients suivant la taille des arbustes ciblés :

- Pour ce qui est du conditionnement à l'étuve, cette méthode présente le plus de précision et de rapidité dans l'obtention de la teneur en eau. Cependant, la taille de l'étuve ne permet d'introduire qu'un seul ciste. De plus celui-ci ne peut être suspendu dans l'étuve ce qui entraîne une déformation du houppier due à son propre poids. Cette approche qui a l'avantage d'être rapide entraîne un compactage des cistes qui modifie leur compacité naturelle.
- La seconde méthode a l'avantage de permettre le conditionnement de plusieurs cistes simultanément. De plus, les cistes étant suspendus dans l'espace du laboratoire, aucune déformation du houppier n'a été constatée. Cependant, cette méthode ne nous permet pas de prédire avec précision la teneur en eau à un temps donné au cours du séchage. En effet, les conditions ambiantes (température, humidité de l'air) du laboratoire ne sont pas contrôlées et la teneur en eau des différentes tailles de particules n'est donc que partiellement contrôlée par ce procédé. Il convient néanmoins de préciser que la teneur en eau des feuilles et des particules de la classe 0-2 mm est mesurée au temps souhaité

de séchage. La teneur en eau des différentes familles de particules est alors calculée à cet instant en fonction de la teneur en eau des 0-2 mm grâce à des courbes de correspondances (cf. Annexe A2) préalablement établies.

2.1.2. Caractérisation des échantillons de ciste

La caractérisation des échantillons de ciste consiste à séparer l'individu en différentes classes de tailles de particule afin de déterminer leur masse, leur taux d'occupation de l'espace (compacité) et leurs propriétés géométriques. Cinq classes de particules ont été sélectionnées : les feuilles, les brindilles de diamètre de 0 à 2 mm, les brindilles de diamètre de 2 à 4 mm, de 4 à 6 mm et les branches de diamètre supérieur à 6 mm. La distinction entre classes de particules mortes et vivantes a également été réalisée. La séparation en classe des branches de diamètres supérieurs à 6 mm n'a pas été réalisée en raison de leur faible participation à la dynamique de propagation des feux (Cheney, 1981). De plus, avec le gabarit d'individu fixé, le ciste ne présente pas de branches avec un diamètre supérieur à 25 mm. Nous pouvons donc considérer que la classe 6-25mm (appelée en anglais *10 hours*) constitue la plus grande taille de particule investiguée. Une attention particulière a été portée sur les particules de petites tailles (feuilles et 0-2 mm) car celles-ci participent activement à la combustion (Burrows, 2001).

Les cistes récoltés ont été placés dans une structure métallique de 1.45 m de haut sur 0.9 m de profondeur et de largeur. La structure est composée d'un étage mobile suivant la verticale, permettant la découpe de 252 cubes de 15 cm de côté (Figure 2-3). Il doit être signalé que les bases des cistes (0.25 m de haut) n'ont pas été caractérisées, car celles-ci ne participent pas à la combustion dans nos expériences. Elles sont localisées dans un support métallique. Elles sont composées de classes de particules de diamètres supérieurs à 6 mm pour une masse moyenne de 0.25 kg.

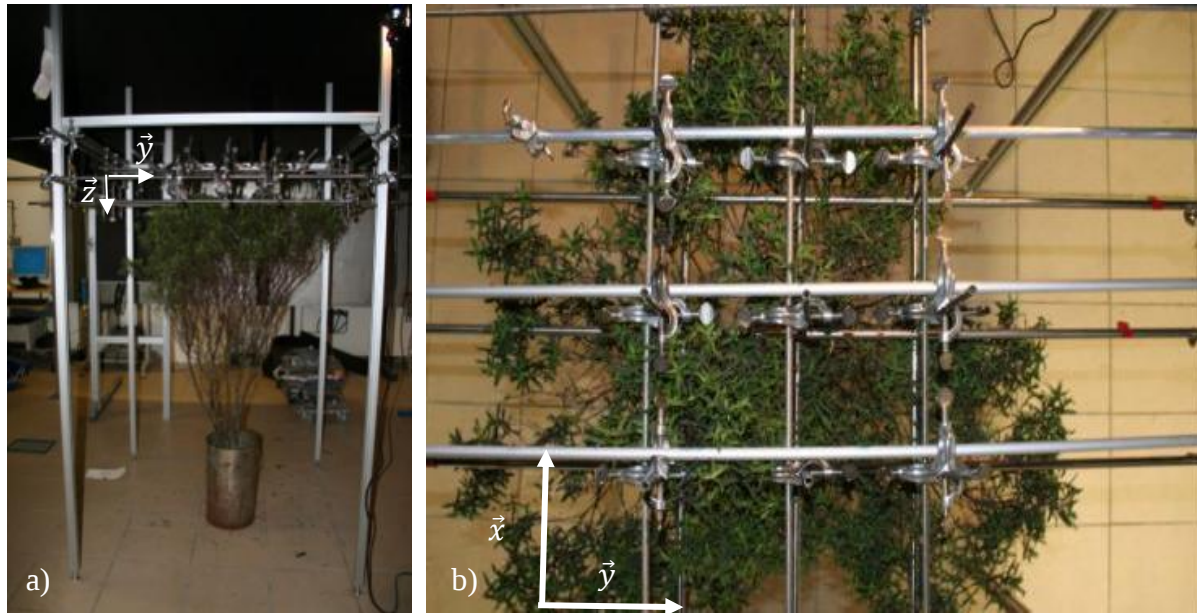


Figure 2-3 : Structure de découpe du ciste pour la caractérisation : a) vue de face, b) vue de dessus

Les cubes de prélèvement sont répertoriés suivant leur coordonnées spatiales (x , y , z). Les particules prélevées dans chaque cube sont déposées dans des barquettes placées à l'étuve pendant 48h (Figure 2-4a). A la suite de l'étuvage, le contenu de chaque barquette est trié suivant les classes de tailles de particules identifiées. Finalement, la masse sèche de chaque classe de particules de chaque cube a été pesée afin d'obtenir la répartition spatiale des différentes classes. Il doit être souligné que le tri a été réalisé après la mise à l'étuve pour minimiser la place occupée et pour faciliter la séparation des classes (les feuilles et brindilles les plus fines se détachant naturellement une fois séchées). La Figure 2-4b permet d'avoir une vision des proportions des différentes classes de particules présentes.

Des caractérisations similaires ont aussi été réalisées sur des cistes après les expériences de combustion. En raison de la disparition de nombreuses particules, la découpe par cube a été remplacée par une découpe par étage. Ainsi, La caractérisation a alors été réalisée suivant la hauteur du ciste par intervalle de 15 cm en conformité avec le protocole utilisé pour les cistes avant brulage.

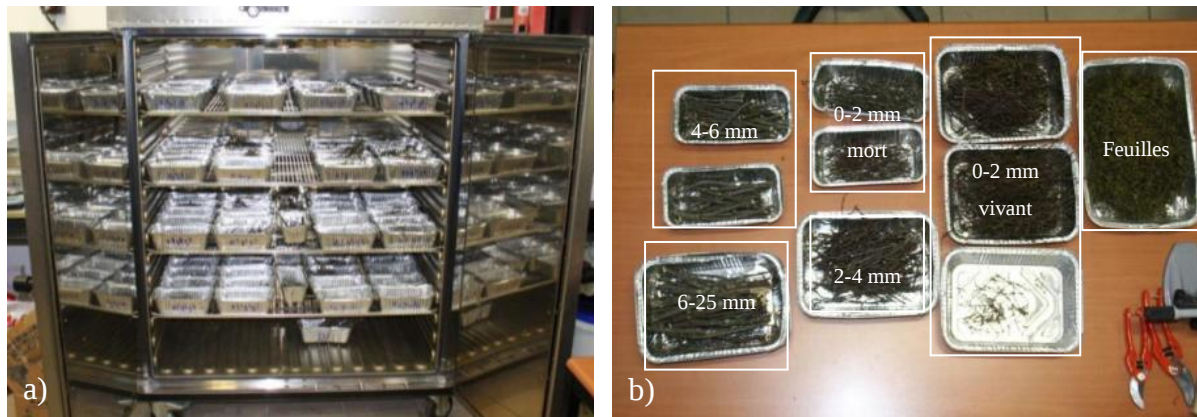


Figure 2-4 : Différentes classes de particules : a) mise à l'étuve des barquettes, b) quantité de particules pour un ciste

La variabilité structurelle du ciste au cours de l'année nous a également amené à réaliser une caractérisation complémentaire pour identifier les proportions de feuilles et de fleurs durant l'été. En effet, durant ces mois de l'année une nouvelle famille de particules est présente. Il s'agit de fleurs qui contiennent des pétales et des graines. La totalité des feuilles et des fleurs a été prélevée puis pesée après passage à l'étuve (60°C pendant 48h) (Figure 2-5) pour un ciste.



Figure 2-5 : Séparation des fleurs (à gauche) et des feuilles (à droite) pour les cistes d'été

2.2. Comportement au feu d'un arbuste de ciste

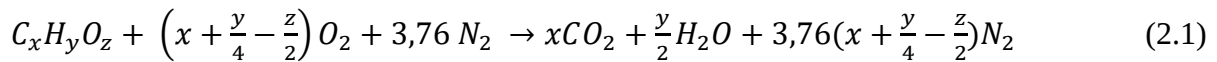
2.2.1. Calorimétrie à consommation d'oxygène

La puissance dégagée (HRR) est un paramètre clé dans la compréhension de la dynamique et des caractéristiques des incendies (Babrauskas et Peacock, 1992). Celle-ci permet de déduire par exemple la hauteur de flamme grâce à des corrélations, de définir une échelle de risque ou encore les moyens de prévision à mettre en œuvre (diminution de la biomasse). Bien que l'estimation de cette grandeur soit difficilement accessible sur le terrain, sa mesure précise est réalisable en laboratoire. Par le passé, la mesure de la puissance dégagée était souvent donnée par l'utilisation de la perte de masse et du pouvoir calorifique obtenu par l'intermédiaire d'une bombe calorimétrique (Domalski et al., 1986). Pour déterminer le pouvoir calorifique, le combustible est placé dans un milieu hyperbare dont l'atmosphère est saturée en dioxygène. Cette méthode permet d'obtenir une combustion complète au dépend de la représentativité de la combustion réelle à pression atmosphérique à l'air libre. En effet, la bombe calorimétrique mesure l'énergie maximale pouvant être dégagée dans ces conditions. De plus, les résultats obtenus ne sont valables que si la décomposition thermique du combustible se fait en une seule étape. Cette méthode n'est donc pas utilisable pour des combustibles végétaux. Pour ces combustibles, la méthode la mieux adaptée pour la mesure de la puissance calorifique mais également pour la détermination de l'enthalpie effective de combustion est à ce jour la calorimétrie par consommation d'oxygène.

Afin d'évaluer la puissance calorifique dégagée lors de réactions de combustion, Hinkley et al. (1968) ont proposé d'utiliser la variation de la concentration d'oxygène. Cette proposition fait suite à la démonstration, réalisée par Thornton (1917), d'équivalence de l'énergie libérée par unité de masse d'oxygène consommé, $E_{O_2} (MJ.kg^{-1})$, pour la combustion complète de composés organiques liquides et gazeux. Cette technique a par la suite été améliorée par le National Bureau of Standards (actuellement NIST) entre 1970 et 1980. Sa première utilisation a été réalisée par Parker en 1977 dans le cadre d'expériences à l'échelle du laboratoire sur différents combustibles. La découverte de l'applicabilité de cette méthode pour les matières organiques solides a été réalisée par Huggett (1980). Celui-ci proposa également une valeur moyenne d'énergie dégagée $E_{O_2} = 13.1 MJ$ par kilogramme d'oxygène consommé. L'énergie libérée peut donc être déterminée à partir de la quantité d'oxygène consommé lors de la combustion. Cette technique est, à ce jour, la plus précise et pratique pour mesurer les débits

calorifiques de feux expérimentaux. Basée sur l'évolution de la concentration de gaz de combustion au cours du temps, elle nécessite de ce fait la mesure qualitative et quantitative des concentrations des produits de la combustion.

La réaction stœchiométrique de la combustion complète d'un combustible du type $C_xH_yO_z$ s'écrit :



Comme il a été précisé précédemment, l'énergie dégagée lors de la combustion est directement liée à la quantité de dioxygène consommée. Le débit calorifique, noté ici $\dot{q}$, est donc donné par le produit de la constante calorifique E_{O_2} et du débit massique de consommation d'oxygène :

$$\dot{q} = E_{O_2}(\dot{m}_{O_2}^0 - \dot{m}_{O_2}) \quad (2.2)$$

Le débit massique de dioxygène est obtenu par la mesure du débit massique des gaz d'extraction et de la fraction molaire de dioxygène dans ces gaz (Figure 2-6). Le débit massique des effluents est mesuré grâce à une sonde de Mac Caffrey positionnée dans le conduit d'extraction.

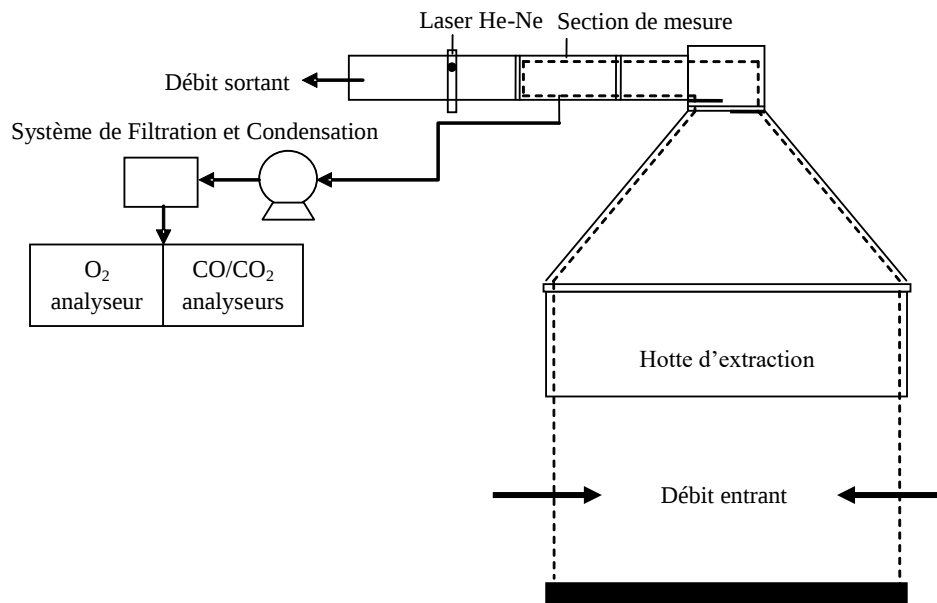


Figure 2-6 : Schéma du calorimètre et de ses capteurs

Matériel et méthode

La sonde renvoie la différence de pression et à partir d'une mesure de température, on a la masse volumique et on obtient la vitesse des gaz. Le débit massique est alors donné par l'expression suivante :

$$\dot{m}_e = Ak_c \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \quad (2.3)$$

Où A est la section (m^2) de la canalisation, ΔP le différentiel de pression, T_e la température des gaz et k_c est une constante déterminée par une procédure de calibration via un bruleur au propane.

Sans combustion, l'expression de la fraction molaire de dioxygène au niveau des analyseurs, $X_{O_2}^A$, est liée au débit d'oxygène par :

$$X_{O_2}^{A_0} = \frac{\frac{\dot{m}_{O_2}^0}{M_{O_2}}}{\frac{\dot{m}_{O_2}^0}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}^0}{M_{CO_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}^0}{M_{N_2}}} \quad (2.4)$$

Au cours de la combustion $X_{O_2}^A$, est donnée par l'expression :

$$X_{O_2}^A = \frac{\frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{O_2}}}{\frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{\dot{m}_{CO}}{M_{CO}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}}} \quad (2.5)$$

Les débits massiques d'oxygène correspondants peuvent donc être obtenus grâce aux deux expressions suivantes :

$$\dot{m}_{O_2}^0 = \frac{X_{O_2}^{A_0}}{(1 - X_{CO_2}^{A_0} - X_{O_2}^{A_0})} \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \dot{m}_{N_2}^0 \quad (2.6)$$

et

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{X_{O_2}^A}{(1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A - X_{O_2}^A)} \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \dot{m}_{N_2} \quad (2.7)$$

La différence des deux expressions ci-dessus est donc :

$$\dot{m}_{O_2}^0 - \dot{m}_{O_2} = \frac{X_{O_2}^{A_0} (1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A) - X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^{A_0})}{(1 - X_{CO_2}^{A_0} - X_{O_2}^{A_0}) (1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A - X_{O_2}^A)} \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \dot{m}_{N_2} \quad (2.8)$$

d'où

$$\dot{q} = E_{O_2} \frac{X_{O_2}^{A_0} (1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A) - X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^{A_0})}{(1 - X_{CO_2}^{A_0} - X_{O_2}^{A_0}) (1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A - X_{O_2}^A)} \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \dot{m}_{N_2} \quad (2.9)$$

Le facteur de consommation ϕ peut être introduit afin de simplifier la relation précédente :

$$\phi = \frac{\dot{m}_{O_2}^0 - \dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{O_2}^0} \quad (2.10)$$

soit après calcul

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{A_0} (1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A) - X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^{A_0})}{X_{O_2}^{A_0} (1 - X_{CO}^A - X_{CO_2}^A - X_{O_2}^A)} \quad (2.11)$$

Finalement à l'aide de (2.11), la relation (2.9) devient :

$$\dot{q} = \frac{E_{O_2} \phi X_{O_2}^{A_0}}{(1 - X_{CO_2}^{A_0} - X_{O_2}^{A_0})} \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \dot{m}_{N_2} \quad (2.12)$$

L'expression du débit massique d'azote, $\dot{m}_{N_2}$, est inconnue et doit être établie :

$$\dot{m}_{N_2} = \dot{m}_a X_{N_2}^0 \frac{M_{N_2}}{M_a} \quad (2.13)$$

avec $\dot{m}_a$ et M_a , représentent respectivement le débit massique ($kg.s^{-1}$) et la masse molaire de l'air entrant.

Matériel et méthode

La mesure directe de $X_{N_2}^0$ n'est pas possible directement à cause de l'assèchement des gaz mesurés. En effet la mesure de la concentration d'oxygène nécessite un échantillon gazeux dépourvu d'eau pour ne pas endommager l'analyseur et celui-ci est donc séché en deux étapes (piège à froid puis colonne d'agent séchant). Cependant, on montre que :

$$X_{N_2}^0 = (1 - X_{H_2O}^0)(1 - X_{CO_2}^{A_0} - X_{O_2}^{A_0}) \quad (2.14)$$

En portant les équations 2.13 et 2.14 dans 2.12, on obtient finalement :

$$\dot{q} = E_{O_2} \phi X_{O_2}^{A_0} \dot{m}_a (1 - X_{H_2O}^0) \frac{M_{O_2}}{M_a} \quad (2.15)$$

Le débit massique d'air entrant $\dot{m}_a$ étant impossible à estimer, la relation suivante a été établie entre le débit des gaz d'extraction $\dot{m}_e$ et $\dot{m}_a$.

$$\frac{\dot{m}_e}{M_e} = \frac{\dot{m}_a}{M_a} (1 - \phi) + \frac{\dot{m}_a}{M_a} \alpha \phi \quad (2.16)$$

Dans cette relation, α représente le facteur d'expansion, c'est à dire le rapport entre le nombre de moles d'une fraction d'air pour lequel l'oxygène serait totalement consommé à celui des produits de la combustion. Il est recommandé d'utiliser la valeur 1,105 pour α (Janssens et Babrauskas, 1992).

En prenant $M_e \approx M_a$, cette expression devient :

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_e}{1 + \phi (\alpha - 1)} \quad (2.17)$$

Finalement, en portant (2.17) dans (2.15) la puissance calorifique est donnée par :

$$\dot{q} = E_{O_2} \frac{\phi}{1 + \phi (\alpha - 1)} \dot{m}_e \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^{A_0} \quad (2.18)$$

Grâce à cette dernière relation, la puissance calorifique dégagée lors de la combustion des végétaux est calculée par traitement sous le logiciel Excel® d'après les mesures brutes des analyseurs de gaz et autres capteurs du LSHR.

2.2.2. Protocole expérimental

Des cistes de tailles et caractéristiques équivalentes ont été prélevés à l'emplacement présenté précédemment. Après plusieurs essais préliminaires un gabarit de ciste type, adapté au dispositif expérimental (taille, durée de combustion, puissance dégagée...), a été retenu. Les cistes prélevés mesuraient environ 1.30 m de hauteur dont 0.30 m de houppier pour un diamètre compris entre 0.6 et 0.8 m et une masse humide de l'ordre de 2.0 kg (pied inclus). Les cistes prélevés ont ensuite été partiellement séchés suivant le second protocole présenté dans la section 2.1.1 pour atteindre la teneur en eau souhaitée. Avant de réaliser les expériences de combustion, une masse de feuille de 3 g est prélevée sur chaque individu pour déterminer la teneur en eau au début de l'expérience (par passage à l'étude à 60°C pendant 48h). Grâce à cette valeur nous en déduisons la teneur en eau de toutes les autres tailles de particules conformément à nos courbes de correspondance. Les pieds des individus de ciste sont ensuite insérés dans un support permettant de les positionner verticalement tout au long des tests de combustion. L'ensemble du ciste et de son support sont alors disposés sur une cellule de pesée permettant d'enregistrer la masse au cours du temps à une fréquence de 1 Hz (Figure 2-7a). L'ensemble ciste- support-cellule de pesée est finalement disposé dans la hotte du LSHR de dimensions 3 m × 3 m et de débit d'extraction 1 m³/s. En canalisant les gaz de combustion dans la hotte, le LSHR permet de mesurer leur composition et d'en déduire la puissance dégagée par la combustion au cours du temps à la fréquence de 1 Hz grâce à la relation (2.21).

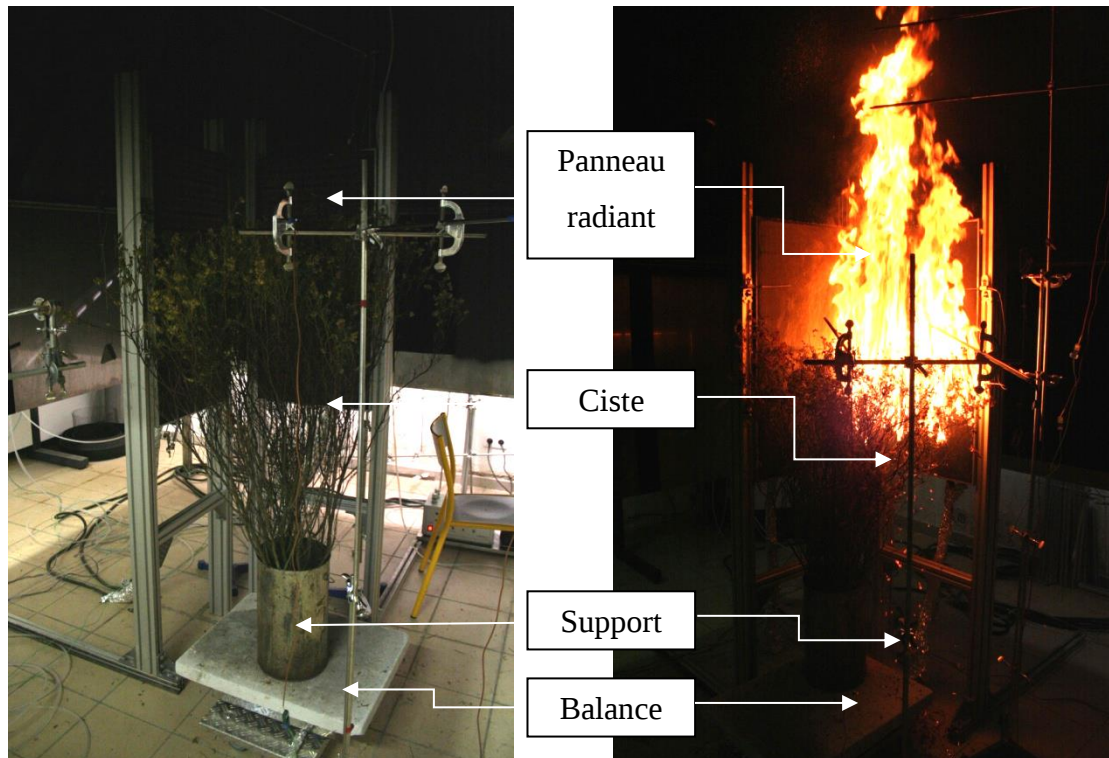


Figure 2-7 : Photos du dispositif expérimental a) avant la combustion b) durant la combustion

Dans la hotte du LSHR, les cistes sont soumis à un flux radiatif constant produit par un ensemble de 2×2 panneaux radiants électriques ($0.48 \text{ m} \times 0.48 \text{ m}$ par panneau) ; encadrant partiellement les individus (cf. Figure 2-7a) et Figure 2-8b) et chauffés à pleine puissance (5750Watts). La température maximum atteinte à la surface des panneaux est de 530°C (803 K). Ces derniers ont été placés dans une configuration perpendiculaire afin de maximiser le flux reçu par les individus de ciste. La densité de flux émis par les panneaux est de 20 kW/m^2 (Cf Annexe A3). L'allumage n'est pas réalisé au moyen d'une source pilote. Il se produit à des positions variées en fonction des échantillons de ciste. Les temps d'allumage et d'extinction ont été enregistrés pour chaque expérience. Trois fluxmètres radiatifs (Medtherm, série 64) ont été utilisés pour mesurer la densité de flux reçue au cours du temps en différents points de l'espace à 1.41 m de hauteur. Deux fluxmètres ont été placés à 1 m de l'axe central des cistes (Fluxmètres 2 et 3 sur la Figure 2-8b). Le troisième se situe entre les panneaux radiants à 0.42 m de l'axe central des cistes. Ces capteurs sont équipés de fenêtre saphir avec un angle de vue de 150° et sont calibrés pour un flux maximum de 20 kW/m^2 . Le signal est échantillonné à une fréquence de 1 Hz par une centrale d'acquisition de données Agilent. Ces capteurs servent par la suite à vérifier la bonne représentation du rayonnement dans les simulations. Deux caméras ont également été installées pour filmer les expériences aux cours du temps.

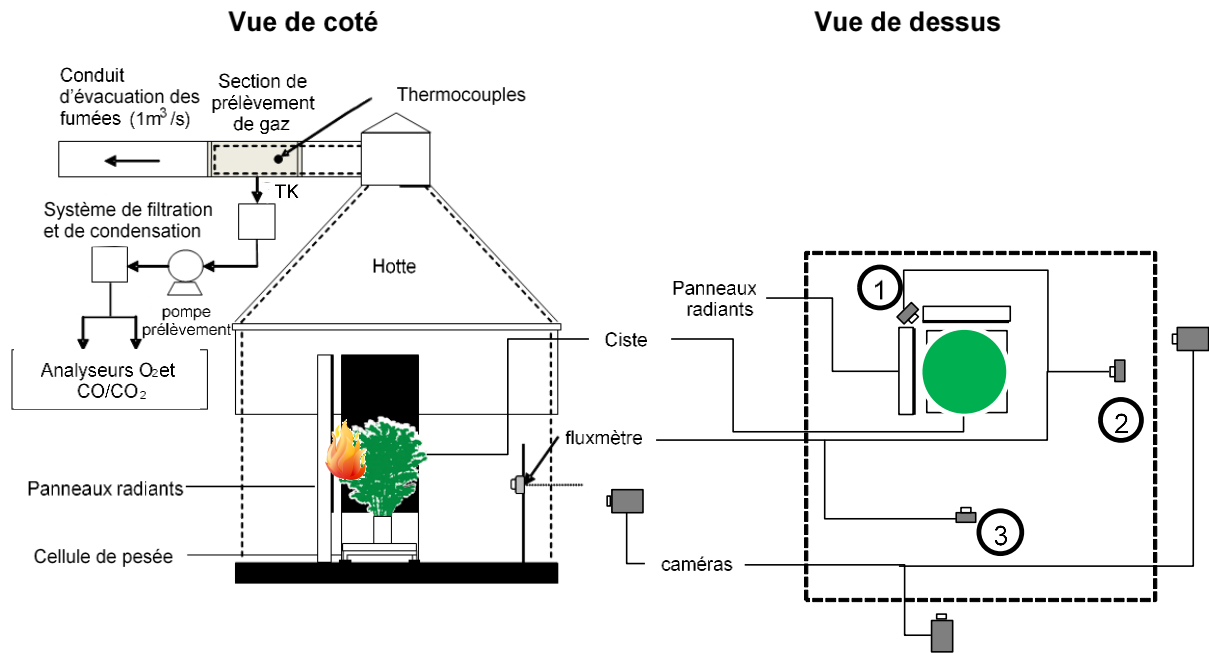


Figure 2-8 : Dispositif expérimental a) vue de côté b) vue du dessus

Afin de mesurer le HRR à partir de la méthodologie présentée dans la section 2.1.1, l'énergie équivalente libérée par unité de masse d'oxygène E_{O_2} a été calculée d'après l'équation de la réaction complète à la stœchiométrie (2.1), tel que :

$$E_{O_2} = \frac{\Delta H_c W_{fuel}}{n_{O_2} W_{O_2}} \quad (2.22)$$

où ΔH_c est la moyenne du pouvoir calorifique inférieur des feuilles et rameaux de ciste (18 841 kJ/kg pour les feuilles et 18 217 kJ/kg pour les brindilles), $n_{O_2} = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}$ ($x = 4.04$, $y = 5.81$ et $z = 2.76$) et W_{fuel} représente la masse molaire du combustible. Avec ces données, la valeur de E_{O_2} est estimée à 14.31 MJ/kg.

2.3. Expériences de propagation de feu dans des litières d'aiguilles de pin

2.3.1. Configuration expérimentale

Ces travaux expérimentaux ont été réalisés dans le but d'obtenir des grandeurs globales (HRR, fraction radiative, fraction convective ...) caractérisant la dynamique d'un front de feu se propageant au travers d'une litière. Ces données vont nous permettre de tester le code de calcul

WFDS que nous avons modifié afin d'implanter les termes sources de masse en collaboration avec Ruddy Mell (USDA, Fire and Environmental Research Applications Team) L'étape de test de WFDS pour la combustion d'une végétation homogène (une seule classe de particule et une seule humidité) est un préalable avant de confronter les prédictions du modèle aux résultats expérimentaux issus de la combustion d'un végétal hétérogène (plusieurs classes de particules et plusieurs humidités).

Ces travaux expérimentaux ont été menés dans le cadre du projet PROTERINA-DUE (Morandini et al., 2013 et Tihay et al., 2014). Les expériences ont été réalisées dans le LSHR présenté à la section 2.2.2. Une litière d'aiguille de pin maritime est positionnée sur un banc de combustion inclinable de dimension 2 m × 2 m. Le banc est placé sur une balance (précision de 1g) afin de mesurer la perte de masse au cours du temps à une fréquence de 1 Hz. Les expériences ont été réalisées à plat et avec une pente de 20° pour comparer la réponse du modèle à des dynamiques de combustion différentes (Figure 2-9).

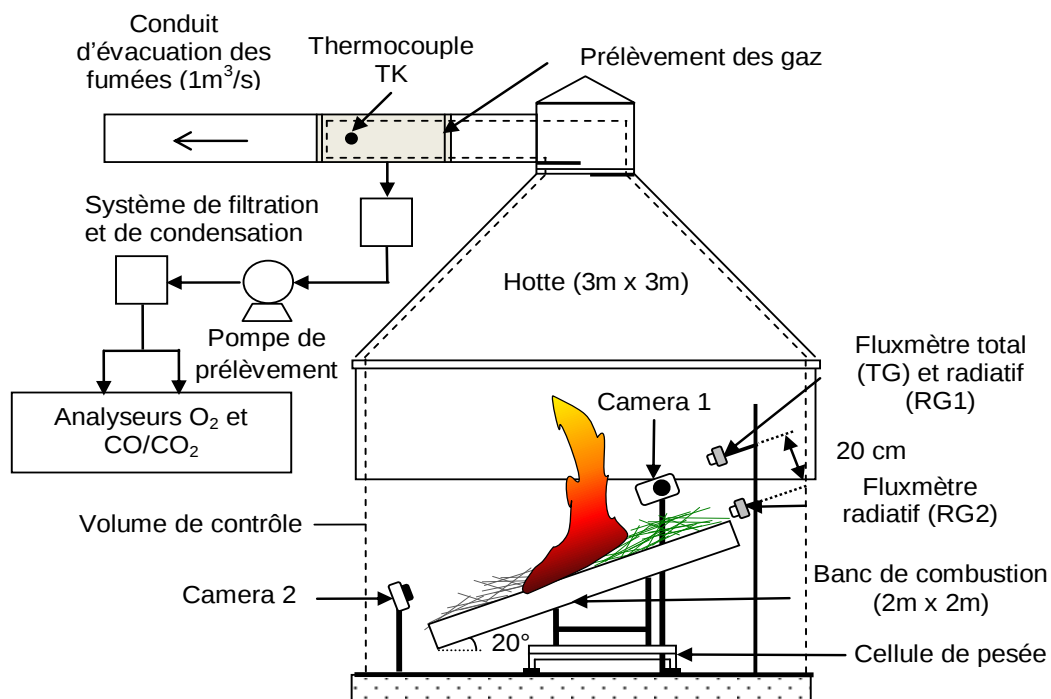


Figure 2-9: Configuration expérimentale des feux de litières

Le lit de combustible a une surface de 1 m de large sur 2 m de long. Différentes charges ont été utilisées : 0.6 kg/m², 0.9 kg/m² et 1.2 kg/m². Les aiguilles ont été préalablement séchées à l'étuve à 60°C pendant 24 h. Les teneurs en eau mesurées étaient comprises entre 3 et 8 %, pour une valeur moyenne de 5 %. Un allumage en ligne est réalisé à une des extrémités du banc de

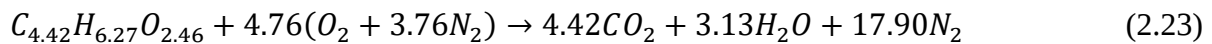
Matériel et méthode

combustion à l'aide d'une faible quantité d'éthanol (4 mL et 6 mL pour respectivement la charge de litière de 0.6 et les charges 0.9 et 1.2 kg/m²). Les hauteurs des litières utilisées sont présentées dans le Tableau 2-1 ci-dessous.

Tableau 2-1 : Hauteurs des litières

Charge de combustible sur base sèche (kg/m ²)	Pente (°)	Hauteur du lit (cm)	Masse volumique apparente (kg/m ³)
0.6	0	3.5	17.1
0.9	0	5.5	16.4
1.2	0	6.5	18.5
0.6	20	3.5	17.1
0.9	20	5.5	16.4
1.2	20	7.5	16.0

La calorimétrie par consommation d'oxygène présentée à la section 2.2.1 a été utilisée pour mesurer le HRR libéré lors des propagations. La composition élémentaire des aiguilles de pin permet d'écrire la réaction de combustion (supposée complète) pour ce végétal :



Cette dernière conduit à estimer grâce à la relation (2.22) l'énergie dégagée par unité de masse d'oxygène $E_{O_2} = 13.33$ MJ/kg et ainsi de calculer le HRR à l'aide de la relation (2.21). Plus de détails sur la méthodologie et les protocoles expérimentaux sont présentés dans Morandini et al. (2013) et Tihay et al. (2014).

2.3.2. Principaux résultats pour les expériences de propagation

Ces travaux se sont déroulés en dehors du cadre de la thèse, nous présentons donc brièvement les principaux résultats sur lesquels nous nous appuyons pour tester WFDS. Le lecteur intéressé peut se référer à Morandini et al. (2013) et Tihay et al. (2014) pour plus de détails. Les courbes moyennes de HRR au cours du temps sont présentées pour les trois charges de combustible et pour les deux inclinaisons du banc de combustion. L'allumage réalisé grâce à l'éthanol permet d'obtenir un front de feu initial linéaire et homogène rapidement pour ne pas

influencer la dynamique de combustion. Le feu se propage ensuite en direction de l'autre extrémité du banc de combustion avec une géométrie de front de flamme variant selon la pente (Figure 2-10). Il doit être souligné que, excepté pour les phases d'allumage et d'extinction, le HRR mesuré correspond aux valeurs couplées des puissances dégagées en phase gazeuse et pour l'oxydation des résidus charbonneux.

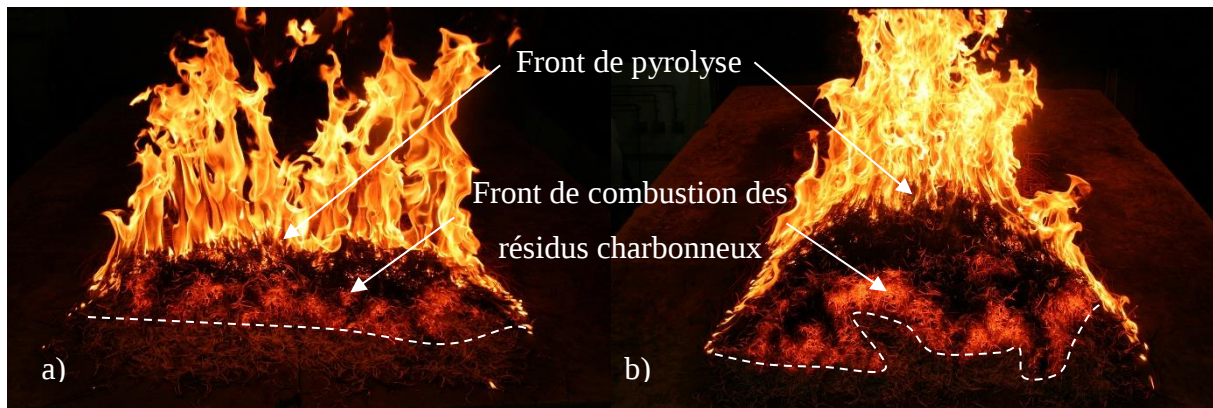


Figure 2-10 : Photos d'un test a) à plat et b) en pente

En ce qui concerne les propagations à plat, le feu se propage à vitesse constante, dont la valeur dépend de la charge de combustible étudiée. Les valeurs de HRR au cours du temps sont présentées pour les trois charges sur la Figure 2-11. Trois phases peuvent être distinguées : allumage ou initiation (1), propagation « libre » (2) et extinction (3). La phase d'allumage, correspond à l'initiation de la propagation. Le HRR est dû à la combustion de l'éthanol et d'une partie de la litière au contact de la flamme. La phase de propagation « libre » (le front de feu n'est plus influencé par la condition d'allumage) correspond ici un régime établi, avec un HRR, provenant de la combustion de gaz de dégradation de la litière et de l'oxydation de résidus charbonneux. Le HRR fluctue autour d'une valeur moyenne (dépendante de la charge), traduisant une vitesse de propagation quasi-constante. La dernière phase correspond à l'extinction durant laquelle la puissance décroît progressivement vers zéro. Celle-ci inclue l'extinction de la flamme (*flameout*), suivi par la combustion des résidus charbonneux.

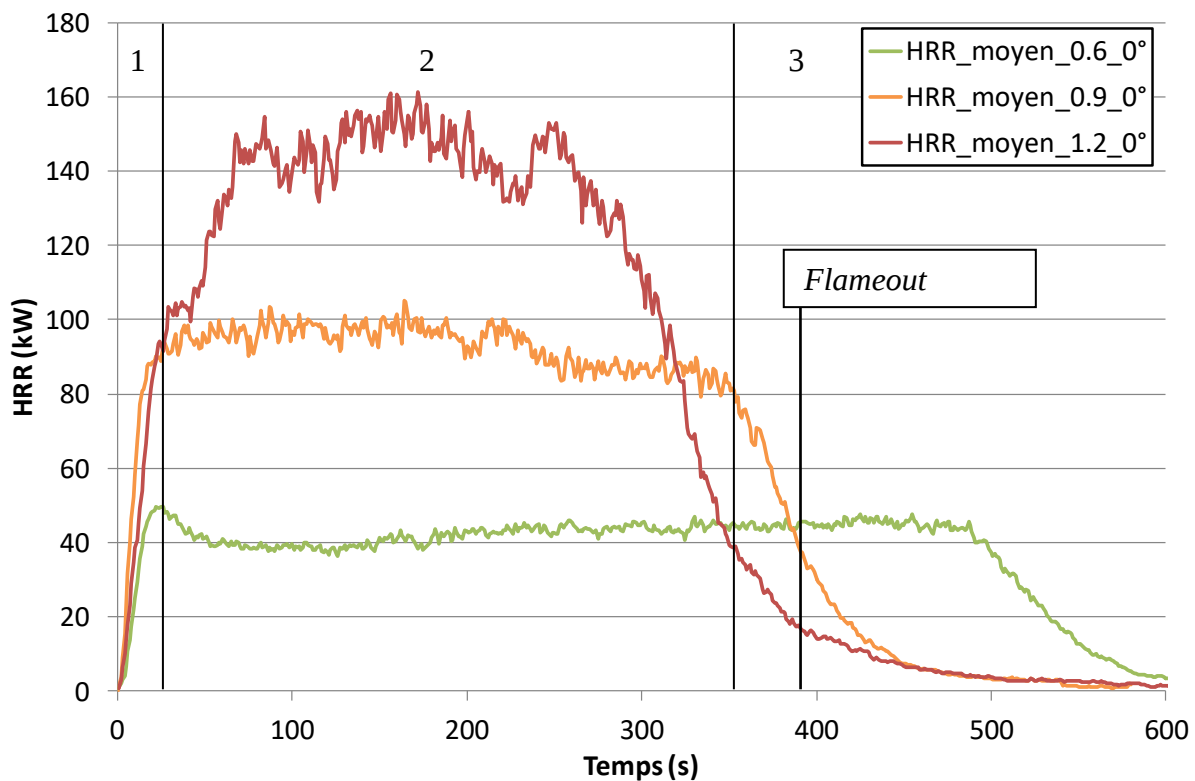


Figure 2-11 : HRR au cours du temps pour les trois charges de litière pour les propagations à plat et phases de combustions associées à la charge 0.9 kg/m²

En ce qui concerne les cas en pente, la phase stationnaire reste observable (Figure 2-12) pour la charge de 0.6 kg/m². Elle est également quelques fois présente pour les charges de 0.9 et 1.2 kg/m², mais de très courte durée. En effet, la présence de la pente provoque une déformation du front de flamme qui prend la forme d'un V inversé caractéristique d'une vitesse de propagation plus importante au centre du front de feu que sur les côtés. De plus, un front de combustion des résidus charbonneux est visible à l'arrière du front de feu (Figure 2-10). La dégradation en phase gazeuse étant plus rapide que l'oxydation des résidus charbonneux et le front de flamme se déplaçant plus rapidement qu'à plat, il laisse une surface grandissante de particules incandescentes à l'arrière. Ce phénomène également observable pour des propagations à plat est nettement plus marqué lors d'une propagation en pente. Cette dynamique est répercutée sur la courbe de HRR qui augmente d'autant plus vite que la charge est plus forte. Nous observons alors l'apparition d'une phase quasi-stationnaire dont la durée diminue avec l'augmentation de la charge de combustible. Lorsque la pointe de front de feu atteint l'extrémité du banc de combustion, le HRR diminue puisque la surface du front de feu est plus faible. A l'instar des cas sans pente, les trois phases d'initiation, de propagation « libre » et d'extinction sont observables. Les différences essentielles étant sur les niveaux de HRR atteints et sur la forme de la courbe de HRR durant la phase de propagation « libre ».

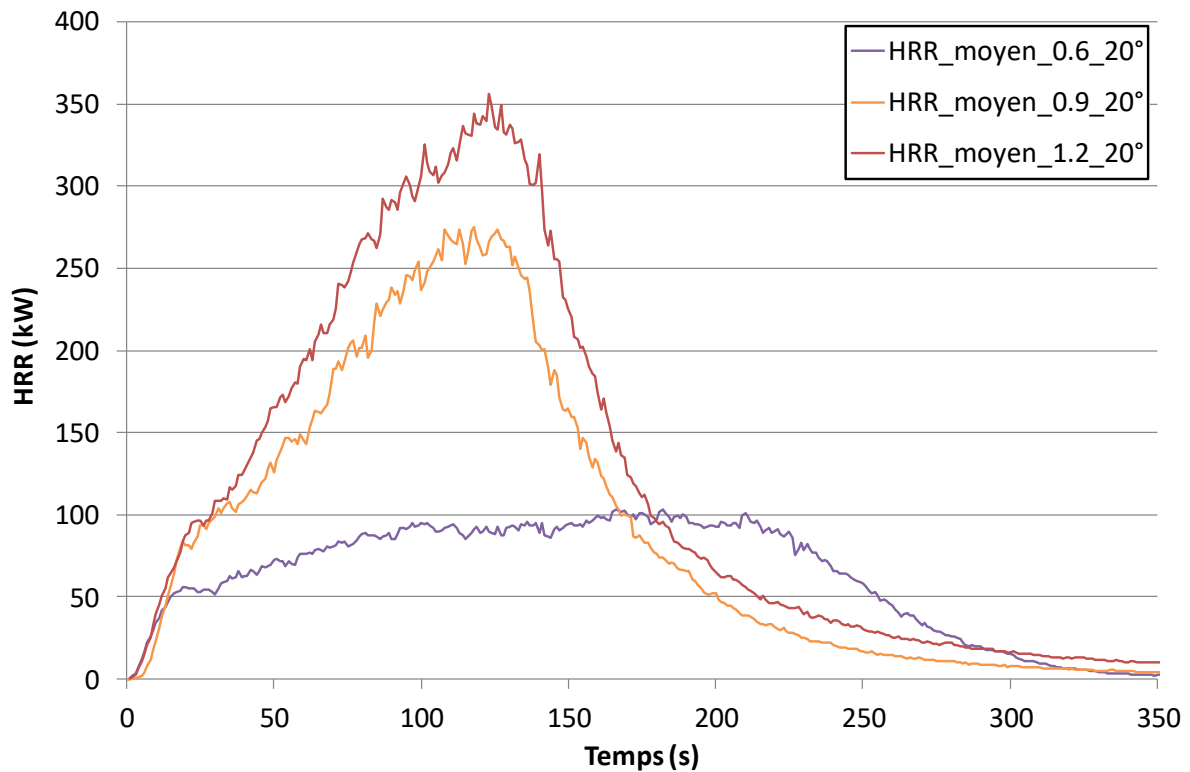


Figure 2-12 : HRR au cours du temps pour les trois charges de litière et pour une pente de 20°.

2.4. Etude de l'écoulement dans la hotte du LSHR

La calorimétrie à consommation d'oxygène induit l'utilisation d'une hotte aspirante. Dans le cas du LSHR, celle-ci à une section de 3 m × 3 m. L'écoulement d'air ainsi créé (notamment au-dessus du banc de combustion situé à 0.9 m de haut) par l'aspiration doit être caractérisé afin de vérifier que son influence n'est pas significative sur la combustion des végétaux. Cette caractérisation nous permettra également de tester le code WFDS afin de vérifier qu'il est en mesure de simuler l'écoulement non réactif dans la hotte avant d'envisager son utilisation pour reproduire les expériences de combustion.

Les configurations expérimentales correspondant aux propagations de feux de litières et à la combustion des arbustes de ciste, ont été reproduites pour mesurer les vitesses de l'écoulement d'air provoqué par la hotte aspirante. Ces mesures ont été réalisées au milieu de la hotte, au-dessus de la litière pour le cas des propagations à plat. Les mesures ont été relevées à l'aide d'un anémomètre unidirectionnel thermique Ahlborn FV A605 TA 1U. Cet anémomètre possède une fréquence d'échantillonnage de 50 Hz et une plage de mesure de 0.01 à 1 m/s pour une précision

Matériel et méthode

de l'ordre de 1 mm/s et un temps de réponse de 0.1 s. Les vitesses sont mesurées dans un cône vertical d'angle 30° (Figure 2-13).

La vitesse de l'écoulement a été mesurée suivant la hauteur au-dessus de cinq positions d'intérêt sur le banc de combustion. Ces points d'intérêt sont disposés sous forme de croix centrée sur le banc de combustion. La Figure 2-13 présente le centre C et le point A situé à 0.5m de C. Les autres points d'intérêt sont également situés à 0.5 du centre C suivant les autres directions. Les mesures de vitesse ont été réalisées au-dessus de chaque point d'intérêt pour une hauteur variant de 0.2 m à 1.5 m avec un intervalle de mesure de 0.1 m. Le capteur de vitesse a été placé parallèlement au lit de combustible dans le but de capturer les vitesses suivant l'axe Oz et donc les composantes principales de vitesses induites par la hotte. Pour chaque point de mesure, la vitesse a été relevée pendant 5 minutes et la moyenne temporelle de la vitesse a été calculée afin de s'affranchir des fluctuations.



Figure 2-13 : Mesure des vitesses de l'écoulement dans la hotte

Les Figure 2-14 et Figure 2-15 représentent les vitesses moyennes et leurs déviations standards suivant la hauteur au-dessus des points A (Figure 2-14) et C (Figure 2-15). Nous voyons que la vitesse augmente avec la hauteur aux dessus des points A et C suivant des profils assez similaires. La vitesse est toutefois plus faible au point C pour une hauteur inférieure à 1 m. En effet, le point A est situé au bord et les entrées d'air sont donc plus marquées à cet endroit. Nous constatons également que la déviation standard présente des amplitudes différentes au-dessus des points A et C. A la position A, la déviation est plus grande lorsque la mesure est proche du lit de combustible. Ce comportement peut être expliqué par la proximité du point A avec le bord du banc où les structures turbulentes pourraient accroître les fluctuations de la vitesse en ces positions.

Au point C, le comportement inverse est observé. Cette position est assez loin du bord du banc pour ne pas être affecté par ces effets. Toutefois, lorsque la hauteur augmente, les entrées d'air latéral convergent en direction du centre de la hotte ce qui accroît les instabilités au-dessus du point et explique donc la plus forte déviation standard observée en ce point. De plus, dans le but de mesurer le HRR, les gaz de combustion doivent être homogénéisés dans le conduit d'extraction. Pour cela, des baffles déflecteurs sont positionnés en sortie de hotte à l'aplomb de la position C. Ces déflecteurs pourraient également perturber l'écoulement amont et accroître les turbulences au-dessus du point C. Enfin, il convient de mentionner que les valeurs des vitesses sont très faibles (inférieures à 0.2 m/s au point A et inférieure à 0.1 m/s au point C) pour une hauteur inférieure à 0.8 m. Sachant que la hauteur des flammes était au maximum de 0.9 m pour les charges de 1.2 kg/m², nous pouvons supposer que l'écoulement induit par la hotte n'influencera pas significativement le front de feu. En effet, les vitesses verticales d'écoulement de l'ordre de 1.4 m/s ont été mesurées (Marcelli et al. 2004) pour des flammes de 0.3 m de haut lors d'une propagation à plat avec une charge de 0.5 kg/m² sans l'utilisation d'une hotte, ce qui est déjà dix fois supérieur aux valeurs des vitesses générées par la hotte. De plus des mesures de PIV au niveau de la litière nous ont permis de voir que les vitesses étaient également très faibles à la base des flammes. Nous avons obtenu des valeurs de $0,026 \pm 0.007$ m/s à 0.08 m de haut (Rochoux., 2013).

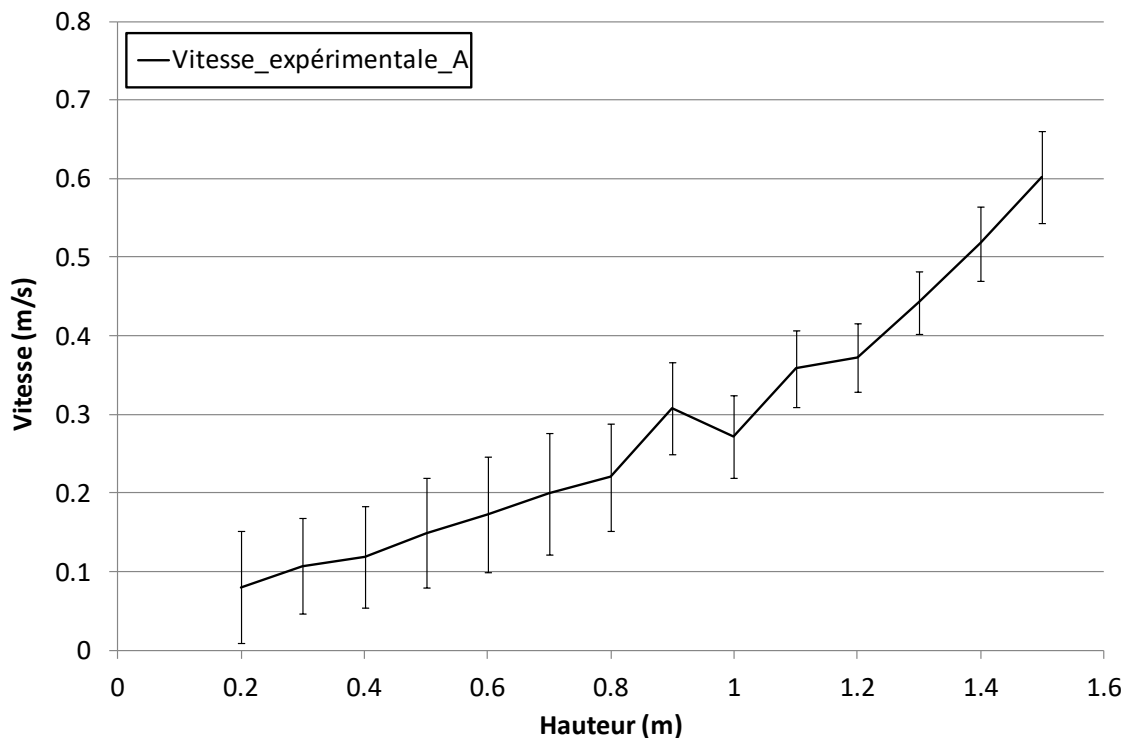


Figure 2-14 : Vitesse et déviation standard mesurée en fonction de la hauteur au-dessus du point A

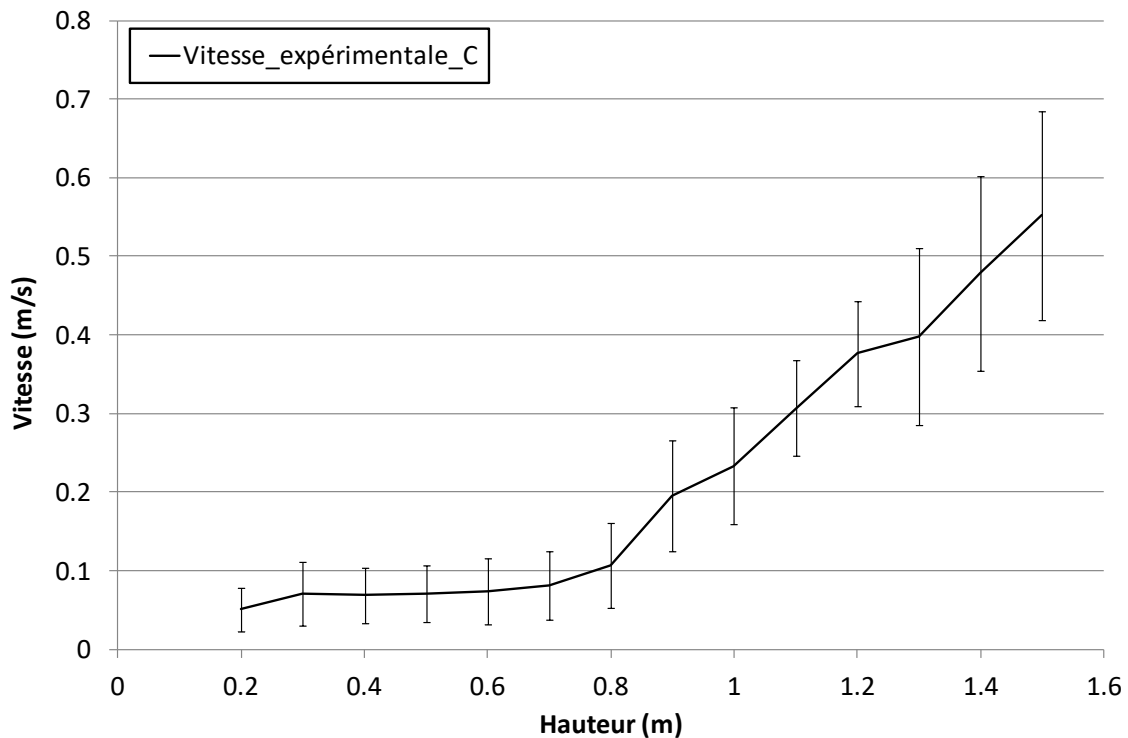


Figure 2-15 : Vitesse et déviation standard mesurée en fonction de la hauteur au-dessus du point C

2.5. Présentation des serveurs de calculs

Les simulations basées sur des modèles détaillés d'incendie ont besoin d'une grande quantité de ressources informatiques. L'utilisation de calculateurs parallèles a donc été nécessaire pour les simulations des propagations de feux de litière et de combustion de cistes. Quatre serveurs ont été utilisés lors de ce travail de thèse. Un Intel Xeon cluster, dont les nœuds sont constitués de deux processeurs Intel Xeon E5-2650 à 8 cœurs fonctionnant à 2,0 GHz avec 32 Go de mémoire principale, a tout d'abord été employé pour dimensionner le domaine de calcul sans combustion correspondant au LSHR avec le banc de combustion et la litière. Les calculs en combustion, coûteux en ressources informatiques ont été lancés sur différents serveurs de calcul plus puissants en fonction de la disponibilité de ces derniers : OCCIGEN au CINES (*Centre Informatique National de l'enseignement Supérieur*), ROMEO au centre HPC de Champagne Ardenne et BRANDO à l'Université de Corse. OCCIGEN est composé de 2106 nœuds de calcul, chacun disposant de 2 processeurs Intel 12 cœurs (E5-2690 v3@2.6 GHz) et de 64 ou 128 Go de mémoire physique. ROMEO est constitué de 130 nœuds de calcul, chaque nœud dispose de 2 processeurs Intel 8 cœurs (E5-2670 [v3@2.6GHz](#)) et de 32 Go de mémoire

Matériel et méthode

physique. Finalement, BRANDO possède 720 cœurs, chacun disposant de 2 processeurs Intel 12 cœurs (E5-2670 [v3@2.3GHz](#)) et 64 Go de mémoire. Il doit être souligné que les simulations les plus coûteuses ont nécessité, 238 cœurs et un temps moyen de simulation de 48h. De plus, aucune différence de résultats n'a été observée pour un même cas lancé sur différents serveurs.

Chapitre 3. Test de performance de WFDS

3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les méthodologies mises au point pour étudier la réaction au feu d'arbustes et caractériser leur structure. Nous avons également détaillé les caractéristiques des différents équipements employés (panneaux radiants et hotte d'extraction) afin de pouvoir les inclure dans les simulations des expériences de comportement au feu des arbustes (cf. chapitre 5). Ce chapitre a pour objectif de tester les performances du code de simulation WFDS dans le cas particulier d'une végétation uniforme (même taille de particules). En effet, WFDS a été modifié afin de prendre en compte de manière plus réaliste les termes sources (dégradation thermique et combustion des résidus charbonneux). De plus, la caractérisation des arbustes a mis en évidence la présence de différentes classes de tailles de particules dont la dynamique de combustion n'est pas uniforme. Une phase préliminaire pour évaluer les capacités de WFDS à reproduire la combustion de structures végétales plus simples est donc nécessaire avant de l'utiliser pour étudier la combustion d'arbustes, plus complexes. Les expériences de propagation de feux de litières d'aiguilles de pin présentées précédemment sont donc utilisées dans ce chapitre pour tester WFDS. Dans un premier temps, les modifications apportées au code WFDS sont présentées. Dans un deuxième temps, la bonne représentation par WFDS de l'écoulement d'air induit par la hotte d'extraction du LSHR est détaillée. Le domaine de calcul est ensuite réévalué afin d'obtenir un ratio temps de calcul / précision optimal. Finalement, la méthode d'allumage numérique est présentée avant de détailler la confrontation entre les puissances prédites et mesurées pour les différentes charges et pentes correspondant aux expériences de propagation.

3.2. Présentation de WFDS et des modifications apportées

WFDS est un code de calcul basé sur un modèle détaillé d'incendie dont l'objectif est de représenter les mécanismes fins régissant la dynamique de combustion des végétaux (Mell,

2009). Il s'agit d'une extension de FDS (Fire Dynamics Simulator), développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) qui est utilisé pour les feux de bâtiments (McGrattan, 2013b). Il s'agit d'un code CFD permettant de résoudre les équations instationnaires et tridimensionnelles régissant la mécanique des fluides, la combustion, et les transferts thermiques. Ce code numérique repose sur l'approche de la simulation des grandes échelles (LES). De plus amples détails du modèle sont donnés par Mell et al. (2009). Afin d'améliorer le code WFDS en comparaison des précédentes études réalisées (propagation de feu de prairie (Mell et al., 2007) et de pin douglas (Mell et al., 2009)), le modèle de dégradation thermique a été modifié et couplé aux équations de transfert de chaleur et de masse en phase gazeuse. Ce modèle de dégradation thermique est basé sur des lois d'Arrhenius pour la dessiccation, la gazéification et l'oxydation des résidus charbonneux (Porterie, 1998). Ainsi lors des confrontations modèles/expériences, la puissance prédite au cours du temps est la somme de la puissance due à la flamme (phase gazeuse) et de la puissance due à combustion des charbons (phase solide).

Les termes sources de masse apparente $\langle \dot{m}_{b,i}''' \rangle$ pour la vapeur d'eau ($i = H_2O$), le combustible gazeux ($i = f$) et le dioxyde de carbone ($i = CO_2$), nécessaires à la résolution des équations de transport de masse d'espèces et d'énergie, sont détaillées ci-dessous. Un modèle similaire à celui présenté dans d'autres études (Morvan 2001, Porterie 2005) a été utilisé afin de représenter la dégradation thermique des particules thermiquement minces. La dégradation thermique en phase solide est décomposée en trois étapes :

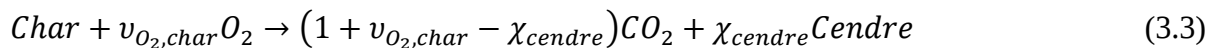
- La dessiccation (endothermique)



- La pyrolyse (endothermique)



- L'oxydation des résidus charbonneux (exothermique)



Test de performance de WFDS

Avec MC la teneur en eau sur base sèche, χ_{char} la fraction massique sur base sèche de combustible converti en résidus charbonneux durant la pyrolyse, $\nu_{O_2, char}$ la constante d'oxydation des charbons à la stœchiométrie fixée à 1.65 (Porterie, 2005) et χ_{cendre} la fraction massique de charbons convertis en cendres durant leur oxydation.

Les équations basées sur des lois d'Arrhenius pour la dessiccation, la pyrolyse et l'oxydation des charbons sont données par :

$$R_{H_2O} = \rho_{b, H_2O} A_{H_2O} T^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_{H_2O}}{T_e}} \quad (3.4)$$

$$R_{pyr} = \rho_{b, sec} A_{pyr} e^{-\frac{E_{pyr}}{T_e}} \quad (3.5)$$

$$R_{char} = \frac{A_{char}}{\nu_{O_2, char}} \rho_g Y_{O_2} \sigma_e \beta_e e^{-\frac{E_{char}}{T_e}} (1 + \beta_{char} \sqrt{Re_e}) \quad (3.6)$$

Les valeurs des constantes cinétiques sont données dans la suite de ce chapitre. Re_e représente le nombre de Reynolds, $Re_e = 2\rho_g |u| r_e / \mu$ avec $r_e = \frac{2}{\sigma_e}$. Le terme contenant Re_e permet de prendre en compte l'effet du soufflage de l'oxygène sur l'oxydation des résidus charbonneux. La constante β_{char} est égale à 0.2, valeur utilisée par Porterie et al (2005).

L'équation gouvernant la température, T_e , des particules thermiquement fines a également été modifiée :

$$\rho_b c_{p,e} \frac{dT_e}{dt} = -\Delta h_{vap} R_{H_2O} - \Delta h_{pyr} R_{pyr} - \alpha_{char} \Delta h_{char} R_{char} - \langle \dot{q}_{c,b}''' \rangle_{Vb} - \langle \nabla \cdot \dot{q}_{r,b}'' \rangle_{Vb} \quad (3.7)$$

Les trois premiers termes du second membre représentent respectivement la dessiccation (endothermique), la pyrolyse (endothermique) et l'oxydation des résidus charbonneux (exothermique). Le paramètre sans dimensions α_{char} est la fraction d'énergie dégagée par l'oxydation des charbons qui est absorbée par le combustible solide, et $(1 - \alpha_{char})$ par la phase gazeuse. Dans le cas présent et dans d'autres études, on considère de façon empirique que $\alpha_{char} = 0.5$ (Porterie, 2005). Les quatrièmes et cinquièmes termes du second membre de (3.7) représentent respectivement les contributions des transferts convectifs et radiatifs moyens sur les éléments combustibles (Mell, 2009). Les valeurs des chaleurs latentes et enthalpies de

réaction sont respectivement $\Delta h_{vap} = 2.259 \times 10^3 J kg^{-1}$, $\Delta h_{pyr} = 418 J kg^{-1}$ (Porterie, 2005) et $\Delta h_{char} = 32 \times 10^3 J kg^{-1}$ (Dahale, 2013).

La modélisation des transferts de chaleur convectifs et radiatifs dans la végétation avec l'approche LES est présentée en détails dans (Mell, 2009). Les transferts convectifs sont donnés par :

$$\langle \dot{q}_{c,b}''' \rangle_{vb} = \beta_e \sigma_e h_{c,e} (T_e - T_g) \quad (3.8)$$

Où $\langle () \rangle$ désigne le caractère explicite du filtre de la méthode LES (Mell, 2009), β_e et σ_e (m^{-1}) sont respectivement la compacité et le rapport surface-volume des particules de végétation de classe e, T_g est la température de la phase gazeuse et $h_{c,e}$ ($W m^{-2} s^{-1}$) le coefficient de transfert convectif (Porterie, 1998) s'écrivant :

$$h_{c,e} = \frac{0.5k(T_g)^{0.683} Re_e^{0.687}}{2/\sigma_e} \quad (3.9)$$

Avec Re_e le nombre de Reynolds précédemment décrit. Le terme de transfert radiatif s'écrit :

$$\langle \nabla \cdot \dot{q}_{r,b}'' \rangle_{vb} = \kappa_{b,e} [4\pi I_b(T_e) - U] \quad (3.10)$$

où $\kappa_{b,e} = \sigma_e \beta_e / 4$ (m^{-1}) est le coefficient d'absorption de la sous maille de végétation, U ($W m^{-2}$) représente le rayonnement incident (intégrale spatiale de la luminance) et $I_b(T_e)$ est la luminance du corps noir à la température T_e .

L'équation tridimensionnelle de transfert radiatif est résolue par la méthode des volumes finis en considérant la phase gazeuse comme un milieu semi-transparent gris. Un traitement spécial du terme radiatif d'émission est requis pour tenir compte de l'effet de l'hétérogénéité de sous-maille sur la température de flamme car il dépend de la température locale à la puissance quatre. La bonne représentation de l'effet de la distribution de température de sous maille est moins critique pour les régions où la température moyenne locale est faible et les gradients des scalaires sont suffisamment résolus. De ce fait, le modèle d'émission en phase gazeuse a été modélisé suivant la formule suivante :

$$\kappa_b I_b(T_g) = \max \left(\chi_r \dot{Q}_c''', \frac{\kappa_g \sigma_B T_g^4}{\pi} \right) \quad (3.11)$$

où χ_r est la fraction de la puissance volumique dégagée par les réactions de combustion en phase gazeuse, $\dot{Q}_c'''$, qui est rayonnée par le volume entourant la région de flamme, κ_g (m^{-1}) est le coefficient d'absorption radiatif du gaz et σ_B ($W m^{-2} K^{-4}$) la constante de Stefan-Boltzmann.

Dans le modèle des particules végétales, la densité apparente et la capacité calorifique sont composées des contributions de la végétation sèche, des résidus charbonneux, des cendres et de la teneur en eau,

$$\rho_b = \rho_{b,sec} + \rho_{b,char} + \rho_{b,cendre} + \rho_{b,H_2O} \quad (3.12)$$

$$c_{p,e} = \frac{\rho_{b,sec}c_{p,sec} + \rho_{b,char}c_{p,char} + \rho_{b,cendre}c_{p,cendre} + \rho_{b,H_2O}c_{p,H_2O}}{\rho_b} \quad (3.13)$$

Où à l'instant initial $\rho_{b,H_2O} = M\rho_b$. Les valeurs des capacités calorifiques sont $c_{p,H_2O} = 4190 J kg K^{-1}$, $c_{p,cendre} = 1244(T_e/300)^{0.315} J kg^{-1} K^{-1}$ (Lautenberger, 2009) et:

$$c_{p,char} = 420 + 2.09T_e + 6.85 \times 10^{-4}T_e^2 \text{ (Park, 2010)} \quad (3.14)$$

$$c_{p,sec} = 10 + 3.7T_e \text{ (Ritchie, 1997)} \quad (3.15)$$

L'équation de conservation de la masse du combustible végétal est donnée par :

$$\frac{d\rho_b}{dt} = -R_{H_2O} - (1 - \chi_{char})R_{pyr} - (1 - \chi_{cendre})R_{char} \quad (3.16)$$

Les taux de variation des différents constituants de la végétation sont donnés par :

$$\frac{d\rho_{b,H_2O}}{dt} = -R_{H_2O} \quad (3.17)$$

$$\frac{d\rho_{b,sec}}{dt} = -R_{pyr} \quad (3.18)$$

$$\frac{d\rho_{b,char}}{dt} = \chi_{char}R_{pyr} - R_{char} \quad (3.19)$$

$$\frac{d\rho_{b,cendre}}{dt} = \chi_{cendre} R_{char} \quad (3.20)$$

Finalement, les termes sources implantés en phase gazeuse pour la vapeur d'eau, le combustible gazeux et le CO_2 sont donnés par $\langle \dot{m}_{b,H_2O}''' \rangle = R_{H_2O}$, $\langle \dot{m}_{b,f}''' \rangle = (1 - \chi_{char}) R_{pyr}$ et $\langle \dot{m}_{b,CO_2}''' \rangle = (1 + \nu_{O_2,char} - \chi_{cendre}) R_{char}$. Celui relatif à la consommation d'oxygène due à l'oxydation des résidus charbonneux est donnée par $-\nu_{O_2,char} R_{char}$.

3.3. Dimensionnement du domaine de calcul sans combustion

3.3.1. Etude de l'écoulement dans la hotte en modélisant l'ensemble du laboratoire

Il convient de rappeler (cf. section 3.1) que les calculs de puissance des feux sont basés sur la mesure de la consommation d'oxygène, obtenue avec une hotte d'extraction qui collecte les produits de combustion gazeux. Le dispositif expérimental génère un écoulement d'air pouvant (légèrement) influencer la propagation du feu. Il nous est donc apparu essentiel de vérifier que WFDS était capable de représenter correctement l'écoulement dans la hotte sans combustion (tout en incluant la strate végétale et le banc de combustion).

Dans un premier temps, les simulations ont concerné l'ensemble du laboratoire expérimental, incluant le LSHR et les différentes ouvertures (Figure 3-1). Le domaine de calcul est ainsi plus large que le LSHR à l'intérieur duquel les essais de propagations sont réalisés. Une seconde étape visera à réduire la taille du domaine de calcul (vers la taille de la hotte) pour gagner en temps de simulation. Mais auparavant il est important de conduire une analyse de sensibilité avec les dimensions réelles du laboratoire : 6.6 m de long, 6.4 m de large et 4.4 m de haut.

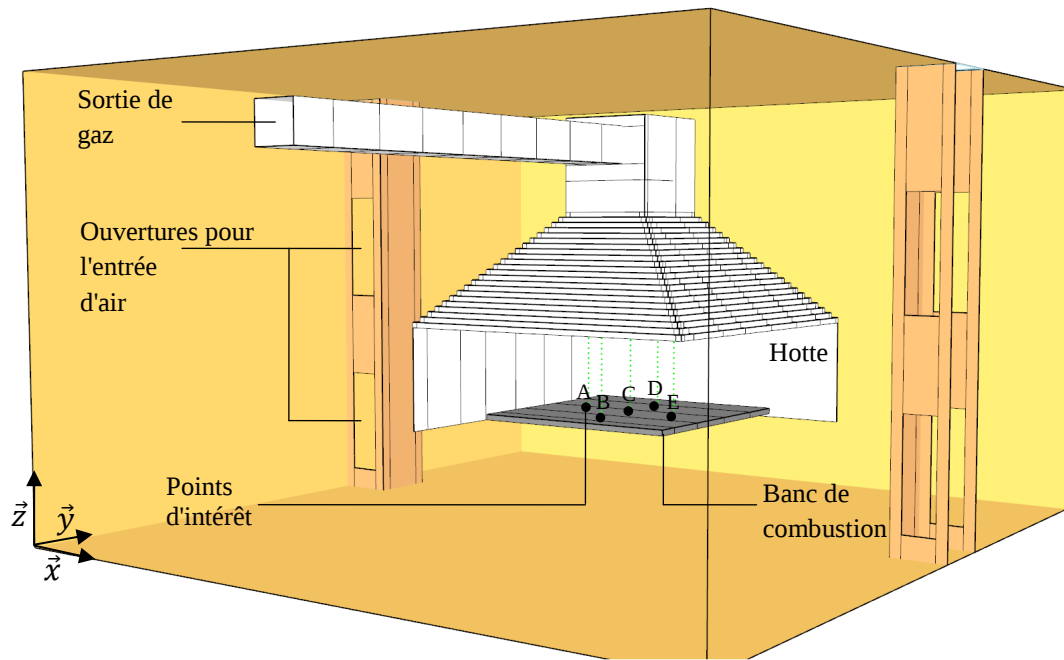


Figure 3-1 : Laboratoire expérimental incluant le LSHR et les ouvertures

Les simulations ont été réalisées pour trois maillages uniformes avec des tailles de mailles de : 2.5 cm, 5 cm et 10 cm. Ces résolutions, plus grossières que celles calculées pour les besoins de la combustion ont été choisies afin de limiter le temps de calcul. En effet, loin du feu, la taille des mailles peut être plus grande que dans la zone de combustion sans pour autant altérer la précision des résultats dans la région du feu. Les propriétés physiques utilisées pour simuler la hotte correspondent à l'acier. Celles utilisées pour le banc de combustion correspondent au béton cellulaire durci en autoclave. WFDS utilise un maillage cartésien. De ce fait, la hotte a été modélisée par un assemblage de multiples obstructions rectangulaires formant un escalier permettant de représenter sa géométrie pyramidale. Il doit être précisé que la même modélisation a été utilisée pour réaliser l'inclinaison du banc à 20° à la fin de ce chapitre pour les expériences en propagation. L'extraction a été réalisée grâce à une condition aux limites de type débit volumique correspondant à la valeur du débit d'extraction mesuré (0.95 m³/s).

Pour cette analyse de sensibilité, nous allons confronter les prédictions du modèle aux mesures du module de la vitesse de l'écoulement en cinq positions d'intérêt au-dessus du banc de combustion (Figure 3-1). Les points sont disposés sous forme de croix centrée sur le banc de combustion. Les points A, B, D et E sont placés à 0.5m du centre C. Le module de la vitesse de l'écoulement ainsi que ses différentes composantes ont été calculées suivant la hauteur z en ces cinq points. Les résultats des simulations pour une même position (x, y) seront présentés en

fonction de la hauteur à des intervalles correspondant à la résolution de domaine la plus grossière, soit 10 cm.

La moyenne temporelle du module de la vitesse suivant la hauteur au-dessus de la position C est représentée sur la Figure 3-2. Celle-ci a été réalisée sur 300 s après avoir atteint le régime stationnaire (60 s). Par soucis de lisibilité, seul l'écart type des données expérimental est présenté. Peu de différences peuvent être observées entre les vitesses prédites pour les différents maillages entre 0.2 et 0.8 m de hauteur au-dessus du banc de combustion. Cependant de 0.8 à 1.5 m de hauteur, l'écart entre les vitesses prédites pour les différents maillages augmente avec la hauteur, et on note un écart maximal pour le maillage à 10 cm. La taille de maille de 10 cm n'est donc pas adéquate pour prédire l'écoulement près de la zone d'extraction d'air. Les valeurs de vitesses pour le maillage de 5 cm sont proches des résultats de références obtenus avec un maillage de 2.5 cm. Le maillage à 5 cm présente donc le meilleur compromis entre le temps de calcul et la précision souhaitée. Ces résultats sont représentatifs de ceux obtenus au-dessus des points A, B, D et E (cf. annexes B1). En comparant les valeurs prédites et expérimentales nous observons (présentées dans le Chap. 2.4) la même tendance entre 0.2 m et 0.8 m au-dessus du banc de combustion. Nous notons une différence moyenne de 0.14 m/s. Les valeurs prédites entre 0.8 m et 1.5 m sont quant à elle en accord avec les valeurs mesurées pour les maillages de 2.5 cm et 5 cm si l'écart type est pris en compte.

La Figure 3-3 présente le module de la vitesse prédite et ses composantes v et w suivant les directions y et z (Figure 2-13) respectivement pour le maillage de 2.5 cm ainsi que les valeurs mesurées au-dessus du point C. La vitesse mesurée suit la tendance de la composante v (axe y) pour des hauteurs inférieures à 0.8 m et celle de la composante w (axe z) entre 0.8 et 1.5 m. Pour des hauteurs inférieures à 0.8 m, l'écoulement est parallèle au banc de combustion. De plus, les caractéristiques du capteur et son positionnement permettent de mesurer principalement la composante v (axe y), comme prédit par le modèle. La direction de la vitesse devient verticale lorsque la hauteur augmente. La vitesse mesurée pour ces hauteurs est donc majoritairement celle de la composante w (axe z), ce qui correspond également aux données prédites par le modèle. D'après ces résultats combinés, il peut être conclu que la taille de maille de 5 cm est suffisante pour reproduire fidèlement l'écoulement sous la hotte d'extraction.

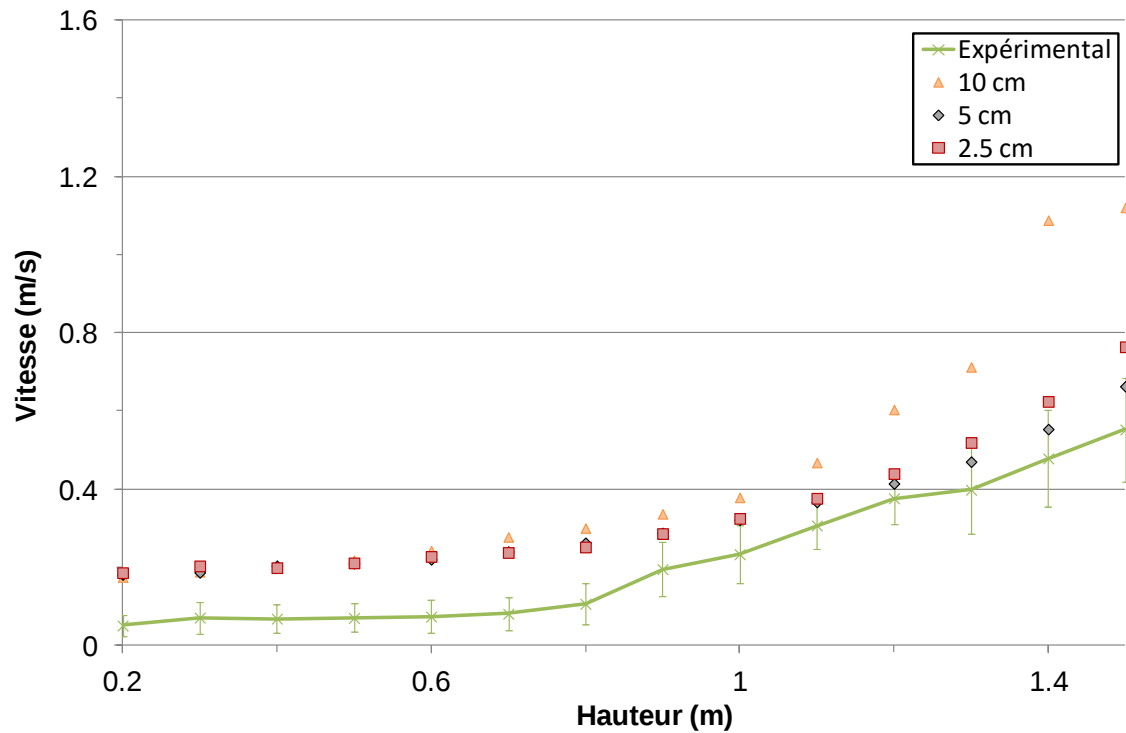


Figure 3-2 : Moyenne temporelle du module de la vitesse et déviation standard au-dessus de la position C pour le grand domaine de calcul (laboratoire) et pour les différents maillages

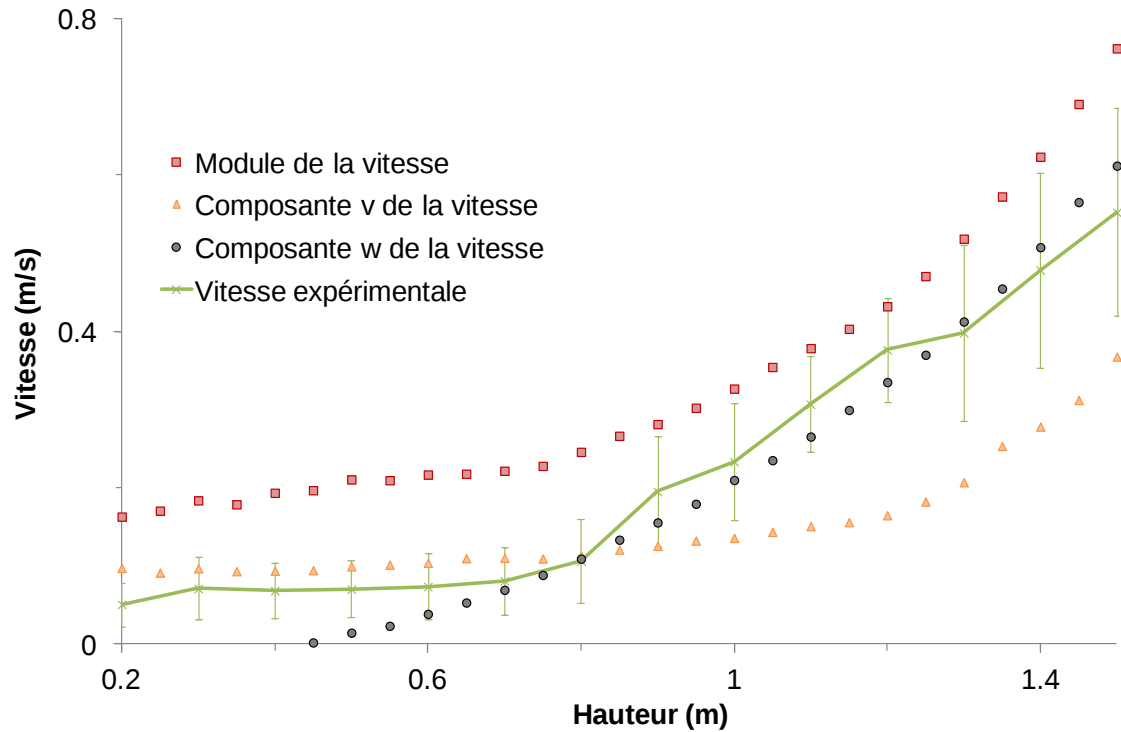


Figure 3-3 : Moyenne temporelle de la vitesse suivant la hauteur des résultats expérimentaux et numérique (maillage 1) au-dessus de la position C

Dans le but de vérifier la bonne résolution de l'écoulement, la fraction d'énergie cinétique non résolue, appelée mesure de résolution de la turbulence (MTR), a été quantifiée (McGrattan, 2013b). La MTR est un critère similaire à celui de Pope (2004). Elle est définie par :

$$MTR(x, t) = \frac{k_{sgs}}{k_{res} + k_{sgs}}$$

où

$$k_{res} = \frac{1}{2} \tilde{u}_i \tilde{u}_i$$

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} (\tilde{u}_i - \hat{\tilde{u}}_i)(\tilde{u}_i - \hat{\tilde{u}}_i)$$

avec $\tilde{u}_i$ est la vitesse résolue en LES et $\hat{\tilde{u}}_i$ la valeur filtrée de $\tilde{u}_i$ à une échelle 2Δ où Δ est le filtre LES (dans FDS, $\Delta = \delta_x$). Plus de détails sont présentés par McGrattan (2013b).

La MTR a été effectué en chaque point suivant la hauteur au-dessus des différents points d'intérêts présentés précédemment. Une moyenne temporelle a ensuite été réalisée pour chaque point suivant la hauteur. Finalement, pour chaque hauteur (au-dessus des cinq points A, B, C, D et E), on a calculé la moyenne spatiale des MTR moyennés en temps qui est représentée sur la Figure 3-4. Selon McGrattan (2013b), des résultats satisfaisants pour des vitesses moyennes et des concentrations d'espèces non réactives sont obtenus pour des valeurs moyennes de MTR proches de 0.2. Nous pouvons de nouveau constater que les maillages à 2.5 et 5 cm répondent à ce critère ce qui n'est pas le cas du maillage à 10 cm pour des hauteurs supérieures à 0.9 m.

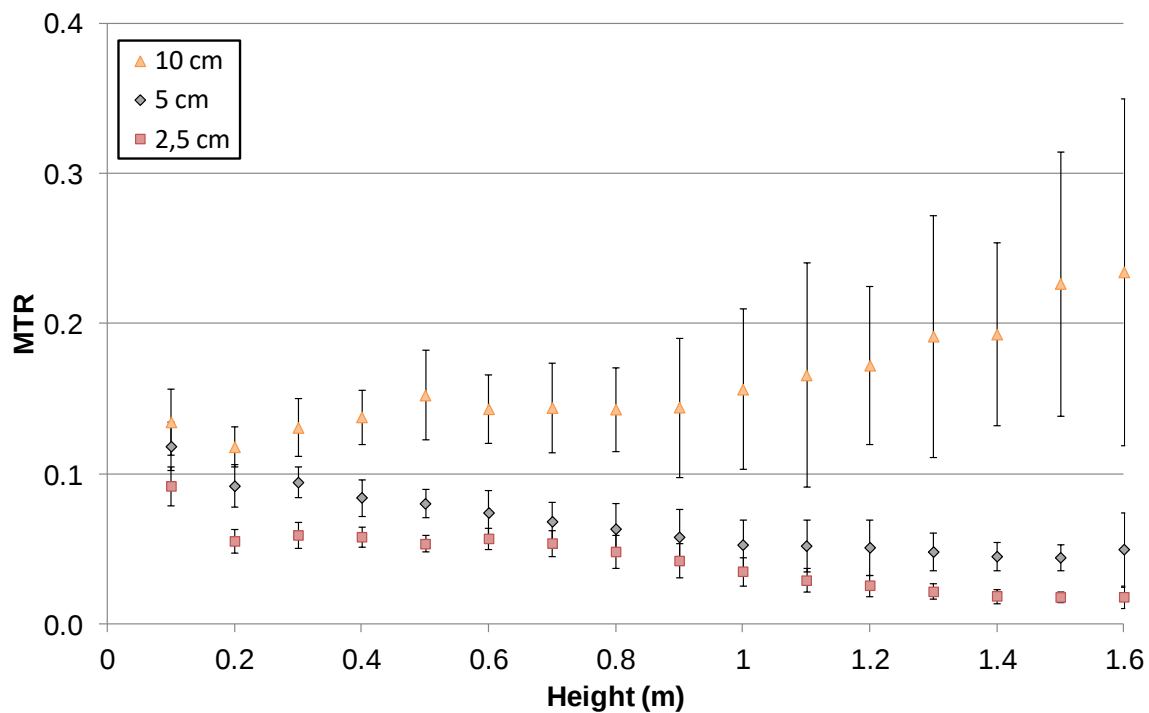


Figure 3-4 : Mesure de résolution de la turbulence moyenne avec déviation standard pour les différents maillages

3.3.2. Etude de l'écoulement en limitant le domaine de calcul à la hotte (LSHR)

La taille du domaine de résolution et le nombre de mailles utilisées sont des facteurs impactant grandement le temps de calcul. Plus le domaine et le nombre de maille sont grands, plus le temps de calcul est long. Les vitesses de calculs (rapport entre la durée simulée et le temps de calcul réel) correspondant aux différents domaines sont présentées dans le Tableau 3-1. Nous constatons que le temps minimum de calcul est de 20.6 jours pour représenter correctement l'écoulement (maillage de 5 cm) avec un seul processeur pour le domaine de calcul comprenant le laboratoire. Ce temps passe à 46 jours pour le calcul de référence (maillage de 2.5 cm et domaine du laboratoire) avec 14 processeurs. Lors de ces calculs nous ne disposions pas d'un ordinateur haute performance (qui sera utilisé ensuite pour les calculs en combustion). Nous avons néanmoins souhaité optimiser la taille du domaine de calcul afin de réduire les temps de simulation. Un domaine de calcul limité à la hotte du LSHR et découpé suivant deux tailles de mailles (maillage 5) a donc été testé pour améliorer les temps de calculs sans perdre en précision.

Tableau 3-1 : Temps de calcul pour les différents maillages

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3	Maillage 4	Maillage 5
Domaine de calcul	Laboratoire	Laboratoire	Laboratoire	Laboratoire	LSHR
Taille de maille (cm)	2.5	5	10	2 et 4	2 et 4
Nombre de mailles	11 489 280	1 436 160	179 520	7 491 000	2 707 200
Nombre de processeurs	14	1	1	16	16
Vitesse de calcul (s /j)	13	29	883	17.5	72
Temps de calcul pour 600s (j)	46.1	20.6	0.68	34.3	8.3

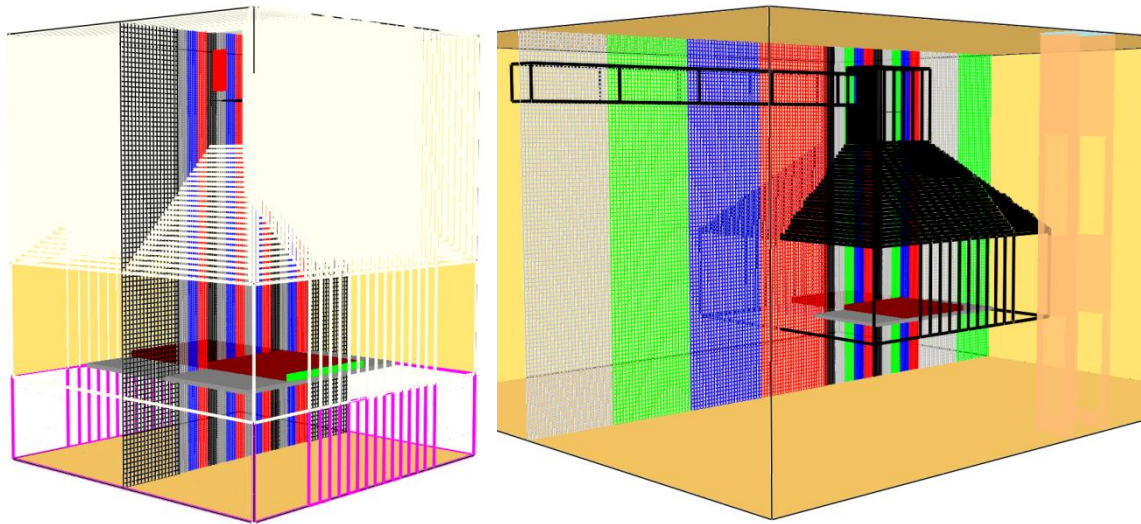


Figure 3-5 : Domaines de calcul limité au LSHR (à gauche) et domaine du laboratoire de référence redécoupé (à droite)

Dans le but d'optimiser les différentes exigences du maillage dans la litière et dans la zone de combustion présentée dans la section suivante, la taille de maille a été fixée à 2 cm dans la litière, ainsi qu'au-dessus et en-dessous de la litière (Figure 3-5 gauche). Un maillage plus grossier de 4 cm a été utilisé sur le reste du domaine pour modéliser l'écoulement non réactif. La taille de maille 4 cm a été choisie pour que les sommets des mailles des deux maillages coïncident, ce qui n'est pas possible avec des mailles de 5 cm (McGrattan 2013a). Un découpage similaire a également été réalisé sur le domaine du laboratoire pour servir de simulation de référence afin de valider le domaine du LSHR (Figure 3-5 droite). La moyenne temporelle du module des vitesses et des composantes des vitesses a été réalisée comme précédemment au-dessus des points d'intérêt. Les résultats obtenus en fonction de la hauteur au-dessus du point C sont présentés sur la Figure 3-6. Ils sont représentatifs des résultats obtenus

Test de performance de WFDS

au-dessus des autres points d'intérêt. En ce qui concerne le module de la vitesse et la composante verticale de la vitesse w , peu de différences peuvent être observées entre les résultats prédits pour les deux domaines de calcul. Les différences les plus importantes concernent les vitesses horizontales avec une légère surestimation de la composante v de la vitesse pour le domaine réduit au LSHR en partie basse. Cependant, ces variations sont de faibles amplitudes (< 0.15 m/s) et nous avons considéré qu'elles étaient suffisamment faibles pour ne pas influencer la dynamique de combustion. Les calculs réalisés pour le domaine réduit à l'échelle du LSHR présentent donc des résultats similaires à ceux obtenus pour le domaine du laboratoire avec un temps de calcul réduit (76 % de réduction du temps de calcul). Ce domaine a donc été choisi pour la suite de l'étude.

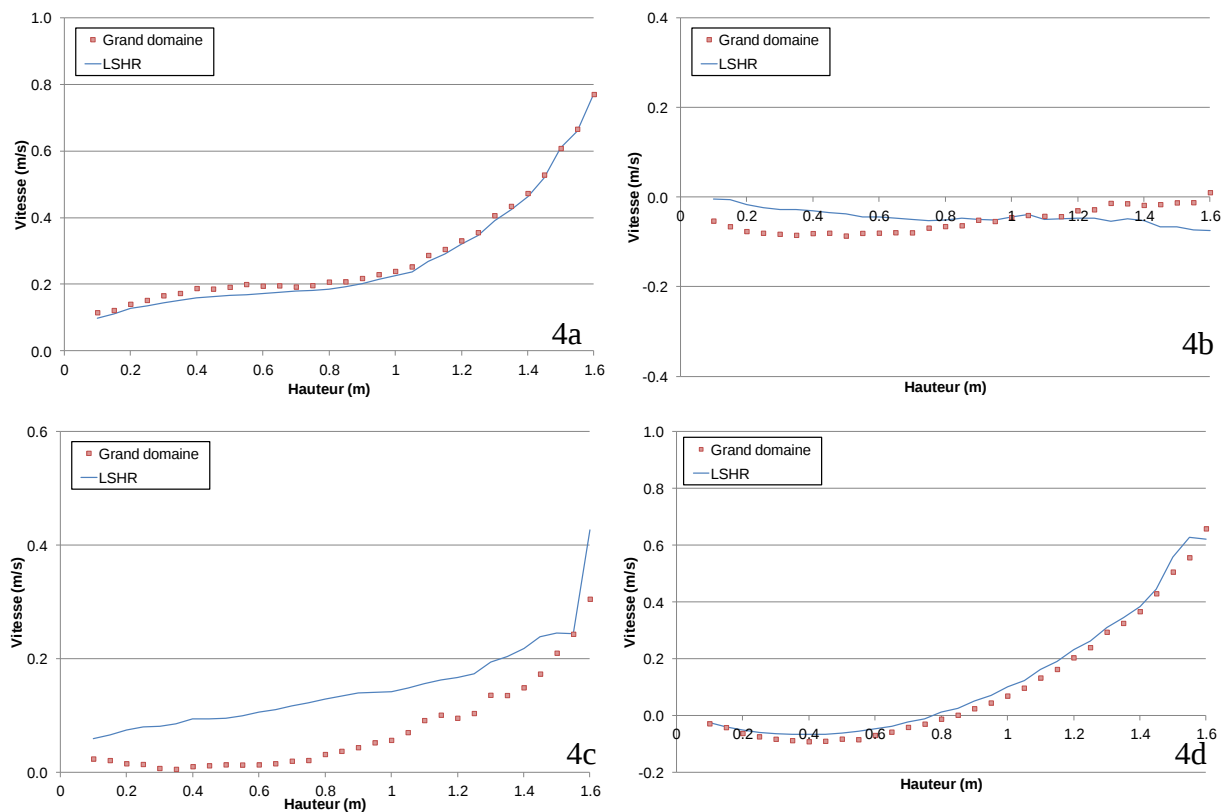


Figure 3-6 : Simulation de la vitesse dans la hotte du LSHR : comparaison entre le grand domaine de calcul et le domaine limité à la hotte au point C : a) module de la vitesse, b) composante u , c) composante v , d) composante w .

3.4. Etude préliminaire dans le cas de la combustion

Avant de confronter les résultats obtenus lors des expériences de propagation avec les prédictions des simulations, nous avons mené une étude pour dimensionner le maillage dans la

zone de combustion, pour déterminer un allumage numérique approprié et pour tester l'effet de la taille des mailles sur la précision des résultats de simulation.

3.4.1. Calculs préliminaires relatifs au maillage pour les propagations

La taille des mailles compatible avec la simulation des expériences de propagation a été évaluée en tenant compte de deux longueurs caractéristiques associées à deux phénomènes physiques impliqués dans la combustion. La première longueur caractéristique calculée concerne le lit de combustible. En effet, pour des feux dont la propagation est dominée par le rayonnement, il est nécessaire d'estimer la longueur d'extinction (δ_R) caractérisant l'absorption du flux radiatif dans la végétation (Morvan, 2011). δ_R est obtenu à partir de la compacité de la phase solide (β_e) et du rapport surface-volume des particules végétales (σ_e) :

$$\delta_R = \frac{4}{\beta_e \sigma_e} \quad (3.21)$$

La taille de maille utilisée pour la litière d_{x_b} doit être inférieure à δ_R . Deux relations sont proposées dans la littérature. Mell (2007) propose d'utiliser une taille de maille maximum d_{x_b} inférieure à trois fois δ_R alors que Morvan et Dupuy (2001) suggèrent d'utiliser une valeur de d_{x_b} inférieure à cinq fois δ_R . Les valeurs obtenues pour les différentes charges étudiées sont présentées dans le Tableau 3-2.

La seconde longueur caractéristique calculée concerne l'écoulement en phase gazeuse au-dessus du banc de combustion. La résolution spatiale nécessaire à sa bonne représentation est donnée par l'expression adimensionnelle $z_c/\delta x$ proposée par McGrattan (2013b) en fonction de la taille caractéristique du feu z_c . z_c dépend de l'intensité du feu $\dot{q}$, la masse volumique, la capacité calorifique massique et la température de l'air ambiant, respectivement ρ_∞ , c_p et T_∞ :

$$z_c = \left(\frac{\dot{q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3.22)$$

McGrattan (2013b) propose de prendre des valeurs de $z_c/\delta x$ comprises entre 4 et 16. Dans notre cas, la formule correspondant à un front de flamme linéaire a été utilisée pour déterminer z_c (Quintiere, 1998):

$$z_{c,line} = \left(\frac{\dot{q}'}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.23)$$

Où $\dot{q}'$ représente la puissance linéaire du feu. Comme le front de flamme reste quasi-linéaire durant les propagations à plat, l'intensité linéaire du feu est équivalente au plateau de HRR : 41, 87 et 130 kW/m respectivement pour les charges de combustible de 0.6, 0.9 et 1.2 kg/m². En ce qui concerne les cas en pente, la puissance linéaire est obtenue par la division du HRR par la longueur du front de flamme durant la phase stationnaire. La longueur du front de flamme est quant à elle obtenues par traitement d'images (Tihay, 2014). Les tailles de maille minimales et maximales utilisables pour la phase gazeuse dx_g en suivant les recommandations de McGrattan (2013b) sont données dans le Tableau 3-2.

D'après la longueur d'extinction, la taille de maille nécessaire dans le lit de combustible doit être inférieure à 1.5 cm ($dx_{b,\delta_R/3}$) ou, au mieux, inférieure à 0.8 cm ($dx_{b,\delta_R/5}$). δ_R dépend des caractéristiques du lit de combustible et des particules. Les fractions volumiques des litières étant comprises entre 0.030 et 0.034, aucune différence significative ne peut être observée entre les différents cas expérimentaux. A contrario, $z_{c,line}$ est directement lié au HRR dont la valeur varie énormément. Pour une même charge, les cas à plat présentes de plus faibles valeurs de HRR que les cas en pente. De plus, plus le HRR est faible, plus la taille de maille doit être petite. De ce fait, seuls les cas à plat ont été pris en compte dans cette analyse pour déterminer la taille de maille la plus fine. Les valeurs obtenues pour $dx_{g,z_c,min}$ et $dx_{b,\delta_R/3}$ sont proches, excepté pour la charge à 0.6 kg/m² pour laquelle $dx_{g,z_c,min}$ est plus proche de $dx_{b,\delta_R/5}$. Ces résultats nous conduisent à utiliser la même taille de maille dans la litière et en phase gazeuse au-dessus de la litière (pour simuler la combustion).

Les simulations pour les cas à plat ont donc été lancées avec des tailles de maille de 3 cm, 2 cm, 1.5 cm et 1 cm dans la zone de combustion, en accord avec les valeurs du Tableau 3-2 afin d'identifier la sensibilité de la combustion au maillage. Pour diminuer le temps de calcul, un maillage grossier a été utilisé pour les zones hors combustion excepté pour le cas avec des mailles de 3 cm. En effet, la taille de maille grossière doit être un multiple de la taille de maille fine. La première taille de maille grossière est donc 6 cm. Afin d'être en accord avec la résolution minimum pour représenter l'écoulement (5 cm), ce maillage grossier ne peut être utilisé.

Tableau 3-2 : Longueurs caractéristiques et tailles de mailles associées

Cas expérimental (charge_pente)	δ_R (m)	$dx_{b,\delta_R/3}$ (m)	$dx_{b,\delta_R/5}$ (m)	$z_{c,line}$ (m)	$dx_{g,z_c,min}$ (m)	$dx_{g,z_c,max}$ (m)
------------------------------------	----------------	----------------------------	----------------------------	------------------	-------------------------	-------------------------

0.6_0	0.041	0.014	0.008	0.111	0.007	0.028
0.9_0	0.043	0.014	0.009	0.184	0.012	0.046
1.2_0	0.038	0.013	0.008	0.241	0.015	0.060
0.6_20	0.040	0.013	0.008	0.159	0.010	0.040
0.9_20	0.043	0.014	0.009	0.230	0.014	0.058
1.2_20	0.044	0.015	0.009	0.284	0.018	0.071

3.4.2. Dimensionnement de l'allumage

Avant de réaliser l'analyse de sensibilité au maillage, nous avons dû mettre au point un allumage numérique qui ne perturbe pas les calculs. Nous le présentons succinctement dans ce paragraphe. La taille de maille utilisée est de 2 cm. Nous rappelons que la méthode d'ignition expérimentale consiste à allumer la litière avec une ligne d'éthanol (cf. Chapitre 2.3). Un calcul préliminaire de la quantité d'aiguilles de pins participant à la combustion peut être réalisé de la façon suivante.

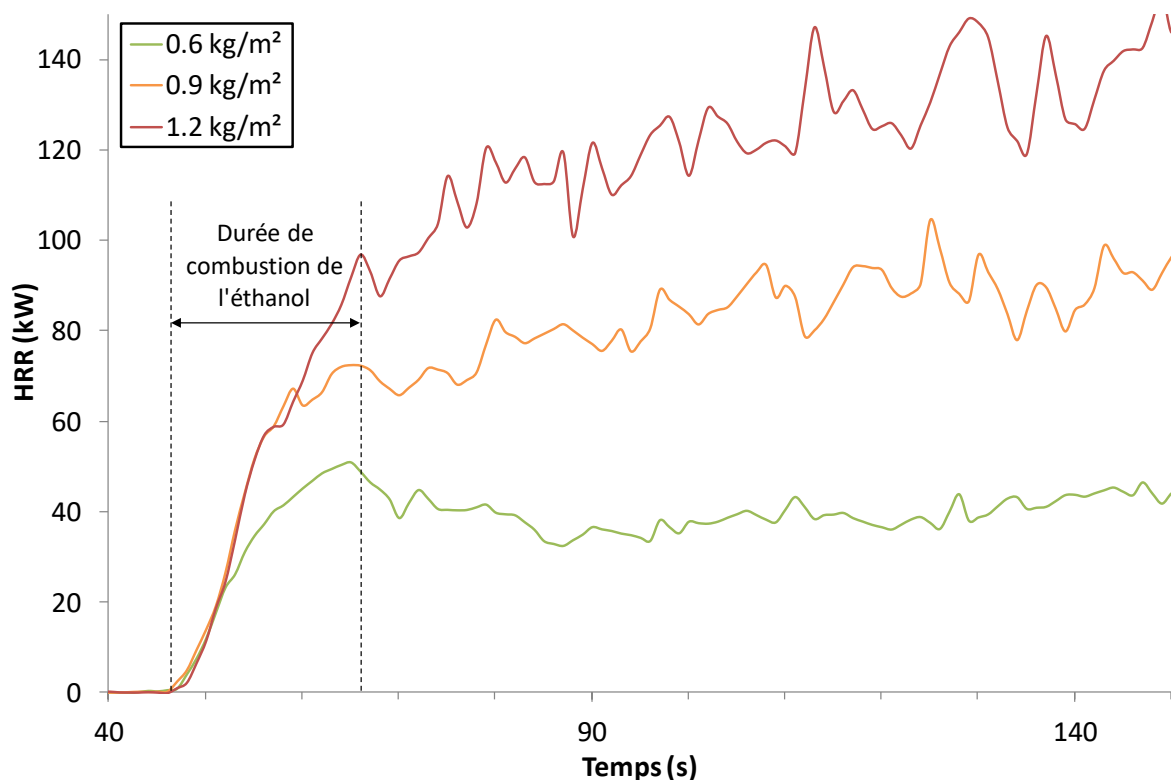


Figure 3-7 : HRR à l'allumage pour les charges de combustible de 0.6, 0.9 et 1.2 kg/m²

Une quantité de 4 ml d'éthanol a été utilisée pour réaliser l'allumage pour une charge de combustible de 0.6 kg/m² alors que 6 ml ont servi pour les charges de 0.9 et 1.2 kg/m². Les durées de combustion de l'éthanol sans présence de végétation ont d'abord été mesurées pour

estimer la durée de l'allumage. Par la suite, la masse d'aiguilles, $m_{needles}$, impliquée dans l'allumage a été estimée par la formule suivante :

$$m_{needles} = \frac{\int_0^{t_{ig}} \dot{q} dt - V_{ethanol} \times \Delta H_{c,ethanol}}{\Delta H_{c,needles}} \quad (24)$$

Où t_{ig} représente la durée d'allumage (cf. Figure 3-7), $V_{ethanol}$ est le volume d'éthanol utilisé pour allumer la végétation et $\Delta H_{c,ethanol} = 21300 \text{ kJ/L}$ est le pouvoir calorifique inférieur de l'éthanol. Après calcul, la masse d'aiguilles impliquées dans l'allumage a été estimée à 20 g, 32 g et 35 g pour respectivement des charges de litières de 0.6, 0.9 et 1.2 kg/m². WFDS offre différentes possibilités de modélisation pour simuler l'allumage expérimental. Deux méthodes numériques d'allumage ont été étudiées. La première méthode a consisté à introduire un bruleur surfacique de puissance prescrite à l'extrémité du lit de combustible tel que la puissance dégagée soit égale à celle de l'éthanol et des aiguilles de pins impliquées dans l'allumage. Suivant l'étude précédemment réalisée, la surface de la source prescrite a été fixée à 1 m x 0.04 m pour une puissance surfacique de 1100 kW/m² pendant 18s pour une charge de 0.6 kg/m². Il convient de noter que la longueur du lit de combustible a été fixée à 1.96 m dans le but d'éviter la superposition des aiguilles et de la bande. La seconde méthode consiste à imposer une température de 1000°C à plusieurs rangées de particules jouant ainsi le rôle d'allumeur. Les propriétés des particules sont équivalentes à celles du reste de la litière. Une bande de 4 cm de large, 1 m et de long et d'une hauteur égale à celle du lit de particules est ainsi utilisée en bout de litière pour allumer numériquement le feu. Le temps durant lequel la température de l'allumeur est de 1000°C a été fixé à la durée de la combustion de l'éthanol, soit 18 s (cf. Figure 3-7).

L'allumage volumique réalisé à l'aide de particules chaudes fourni une meilleure représentation de l'allumage expérimental que le bruleur surfacique. En effet, le front de feu créé est homogène sur la largeur de la litière avec des puissances dégagées équivalentes aux puissances relevées. Bien que le bruleur surfacique produise la puissance adéquate à l'allumage, le transfert de chaleur au lit de combustible n'est pas suffisant pour obtenir un front de flamme homogène, provoquant une décroissance progressive du HRR jusqu'à l'arrêt de la combustion en milieu de banc. L'allumage par particules chauffées à 1000°C a donc été choisi pour le reste de l'étude.

Afin de réaliser un allumage numérique homogène, une attention particulière doit être portée sur le temps à partir duquel celui-ci est effectué. Bien que ce temps n'influence pas l'allumage expérimental, il est nécessaire de le déterminer pour la simulation numérique. Un régime

d'écoulement établi doit être atteint dans la hotte d'extraction pour pouvoir lancer l'allumage afin d'éviter les perturbations (Figure 3-8). Après plusieurs essais et après avoir déterminé une condition de régime établi (cf. annexe B2), l'allumage numérique a été réalisé après un délai de calcul de 60 secondes.

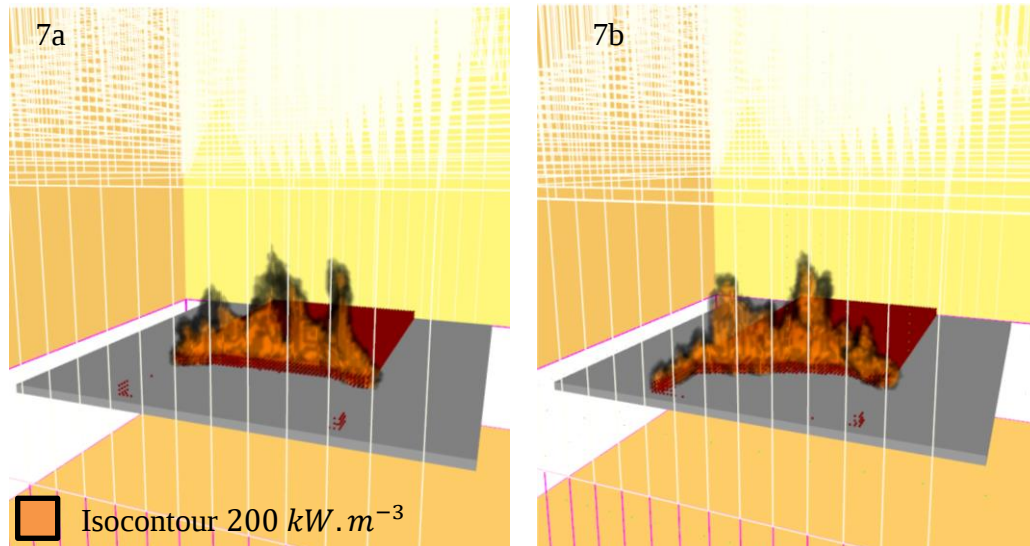


Figure 3-8 : Influence du temps d'allumage sur la forme du front de flamme pour une charge de combustible de 0.9 kg/m^2 : a) allumage numérique réalisé après la stabilisation de l'écoulement, b) allumage numérique réalisé avant la stabilisation de l'écoulement

3.4.3. Analyse de sensibilité au maillage

Les principaux paramètres thermo-physiques utilisés en entrée du modèle sont présentés dans la Tableau 3-3. La combustion en phase gazeuse est modélisée par une réaction globale à une étape en considérant un combustible du type $C_xH_yO_z$ où x , y et z ont été obtenus à partir de l'analyse élémentaire de broyat d'aiguilles de pin. Les résidus charbonneux sont formés durant la dégradation de la végétation et sont supposés constitués de carbone pur et de cendres. La fraction de charbon χ_{char} a été prise dans la littérature (Zaida, 2012). L'enthalpie de combustion des gaz Δh_c a été calculée par différence entre le pouvoir calorifique inférieur des aiguilles de pin et l'énergie de combustion des résidus charbonneux. Cette dernière a été estimée comme le produit de χ_{char} et de son enthalpie de combustion Δh_{char} (Dahale, 2013). Le calcul de la fraction radiative est présentée plus en détails au chapitre 6.4.1 ainsi que dans Morandini et al. (2013) et Tihay et al. (2014). La valeur du facteur d'émission des suies χ_s est issue de la littérature (Mell, 2009). Finalement, les conditions ambiantes ont été mesurées lors de chaque expérience.

Test de performance de WFDS

Les paramètres géométriques de la litière et des aiguilles de pin sont également présentés dans le Tableau 3-3. Il doit être souligné que la hauteur du lit de combustible h_b doit être un multiple de la taille de maille utilisée. De ce fait, la masse volumique apparente a du être légèrement ajustée afin d'obtenir la charge de combustible souhaitée. La valeur moyenne des différences entre les masses volumiques apparentes expérimentales et numériques est de 9.3%.

Tableau 3-3 : Paramètres d'entrée des propriétés thermo-physiques requis par WFDS

Phase	Symbole	Valeur
Solide	MC	Cas à plat : 5 % Cas en pente : 3% pour 0.6 kg/m ² , 5 et 8% pour 0.9 kg/m ² et 8% pour 1.2 kg/m ²
	χ_{char}	0.27
	χ_{ash}	0.11
	$\Delta h_{vap} (kJ/kg)$	2259
	$A_{H_2O} (\sqrt{K}/s)$	600000
	$E_{H_2O} (K)$	5800
	$\Delta h_{pyr} (kJ/kg)$	418
	$A_{pyr} (1/s)$	36300
	$E_{pyr} (K)$	7250
	$\Delta h_{char} (kJ/kg)$	-32740
	$A_{char} (m/s)$	215
	$E_{char} (K)$	9000
	$\nu_{O_2, char}$	1.65
	β_{char}	0.2
	$\sigma_e (m^{-1})$	3057
	$\rho_e (kg/m^3)$	511
	$\rho_b (kg/m^3)$	Voir tableau 2-2 chapitre 2 section 2.3.1
	F_{C_D}	3/8
	α_{char}	0.5
	h_b	Voir tableau 2-2 chapitre 2 section 2.3.1
	$\Delta h_c (kJ/kg)$	16360

Test de performance de WFDS

Gazeuse	Valeur max cas à plat : 0.17 pour 0.6 kg/m ² 0.20 pour 0.9 kg/m ² 0.22 pour 1.2 kg/m ²
χ_{rad}	Valeur max cas en pente : 0.24
χ_s	0.02
T_a (°C)	18°C à 24°C
Humidité relative (%)	26 % à 50%

Avant toute analyse, il doit être rappelé que WFDS calcul distinctement l'énergie dégagée en phase gazeuse et l'énergie dégagée par la combustion des charbons. De ce fait le HRR, appelé HRR total, utilisé pour la suite de l'étude est la somme de ces deux contributions. Le HRR libéré sous phase gazeuse est noté par la suite HRR gaz et celui libéré par l'oxydation des résidus charbonneux est noté HRR char.

Les résultats numériques de HRR totaux sont présentés Figure 3-9, Figure 3-10 et Figure 3-11 pour, respectivement, les charges de 0.6, 0.9 et 1.2 kg/m². Il doit être souligné que la taille de maille à 3 cm n'est pas représentée pour la charge 0.6 kg/m² pour des raison de lisibilité. D'après la Figure 3-9 ci-dessous, des simulations doivent être lancée avec une taille de maille inférieur à 1 cm afin de pouvoir observer une convergence. Cependant, une telle taille de maille est trop couteuse en ressources informatiques pour être utilisée. Ce résultat était attendu, compte tenu des calcul préliminaires réalisés chapitre 3.2 (Tableau 3-2). A contrario, pour les charges de 0.9 et 1.2 kg/m², la convergence est observée lorsque la taille de maille diminue. Dans les deux cas, de faibles différences apparaissent entre les allures des courbes de HRR pour les tailles de mailles de 1.5 et 1 cm pouvant être expliquées par de légères modifications de configurations causées par la résolution du maillage. Nous avons pu constater que, dans les conditions de l'étude, $dx_{g,z_c,min}$ (cf. Tableau 2) permet d'obtenir la meilleur estimation de la taille de maille nécessaire pour la modélisation de la combustion. Pour la suite de l'étude, les résultats obtenus pour la résolution de 1 cm ont été utilisés pour les trois charges.

Test de performance de WFDS

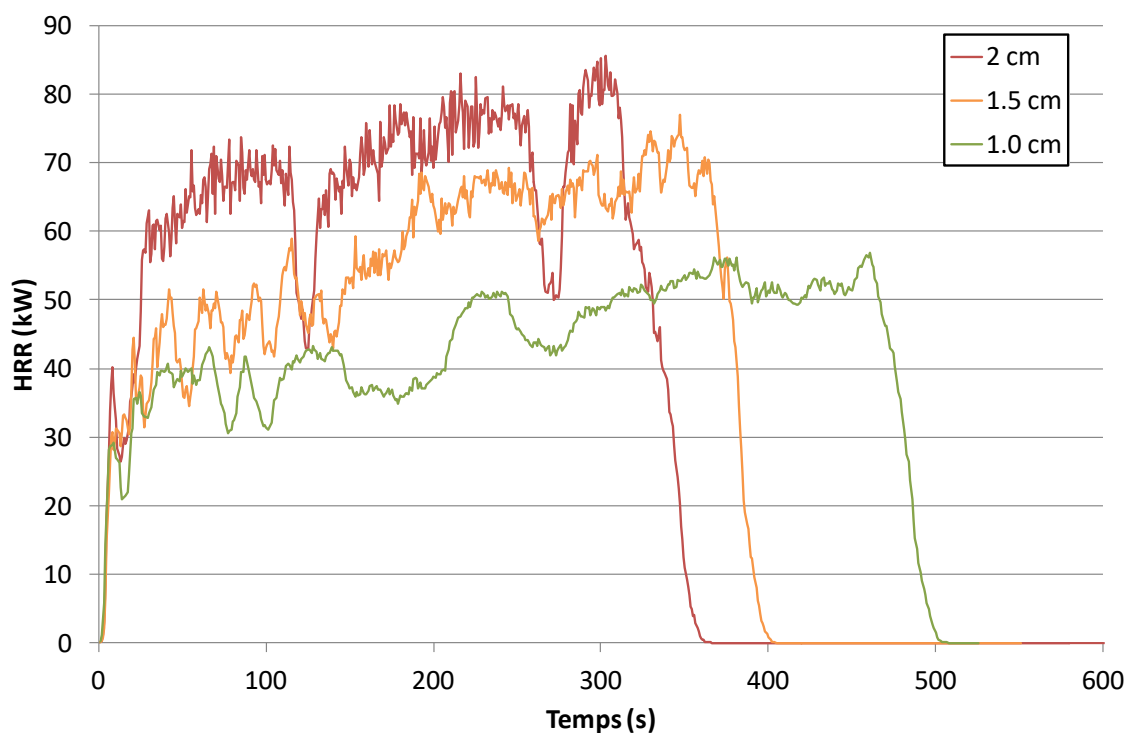


Figure 3-9 : HRR numérique au cours du temps pour la charge de 0.6 kg/m² pour différentes tailles de mailles

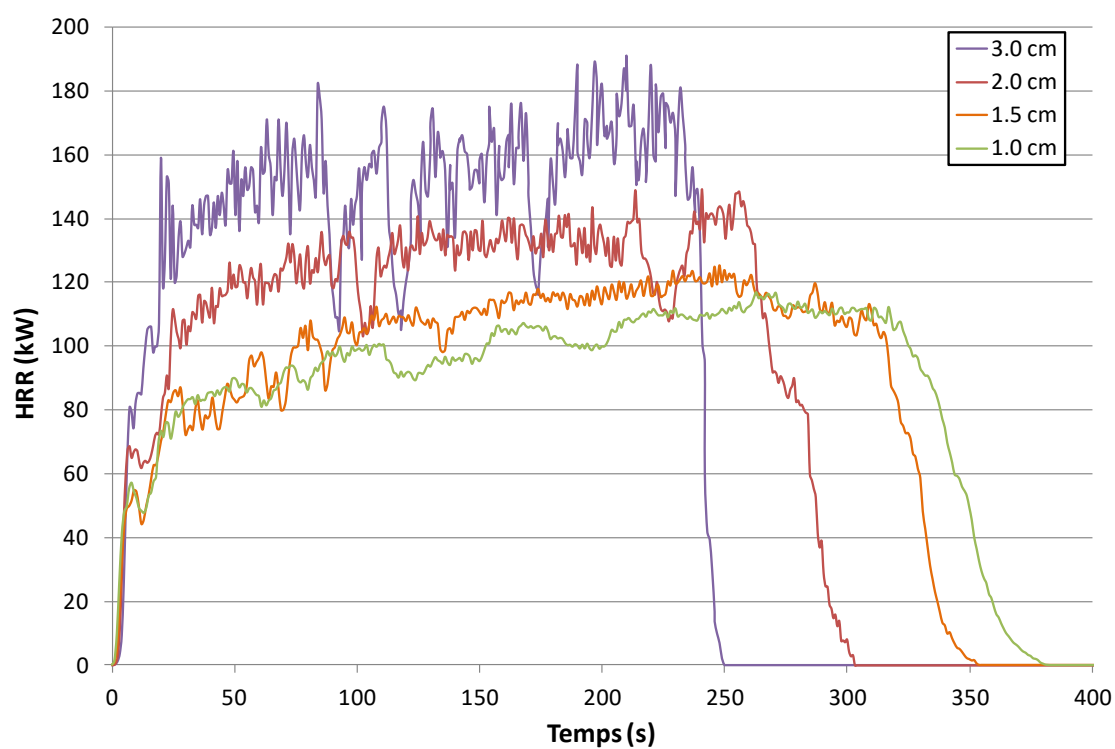


Figure 3-10 : HRR numérique au cours du temps pour la charge de 0.9 kg/m² pour différentes tailles de mailles

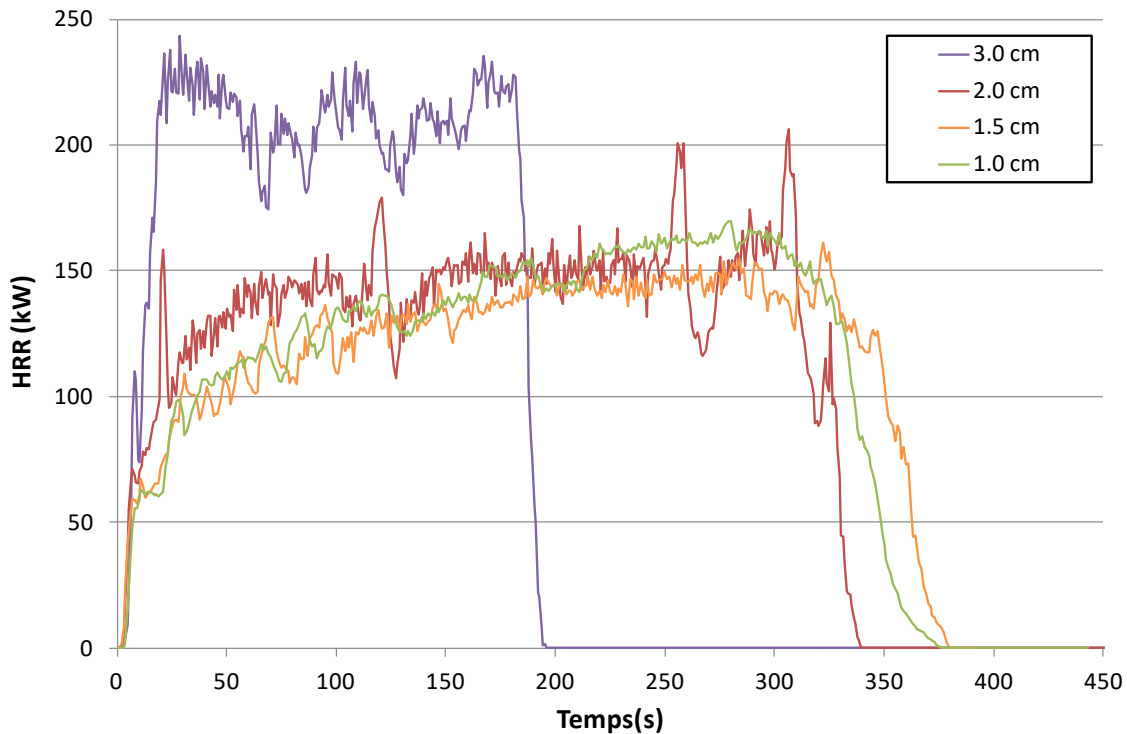


Figure 3-11 : HRR numérique au cours du temps pour la charge de 1.2 kg/m² pour différentes tailles de mailles

3.5. Confrontation des puissances prédites par WFDS et des puissances mesurées pour des feux se propageant dans des litières

La Figure 3-12 présente les résultats numériques instantanés de HRR, HRR des gaz et HRR des résidus charbonneux pour la charge de 0.9 kg/m². Nous observons que l'oxydation des charbons commence après l'allumage du lit de combustible, vers 12 s pour ce cas, 17 s pour la charge de 1.2 kg/m² et 8 s pour la charge à 0.6 kg/m². Ces valeurs sont en accord avec le temps de résidence du front de flamme. Les courbes de HRR des gaz et des charbons suivent la même tendance, indiquant que la surface impliquée dans le processus de combustion est quasi-constante, ce qui concorde avec la dynamique expérimentale observée. De plus, cette dynamique peut être observée par l'intermédiaire du logiciel "Smokeview" (Figure 3-13). La contribution du HRR des gaz au HRR total durant la phase quasi-stationnaire est de 60 %, les 40% restant correspondant à la contribution des résidus charbonneux. Cette importante contribution du HRR des charbons peut être expliquée à la fois par la masse de combustible sec qui est converti en charbon et suit des réactions hétérogènes en phase solide ; et le caractère

hautement exothermique de ces réactions par rapport aux réactions de combustion en phase gazeuse.

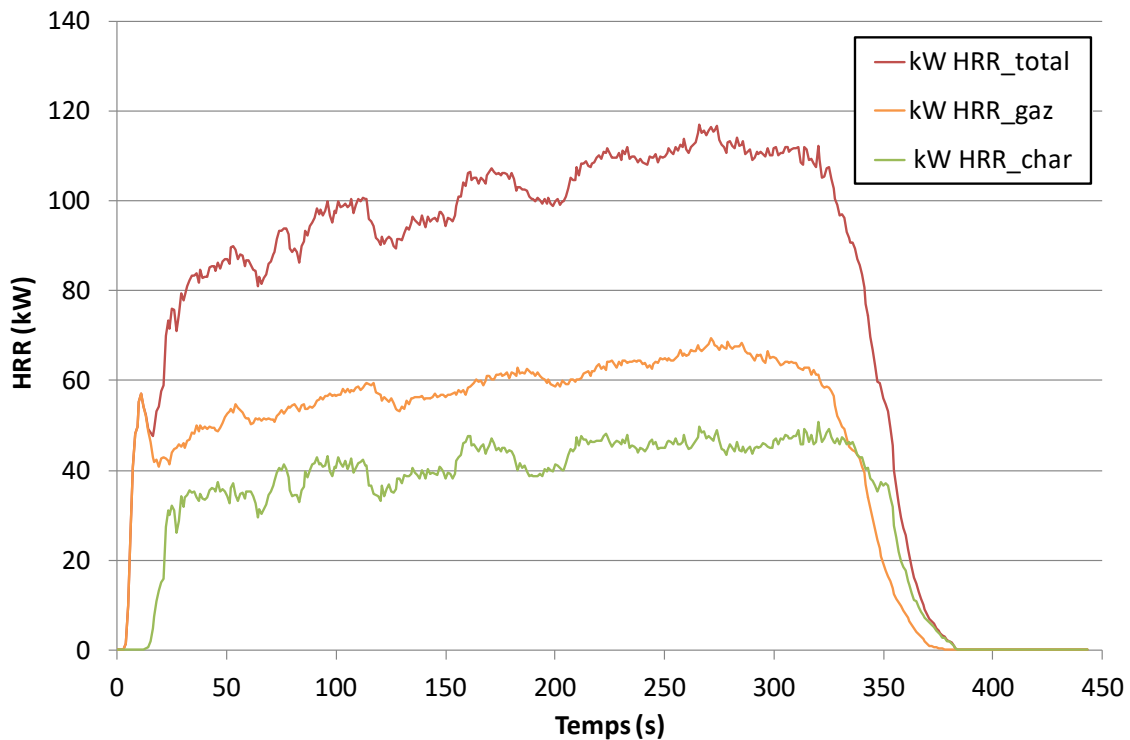


Figure 3-12 : HRR prédits des gaz, des char et total pour une propagation à plat avec une charge de 0.9 kg/m²

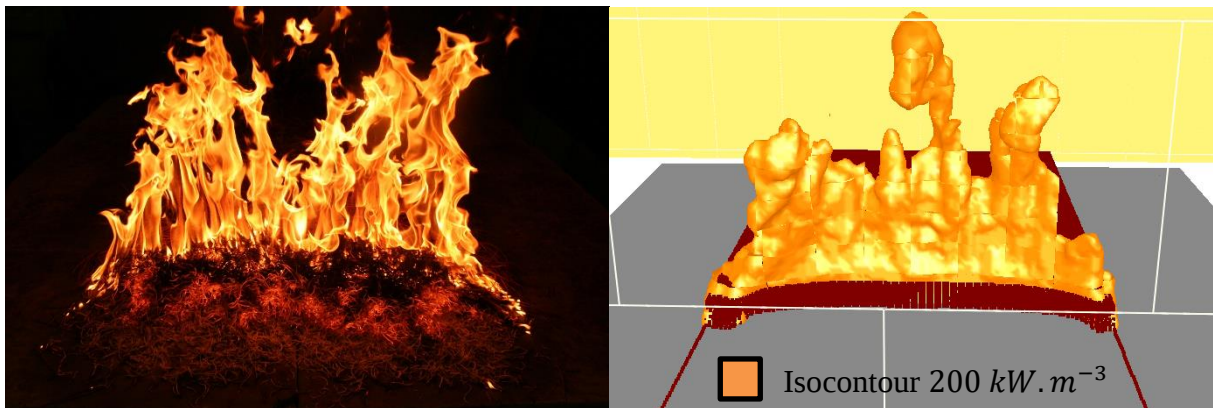


Figure 3-13 : Photo du front de flamme expérimental et image numérique pour les cas à plat

La Figure 3-14 présente les HRR calculés pour une propagation en présence d'une pente de 20 degrés et pour une charge de 0.9 kg/m². Nous observons une augmentation progressive des courbes de HRR au cours du temps qui traduit une augmentation du front de flamme et ainsi de la quantité de combustible participant à la combustion. L'utilisation du logiciel "Smokeview" met également en évidence l'apparition d'un front de flamme en forme de V comme observé

Test de performance de WFDS

lors des expériences (Figure 3-15). Les mêmes tendances sont retrouvées pour toutes les autres charges en présence d'une pente.

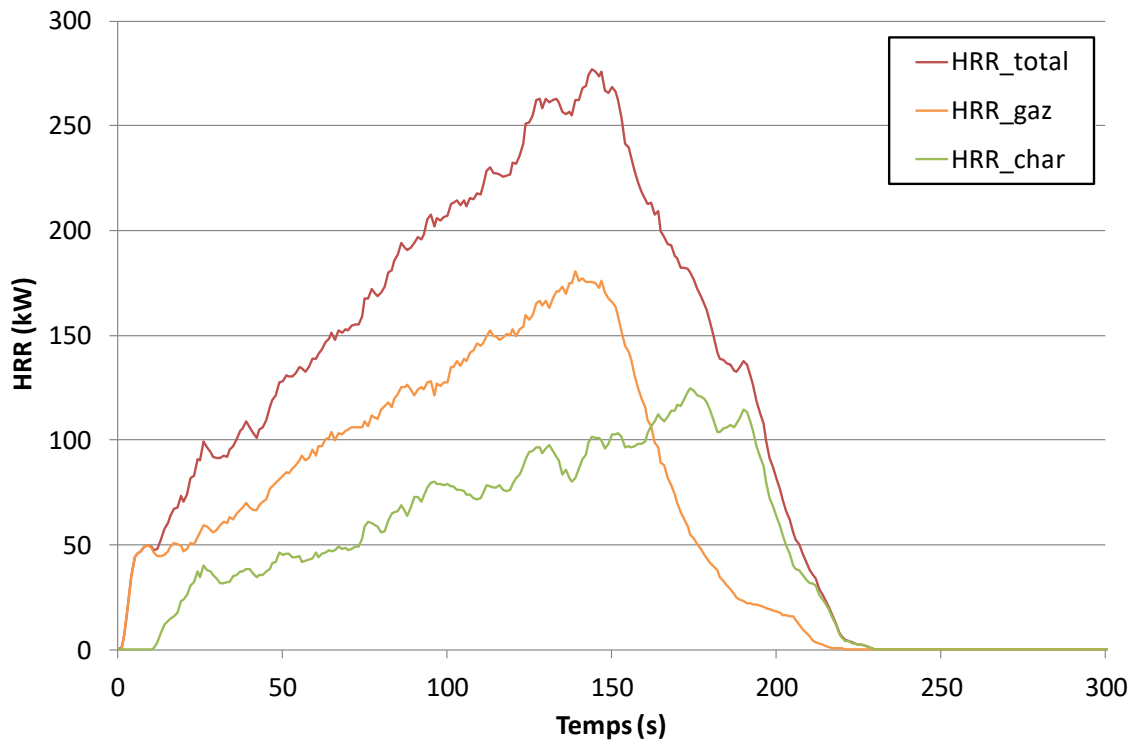


Figure 3-14 : HRR prédits des gaz, des char et total pour une propagation en pente avec une charge de 0.9 kg/m²

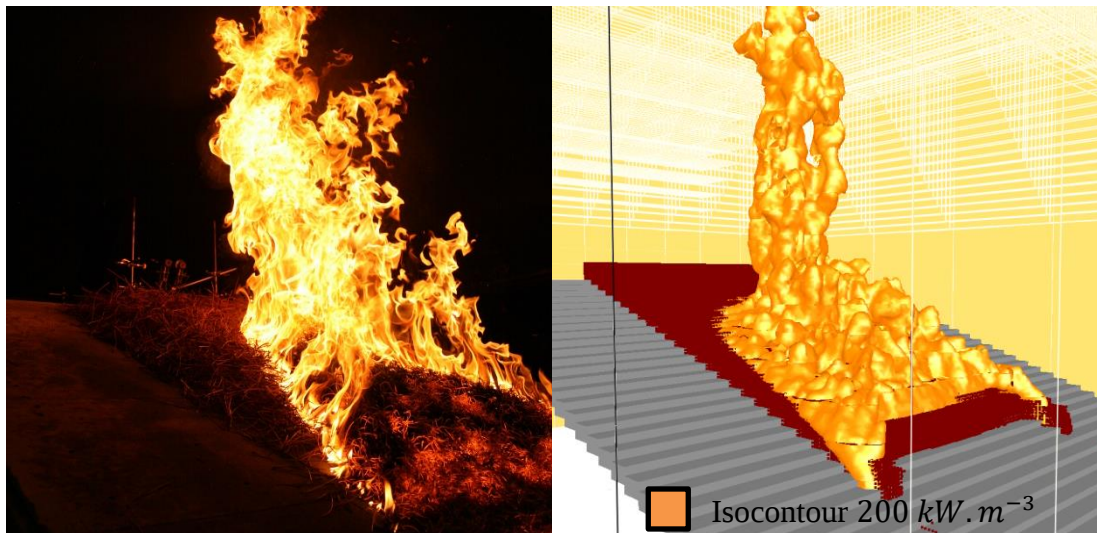


Figure 3-15 : Photo du front de flamme expérimental et image numérique pour les cas en pente

3.5.1. Simulation des propagations à plat

Les courbes de HRR prédites pour les maillages les plus fins (1 cm) ont été confrontées aux données expérimentales présentées au chapitre 3.5. Les résultats prédits et mesurés de HRR pour les trois charges étudiées sont présentés sur les Figure 3-16a-f.

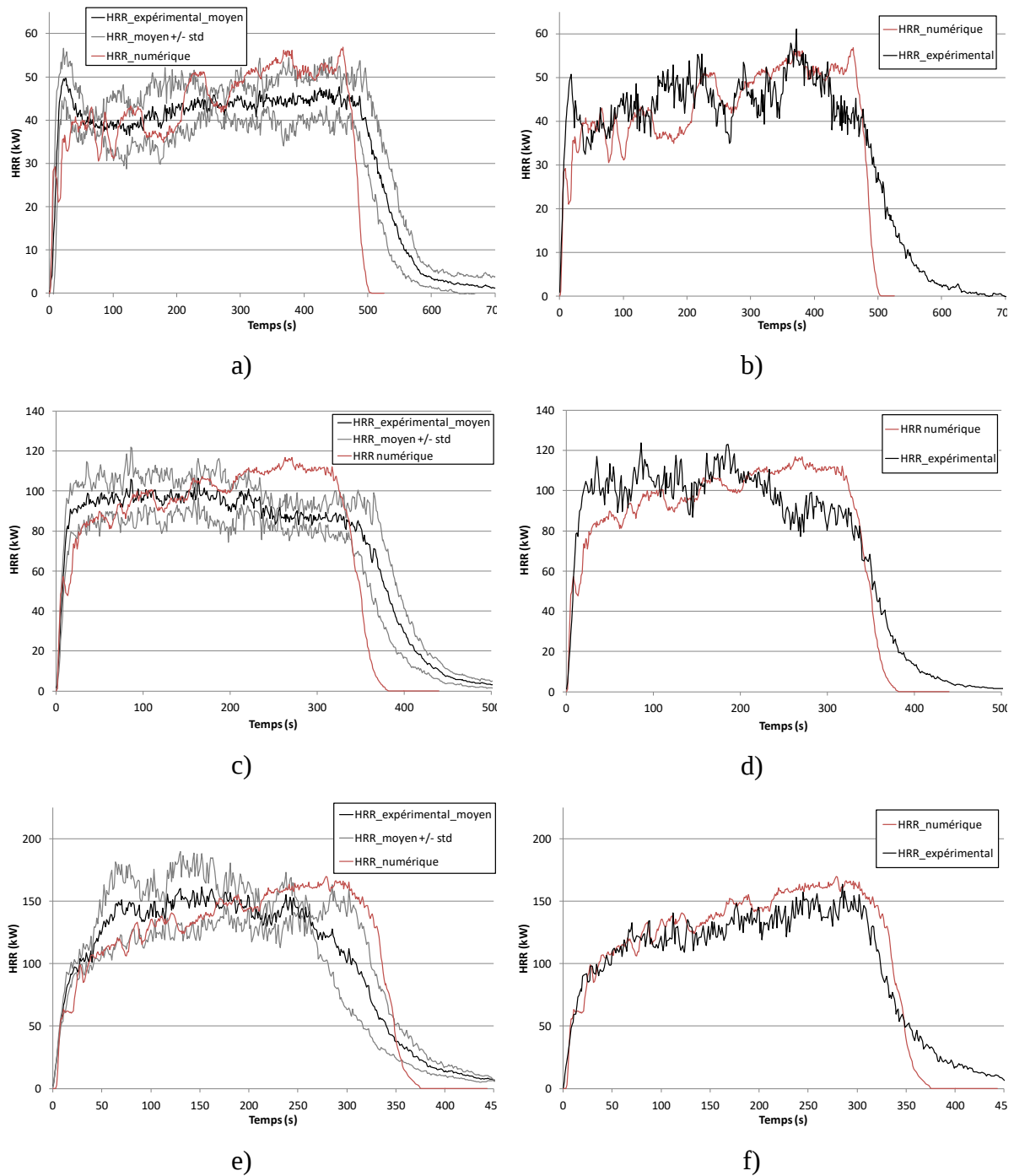


Figure 3-16 : HRR prédits et expérimentaux pour les propagations à plat. Gauche : HRR expérimental et déviation standard associée et HRR prédit. Droite : HRR prédit et HRR expérimental le plus proche. a) et b) Charge 0.6 kg/m², c) et d) Charge 0.9 kg/m² et e) et f) Charge 1.2 kg/m²

Une bonne représentation de la propagation peut être observée pendant le régime établi avec des valeurs de HRR comprises dans la gamme de puissance attendue. Cette fidélité est d'autant plus remarquable en comparant les données prédites à l'expérience offrant la meilleure correspondance. De plus, la durée de combustion, liée à la vitesse de propagation, est correctement prédite. Une légère augmentation du HRR peut-être observée au cours du temps pour les trois charges. Ce phénomène a également pu être observé expérimentalement. Dans certains cas, les aiguilles présentes au bord de la litière ne brûlent pas complètement car l'écoulement d'air au bord du lit entraîne un refroidissement, provoquant la déformation du front de flamme, ce qui augmente le périmètre du front feu et le HRR au cours du temps. Il doit être également souligné que la phase d'extinction numérique est trop rapide par rapport à l'extinction expérimentale. Si nous comparons la simulation numérique correspondant à la charge de 0.6 kg/m² avec l'expérience la plus proche, nous notons que la différence entre les quantités totales prédites et mesurées d'énergie libérée durant la phase d'extinction est inférieure à 6.5 % de l'énergie totale libérée durant l'expérience. Afin d'approfondir ce point, la différence instantanée de HRR entre la simulation et l'expérience la plus proche est présentée sur la Figure 3-17. L'écart absolu d'énergie libérée, correspondant à la somme des écarts, est dans ce cas inférieur à 18.5 %. Pour les deux autres charges, les écarts absolus de puissance totale libérée sont égaux à 18.6 % et 16.7 % pour respectivement les charges 0.9 et 1.2 kg/m². En ce qui concerne les phases d'extinction, telle que représentée en noir Figure 3-17, les différences d'énergies libérées sont de 5.4 et 5.5 % pour les charges de 0.9 et 1.2 kg/m². Il doit être également souligné que, si la différence est uniquement calculée lorsque le HRR prédit sort de la plage de valeurs du HRR expérimentale (moyenne $\pm$ déviation standard), alors les écarts absolus entre les puissances totales prédites et simulées pour les trois charges sont de 8, 11.8 et 6.2 % pour respectivement les charges de 0.6, 0.9 et 1.2 kg/m².

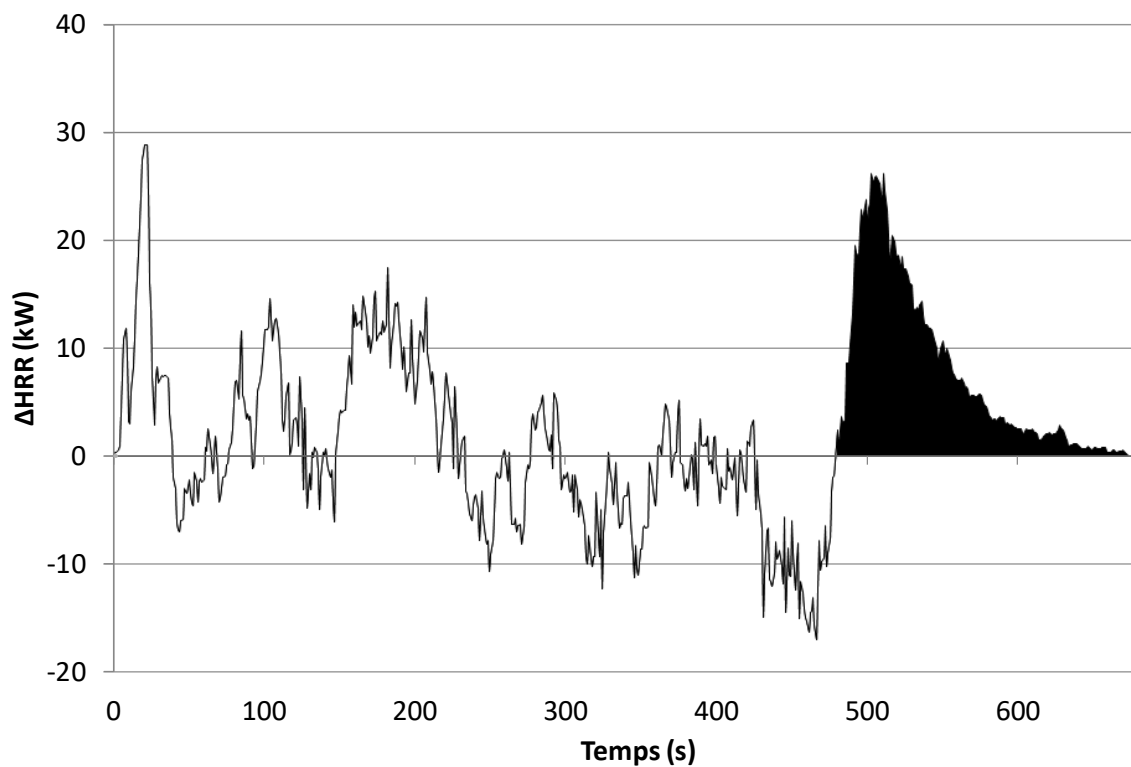


Figure 3-17 : Différence instantanée entre le HRR total expérimental et prédit pour la charge de 0.6 kg/m² au cours du temps

Il peut être également pertinent d'analyser les résultats de MLR. En effet, le MLR résulte directement de la libération de gaz et de l'oxydation des résidus charbonneux. Le MLR prédit a de ce fait été comparé au MLR expérimental pour vérifier la capacité de WFDS à prédire la dynamique de combustion. La Figure 3-18 présente les résultats prédits et expérimentaux de HRR et de MLR pour une propagation avec une charge de 1.2 kg/m² dans le cas de l'expérience la plus proche des simulations. En fin de combustion, lorsque le MLR numérique est égale à zéro, la combustion numérique cesse. Cependant nous constatons que durant cette phase d'extinction, les valeurs expérimentales du MLR décroissent de manière monotone avec de larges fluctuations. Ainsi le HRR expérimental diminue plus progressivement que le HRR prédit dans cette phase où l'oxydation des résidus charbonneux continue. La plus grande différence entre les MLR prédit et expérimental est alors de 2 g/s. L'oxydation des résidus charbonneux dégageant une grande quantité de chaleur, sous-estimer le MLR de 2g/s entraîne une sous-estimation du HRR de 60kW ce qui est non négligeable. Il convient toutefois de relativiser cette analyse car la cellule de pesée qui possède une précision de 1g/s, atteint ses limites de mesures dans cette situation.

Test de performance de WFDS

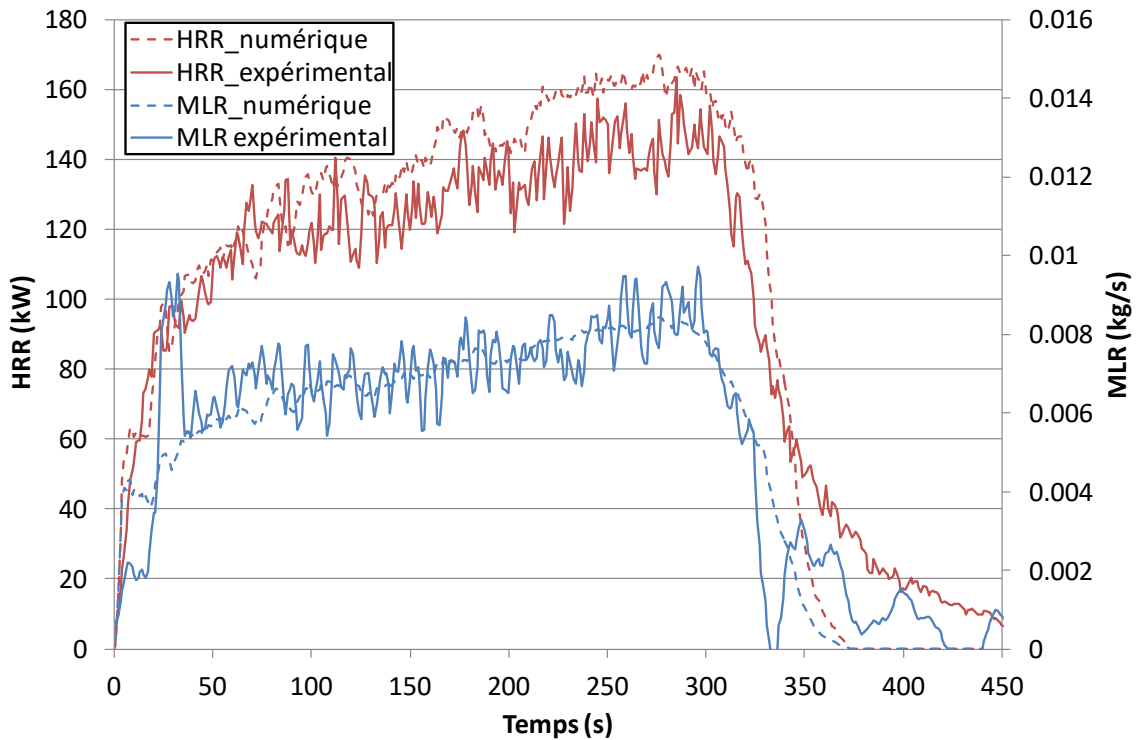
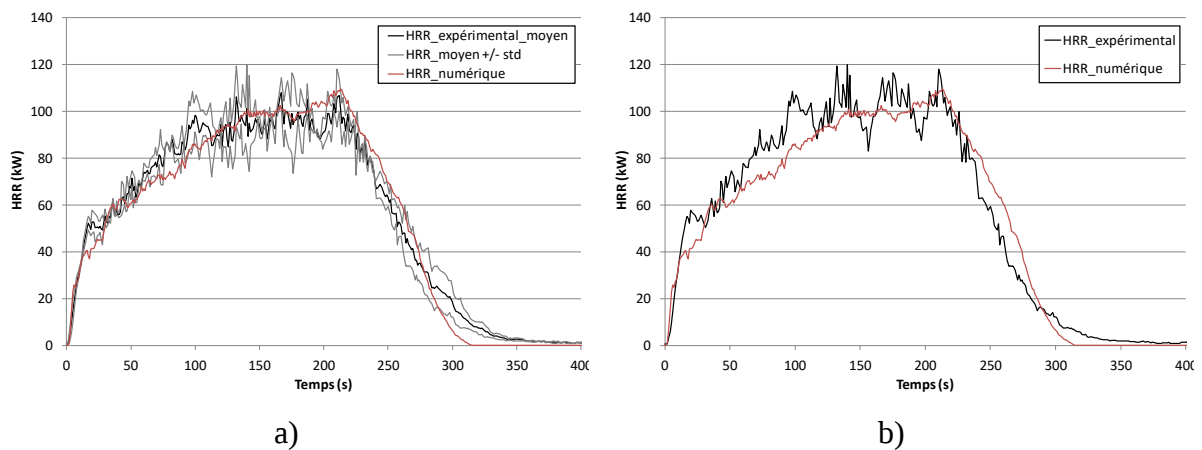


Figure 3-18 : HRR et MLR prédits et expérimentaux pour une propagation avec une charge de 1.2 kg/m²

3.5.2. Simulation des propagations avec une pente de 20 degrés

La Figure 3-19 présente les résultats des HRR totaux au cours du temps pour les propagations en présence d'une pente de 20 degré dans le cas des trois charges de 0.6, 0.9 et 1.2 kg/m². Les HRR prédits sont confrontés aux valeurs moyennes expérimentales avec leurs déviations standards. Les courbes de droite montrent le HRR total prédit comparé à celui de l'expérience la plus proche de la simulation.



Test de performance de WFDS

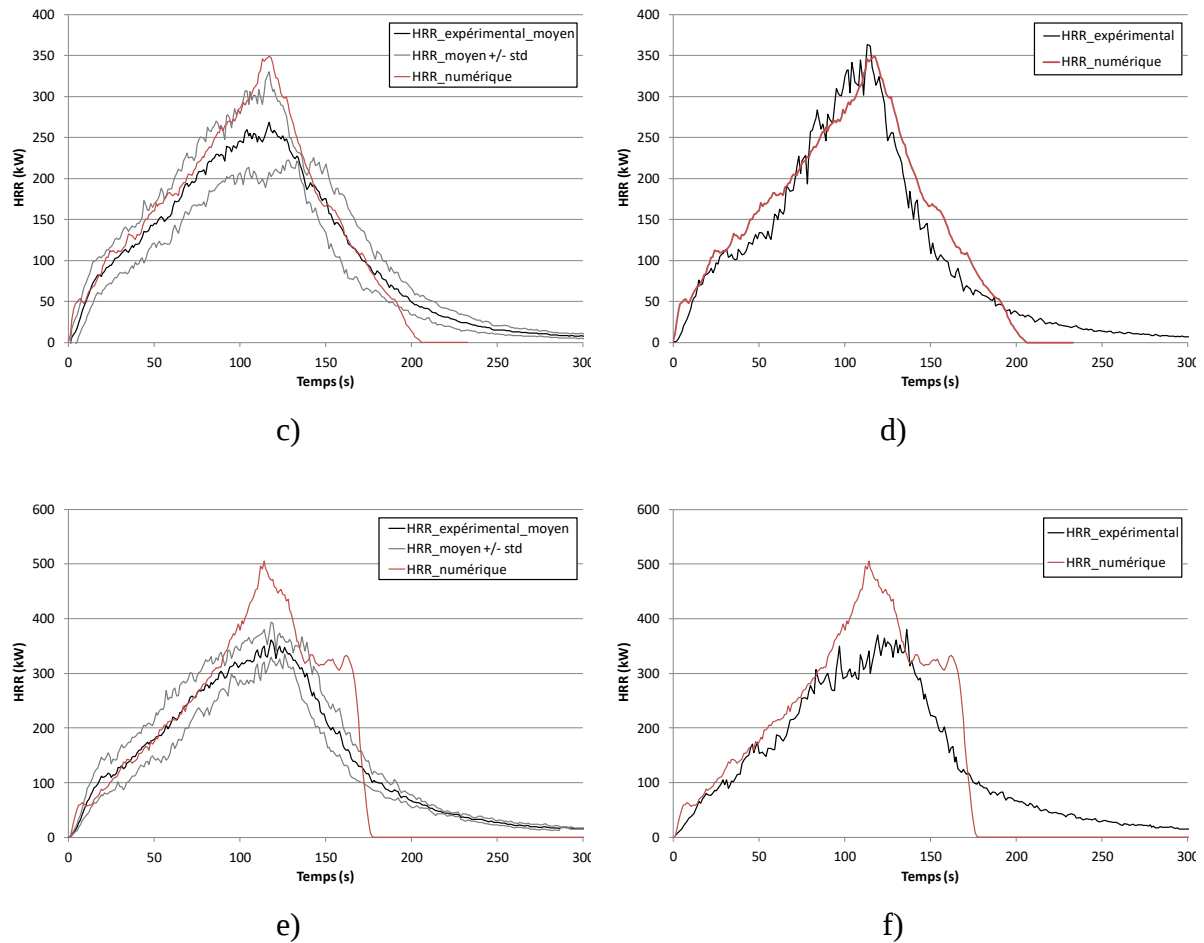


Figure 3-19 : HRR prédits et expérimentaux pour les propagations en pente. Gauche : HRR expérimental et déviation standard associée et HRR prédit. Droite : HRR prédit et HRR expérimental le plus proche. a) et b) Charge 0.6 kg/m², c) et d) Charge 0.9 kg/m² et e) et f) Charge 1.2 kg/m²

En ce qui concerne le cas correspondant à une charge de 0.6 kg/m², nous notons une très bonne correspondance sur l'ensemble de la combustion, incluant l'extinction. L'écart absolu entre le HRR total prédit et le HRR mesuré, comprenant la plage d'écart type, est égale à 4.6 %. La comparaison de la simulation avec l'expérience la plus proche affiche un écart absolu de 13.6 % de la puissance totale libérée.

Pour la charge de 0.9 kg/m², les résultats des simulations présentent un bon accord avec les données expérimentales. Il doit être souligné toutefois une importante variabilité des données expérimentales dans ce cas particulier en comparaison des expériences réalisées avec les autres charges. Cet écart est dû à la teneur en eau qui variait significativement entre les différentes expériences réalisées dans ce cas. Pour affiner la confrontation avec les résultats expérimentaux, deux valeurs de teneur en eau ont été utilisées lors des simulations. Les résultats pour les deux teneurs en eau utilisées de 5 et 8 % sont présentées respectivement sur les Figure 3-20a et Figure 3-20b. Les Figure 3-20 mettent en évidence une bonne représentation de la combustion par

Test de performance de WFDS

WFDS pour les deux valeurs utilisées de la teneur en eau. Il doit être souligné que pour la Figure 3-20b les valeurs expérimentales de teneur en eau étaient de 9% et 7.5 % (8 % pour la simulation). Finalement, l'écart absolu entre les puissances prédites et simulées est de 19% quel que soit la teneur en eau considérée.

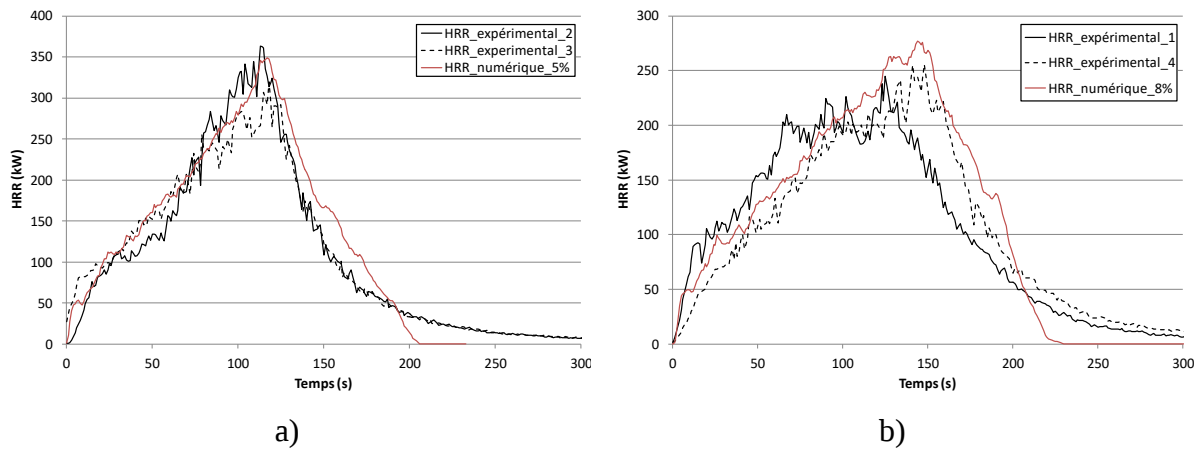


Figure 3-20 : HRR prédit et expérimental pour les propagations en pente avec une charge de de 0.9 kg/m². a) MC = 5 % b) MC=8%

Il doit être ajouté que le MLR prédit pour ces deux charges présente, à l'instar des simulations à plat, de bonnes concordances avec le MLR mesuré. La plus grande différence est observable, comme pour les cas des propagations à plat, lors de l'extinction (Figure 3-21).

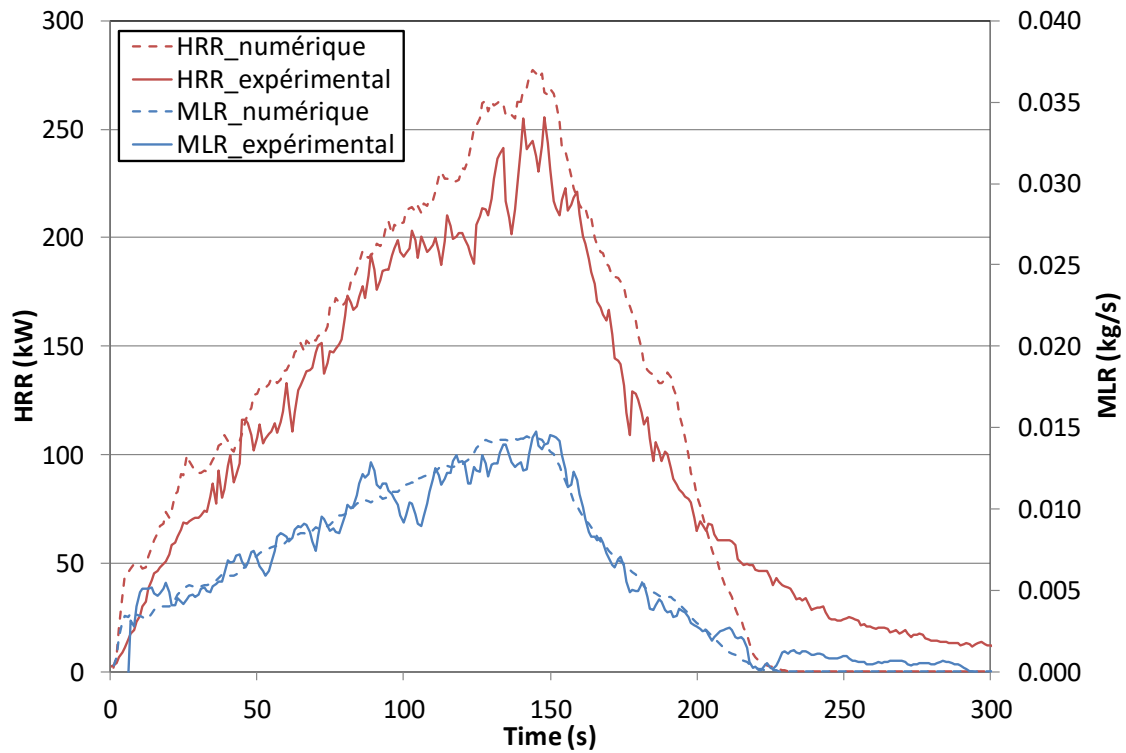


Figure 3-21 : HRR et MLR prédits et expérimentaux pour une propagation en pente avec une charge de 0.9 kg/m^2 avec $MC=8\%$

Les correspondances entre les HRR prédits et mesurés sont moins bonnes pour la charge de 1.2 kg/m^2 . En effet, le HRR total augmente après l'allumage jusqu'à atteindre un pic proche de 500 kW alors que le pic expérimental moyen est de 350 kW . Comme pour les cas précédents, la phase d'extinction présente les plus grandes différences. La Figure 3-22 présente les courbes de HRR total et de MLR prédit et celles obtenues pour l'expérience la plus proche de la simulation. Des tendances similaires peuvent être observées pour le MLR et le HRR prédits. Le feu simulé se propage plus rapidement que le feu expérimental et le front de flamme numérique arrive trop rapidement au bout du banc de combustion. Ceci entraîne une augmentation de la surface de résidus charbonneux actifs derrière le front et la participation d'une plus grande quantité de végétal à la combustion.

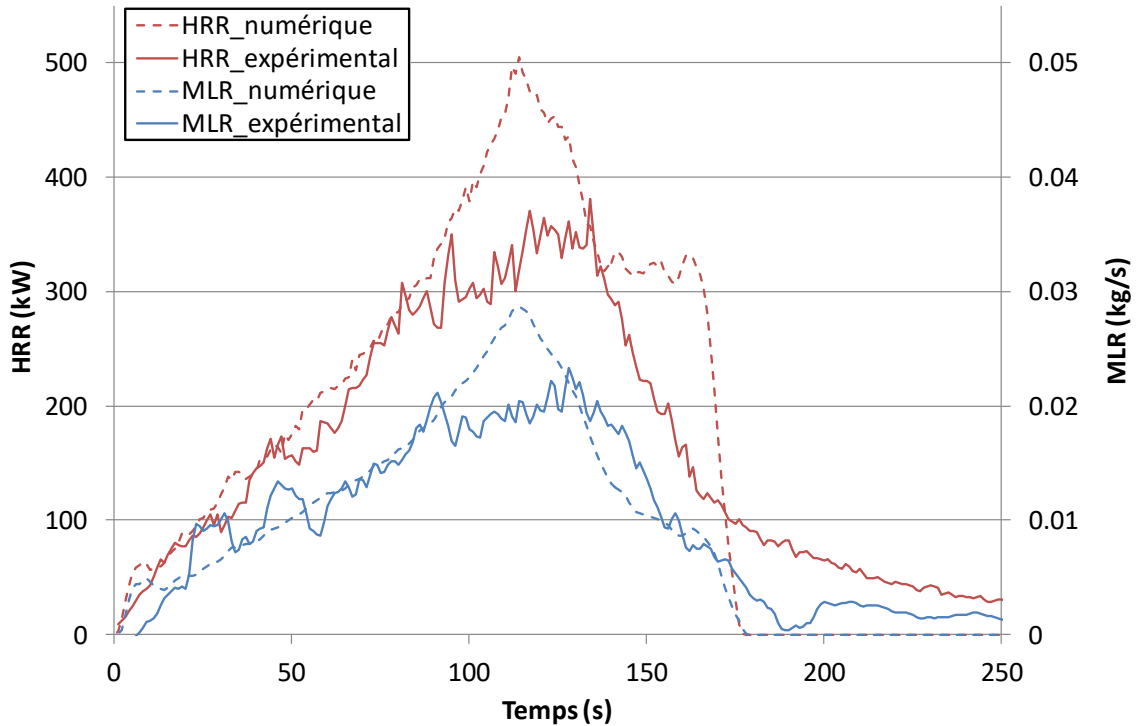


Figure 3-22 : HRR et MLR prédits et expérimentaux pour une propagation en pente avec une charge de 1.2 kg/m²

Les évolutions des HRR des gaz et des chars au cours du temps sont présentées sur la Figure 3-23. En ce qui concerne le HRR gaz, nous notons une augmentation de la pente aux environs de 100 s. D'après la représentation visuelle réalisée sous Smokeview, ce temps correspond au moment où la flamme commence à lécher la surface de la hotte d'extraction (proche du banc de combustion à cause de son inclinaison). Il doit être précisé que ce phénomène est également observable expérimentalement. Par la suite la fraction radiative instantanée, $\chi_{rad}(t)$ correspondant au rapport entre la puissance émise sous forme de rayonnement et le HRR total, a été tracée (Figure 3-24). Une augmentation de $\chi_{rad}(t)$ est observable 100s après l'allumage. Cette augmentation peut être causée par l'échauffement de la hotte d'extraction rayonnant à son tour. Il doit être souligné que ce phénomène n'a été observé que pour ce cas. Pour les autres simulations, la fraction radiative numérique au cours du temps correspond au plus, à la fraction radiative défini en entrée de WFDS. Concernant le HRR char, une augmentation de la pente est également visible 150s après l'allumage. Ce temps correspond, (après visualisation avec Smokeview) à l'instant où le front de flamme atteint l'extrémité du banc de combustion et s'éteint progressivement. Le front de flamme laisse sa place par la suite à deux fronts de combustion des chars. Le premier front de combustion des chars avance dans le sens de la propagation du front de flamme alors que le second avance en sens contraire depuis l'extrémité du banc de combustion, ce qui augmente la quantité de char s'oxydant et ainsi la valeur du HRR

char. Ce phénomène a également été observé expérimentalement dans une moindre ampleur. De façon à confirmer l'effet de l'interaction entre la flamme et la hotte sur la prédiction du HRR, une simulation a été effectuée sans la hotte d'extraction (Figure 3-25). Dans ce cas de Figure , la fraction rayonnée au cours du temps $\chi_{rad}(t)$ atteint un régime quasi-stationnaire lors de la propagation et ne dépasse pas la valeur fixée en entrée de WFDS. De plus, le HRR gaz et le HRR char augmentent de façon monotone au cours du temps. Cependant, l'extinction est tout aussi rapide qu'avec la présence de la hotte.

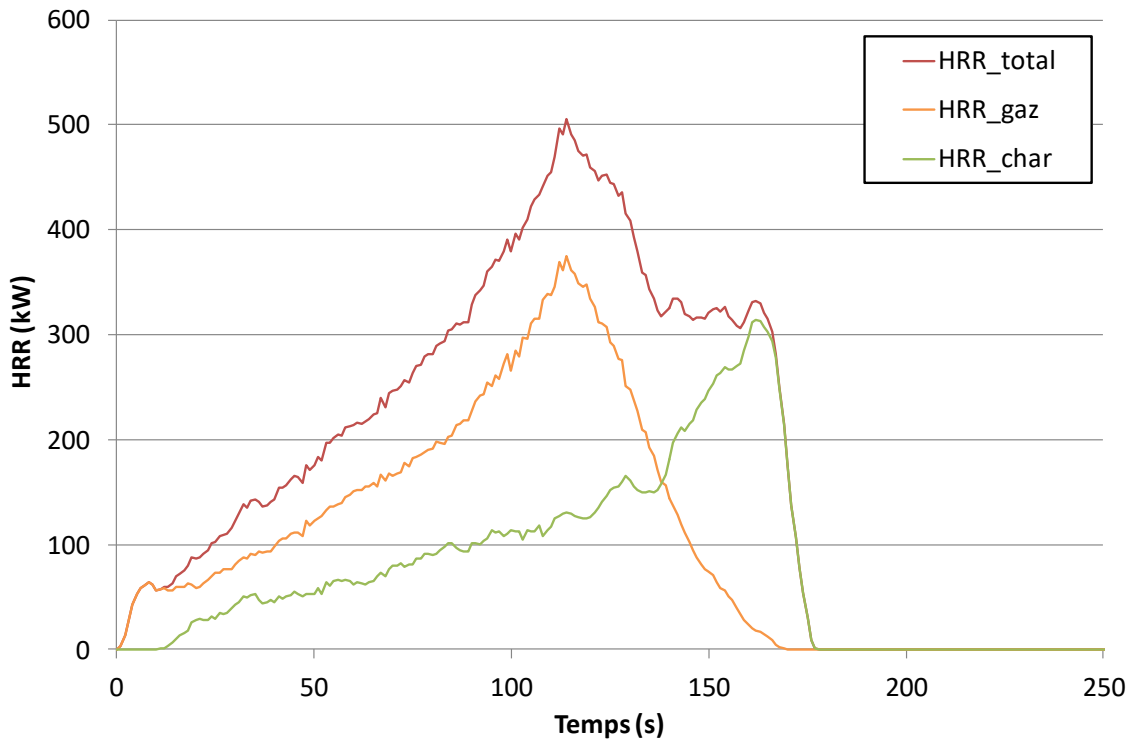


Figure 3-23 : HRR total, HRR gaz et HRR char prédits en fonction du temps pour la propagation en pente avec une charge de 1.2 kg/m²

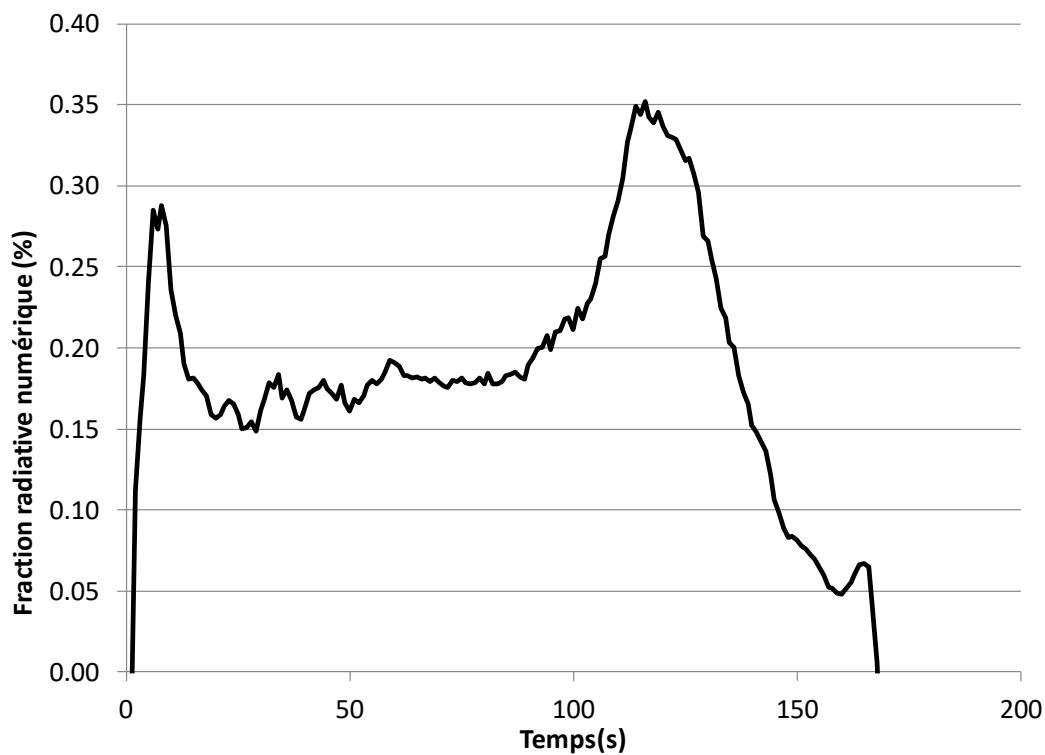


Figure 3-24 : Fraction radiative numérique en fonction du temps pour une propagation en pente avec une charge de 1.2 kg/m²

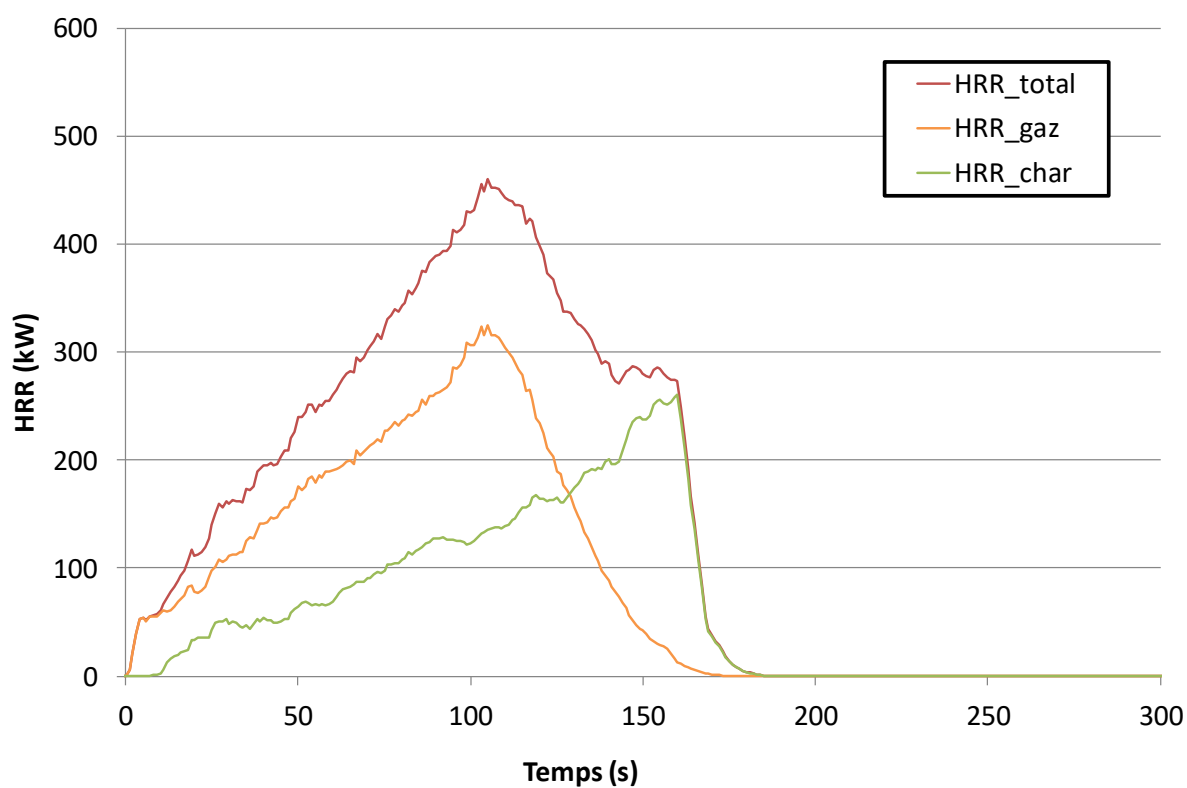


Figure 3-25 : HRR total, HRR gaz et HRR char en fonction du temps pour la propagation en pente et la charge de 1.2 kg/m² sans hotte

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les modèles de dégradation thermique implantés dans le code de calcul WFDS ont été présentés : dessiccation, gazéification et oxydation des résidus charbonneux. Une méthodologie adaptée au test des modèles détaillés d'incendie a été proposée. Elle repose sur le test de la bonne prise en compte du dispositif expérimental par les modèles (cas de l'écoulement non réactif) et sur la confrontation des prédictions des modèles aux HRR expérimentaux pour des propagations de feu dans un combustible homogène (litières d'aiguilles de pins). Ces deux phases de test sont rappelées ci-dessous :

- Phase de modélisation du dispositif expérimental pour l'écoulement non réactif
 - Analyse de sensibilité pour la taille de maille à utiliser pour représenter l'écoulement non réactif
 - Détermination de la taille optimale du domaine de calcul
- Phase de test du modèle détaillé par confrontation avec les expériences de combustion
 - Calculs préliminaires de la taille de maille nécessaire pour chaque charge et pente
 - Détermination de la méthode d'allumage numérique offrant la plus grande concordance avec la méthode expérimentale
 - Analyse de sensibilité sur la taille de maille à utiliser pour chaque cas
 - Confrontation aux données expérimentales

La première phase nous a permis de déterminer la taille de maille nécessaire (5 cm) afin de représenter l'écoulement induit par notre dispositif expérimental. La taille du domaine de calcul a été optimisée afin de limiter le temps de calcul sans perdre en précision. Puis la taille de maille nécessaire à la modélisation de chaque cas de propagation (pente et charge) a été calculée. La résolution dans la zone de combustion devant être plus haute que dans la zone non réactive, le maillage du domaine de calcul a été raffiné autour de cette zone et dilaté en dehors. La méthode d'allumage choisie a consisté en l'ajout de particules chauffées à 1000°C dans le volume de la litière afin d'obtenir un front homogène sur la largeur de la litière dans les premiers instants de la propagation. L'analyse de sensibilité au maillage pour la combustion a révélé que la résolution calculée la plus fine ($dx_{g,zx,min}$) était la plus appropriée. Les principaux résultats de la confrontation aux données expérimentales sont les suivants :

- Cas des propagations à plat :
 - Les puissances prédites en régime établi concordent avec les valeurs mesurées mettant en évidence la bonne prédiction de la vitesse de propagation pour chaque charge et de l'énergie dégagée. Les vitesses de perte de masse sont également en adéquation avec les valeurs mesurées.
 - Un bémol doit être signalé quant à la bonne représentation de la dynamique d'extinction. Celle-ci se produit sur une période bien plus courte que celle observée expérimentalement, avec une énergie dégagée inférieure à la réalité.
- Cas des propagations en pente :
 - Les puissances prédites au cours du temps pour les charges de 0.6 et 0.9 kg/m² sont en adéquation avec les résultats expérimentaux, notamment pour les valeurs de pics de HRR. La dynamique de combustion simulée (visualisée grâce au logiciel "Smokeview") est conforme à la dynamique expérimentale (mêmes vitesses de propagation et formes du front de feu).
 - Il doit être précisé la bonne prise en compte de la teneur en eau pour les cas à 0.9 kg/m², quand celle-ci est comprise entre 3 et 8 %. En effet, les différences observées dans les courbes de HRR lors des expériences sont reproduites par le modèle.
 - La dynamique de combustion simulée pour la plus grande charge de combustible (1.2 kg/m²) n'est cependant pas satisfaisante. L'interaction entre la flamme et la hotte d'extraction entraîne une augmentation du pic de HRR et une plus grande vitesse de propagation. La consommation des chars est également trop marquée en fin de combustion.

Chapitre 4. Comportement au feu d'un buisson

4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, le code de simulation WFDS a été testé sur des cas simples. La bonne représentation de l'écoulement induit par la hotte d'extraction et de la combustion d'une végétation uniforme (litières d'aiguilles de pins) ont été investiguées. Des limites de représentation du modèle concernant la phase d'extinction du combustible des expériences de propagation ont pu être observées. L'objectif de ce chapitre est de fournir des données expérimentales sur la composition et la combustion d'arbustes de ciste. Ces résultats permettront d'une part de mieux comprendre la réaction au feu des arbustes et d'autre part de pouvoir tester le code WFDS dans le cas d'un végétal composé de plusieurs familles de particules. Dans un premier temps, les résultats du conditionnement des cistes seront exposés. La composition des arbustes et la répartition spatiale des différentes classes de particules seront présentées par la suite. Finalement la réaction au feu des cistes sera étudiée en deux phases. Une première phase a consisté en l'analyse des paramètres liés aux critères de réaction au feu identifiés, indépendamment les uns des autres. La seconde phase aura pour but d'étudier la réaction au feu des arbustes comme l'association des quatre critères par une méthode statistique (Analyse en Composantes Principales).

4.2. Résultats des méthodes de conditionnement

La teneur en eau des différentes classes de particules est un facteur influençant fortement la combustion des végétaux (Babrauskas et al., 2006). De ce fait, nous avons développé deux méthodes pour conditionner les cistes à une humidité souhaitée afin de contrôler l'influence de ce paramètre pour les essais en combustion. Ces deux méthodes ont été détaillées dans le chapitre 2. Il ne s'agit pas ici de présenter leurs avantages et inconvénients qui ont été discutés dans le chapitre 2 à la lumière des protocoles. Ainsi les résultats obtenus pour ces deux

méthodes sont présentées ci-dessous uniquement dans le but de fournir au lecteur des éléments d'appréciation sur la mise en œuvre de ces méthodes.

Résultats de la première méthode de conditionnement

Le conditionnement est basé sur l'évolution de la teneur en eau sur base sèche des classes de particules définie par :

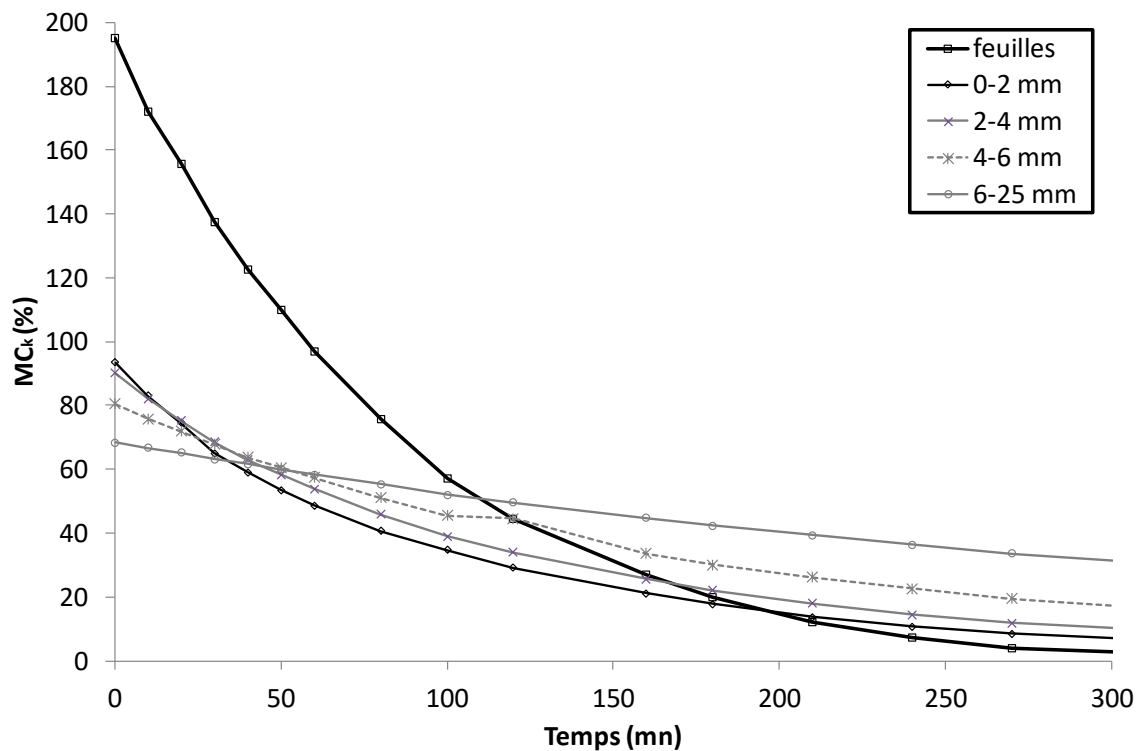
$$MC_k(t) = \frac{m_k(t) - m_k(48h)}{m_k(48h)} \quad (4.1)$$

où $MC_k(t)$ est la teneur en eau, sur base sèche, de la classe de particule k au cours du temps, $m_k(t)$ est la masse de la classe de particule k pour un temps t passé à l'étuve et $m_k(48h)$ est la masse sèche de la classe de particule k après 48 heures passées à l'étuve.

Afin de discuter les résultats nous avons étudié la vitesse de dessiccation au cours du temps. Elle est calculée par :

$$\frac{dMC_k(t)}{dt} = \frac{MC_k(t+\Delta t) - MC_k(t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad \text{avec } \Delta t = 10, 20 \text{ ou } 30 \text{ mn} \quad (4.2)$$

La Figure 4-1 représente MC_k au cours du temps pour les différentes classes de particule d'un ciste récolté en mai 2015. La teneur en eau initiale diminue avec l'augmentation de la taille de particules. Elle est de 195% pour les feuilles, 93% pour la classe de particule 0-2 mm, 90 % pour la classe 2-4 mm, 80 % pour la classe 4-6 mm et 68 % pour la classe 6-25 mm. La vitesse de dessiccation est maximale lors de la mise à l'étuve et diminue progressivement. Elle est dépendante de la classe des particules, en effet, plus la taille des particules est grande, plus la vitesse de dessiccation est faible. Initialement, elle est de 2.32 %/mn pour les feuilles, 1 %/mn pour les classes de particules 0-2 mm et 2-4 mm, 0.79 %/mn pour la classe 4-6 mm et 0.17 %/mn pour la classe de particule 6-25 mm. Il doit être souligné que le conditionnement entraîne un changement de la répartition de la teneur en eau dans l'arbuste. Dans le milieu naturel, la teneur en eau décroît avec l'accroissement de la taille de particules. Après dessiccation nous avons la répartition inverse car les plus grosses particules mettent plus de temps à sécher.

Figure 4-1 : MC_k au cours du temps des différentes classes de particules

La Figure 4-1 montre qu'il convient d'être vigilant sur le temps de dessiccation des classes de particules les plus fines (feuilles et 0-2 mm). En effet, ce sont celles qui participent activement à la combustion dans nos conditions expérimentales et il s'agit de celles dont la variation de la teneur en eau est la plus dynamique. La teneur en eau critique de 67 % est atteinte au bout de 90 minutes et les 30 % de teneur en eau en 150 minutes. De plus, il doit être souligné que la Figure 4-1 correspond au cas d'un ciste prélevé un lendemain de jour de pluie pour obtenir le temps maximum nécessaire pour atteindre la teneur en eau critique et minimale. Afin de nous affranchir de la teneur en eau initiale, nous avons développé une méthode graphique pour définir un temps de séchage *a priori* permettant d'atteindre la teneur en eau souhaitée des feuilles. Cette méthode est issue de l'analyse de la dessiccation de plusieurs cistes prélevés au cours de différents mois de l'année pour différentes teneurs en eau. Leurs teneurs en eau initiales sont présentées dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Teneur en eau initiale des feuilles et brindilles de 0-2 mm de cistes

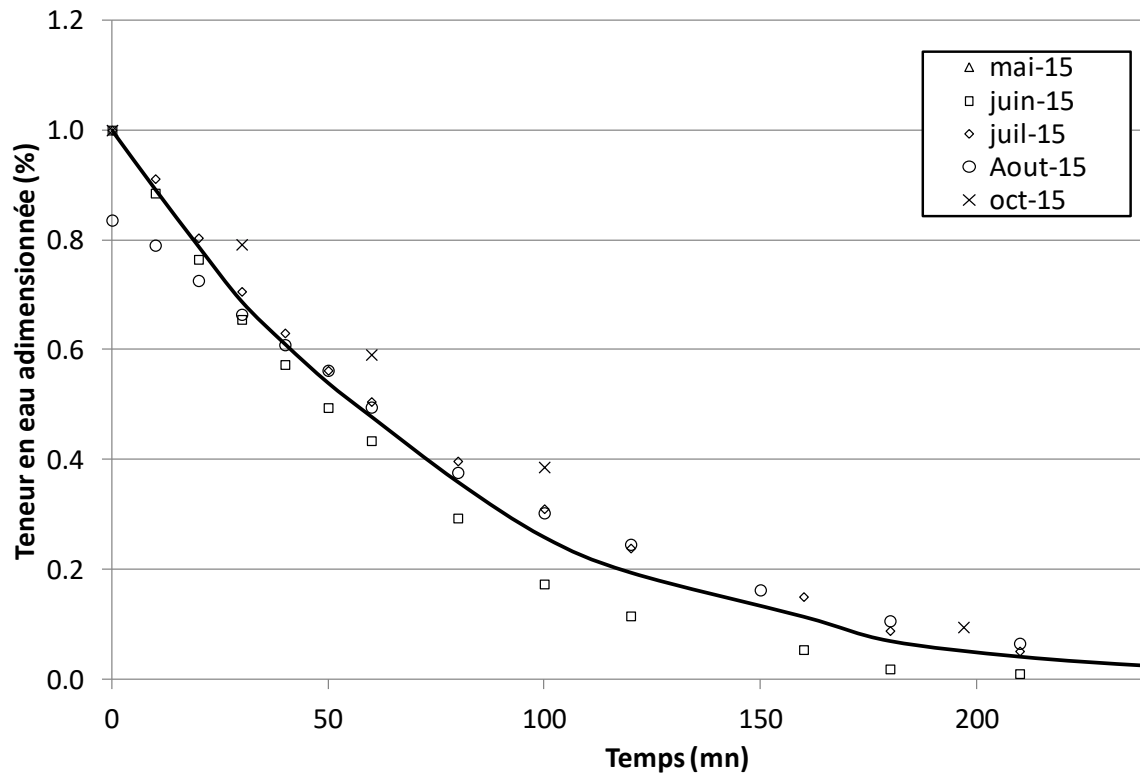
Mois de prélèvement	Mai	Juin	Juillet	Août	Octobre
$MC_f(0)$	195 %	155 %	131 %	108 %	144 %
$MC_{0-2}(0)$	93 %	104 %	101 %	91 %	

La teneur en eau des feuilles varie au cours des mois avec une valeur minimale obtenue début août. Celle de la classe de particule 0-2 mm est quasiment constante au cours des mois avec une moyenne de 97% et un écart type standard de 5%. Ces résultats peuvent être expliqués par la physiologie du végétal combinée à l'action des conditions ambiantes qui ont une plus grande influence sur les feuilles que sur les brindilles. Notre approche repose sur la comparaison de l'évolution de la teneur en eau adimensionnée des feuilles au cours du séchage des différents cistes.

La teneur en eau adimensionnée est définie par :

$$MC_{kr}(t) = \frac{MC_k(t)}{MC_k(0)} \quad (4.3)$$

La Figure 4-2 présente l'évolution de MC_{kr} au cours du temps lors du séchage des feuilles prélevées sur les différents cistes. Nous constatons que les courbes sont proches pour les différents mois étudiés. Les feuilles de ciste suivent donc un comportement analogue lors de la dessiccation pour les différents mois de l'année. Nous remarquons également que l'évolution de la teneur en eau adimensionnée est peu dépendante de la teneur en eau initiale. Ces résultats nous permettent d'estimer la teneur en eau initiale des feuilles après quelques dizaines de minutes de séchage sans avoir besoin d'attendre 48 heures pour que l'eau se soit complètement évaporée. Ce dernier résultat nous permet alors de connaître le temps nécessaire de mise à l'étuve pour obtenir la teneur en eau souhaitée.

Figure 4-2 : MC_{kr} au cours du temps des feuilles à différentes saisons

L'évolution de la teneur en eau adimensionnée au cours du temps pour la classe de particule 0-2 mm est tracée sur la Figure 4-3. Les brindilles de ciste de 0-2 mm suivent donc un comportement analogue lors de la dessiccation pour les différents mois de l'année. Ce résultat est similaire à celui obtenu pour les feuilles. La même démarche peut donc être adoptée afin de prédire la teneur en eau initiale de la classe de particule 0-2 mm ainsi que sa teneur en eau après un temps prédéterminé dans l'étuve.

Cette première méthode de conditionnement nous permet d'estimer rapidement le temps d'étuvage nécessaire pour atteindre la teneur en eau désirée. Néanmoins, l'étuve disponible ne peut contenir qu'un seul individu de ciste et entraîne une déformation de celui-ci. Cette méthode a été utilisée initialement dans ces travaux de thèse. Nous avons ensuite développé une nouvelle méthode mieux adaptée au séchage de quantités de ciste plus importantes.

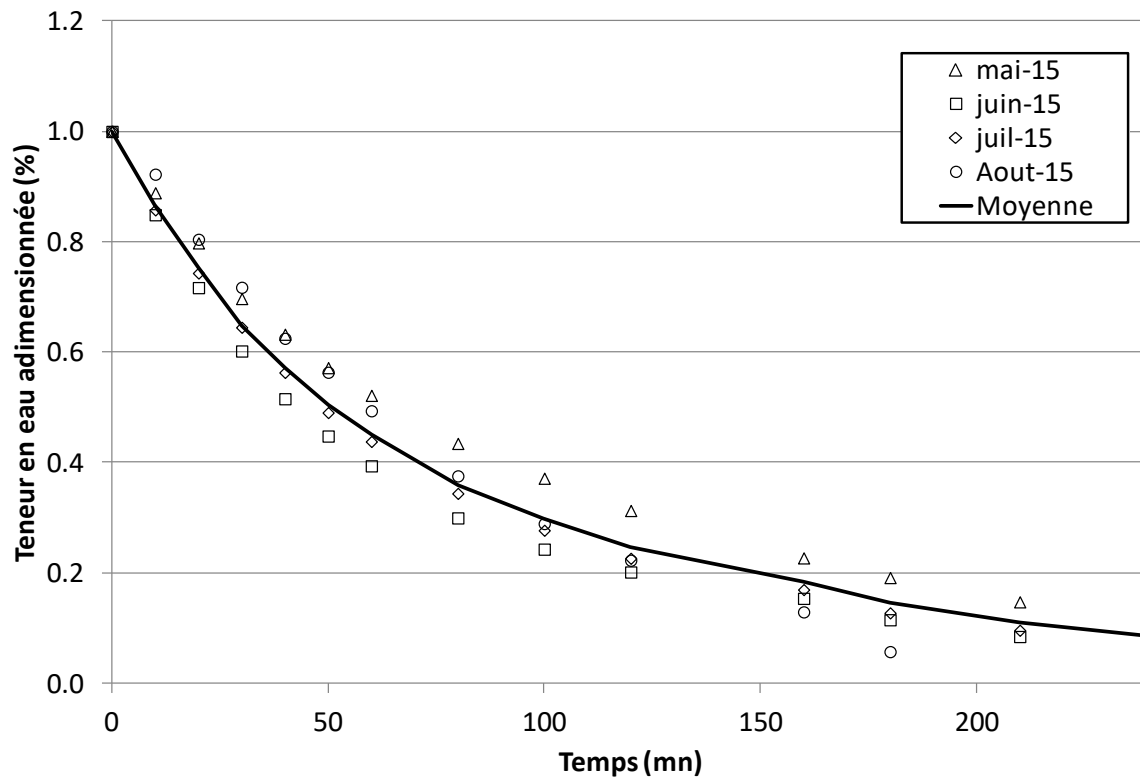


Figure 4-3 : MC_{kr} au cours du temps de la classe de particules 0-2 mm à différentes saisons

Résultats de la deuxième méthode de conditionnement

La Figure 4-4 représente le MC_k et sa tendance au cours du temps pour les différentes classes de particule d'un ciste récolté en janvier 2016. Les mêmes tendances que pour la première méthode de conditionnement peuvent être observées. La vitesse de perte de teneur en eau est maximale au début de la phase de conditionnement et ralentie au cours du temps. De plus, comme pour la première méthode, une inversion de la répartition de la teneur en eau, en fonction de la taille des particules, peut être observée. En outre, la totalité de l'eau présente dans les différentes classes de particules n'est pas perdue lors de ce conditionnement. La teneur en eau diminue jusqu'à atteindre une valeur stable dépendante de la pression, de la température et de l'humidité ambiante. Cette valeur est cependant assez faible pour que la teneur en eau souhaitée pour les feuilles soit atteinte. La teneur en eau critique (67 %) pour les feuilles est atteinte après 15 h de conditionnement et celle de 30 % après 34 h.

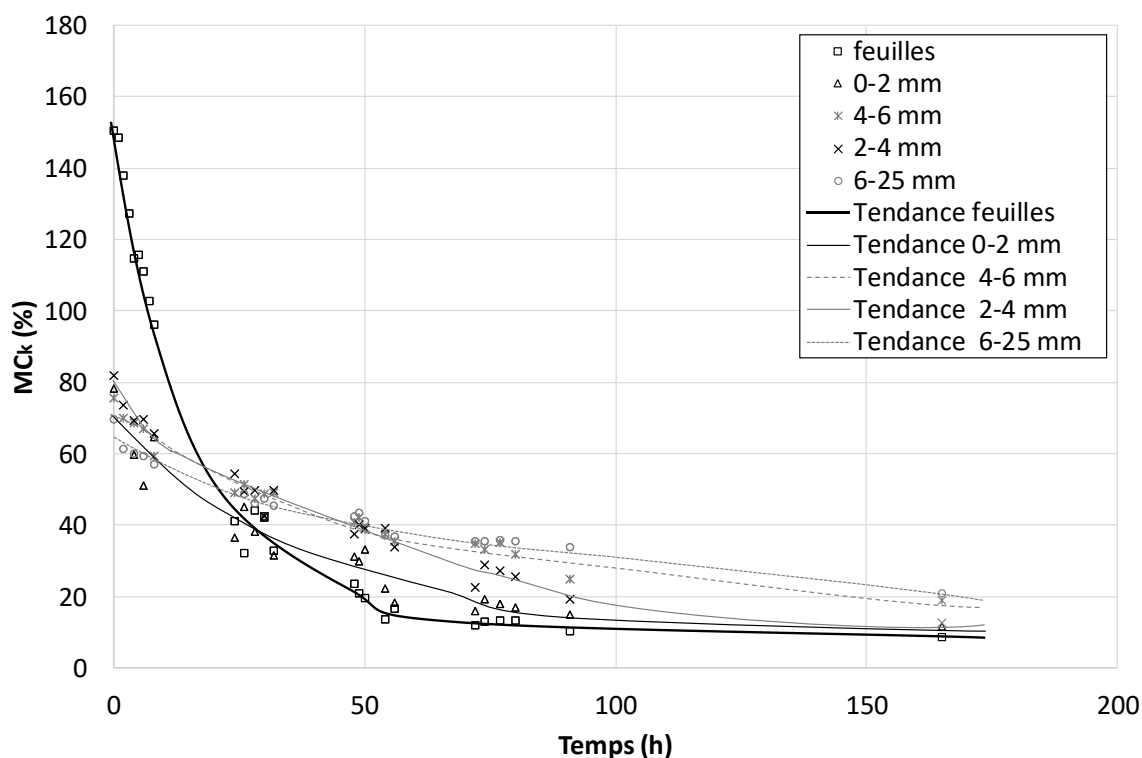


Figure 4-4 : MC_k et leur tendance au cours du temps des différentes classes de particules pour la seconde méthode de conditionnement

Cette seconde méthode ne nous permet pas d'estimer le temps de conditionnement nécessaire pour atteindre la teneur en eau souhaitée avec précision car les conditions ambiantes du laboratoire ne sont pas maîtrisées. Toutefois, elle nous permet d'atteindre la plage désirée (<30%) de teneur en eau après un jour et demi de conditionnement. En complément, des mesures de teneurs en eau initiales ont été réalisées lors des prélèvements pour avoir une estimation du temps de séchage nécessaire. Cette méthode présente l'avantage de permettre le conditionnement de nombreux échantillons simultanément sans entraîner leur déformation.

4.3. Résultats de caractérisation des cistes

Une caractérisation de la composition globale et de la répartition spatiale des classes de particules présentes dans le ciste de Montpellier a été réalisée (suivant la méthodologie détaillée dans le chapitre 2) afin de fournir les données nécessaires à l'élaboration d'un modèle de ciste pour WFDS et de compléter notre compréhension de la dynamique de combustion.

Les propriétés géométriques des cistes caractérisés sont présentées dans tableau ci-dessous :

Tableau 4-2 : Dimensions et masses des cistes caractérisés

	H (m)	$\varnothing$ (m)	h (m)	$\frac{h}{H}$ (%)	Masse sèche (kg)
Ciste 1	1.15	0.60	0.30	26	0.79
Ciste 2	1.15	0.75	0.30	26	0.72
Ciste 3	1.40	0.70	0.45	32	0.78

où H , $\varnothing$ et h représentent respectivement la hauteur du ciste, le diamètre et la hauteur de son houppier.

4.3.1. Répartition massique des différentes classes de particules

Dans un premier temps, la composition globale de l'arbuste a été analysée pour identifier la quantité de particules participant activement à la combustion. Le Tableau 4-3 représente la répartition massique de chaque classe de particule au sein de l'arbre en adoptant la notation suivante :

$$\Gamma_k = \frac{m_{ks}}{m_s} \quad (4.4)$$

avec Γ_k , le pourcentage massique de la classe k dans le ciste, m_{ks} la masse sèche de la classe de particule k dans le ciste et $m_s = \sum_k m_{ks}$, la masse du ciste sec (hors base, cf. chapitre 2 section 2.1.2).

Nous observons que la composition des trois échantillons est très proche bien que leurs dimensions diffèrent légèrement. En effet, les écarts types sont de 0.8 % pour les feuilles, de 1.3 % pour la classe 0-2 mm, 0.9 % pour la classe 2-4 mm, et 1.6 % pour la classe 4-6 mm. La différence la plus élevée est de 4 % pour la classe 6-25 mm. Cette différence est due à la structure du pied de l'échantillon qui présente le plus de différences entre les individus. De ce fait, nous pouvons considérer qu'un ciste moyen prélevé au même endroit est composé de 22.1 ± 0.8 % de feuilles, de 20.8 ± 1.3 % de particules de la classe 0-2 mm, de 18.3 ± 0.9 % de particules de la classe 2-4 mm, de 16.4 ± 1.6 % de particules de la classe 4-6 mm et de 17.0 ± 4.0 % de particules de la classe 6-25 mm. Pour la suite de l'étude, nous considérons que 42.9 % de la masse totale du ciste est composée de classes particules de tailles inférieures à 2

mm, participant activement à la combustion. De plus, 66.6 % de sa masse sèche appartient à des classes de particules dont la taille est inférieure à 6 mm.

Tableau 4-3: répartition massique des classes de particules

	Γ_f	Γ_{0-2} vivant	Γ_{0-2} mort	Γ_{2-4}	Γ_{4-6}	Γ_{6-25}
Ciste 1	23.1 %	21.7 %	5.2 %	17.6 %	16.2 %	16.1 %
Ciste 2	21.1 %	21.8 %	6.2 %	19.6 %	18.5 %	12.7 %
Ciste 3	22.1 %	18.9 %	4.3 %	17.8 %	14.5 %	22.3 %
Moyenne	22.1 %	20.8 %	5.2 %	18.3 %	16.4 %	17.0 %
Ecart type	0.8 %	1.3 %	0.8 %	0.9 %	1.6 %	4.0 %

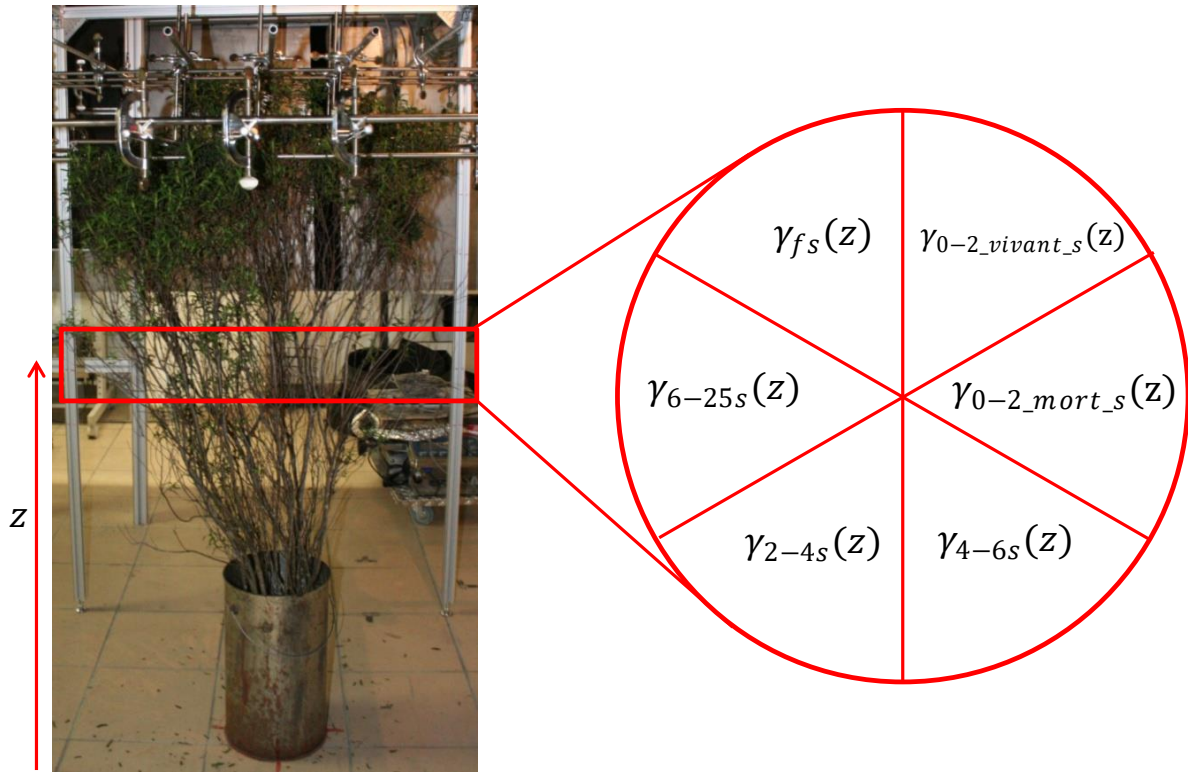
4.3.2. Fraction massique des différentes classes de particules suivant la hauteur

La caractérisation a été réalisée avec des mailles de 15 cm de côté. Cette taille est bien adaptée pour appréhender la variation spatiale des caractéristiques des cistes suivant la hauteur. Ces arbustes mesurent 1.15m de haut et leur houppier représente environ 30% de cette hauteur. Ainsi la discrétisation adoptée permet de capter la discontinuité avec le houppier. Par contre, cet échantillonnage ne nous a pas permis d'apprécier une éventuelle variation radiale de la répartition d'une même classe de particules dans le houppier. En effet, son diamètre étant de 60 cm, l'échantillonnage adopté (cubes de 15 cm) avec 4 mailles au plus n'a pas révélé de tendance, même si nous avons pu noter une hétérogénéité à l'étage le plus élevé. Nous présentons donc dans ce paragraphe la variation de la fraction massique des différentes classes de particules suivant la hauteur des arbustes.

Pour cela, nous introduisons la grandeur $\gamma_{ks}(z)$, fraction massique de la classe de particules sèche k pour la hauteur z , définie par :

$$\gamma_{ks}(z) = \frac{m_{ks}(z)}{m_s(z)} \quad (4.5)$$

où $m_{ks}(z)$ représente la masse sèche de la classe de particule k située entre $z - \frac{\delta}{2}$ et $z + \frac{\delta}{2}$ pour $\delta = 15 \text{ cm}$ et $m_s(z) = \sum_k m_{ks}(z)$. La Figure 4 illustre cette définition.

Figure 4-5 : Fraction massique des classes de particules à une hauteur z

La Figure 4-7 présente l'évolution de γ_{ks} pour toutes les classes de particule en fonction de la hauteur adimensionnée z^* ($z^* = z/H$) dans le cas du ciste 1. Nous observons qu'à la hauteur $z^* = 0.94$, (correspondant à la partie supérieure du houppier) le houppier est composé uniquement des classes de particules participant activement à la combustion (71% de feuilles et 29% de particules de la classe 0-2 mm). Les particules de la classe 2-4 mm sont présentes dans la partie inférieure du houppier, à partir de $z^* = 0.80$, à un taux de présence de 16%. Nous trouvons 84% de classes de particules très combustibles à cette hauteur (43% de feuilles et 38% de 0-2 mm). A la hauteur $z^* = 0.67$, située dans la zone intermédiaire, le ciste est composé majoritairement de particules de la classe 0-2 mm (36%) et de particules de la classe 2-4 mm (30%). Le pourcentage de présence des feuilles est faible avec une fraction massique de 17%, et la classe de particule 4-6 mm est présente pour la première fois à 14%. Dans la partie inférieure de la zone intermédiaire, pour $z^* = 0.54$, les feuilles et les particules de la classe 0-2 mm sont très peu présentes (respectivement 6% et 13%). A cette hauteur, le ciste est composé principalement de particules de la classe 4-6 mm, présentes à 35%, et de la classe 2-4 mm, présentes à 29%. Les particules de la classe 6-25 mm représentent 6% du total. Dans la partie supérieure du pied, soit pour $z^* = 0.41$, les classes de particules les plus fines (feuilles et 0-2 mm) sont négligeables. Elles représentent chacune 4% du total à cet étage. A cette hauteur,

l'arbuste est composé en majorité de particules de classe 4-6 mm et 6-25 mm (33% et 31% respectivement). La classe de particule 2-4 mm est présente à 18 %. Finalement, la partie inférieure du pied est composée de 67% de particules de la classe 6-25 mm et de 14% de particules de la classe 4-6 mm. Les autres particules représentent 19% du total à cet étage avec principalement des particules de la classe 2-4 mm (8%). Il doit être noté que la classe de particule 0-2 mm mort n'est pas présentée sur cette figure par soucis de lisibilité.

Ces résultats nous permettent de mieux cerner la structuration des trois zones composant le ciste. Le houppier est composé en quasi-totalité par les classes de particules participant activement à la combustion (plus de 80 %), le pied est composé majoritairement de classes de particules de tailles supérieures à 4 mm (plus de 60 %). La partie intermédiaire, quant à elle, est composée d'un mélange de particules (0 à 6 mm) avec un pourcentage de la classe de particules 2-4 mm de 30% (valeur maximale de cette classe de particules).

D'après les résultats obtenus nous pouvons estimer que la partie supérieure du ciste, soit le houppier, participera activement à la combustion alors que la consommation des particules présentes dans les zones inférieures sera moins importante. Les courbes de $\gamma_k(z)$ des deux autres cistes sont similaires à ceux du ciste 1.

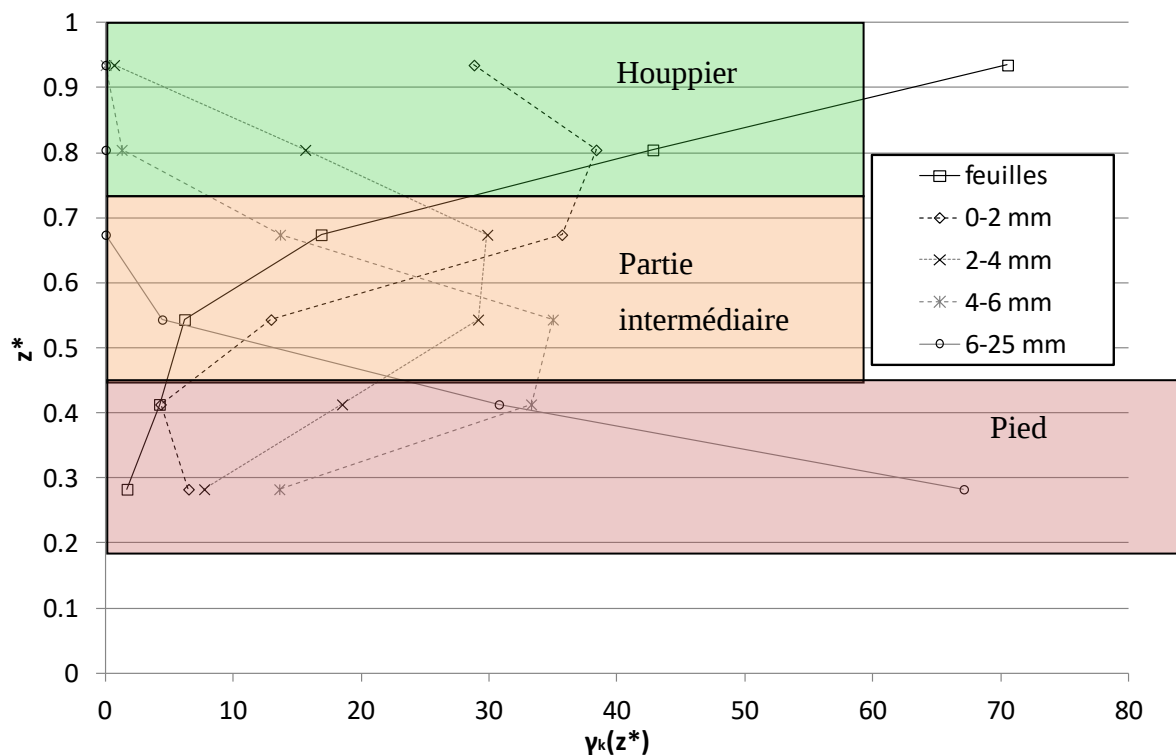
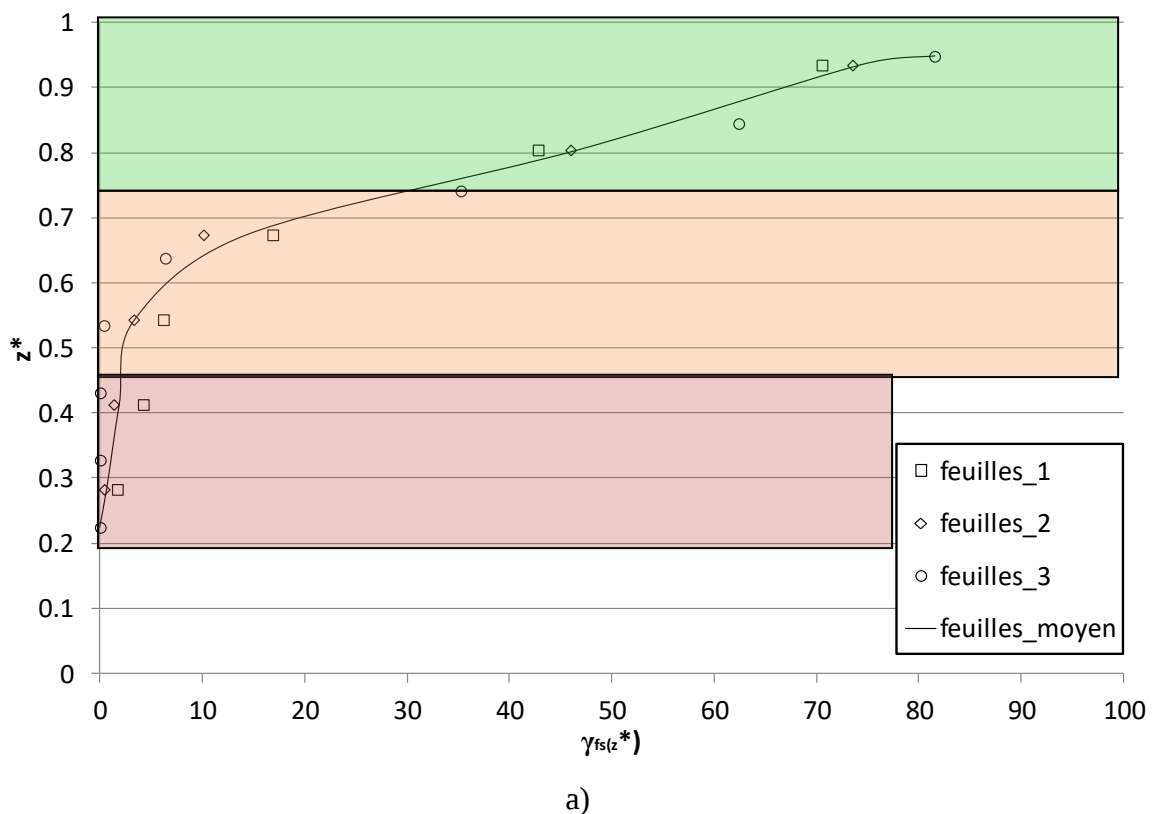


Figure 4-6 : Fraction massique des classes de particules en fonction de la hauteur du ciste 1

Les Figure 4-7a) à Figure 4-7e) représentent l'évolution de γ_{ks} pour chaque classe de particule en fonction de la hauteur adimensionnée z^* pour les trois cistes. Les différentes zones composant le ciste sont de nouveau identifiables (houppier, zone intermédiaire et pied). Nous observons une répartition similaire des classes de particule pour les trois cistes ce qui conforte la reproductibilité des échantillonnages. Les plus grands écarts concernent les classes de particules de tailles supérieures à 4 mm pour le pied du ciste. Les écarts pour les classes de particules de petites tailles sont faibles dans le houppier et dans la partie intermédiaire. Ces résultats nous confortent pour l'étude de la réaction au feu des plants de ciste. En effet, nous aurons à prélever des arbustes dont les répartitions de classe de particules devront être similaires afin de limiter au mieux l'effet de l'hétérogénéité des plants sur la répétabilité des brûlages.



Comportement au feu d'un buisson

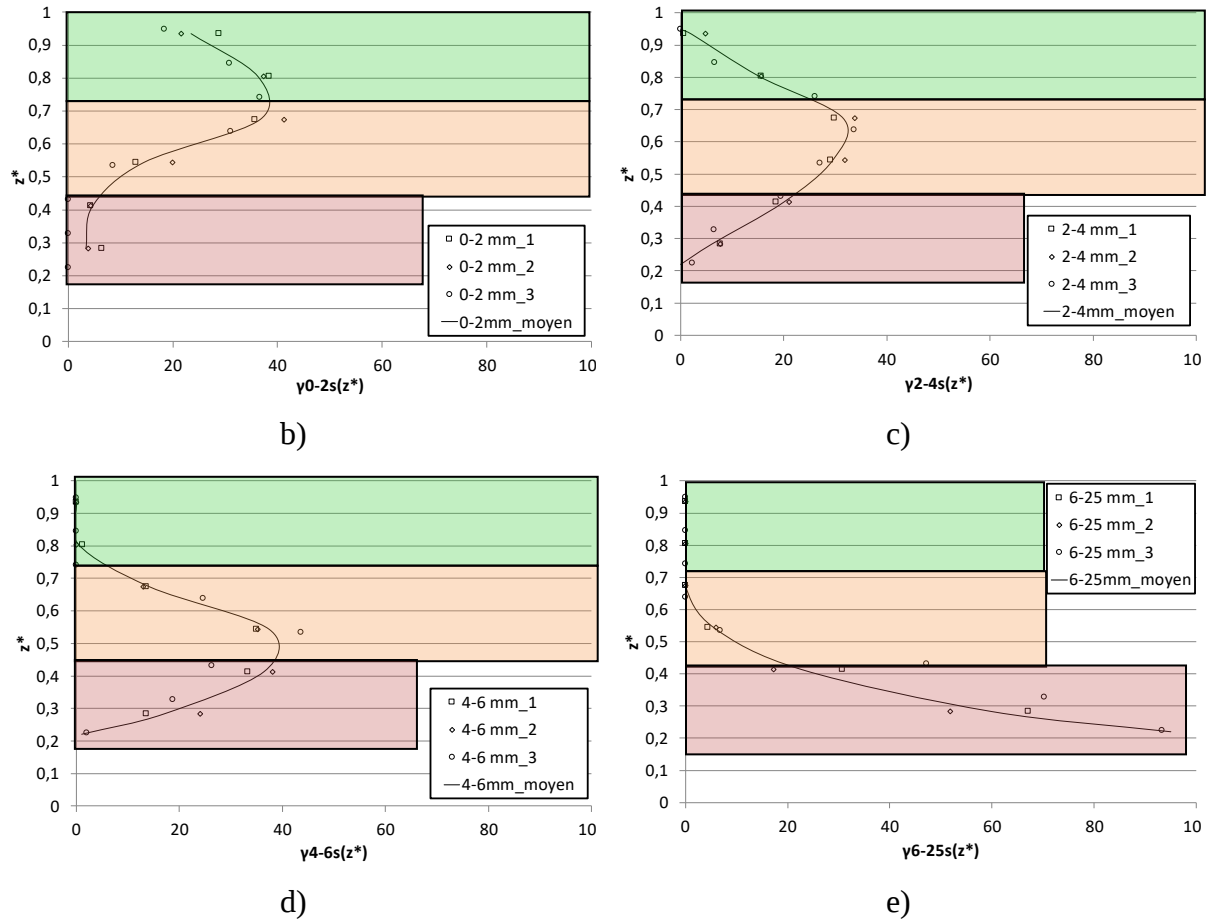


Figure 4-7 : Fraction massique des classes de particules en fonction de la hauteur a) feuilles b) 0-2 mm c) 2-4 mm d) 4-6 mm e) 6-25 mm pour les trois cistes

4.3.3. Répartition massique d'une même classe de particules suivant la hauteur

La répartition massique d'une même classe de particules suivant la hauteur est présentée dans cette section afin de compléter l'analyse précédente. Pour cela, nous introduisons la grandeur $\zeta_{ks}(z)$, définie par :

$$\zeta_{ks}(z) = \frac{m_{ks}(z)}{m_{ks}} \quad (4.6)$$

avec $m_{ks}(z)$, la masse sèche de la classe de particule k située entre $z - \frac{\delta}{2}$ et $z + \frac{\delta}{2}$ pour $\delta = 15$ cm. La Figure 4-8 illustre cette définition.

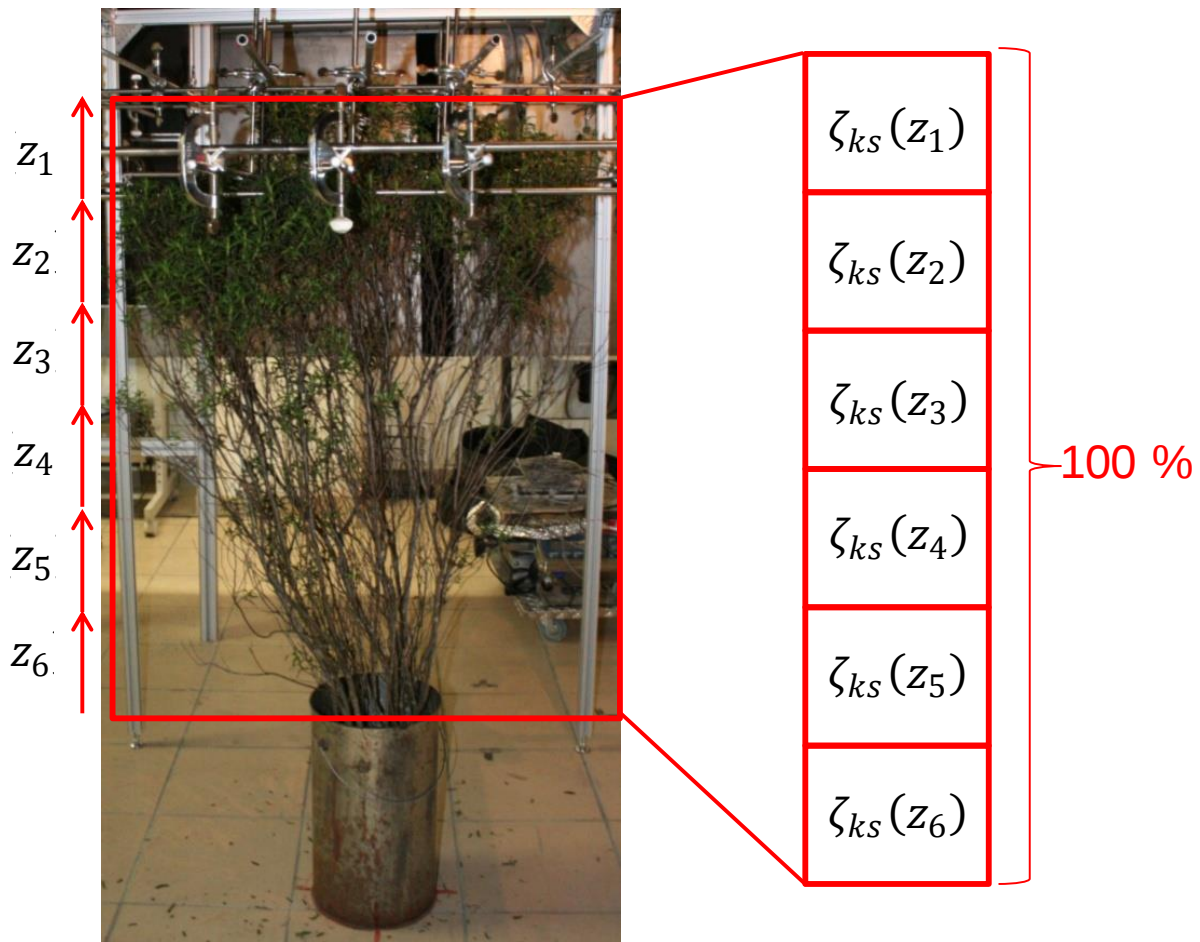


Figure 4-8 : Répartition massique d'une classe de particule k suivant la hauteur

La Figure 4-9 représente ζ_{ks} pour chaque classe de particule en fonction de la hauteur adimensionnée z^* ($z^* = z/H$) pour le ciste 1. Nous constatons que 78% de la masse totale des feuilles se situe dans le houppier. Les particules de la classe 0-2 mm sont présentes à 82% dans le houppier et la moitié supérieure de la partie intermédiaire. Pour ce qui est de la classe 2-4 mm, 58% de la masse totale des particules se situe dans la partie intermédiaire. Le reste étant réparti de manière quasi-identique dans les deux autres parties du ciste. Les particules de la classe 4-6 mm sont principalement présentes dans la moitié inférieure de la partie intermédiaire (37% de la masse totale de ces particules) et dans le pied (46% de la masse totale de ces particules). Finalement nous retrouvons 95% de la masse totale de la classe 6-25 mm dans le pied du ciste. Les particules participant activement à la combustion (feuille et particules de la classe 0-2 mm) se situent donc majoritairement dans le houppier et la moitié supérieure de la partie intermédiaire du ciste.

Nous observons, pour la classe 6-25 mm, un comportement inverse à celui des feuilles. Il en est de même entre les classes 0-2 mm et 4-6 mm. De plus, une symétrie est présente à $z^* = 0.6$ pour les particules de la classe 2-4 mm.

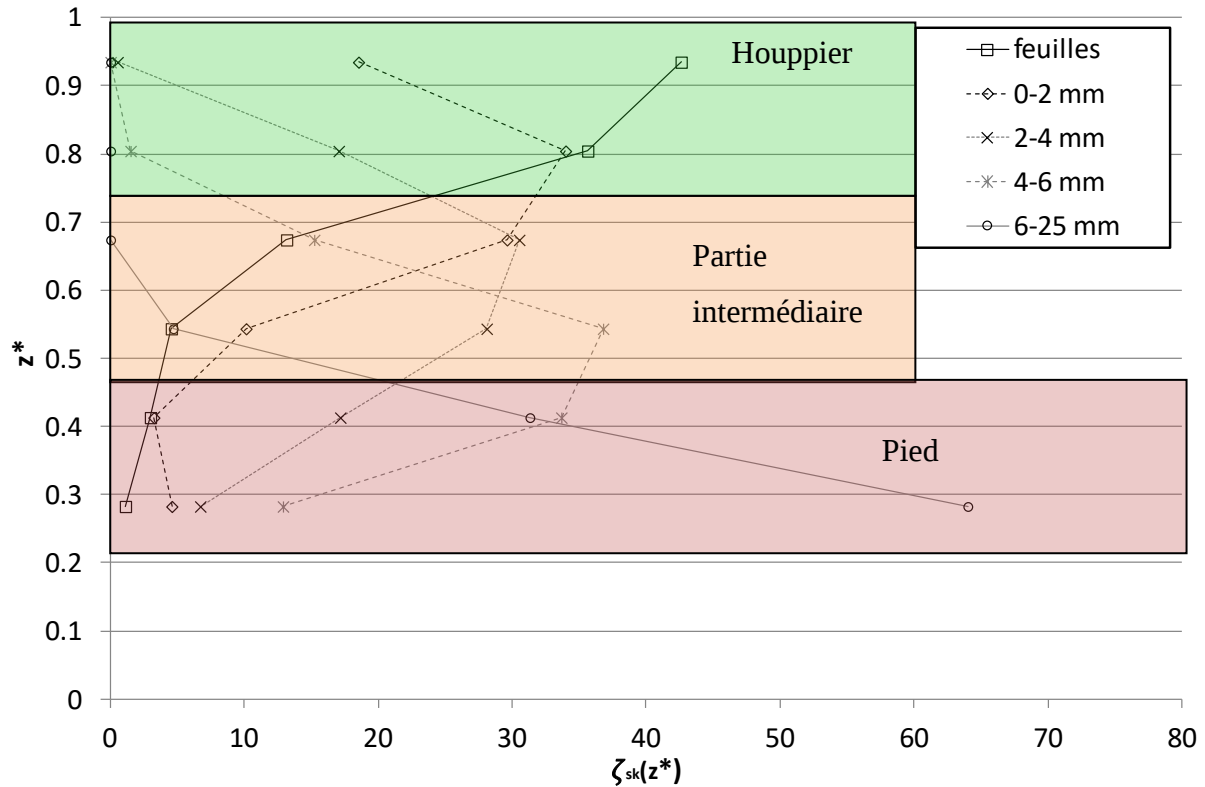
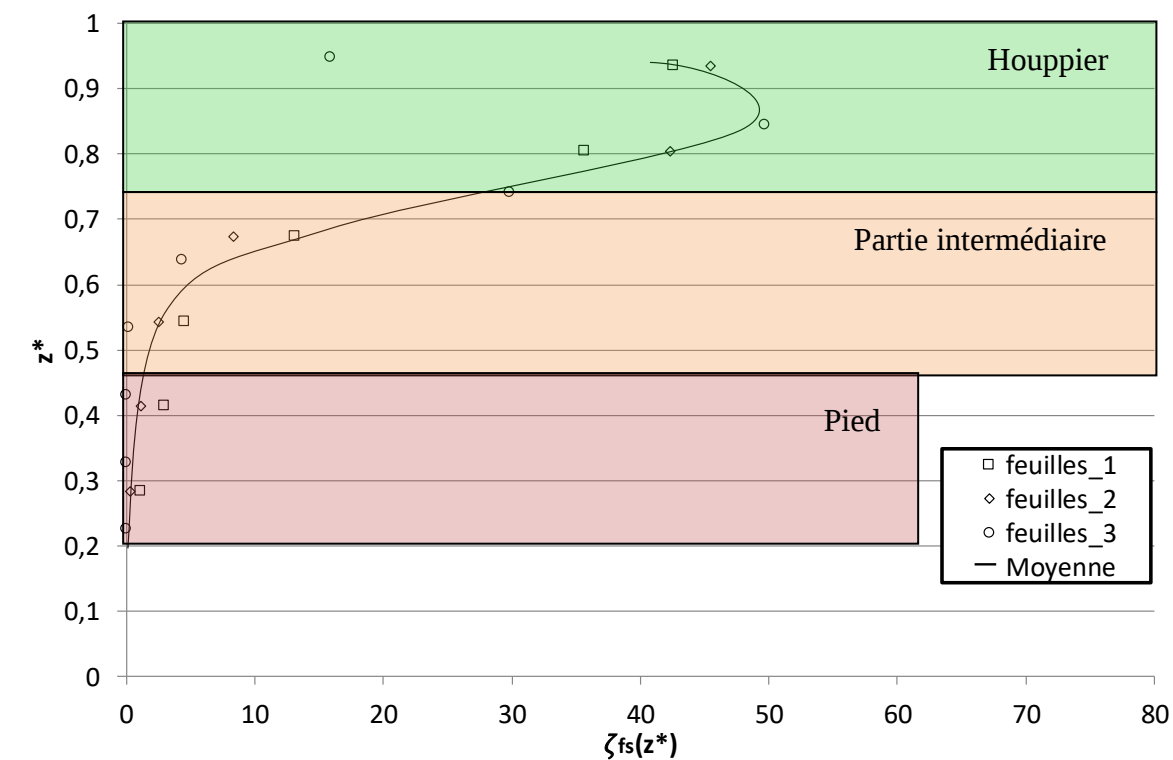


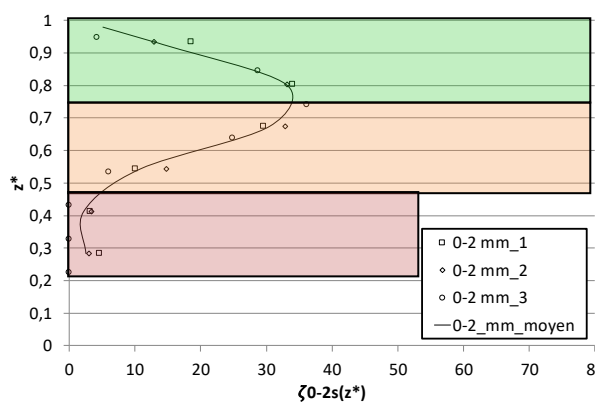
Figure 4-9 : Répartition massique de chaque classe de particules en fonction de la hauteur adimensionnée pour le ciste 1

Les Figure 4-10a) à Figure 4-10e) représentent ζ_{sk} pour chaque classe de particules en fonction de la hauteur adimensionnée z^* pour les trois cistes. Nous observons que la répartition des feuilles au sein des trois cistes est similaire. En effet, nous retrouvons entre 80 et 95% de la fraction massique des feuilles dans les houppiers pour les trois cistes. Les échantillonnages sont également répétables pour les autres classes de particules. Cependant nous notons une dispersion des mesures pour les classes de particules de tailles supérieures à 4 mm dans la zone du pied. Ces résultats corroborent l'analyse faite dans le paragraphe précédent. La dispersion des particules les plus épaisses ne sera pas rédhibitoire dans notre cas car notre étude sur la réaction au feu des cistes impliquera principalement les particules les plus fines contenues dans le houppier.

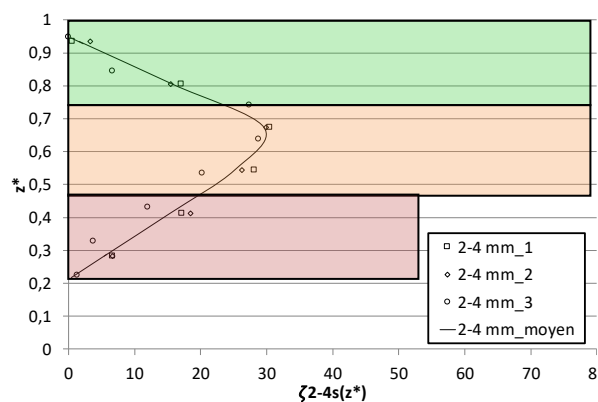
Comportement au feu d'un buisson



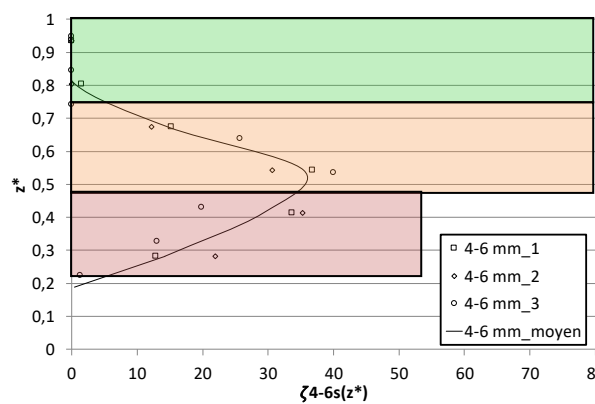
a)



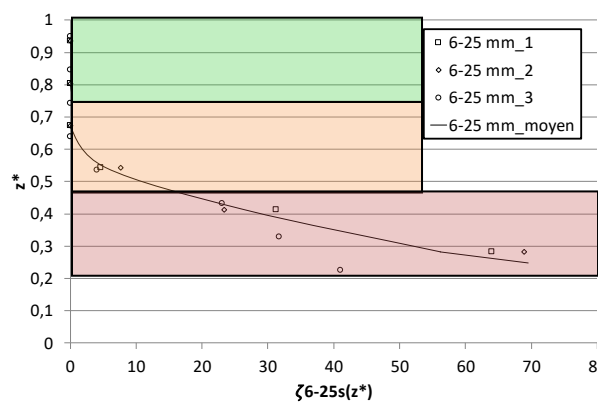
b)



c)



d)



e)

Figure 4-10 : Répartition massique des classes de particules en fonction de la hauteur adimensionnée a) 0-2 mm b) 2-4 mm c) 4-6 mm d) 2-4 mm e) 6-25 mm

Dans la littérature, un autre type de ciste, dit à feuilles de sauge (*cistus salviifolius*), a été caractérisé en fonction de la répartition massique des différentes classes de particules le constituant (feuilles et brindilles de 0-2.5 mm et 2.5-5 mm de diamètre) (Papio et Trabaud, 1991). Les cistes caractérisés sont plus petits (0.74 m de hauteur, 0.44 m de diamètre, masse de 155 g en moyenne contre 1.23 m de hauteur, 0.68 m de diamètre et 763 g dans notre cas) et ne présentent pas de branches de diamètres supérieurs à 5 mm. Bien que les dimensions et les diamètres des particules composant ces cistes soient inférieures à ceux des cistes que nous avons étudiés, leur répartition massique est similaire. Les cistes à feuilles de sauges sont constitués en moyenne de 20.4 ± 2.7 % de feuilles, de 21.1 ± 2.5 % de 0-2.5 mm vivant, 14.5 ± 2.5 % de 0-2.5 mm mort et 25.6 ± 1.6 % de 2.5-5 mm contre 22.1 ± 0.8 % de feuilles, 20.8 ± 1.3 % de 0-2 mm vivant et 5.2 ± 0.8 % de 0-2 mm mort pour les cistes de Montpellier caractérisés. Il doit être cependant noté que la masse de particules de diamètres supérieurs à 6 mm représentent 17 ± 4 % de la masse des cistes de Montpellier alors que celles-ci ne sont pas présentes sur les cistes à feuilles de sauges.

Les études de combustion d'individus portent en partie sur la chamise qui a été également caractérisée en détails dans la littérature. Li et al. (2016) fournissent des résultats de combustion qui sont couplées à une caractérisation de végétation brûlée. La chamise caractérisée fait en moyenne 0.95 ± 0.19 m de haut pour un diamètre moyen de 0.62 ± 0.04 m et une masse totale de 0.53 ± 0.14 kg. Les particules dont le diamètre est inférieur à 0.63 cm ont été séparées des particules de plus grandes épaisseurs. La composition de la chamise est similaire à celle des cistes de Montpellier. Elle est composée à 90 ± 10 % de tailles de particules inférieures à 6 mm et 10 % (pour un écart type de 10 %) de tailles supérieures. Les cistes caractérisés dans notre étude sont composés de 83 ± 5 % de particules de classes 0-6 mm. De plus, il est montré par Li et al. (2017) que la plus grande quantité de fines particules est située en partie basse du buisson. A contrario, les fines particules composant les cistes sont situées dans le houppier en partie haute de l'arbuste.

4.3.4. Composition des cistes l'été

Les expériences de combustion réalisées sur les cistes prélevés l'été ont révélé un comportement original. Afin de l'expliquer dans la suite de ce chapitre une caractérisation de la composition globale de ces cistes a été effectuée. Le calcul de la répartition massique a été réalisé tel que présenté dans la section 4.3.1. Les masses mesurées pour chaque famille de

particules sont présentées dans le Tableau 4-4. Le tableau contient également à titre de comparaison les masses attendues si nous avons effectué ce prélèvement en automne. Dans ce cas, la répartition massique a été calculée en appliquant les fractions massiques identifiées dans la section 4.3.1.

Tableau 4-4 : Répartition massique des classes de particules présentes dans les cistes d'été et masses attendues pour un ciste d'automne

	Plan de Ciste	fleurs	feuilles	0-2 mm	2-25 mm
Masses mesurées (g)	1306	98	101	309	798
Répartition (%) des masses mesurées	100	8	8	23	61
Masses calculées (g)	1306	0	287	340	679

Nous notons tout d'abord la présence de deux familles de particules supplémentaires dans les cistes d'été : les fleurs et les graines. Mais comme les graines sont incluses dans les fleurs, nous considérons une seule famille supplémentaire. Nous observons que la masse des fleurs dans ces cistes est équivalente à celle des feuilles. Elle représente 8% de la masse totale du ciste. Nous observons également une diminution de la quantité des particules fines lors de cette saison. En effet, la somme des masses des particules de classes inférieur ou égale à 2 mm d'épaisseur caractéristique (en comptant les fleurs) représente 38,6% de la masse totale du ciste contre 48% pour les cistes d'automne. En effet, la masse des feuilles diminuent considérablement en été et représente un tiers de la masse des feuilles présentes dans les cistes d'automne. Il doit être signalé que la masse de feuille manquante se retrouve sous forme de litière (Figure 4-11) en dessous de l'arbuste. Cette litière n'est cependant pas prise en compte lors de l'étude de réaction au feu présentée dans le reste du chapitre.



Figure 4-11 : Litière observée sous les cistes durant l'été

4.4. Résultats des essais de comportement au feu d'un buisson

Lors de ces travaux de thèse, nous avons réalisé 41 expériences de combustion de cistes. Les résultats de 29 essais ont été conservés pour comprendre le comportement au feu de ces cistes, soit 70% des expériences réalisées. Lors des premiers essais, nous avons observé que pour certains tests, la courbe de HRR présentait une valeur maximale faible (64 ± 27 kW) et comportait généralement deux pics. Le feu, de faible intensité se propageait lentement jusqu'à sa quasi-extinction. Une faible augmentation de puissance était observable lorsque la flamme atteignait une forte concentration de feuilles ou qu'un second allumage se produisait. Cela se traduisait visuellement par une propagation erratique dans le houppier, impliquant des pousses de proche en proche et avec une très faible vitesse de propagation. L'intensité de la combustion n'était pas suffisante pour observer une propagation d'ensemble du feu. Pour obtenir une propagation d'ensemble, nous avons identifié sur ces premiers essais que les cistes devaient présenter un léger contact entre le houppier et les panneaux radiants afin de favoriser l'allumage mais également d'anticiper la position de la zone d'allumage. Nous avons ensuite réalisé l'ensemble des essais restant en obtenant le plus souvent la dynamique de combustion souhaitée, excepté lors de double allumages ou lors d'essais infructueux. De plus, nous avons mis en évidence un effet de la saison sur les dynamiques de combustion, ce qui nous a contraints

à réaliser les expériences à des périodes fixes. En effet, au printemps, la composition des feuilles influence l'allumage et en été la structure du houppier est responsable d'un comportement différent. Sur le total des 41 expériences, 14 ont été réalisées au printemps, 13 en été et 14 en automne. Pour un total d'expériences retenues de 8 au printemps, 8 en été et 13 en automne.

Dans cette partie nous nous intéressons principalement aux différents critères de comportement au feu, définis dans le chapitre 1.3, à savoir : les critères de *ignitability*, *combustibility*, *sustainability* et *consumability*. Pour étudier au mieux ces différents critères, des paramètres, issus des mesures fournies par notre dispositif expérimental, ont été sélectionnés comme indiqué dans le Tableau 4-5 :

Tableau 4-5 : Paramètres liés aux critères de réaction au feu étudiés

Critère	<i>ignitability</i>	<i>sustainability</i>	<i>combustibility</i>	<i>consumability</i>
Paramètres étudiés	t_{ign} (s)	t_{fl} (s)	Pic de HRR	
			(kW)	
			Pic de MLR	η (%)
			(g/s)	
			α (kW.s ⁻²)	

Les paramètres α et η seront présentés ci-après. Les valeurs des paramètres associés aux critères de comportement au feu du buisson sont synthétisées dans le Tableau 4-6 pour l'ensemble des essais valides. Ces résultats sont analysés et discutés dans les paragraphes suivants.

Tableau 4-6 : Valeurs des paramètres pour les essais de comportement au feu des cistes

Saison Année	Référence	t_{ign} (s)	t_{fl} (s)	Pic HRR (kW)	Pic de MLR (g/s)	α (kW.s ⁻²)	η (%)
Printemps 2015	150402_1	12	77	145	10.37	0.089	22,1 ± 4,4
	150402_2	3	36	228	15.69	0.787	36,5 ± 6,5
	150402_3	6	81	57	4.59	0.066	18,0 ± 9,4
	150608_1	600	40	268	17.88	0.935	20,5 ± 3,6
Automne 2015	151020_1	90	95	106	6.73	0.115	21,0 ± 4,3
	151020_2	186	60	230	16.38	0.620	23,7 ± 4,1
	151020_3	217	120	85	5.64	0.110	16,4 ± 3,6
	151022_1	79	105	112	8.27	0.103	24,5 ± 4,5

Comportement au feu d'un buisson

	151022_2	20	71	256	17.47	0.325	36,4 ± 4,9
	151022_3	44	42	262	16.11	0.600	21,3 ± 4,1
	151112_2	71	76	222	14.14	0.312	20,6 ± 3,4
	151112_3	47	80	182	12.35	0.375	22,7 ± 3,7
	151112_4	157	70	445	28.32	0.622	34,0 ± 4,7
Printemps 2016	160325_3	467	57	300	20.00	0.526	38,5 ± 6,7
	160404_2	485	72	170	10.00	0.223	28,7 ± 5,4
	160404_3	722	94	264	17.00	0.522	38,6 ± 5,4
	160404_4	48	59	195	12.40	1.259	49,8 ± 10,5
Eté 2016	160705_2	213	50	200	19.00	1.020	16,6 ± 5,5
	160705_4	19	62	115	12.80	0.639	16,4 ± 4,7
	160705_5	69	30	114	10.00	0.390	21,4 ± 12,0
	162807_1	467	59	174	10.00	0.569	17,8 ± 3,5
	162807_3	814	48	203	14.28	0.702	9,5 ± 3,4
Automne 2016	160920_1	257	84	221	13.70	0.800	25,5 ± 4,4
	160920_2	254	63	163	10.00	0.259	18,5 ± 4,8
	160920_3	631	79	190	13.60	0.400	29,7 ± 4,9
	160920_4	793	96	163	10.00	0.080	30,3 ± 5,6
Eté 2017	170724_1	469	71	209	15.95	0.57	26,7 ± 5,6
	170724_2	1302	86	239	20.00	0.57	38,3 ± 5,6
	170724_3	43	173	54	4.20	0.04	18,6 ± 4,7

4.4.1. Le critère *ignitability*

Le critère *ignitability* est défini par le temps que met un matériau à s'allumer. La variable étudiée est le temps d'allumage. Lorsque les particules sont exposées à un flux de chaleur provenant d'une source extérieure (panneaux radiants dans notre cas), leur température augmente et une dégradation thermique se produit. L'allumage a lieu sur un bord du ciste quand le débit massique est assez riche en gaz combustibles, au voisinage d'une particule incandescente dans la totalité de nos essais. Le feu se propage ensuite de manière horizontale au reste du houppier. Pour ces expériences, les feuilles sont les premières particules à s'enflammer. La flamme englobe par la suite les autres classes de particules. De ce fait, nous nous intéressons à une possible relation entre le temps d'inflammation et la teneur en eau des feuilles. La Figure 4-12 représente le temps

d'allumage t_{ign} en fonction de la teneur en eau des feuilles, MC_f , pour les différentes saisons de prélèvement des cistes. Ce graphique révèle trois tendances. Pour les cistes d'automne, le temps d'inflammation semble augmenter avec la teneur en eau des feuilles. En ce qui concerne les cistes d'été, l'augmentation de la teneur en eau des feuilles entraîne également une augmentation du temps d'allumage. Cependant, la quantité de feuilles (particules les plus fines et les plus inflammables) est plus faible en été dans le houppier, ce qui entraîne une diminution de la masse des produits de pyrolyse. Ainsi, une augmentation de la teneur en eau l'été induit une augmentation plus significative du temps d'allumage qu'en automne. Enfin, des temps d'allumage très importants sont souvent obtenus pour les cistes de printemps y compris pour les humidités les plus faibles. Dans ce cas, les pousses juvéniles (absentes en été et en hiver) semblent avoir un pouvoir ignifugeant (probablement lié à leur composition), retardant significativement l'inflammation de l'échantillon.

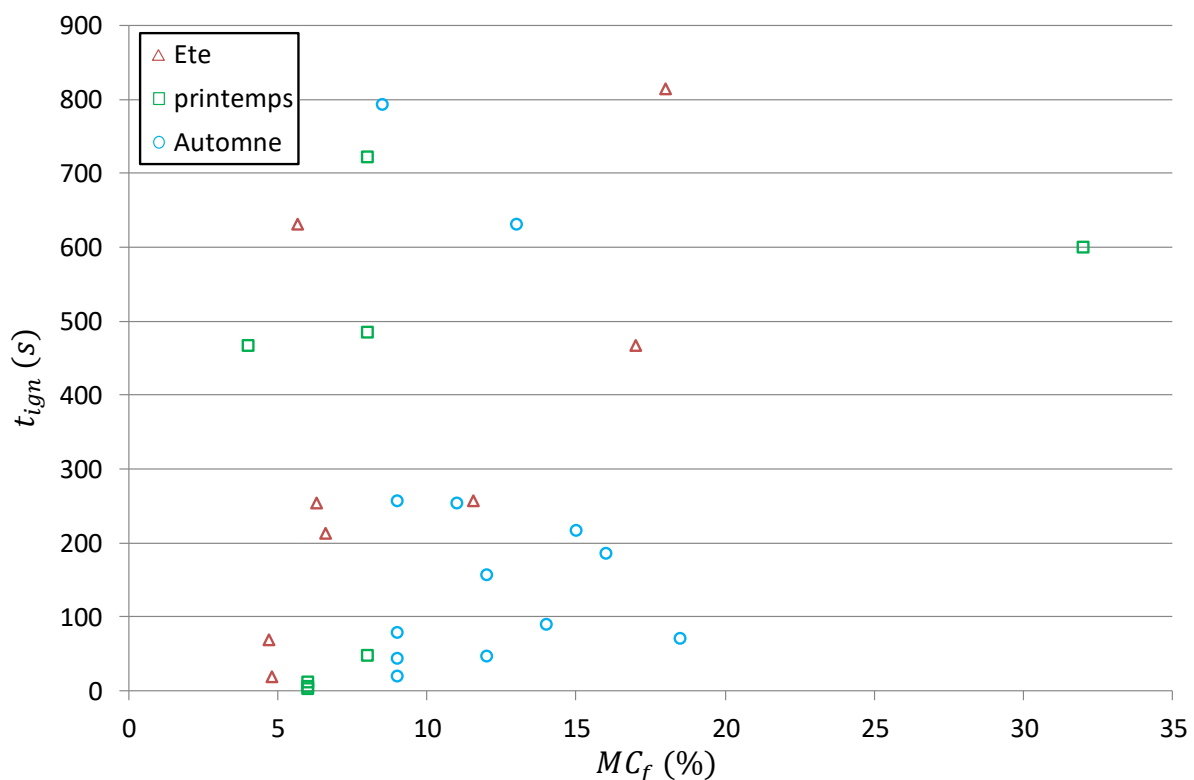


Figure 4-12 : Temps d'allumage des cistes en fonction de la teneur en eau des feuilles

Ces résultats sont en adéquation avec la littérature. En effet, McAllister et Weise (2017) ont montré une variation du temps d'allumage au cours des saisons. Cependant, il doit être souligné que la valeur du flux incident joue un rôle important sur le temps d'allumage (Bartoli et al.

2011). En effet, celui-ci augmente fortement quand la densité de flux imposée se rapproche de la valeur critique d'inflammation. Pour notre configuration expérimentale, le flux incident est proche de la valeur de flux critique observé par Bartoli et al. (2011), soit 20 kW/m². De plus, la distance entre le ciste et les panneaux varie légèrement entre les expériences, ce qui, à cette échelle de flux, entraîne une variabilité des résultats.

4.4.2. Le critère *combustibility*

Le critère *combustibility* est défini comme étant l'intensité de la combustion. Afin d'étudier ce critère, nous allons nous intéresser à deux phases de la combustion. La première phase est associée à la croissance du feu et nous examinerons plus particulièrement sa vitesse de croissance. La seconde phase correspond au régime établi de la combustion. Les paramètres qui nous permettront de décrire ces deux phases de combustion sont la puissance dégagée (HRR) et la vitesse de perte de masse moyenne du combustible (MLR). Le MLR est utilisé uniquement pour décrire la deuxième phase.

Phase de croissance du feu

Afin d'étudier la phase de croissance (HRR >10kW) des différents essais, nous avons approximé la courbe de HRR par une fonction du type (NFPA 72) (Figure 4-13) :

$$HRR_{ign} = \alpha \cdot t^2 \quad (4.7)$$

où α est appelé coefficient de croissance de la combustion.

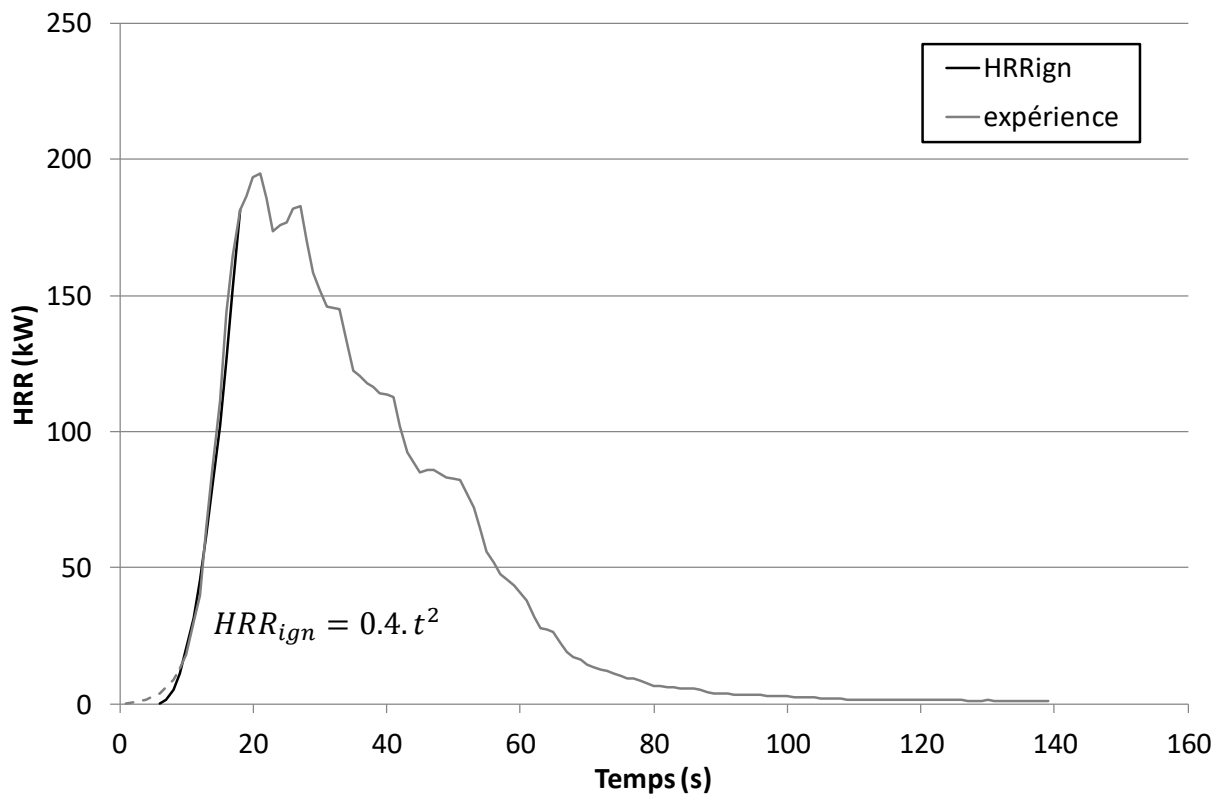


Figure 4-13 : HRR au cours du temps pour une expérience type et approximation du HRR (HRR_{ign}) associé lors de la phase de croissance du feu

L'analyse des différents essais nous a permis de distinguer trois types de combustion correspondant à différents intervalles de valeur pour α (Figure 4-14). Pour des valeurs de α faibles ($\alpha < 0.2$), la vitesse de propagation est lente et le feu se propage de proche en proche sans dynamique d'ensemble. Une vitesse de propagation intermédiaire peut être observée pour des valeurs moyennes de α ($0.2 < \alpha < 0.4$). La propagation se fait horizontalement depuis l'origine de l'allumage en bord de houppier jusqu'à atteindre l'extrémité opposée du houppier. Enfin, pour les fortes valeurs de α ($\alpha > 0.4$), la flamme se propage rapidement à l'intégralité du houppier horizontalement. Le feu se propage par la suite de manière verticale. Le comportement des cistes d'été n'est pas présenté ici car leurs caractéristiques phénologiques entraînent une dynamique de combustion très différente qui sera présentée par la suite.



Figure 4-14: Différents cas de combustion de cistes pour un temps de 30 secondes après l'allumage a) $\alpha < 0.2$; b) $0.2 < \alpha < 0.4$; c) $0.4 < \alpha$

Régime établi de combustion

Afin d'étudier le régime établi de combustion, l'évolution du HRR au cours du temps a été analysée pour chaque essai. Différentes dynamiques de combustions et pics de HRR ont été observés en fonction du coefficient de croissance à l'allumage (Figure 4-15). Le régime de combustion lente ($\alpha < 0.2$) a été obtenu pour 19% des expériences. Pour ce régime de combustion, les pics de HRR observés sont faibles ($\leq 100 \pm 5$ kW) avec le temps de combustion le plus long : 100 ± 14 s. Le régime de combustion intermédiaire, correspondant à 38% des essais, avec des pics de HRR moyens (188 ± 27 kW) et des temps de combustion de l'ordre de 77 ± 10 s, a été obtenu pour des α compris entre 0.2 et 0.4. Enfin, une combustion rapide avec des pics de HRR de l'ordre de 257 ± 63 kW et des temps de combustion courts de 60 ± 19 s a été obtenue pour 43% des expériences.

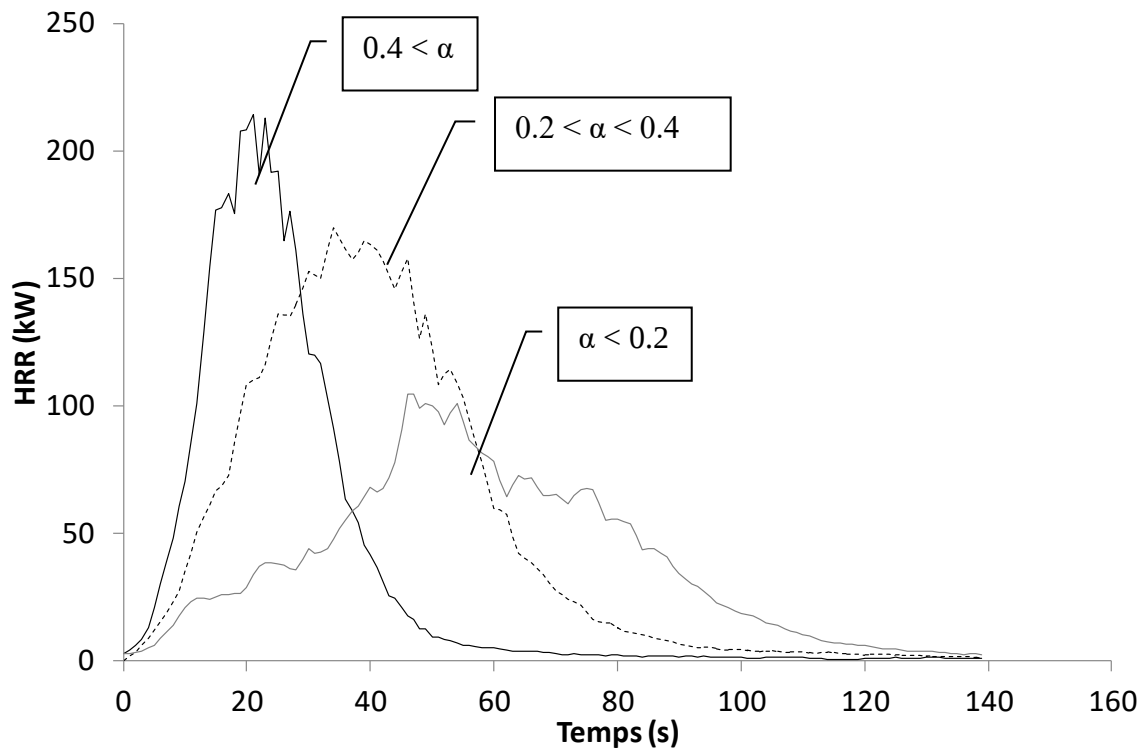


Figure 4-15 : HRR au cours du temps pour les trois régimes de combustibilité

Dans le but de comprendre la cause des différents régimes de combustion, une attention particulière a été portée à la zone d'allumage. Les essais ont alors montré un effet de la position d'allumage sur la dynamique de la combustion. Le coefficient de croissance à l'allumage dépend fortement de la quantité de combustible présente au-dessus de la zone d'allumage. Un allumage se produisant dans la couche supérieure du houppier, sans combustible au-dessus, conduit à un faible coefficient de croissance et à une combustibilité lente. Un allumage entre le milieu et le haut du houppier, avec une présence significative de combustible, entraîne un allumage plus intense et une combustibilité moyenne. Plus cette quantité de combustible est grande plus le coefficient de croissance est important. Enfin, lorsque l'allumage se produit en bas du houppier, le transfert de chaleur convectif, par le contact de la flamme avec le houppier, est responsable d'un coefficient de croissance de forte valeur, menant à une combustion rapide. Les différentes zones d'allumage sont présentées sur la Figure 4-16. Dans la suite du texte, un allumage se produisant dans la zone inférieure du houppier sera considéré comme *favorable* à la combustion, alors qu'un allumage ayant lieu dans sa partie supérieure sera dit *défavorable* à la combustion.



Figure 4-16 : Différentes positions d'allumages associés à des combustibilités différentes.

La dynamique de combustion des cistes d'été est traitée distinctement car la répartition de la masse des classes de particules est différente (pour une même masse d'arbuste) de celle obtenue lors des autres saisons. En effet, il a été mis en évidence dans ce chapitre que, pour une même masse d'arbuste, la masse de feuilles présentes dans un ciste l'été est deux tiers moindres que celle présente dans les cistes pour les autres saisons. Pour les cistes d'été cette masse "manquante" est partiellement compensée par la masse des fleurs. De ce fait, pour une zone d'allumage favorable, le coefficient de croissance est supérieur à 0.4 mais n'entraîne pas de combustion rapide faute de combustible. De plus, il doit être souligné que la présence de fleurs altère la dynamique de combustion. Les graines, tenues par des branches de faibles diamètres, s'enflamment et tombent incandescentes sur le sol, allumant dans leur chute la hauteur du ciste et pouvant transformer ainsi un allumage défavorable en allumage favorable (Figure 4-17b), ce qui n'est pas le cas pour les cistes prélevés lors des autres saisons (Figure 4-17a). Sur le terrain, les feuilles perdues par le houppier du ciste se retrouvent mortes sous celui-ci (Figure 4-11), formant une litière. Ainsi cette configuration peut entraîner sur le terrain des dynamiques de combustion rapides et puissantes. La chute de graines enflammées conduit à des feux de litières dont les flammes peuvent lécher les classes de particules présentes dans le ciste et/ou dans des cistes voisins.



Figure 4-17 : a) combustion du ciste d'hiver, b) combustion du ciste d'été

L'étude du lien entre le pic de MLR et le pic de HRR met également en évidence ce changement de dynamique (Figure 4-18). Nous observons que le pic de HRR est directement proportionnel au pic de MLR pour les cistes de printemps et d'automne et suit la même tendance nous permettant d'étudier la *combustibility* de ces deux saisons conjointement. Il doit être souligné que la pente de la courbe de tendance donne l'enthalpie effective de combustion qui est de ce fait équivalente pour les saisons d'automne et de printemps.

En ce qui concerne les cistes d'été, la Figure 4-18 révèle que cette enthalpie effective est moins importante et nous observons une plus forte variabilité des données ($R^2 \approx 0.76$). Les fleurs, en s'enflammant, tombent aléatoirement au sol ou sur la cellule de pesée sans que leur combustion totale ne soit systématiquement observée. Ce phénomène entraîne ainsi une plus grande variabilité dans les résultats de pic de MLR, se traduisant par un coefficient de corrélation bien inférieur à celui des autres saisons. De plus, la caractérisation présentée section 4.3.4 a mis en évidence une masse moins importante des feuilles dans les houppiers en été. L'enthalpie de combustion des feuilles est de 18841 kJ/kg et celles des brindilles est égale à 18217 kJ/kg. Ainsi, une plus grande quantité de brindilles participent l'été à la combustion pour une masse équivalente brûlée. L'enthalpie de combustion des brindilles étant plus faible que celle des feuilles, une plus grande consommation de brindilles entraîne une diminution de l'enthalpie effective de combustion. Finalement, il doit être signalé que le pic de MLR étudié comprend la perte de masse d'eau, ce qui diminue significativement la pente de la droite de tendance. L'enthalpie effective de combustion a été estimée, sur base sèche, à 17164 ± 1768 kJ/kg.

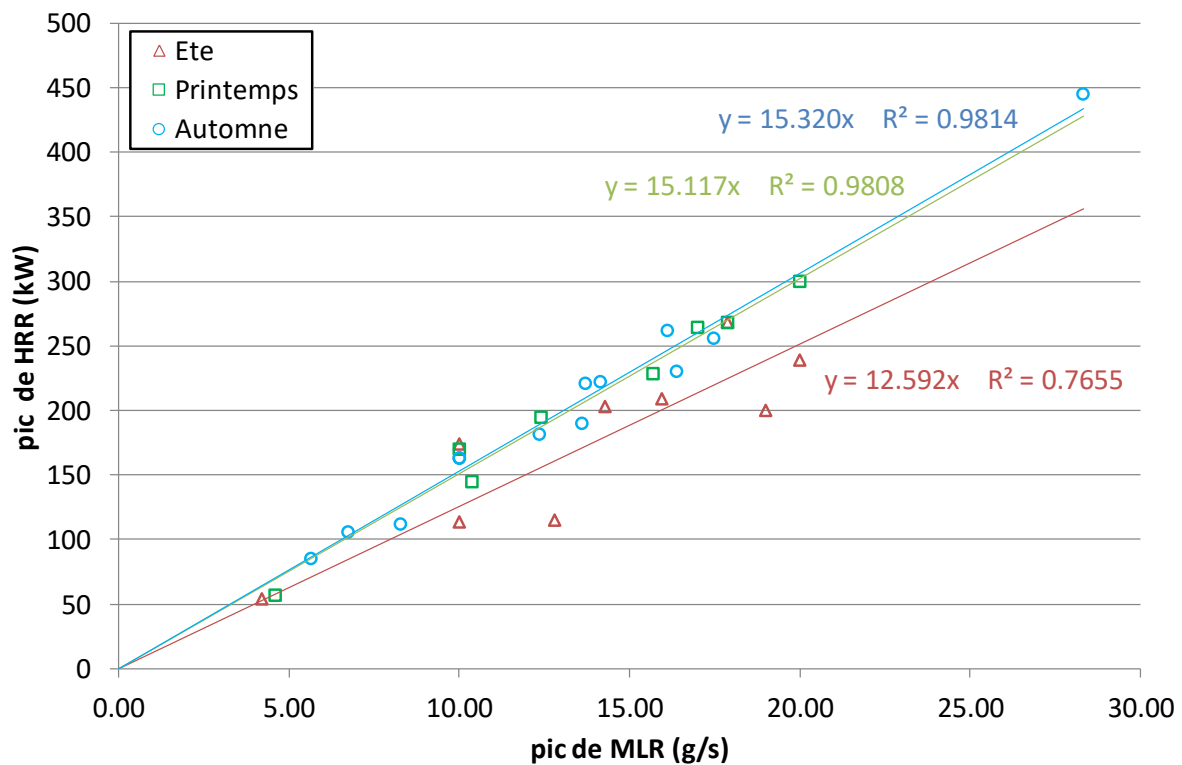


Figure 4-18 : Pic de MLR en fonction du pic de HRR pour différentes saisons associées à leur droite de tendances et coefficient de détermination R^2

Les expériences réalisées par Babrauskas et al. (2001 et 2006) sur les sapins douglas ont montrées une influence de la teneur en eau sur le pic de HRR et la chaleur effective de combustion. Cependant, la plage de variation de la teneur en eau étudiée par Babrauskas est bien plus importante (variation de 0 à 160 %) que dans notre cas (variation de 4 à 30 %). Pour des teneurs en eau inférieures à 30%, la variabilité des résultats est importante chez Babrauskas ce qui ne permet d'observer qu'une légère tendance. Afin de pouvoir vérifier ce phénomène, de plus grandes variations de teneurs en eau sont nécessaires. De plus, il a été observé par Li et al. (2016) que la position d'allumage influence le temps nécessaire à l'obtention du pic de MLR et la vitesse de propagation.

4.4.3. Le critère *sustainability*

Le critère *sustainability* est défini comme la façon dont le feu s'auto-entretient. Le paramètre étudié pour caractériser la *sustainability* est la durée de flamme t_f . La Figure 4-19 montre que la durée de flamme diminue avec l'augmentation du pic de HRR. Comme cela a été mis en évidence dans la section précédente (portant sur la *combustibility*), les durées de flammes semblent être directement liées à la valeur du pic de HRR. Des durées de flammes supérieures à 80 s et jusqu'à 120 s ont été obtenues pour des pics de HRR faibles (≤ 150 kW), tandis que les durées les plus courtes (près de 40 s) ont été obtenues pour des pics de HRR élevés (≥ 210 kW). Ce comportement peut être expliqué par la manière dont le feu se propage dans l'arbuste en fonction de la position d'allumage et du HRR. Le ciste étant asséché au voisinage des panneaux radiants, la position d'allumage joue un rôle crucial dans la dynamique de combustion. En effet, un allumage en partie haute du houppier entraîne un feu de faible puissance se propageant principalement de proche en proche (probablement plus par effet radiatif que convectif). De plus, celui-ci est stopper lorsqu'il rencontre une petite coupure de combustible. La propagation est lente et entraîne des temps de combustion importants. Un allumage au milieu de la hauteur du houppier favorise les échanges couplés convection/rayonnement entre la zone d'allumage et le combustible situé en son voisinage. La dessiccation du reste du ciste est donc plus rapide, ce qui entraîne une vitesse de propagation plus élevée et un temps de flamme plus court. Enfin, pour un allumage en partie basse, l'implication de la convection et du rayonnement entre la zone d'allumage et la végétation imbrulée située au-dessus est encore plus importante, ce qui entraîne une dessiccation d'autant plus forte avec des vitesses de propagation élevées et une durée de flamme courte. On peut donc dire que le critère *sustainability* est (dans le cas du dispositif expérimental considéré) intrinsèquement lié à la vitesse de perte de masse et au pic de HRR, et de ce fait à la *combustibility*. De plus, nous observons un décalage des tendances moyennes des durées de flamme avec les saisons (cf. Figure 4-19). La durée de flamme diminue pour une même puissance lorsqu'on passe de l'automne à l'été. Ce décalage peut être expliqué par la diminution des masses des classes de particules les plus fines participant à la combustion au printemps et en été.

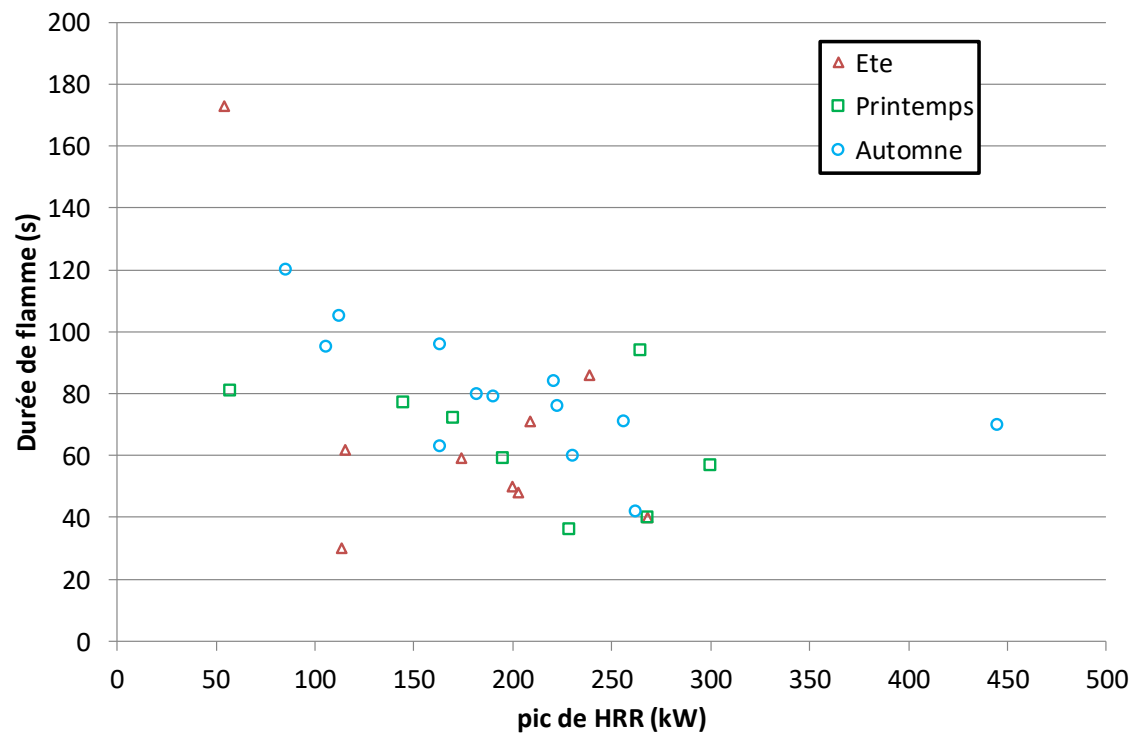


Figure 4-19 : Durée de flamme en fonction du pic de HRR

Dans cette étude, la *sustainability* est fortement influencée par les paramètres liés à la *combustibility* (pic de HRR, α , position d'allumage). La majorité des grandeurs identifiées comme ayant une influence (masse volumique, continuité, quantité, compacité, topologie du terrain et conditions météorologiques) (Martin et al. 1994) n'ont cependant pas pu être étudiées en raisons de leur trop grande variabilité durant les expériences. Il doit être toutefois noté que la teneur en eau ne semble pas avoir d'effet sur la durée de flamme pour la plage de variation étudiée.

4.4.4. Le critère *consumability*

Le critère *consumability* est caractérisé dans notre étude par la quantité de matière qui a été brûlée par rapport à la quantité présente initialement. Grâce à l'étude de dessiccation et à la caractérisation des arbustes réalisées dans les paragraphes 4.2 et 4.3, la masse totale sèche de chaque ciste a été évaluée à partir de la teneur en eau des feuilles et de la masse humide initiale des arbustes. Une première grandeur utilisée pour étudier la *consumability* est le taux de consommation, noté η . Elle est définie par :

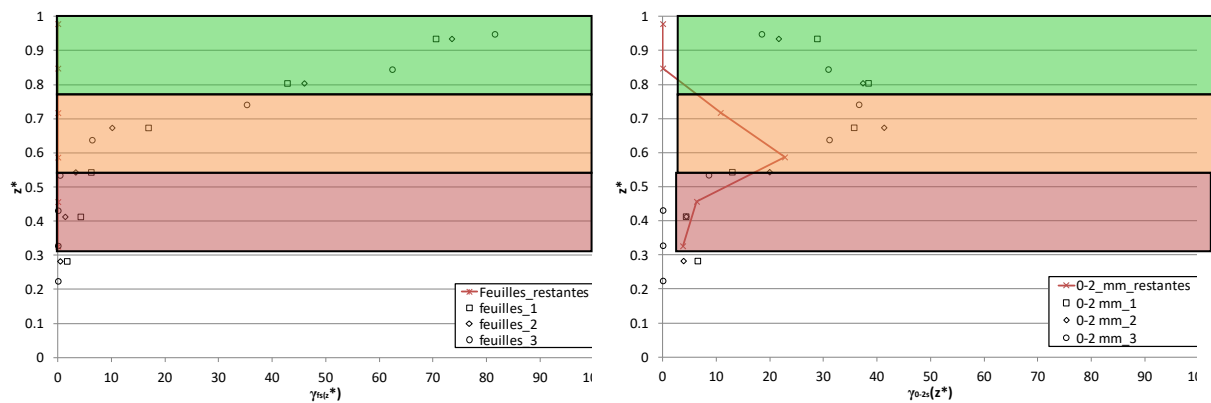
$$\eta = 1 - \frac{m_{sr}}{m_s} \quad (4.8)$$

où m_{sr} est la masse sèche de combustible restant après l'essai. Dans le but d'affiner cette étude, nous avons également caractérisé trois cistes après brulage en suivant la méthode présentée au chapitre 2 (section 2.1.2). Cette caractérisation nous a permis d'estimer les fractions massiques résiduelles $\gamma_{ks}^r(z)$ des classes de particules sèche k . $\gamma_{ks}^r(z)$ est définie par:

$$\gamma_{ks}^r(z) = \frac{m_{ks}^r(z)}{m_s(z)} \quad (4.9)$$

où $m_{ks}^r(z)$ représente la masse résiduelle de particules de la classe k située entre $z - \frac{\delta}{2}$ et $z + \frac{\delta}{2}$ avec $\delta = 15 \text{ cm}$.

Les résultats de la caractérisation fine réalisée pour ces trois individus sont d'abord présentés, suivi d'une synthèse associée à l'ensemble des expériences mentionnées dans le Tableau 4-6. Afin de ne pas surcharger cette partie, nous fournissons uniquement les graphiques correspondant à la caractérisation d'un ciste (cf. Figure 20). Pour ce premier ciste, la combustion a été la plus intense et le combustible a été consommé à 42%. Le houppier a été intégralement brûlé ainsi que les classes de particules inférieures à 6 mm présentes dans la partie intermédiaire. Pour le second ciste caractérisé, la masse consommée représente 36% de la masse sèche totale. Dans ce cas, l'intégralité du houppier a été consommée, comprenant des particules de la classe 2-4 mm, ainsi que la partie supérieure de la zone intermédiaire (hors classes de diamètres supérieurs à 4 mm). Le troisième ciste présente une consommation de 27%. Pour ce dernier, seule la partie supérieure du houppier a été consommée. Le combustible brûlé n'est composé que de feuilles et de brindilles.



Comportement au feu d'un buisson

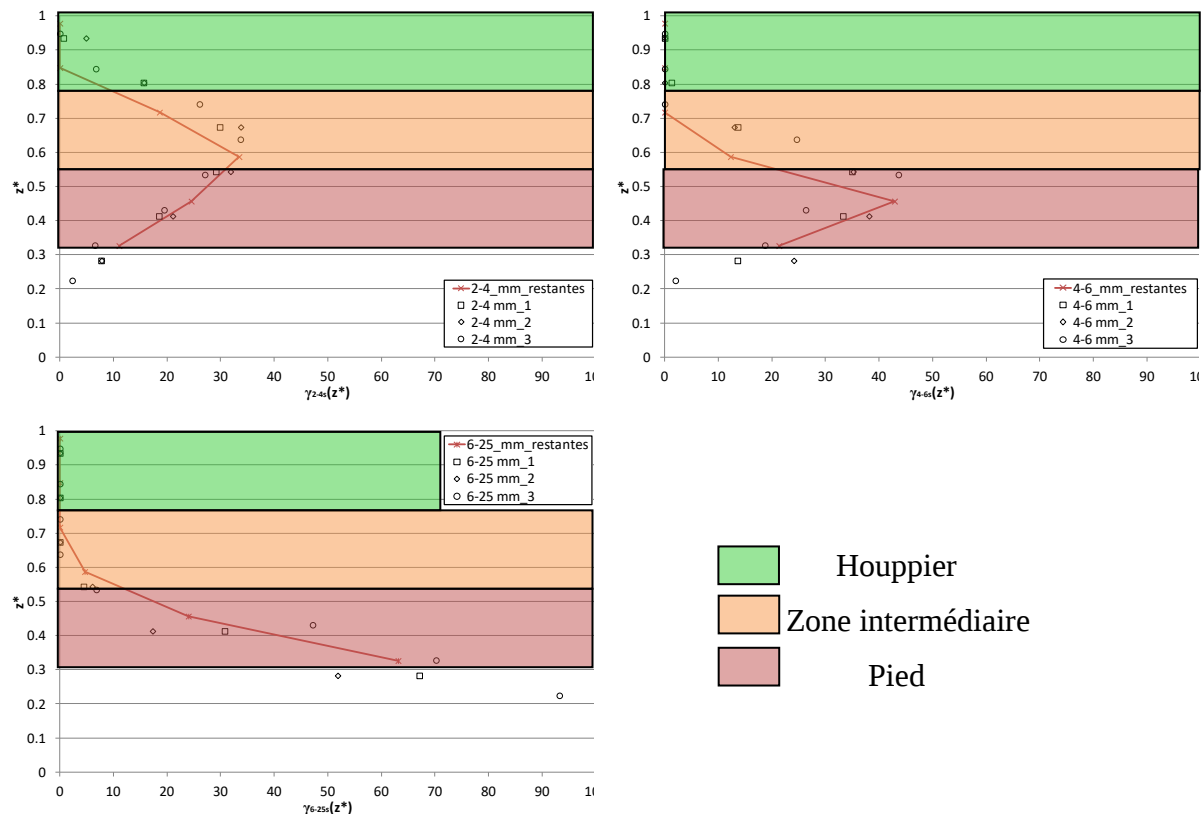


Figure 4-20 : Fractions massiques initiales et résiduelles des classes de particules en fonction de la hauteur adimensionnée z^*

Les résultats des taux de consommation sont synthétisés dans la Figure 4-21 en fonction de la teneur en eau pour l'ensemble des expériences réalisées. La masse moyenne consommée dans les expériences est de 0.52 ± 0.20 kg, ce qui représente $21 \pm 6\%$ de la masse moyenne d'un ciste. Cette masse consommée est composée principalement de fines particules situées dans le houppier qui lui-même représente 33% de la masse sèche du ciste. Les résultats présentés sur la Figure 4-21 suggèrent une diminution de combustible consommé avec l'augmentation de la teneur en eau des feuilles pour les cistes d'automne. En ce qui concerne les cistes d'été, la faible quantité de particules combustibles présentes dans le ciste ne permet pas d'observer de relation entre la fraction massique consommée et la teneur en eau des feuilles. La caractérisation de la végétation a révélé que les feuilles et rameaux de diamètre inférieur à 2 mm dans le houppier représentent respectivement 18% et 15% de la masse totale du ciste d'automne. Par conséquent, après observation des cistes brûlés, nous pouvons affirmer que pour nos expériences, une fraction massique consommée inférieure à 18% induit qu'une partie des feuilles présentes dans le houppier a brûlé et que le feu ne s'est pas répandu au reste du houppier. Pour une fraction massique brûlée comprise entre 18 et 33%, les mesures ont montré que toutes les feuilles et une partie des particules de 0-2 mm dans le houppier ont été consommées. Finalement, une fraction

massique brûlée supérieure à 33% indique une consommation totale du houppier et d'une partie des classes de particules de diamètre comprise entre 0 à 6 mm dans la zone intermédiaire du ciste (principalement des 0-2 mm et 2-4 mm). Il doit être souligné que les cistes ont été brûlés humides sans mesure possible de la masse sèche initiale. Celle-ci a donc été estimée à partir de la masse humide, des teneurs en eau des feuilles et 0-2 mm et de la distribution de chaque classe de particules (cf. annexe A2). De ce fait, l'incertitude liée à l'estimation de la masse sèche (présentée section 4.3.1) affecte directement le calcul de la fraction massique consommée.

Les résultats ont permis de distinguer trois régimes pour le critère de *consumability*: un régime de *consumability* faible pour lequel seule une partie des feuilles présente dans le houppier a été brûlée, un régime de *consumability* moyen, pour lequel les feuilles présentes dans le houppier ainsi qu'une partie des brindilles de diamètre compris entre 0 et 2 mm ont été consommées et un régime de *consumability* fort, avec un houppier totalement brûlé ainsi que des particules de plus gros diamètre comprises dans la zone supérieure de la partie intermédiaire des cistes.

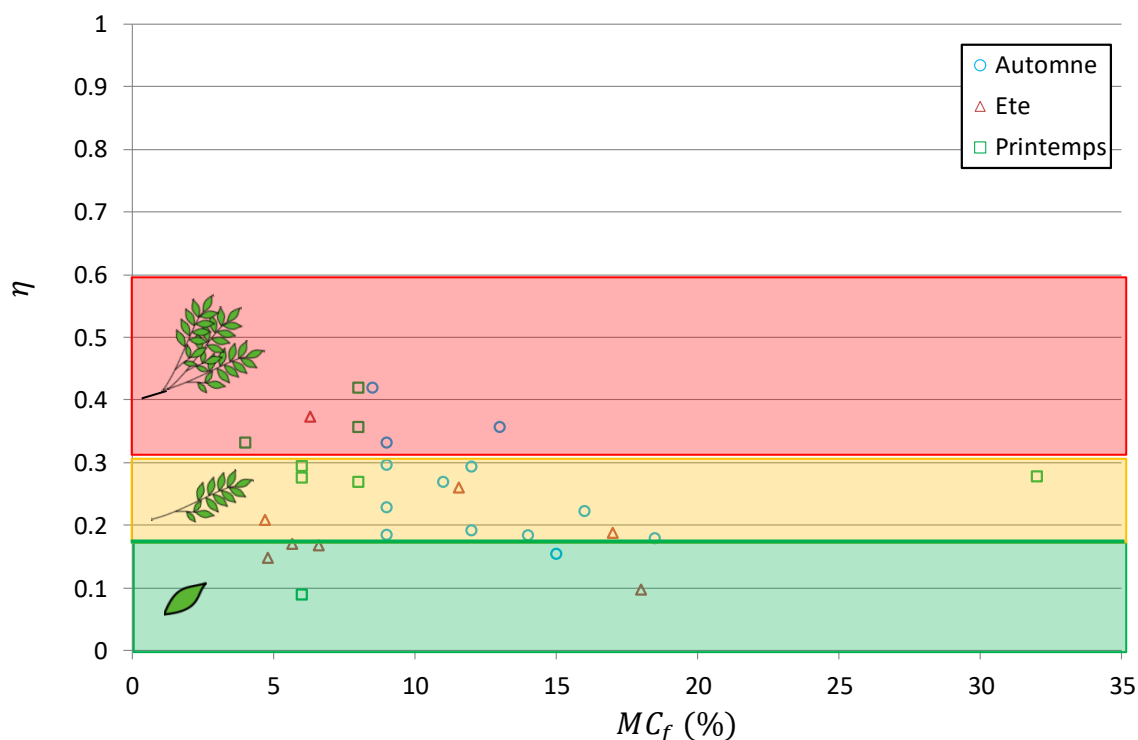


Figure 4-21 : Fraction massique brûlée en fonction de la teneur en eau des feuilles

Santana et Marrs (2004) ont montré une influence de la teneur en eau sur la consommation de combustible. Celle-ci diminue lorsque la teneur en eau augmente. Ce phénomène a pu être observé plus particulièrement sur les cistes d'automne. De plus, les particules de grands

diamètres ont été peu impliquées dans la combustion des cistes, ce qui a pu être observé par Li et al. (2016) et Burrows (2001).

4.4.5. Etude statistique de la réaction au feu des cistes

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les paramètres présentés ci-dessus afin de mettre en évidence différents types de comportement au feu. Les résultats sont présentés dans la Figure 4-22. Les paramètres mesurés pour les cistes d'été n'ont pas été inclus dans cette analyse car ces derniers présentent une structure trop différente de celle des cistes prélevés au cours des autres saisons. En effet, la composition des arbustes, a un fort impact sur les paramètres étudiés ce qui conduit à exclure les cistes d'été de cette analyse. Les différents paramètres associés aux quatre critères étudiés (position d'allumage, durée de flamme, pic de HRR, pic de MLR, coefficient de croissance et fraction massique brûlée) ont été utilisés. Les résultats ont permis d'extraire trois composantes principales, expliquant 87 % de la variance totale. La composante principale (CP 1) explique 54 % de la variance tandis que les deux autres composantes expliquent respectivement 19 % (CP 2) et 14 % (CP 3) de la variance.

Nous observons que les paramètres ont une influence positive (flèche vers la droite) sur la composante 1 excepté la durée de flamme (flèche vers la gauche). En ce qui concerne la composante 2, le pic de HRR, de MLR, le taux de consommation et la durée de flamme ont un effet positif à contrario du coefficient de croissance à l'allumage et de la position d'allumage. Enfin, la composante 3 est négativement influencée par le pic de HRR et de MLR alors que les autres paramètres ont une influence positive. De plus nous observons que les paramètres liés à la *combustibility* et à la *sustainability* contribuent principalement à la composante 1 alors que la position d'allumage contribue à la seconde composante. La *consumability* participe majoritairement à la composante 3.

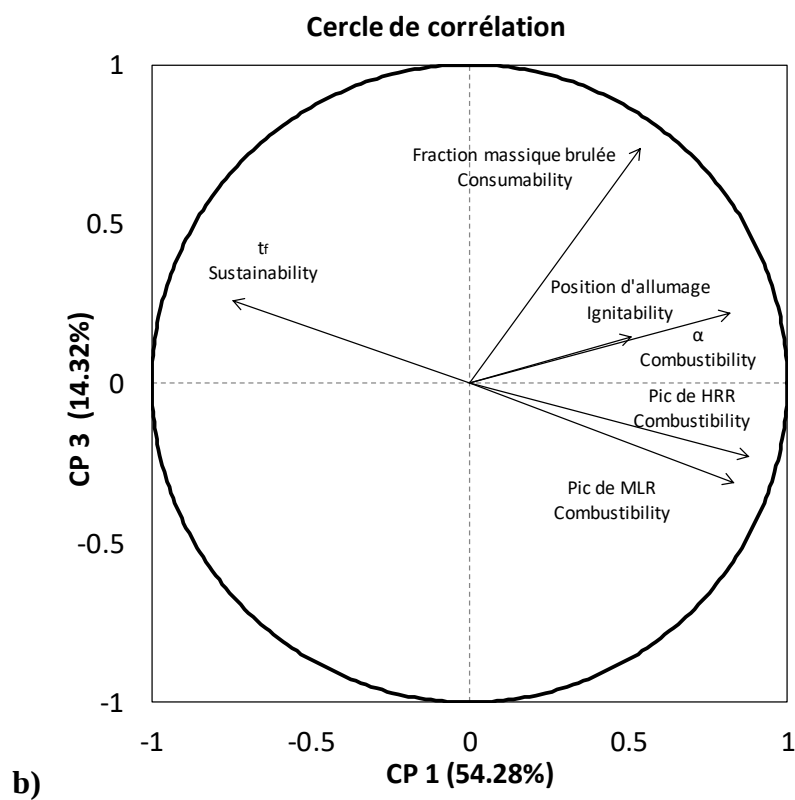
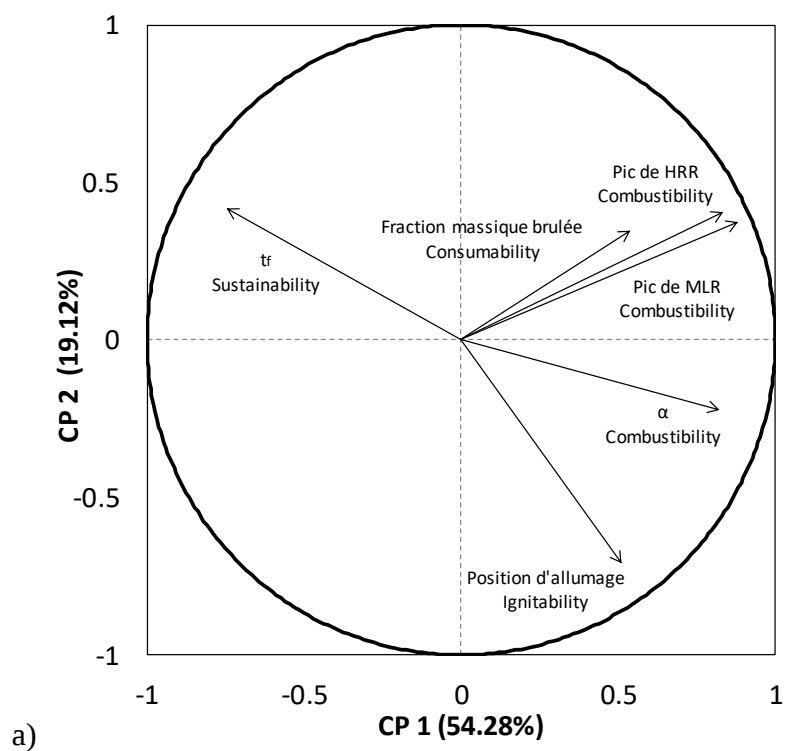


Figure 4-22 : paramètres de réaction au feu dans le plan des composantes principales : a) 1 et 2 b) 1 et 3

Afin d'observer les corrélations possibles entre les paramètres, nous nous sommes intéressés aux deux composantes principales expliquant le plus grand pourcentage de la variance, soit CP1 et CP2 (74% au total). Les angles entre chaque projection des vecteurs (paramètres) sur ces composantes ont été calculés. Le taux de consommation a un faible poids sur les composantes CP1 et CP2, ce qui ne nous permet pas d'analyser ce paramètre. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 4-7. Une colinéarité des vecteurs suggère une forte corrélation entre ceux-ci. Ainsi, pour des angles proches de 0° ou de 180° , les deux paramètres étudiés sont proportionnels ou inversement proportionnels. A contrario, aucune corrélation n'est à relever pour des valeurs d'angle de 90° . Plusieurs corrélations peuvent être observées. La corrélation déjà connue entre les pics de HRR et de MLR est confirmée. La durée de flamme et le coefficient de croissance à l'allumage sont inversement corrélés, traduisant une diminution de la durée de flamme avec l'augmentation de α . Nous notons également une corrélation inverse entre la position d'allumage et la durée de flamme, suggérant une diminution de la durée de flamme lorsque la position d'allumage se déplace vers le bas du houppier. Des corrélations moins fortes sont observables entre α et la position d'allumage ainsi qu'entre α et les pics de MLR et de HRR, (comme il a pu être observé dans la section précédente). Une corrélation inverse moins forte apparaît également entre la durée de flamme et les pics de MLR et de HRR. La position d'allumage et les pics de HRR et de MLR ne semble cependant pas corrélés entre eux.

Tableau 4-7: plan (CP1,CP2)

	t_{fl}	Pic de HRR	Pic de MLR	α	Position allumage
t_{fl}		128	125	166	-155
Pic de HRR			-3	38	77
Pic de MLR				41	80
α					39
Position allumage					

Afin de compléter ces observations, les projections des vecteurs sur les composantes CP1 et CP3 ont également été analysées. Dans le plan (CP1, CP3), nous confirmons que la durée de flamme et les pics de HRR et de MLR sont inversement corrélés, ce qui induit une diminution de la durée de flamme avec l'augmentation des pics de HRR et de MLR. Ainsi il apparaît que la *sustainability* (durée de flamme) soit inversement proportionnelle à la *combustibility* (α , pic de HRR et pic de MLR). La *consummability* (taux de consommation η) ne semble pas être lié

aux autres paramètres étudiés, ce qui suggère que d'autres facteurs, comme la teneur en eau (non prise en compte dans cette ACP) des différentes classes de particules par exemple, sont impliqués dans les variations de η (cf. Figure 4-21).

La projection des expériences de combustion sur la carte factorielle dans le plan (CP 1, CP 2) met en évidence quatre types de comportement au feu ainsi que leurs centres de gravité représentés par une forme pleine (Figure 4-23).

Le premier groupe (cercles) correspond à une **faible réaction au feu** (*flamability* faible) avec $\alpha < 0,2$, un faible pic de HRR ($83,9 \pm 20$ kW) pour une très longue durée de flamme (100 ± 14 s) et une faible masse brûlée ($18,9 \pm 3,0\%$) impliquant principalement les feuilles et les 0-2 mm. Le deuxième groupe (carrés) correspond à une **réaction au feu moyenne** (*flamability* moyenne), correspondant à une valeur de α comprise entre 0,2 et 0,4, un pic moyen de HRR (188 ± 27 kW), un long temps de flamme (77 ± 10 s) et une consommation modérée de combustible ($23 \pm 5\%$) incluant les feuilles et une part plus importante de particules de diamètre jusqu'à 2 mm. Une **réaction au feu forte et rapide** (*flamability* forte et rapide) est associée au troisième groupe (diamants), caractérisé par α supérieur à 0,4, un pic élevé de HRR (228 ± 15 kW), une période de flamme de courte durée (44 ± 9 s) et une consommation de combustible modérée ($25 \pm 6\%$) impliquant les mêmes classes de particules que la réaction au feu moyenne. Enfin, le quatrième groupe (triangles) est caractérisé par une **réaction au feu forte et consommatrice** (*flamability* forte et consommatrice) avec α supérieur à 0,4, un pic HRR très élevé (384 ± 99 kW), une longue durée de flamme (70 ± 14 s) et une importante consommation de combustible ($32 \pm 4\%$). On note aussi dans ce groupe que les particules de diamètre supérieur à 4 mm sont impliquées dans la combustion alors que pour les autres groupes, les particules les plus grosses participant à la combustion avaient un diamètre de 2 mm.

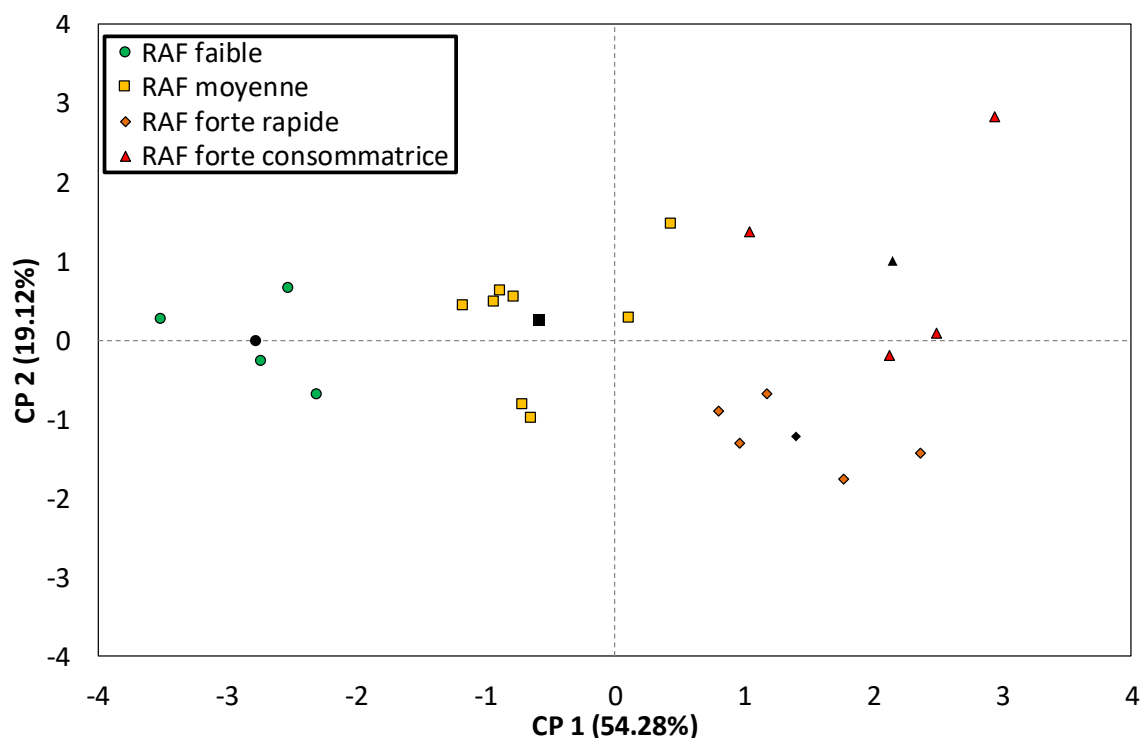


Figure 4-23 : Graphe des individus dans le plan principal associé aux types de réaction au feu

Les différents types de réaction au feu peuvent être expliqués par différentes raisons (Figure 4-24) : la position et le temps d'allumage ainsi que la répartition spatiale des particules fines dans le houppier. Un allumage favorable (voir la section *combustibility*) entraîne une réaction au feu forte, alors qu'un allumage défavorable provoque une réaction au feu faible ou moyenne. Dans le cas des réactions au feu fortes, la différence entre la « réaction au feu forte et rapide » et la « réaction au feu forte et consommatrice » est causée par des temps d'allumage long ou des cas de doubles allumages sur les deux faces des cistes exposés aux panneaux radiants. Pour de longs temps d'allumage, la teneur en eau des différentes classes de particules est considérablement réduite au moment de l'allumage, ce qui entraîne une consommation élevée de combustible, incluant les classes de particules d'un diamètre supérieur à 4 mm. Pour des temps d'allumages plus courts (réaction au feu forte et rapide), les particules de diamètres importants (supérieur à 4 mm) ne reçoivent pas suffisamment de chaleur pour provoquer l'évaporation totale de l'eau et leur combustion. La différenciation des réactions faible et moyenne est due à la structure de la végétation. Dans ce cas, la structure du ciste est atypique par rapport aux autres échantillons. En effet, l'étude de la masse volumique apparente (cf. annexe C) a mis en évidence une plus faible masse volumique apparente de feuilles pour les faibles réactions au feu ($0.9 \pm 0.2 \text{ kg/m}^3$) que pour les réactions au feu moyennes ($1.4 \pm 0.3 \text{ kg/m}^3$). En effet, bien qu'un modèle de ciste ait été défini, les premières campagnes de test

comprenaient des échantillons avec une masse volumique apparente inférieure des particules fines dans le houppier. La réaction au feu faible a donc été obtenue pour ce type d'arbuste. La réduction de la quantité de particules participant activement à la combustion entraîne une diminution de la puissance libérée, ce qui limite la propagation du feu dans l'arbuste.

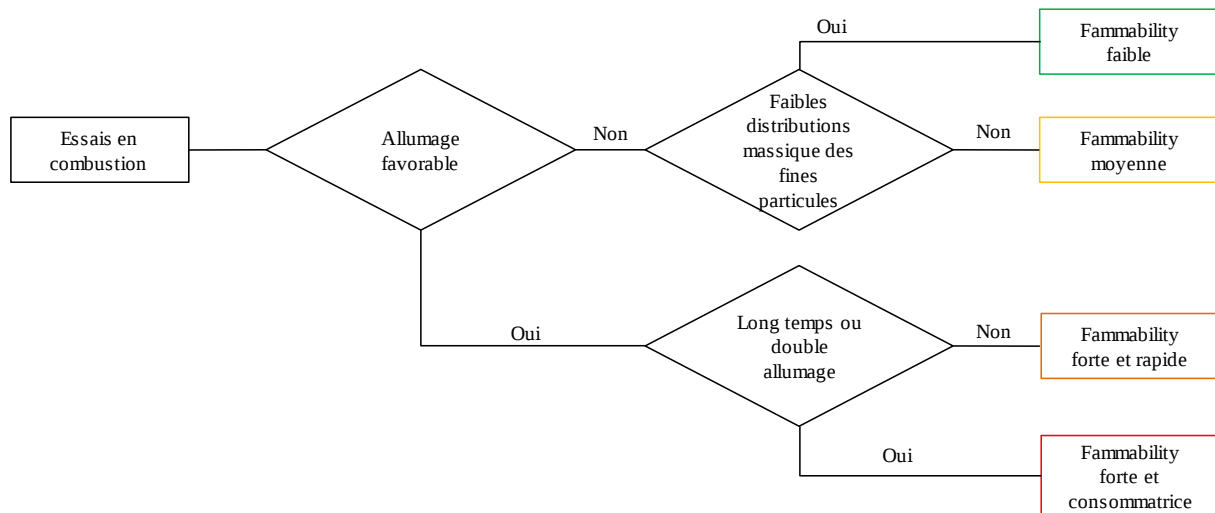


Figure 4-24 : Les différents types de réaction au feu (*flammability*) pour un ciste

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement au feu d'arbustes naturels (végétation non reconstituée). Pour cela, nous avons tout d'abord caractérisé plusieurs arbustes afin de déterminer leur structure en fonction des différentes tailles de particules qui les composent. Cette caractérisation est indispensable pour tenter de comprendre comment ils brûlent. Nous avons ensuite analysé leur réaction au feu à l'aide de différents critères (*ignitability*, *sustainability*, *combustibility* et *consumability*) auxquels nous avons associé des paramètres mesurables. Cette approche nous a permis de distinguer plusieurs régimes de combustion et de qualifier ainsi la réaction au feu de ces arbustes (*flammability*). Enfin, nous avons également déterminé les tailles de particules ayant participé à la combustion par une caractérisation des arbustes après brûlage. Les principales contributions de ce chapitre sont les suivantes.

Nous avons tout d'abord pu vérifier que, comme observé dans la littérature, la teneur en eau initiale des particules végétales a une influence sur la durée d'allumage et la consommation du combustible. Le temps d'allumage augmente avec la teneur en eau des feuilles. La masse brûlée

des cistes diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. Cependant l'influence de la teneur en eau sur le HRR n'a pas été observée.

Nous avons mis en évidence quatre types de réaction au feu à partir d'une étude statistique des paramètres étudiés. Les réactions au feu faible et moyenne sont dues à un allumage défavorable située dans la partie supérieure du houppier (faible quantité de combustible présente au-dessus de la zone d'allumage), ce qui entraîne :

- un pic de HRR et une consommation de masse faibles associés à un temps de flamme très long pour la réaction au feu faible
- un pic de HRR et une consommation de masse modérés avec des temps de flammes long pour la réaction au feu moyenne

Les réactions hautes sont obtenues pour un allumage favorable situé dans la partie inférieure du houppier (quantité notable de combustible présente au-dessus de la zone d'allumage. Il s'en suit :

- des pics de HRR et une consommation de masse modérés avec des temps de flammes courts pour la réaction au feu forte et rapide
- des pics de HRR et une consommation de masse élevés associés à des temps de flamme long pour la réaction au feu forte et consommatrice (cas des doubles allumages et des allumages après un temps d'exposition aux panneaux radiants long)

Par ailleurs, l'ACP a identifié deux composantes principales associées aux critères de réaction au feu. De plus, elle a également mis en évidence le lien entre la *combustibility* et la *sustainability*.

Chapitre 5. Simulation de la combustion d'un arbuste avec WFDS. Confrontation modèle-expérience

5.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons caractérisé la structure végétale de différents cistes. Ce travail a mis en évidence une répartition massique similaire des différentes classes de particules pour des cistes de géométries proches. Ces résultats nous ont permis de réaliser un modèle numérique de ciste qui est présenté dans la première partie de ce chapitre. La seconde partie de ce chapitre a pour but d'étudier numériquement la réaction au feu des cistes et de confronter les prédictions du modèle WFDS aux précédents résultats expérimentaux. Les différents critères de *combustibility*, de *consumability* et de *sustainability* seront les principaux supports de cette comparaison. En dernière partie de ce chapitre, nous proposons une analyse de sensibilité de WFDS aux différents paramètres de ses principaux sous modèles afin de mieux cerner l'influence des données d'entrée sur les prédictions de ce code de calcul.

5.2. Simulation de la combustion d'un arbuste avec WFDS

5.2.1. Modèle numérique de buisson

Afin de comparer les résultats obtenus expérimentalement avec les prédictions du code WFDS, une représentation numérique du combustible est nécessaire. Les résultats de caractérisation obtenus dans le chapitre précédent ont été utilisés pour modéliser le ciste. WFDS permettant l'utilisation de plusieurs classes de particules, le ciste de référence a été modélisé comme la juxtaposition de six arbustes composés chacun d'une des classes de particules suivantes : les feuilles, les brindilles mortes d'épaisseur 0-2 mm et les brindilles vivantes d'épaisseur 0-2 mm, 2-4 mm, 4-6 mm et 6-25 mm.

Les résultats de la caractérisation (chapitre 4, section 4.3) fournissent une source de données fiables (masse volumique apparente et distribution pour chaque classe de particule) pour réaliser

une modélisation fidèle d'un ciste. Toutefois, il convient de remarquer qu'une géométrie cartésienne comme celle de la Figure 5-1, qui aurait l'avantage de s'appuyer sur la grille utilisée lors de la caractérisation (Figure 2-3), ne correspondrait pas à la forme réelle du ciste et nous conduirait à sous-estimer la masse volumique apparente de l'arbuste aux bords. De plus, il a été souligné (chapitre 4, section 4.3.2) que la taille de maille utilisée est trop grossière (15 cm pour un diamètre maximum de 60 cm) pour pouvoir observer une variation radiale de la masse volumique apparente. Celle-ci a donc été évaluée à partir des masses totales par étage des différentes classes de particules et de leurs volumes associés.



Figure 5-1 : Géométrie cartésienne peu adaptée à la modélisation du ciste a) vue de cote b) vue de dessus

Un modèle numérique plus réaliste de cistes a été proposé (Figure 5-2). Il est formé d'un assemblage de cônes tronqués (défini comme *frustum* dans WFDS), pour représenter au mieux la forme du ciste. La hauteur des cônes est de 0.15 m conformément au maillage ayant servi à la caractérisation. Les cônes sont ensuite construits de façon à ce que le modèle numérique (cf. **Tableau 5-1**) épouse au mieux l'enveloppe moyenne du gabarit défini pour les cistes.



Figure 5-2 : Enveloppe du modèle numérique de ciste

Tableau 5-1 : Dimensions et masses des classes de particules associées à chaque étage pour un ciste moyen de 1.5 kg

	Diamètre inférieur (m)	Diamètre supérieur (m)	Masse feuilles (g)	Masse 0-2 mm mort (g)	Masse 0-2 mm vivant (g)	Masse 2-4 mm (g)	Masse 4-6 mm (g)	Masse 6-25 mm (g)
Etagé 1	0,6	0,56	147,9	0,0	60,4	1,4	0,0	0,0
Etagé 2	0,6	0,6	123,7	5,7	110,8	45,1	3,6	0,0
Etagé 3	0,52	0,6	45,6	10,8	96,5	80,8	36,9	0,0
Etagé 4	0,46	0,52	15,7	31,6	33,0	74,3	89,3	11,3
Etagé 5	0,42	0,46	10,3	22,1	10,5	45,4	81,7	75,5
Etagé 6	0,4	0,42	3,8	7,9	14,9	17,7	31,2	154,4

Les volumes de ces frustrum de cône ont été calculés afin d'obtenir la masse volumique apparente de chaque classe de particules à chaque étage telle que :

$$\rho_{bk}(i) = \frac{m_{ks}(i)}{V(i)} \quad (5.1)$$

avec $\rho_{bk}(i)$, la masse volumique apparente de la classe de particule k à l'étage i et $V(i)$ le volume du cône tronqué à l'étage i . Les masses volumiques apparentes sont présentées dans le Tableau 5-2 ci-dessous:

Tableau 5-2 : Volume des frustrum et masses volumiques apparentes des classes de particules suivant la hauteur

	Volume	Feuilles	0-2 mm mort	0-2 mm vivant	2-4 mm	4-6 mm	6-25 mm
	(m ³)	(kg.m ⁻³)	(kg.m ⁻³)	(kg.m ⁻³)	(kg.m ⁻³)	(kg.m ⁻³)	(kg.m ⁻³)
Etage 1	0.037	3.99	0	1.63	0.04	0	0
Etage 2	0.045	2.73	0.13	2.45	0.99	0.08	0
Etage 3	0.034	1.32	0.31	2.79	2.34	1.07	0
Etage 4	0.030	0.52	1.05	1.09	2.46	2.95	0.37
Etage 5	0.021	0.48	1.04	0.49	2.13	3.83	3.54
Etage 6	0.013	0.30	0.37	1.18	1.41	2.48	12.27

Les propriétés des classes de particules nécessaires aux simulations sont présentées dans le (Tableau 5-3). Il s'agit du rapport surface-volume σ_e , de la masse volumique ρ_e de la fraction de résidus charbonneux χ_{char} et de la fraction de cendre dans les chars χ_{ash} . WFDS requiert en entrée la masse volumique et la masse volumique apparente pour chaque classe de particules. Cette dernière est déduite du Tableau 5-2.

Tableau 5-3 : Propriétés des classes de particules composant les cistes

	Feuilles	Branches			
		0-2 mm	2-4 mm	4-6 mm	6-25 mm
$\sigma_e (m^{-1})$	2081	1733	1000	666	400
$\rho_e (kg/m^3)$	478		961		
χ_{char}			0.3		
χ_{ash}			0.13		

5.2.2. Simulation de la combustion de cistes secs avec WFDS

Il doit être souligné que ce cas ne correspond pas à une réalité expérimentale. Ce premier cas « simple », avec omission volontaire de l'eau, est utilisé comme référence dans le but de vérifier si le ciste s'enflamme suite à la dégradation causée par la chauffe des panneaux radiants. Le cas de la combustion du ciste humide sera présenté dans la section suivante (5.2.3). Les paramètres des lois de dessiccation, de dégradation et de combustion des résidus charbonneux sont donnés dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Paramètres d'entrée des propriétés thermo-physiques requises par WFDS

Symboles	Valeurs	Sources
ρ_b (kg/m^3)	Voir Tableau 5-2	
Δh_{vap} (kJ/kg)	2259	
$A_{H_2O}(\sqrt{K}/s)$	600000	Grishin (1992)
E_{H_2O} (K)	5800	Grishin (1992)
Δh_{pyr} (kJ/kg)	418	Morvan et Dupuy (2001)
$A_{pyr}(1/s)$	36300	Grishin (1992)
E_{pyr} (K)	7250	Grishin (1992)
Δh_{char} (kJ/kg)	-32740	Dahale et al. (2013)
$A_{char}(m/s)$	215	Perez-Ramirez (2017)
E_{char} (K)	9000	Grishin (1992)
$\nu_{O_2, char}$	1.65	Porterie et al. (2005)
β_{char}	0.2	Porterie et al. (2005)
F_{CD}	3/8	Mell et al. (2009)
χ_{rad}	0.27	Valeur calculée (cf. Annexe D1)

Le domaine du LSHR comprenant le système d'extraction et les ensembles de panneaux radiants ont été modélisés afin de reproduire les conditions identiques à celles de l'expérience (Figure 5-3). Le ciste numérique présenté précédemment a été placé devant les ensembles de panneaux radiants chauffé à 520 °C. Un calcul préalable effectué sans ciste avec les panneaux radiants nous a permis de vérifier que l'ensemble chauffant produit une densité de flux thermique comparable à celle mesurée expérimentalement à une distance de 1 m des panneaux. En effet, nous avons relevé 1.79 ± 0.2 kW/m² expérimentalement et WFDS prédit une densité de flux semblable de 1.78 kW/m². Ce calcul préliminaire a été couplé à une analyse de sensibilité de l'écoulement non réactif présentée en Annexe D2. La taille de maille nécessaire à la bonne représentation de la combustion a par la suite été estimée à partir des données de HRR expérimental (cf. Annexe D3). Nous avons établi qu'une taille de maille de 2 cm dans la zone de combustion (arbuste et flamme située au-dessus) et une taille de 4 cm en dehors constituait un maillage approprié.

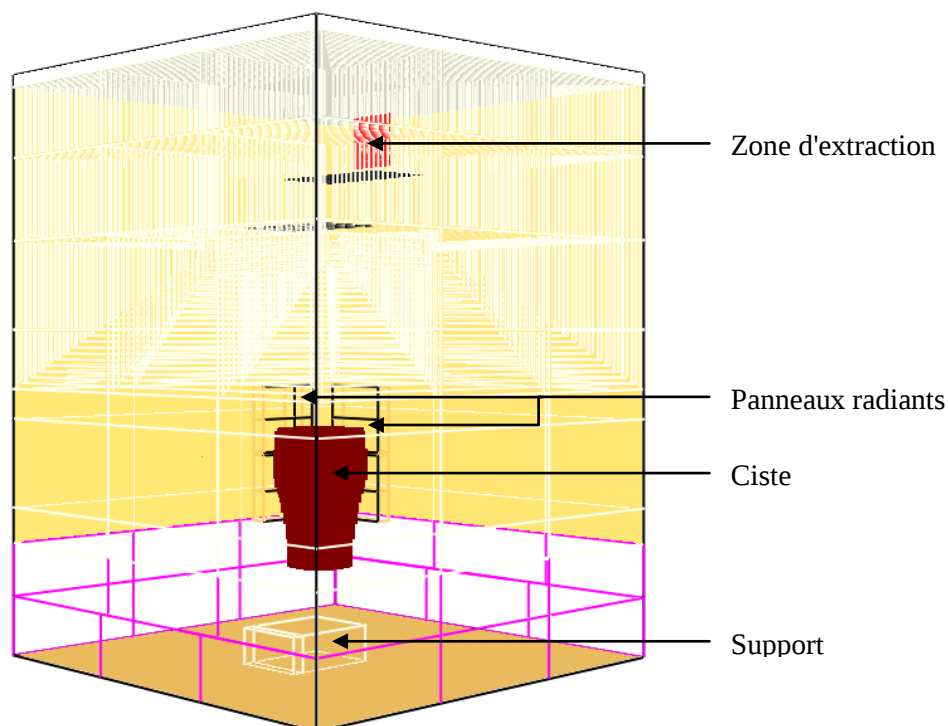


Figure 5-3 : domaine de calcul associé aux expériences de brûlage de ciste

Dans ces conditions de simulation, un auto-allumage a été obtenu numériquement. Cependant, la puissance dégagée lors de l'allumage n'est pas assez élevée pour maintenir la propagation de la flamme dans l'ensemble de l'arbuste dans le houppier (voir courbe bleue Figure 5-4).

De ce fait, un allumage piloté a dû être utilisé pour pouvoir observer la combustion. L'allumage a été réalisé numériquement (de façon analogue à l'allumage réalisé dans le chapitre 3) par l'intermédiaire de particules chauffées à 1000 °C dont les propriétés physiques sont les mêmes que celle des brindilles de diamètre 2 mm. La taille de l'allumeur a été fixée à 10×20×20 cm³ sur une durée de 15 s. L'allumage a été réalisé en partie basse du houppier après un temps de chauffe de 200 s correspondant au temps où la température des particules du buisson ne varie plus.

Avec cet allumage en partie basse, les prédictions du code de calcul sont discutées vis-à-vis des résultats expérimentaux pour des cas de réaction au feu « forte et consommatrice » (cf. Figure 5-4). Le coefficient de croissance α à l'allumage issu du traitement de la courbe de HRR prédit est proche ($\alpha = 0.42 \text{ kW.s}^{-2}$) des valeurs obtenues pour la *flammability* forte au chapitre précédent ($\alpha > 0.4$). Le pic de HRR prédit (421 kW) est plus important que la valeur moyenne du pic de HRR obtenu expérimentalement ($284 \pm 99 \text{ kW}$). La durée de flamme prédite est

proche (72 s) de la durée de flamme moyenne expérimentale (70 ± 14 s). La quantité de combustible consommée dans la simulation est nettement plus importante (76 % de la masse totale du ciste consommée), que lors des expériences (32 ± 4 %). Ces résultats peuvent s'expliquer par l'absence d'eau dans les simulations et plus particulièrement dans les classes de particules de plus gros diamètre, ce qui n'est pas le cas expérimentalement. Toutefois, cette étude préliminaire n'avait pas pour objectif de reproduire la réalité expérimentale. Elle visait simplement à avoir une première idée des potentialités et des limites du code de calcul. Nous constatons ainsi que la phase de décroissance est plus courte que celle obtenue expérimentalement (respectivement 20s et 40 ± 14 s), ce qui rejoint le résultat des simulations des feux de litières d'aiguilles de pins présentées au chapitre 4.

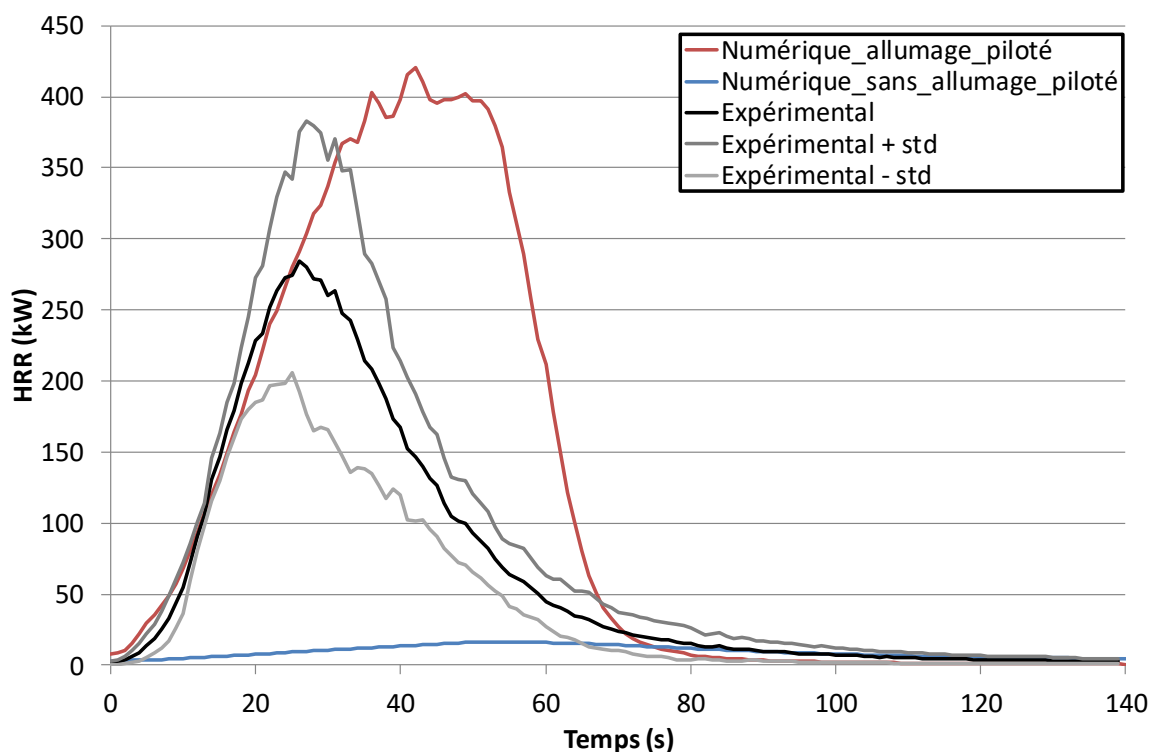


Figure 5-4 : comparaison des HRR prédits et mesurés au cours du temps pour un ciste secs

5.2.3. Simulation de la combustion de cistes humides avec WFDS

Les expériences réalisées en laboratoire ont concerné du combustible vivant présentant une teneur en eau des feuilles comprise entre 4 et 32 %. La prise en compte de l'eau est donc essentielle pour tester le code de simulation dans des conditions représentatives. Un allumage numérique identique à celui présenté dans la section précédente pour les litières, a été utilisé.

Compte tenu de l'impossibilité pour WFDS de prédire un allumage spontané, nous avons défini un temps d'allumage dans la simulation numérique reproduisant le plus fidèlement possible les conditions expérimentales, notamment pour ce qui concerne la perte de masse. En effet, nous avons observé au cours des expériences une grande variabilité du temps d'allumage (cf. chapitre 4) liée aux différences des propriétés géométriques des échantillons. Mais, pour une même teneur en eau, la masse perdue au cours des expériences avant l'allumage ne varie pas significativement en comparaison des variations du temps d'allumage. Par exemple, pour une teneur en eau des feuilles de 7 ± 2 %, le temps moyen d'allumage était de 89 ± 85 s, tandis que le pourcentage moyen de perte de masse (rapport de la masse perdue à la masse humide de l'arbuste) était de 3.0 ± 0.6 % (Tableau 5-5). De plus, lors de plusieurs séries d'expériences, des mesures de production de gaz ont été réalisées par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) (Leonelli, 2018). Cette technique de mesure nous permet de déterminer la production de vapeur d'eau et ainsi de différencier la masse perdue par dessiccation de celle perdue par pyrolyse. Les masses perdues lors de l'allumage par dessiccation et pyrolyse ont donc été estimées respectivement à 1.6 ± 0.4 % et 1.4 ± 0.2 % de la masse totale.

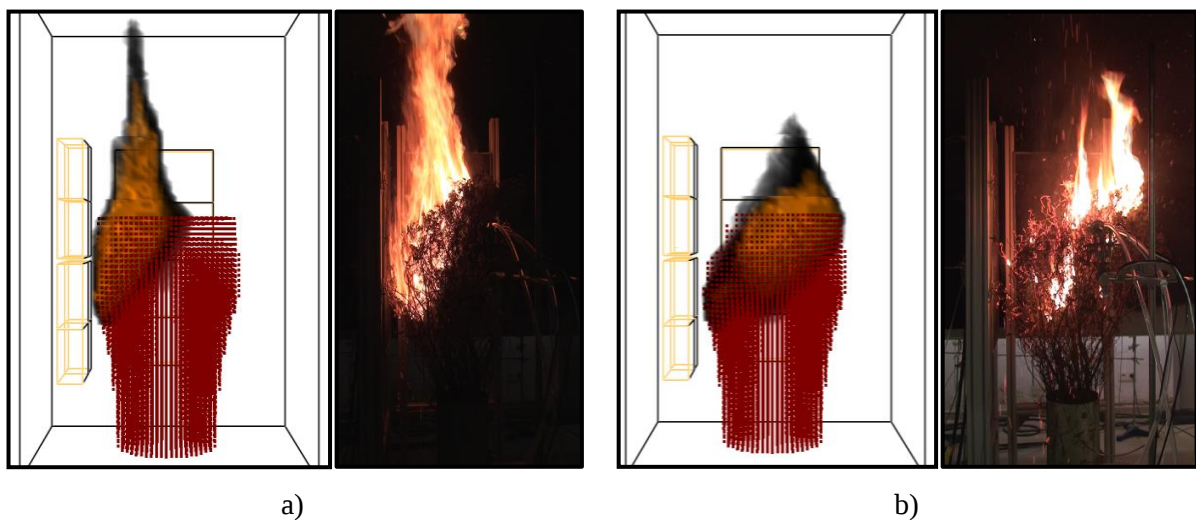
Les tests de WFDS ont donc été effectués sur la base des simulations de combustion d'un ciste dont la teneur en eau des feuilles est de 7%. Cette teneur peut sembler faible a priori mais il faut préciser que les valeurs, pour les classes de particules vivantes de diamètre 0-2 mm, 2-4 mm, 4-6 mm et 6-25 mm, sont respectivement de 23, 27, 35, et 45%. Les simulations nous permettent de prédire une perte de masse de 3.0 % après une durée de chauffe de 120 s. Cette masse perdue correspond à 2.1 % d'eau (dessiccation) et 0.9 % de combustible sec (pyrolyse). Pour un temps de simulations de 89 s (correspondant au temps moyen d'allumage observé expérimentalement), les prédictions des masses d'eau et de combustible sec perdues sont respectivement de 1.15 et 0.51 % ; valeurs inférieures à celles observées. Ces résultats soulèvent un problème concernant l'aptitude de WFDS à représenter la dessiccation et la dégradation durant la phase de préchauffage.

Ainsi, nous avons fixé un temps d'allumage numérique pour lequel la simulation prédit une perte de masse de combustible sec identique à celle relevée expérimentalement. Pour la teneur en eau des feuilles de 7%, ce temps d'allumage numérique a donc été fixé à 150 s.

Tableau 5-5 : Récapitulatif des masses perdues expérimentalement avant allumage pour une teneur en eau des feuilles de 7 ± 2 %

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Moyenne	Simulation
Masse humide m_h (kg)	1.86	2.39	1.93	0.925	2.296	1,88 ($\pm 0,52$)	1.89
Masse perdue m_p (kg)	0.07	0.055	0.07	0.02	0.072	0,057 ($\pm 0,019$)	0.057
Ratio $\frac{m_p}{m_h}$	0.038	0.023	0.036	0.022	0.031	0.03 ($\pm 0,006$)	0.03

La dynamique des simulations est visualisée sur la Figure 5-5 à l'aide du logiciel « Smokeview ». Nous voyons que le feu se développe de manière similaire aux observations expérimentales. La flamme englobe la hauteur du houppier lors de l'allumage, puis se propage l'horizontalement au sein de celui-ci. Les durées de flammes prédites et observées sont similaires (respectivement 56 et 59 s pour les durées de flamme numérique et expérimentale). Ce résultat montre que le code WFDS est apte à représenter le critère de *sustainability* dans le cas de la combustion d'un buisson.



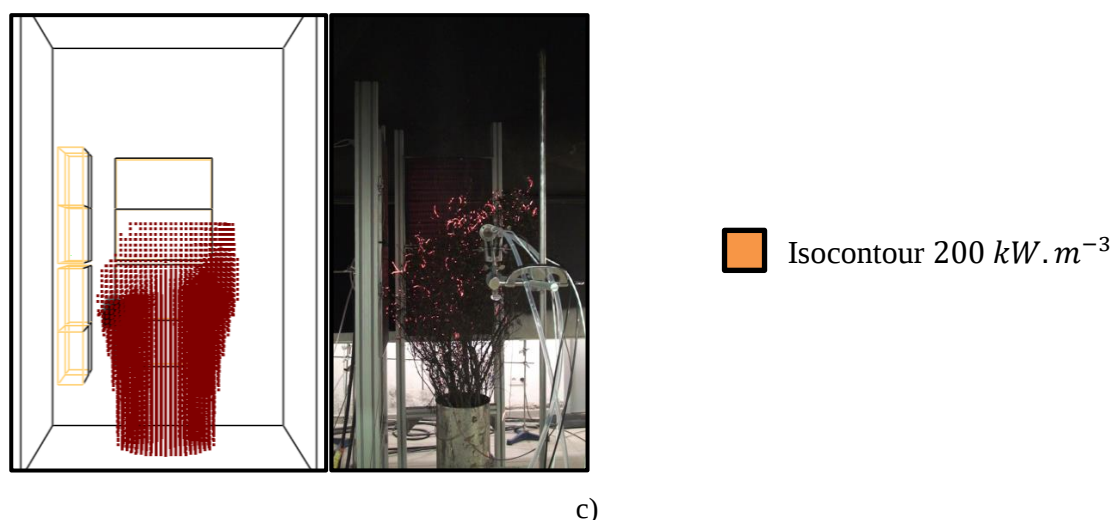


Figure 5-5 : Comparaison des combustions prédites et observées pour un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7% aux temps de a) 20s b) 40 s et c) 60s après l'allumage

La Figure 5-6 présente les relevés expérimentaux et les résultats de la simulation pour le HRR en fonction du temps. Le pic de HRR, la durée de flamme et le taux de consommation de combustible sont très proches de ceux obtenus expérimentalement (Tableau 5-6). Ces résultats montrent que WFDS est capable de reproduire les principales grandeurs mesurées relatives aux critères de *combustibility* et *consumability*. Cependant, un palier dans la courbe de HRR prédit (Figure 5-6) apparaît peu de temps après l'allumage. Nous observons également que l'extinction s'effectue trop rapidement, ce qui avait également été relevé pour les simulations des propagations dans les litières d'aiguilles de pins (cf. chapitre 3). La Figure 5-7 présente les prévisions de WFDS pour la puissance libérée en phase gazeuse (HRR_gaz), par l'oxydation des résidus charbonneux (HRR_charbon) et totale (HRR_total, somme des HRR gaz et char) mettant en évidence le palier en phase gazeuse. Le HRR en phase gazeuse augmente jusqu'à ce qu'une valeur seuil (le palier) soit atteinte. Par la suite, l'activation de la combustion des charbons entraîne une augmentation du HRR_total et du HRR_gaz(Figure 5-7).

Tableau 5-6 : Confrontation des prédictions du modèle et des données expérimentales pour la combustion d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%

Cas	Durée de flamme	Pic de HRR	Taux de consommation
Expérimental	44 ± 9 s	228 ± 15 kW	25 ± 6 %
Numérique	56 s	230 kW	32 %

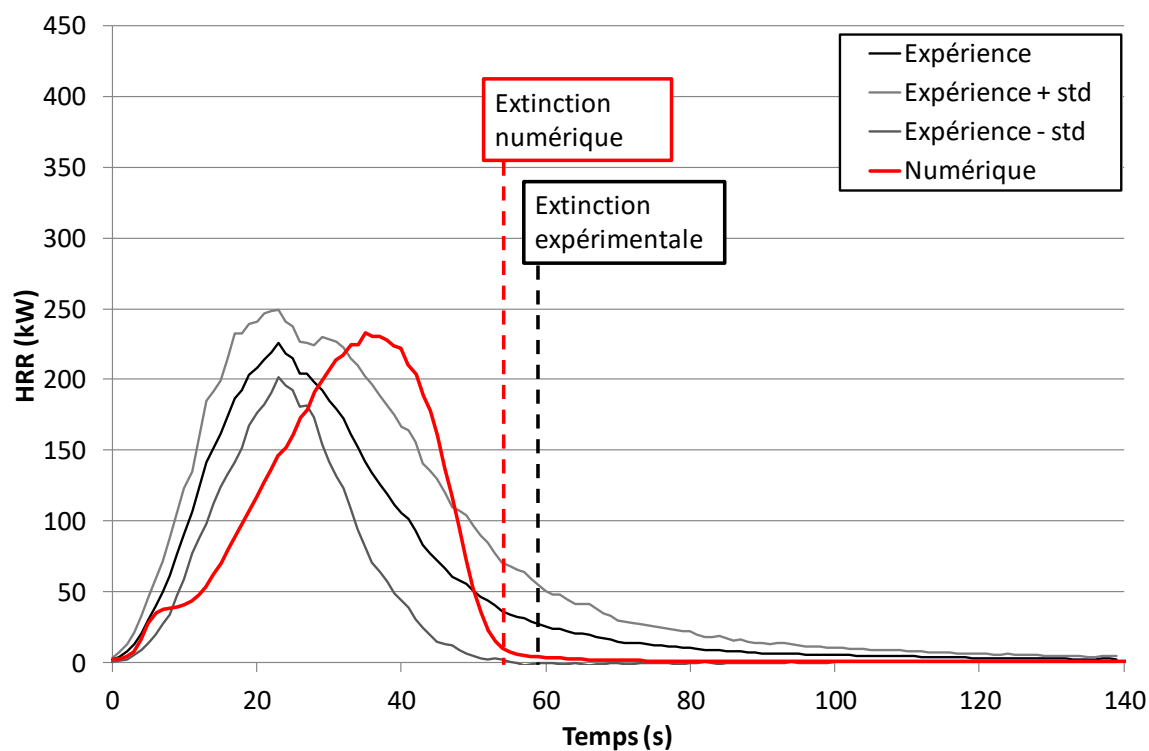


Figure 5-6 : HRR prédit et mesuré en fonction du temps pour la combustion d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%

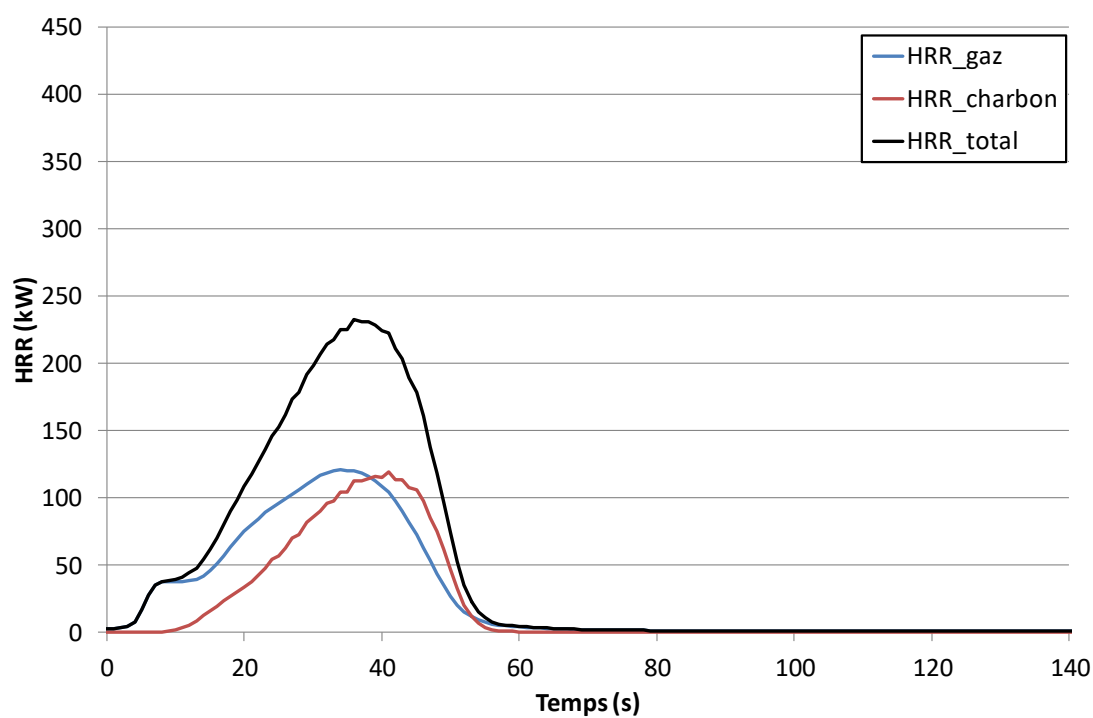


Figure 5-7 : HRR des gaz et HRR des résidus charbonneux prédits en fonction du temps pour la combustion d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%

Les vitesses de perte de masse des différentes classes de particules ont été tracées sur la Figure 5-8 afin d'analyser la présence de ce plateau dans la courbe de HRR prédit. Nous observons que les particules fines de taille caractéristique inférieure à 2 mm sont impliquées dès le début du processus de dégradation thermique, tandis que les particules de taille plus importante (2 à 4 mm) sont dégradées ultérieurement. Les particules de diamètres supérieur à 4 mm ne subissent pas de dégradation et ne sont, de ce fait, pas représentées sur la figure. Le plateau n'est visible que pour le MLR des feuilles et la classe de particules de 0 à 2 mm. Il n'est pas présent pour le MLR de la classe 2-4 mm qui subit une faible consommation. Ainsi, le plateau dans les courbes de HRR serait dû à une sous-estimation de la perte de masse des particules les plus fines. Ceci entraînerait une sous-estimation du débit de gaz de combustion et donc une puissance de combustion trop faible. Cette sous-estimation pourrait avoir plusieurs origines comme un défaut de transferts thermiques en direction du combustible imbrulé qui limiterait la dynamique de flamme. Une autre raison pourrait être l'activation trop tardive de la combustion des résidus charbonneux (cf. Figure 5-7), qui empêcherait d'entretenir la combustion du houppier au niveau observé expérimentalement. Afin d'investiguer les raisons de cette sous-estimation, une analyse de sensibilité de WFDS aux paramètres des principaux sous-modèles sera menée dans la partie suivante.

Afin de compléter cette confrontation des prédictions de WFDS aux résultats expérimentaux, nous discutons la consommation des particules combustibles. Nous voyons dans le Tableau 5-6 que le taux de consommation prédit est légèrement supérieur au taux de consommation observé expérimentalement. La simulation prédit que 80 % de la masse des feuilles, 65 % de la masse des brindilles de diamètre 0-2 mm et 8 % de la masse totale des brindilles de 2-4 mm présentes dans le houppier ont été consommées. Pour une consommation globale du ciste équivalente, nous avons observé expérimentalement que l'intégralité des particules fines (feuilles et 0-2 mm) ont été consommées. Il n'a pas été possible de déterminer la fraction des brindilles de 2-4 mm consommées. Nous pouvons observer sur la Figure 5-9 que la valeur de pic de MLR prédite (15,3 g/s) est proche des valeurs mesurées (14.4 ± 2.3 g/s) ce qui confirme le potentiel de WFDS pour représenter correctement le critère de *combustibility* des arbustes de ciste. Enfin, il convient de noter que la courbe du MLR prédit (Figure 5-10) suit la même tendance que la courbe de HRR prédit (Figure 5-7) (apparition du palier après l'allumage et diminution rapide après le pic de MLR).

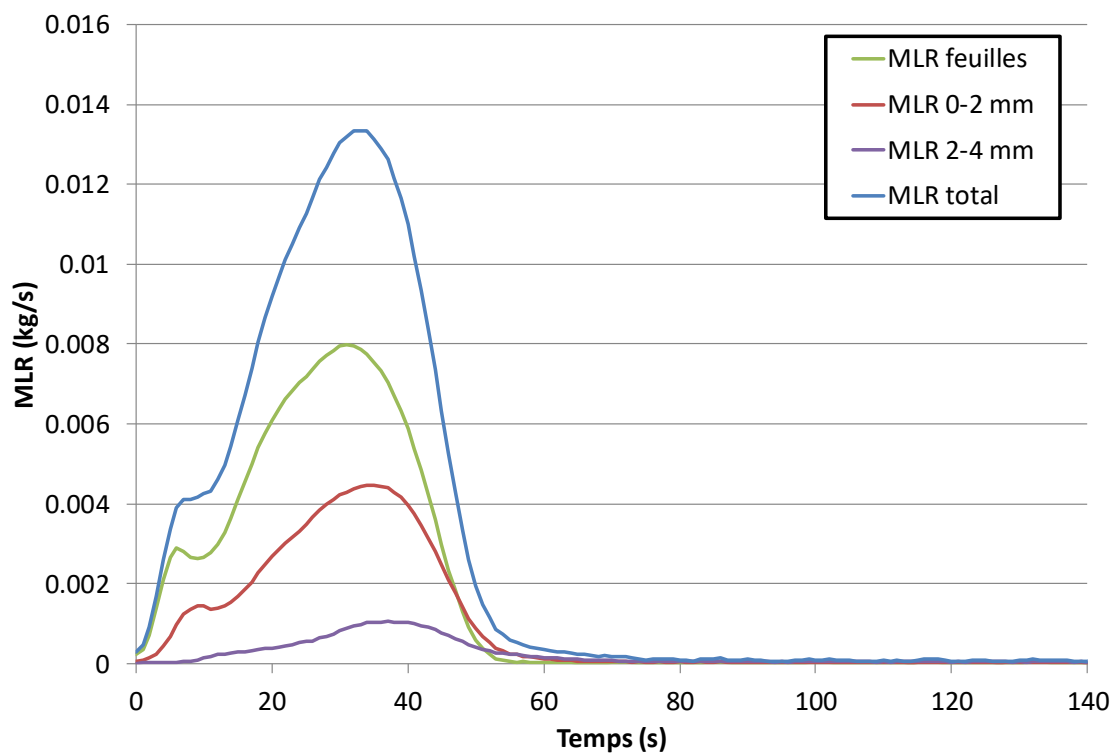


Figure 5-8 : MLR prédits des différentes classes de particules en fonction du temps pour la combustion d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%

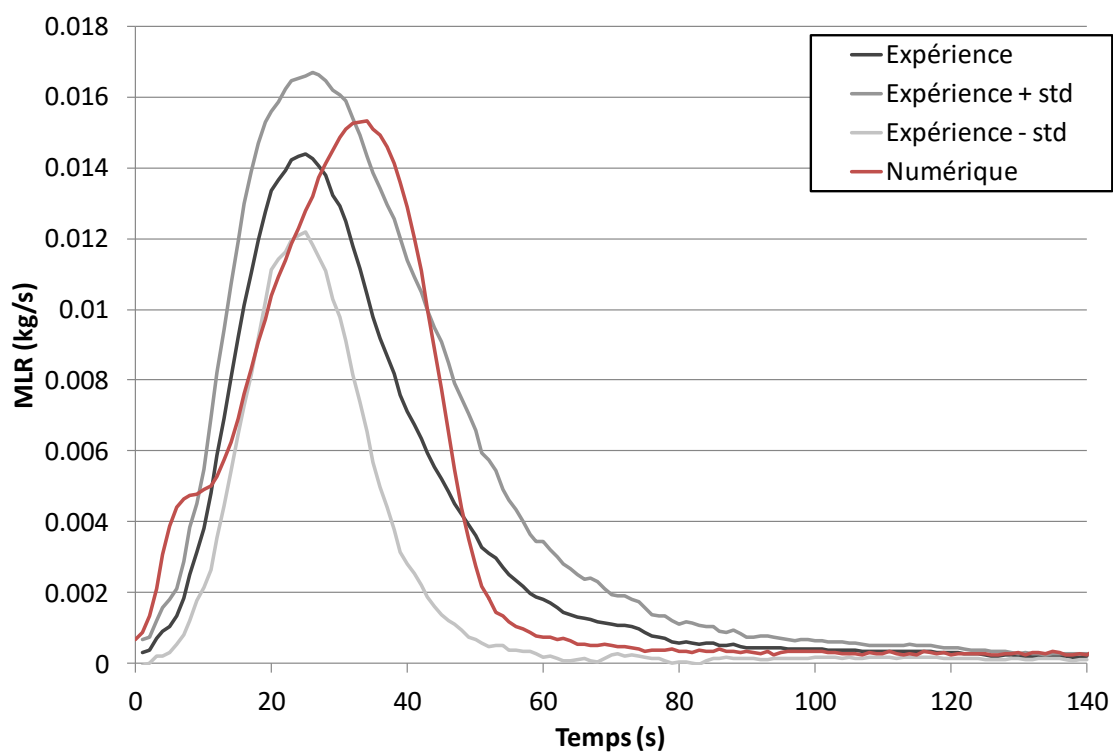


Figure 5-9 : MLR prédit et mesuré en fonction du temps pour la combustion d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%

5.3. Analyse de sensibilité du code WFDS aux principaux paramètres d'entrée

Dans le but de mieux cerner la cause de la présence du plateau dans la courbe du HRR prédit (Figure 5-6), une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier l'influence des principaux paramètres d'entrée de WFDS sur la prédiction du HRR. Dans cette section, l'influence de la fraction rayonnée, du facteur de coefficient de trainée, de la capacité calorifique des résidus charbonneux, de la fraction de résidus charbonneux et des paramètres des modèles de dessiccation, de pyrolyse et de dégradation des résidus charbonneux a été étudiée.

5.3.1. Influence de la fraction rayonnée

La valeur moyenne obtenue pour les 8 expériences réalisées, 0.27 ± 0.03 , a été utilisée comme valeur de référence pour le reste de l'étude (Cf. Annexe D1). Les simulations ont été réalisées en faisant varier la valeur de χ_{rad} entre 0.2 et 0.3. Les résultats du HRR prédit sont tracés sur la Figure 5-10 pour quelques valeurs significatives de χ_{rad} afin d'apprécier son effet. L'augmentation de la fraction radiative entraîne une augmentation du pic de HRR (*combustibility*) (285 kW pour $\chi_{rad} = 0.3$) et de la pente du HRR après l'allumage. Nous observons également une augmentation de la consommation de combustible (*consumability*) qui passe par exemple à 36 % pour $\chi_{rad} = 0.3$ alors que la consommation était de 32 % pour $\chi_{rad} = 0.27$. Cependant, le palier est toujours présent dans la courbe de HRR quelle que soit la valeur de χ_{rad} . La modification de χ_{rad} (dans la plage testée ici) n'a donc pas d'influence sur la présence de ce palier. L'accroissement du HRR après le palier, quand χ_{rad} augmente, est dû à l'augmentation des transferts radiatifs depuis la zone de combustion en direction des particules imbrulées. Cela induit la dégradation d'une quantité plus importante de fines classes de particules (feuilles et 0-2 mm) que lors du test avec la valeur de référence de χ_{rad} .

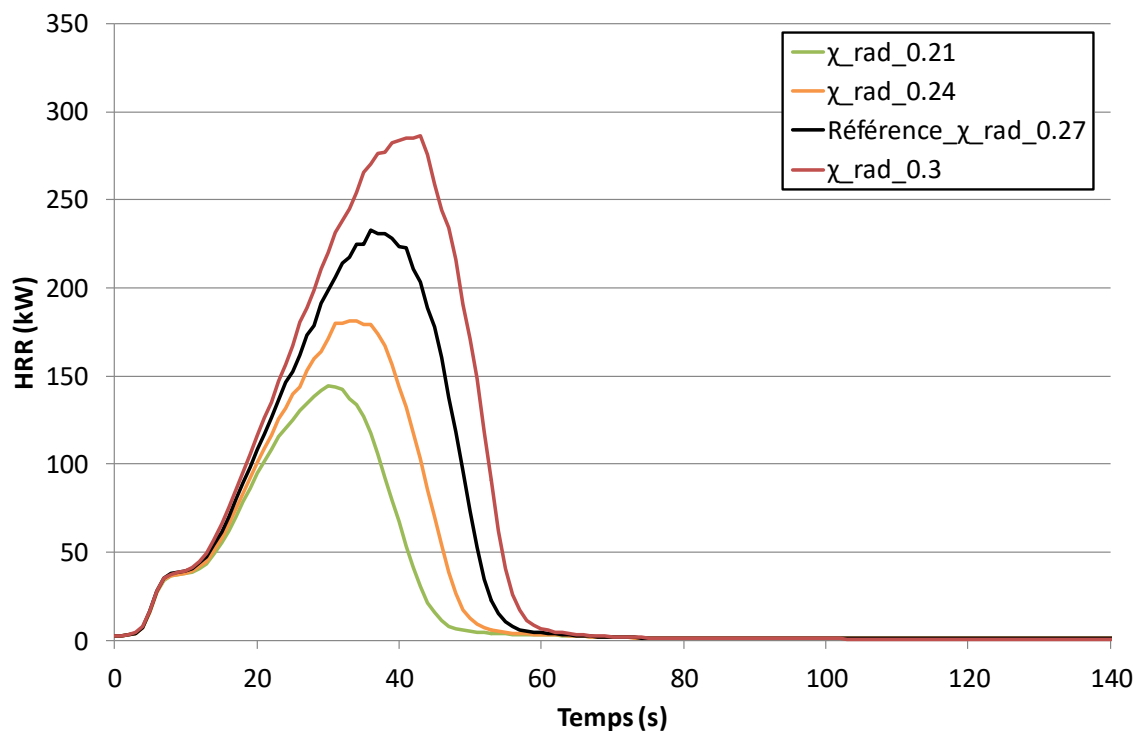


Figure 5-10 : Influence de la fraction radiative χ_{rad} sur le HRR prédit (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

5.3.2. Influence du coefficient de trainée

La valeur du coefficient de trainée proposée par Mell (2007) $F_{Cd} = 0.375$ a été prise comme valeur de référence. Elle a été auparavant utilisée pour le pin douglas (Mell et al., 2009), pour des litières d'aiguilles de pin (Perez-Ramirez et al., 2017) et pour du maquis méditerranéen (Morvan, 2001). Les simulations ont été réalisées en faisant varier, sa valeur dans une plage comprise entre 0.1 et 1.0 avec un incrément de 0.1. Les résultats du HRR prédit sont tracés sur la Figure 5-11 pour quelques valeurs significatives de F_{Cd} . Un coefficient de trainée inférieur à la valeur initiale (0.375) provoque une atténuation de la combustion. Dans ce cas, le pic de HRR et la durée de flamme sont inférieurs à ceux du cas de référence. De plus, une accentuation du plateau présent après l'allumage peut être observée sur les courbes de HRR. Le pic de HRR et la pente après l'allumage augmentent avec le F_{Cd} jusqu'à la valeur critique de $F_{Cd} = 0.7$. Pour des valeurs de F_{Cd} supérieures à 0.7, le pic de HRR et la pente à l'allumage diminuent légèrement alors que le temps de combustion et l'énergie totale libérée augmentent. Nous notons cependant dans la courbe du HRR prédit un lissage progressif du palier qui disparaît à partir de $F_{Cd} = 0.7$.

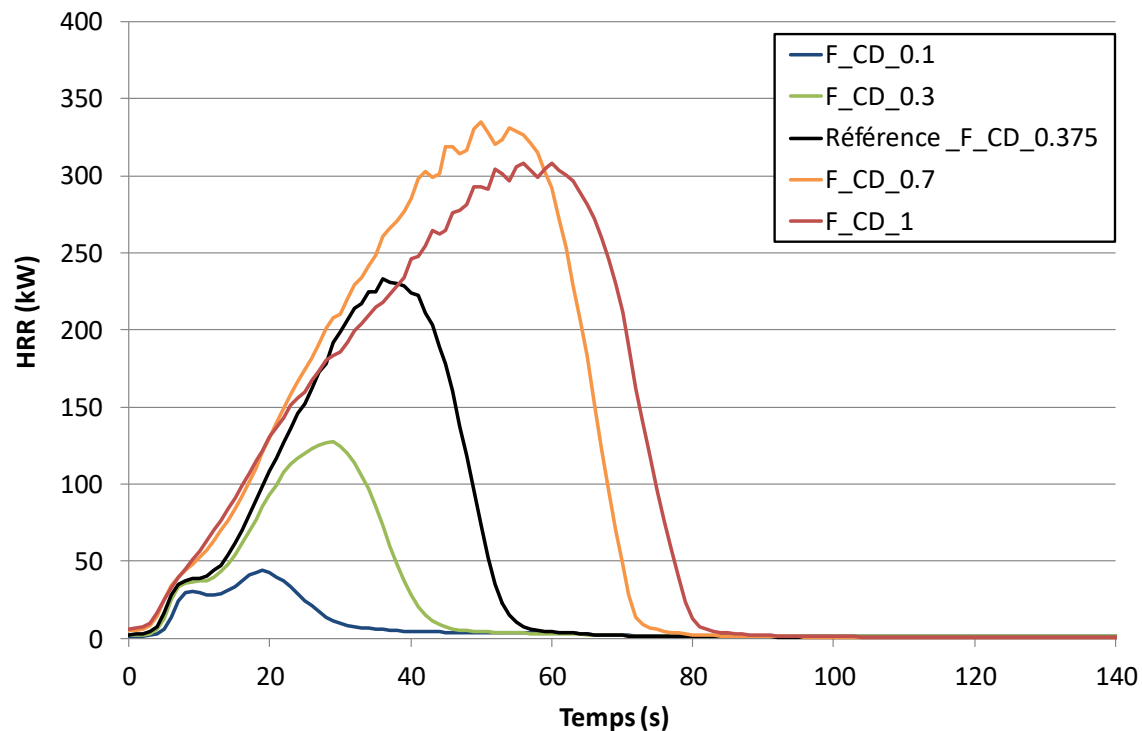


Figure 5-11 : Influence du coefficient de traînée F_{Cd} sur le HRR prédit (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

Une diminution des forces de traînée entraîne une diminution des interactions entre l'écoulement et l'arbuste et ainsi des transferts thermiques convectifs ce qui atténue la combustion. A contrario, l'augmentation des forces de traînée entraîne des interactions plus importantes, ce qui accroît les transferts thermiques convectifs et favorise la combustion. La Figure 5-12 permet d'apprécier l'effet du coefficient de traînée sur le MLR des différentes classes de particules. La comparaison des MLR des classes de particules au cours du temps pour des valeurs de $F_{Cd} = 0.375$ et 0.7 montre que le plateau présent sur les courbes de MLR pour la valeur de référence disparaît pour $F_{Cd} = 0.7$. Ceci s'explique par un échauffement plus important de ces particules comme évoqué ci-dessus. La combustion des tailles de particules de 2 à 6 mm est plus importante pour $F_{Cd} = 0.7$ (24 % et 5% de la masse des classes de particules pour respectivement $F_{Cd} = 0.7$ et 0.375). Pour $F_{Cd} = 0.375$, la classe de particules 4-6 mm participe peu à la combustion (6% de la masse de cette classe) alors qu'elle est dégradée de manière importante pour $F_{Cd} = 0.7$ (17%). L'étude de l'influence du coefficient de traînée révèle qu'un accroissement des transferts thermiques convectifs pourrait entraîner une dynamique de perte de masse plus importante dans les premiers instants suivants l'allumage. Toutefois, les valeurs testées du coefficient de traînée ne semblent pas en mesure de répondre à cette exigence sans entraîner une nette surestimation du HRR et de l'énergie totale dégagée.

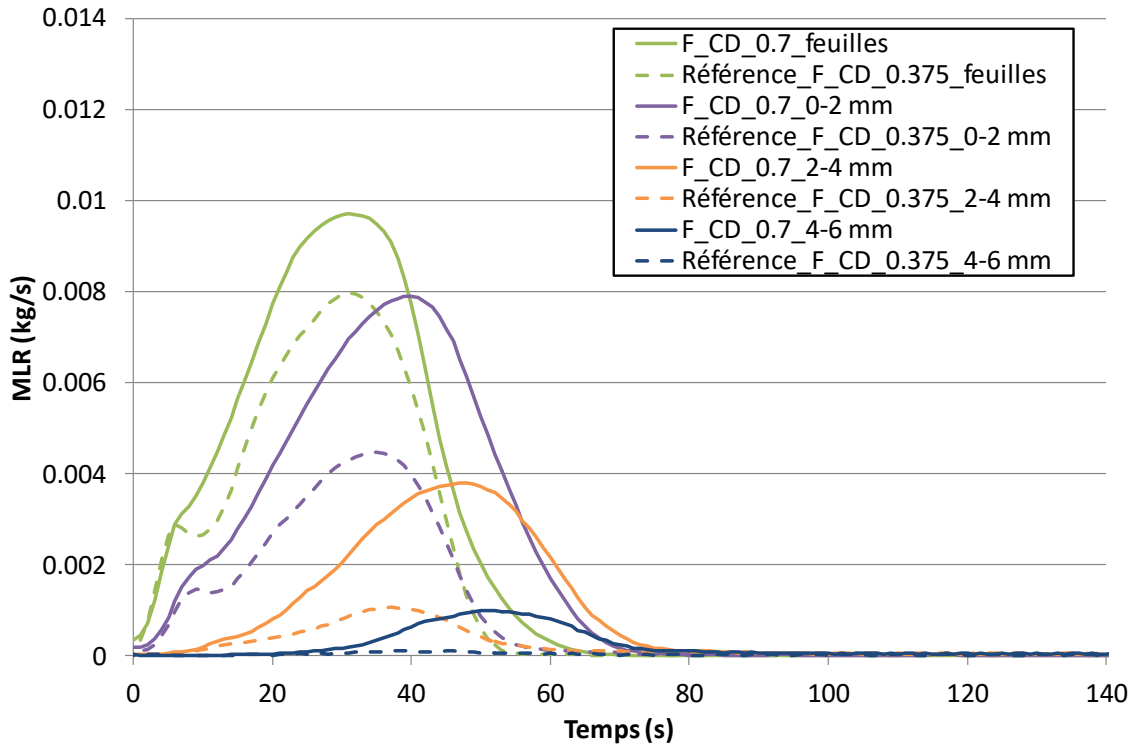


Figure 5-12 : MLR des différentes classes de particules au cours du temps pour $F_{CD} = 0.7$ et $F_{CD} = 0.375$ (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

5.3.3. Influence de la capacité calorifique des charbons

La relation utilisée par défaut dans WFDS pour calculer la capacité calorifique des charbons est l'équation quadratique suivante, proposée par Park et al. (2010) :

$$c_{p,char} = 420 + 2.09T_p + 6.85 \times 10^{-4}T_p^2 \quad (5.2)$$

Afin d'analyser l'influence de $c_{p,char}$ sur la combustion, nous avons testé deux valeurs de $c_{p,char}$ (1500 et 3000 J.kg⁻¹.K⁻¹) et la relation linéaire de Parker (1989) suivante :

$$c_{p,char} = 1110 + 3.7 T_p \quad (5.3)$$

Les valeurs de 1500 et 3000 J.kg⁻¹.K⁻¹ ont été calculées à partir de la formule de Park, respectivement pour des valeurs de températures de 400 °C et 800 °C. Les résultats du HRR prédit sont tracés sur la Figure 14 pour les différentes expressions et valeurs de $c_{p,char}$. Nous observons une influence significative de $c_{p,char}$ sur la combustion du ciste. En effet, la pente de HRR à l'allumage, les valeurs de pic de HRR et de durée de la combustion augmentent avec la diminution de $C_{p,char}$, ainsi que la quantité de combustible brûlé. Le HRR le plus bas correspond à la relation de Parker. Notons que pour cette relation la capacité calorifique est

égale à $3000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour une température de $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La Figure 14 révèle que la capacité calorifique a peu d'influence sur le plateau présent après l'allumage sur les courbes de HRR prédits.

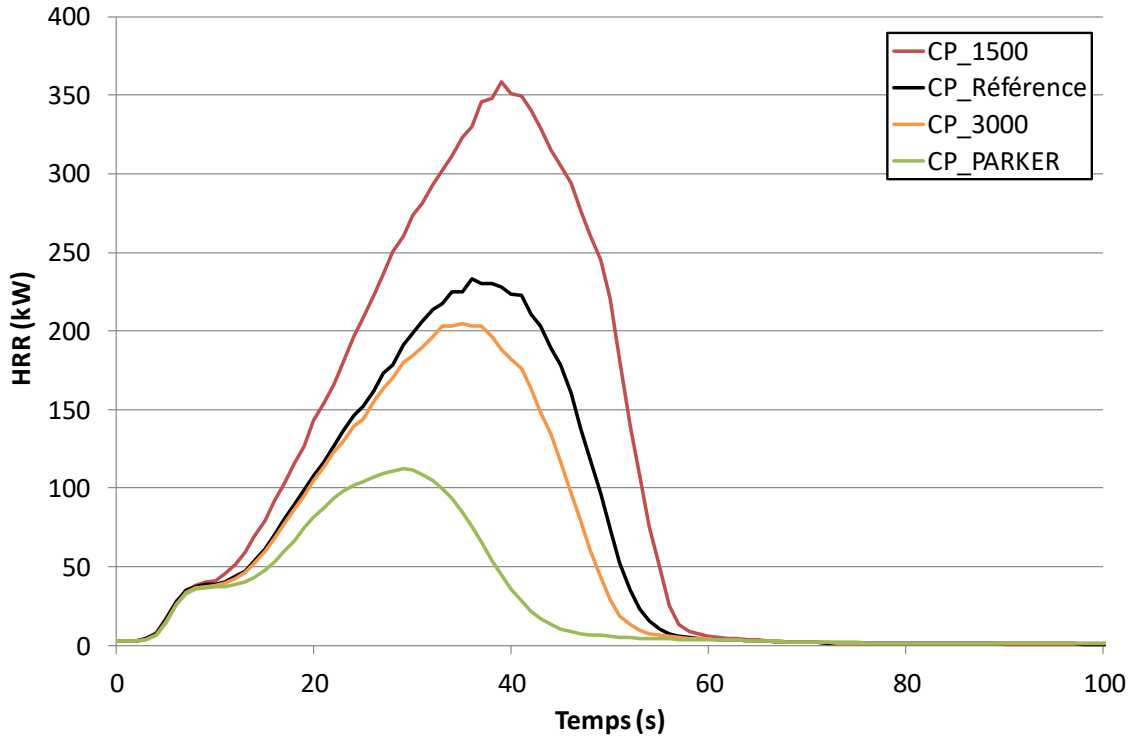


Figure 5-13 : Influence de la capacité calorifique des chars $c_{p,char}$ sur le HRR prédit (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

5.3.4. Influence de la fraction des résidus charbonneux et de leur enthalpie de combustion

La valeur de référence de la fraction charbonneuse χ_{char} a été fixée à 30 % (Leroy, 2007) et l'enthalpie de combustion $\Delta h_{char} = 32740 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Dahale et al. 2013). Pour étudier l'influence de χ_{char} sur le HRR prédit, nous devons modifier dans WFDS l'enthalpie de combustion des gaz, Δh_g ainsi que le nombre d'atomes de carbone x_g dans la formule chimique des gaz de dégradation. Δh_g est donnée par :

$$\Delta h_g = \frac{PCI - \Delta h_{char} \cdot \chi_{char}}{1 - \chi_{char}} \quad (5.4)$$

où PCI représente le pouvoir calorifique inférieur du végétal sec. x_g s'obtient à partir du nombre d'atomes de carbone x de la formule chimique équivalente du ciste ($C_x H_y O_z$) :

$$x_g = x (1 - \chi_{char}) \quad (5.5)$$

Les différentes valeurs utilisées pour χ_{CHAR} sont présentées dans le Tableau 5-7 ci-dessous:

Tableau 5-7 : Fraction massique de charbons, nombre d'atomes de carbone et enthalpie de combustion des gaz utilisés pour les différents calculs

χ_{char} (%)	30	27	24	0
x_g	2.83	2.95	3.07	4.04
Δh_g (kJ/kg)	12 884	13700	14452	18 841

La Figure 5-14 représente les courbes de HRR total (gaz et charbon) et de HRR issu de la combustion des charbons au cours du temps, pour différentes valeurs de χ_{char} . Nous observons que la diminution de χ_{char} entraîne une augmentation du pic de HRR total et du pic de HRR des chars. Peu de temps après l'allumage, la pente de HRR total augmente lorsque χ_{char} diminue alors que le plateau de HRR semble s'estomper. Toutefois, la disparition du palier à l'allumage n'intervient que pour le cas limite théorique de $\chi_{char} = 0$. Nous constatons que pour la valeur de $\chi_{char} = 0.27$, (ce qui représente un écart de 10% seulement par rapport à la valeur de référence), le pic de HRR atteint 350 kW alors qu'on obtient 250 kW pour la valeur de référence $\chi_{char} = 0.3$. Ce paramètre a donc une grande influence sur la combustion puisque 10% de variation sur χ_{char} entraîne 40% de différence sur le pic de HRR.

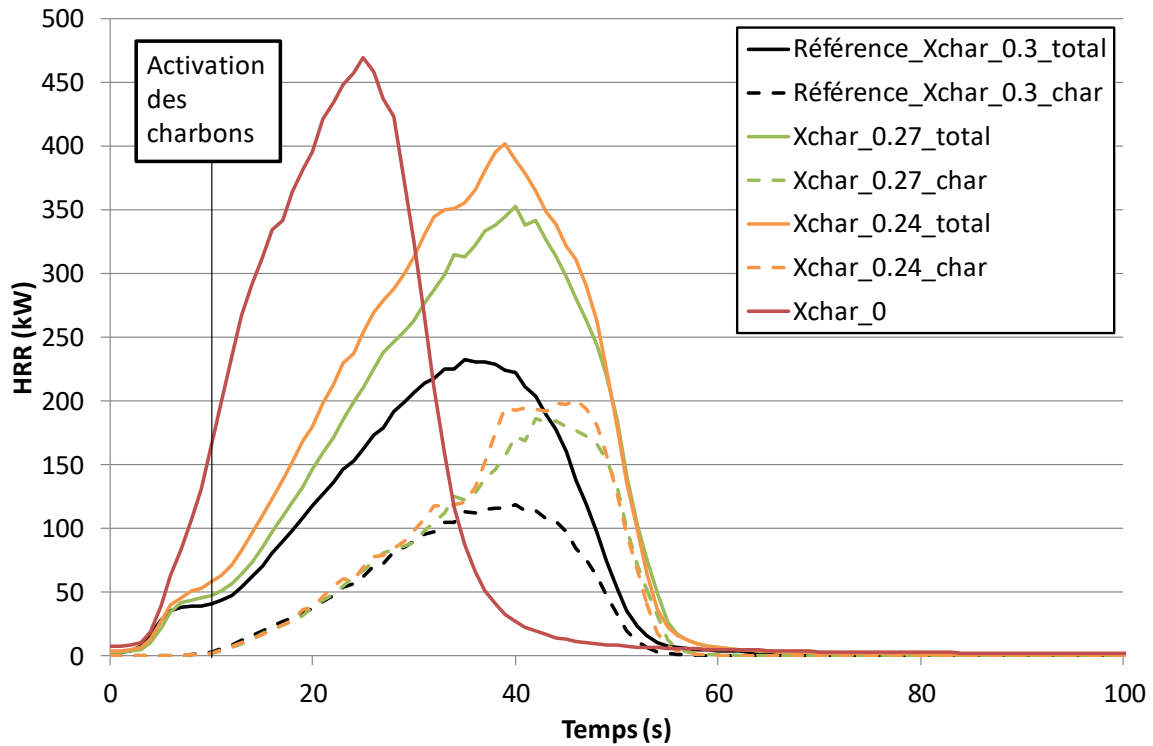


Figure 5-14 : Influence de la fraction de résidus charbonneux χ_{CHAR} sur la prédiction du HRR total et du HRR issu de la combustion des charbons (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

La comparaison entre le MLR obtenu pour $\chi_{char} = 0.3$ (référence) et $\chi_{char} = 0.27$ est présentée sur la Figure 5-15 pour les différentes classes de particules. Nous constatons que le plateau des MLR des différentes classes de particules s'estompe sans disparaître pour $\chi_{char} = 0.27$. Comme pour le facteur de coefficient de trainée, nous observons que la combustion des particules de plus grandes tailles (2-4 mm et 4-6 mm) augmente lorsque χ_{char} diminue. Par exemple, pour la valeur de référence de χ_{char} , les branches de diamètre 4-6 mm ne participent pas à la combustion et celles de diamètre 2-4 mm participent légèrement alors que ces deux classes de particules sont nettement impliquées dans la combustion pour $\chi_{char} = 0.27$. Ainsi, une diminution de la valeur de χ_{char} entraîne une augmentation de la taille et de la quantité des particules impliquées dans la combustion.

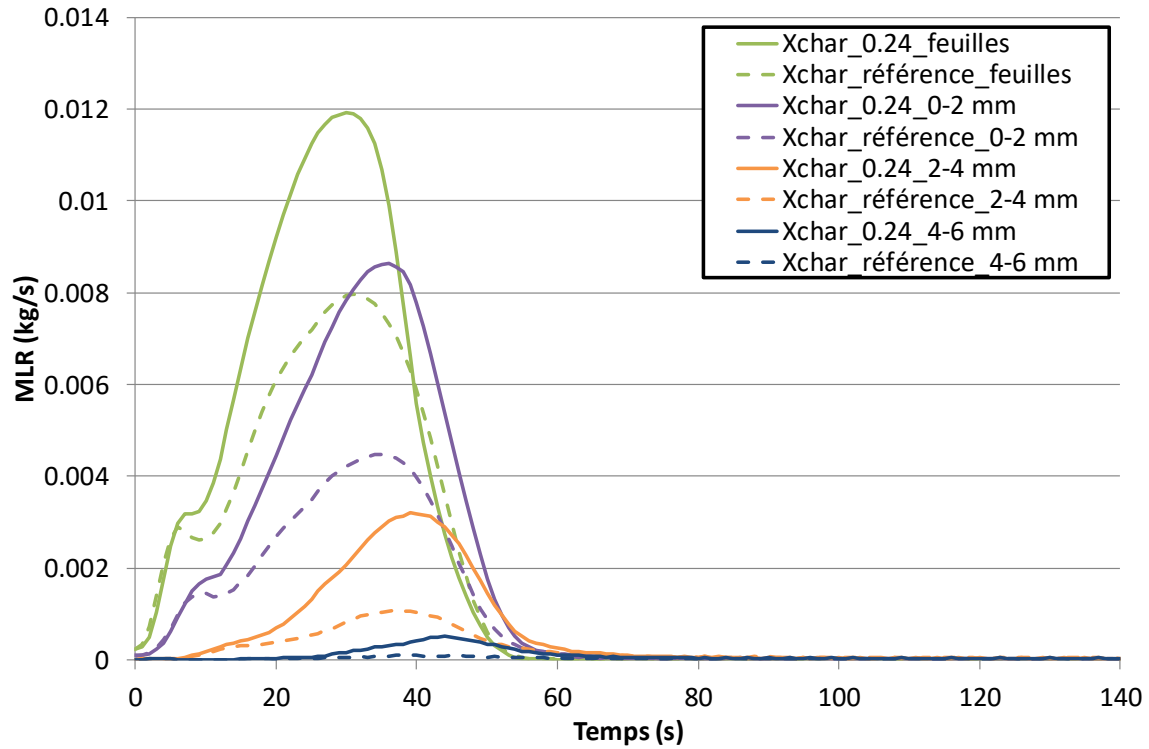


Figure 5-15 : MLR des différentes classes de particules au cours du temps pour $\chi_{char} = 0.3$ et $\chi_{char} = 0.24$ (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

5.3.5. Influence des paramètres du modèle de dessiccation

L'analyse de sensibilité a également été menée sur les paramètres de la vitesse de dessiccation R_{H_2O} . Nous rappelons son expression :

$$R_{H_2O} = \rho_{b,H_2O} A_{H_2O} T_p^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_{H_2O}}{T_p}} \quad (5.6)$$

où A_{H_2O} est le facteur pré-exponentiel et E_{H_2O} l'énergie d'activation par la constante des gaz parfaits.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous analyserons plus spécifiquement les influences croisées des termes sources de masse. Pour cela, nous avons fixé la plage de variation des paramètres des lois de dégradation entre $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ autour de leurs valeurs de référence (5800 K). Ainsi la Figure 5-16 présente les résultats de HRR prédit pour des valeurs de $E_{H_2O} \pm 10\%$ et $E_{H_2O} \pm 20\%$.

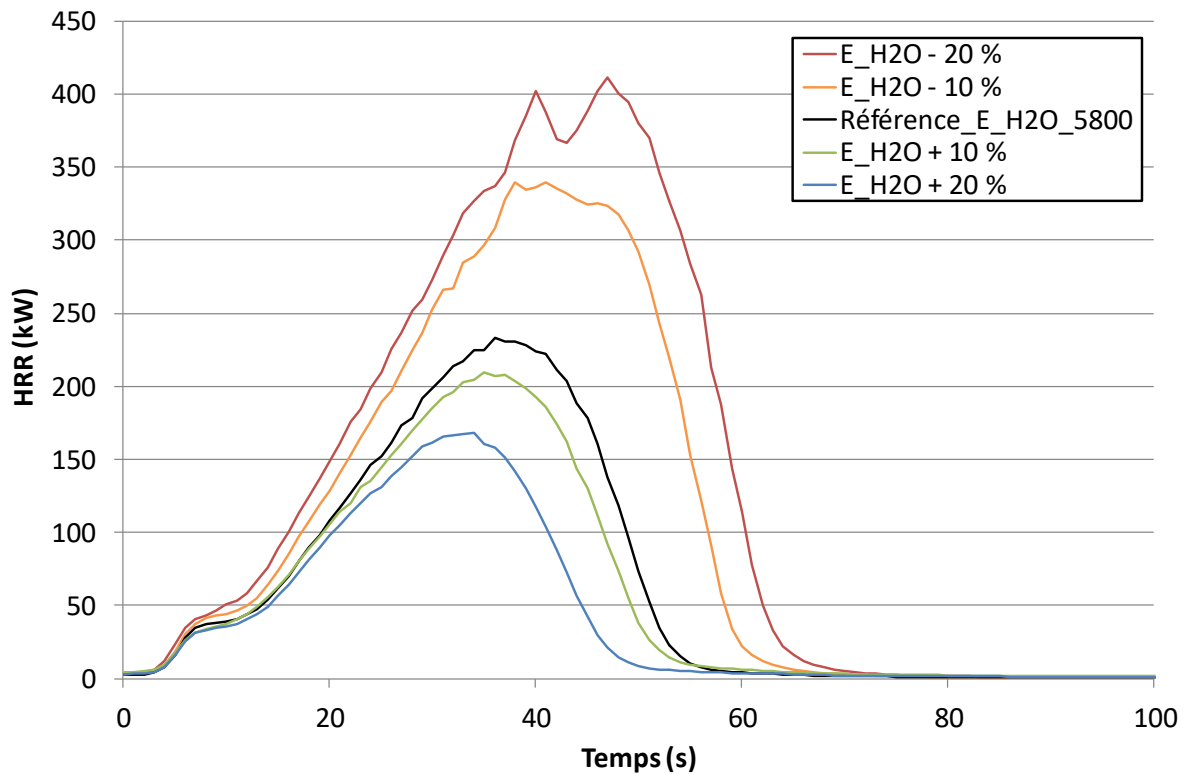


Figure 5-16 : Influence de l'énergie d'activation E_{H_2O} sur la prédiction du HRR (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

Pour une valeur E_{H_2O} égale à 6960 K ($E_{H_2O} + 20\%$), la quantité d'énergie nécessaire pour initier l'évaporation de l'eau est plus importante, ce qui conduit à une réduction du pic HRR et du temps de combustion. Pour E_{H_2O} égale à 4640 K ($E_{H_2O} - 20\%$), l'énergie nécessaire pour initier l'évaporation de l'eau est plus faible. L'eau s'évapore plus facilement, ce qui conduit à une augmentation de l'énergie disponible pour la dégradation du combustible, augmentant ainsi la valeur des critères de *combustibility*, la *sustainability* et la *consumability*. Pour $E_{H_2O} - 20\%$, le pic de HRR est donc plus important (411 kW) la durée de combustion est plus longue (62 s) et le taux de consommation des particules est plus élevé (56 % contre 32 % pour la valeur de référence $E_{H_2O} = 5800$ K). Bien que l'énergie d'activation joue un rôle important sur la dynamique de combustion, ce paramètre a peu d'influence sur le plateau après l'allumage. Une augmentation de la pente associée au plateau peut être observée pour la valeur de $E_{H_2O} - 20\%$, mais elle ne permet pas de supprimer le plateau.

Le coefficient pré-exponentiel, A_{H_2O} , a également été modifié pour observer son effet sur l'allumage. Des valeurs de $A_{H_2O} \pm 10\%$ et $A_{H_2O} \pm 20\%$ ont été utilisées (Figure 5-17). Nous observons une faible influence de ce paramètre sur le critère de *combustibility*. En effet, des

variations de HRR de 7 et 9 % ont été relevées par rapport à la valeur de référence. De plus, ce paramètre n'a pas d'influence sur la présence du plateau à l'allumage.

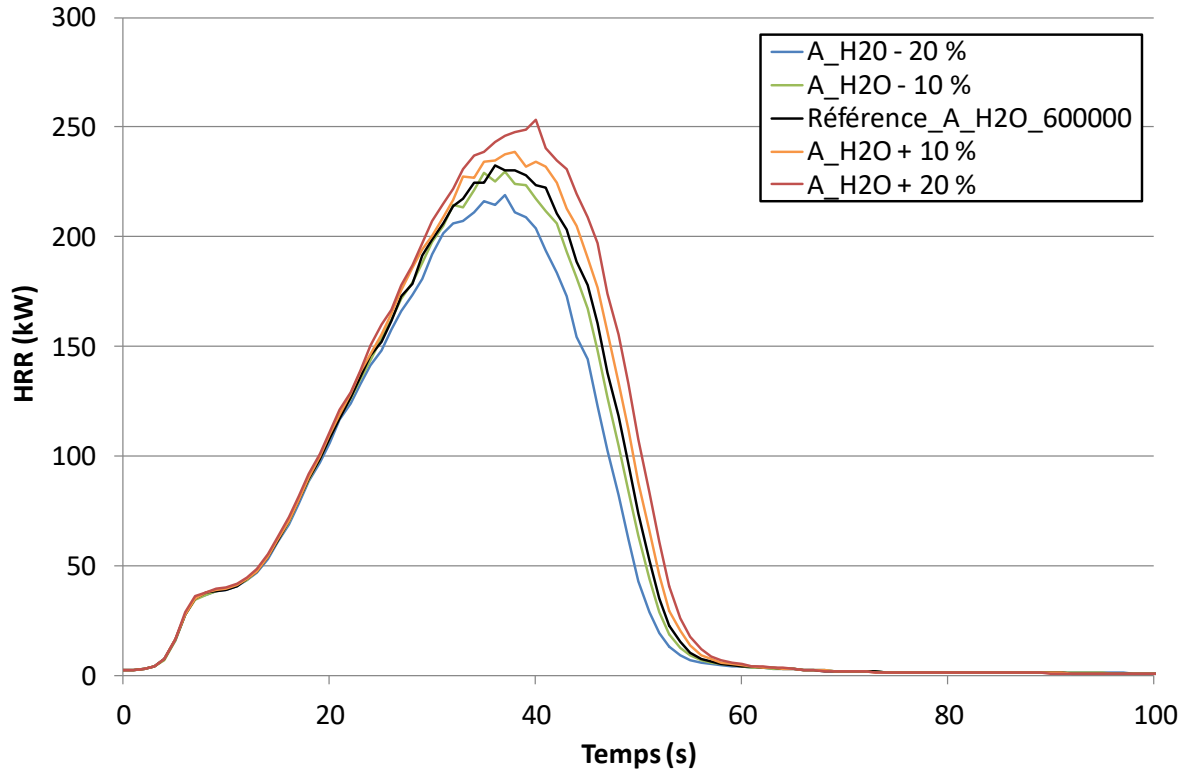


Figure 5-17 : influence du facteur pré-exponentiel A_{H_2O} sur la prédiction du HRR (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

L'énergie d'activation, E_{H_2O} , de la dessiccation a un impact significatif sur la dynamique de combustion ce qui n'est pas le cas du coefficient pré-exponentiel A_{H_2O} . Cependant, bien que le plateau sur la courbe de HRR après allumage ait été révélé lors de l'étude de la combustion d'un ciste avec une teneur en eau (rappelons qu'il était absent pour la combustion d'un ciste sec), les variations des paramètres de la loi dessiccation ont peu d'effet sur ce plateau, ce qui semble contrintuitif.

5.3.6. Influence des paramètres de la loi de pyrolyse

L'expression de la vitesse de réaction de la pyrolyse est rappelée ci-dessous :

$$R_{pyr} = \rho_{b,sec} A_{pyr} e^{-\frac{E_{pyr}}{T_e}} \quad (5.7)$$

Nous nous intéressons au coefficient pré-exponentiel A_{pyr} et à l'énergie d'activation E_{pyr} dont les valeurs de référence utilisées dans WFDS sont respectivement 36300 s^{-1} et 7250 K . Comme pour les sections précédentes, nous analysons les résultats des simulations pour des variations de $\pm 10 \%$ et $\pm 20 \%$ autour de ces valeurs de références.

La Figure 5-18 représente les courbes de HRR au cours du temps pour les valeurs de $A_{pyr} \pm 10 \%$ et $A_{pyr} \pm 20 \%$. Les courbes de HRR suivent de façon quasi-homothétique les variations de A_{pyr} . Plus la valeur de A_{pyr} est élevée, plus le pic de HRR est important et inversement lorsque A_{pyr} diminue. Par exemple, le pic de HRR vaut 294 kW pour $A_{pyr} + 20 \%$ et 160 kW pour $A_{pyr} - 20 \%$. Enfin il est important de remarquer que ce paramètre a peu d'influence sur le palier dans les courbes de HRR après allumage. Le paramètre A_{pyr} , bien qu'impactant l'amplitude de la combustion, influence peu la dynamique de combustion après l'allumage.

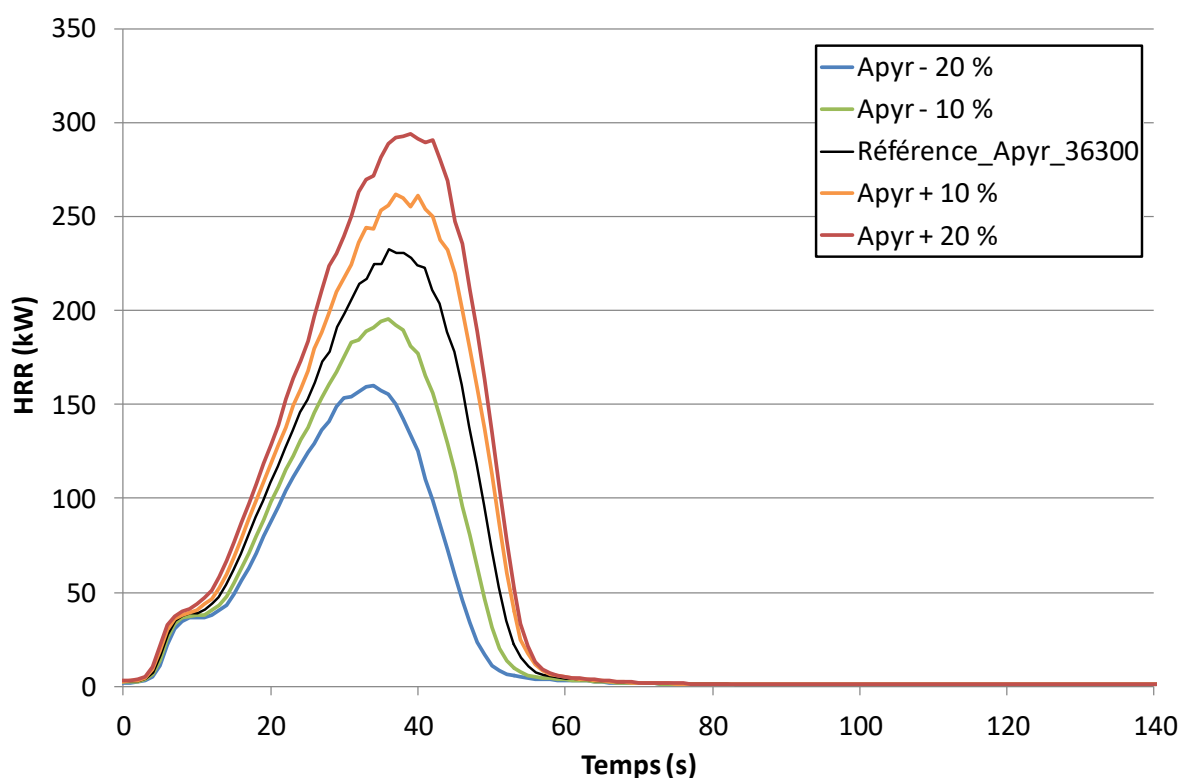


Figure 5-18 : Influence du facteur pré-exponentiel A_{pyr} sur la prédiction du HRR total (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

Le HRR prédit au cours du temps est présenté sur la Figure 5-19 pour les valeurs de $E_{pyr} \pm 10\%$ et $E_{pyr} \pm 20\%$. Nous observons la présence d'un auto-allumage pour la valeur de $E_{pyr} - 20\%$. Dans ce cas l'énergie issue des panneaux radiants induit une forte pyrolyse qui suffit à

produire un mélange gaz combustible/air suffisamment énergétique pour auto-entretenir la combustion. Nous voyons également qu'il n'y a plus de palier à l'allumage pour la valeur de $E_{pyr} - 10\%$. Pour les valeurs testées de $E_{pyr} + 10\%$ et $E_{pyr} + 20\%$, l'énergie fournie suite à l'allumage n'est pas suffisante pour entretenir la combustion de l'arbuste.

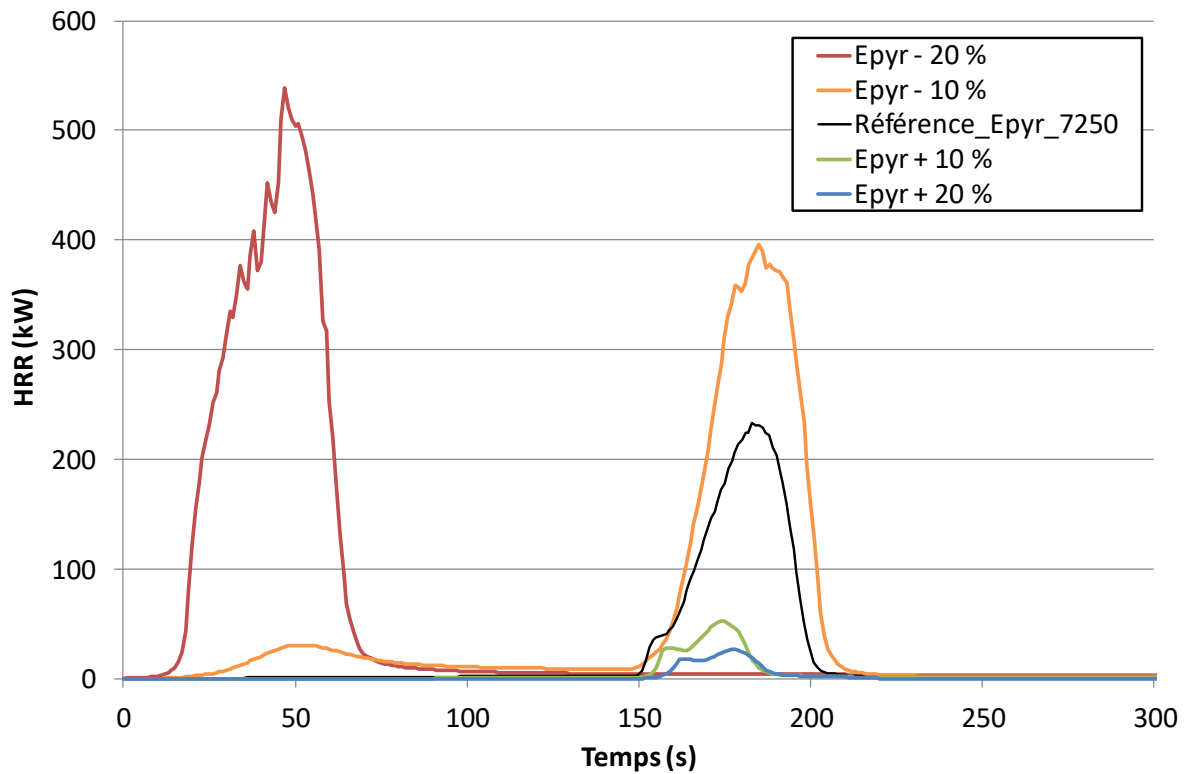


Figure 5-19 : Influence de l'énergie d'activation E_{pyr} sur la prédiction du HRR total (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

Les vitesses de perte de masse des différentes classes de particules pour E_{pyr} de référence et $E_{pyr} - 20\%$ sont présentées sur la Figure 5-20. Nous observons une gazéification nettement plus élevée pour $E_{pyr} - 20\%$. Les particules de diamètres 2-4 mm et 4-6 mm sont fortement dégradées ce qui n'était pas le cas pour la valeur de référence E_{pyr} (7250 K).

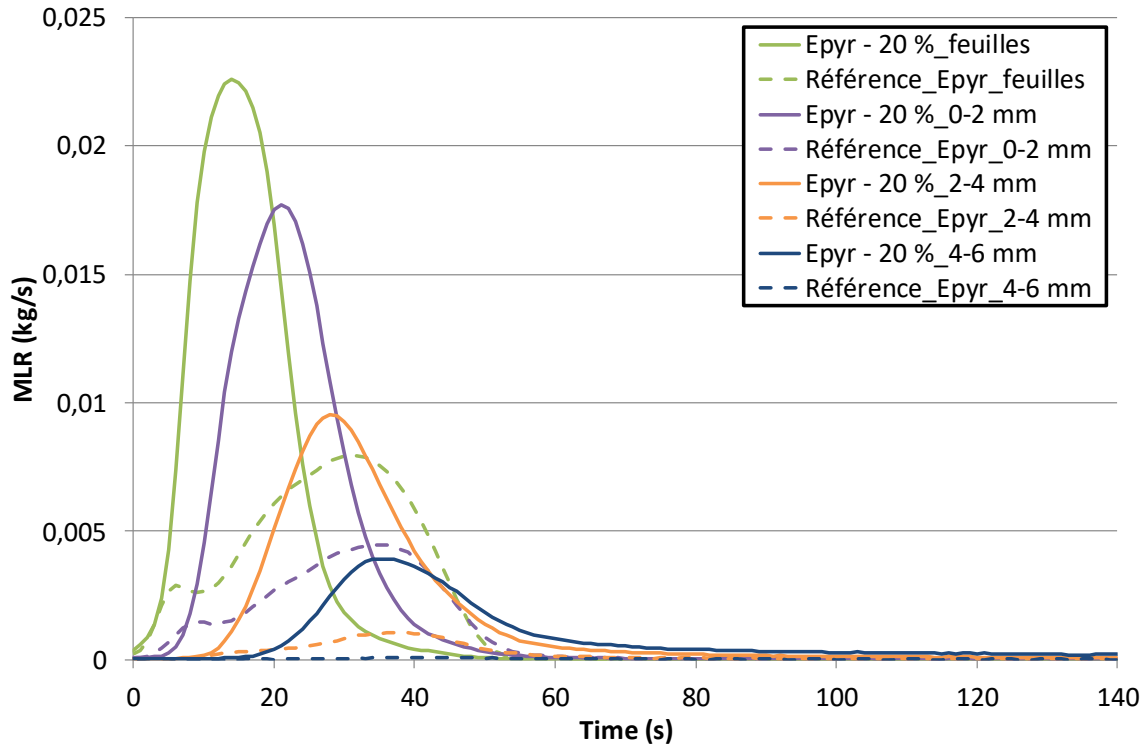


Figure 5-20 : MLR des différentes classes de particules au cours du temps pour E_{pyr} et $E_{pyr} - 20\%$ (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

5.3.7. Influence des paramètres de la loi de dégradation des résidus charbonneux

Nous rappelons ci-dessous l'expression de la vitesse d'oxydation des résidus charbonneux :

$$R_{char} = \frac{A_{char}}{\nu_{O_2, char}} \rho_g Y_{O_2} \sigma_e \beta_e e^{-\frac{E_{char}}{T_e}} (1 + \beta_{char} \sqrt{Re_e}) \quad (5.8)$$

)

L'analyse de sensibilité a concerné le facteur pré-exponentiel A_{CHAR} et l'énergie d'activation E_{char} dont les valeurs de références sont respectivement 215 s^{-1} et 9000 K . Comme précédemment, nous avons considéré des variations de 10% et 20% autour des valeurs de référence.

La Figure 5-21 présente la courbe de HRR issu de l'oxydation des résidus charbonneux pour les valeurs de $E_{char} - 10\%$ et $E_{char} - 20\%$. Nous observons que l'oxydation se produit plus précocement pour des valeurs de E_{char} inférieures à la valeur de référence. En effet dans ces cas, les résidus charbonneux nécessitent moins d'énergie pour être oxydés. Pour des valeurs de $E_{char} + 10\%$ et $E_{char} + 20\%$, l'énergie fournie aux résidus charbonneux ne permet pas de

les oxyder et le HRR issu des char est nul. Pour ces cas, la flamme ne se propage pas dans le houppier comme nous pouvons le constater sur la Figure 5-22, où sont tracés les courbes de HRR total prédits.

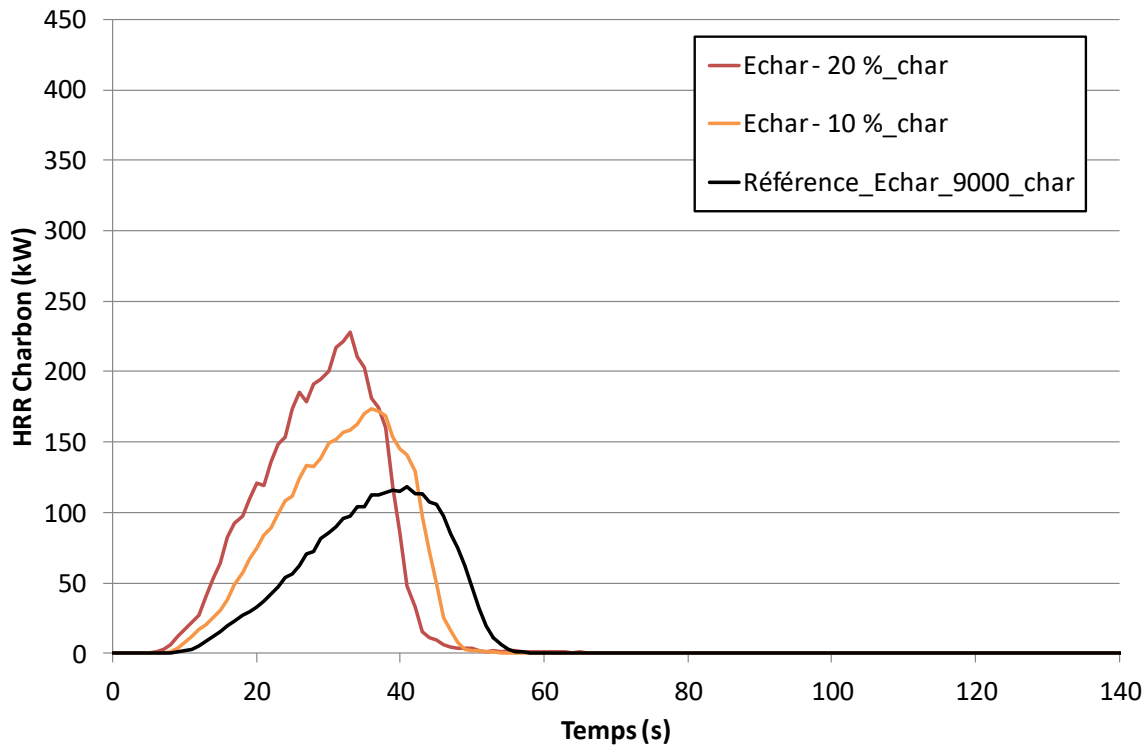


Figure 5-21 : Influence de l'énergie d'activation E_{char} sur la prédiction du HRR issus de la combustion des charbons (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

Sur cette Figure 5-22, nous constatons une nette inflexion de la courbe de HRR pour $E_{char} - 10\%$ à l'instant où se produisait le plateau, et la quasi-disparition du plateau pour $E_{char} - 20\%$. Dans ce cas, le pic de HRR est de 394 kW (contre 230 W pour la valeur de référence) et la consommation de combustible de 37 % (contre 32 % pour la valeur de référence). En diminuant E_{char} , nous accélérons la consommation des particules ce qui non seulement augmente la puissance dégagée par les résidus charbonneux mais entraine également une diminution de la durée de flamme (43s pour $E_{char} - 20\%$ contre 56s pour la valeur de référence).

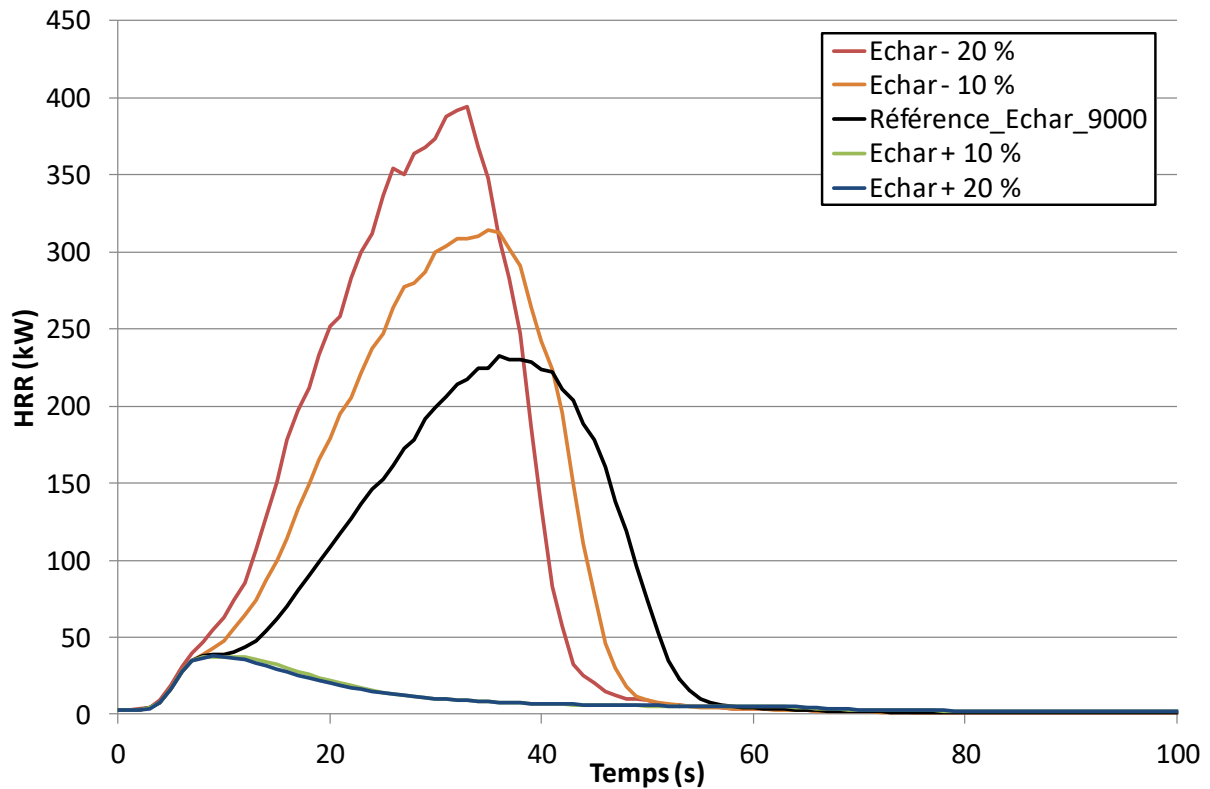


Figure 5-22 : Influence de l'énergie d'activation E_{char} sur la prédiction du HRR (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

La Figure 5-23 et la Figure 22 présentent respectivement les courbes de HRR total et HRR issu de la combustion des charbons pour des valeurs du facteur pré-exponentiel égale à $A_{char} \pm 10\%$ et $A_{char} \pm 20\%$. Ces deux figures montrent une influence du facteur pré-exponentiel sur la puissance dégagée lors de la combustion. Bien qu'une faible augmentation du pic de HRR total soit observable avec l'augmentation de A_{char} , une diminution de celui-ci entraîne une forte diminution du pic de HRR, notamment pour $A_{char} - 20\%$ qui entraîne une diminution du pic de HRR total de 53 % (108 kW contre 230 kW pour la valeur de référence). Toutefois, le plateau sur la courbe de HRR total prédit demeure toujours visible quelle que soit la valeur de A_{char} que nous avons étudiée.

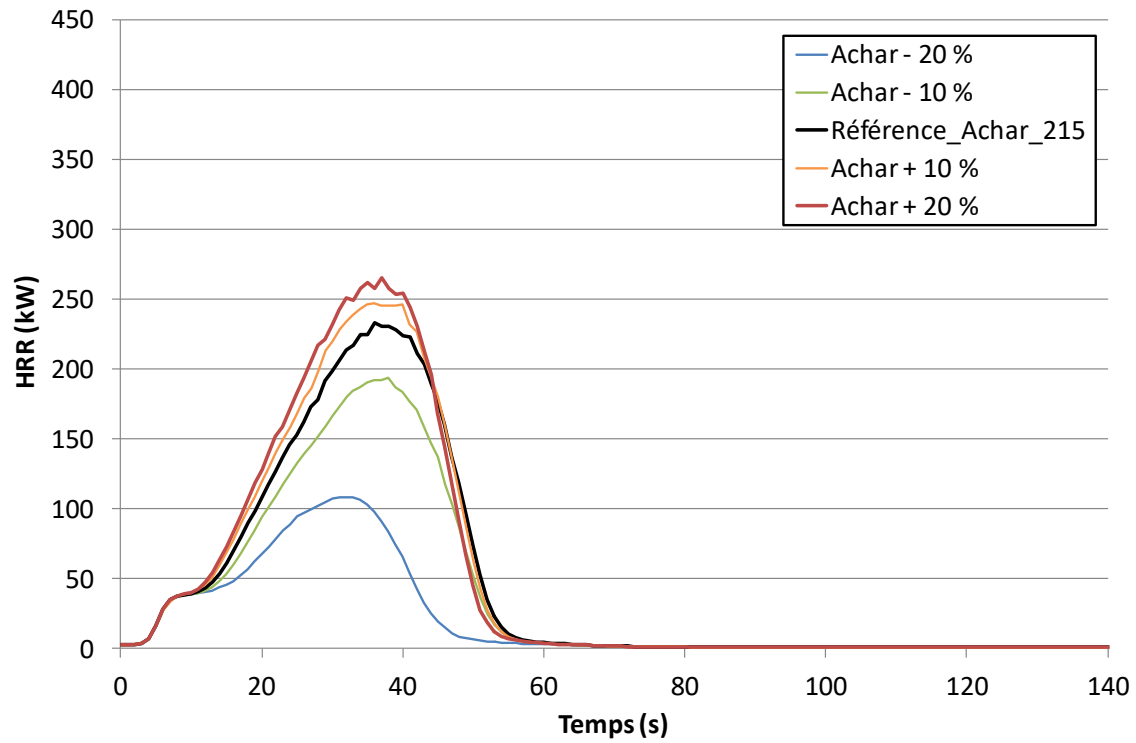


Figure 5-23 : Influence du facteur pré-exponentiel A_{char} sur la prédiction du HRR total (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

La Figure 5-24 montre que la diminution de A_{char} entraîne un pic de HRR des charbons moins importants et une oxydation plus tardive accentuant ainsi l'effet de plateau ainsi qu'une diminution de la durée de combustion (42 s contre 56 s pour la valeur de référence).

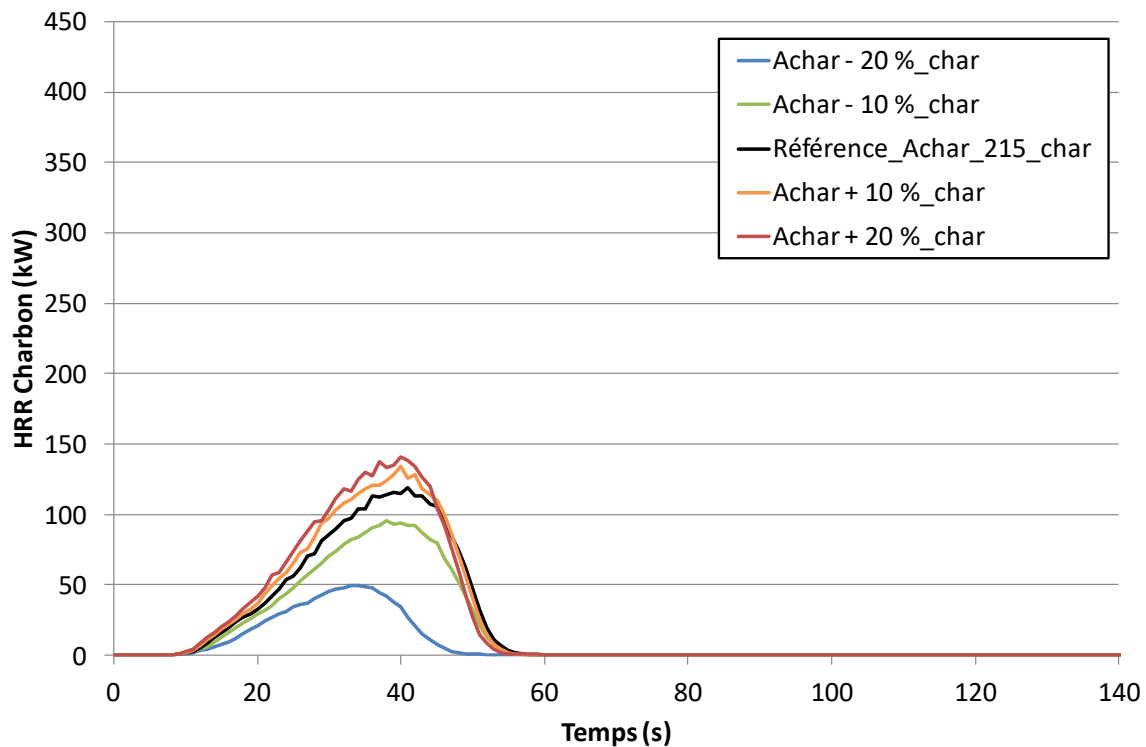


Figure 5-24 : Influence du facteur pré-exponentiel A_{char} sur la prédiction du HRR issu de la combustion des charbons (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

L'analyse de sensibilité réalisée sur les paramètres A_{char} et E_{char} montre que le plateau est atténué par la diminution de E_{char} . L'oxydation des résidus charbonneux intervient plus tôt dans le processus de combustion, ce qui entraîne une augmentation du pic de HRR et de la masse consommée.

Afin d'explorer une plage de variation plus grande de A_{char} , nous avons simulé les cas correspondant à des valeurs de $A_{char} = 430 \text{ ms}^{-1}$ et $A_{char} = 150 \text{ ms}^{-1}$. Nous observons sur la Figure 5-25 une atténuation du plateau à l'allumage pour $A_{char} = 430 \text{ ms}^{-1}$ alors qu'une extinction se produit après le plateau pour $A_{char} = 150 \text{ ms}^{-1}$. Ces deux tendances peuvent être expliquées par la dynamique d'oxydation des résidus charbonneux. L'activation de l'oxydation des charbons est plus précoce pour $A_{char} = 430 \text{ ms}^{-1}$ ce qui atténue le plateau à l'allumage. Pour $A_{char} = 150 \text{ ms}^{-1}$ l'oxydation des charbons est bien trop faible pour maintenir la combustion d'ensemble, ce qui conduit à l'extinction.

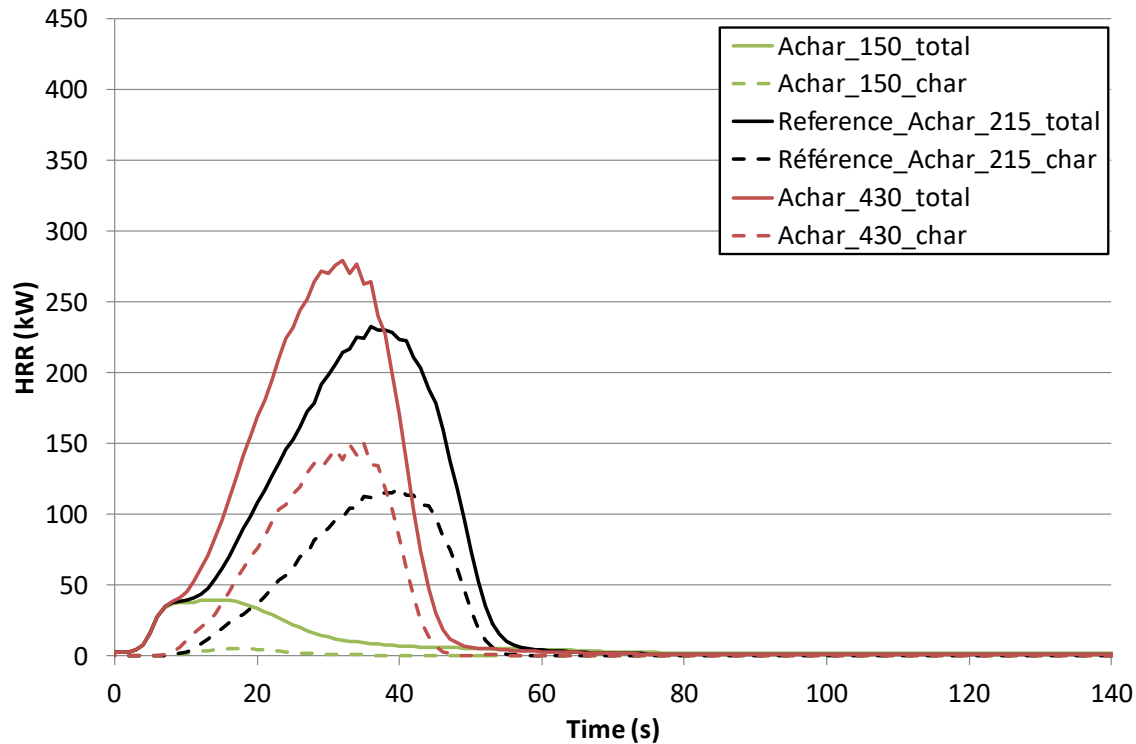


Figure 5-25 : HRR total et HRR issu de la combustion des charbons au cours du temps pour $A_{char} = 430, 150$ et $A_{char} = 215 \text{ ms}^{-1}$ (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

Nous voyons sur la Figure 5-26 comparant les MLR obtenus pour $A_{char} = 430 \text{ ms}^{-1}$ et $A_{char} = 215 \text{ ms}^{-1}$ (référence) que le palier de MLR présent pour les feuilles et brindilles de diamètre 0-2 mm est toujours présent pour le cas $A_{char} = 430 \text{ ms}^{-1}$, bien que légèrement atténué du fait de l'oxydation anticipée des charbons. Nous constatons également que le fait d'augmenter la valeur de A_{char} n'augmente ni la taille des particules impliquées dans la combustion ni leur taux de consommation. Ainsi, pour une valeur de $A_{char} = 430 \text{ ms}^{-1}$, nous obtiendrons un meilleur accord avec l'expérience pour la pente de HRR total mais le pic de HRR sera plus fort et le plateau restera visible.

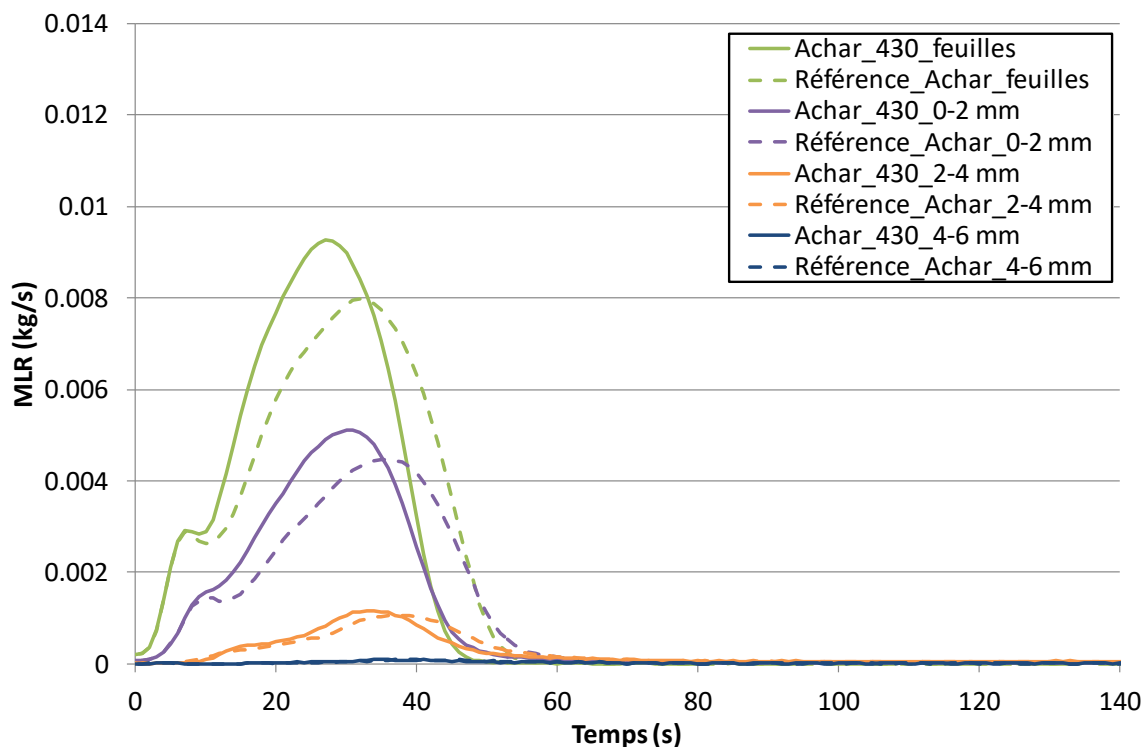


Figure 5-26 : MLR des différentes classes de particules au cours du temps pour $A_{char} = 430$ et $A_{char} = 215 \text{ ms}^{-1}$ (cas d'un ciste avec une teneur en eau des feuilles de 7%)

5.4. Analyse de sensibilité globale des paramètres des termes sources

Afin de mieux comprendre l'effet des paramètres des lois de dégradation sur le comportement de WFDS et d'identifier ceux dont l'impact est le plus important, nous avons mené une analyse de sensibilité globale à l'aide d'une méthode issue de la théorie classique des plans d'expériences. Nous rappelons que l'analyse de sensibilité globale permet d'analyser un modèle mathématique en étudiant l'impact de la variabilité des facteurs d'entrée du modèle sur la variable de sortie. Dans notre cas, l'objectif est de déterminer les entrées responsables de cette variabilité ce qui permet de fixer les entrées dont la variabilité n'influe pas les variables de sorties choisies. Un plan factoriel à 2 niveaux a été réalisé pour un total de 2^5 combinaisons. Le Tableau 5-8 ci-dessous fournit les valeurs basses et hautes des cinq paramètres considérés (facteurs d'entrée du modèle). Ces valeurs correspondent à des variations de $\pm 10\%$ autour de la valeur de référence. Nous avons limité l'étude à des variations de $\pm 10\%$ car l'effet de variations de $\pm 20\%$ ne peut pas être analysé. En effet, l'énergie d'activation de la pyrolyse E_{pyr} devient inférieure à celle de la dessiccation E_{H_2O} pour les valeurs de $E_{H_2O} + 20\%$ et $E_{pyr} - 20\%$, ce qui entraîne la combustion du ciste avant sa dessiccation. Ceci altère l'analyse de sensibilité et la physique de la combustion ne représentant plus la réalité. Il doit être souligné

que A_{H_2O} n'a pas été pris en compte, du fait de l'effet négligeable de ses variations sur les courbes de HRR prédit (cf. Figure 5-17). Les interactions entre les paramètres ont également été considérées du fait même de la méthodologie adoptée. Quatre variables de sortie ont été considérées : le pic de HRR, le pic de MLR, la durée de flamme et le taux de consommation. Le logiciel Minitab 18 a été utilisé pour construire le plan d'expériences (Tableau 5-9) et tracer le diagramme de Pareto.

Tableau 5-8 : Valeurs hautes et basses des paramètres

Paramètres	Valeurs basses	Valeurs hautes
E_{H_2O} (K)	5220	6380
A_{char} (s^{-1})	193.5	236.5
E_{char} (K)	8100	9900
A_{pyr} (s^{-1})	32670	39930
E_{pyr} (K)	6525	7975

Tableau 5-9 : Plan d'expériences et valeurs des variables de sortie

N° du Cas	E_{H_2O}	A_{char}	E_{char}	A_{pyr}	E_{pyr}	Pic de HRR (kW)	Pic de MLR ($g.s^{-1}$)	Durée de flamme (s)	Taux de consommation (%)
1	5220	193.5	8100	32670	6525	505	31	119	55.2
2	5220	193.5	8100	32670	7975	116	6	35	10.0
3	5220	193.5	8100	39930	7975	137	8	38	12.0
4	5220	193.5	8100	39930	6525	474	31	65	3.7
5	5220	193.5	9900	39930	6525	77	8	133	23.9
6	5220	193.5	9900	39930	7975	31	4	16	4.4
7	5220	193.5	9900	32670	7975	30	3	16	3.5
8	5220	193.5	9900	32670	6525	86	9	112	16.7
9	5220	236.5	9900	32670	6525	90	9	111	23.2
10	5220	236.5	9900	32670	7975	29	3	16	4.0
11	5220	236.5	9900	39930	7975	32	4	16	3.8
12	5220	236.5	9900	39930	6525	82	9	131	16.7
13	5220	236.5	8100	39930	6525	503	31	60	50.3
14	5220	236.5	8100	39930	7975	143	8	37	12.3
15	5220	236.5	8100	32670	7975	120	6	34	9.4
16	5220	236.5	8100	32670	6525	558	32	100	46.8
17	6380	236.5	8100	32670	6525	532	34	64	56.9
18	6380	236.5	8100	32670	7975	72	4	24	5.3
19	6380	236.5	8100	39930	7975	79	4	25	5.5
20	6380	236.5	8100	39930	6525	505	36	62	3.5
21	6380	236.5	9900	39930	6525	62	7	140	25.5
22	6380	236.5	9900	39930	7975	25	3	13	3.7

23	6380	236.5	9900	32670	7975	22	2	13	2.9
24	6380	236.5	9900	32670	6525	41	5	149	10.9
25	6380	193.5	9900	32670	6525	41	5	150	22.5
26	6380	193.5	9900	32670	7975	23	2	13	3.3
27	6380	193.5	9900	39930	7975	25	3	13	3.2
28	6380	193.5	9900	39930	6525	62	7	141	10.0
29	6380	193.5	8100	39930	6525	536	35	64	60.6
30	6380	193.5	8100	39930	7975	75	4	25	5.9
31	6380	193.5	8100	32670	7975	68	4	25	4.9
32	6380	193.5	8100	32670	6525	486	33	66	3.3

Effet de la variabilité des facteurs d'entrée sur le pic de HRR

La Figure 5-27 et la Figure 5-28 montrent respectivement le diagramme de Pareto normalisé et le graphique des effets principaux pour le pic de HRR. Nous observons que le pic de HRR est grandement influencé par l'énergie d'activation de l'oxydation des résidus charbonneux (43.5 %) et celle de la pyrolyse (33,0 %). E_{H_2O} ne représente que 0.3 % des effets alors que les coefficients pré-exponentiels A_{pyr} et A_{char} présentent 0 % des effets. Enfin, l'interaction de E_{char} et E_{pyr} représente 22.2 % des effets. Les énergies d'activation de la pyrolyse et de l'oxydation des charbons jouent un rôle important sur la combustion. Plus leurs valeurs sont faibles, plus la combustion s'entretient facilement. L'influence de E_{char} est plus forte que celle de E_{pyr} probablement en raison de la valeur élevée du pouvoir calorifique du charbon devant celui des gaz. En ce qui concerne l'énergie d'activation de la dessiccation, la présence d'eau en faible quantité et l'effet des panneaux radiants diminuent son implication dans la valeur du pic de HRR. Finalement, les facteurs pré-exponentiels ont moins d'impact que les énergies d'activation. Ainsi, pour être en mesure de prédire fidèlement la *combustibility* du ciste, il est important d'identifier avec précision les valeurs de E_{pyr} et E_{char} . La Figure 5-28 confirme que E_{pyr} et E_{char} ont un effet important sur le pic de HRR. Leur diminution entraîne une augmentation du pic de HRR. Nous voyons également sur la Figure 5-28 que les effets des coefficients pré-exponentiels sont très faibles.

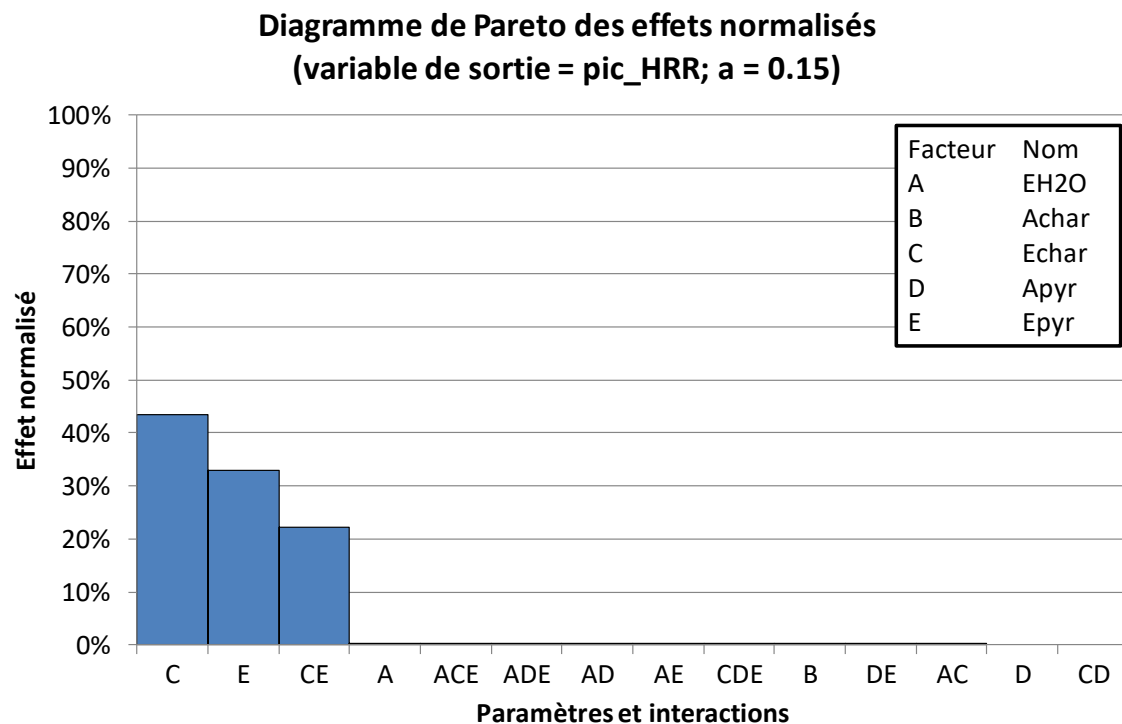


Figure 5-27 : Diagramme de Pareto normalisé associé au pic de HRR

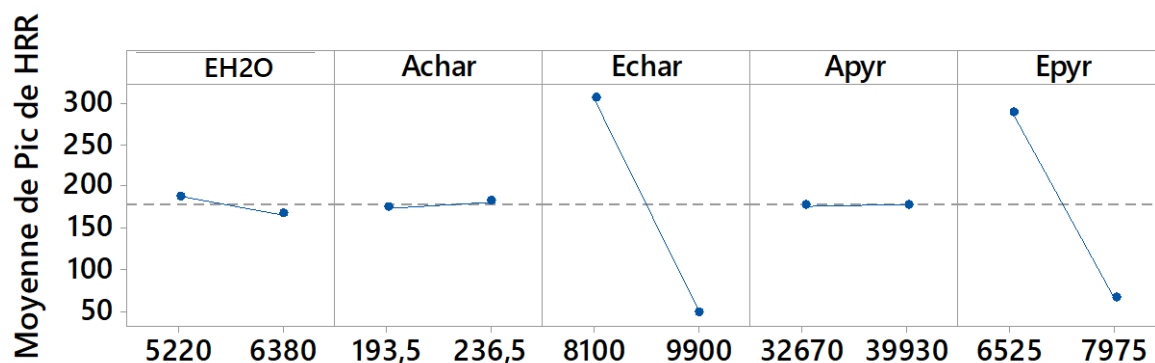


Figure 5-28 : Graphique des effets principaux associé au pic de HRR

Effet de la variabilité des facteurs d'entrée sur le pic de MLR

Le diagramme de Pareto normalisé et le graphique des effets principaux correspondant au pic de MLR sont présentés sur la Figure 5-29 et la Figure 5-30. Le pic de MLR est influencé en majorité par E_{pyr} et E_{char} , qui provoquent respectivement 42.8 % et 33 % des effets. Les paramètres E_{H_2O} , A_{pyr} et A_{char} n'ont pas d'effet puisqu'ils comptent respectivement pour 0.2, 0.1 et 0 % des effets. Contrairement au pic de HRR, E_{char} joue un rôle moins important que E_{pyr} sur le pic de MLR. En effet, seul 30 % de la masse de combustible est transformée en charbon, ce qui réduit l'impact de ce paramètre. Il en est de même pour la dessiccation, la masse

d'eau présente lors de la combustion est bien trop faible au regard des autres grandeurs. Le pic de MLR est principalement relié à la loi de pyrolyse, donc à son énergie d'activation, ce qui en fait le paramètre dont l'impact est le plus important. La Figure 5-30 nous renseigne sur les effets des variations des paramètres sur le pic de MLR. De manière évidente, nous notons que la diminution des énergies d'activation entraine une augmentation du pic de MLR. De la même façon, l'augmentation des coefficients pré-exponentiels conduit à une augmentation du pic de MLR.

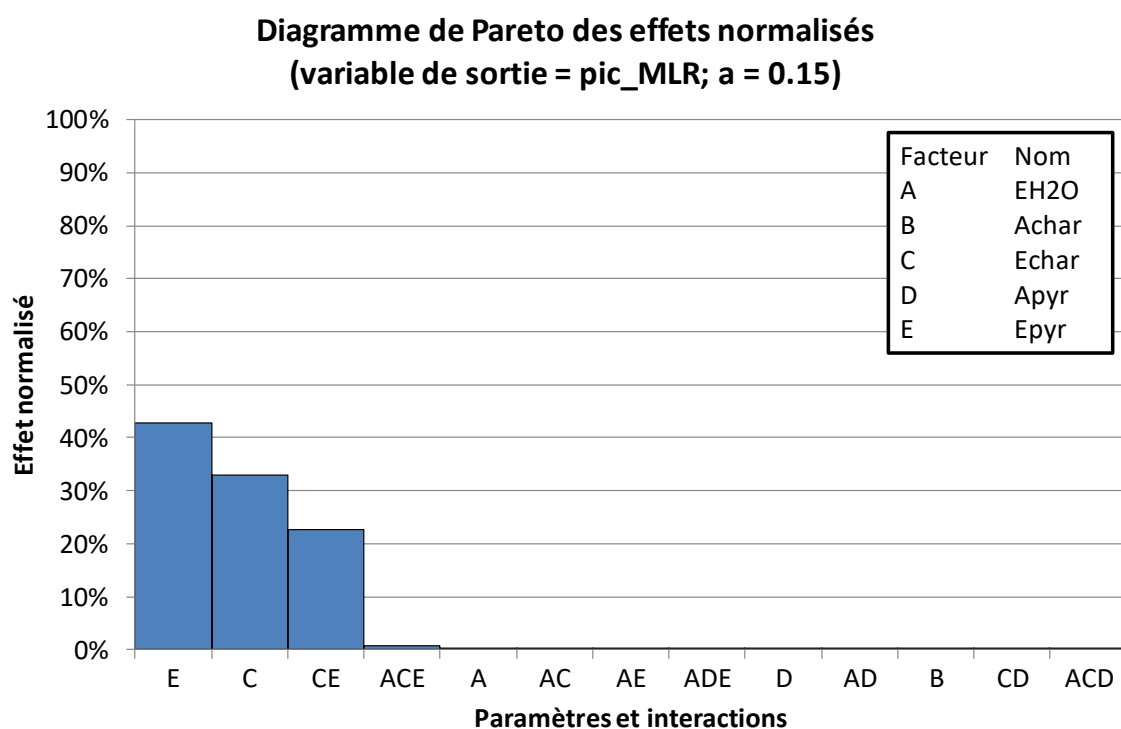


Figure 5-29 : Diagramme de Pareto normalisé associé au pic de MLR

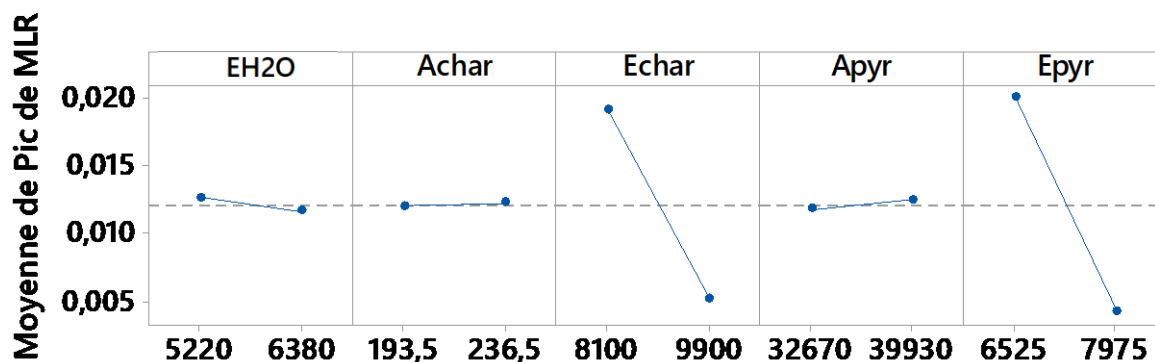


Figure 5-30 : Graphique des effets principaux associé au pic de MLR

Effet de la variabilité des facteurs d'entrée sur le taux de consommation

Le diagramme de Pareto normalisé (Figure 5-31) et le graphique des effets principaux (Figure 5-32) ont été tracés pour le taux de consommation (*consummability*). En ce qui concerne les paramètres pris indépendamment les uns des autres, la plus grande influence est produite par E_{pyr} correspondant à 35,6% des effets suivie de E_{char} (8,9% des effets). Les autres paramètres influencent peu le taux de consommation avec au total 2.4% des effets. L'interaction de la globalité des paramètres d'entrée et celle des paramètres liés à la pyrolyse et l'oxydation des résidus charbonneux, influence quant à elle respectivement 13 et 13.9% des effets. Lorsque l'énergie d'activation de la pyrolyse est faible, la dégradation est favorisée, ce qui entraîne une plus grande perte de masse au cours de la combustion pour toutes les tailles de particules (cf. Figure 5-20).

Les effets des énergies d'activation observés dans les sections précédentes sont confirmés sur la Figure 5-32. La diminution des valeurs de E_{pyr} , E_{char} et E_{H_2O} entraîne une augmentation du taux de consommation. L'effet de A_{char} a également été vérifié, son augmentation provoque celle du taux de consommation. Cependant, il doit être souligné que l'augmentation de A_{pyr} entraîne une diminution de la consommation de combustible. Lorsque A_{pyr} augmente, la dégradation se produit trop rapidement et la combustion est trop rapide pour sécher les plus grosses particules qui ne sont pas dégradées.

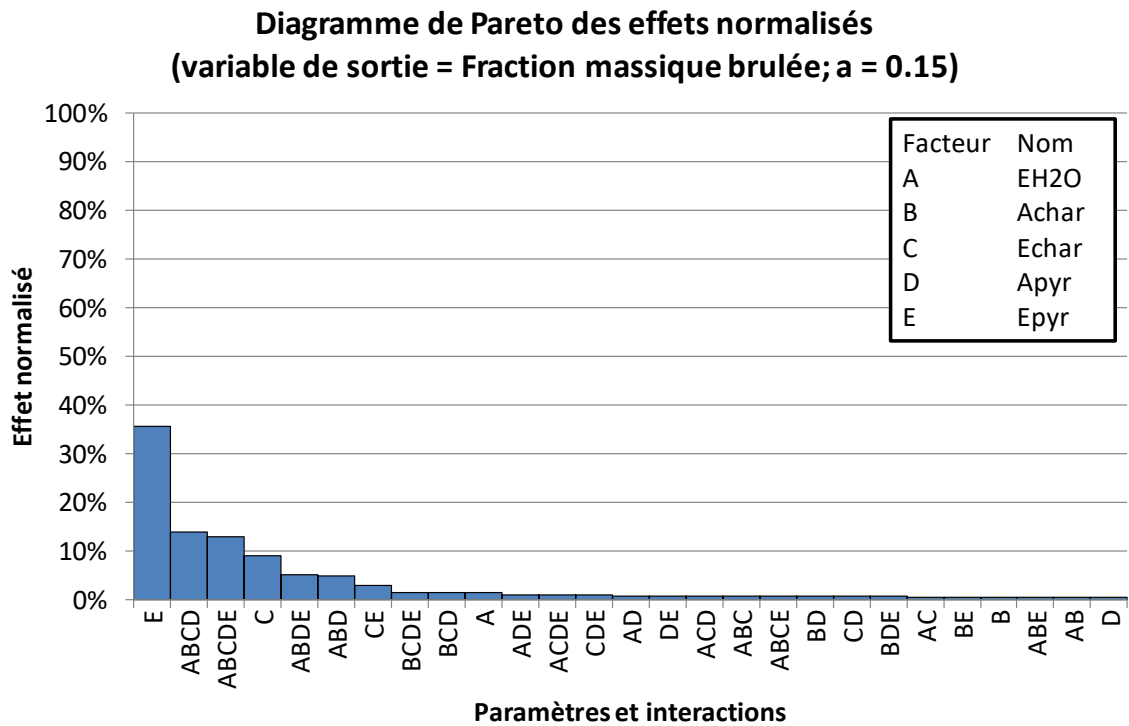


Figure 5-31 : Diagramme de Pareto normalisé associé au taux de consommation

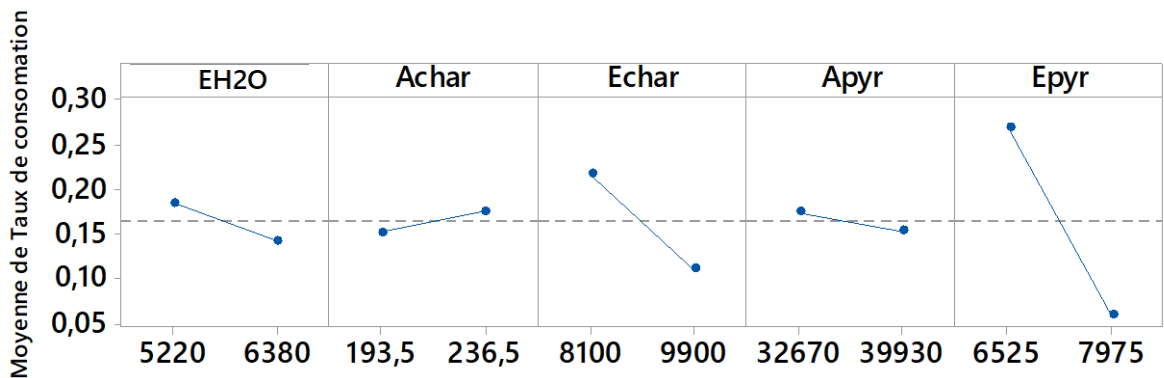


Figure 5-32 : Graphique des effets principaux associé au taux de consommation

Effet de la variabilité des facteurs d'entrée sur la durée de flamme

Le diagramme de Pareto normalisé et le graphique des effets principaux pour la durée de flamme sont présentés sur la Figure 5-33 et la Figure 5-34. La durée de flamme est essentiellement influencée par l'énergie d'activation de la pyrolyse (72.9 %). L'effet de E_{char} est faible (4.9 % des effets) alors que les autres paramètres A_{pyr} , E_{H_2O} et A_{char} n'ont pas d'effet puisqu'ils comptent respectivement pour 0.2, 0.1 et 0.06 % des effets. L'action couplée de E_{char} et E_{pyr} représente 15,0 % des effets. Pour la valeur maximale de E_{pyr} choisie, l'énergie d'activation est trop importante ce qui entraine un arrêt anticipé de la combustion. A l'inverse,

une diminution de E_{pyr} entraîne une plus grande durée de flamme provoquée par l'entretien plus aisé de la combustion et un taux de consommation accru.

Les effets observés lors de l'étude de l'influence de E_{H_2O} et E_{pyr} peuvent être de nouveau relevés sur le graphique des effets présenté sur la Figure 5-34. La diminution des valeurs de E_{H_2O} et E_{pyr} permet d'augmenter la taille des classes particules participant à la combustion ce qui entraîne une augmentation de la durée de combustion. L'augmentation de E_{char} provoque un retard de l'activation de l'oxydation des résidus charbonneux, ce qui entraîne une augmentation de la durée de flamme. A l'inverse, l'augmentation de A_{char} accélère la vitesse de consommation des charbons (une fois activé), ce qui diminue la durée de flamme. Enfin, la diminution de t_f avec l'augmentation de A_{pyr} peut s'expliquer de la même façon que pour le taux de consommation (cf. paragraphe précédent).

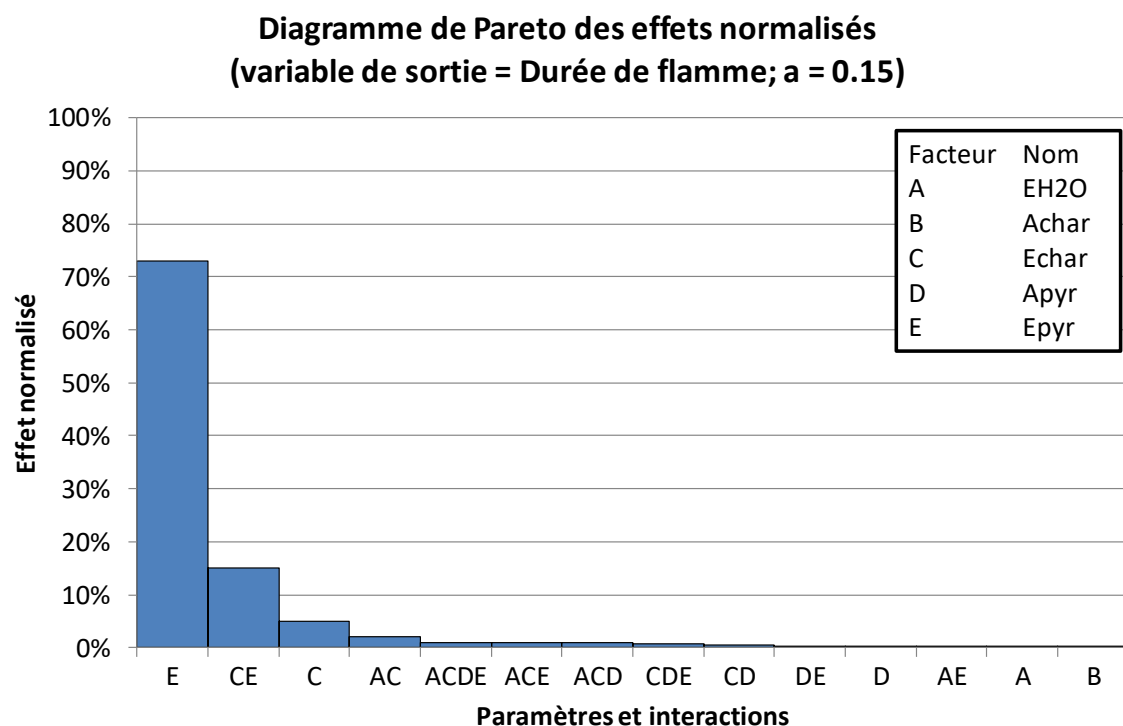


Figure 5-33 : Diagramme de Pareto normalisé associé à la durée de flamme

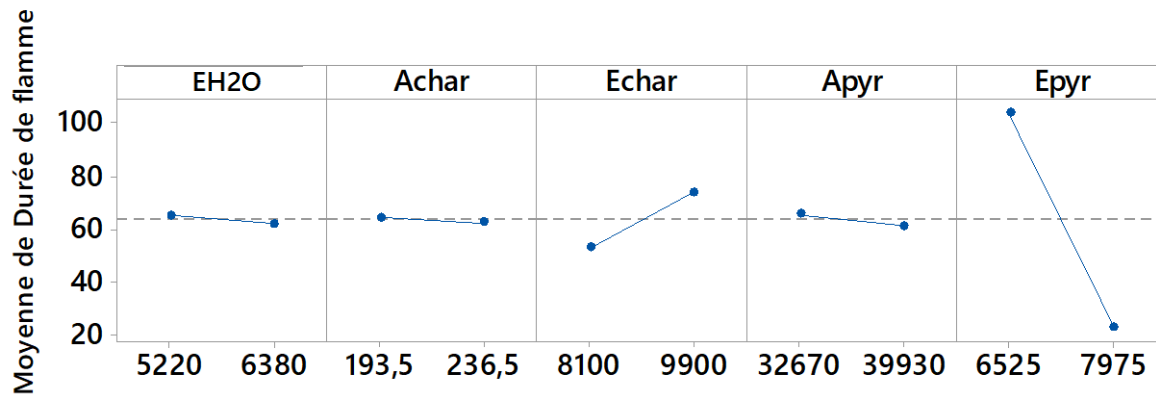


Figure 5-34 : Graphique des effets principaux associé à la durée de flamme

Synthèse des effets de la variabilité des facteurs d'entrée sur les critères de flammability

Cette étude nous a permis d'identifier les paramètres dont l'impact sur les critères liés à la *flammability* sont les plus importants. Nous avons ainsi montré que E_{pyr} , et dans une moindre mesure E_{char} , sont les paramètres d'entrée principalement responsables de la variabilité des variables de sortie analysées. Il faudra donc être en mesure de les identifier de façon aussi précise. En effet, les variations observées pour les quatre grandeurs étudiées sont importantes pour des faibles variations de E_{pyr} ($\pm 10\%$). E_{char} influence plus faiblement que E_{pyr} la durée de flamme et le taux de consommation. Cependant les effets de ce paramètre sont plus forts pour le pic de HRR et du même ordre que les effets de E_{pyr} pour le pic de MLR. Ce second paramètre également être déterminé avec précaution. Bien que les autres paramètres affectent les données calculées, les effets provoqués par leur variation sont faibles par rapport à ceux de E_{pyr} et E_{char} . Ces paramètres demandent donc moins de précision et présentent une marge d'erreur possible plus importante.

Finalement, l'effet de chaque paramètre sur les différents critères de *combustibility*, *sustainability* et *consumability* a pu être observée. La *combustibility* augmente lors de la diminution des énergies d'activation ou de l'augmentation des coefficients pré-exponentiels. La *sustainability* est plus importante lorsque l'énergie d'activation de l'oxydation des résidus carbonneux augmente, à l'inverse, l'augmentation des valeurs des autres paramètres d'entrées entraîne une diminution de la *sustainability*. Enfin, la diminution des énergies d'activation ou l'augmentation de A_{char} provoque une augmentation de la *consumability*. Cependant, l'augmentation de A_{pyr} provoque la diminution de la *consumability*. La combustion est trop rapide et les plus grosses particules n'ont pas le temps de sécher pour participer à la combustion.

5.5. Conclusion

Dans ce chapitre, le code WFDS a été testé grâce aux données récoltées au cours de la caractérisation des cistes et lors de l'étude de leur réaction au feu. Un modèle numérique de cistes a été créé prenant en compte les différentes classes de particules composant un arbuste type. Pour la simulation réalisée avec du ciste sec, WFDS prédit un auto-allumage du ciste mais la combustion ne permet pas au feu de se propager dans le reste du houppier. Un allumage piloté a donc été introduit. Cet allumage a également été utilisé pour la simulation de la combustion d'un ciste avec teneur en eau qui correspond aux expériences réalisées. Dans ce cas, le temps d'allumage a été estimé sur la base de la masse perdue avant l'allumage. Toutefois, la vitesse de perte de masse prédite avant l'allumage étant moins importante que celle observée au cours des expériences, le temps de préchauffage est plus long pour les simulations. Les prédictions de WFDS pour le pic de HRR, la durée de flamme et le taux de consommation de masse sont proches des valeurs expérimentales. Cependant, les courbes de HRR présentent un plateau peu après l'allumage qui ne correspond pas à la réalité expérimentale. Enfin, la diminution de la courbe de HRR à l'extinction est plus rapide que lors des expériences comme nous l'avions déjà noté dans le chapitre 3 pour les feux de litière.

Finalement, une analyse de sensibilité a été réalisée en deux étapes afin d'appréhender l'effet de chacun des nombreux paramètres du code. Lors de la première étape nous avons étudié l'influence des paramètres des principaux sous-modèles de WFDS indépendamment les uns des autres. Cette étude nous a permis de mieux comprendre l'influence de ces paramètres sur la *flammability*. Bien que *l'ignitability* ne soit pas étudiée dans ce chapitre à cause du temps d'allumage fixé, nous avons pu constater que la valeur de E_{pyr} influence fortement le temps d'allumage. Une diminution de cette énergie provoque un allumage anticipé. Dans une seconde étape nous avons effectué une analyse de sensibilité globale des paramètres des sous modèles associés aux termes sources de masse.

Cette analyse a mis en évidence l'importance d'identifier avec précision l'énergie d'activation de la pyrolyse et l'énergie d'activation des résidus charbonneux, qui sont les paramètres ayant la plus grande influence sur les trois des critères *combustibility*, *consumability* et *sustainability* définissant la *flammability*.

Conclusion

Des aménagements forestiers sont mis en place pour limiter la propagation des feux de forêts et ainsi réduire leurs impacts. A ce jour, la technique la plus utilisée consiste à diminuer la charge de combustible afin d'affaiblir la puissance des incendies et de ralentir leur propagation. Cependant, ces aménagements sont réalisés à dire d'experts sans fondements scientifiques. Face à cette problématique, la communauté scientifique étudie la propagation des incendies de végétation dans l'objectif d'améliorer les connaissances sur leur comportement et de fournir des outils d'aide à la décision. Pour cela, elle développe des approches expérimentales et de modélisation.

L'objectif principal de cette thèse s'inscrit dans cette volonté d'amélioration des connaissances fondamentales sur la dynamique de combustion d'arbustes naturels isolés en vue de fournir des bases de validation pour le code de calcul WFDS. Dans ce cadre, nous avons étudié la dynamique de combustion du ciste de Montpellier d'après les critères de réaction au feu (*flammability*) définis par Anderson (1970) et Martin et al. (1994). Pour cela, quatre études ont été conduites en parallèle. Tout d'abord deux études expérimentales ont été réalisées sur la caractérisation structurelle et la réaction au feu du ciste de Montpellier. Ces données ont par la suite servi à la mise en œuvre de simulations pour tester et valider le code WFDS. Dans un premier temps, ce code a été validé pour la propagation de feux de litières composées d'un seul type de particules à partir de résultats expérimentaux obtenus par Morandini et al. (2013) et Tihay et al. (2014). Le code a ensuite été testé sur la combustion de cistes composés de plusieurs types de particules. Cette partie a été couplée à une analyse de sensibilité des différents paramètres d'entrée du code et à l'analyse de sensibilité globale des paramètres liés aux lois de dégradation.

La caractérisation de plusieurs arbustes de ciste de gabarit prédéfini a permis de mettre en évidence la faible variation de la répartition massique des classes de particules qui les composent tout en servant de base à la compréhension de la dynamique de combustion et l'élaboration d'un modèle numérique d'arbuste.

Conclusion

L'analyse de la réaction au feu des cistes a été réalisée suivant différents critères (*ignitability*, *sustainability*, *combustibility* et *consumability*) auxquels nous avons associé des paramètres mesurables (respectivement le temps d'allumage, la durée de flamme, le pic de HRR et le coefficient de croissance à l'allumage, le taux de consommation du végétal). Cela nous a permis de vérifier l'influence de la teneur en eau sur le temps d'allumage et la consommation de combustible. Ainsi, le temps d'allumage augmente avec la teneur en eau alors que le taux de consommation diminue. Le rôle de la position d'allumage a également été observé. Un allumage situé en partie haute du houppier (défavorable à la combustion) entraîne des réactions au feu faible et moyenne alors qu'un allumage en partie basse (favorable à la combustion) provoque des réactions au feu fortes. Nous avons ainsi mis en évidence quatre types de réaction au feu :

- la réaction au feu faible, présentant un pic de HRR et une consommation de masse faibles associés à une durée de flamme très longue
- la réaction au feu moyenne montrant un pic de HRR et une consommation de masse modérés avec des durées de flammes longue
- la réaction au feu forte et rapide pour laquelle les pics de HRR et la consommation de masse sont modérés avec des durées de flammes courtes
- la réaction au feu forte et consommatrice (cas des doubles allumages et des allumages après un temps d'exposition aux panneaux radiants long) avec des pics de HRR et une consommation de masse élevés associés à des durées de flamme longues pour la réaction au feu forte et consommatrice

Il a également été relevé que la composition des cistes varie fortement entre l'été et le reste de l'année. En été, la majorité des feuilles tombent au sol pour former une litière de combustible mort et les fleurs sèchent en restant dans le houppier. Lors de la combustion de ces arbustes, les graines (présentes dans les fleurs) enflammées tombent au sol en allumant les particules présentes et sont également susceptibles de transmettre la combustion à la litière, modifiant fortement les processus de combustion d'un individu.

Le modèle physique-détaillé WFDS a été validé pour la propagation de feux de litières en suivant deux étapes. Tout d'abord, la bonne représentation de l'écoulement non réactif engendré par la hotte aspirante (du dispositif expérimental) a été vérifiée. Les calculs en combustions ont ensuite été effectués et confrontés aux résultats expérimentaux. Pour cela, la résolution spatiale nécessaire à la modélisation de chaque cas de propagation (pente et charge) a été déterminée. Nous avons mis en évidence que :

Conclusion

- la résolution calculée la plus fine ($dx_{g,z_c,min}$) est la plus appropriée pour représenter la combustion
- les puissances et vitesses de propagation et débits de perte de masse prédits en régime établi pour les cas à plat sont en accord avec les valeurs mesurées expérimentalement
- la dynamique d'extinction numérique est trop rapide par rapport à celle observée
- les puissances prédites pour les charges de 0.6 et 0.9 kg/m² en pente sont en adéquation avec les résultats expérimentaux
- la teneur en eau des particules est bien prise en compte par le code pour les valeurs étudiées de 3 à 8 %. En effet, les différences observées dans les courbes de HRR lors des expériences sont bien reproduites par le modèle
- en pente, l'interaction entre la flamme et la hotte d'extraction entraîne une augmentation du pic de HRR et une plus grande vitesse de propagation pour la plus grande charge (1.2 kg/m²)

Le test du code WFDS a été effectué grâce aux données récoltées au cours de la caractérisation des cistes et de l'étude de leur réaction au feu. Un modèle numérique de cistes a été créé, prenant en compte les différentes classes de particules composant un arbuste type. Une simulation de la combustion d'un ciste sec a été réalisée faisant apparaître la présence d'un auto-allumage ne permettant pas au feu de se propager dans le reste du houppier. Un allumage piloté a donc été introduit. Il a également été utilisé pour la simulation de la combustion d'un ciste humide qui correspond aux expériences réalisées. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- la vitesse de perte de masse prédite avant l'allumage est moins élevée que pour les expériences
- les courbes de HRR présentent un plateau peu après l'allumage qui ne correspond pas aux mesures réalisées au cours des expériences
- les prédictions pour le pic de HRR, la durée de flamme et le taux de consommation de masse sont proches des valeurs expérimentales
- la diminution de la courbe de HRR à l'extinction est plus rapide que lors des expériences comme pour les feux de litière

Finalement, deux analyses de sensibilité ont été réalisées pour différents paramètres d'entrée du code WFDS. L'influence de chaque paramètre des principaux sous-modèles de WFDS a d'abord été étudiée. Par la suite, nous avons effectué une analyse de sensibilité globale des paramètres des sous modèles associés aux termes sources de masse. Ces études nous ont permis

Conclusion

de mieux comprendre l'influence des paramètres d'entrée sur la réaction au feu et de mettre en évidence la nécessité d'identifier avec précision la valeur de l'énergie d'activation de la pyrolyse et de l'oxydation des résidus charbonneux qui influencent grandement les critères de la réaction au feu.

Ce travail est un premier pas vers la compréhension de la dynamique de combustion des feux de maquis. Parmi les principaux problèmes rencontrés, la faible intensité des panneaux radiants ne nous permet pas d'étudier avec précision l'*ignitability*. En effet, le flux incident auquel sont soumis les cistes est trop faible (20 kW.m^2) et engendre de grandes variabilités dans les résultats obtenus.

De plus, le changement de structure des arbustes lors de la saison estivale demande une modification du protocole expérimental afin de prendre en compte la litière présente sous les cistes pouvant potentiellement participer activement à la combustion. De ce fait, des expériences en combustion doivent être menées sur des cistes d'été avec litières afin d'étudier l'impact de la chute de graines enflammées sur la combustion. En effet, dans le cas de l'inflammation de la litière, la source de chaleur supplémentaire apportée pourrait être en mesure d'entraîner la consommation de particules plus grandes.

Enfin, des expériences comprenant plusieurs cistes sont nécessaires pour étudier les interactions entre les individus et se rapprocher de la configuration des feux de maquis.

En ce qui concerne WFDS, il sera nécessaire de poursuivre les investigations pour améliorer la prédiction de la réaction au feu d'arbustes.

- Anderson, H.E., 1970. Forest fuel ignitibility. *Fire Technology* 6, 312–319.
- Andrews, P.L., 1986. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-BURN Subsystem, part 1 (No. INT-GTR-194). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT.
- Babrauskas, V., Peacock, R.D., 1992. Heat release rate: The single most important variable in fire hazard. *Fire Safety Journal* 18, 255–272.
- Babrauskas, V., Chastagner, G., Stauss, E., 2001. Flammability of cut christmas trees. Unpublished 2, 3–2.
- Babrauskas, V., 2006. Effective heat of combustion for flaming combustion of conifers. *Canadian Journal of Forest Research* 36, 659–663.
- Balbi, J.-H., Rossi, J.-L., Marcelli, T., Santoni, P.-A., 2007. A 3D physical real-time model of surface fires across fuel beds. *Combustion Science and Technology* 179, 2511–2537.
- Barboni, T., Morandini, F., Rossi, L., Molinier, T., Santoni, P.-A., 2012. Relationship Between Flame Length and Fireline Intensity Obtained by Calorimetry at Laboratory Scale. *Combustion Science and Technology* 184, 186–204.
- Bartoli, P., Simeoni, A., Biteau, H., Torero, J.L., Santoni, P.A., 2011. Determination of the main parameters influencing forest fuel combustion dynamics. *Fire Safety Journal* 46, 27–33.
- Behm, A.L., Duryea, M.L., Long, A.J., Zipperer, W.C., 2004. Flammability of native understory species in pine flatwood and hardwood hammock ecosystems and implications for the wildland–urban interface. *International Journal of Wildland Fire* 13, 355–365.
- Burrows, N.D., 2001. Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. *International Journal of Wildland Fire* 10, 137–143.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., Williams, D., 1983. *Fire in forestry. Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization.* John Wiley & Sons, Inc.
- Chatelon, F.J., Balbi, J.H., Morvan, D., Rossi, J.L., Marcelli, T., 2017. A convective model for laboratory fires with well-ordered vertically-oriented fuel beds. *Fire Safety Journal* 90, 54–61.
- Cheney, N.P., 1981. Fire behaviour. *Fire and the Australian Biota*. (Eds AM Gill, RH Groves, IR Noble) pp 151–175.
- Cheney, N., Gould, J., Catchpole, W., 1993. The Influence of Fuel, Weather and Fire Shape Variables on Fire-Spread in Grasslands. *International Journal of Wildland Fire* 3, 31.

Bibliographie

- Cheney, N., Gould, J., 1995. Fire Growth in Grassland Fuels. *International Journal of Wildland Fire* 5, 237.
- Countryman, C.M., Philpot, C.W., 1970. Physical characteristics of chamise as a wildland fuel. Res. Paper PSW-RP-66. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 16 p 066.
- Curt, T., Schaffhauser, A., Borgniet, L., Dumas, C., Estève, R., Ganteaume, A., Jappiot, M., Martin, W., N'Diaye, A., Poilvet, B., 2011. Litter flammability in oak woodlands and shrublands of southeastern France. *Forest Ecology and Management* 261, 2214–2222.
- Dahale, A., Ferguson, S., Shotorban, B., Mahalingam, S., 2013. Effects of distribution of bulk density and moisture content on shrub fires. *International Journal of Wildland Fire* 22, 625.
- Dahale, A., Shotorban, B., Mahalingam, S., 2015. Interactions of fires of neighbouring shrubs in two- and three-shrub arrangements. *International Journal of Wildland Fire* 24, 624.
- Delichatsios, M.A., Panagiotou, T.H., Kiley, F., 1991. The use of time to ignition data for characterizing the thermal inertia and the minimum (critical) heat flux for ignition or pyrolysis. *Combustion and Flame* 84, 323–332.
- Dimitrakopoulos, A.P., Papaioannou, K.K., 2001. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology* 37, 143–152.
- Domalski, E.S., Jobe Jr, T.L., Milne, T.A., 1986. Thermodynamic data for biomass conversion and waste incineration. National Bureau of Standards, Washington, DC (US); Solar Energy Research Inst., Golden, CO (US).
- Dungan, K.W., 2007. Performance-Based Approach to Designing and Analyzing Fire Detection Systems. NFPA 72® National Fire Alarm Code®(2007 ed), 72-194
- Dupuy, J.-L., Maréchal, J., Portier, D., Valette, J.-C., 2011. The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire* 20, 272.
- Etlinger, M.G., Beall, F.C., 2005. Development of a laboratory protocol for fire performance of landscape plants. *International Journal of Wildland Fire* 13, 479–488.
- Fernandes, P.M., Botelho, H., Rego, F., Loureiro, C., 2008. Using fuel and weather variables to predict the sustainability of surface fire spread in maritime pine stands. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 190–201.
- Finney, M.A., 1998. FARSITE, Fire Area Simulator—model development and evaluation. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station Ogden, UT.
- Fonda, R.W., Belanger, L.A., Burley, L.L., 1998. Burning characteristics of western conifer needles. *Northwest science (USA)*.
- Frandsen, W.H., 1971. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame* 16, 9–16.

- Ganteaume, A., Marielle, J., Corinne, L.-M., Thomas, C., Laurent, B., 2011. Effects of vegetation type and fire regime on flammability of undisturbed litter in Southeastern France. *Forest Ecology and Management* 261, 2223–2231.
- Ganteaume, A., Jappiot, M., Curt, T., Lampin, C., Borgniet, L., 2014. Flammability of litter sampled according to two different methods: comparison of results in laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire* 23, 1061.
- Ghetti, P., Ricca, L., Angelini, L., 1996. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel* 75, 565–573.
- Golovistikov, I.N., 1975. [Ability of antilymphocyte sera to counteract the allogeneic inhibition of hematopoietic stem cells]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 223, 1245–1247.
- Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Martínez, E., Madrigal, J., Lampin-Cabaret, C., Blanc, L., Colin, P.Y., Pérez-Gorostiaga, P., Vega, J.A., 2002. Flammability of some fuel beds common in the South-European ecosystems, in: IV International Conference Forest Fire Research.
- Hinkley, P.L., Wraight, H.G., Wadley, A.I., 1968. Rates of heat Output and Heat Transfer in the Fire Propagation Test. *Fire Safety Science* 709, 1–1.
- Houssami, M.E., Thomas, J.C., Lamorlette, A., Morvan, D., Chaos, M., Hadden, R., Simeoni, A., 2016. Experimental and numerical studies characterizing the burning dynamics of wildland fuels. *Combustion and Flame* 168, 113–126.
- Huggett, C., 1980. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials* 4, 61–65.
- Janssens, M., 1992. Room fire models, Chapter 6 of “Heat Release in Fires”, edited by Babrauskas, V. & Grayson, S.J. Elsevier Applied Science.
- Koo, E., Pagni, P., Stephens, S., Huff, J., Woycheese, J., Weise, D., 2005. A Simple Physical Model For Forest Fire Spread Rate. *Fire Safety Science* 8, 851–862.
- Lautenberger, C., Fernandez-Pello, C., 2009. A model for the oxidative pyrolysis of wood. *Combustion and Flame* 156, 1503–1513.
- Leonelli, L., 2018. Caractérisation des fumées issues de feux de végétation contrôlés : termes sources, phases d’émissions et impact sur les opérationnels (PhD Thesis). Université Pascal Paoli.
- Leroy, V., Cancellieri, D., Leoni, E., 2006. Thermal degradation of ligno-cellulosic fuels: DSC and TGA studies. *Thermochimica Acta* 451, 131–138.
- Leroy, V., 2007. Contribution à la modélisation des feux de forêt : Cinétique de dégradation thermique et Cinétique de combustion des végétaux (PhD Thesis). Université Pascal Paoli.
- Li, J., 2011. Experimental investigation of bulk density and its role in fire behavior in live shrub fuels (PhD Thesis). University of California, Riverside.
- Li, J., Mahalingam, S., Weise, D.R., 2017. Experimental investigation of fire propagation in single live shrubs. *International Journal of Wildland Fire* 26, 58.

Bibliographie

- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., 2013. A new bench-scale methodology for evaluating the flammability of live forest fuels. *Journal of Fire Sciences* 31, 131–142.
- Magalhães DE, R.M.Q., Schwilk, D.W., 2012. Leaf traits and litter flammability: evidence for non-additive mixture effects in a temperate forest: *Non-additive effects in litter flammability*. *Journal of Ecology* 100, 1153–1163.
- Marsden-Smedley, J.B., Catchpole, W.R., Pyrke, A., 2001. Fire modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. IV. Sustaining versus non-sustaining fires. *Int. J. Wildland Fire* 10, 255–262.
- Martin, R., Gordon, D., Gutierrez MA, Lee, D., Molina-Terrén DM, Schroeder RA, Sapsis DB, Stephens SL, 1993. Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation. Unpublished.
- McAllister, S., Finney, M., 2014. Convection ignition of live forest fuels. *Fire Safety Science* 11, 1312–1325.
- McAllister, S., Weise, D.R., 2017. Effects of Season on Ignition of Live Wildland Fuels Using the Forced Ignition and Flame Spread Test Apparatus. *Combustion Science and Technology* 189, 231–247.
- McArthur, A.G., 1966. Weather and grassland fire behaviour. Forestry and Timber Bureau, Department of national Development, Commonwealth of Australia.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K., 2013a. Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model. NIST special publication 1018, 175.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K., 2013b. Fire dynamics simulator user's guide. NIST special publication 1019, 6th Edition.
- Mell, W., Jenkins, M.A., Gould, J., Cheney, P., 2007. A physics-based approach to modelling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire* 16, 1.
- Mell, W., Maranghides, A., McDermott, R., Manzello, S.L., 2009. Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees. *Combustion and Flame* 156, 2023–2041.
- Morandini, F., Perez-Ramirez, Y., Tihay, V., Santoni, P.-A., Barboni, T., 2013. Radiant, convective and heat release characterization of vegetation fire. *International Journal of Thermal Sciences* 70, 83–91.
- Morandini, F., Santoni, P.-A., Balbi, J.-H., 2000. Validation Study of a Two-Dimensional Model of Fire Spread Across a Fuel Bed. *Combustion Science and Technology* 157, 141–165.
- Morandini, F., Santoni, P., Balbi, J., 2001. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal* 36, 519–543.
- Morandini, F., Santoni, P.A., Balbi, J.H., Ventura, J.M., Mendes-Lopes, J.M., 2002. A two-dimensional model of fire spread across a fuel bed including wind combined with slope conditions. *International Journal of Wildland Fire* 11, 53.

Bibliographie

- Morandini, F., Simeoni, A., Santoni, P.A., Balbi, J.H., 2005. A model for the spread of fire across a fuel bed incorporation the effects of wind and slope. *Combustion Science and Technology* 177, 1381–1418.
- Morandini, F., Silvani, X., Rossi, L., Santoni, P.-A., Simeoni, A., Balbi, J.-H., Louis Rossi, J., Marcelli, T., 2006. Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties. *Fire Safety Journal* 41, 229–235.
- Morvan, D., Dupuy, J.L., 2001. Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame* 127, 1981–1994.
- Morvan, D., Dupuy, J., 2003. Numerical Simulation Of The Propagation Of A Surface Fire Through A Mediterranean Shrub. *Fire Safety Science* 7, 557–568.
- Morvan, D., Méradji, S., Accary, G., 2009. Physical modelling of fire spread in Grasslands. *Fire Safety Journal* 44, 50–61.
- Morvan, D., 2011. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling. *Fire technology* 47, 437–460.
- Morvan, D., 2015. Numerical study of the behaviour of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer. *Fire Safety Journal* 71, 34–48.
- Overholt, K.J., Cabrera, J., Kurzawski, A., Koopersmith, M., Ezekoye, O.A., 2014. Characterization of Fuel Properties and Fire Spread Rates for Little Bluestem Grass. *Fire Technology* 50, 9–38.
- Padhi, S., Shotorban, B., Mahalingam, S., 2016. Computational investigation of flame characteristics of a non-propagating shrub fire. *Fire Safety Journal* 81, 64–73.
- Padhi, S., Shotorban, B., Mahalingam, S., 2017. A computational study of the interactions of three adjacent burning shrubs subjected to wind. *Fire Safety Journal* 91, 749–757.
- Papió, C., Trabaud, L., 1991. Comparative Study of the Aerial Structure of Five Shrubs of Mediterranean Shrublands. *for sci* 37, 146–159.
- Park, W.C., Atreya, A., Baum, H.R., 2010. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. *Combustion and Flame* 157, 481–494.
- Parker, J.C., 1989. Multiphase flow and transport in porous media. *Reviews of Geophysics* 27, 311–328.
- Perez-Ramirez, Y., Mell, W.E., Santoni, P.A., Tramoni, J.B., Bosseur, F., 2017. Examination of WFDS in Modeling Spreading Fires in a Furniture Calorimeter. *Fire Technology* 53, 1795–1832.
- Pickett, B.M., Isackson, C., Wunder, R., Fletcher, T.H., Butler, B.W., Weise, D.R., 2010. Experimental measurements during combustion of moist individual foliage samplesA. *International Journal of Wildland Fire* 19, 153–162.
- Plucinski, M.P., Catchpole, W.R., 2001. Predicting ignition thresholds in litter layers, in: MODSIM 2001 International Congress on Modelling and Simulation, December. pp. 967–971.

Bibliographie

- Plucinski, M.P., Anderson, W.R., 2008. Laboratory determination of factors influencing successful point ignition in the litter layer of shrubland vegetation. *International Journal of Wildland Fire* 17, 628.
- Plucinski, M.P., Anderson, W.R., Bradstock, R.A., Gill, A.M., 2010. The initiation of fire spread in shrubland fuels recreated in the laboratory. *International Journal of Wildland Fire* 19, 512.
- Pope, S.B., 2004. Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. *New Journal of Physics* 6, 35–35.
- Porterie, B., Morvan, D., Larini, M., Loraud, J.C., 1998. Wildfire propagation: A two-dimensional multiphase approach. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 34, 139–150.
- Porterie, B., Morvan, D., Loraud, J.C., Larini, M., 2000. Firespread through fuel beds: Modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics. *Physics of Fluids* 12, 1762–1782.
- Porterie, B., Consalvi, J.L., Kaiss, A., Loraud, J.C., 2005. Predicting wildland fire behavior and emissions using a fine-scale physical model. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 47, 571–591.
- Prince, D.R., Fletcher, M.E., Shen, C., Fletcher, T.H., 2014. Application of L-systems to geometrical construction of chamise and juniper shrubs. *Ecological Modelling* 273, 86–95.
- Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A., Hanan, J.S., Fracchia, F.D., Fowler, D.R., de Boer, M.J.M., Mercer, L., 1990. *The algorithmic beauty of plants* Springer. New York.
- Quintiere, J.G., Grove, B.S., 1998. A unified analysis for fire plumes. *Symposium (International) on Combustion* 27, 2757–2766.
- Ritchie, S., Steckler, K., Hamins, A., Cleary, T., Yang, J., Kashiwagi, T., 1997. The Effect Of Sample Size On The Heat Release Rate Of Charring Materials. *Fire Safety Science* 5, 177–188.
- Rochoux, M., 2014. Vers une meilleure prévision de la propagation d'incendies de forêt: evaluation de modèles et assimilation de données (PhD Thesis). Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
- Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.
- Rundel, P.W., Parsons, D.J., 1979. Structural Changes in Chamise (*Adenostoma fasciculatum*) along a Fire-Induced Age Gradient. *Journal of Range Management* 32, 462.
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T.H., Boca, R., Libertà, G., Branco, A., de Rigo, D., Ferrari, D., Maianti, P., Vivancos, T.A., Schulte, E., 2017. *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa* 2016.
- Santana, V.M., Marrs, R.H., 2014. Flammability properties of British heathland and moorland vegetation: Models for predicting fire ignition. *Journal of Environmental Management* 139, 88–96.
- Santoni, P.-A., 1998. Elaboration of an evolving calculation domain for the resolution of a fire spread model. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 33, 279–298.

Bibliographie

- Santoni, P.A., Simeoni, A., Rossi, J.L., Bosseur, F., Morandini, F., Silvani, X., Balbi, J.H., Cancellieri, D., Rossi, L., 2006. Instrumentation of wildland fire: Characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub. *Fire Safety Journal* 41, 171–184.
- Santoni, P.-A., Morandini, F., Barboni, T., 2010. Steady and Unsteady Fireline Intensity of Spreading Fires at Laboratory Scale. *The Open Thermodynamics Journal* 4, 212–219.
- Santoni, P.-A., Filippi, J.-B., Balbi, J.-H., Bosseur, F., 2011. Wildland Fire Behaviour Case Studies and Fuel Models for Landscape-Scale Fire Modeling. *Journal of Combustion* 2011, 1–12.
- Scarff, F.R., Westoby, M., 2006. Leaf litter flammability in some semi-arid Australian woodlands. *Functional Ecology* 20, 745–752.
- Schemel, C.F., Simeoni, A., Biteau, H., Rivera, J.D., Torero, J.L., 2008. A calorimetric study of wildland fuels. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, 1381–1389.
- Shen, C., Fletcher, T.H., 2015. Fuel Element Combustion Properties for Live Wildland Utah Shrubs. *Combustion Science and Technology* 187, 428–444.
- Spearpoint, M., Quintiere, J., 2001. Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model — effect of species, grain orientation and heat flux. *Fire Safety Journal* 36, 391–415.
- Stocks, B.J., Alexander, M.E., Lanoville, R.A., 2004. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *Canadian Journal of Forest Research* 34, 1543–1547.
- Tachajapong, W., Lozano, J., Mahalingam, S., Weise, D.R., 2014. Experimental modelling of crown fire initiation in open and closed shrubland systems. *International Journal of Wildland Fire* 23, 451.
- Tanskanen, H., 2002. Ignition potential of Norway spruce and Scots pines stands in southern Finland. IV International Conference on Forest Fire Research.
- Thornton, W.M., 1917. XV. *The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds*. *Philosophical Magazine Series* 6 33, 196–203.
- Tihay, V., Morandini, F., Santoni, P.A., Perez-Ramirez, Y., Barboni, T., 2012. Study of the influence of fuel load and slope on a fire spreading across a bed of pine needles by using oxygen consumption calorimetry. *Journal of Physics: Conference Series* 395, 012075.
- Tihay, V., Santoni, P.-A., Barboni, T., Leonelli, L., 2014. Experimental and theoretical study of diameter effect on the ignition of cistus twigs, in: *Advances in Forest Fire Research*. Imprensa da Universidade de Coimbra, pp. 179–189.
- Viegas, D.X., Pita, L.P., 2004. Fire spread in canyons. *Int. J. Wildland Fire* 13, 253–274.
- Weise, D.R., White, R.H., Beall, F.C., Etlinger, M., 2005. Use of the cone calorimeter to detect seasonal differences in selected combustion characteristics of ornamental vegetation. *International Journal of Wildland Fire* 14, 321–338.
- White, R.H., Dietenberger, M.A., 2001. Wood products: thermal degradation and fire. *Encyclopedia of materials: science and technology*. [SI]: Elsevier Science Ltd, c2001: Pages 9712-9716.

- Xanthopoulos, G., Ghosn, D., Kazakis, G., 2006. Investigation of the wind speed threshold above which discarded cigarettes are likely to be moved by the wind. *International Journal of Wildland Fire* 15, 567.
- Zaïda, J., 2012. Etude expérimentale et numérique de la dégradation thermique des lits combustibles végétaux. PhD, University of Ouagadougou.
- Zhou, X., Mahalingam, S., Weise, D., 2005. Modeling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed. *Combustion and Flame* 143, 183–198.
- Zhou, X., Mahalingam, S., Weise, D., 2007. Experimental study and large eddy simulation of effect of terrain slope on marginal burning in shrub fuel beds. *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 2547–2555.

A.1. Présentation du ciste de Montpellier

Le ciste de Montpellier (*cistus Monspeliensis*) est un arbuste faisant partie de la famille des cistacées. Sa hauteur peut varier de 0.5 à 1.2 m. Il pousse sur des terrains siliceux et peut se trouver dans la zone méso méditerranéenne inférieure. Des feuilles lancéolées et sans pétioles net composent son feuillage persistant vert. Lors de sa floraison (d'avril à juin), une inflorescence en cyme unipare hélicoïde composée de fleurs à cinq pétales blancs peut être observée. Au cours de l'été, ses fleurs deviennent marron à cause de la chaleur et du manque d'eau.



Figure A.1-1 : Photographie de ciste de Montpellier

Il est fréquent que le ciste de Montpellier s'installe suite à la dégradation des forêts et maquis sous l'action répétée des feux. En effet, c'est un arbuste dit pyrophyte ayant la particularité de posséder des graines résistantes au feu pouvant rapidement germer après son passage.

A.2. Courbes de correspondance des teneurs en eau

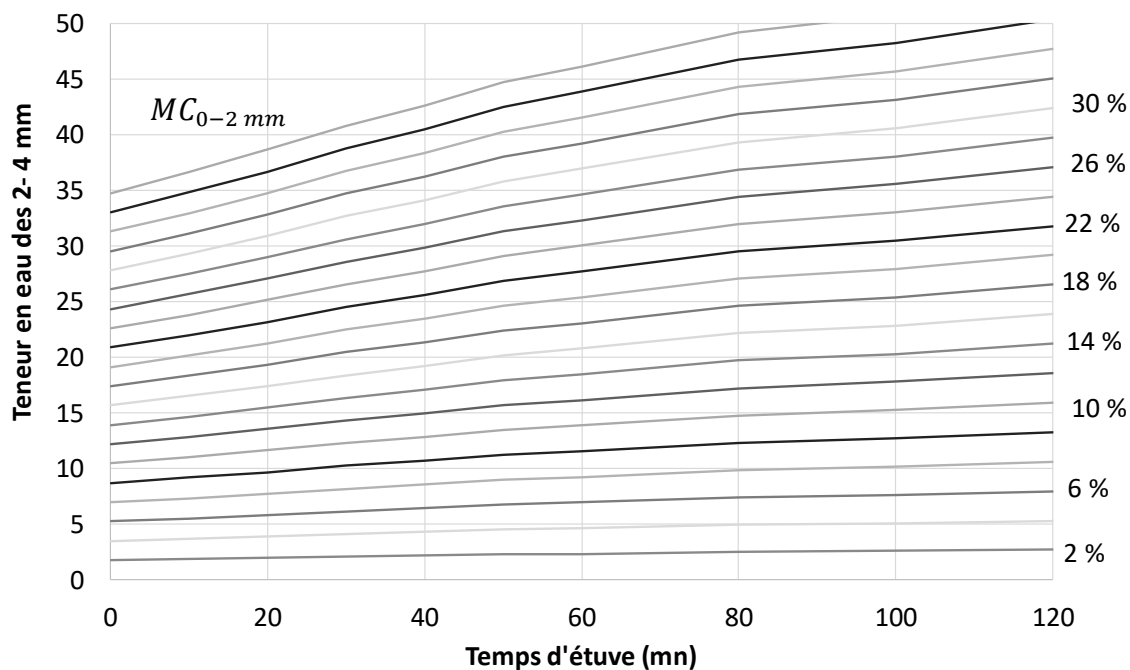


Figure A.2-1 : Teneur en eau de la classe de particule 2-4 mm en fonction du temps d'étuve et de la teneur en eau de la classe 0-2 mm

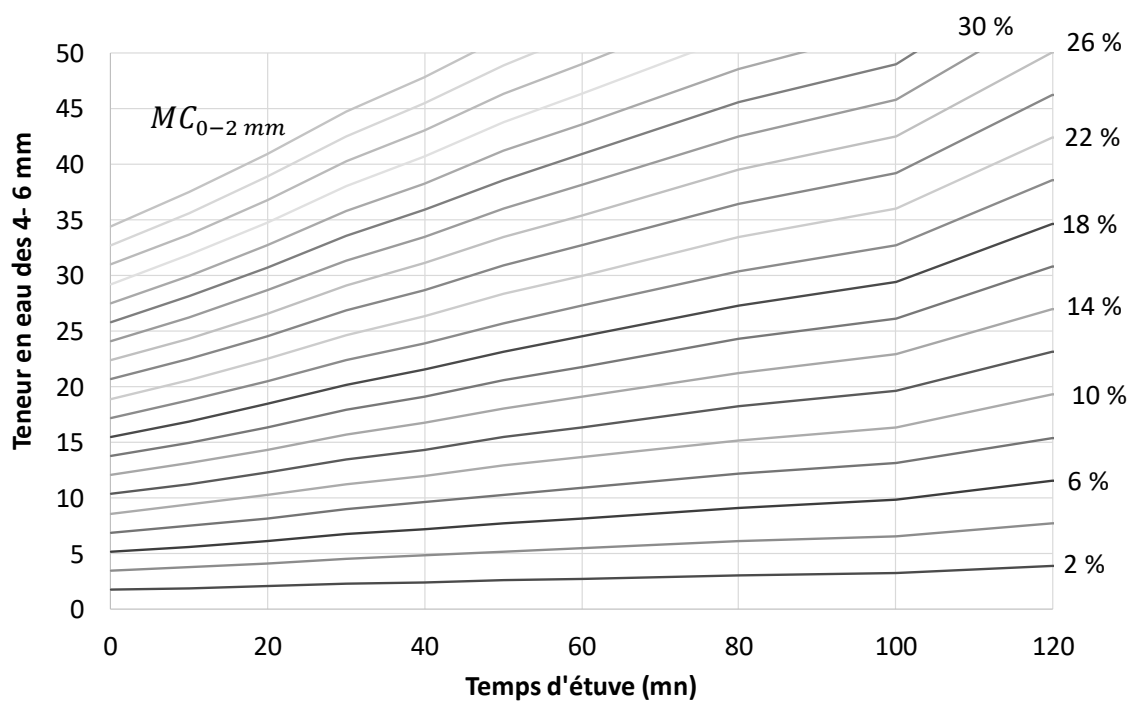


Figure A.2-2 : Teneur en eau de la classe de particule 4-6 mm en fonction du temps d'étuve et de la teneur en eau de la classe 0-2 mm

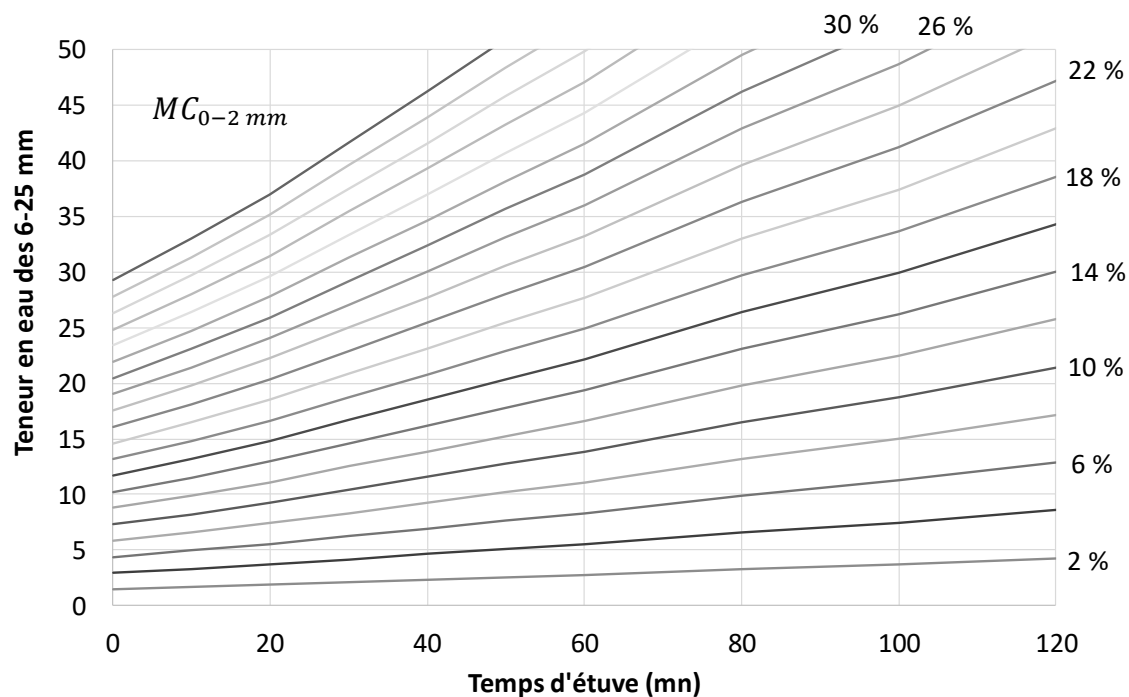


Figure A.2-3 : Teneur en eau de la classe de particule 6-25 mm en fonction du temps d'étuve et de la teneur en eau de la classe 0-2 mm

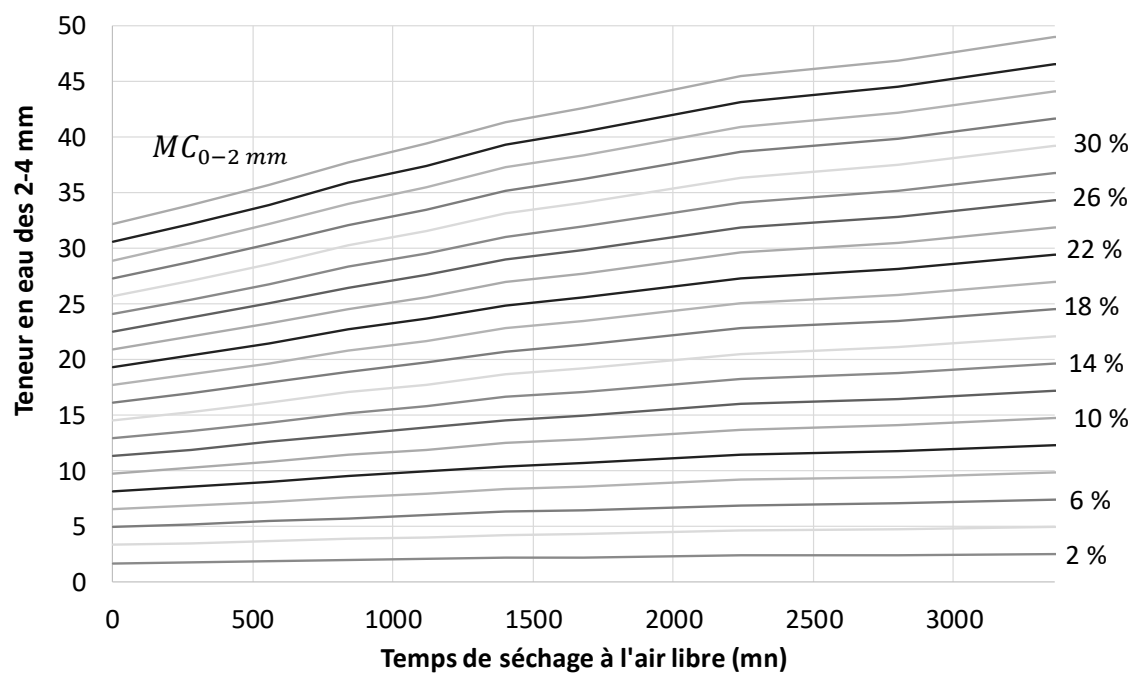


Figure A.2-4 : Teneur en eau de la classe de particule 2-4 mm en fonction du temps de séchage à air libre et de la teneur en eau de la classe 0-2 mm

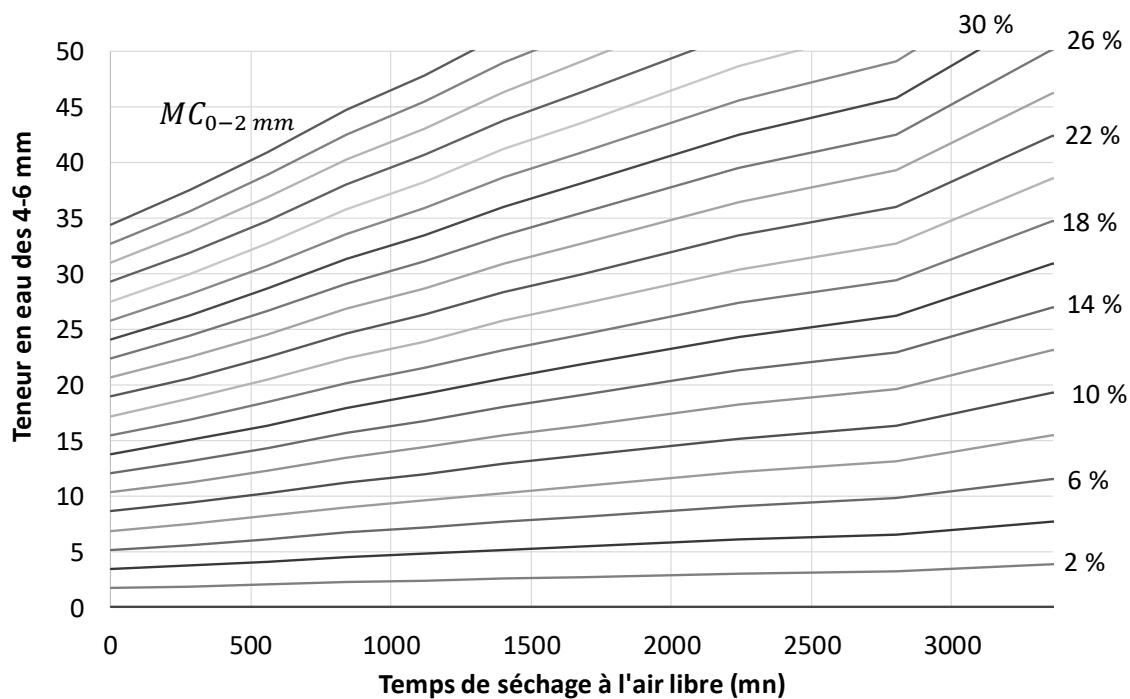


Figure A.2-5 : Teneur en eau de la classe de particule 4-6 mm en fonction du temps de séchage à air libre et de la teneur en eau de la classe 0-2 mm

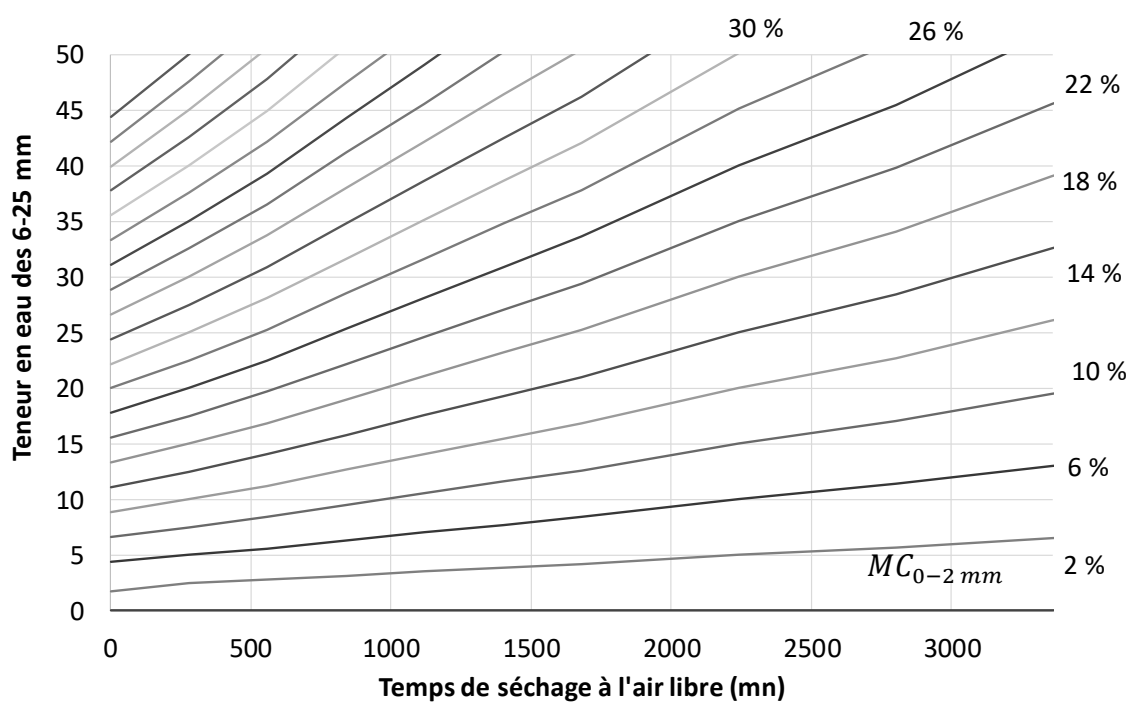


Figure A.2-6 : Teneur en eau de la classe de particule 6-25 mm en fonction du temps de séchage à air libre et de la teneur en eau de la classe 0-2 mm

A.3 Caractérisation des panneaux radiants

Afin de mieux connaître la capacité de notre installation et de caractériser au mieux le préchauffage pour appliquer des conditions initiales réalistes pour l'étude numérique, une caractérisation des panneaux radiants a été réalisée. Les panneaux radiants sont des modèles électriques Raymax 2030 du constructeur Watlow alimentés en 230 V monophasés (puissance max 5750Watts) offrant une surface de chauffe totale de 0.92 m² (Figure A.3-1). La distribution de température à la surface des panneaux et la densité de flux radiatif reçue à distance ont été mesurées afin d'évaluer le pouvoir émissif des panneaux et de définir la distance entre les panneaux et l'arbuste. Lors de cette caractérisation, les panneaux ont été alimentés à pleine puissance, ce qui correspond à une température de surface mesurée de 530 °C.



Figure A.3-1 : Ensemble de 2x2 panneaux radiants utilisés pour chauffer les cistes

Cartographie de la densité de flux radiatif à 1m des panneaux

Dans un premier temps, une cartographie du flux radiatif émit par un ensemble de deux panneaux radiants a été réalisée. Un fluxmètre total Medtherm avec un angle de vue de 180° et calibré pour une valeur maximum de 20 kW/m² a été utilisé. Celui-ci a été placé à 1 m de distance du centre de l'ensemble des panneaux en 25 positions (Figure A.3-2) correspondant aux valeurs suivantes des angles α et φ : $\alpha = [30, 60, 90, 120, 150]$ et $\varphi = [-60, -30, 0, 30, 60]$.

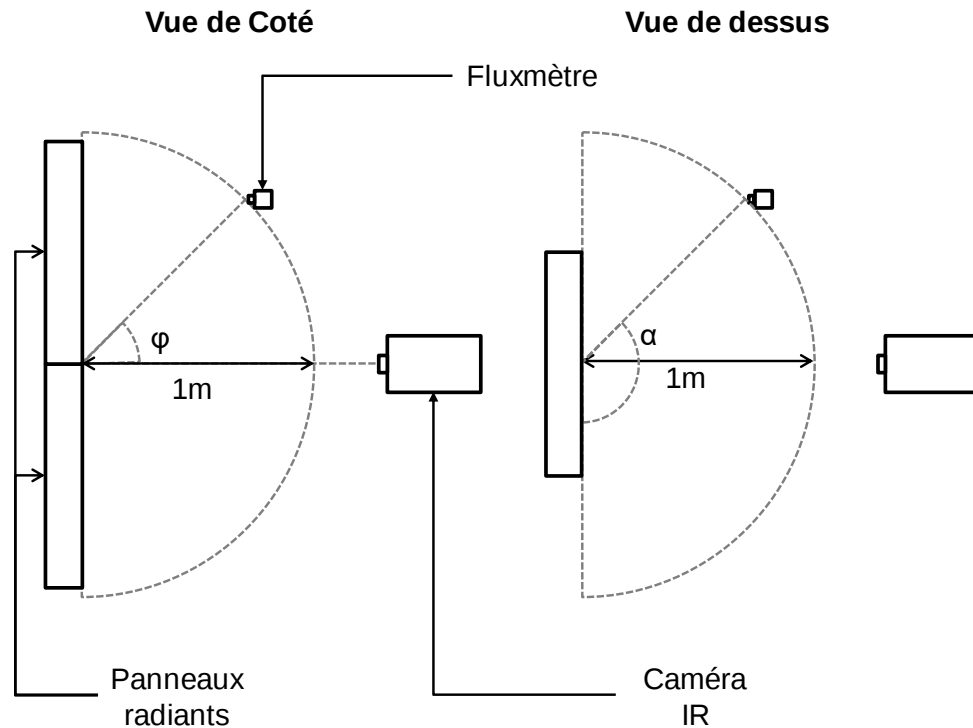


Figure A.3-2 : Points de mesure de la densité de flux radiatif

La Figure A.3-3 représente la cartographie de la densité de flux mesurée en fonction des angles α et φ . Une symétrie verticale est observée par rapport à $\varphi = 90^\circ$ avec une valeur maximale de la densité de flux pour $\alpha = 90^\circ$ et $\varphi = -30^\circ$. La densité de flux diminue progressivement pour des valeurs de α s'éloignant de 90° , avec une perte maximale de 35% pour $\alpha = 30^\circ$ et $\alpha = 150^\circ$. Nous notons également une diminution de 40% du flux reçu pour les extrema de φ .

Ce premier résultat nous permet de vérifier que les panneaux confèrent à la densité de flux reçu à 1 m de distance une distribution quasi-isotrope. Il révèle également la faible valeur de la sollicitation thermique à cette distance.

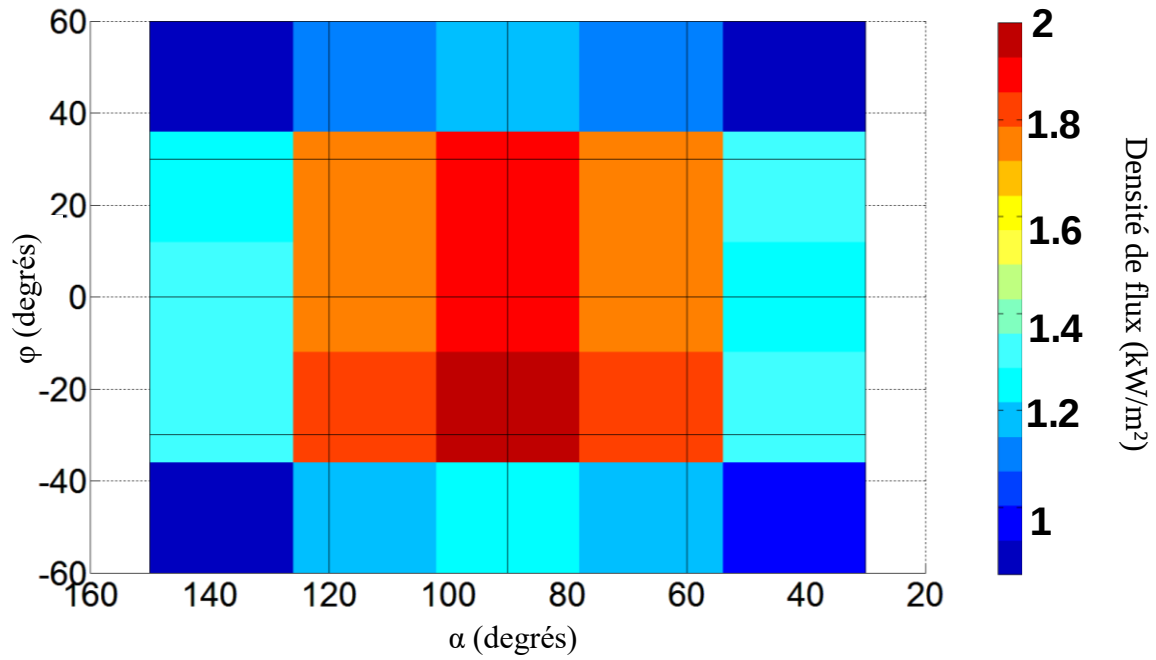


Figure A.3-3 : Cartographie du flux à 1 m

Détermination du pouvoir émissif des panneaux

Le pouvoir émissif des panneaux radiants a été calculé à partir des données de flux relevées au centre de l'ensemble du dispositif. Pour cela, nous avons évalué le facteur de forme entre un panneau (1/4 du dispositif) et le capteur de flux lui faisant face, suivant la Figure A.3-4.

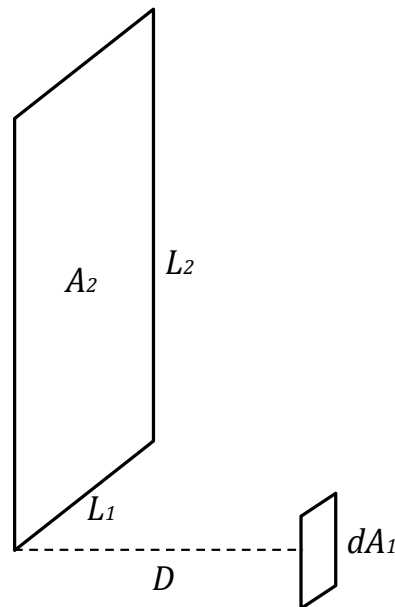


Figure A.3-4 : Facteur de forme entre un rectangle parallèle à une surface différentielle

$$F_{A_2 \rightarrow dA_1} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \quad (\text{A.3.1})$$

avec $X = L_1/D$ et $Y = L_2/D$

Le pouvoir émissif des panneaux radiants est défini par :

$$E = \frac{\phi_{mesuré}}{F_{A_2 \rightarrow dA_1}} \quad (A.3.2)$$

où $\phi_{mesuré}$ correspond à la densité de flux reçue par le capteur. Après calcul, le pouvoir émissif des panneaux radiants a été évalué à $E = 19,9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Détermination de l'émissivité des panneaux

Une cartographie de la température de surface des panneaux a été réalisée afin d'estimer leur émissivité. Une caméra infrarouge Flir S65, dont l'émissivité a été fixée à 1, a été utilisée comme imageur nous permettant de relever l'emplacement et la tailles des zones chaudes et froides identifiées visuellement. Il doit être signalé que la surface externe des panneaux radiants est chauffée par l'intermédiaire de filaments qui transmettent leur chaleur à un revêtement externe. Ce revêtement n'est cependant pas totalement opaque ce qui provoque une transmission du rayonnement des filaments vers l'extérieur et ainsi une perturbation de la valeur de température de surface mesurée. Des thermocouples de type K ont de ce fait été utilisés afin de réaliser la cartographie de température nous permettant d'estimer la valeur réelle de l'émissivité des panneaux.

La Figure A.3-5 présente les cartographies de température des ensembles de panneaux. A l'instar des données de flux, une symétrie horizontale peut être observée pour l'ensemble des panneaux. Bien que les températures soient uniformes horizontalement, ceci n'est pas le cas suivant la hauteur. La présence du filament chaud entraîne l'apparition de zones chaudes de 49 mm de hauteur espacée par des zones de température moins importantes et de hauteur 12 mm.

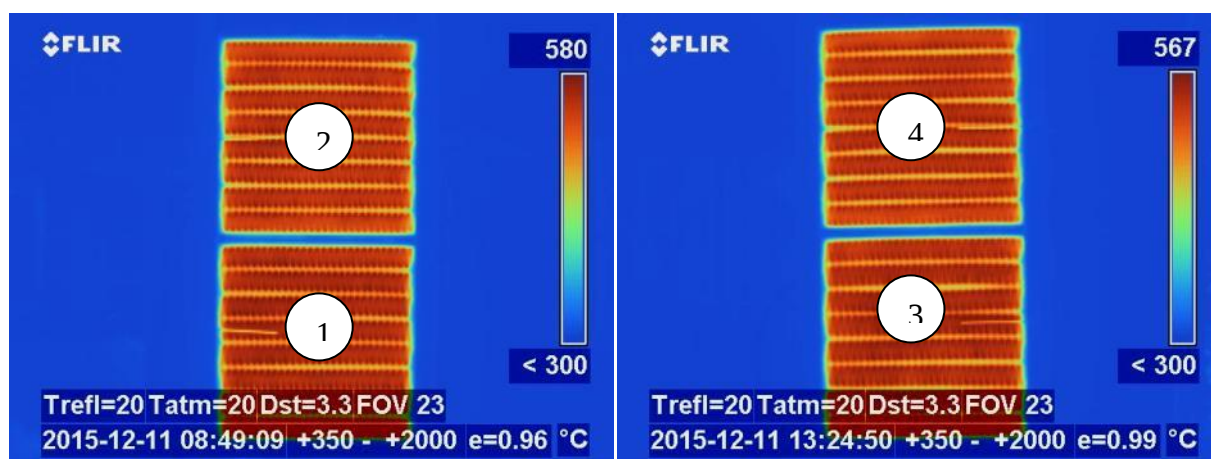


Figure A.3-5 : Image IR des deux ensembles de panneaux radiants

La température des panneaux en fonction de la hauteur a été tracée Figure A.3-6. La température moyenne des zones chaudes a été estimée à 530 °C et 520°C pour respectivement les panneaux du bas et du haut et les zones "froides" à une température moyenne de 493 et 482°C. La valeur moyenne de température des deux panneaux a quant à elle été estimée à 525 et 513°C. Le flux maximum obtenu en partie basse de l'ensemble ($\alpha = 90^\circ$ et $\varphi = -30^\circ$) peut être expliqué par la différence de température entre le panneau inférieur et le supérieur, le panneau du bas étant légèrement plus chaud.

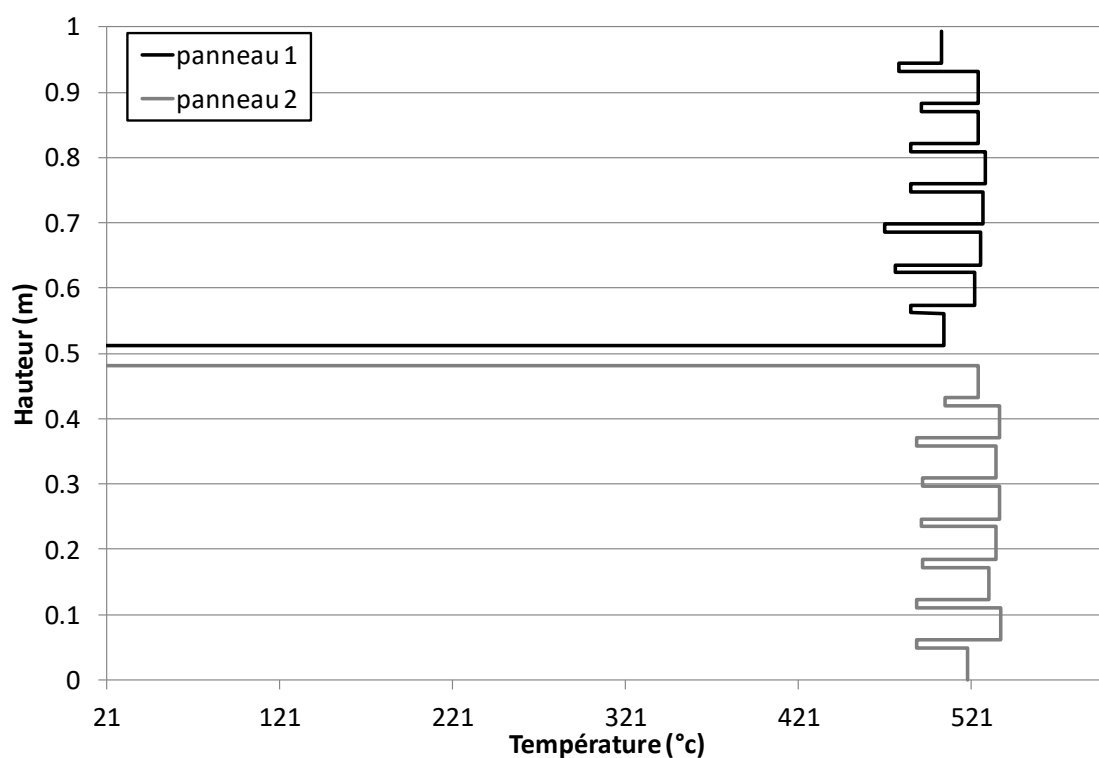


Figure A.3-6 : Température en fonction de la hauteur du premier ensemble de panneaux

Les panneaux ont été découpés suivant les zones chaudes et froides afin d'obtenir une estimation précise de leur émissivité. Celle-ci a été calculée tel que :

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{mesuré}}{\sum_i F_{A_i \rightarrow dA_1} \sigma T_i^4} \quad (A.3.3)$$

D'après la cartographie des températures, du flux mesuré et des facteurs de formes, l'émissivité des panneaux radiants a été estimée à $\varepsilon = 0.82$.

Estimation de la température moyenne des panneaux

La température moyenne des panneaux radiants est un paramètre d'entrée important pour représenter la configuration expérimentale dans les simulations. Celle-ci a été déterminée d'après les valeurs d'émissivité et de pouvoir émissif calculées précédemment. La température moyenne a été définie telle que :

$$T_{moy} = \left(\frac{E}{\sigma \varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (A.3.4)$$

La température moyenne des panneaux radiants a ainsi été estimée à 535.5 °C.

B.1. Courbes de vitesses aux positions d'intérêt A, B, D et E

Dans le but de vérifier la convergence du champ de vitesses au-dessus du banc de combustion, le traitement réalisé sur le point C (Chapitre 3.3.1) a été effectué pour les quatre autres points d'intérêt Figure B.1-1). Les moyennes temporelles du module de vitesse au-dessus des points A, B, D et E suivant la hauteur sont présentées respectivement Figure B.1-1, B.1-2, B.1-3 et B.1-4. Nous pouvons observer que les profils de vitesses pour les tailles de mailles de 2.5 et 5 cm sont très proches pour l'ensemble des points d'intérêts. En ce qui concerne la taille de maille de 10 cm, à l'exception de la position D, nous constatons une augmentation avec la hauteur de l'écart avec les profils de vitesses des autres tailles de mailles. Bien qu'une convergence soit observable pour les trois tailles de mailles en-dessous de 0.8 m de hauteur, le maillage à 10 cm de résolution échoue dans la représentation des profils au-dessus de 0.8 m. Les profils de vitesses des tailles de mailles de 2.5 et 5 cm étant très proches pour l'ensemble des positions, nous pouvons considérer que la taille de maille de 5 cm présente donc le meilleur compromis entre le temps de calcul et la précision souhaitée.

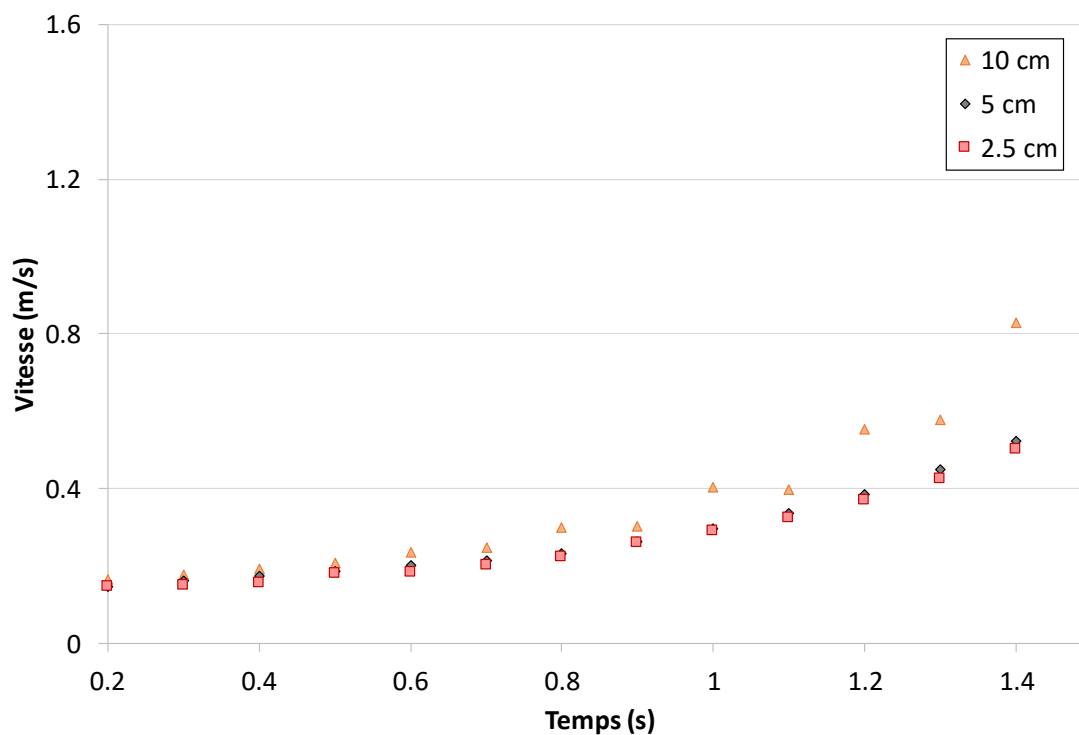


Figure B.1-1 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position A pour le grand domaine de calcul (laboratoire) et pour les différents maillages

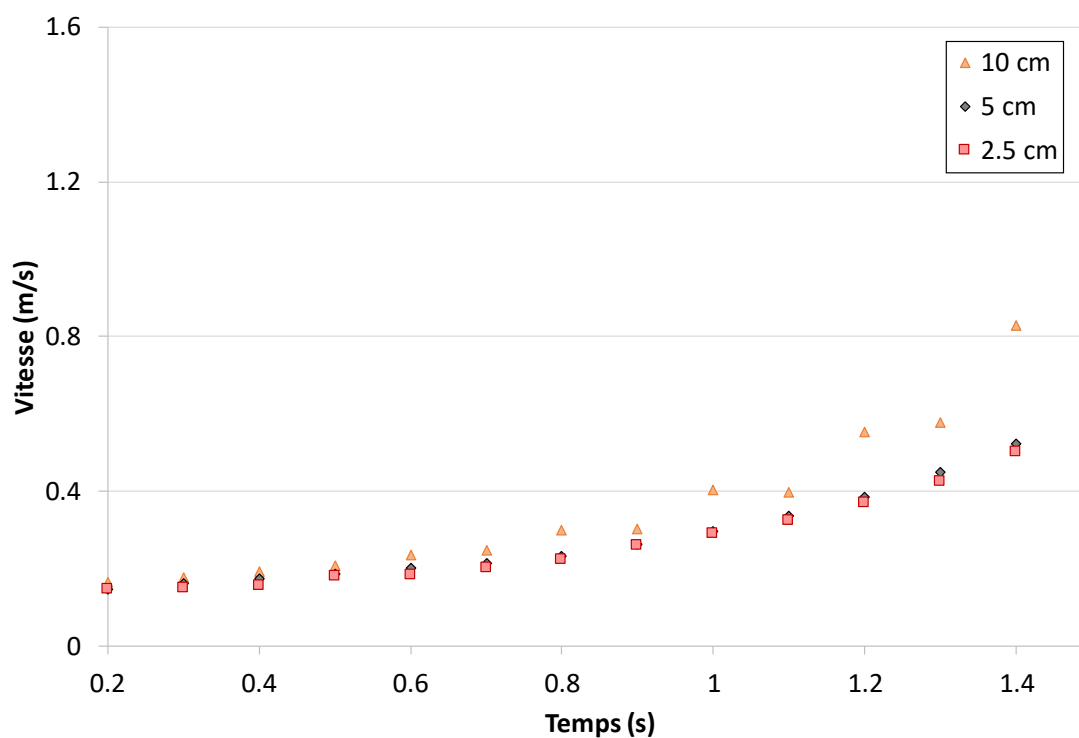


Figure B.1-2 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position B pour le grand domaine de calcul (laboratoire) et pour les différents maillages

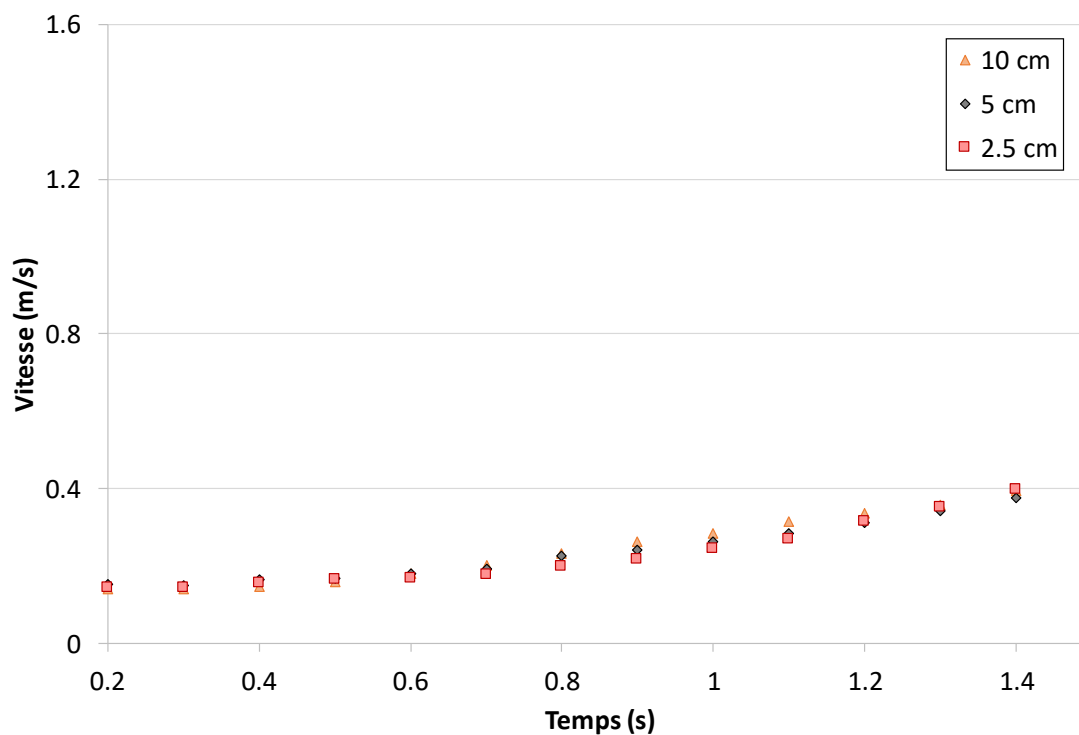


Figure B.1-3 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position D pour le grand domaine de calcul (laboratoire) et pour les différents maillages

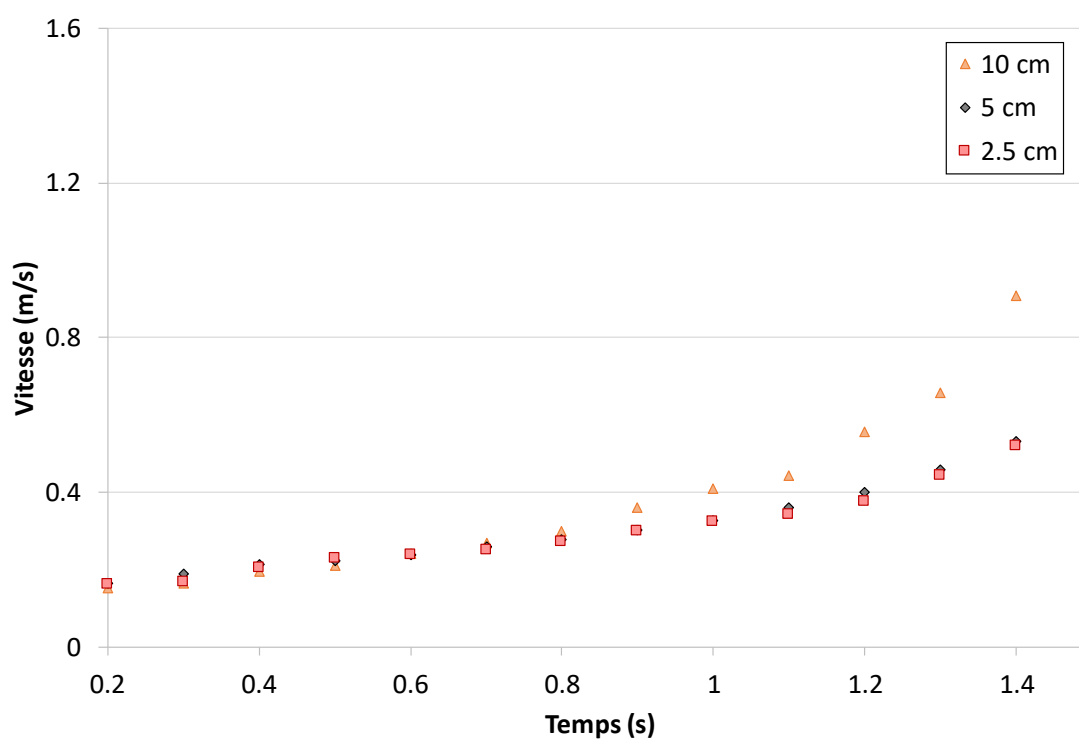


Figure B.1-4 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position E pour le grand domaine de calcul (laboratoire) et pour les différents maillages

B.2. Détermination du temps nécessaire pour atteindre le régime d'écoulement établi

Afin de déterminer le temps nécessaire pour atteindre le régime d'écoulement établi, les vitesses calculées au cours du temps au-dessus des positions d'intérêts ont été analysées. LA Figure B.2-1 présente les modules des vitesses à différentes hauteurs au-dessus du point C au cours du temps. Les vitesses ont été assimilées à des réponses de système de second ordre afin de déterminer leur temps de réponse à 5 %. Les valeurs moyenne en régime d'écoulement établi $\pm$ 5 % sont également présentées sur la Figure B.2-1. Nous observons une augmentation du temps de réponse à 5 % lorsque la hauteur diminue. Les turbulences engendrées par la présence du banc de combustion et de la litière ralentissent la mise en régime de l'écoulement et augmente l'amplitude des oscillations. En ce qui concerne la vitesse à 0.5 m de hauteur, le critère des 5 % ne peut pas être atteint. De larges oscillations sont présentes tout au long du temps de simulation. Cependant, la courbe de la vitesse à cette hauteur présente la même tendance que pour les autres hauteurs (vitesse de valeur oscillante autour d'une valeur moyenne). Nous avons donc considéré que le temps nécessaire pour atteindre le régime d'écoulement établi correspond au temps de réponse à 5 % obtenu à une hauteur de 0.5 m (oscillations mises à part), soit 60s.

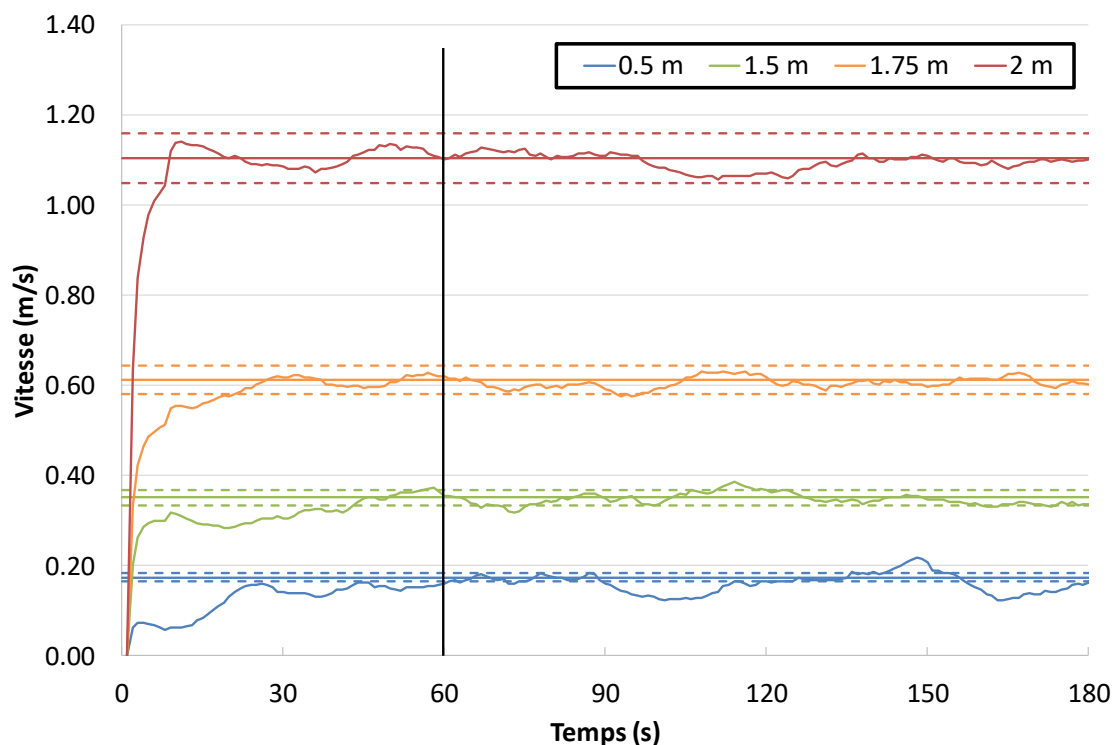


Figure B.2-1 : Module de la vitesse et valeur moyenne $\pm$ 5 % au-dessus du point C à 0.5 m, 1.5 m, 1.75 m et 2 m de hauteur au cours du temps

C. Calcul de la masse volumique apparente des cistes

La masse volumique apparente des feuilles présentes dans le houppier a été évaluée d'après les dimensions de chaque ciste et les données de répartition massique obtenues lors de la caractérisation. Elle a été calculée telle que :

$$\rho_{bfh} = \frac{m_{fsh}}{v_h} \quad (C.1)$$

avec

$$m_{fsh} = m_s \cdot \zeta_{fs}(\text{houppier}) \cdot \Gamma_f \quad (C.2)$$

où v_h est le volume du houppier, m_{fsh} la masse de feuille dans le houppier, m_s la masse sèche du ciste, Γ_f la répartition massique de feuilles dans le ciste et $\zeta_{fs}(\text{houppier})$ la répartition massique des feuilles dans le houppier (cf Chapitre 4.3). Afin de faciliter le calcul du volume du houppier, les cistes ont été assimilés à des cône de bases elliptiques (Figure C-1). Les résultats de masse volumique apparente des feuilles pour chaque ciste sont présentés Tableau C-1.

.

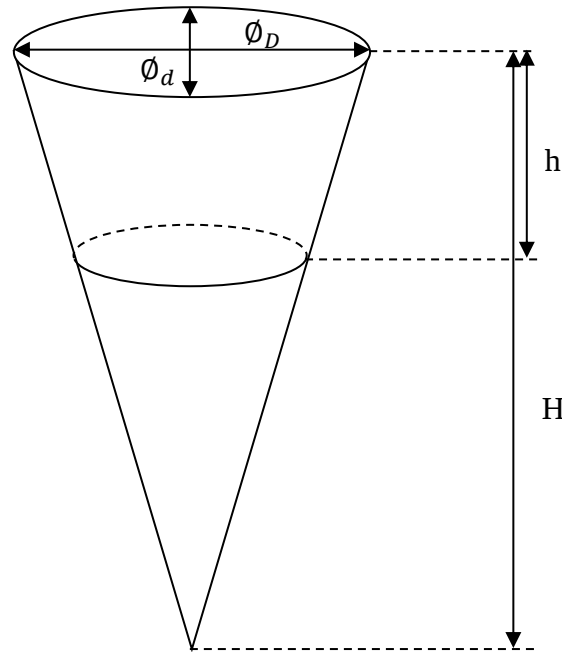


Figure C-1 : Schéma de l'approximation du volume d'un ciste

Tableau C-1 : Dimensions, masses et masse volumique apparente de chaque ciste

Ciste	ϕ_d (m)	ϕ_D (m)	H (m)	h (m)	v_h (m ³)	m_s (kg)	m_{fs} (kg)	ρ_{bfh} (kg/m ³)
150402_1	0.52	0.65	1.40	0.36	0.292	1.529	0.338	1.156
150402_2	0.50	0.70	1.35	0.45	0.348	1.529	0.338	0.970
150402_3	0.70	0.80	1.10	0.30	0.397	1.529	0.338	0.851
151020_1	0.54	0.65	1.20	0.25	0.222	1.578	0.349	1.569
151020_2	0.49	0.74	1.26	0.29	0.260	1.867	0.413	1.586
151020_3	0.77	0.97	1.31	0.38	0.658	1.918	0.424	0.644
151022_1	0.70	0.70	1.35	0.36	0.420	1.757	0.388	0.926
151022_2	0.74	0.74	1.25	0.23	0.327	2.197	0.486	1.483
151022_3	0.96	0.96	1.40	0.60	1.099	1.864	0.412	0.375
151112_2	0.64	0.64	1.25	0.25	0.264	2.004	0.443	1.680
151112_3	0.65	0.65	1.31	0.44	0.406	2.387	0.528	1.298
151112_4	0.58	0.58	1.25	0.37	0.286	2.280	0.504	1.761
160325_3	0.65	0.80	1.35	0.40	0.479	1.820	0.402	0.840
160404_2	0.70	0.80	1.20	0.30	0.407	1.560	0.345	0.847
160404_3	0.60	0.75	1.30	0.30	0.334	1.805	0.399	1.195
160404_4	0.50	0.70	1.15	0.30	0.251	0.800	0.177	0.703
162807_1	0.60	0.70	1.30	0.20	0.225	2.117	0.468	2.076
162807_3	0.70	0.70	1.35	0.25	0.318	2.420	0.535	1.682
160920_1	0.60	0.60	1.35	0.20	0.194	2.158	0.477	2.455
160920_2	0.50	0.60	1.30	0.25	0.193	1.838	0.406	2.102
160920_3	0.70	0.70	1.20	0.20	0.259	1.737	0.384	1.480
160920_4	0.60	0.70	1.30	0.30	0.312	1.896	0.419	1.345
170724_1	0.60	0.80	1.30	0.30	0.356	1.688	0.373	1.048
170724_2	0.60	0.70	1.20	0.30	0.305	1.728	0.382	1.251
170724_3	0.65	0.90	1.30	0.25	0.377	2.008	0.444	1.178

D.1. Calcul de la fraction radiative χ_{rad} pour les brûlages de cistes

La fraction radiative χ_{rad} a été évaluée à partir des mesures de HRR obtenues lors des expériences de combustion des cistes et d'une estimation de la puissance convective émise lors de ces mêmes expériences. Pour cela il est nécessaire de connaître la température des gaz à l'entrée du conduit d'évacuation, T_g . Nous disposons d'une mesure de la température des gaz d'extraction en un point à l'intérieur de cette gaine grâce au thermocouple TK (figure 2-8). Cependant, les gaz sont refroidis à la traversée de la gaine et cette mesure n'est pas représentative de la température en tout point du conduit d'extraction (de longueur $l = 5.576$ m). Un bilan thermique a donc été réalisé dans le but de déterminer la température T_g à l'entrée du conduit en tenant en compte des pertes thermiques des gaz traversant le conduit. Pour une section de conduit de longueur dx , le bilan s'écrit :

$$\dot{M}_{mix} c_{p,mix} T(x, t) = \dot{M}_{mix} c_{p,mix} T(x + dx, t + dt) + \Phi_{loss} \quad (D.2)$$

Annexes

où Φ_{loss} correspond aux pertes thermiques modélisées par :

$$\Phi_{loss} = \pi d U (T - T_a) dx \quad (D.3)$$

où d représente le diamètre du conduit (0.4 m) et U est le coefficient de transfert thermique global le long du conduit, dont l'expression est donnée par :

$$U = a \frac{\dot{M}_{mix} c_{p,mix}}{\pi d} \quad (D.4)$$

a est une constante (m^{-1}) déterminée lors des expériences de propagation de feu de litières à plat présentées dans Morandini et al. (2013) telle que :

$$a = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left(\frac{T_{TK1} - T_a}{T_{TK2} - T_a} \right) \quad (D.5)$$

où T_{TK1} et T_{TK2} sont les températures des capteurs dans le conduit d'extraction et x_1 et x_2 la distance entre les thermocouples et l'entrée du conduit.

En combinant 6.2 et 6.4, nous obtenons :

$$\frac{1}{v} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + aT(x,t) = aT_a \quad (D.6)$$

où v est la vitesse moyenne des gaz dans le conduit.

D'après les mesures de températures obtenues par le thermocouple TK, la température des gaz augmente quasi-linéairement au cours du temps (Figure D.1-1). Afin de simplifier les calculs nous supposons donc que $\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = K$. La résolution de l'équation (D.6) mène à la température des gaz à l'entrée du conduit d'extraction pour $x = 0$:

$$T_g = T_a - \frac{K}{av} + \left(T_{TK} - T_a + \frac{K}{av} \right) e^{al} \quad (D.7)$$

Où l représente la distance entre l'entrée du conduit et le thermocouple TK. La connaissance de la température des gaz permet le calcul de la puissance convective notée HRR_{conv} :

$$HRR_{conv} = \dot{M}_{mix} \int_{T_a}^{T_g} c_{p,mix}(T) dT \quad (D.8)$$

où T_a est la température ambiante, $c_{p,mix}$ est la capacité calorifique du mélange à la température T prise égale à celle de l'air sec et $\dot{M}_{mix}$ est le débit massique du mélange de composés chimiques et d'air.

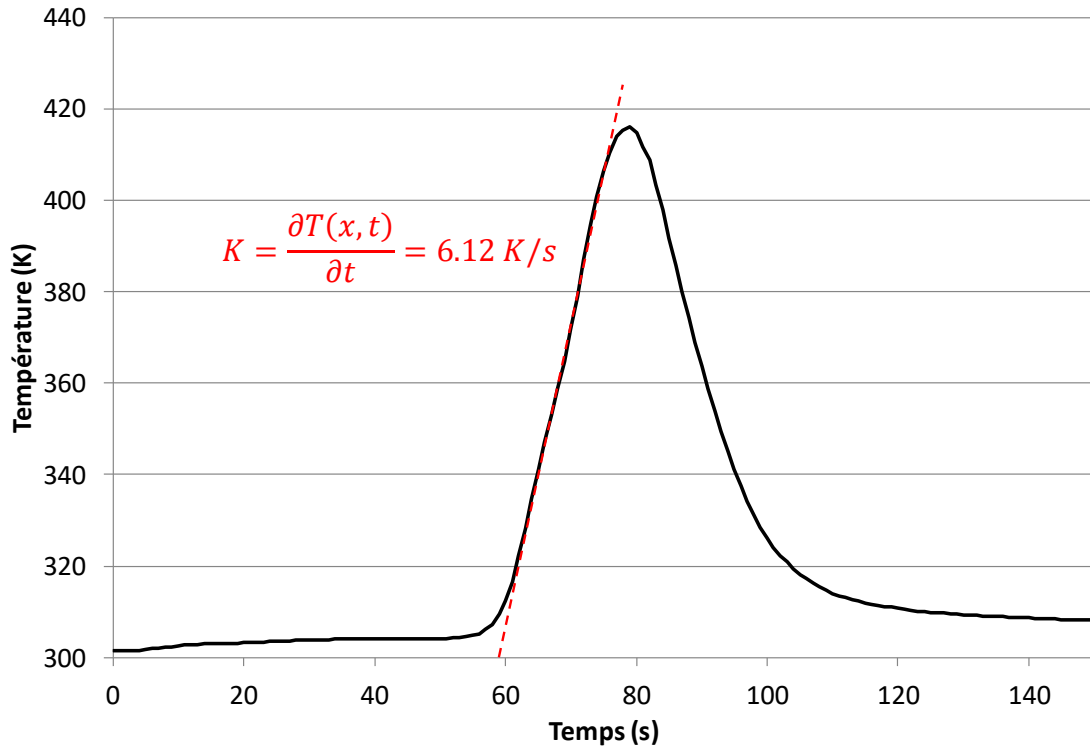


Figure D.1-1: Mesure de température dans le conduit d'extraction au cours du temps pour une expérience de réaction au feu de ciste

Le débit massique étant constant dans le conduit, il a été déterminé à partir du débit volumique du mélange mesuré dans la section d'échantillonnage des gaz $\dot{V}(T_{TK})$ par l'équation suivante :

$$\dot{M}_{mix} = \dot{V}(T_{TK}) \cdot \rho(T_{TK}) \quad (D.9)$$

avec une masse volumique de mélange prise égale à celle de l'air sec :

$$\rho(T_{TK}) = \rho_{air,298} \frac{298}{T_{TK}} \quad (D.10)$$

La fraction convective correspond au ratio entre la puissance convective HRR_{conv} et la puissance totale :

$$\chi_{conv} = \frac{HRR_{conv}}{HRR} \quad (D.11)$$

Finalement, la valeur de la fraction radiative χ_{rad} est donnée par :

$$\chi_{rad} = 1 - \chi_{conv} \quad (D.12)$$

D.2. Analyse de sensibilité au maillage de l'écoulement non réactif et du flux produits par les panneaux radiants

Bien qu'une analyse de sensibilité de l'écoulement non réactif ait été réalisée dans le cadre de propagation de feux de litière, le changement de configuration expérimentale provoque une modification du champ de vitesse dans la zone de combustion (ciste et zone de flamme). En effet, les turbulences engendrées par la présence du banc de combustion dans le premier cas disparaissent au profit de celles engendrées par l'ensemble des panneaux.

Le domaine de calcul est celui du LSHR (Figure 5-3). Les simulations ont été réalisées pour trois maillages. Le premier maillage présente une taille de maille de 10 cm sur l'ensemble du domaine, le second est composé d'une taille de maille de 4 cm dans la zone de combustion et de 8 cm autour. Enfin, le troisième maillage présente une taille de maille de 2 cm dans la zone de combustion et de 4 cm ailleurs. L'écoulement est analysé en 5 positions d'intérêt au-dessus de la base du houppier ($z = 0.2 \text{ m}$). Les points sont disposés en forme de croix centrée sur l'axe du ciste. Les points A, B, D et E sont placés à 0.5 m du centre C. La même démarche que pour les propagations de feux de litières a été suivie. Les Figures D.2-1 à D.2-6 présentent les modules des vitesses suivant la hauteur pour respectivement les points A, B, C, D et E, pour les trois maillages utilisés.

Nous observons, que les profils des vitesses pour les maillages 2-4 cm et 4-8 cm sont très proches. La plus grande différence observée est de 0.15 m/s pour une hauteur de 1.5 m au point C. Ce phénomène peut être de nouveau expliqué par la proximité de la zone d'extraction. En ce qui concerne le maillage à 10 cm, les profils de vitesses obtenus aux points A, B, D et E sont proches de ceux obtenus pour les maillages plus fins. La vitesse est cependant fortement surestimée pour ce qui est de la position C. Cette résolution de maille n'est donc pas suffisante pour représenter fidèlement l'écoulement.

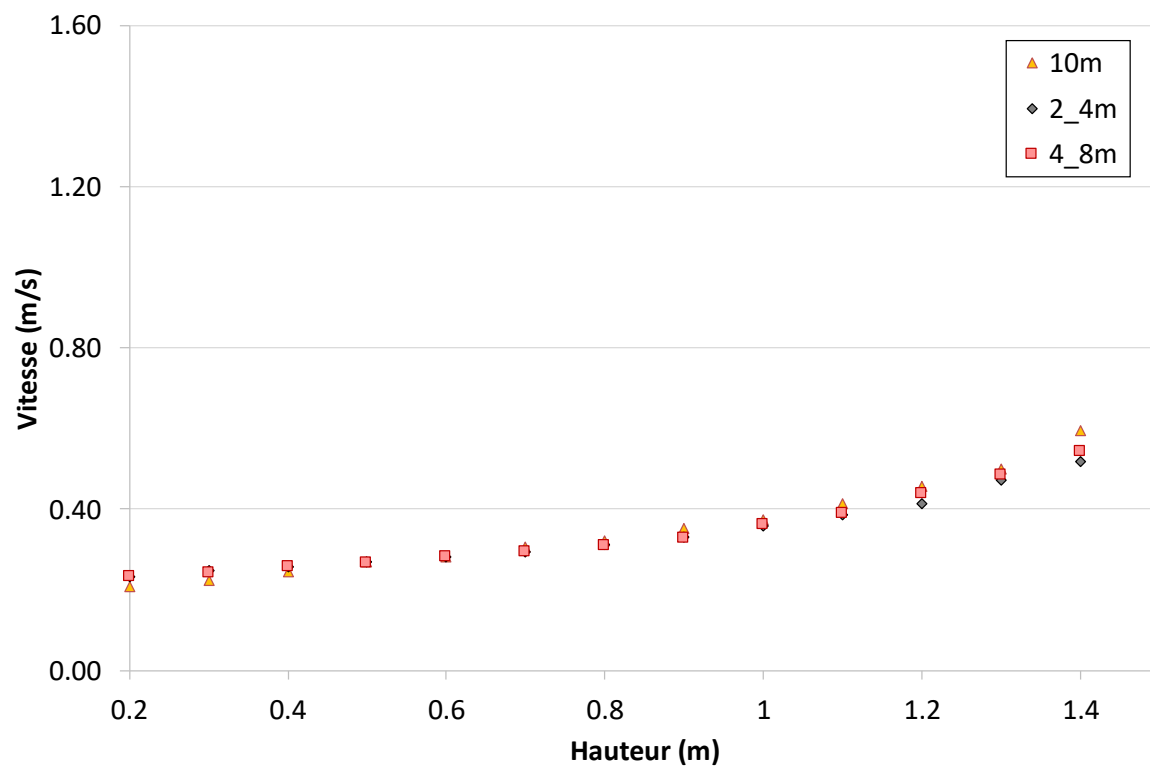


Figure D.2-1 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position A pour les différents maillages

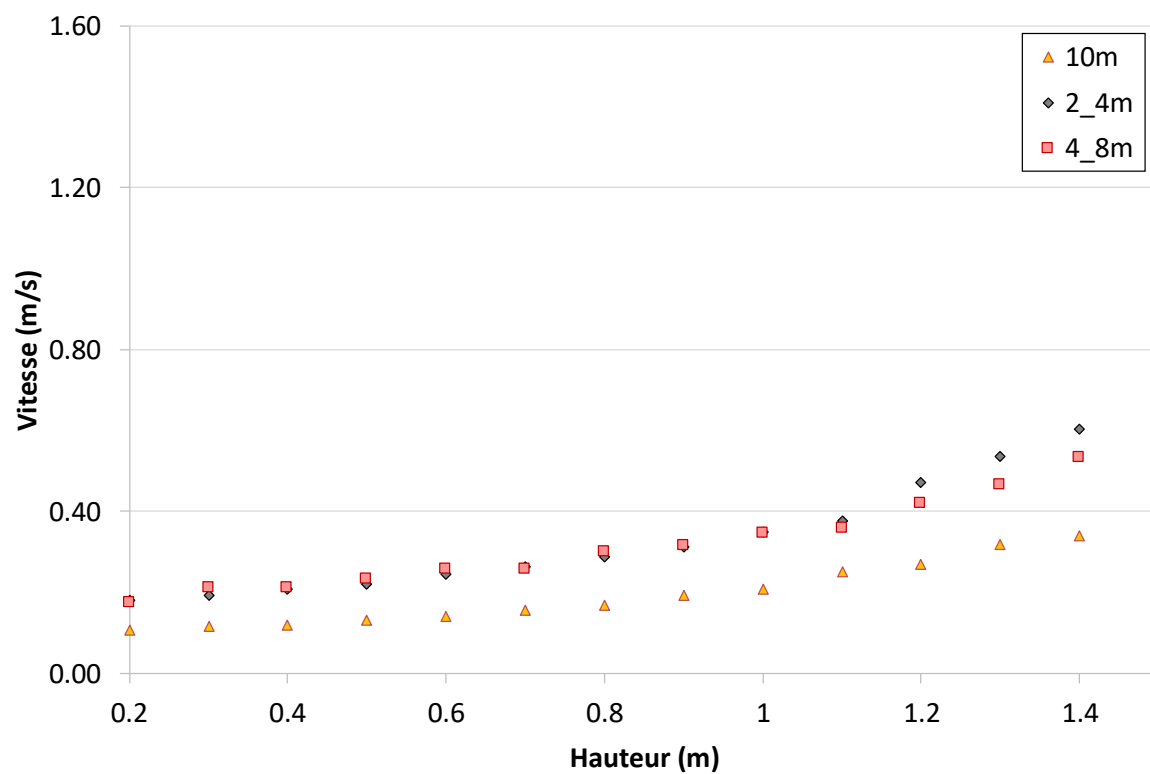


Figure D.2-2 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position B pour les différents maillages

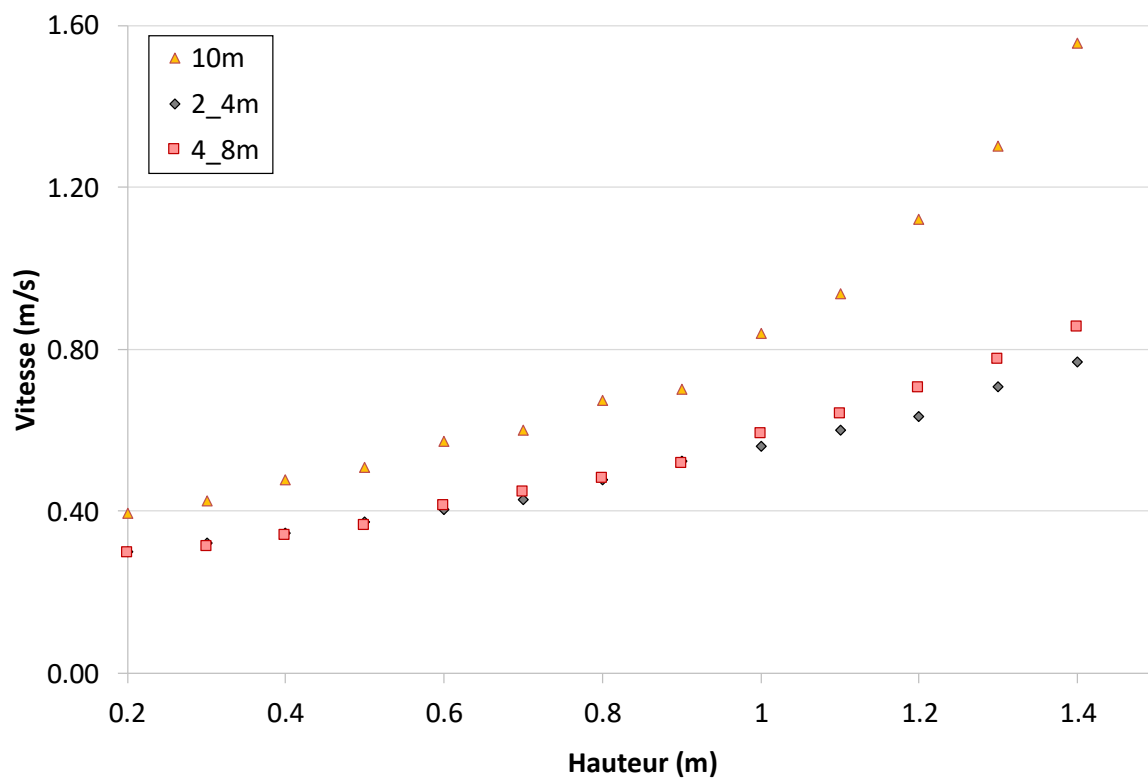


Figure D.2-3 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position C pour les différents maillages

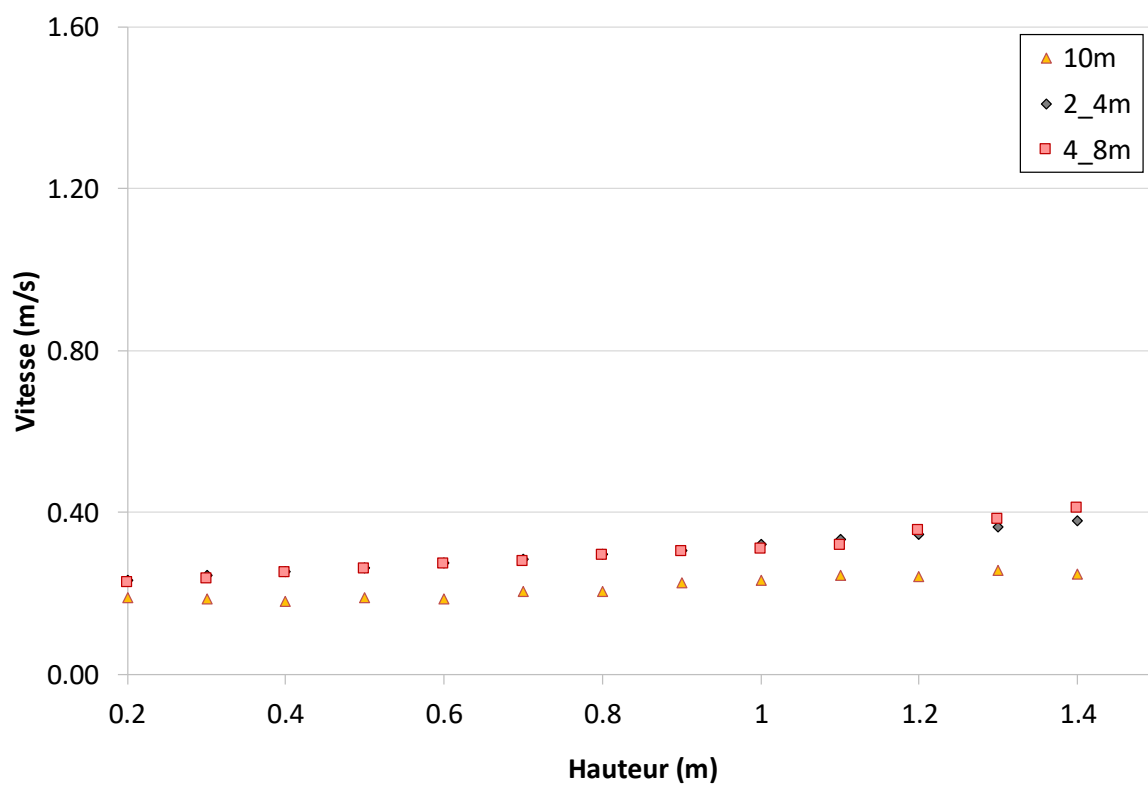


Figure D.2-4 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position D pour les différents maillages

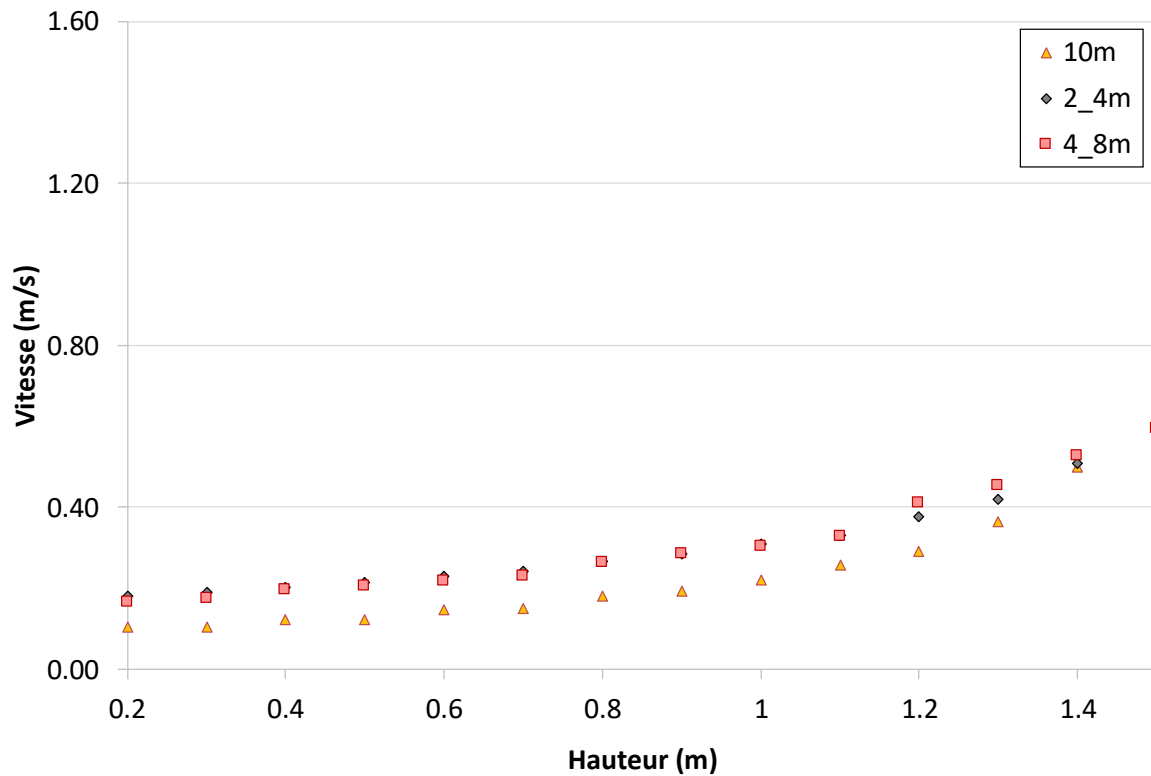


Figure D.2-5 : Moyenne temporelle du module de la vitesse au-dessus de la position E pour les différents maillages

L'allumage expérimental est réalisé par l'intermédiaire de panneaux rayonnants. Leur bonne représentation est de ce fait essentiel à représentation fidèle de la configuration expérimentale utilisée. Des capteurs numériques de flux radiatifs ont été placés aux mêmes emplacements (2 et 3) que les fluxmètres présents lors des expériences (Chapitre 2.8). Les flux calculés pour les trois maillages sont très proches (1.92, 2.01 et 1.78 kW/m² pour respectivement les tailles de mailles 10, 4-8 et 2-4 cm). Les valeurs expérimentales relevées aux même positions (2 et 3) sont de 1.79 ± 0.2 kW/m. Le maillage le plus fin permet une bonne prédiction du flux radiatif émis par les panneaux radiants alors que les simulations avec les autres maillages présentent une erreur de l'ordre de 10%. Il convient de noter que cette valeur est fortement influencée par la distance entre les panneaux et le fluxmètre, une différence de positionnement minime peut entraîner de grandes variations. Il a été estimé qu'à cette distance, une incertitude sur la distance de 5 cm entraîne une incertitude sur la mesure de flux de 10 %.

D.3. Calcul préliminaire de la taille des mailles pour simuler le brûlage des cistes

Les tailles de mailles compatibles avec la simulation des expériences de réaction au feu des cistes ont été évaluées en suivant la même démarche que pour les cas de propagation présentés au chapitre 3 (section 3.4.1). La longueur d'extinction δ_R caractérisant l'absorption du flux radiatif a été calculée pour le gabarit de ciste moyen défini au chapitre 5 (Tableau 5-1). La taille caractéristique du feu z_c a été déterminée pour les quatre types de réaction au feu d'après l'équation (3.22). Les résultats obtenus pour ces deux dimensions caractéristiques et pour les quatre types de réaction au feu définies au chapitre 4 sont présentés dans le Tableau D.3-1. Il a été montré chapitre 3 (section 3.4.3) qu'une résolution correspondant à $dx_{g,z_c,min}$ permet d'obtenir la meilleure estimation de la taille de maille nécessaire pour la modélisation de la combustion. Le maillage à 2 cm de résolution dans la phase de flamme a donc été choisi pour la modélisation de la combustion du ciste, les valeurs de $dx_{g,z_c,min}$ obtenues étant supérieures à cette valeur pour les 4 cas. Cette même taille de maille a été adoptée dans la portion du domaine incluant l'arbuste. En dehors de la zone de combustion (arbuste et flamme), une taille de maille de 4 cm a été adoptée

Tableau D.3-1 : Longueurs caractéristiques et tailles de maille associées pour la combustion des cistes

Réaction au feu	δ_R (m)	$dx_{b,\delta_R/3}$ (m)	$dx_{b,\delta_R/5}$ (m)	z_c (m)	$dx_{g,z_c,min}$ (m)	$dx_{g,z_c,max}$ (m)
Faible	0.144	0.048	0.029	0.356	0.022	0.089
Moyenne	0.144	0.048	0.029	0.491	0.031	0.123
Forte et rapide	0.144	0.048	0.029	0.531	0.033	0.133
Forte et consommatrice	0.144	0.048	0.029	0.612	0.038	0.153

Résumé

Depuis plusieurs années, des aménagements forestiers sont mis en place pour limiter la propagation des feux de forêts et ainsi réduire leurs impacts. La technique la plus utilisée consiste à diminuer la charge de combustible afin d'affaiblir la puissance des incendies et de ralentir leur propagation. Les coupures de combustibles ainsi réalisées peuvent également servir de support aux moyens de lutte. Cependant, ces aménagements sont réalisés à dire d'experts sans fondements scientifiques. Cette thèse a pour objectif principal d'améliorer nos connaissances fondamentales sur la dynamique de combustion d'arbustes naturels et isolés tout en apportant une base de validation aux modèles physique-détaillé. Pour cela, quatre études ont été menées. Le ciste a tout d'abord été caractérisé des points de vue structurel et de sa réaction au feu (*flammability*). Les données de caractérisation ont ensuite servi d'intrant au code de calcul WFDS. Dans un premier temps ce code a été validé pour la propagation de feux de litières composées d'un seul type de particules à partir d'expériences précédemment réalisées. Dans un second temps, le code WFDS a été testé pour la combustion de cistes composés de plusieurs types de particules. Ces tests ont été complétés par une analyse de sensibilité portant sur les paramètres liés aux termes sources de masse. Les données récoltées lors de la caractérisation ont mis en évidence la faible variation de la composition des cistes de dimensions voisines. Ceci nous a permis de mettre au point un modèle numérique pour les gabarits de ciste étudiés. Une modification de la structure des cistes a également été observée durant la saison estivale. La majorité des feuilles présentes dans le houppier sont tombées au sol pour former une litière de combustible sec. De plus, les fleurs, contenant des graines, qui ont fait leur apparition plus tôt dans l'année sont sèches. La réaction au feu des cistes a été étudiée expérimentalement suivant les quatre critères définis dans la littérature (*ignitability*, *sustainability*, *combustibility* et *consumability*). Les expériences nous ont permis de comprendre l'influence de la position d'allumage et de la teneur en eau sur la réaction au feu. Un allumage en partie haute du houppier associé une faible présence de combustible au voisinage de l'allumage entraîne des feux de *sustainability* forte et de *combustibility* et *consumability* faible ou modérée (*flammability* faible et modérée). Un allumage en partie haute, en présence de quantité importante de combustible au voisinage, provoque des réactions au feu fortes. La réaction au feu est rapide et de puissances modérée (*flammability* forte et rapide), si la quantité d'eau présente dans les branches est importante. Elle est lente et très puissante si la teneur en eau est faible, ce qui entraîne une consommation des grosses branches (*flammability* forte et consommeuse). La teneur en eau dans les feuilles a également un impact important sur le temps d'allumage (*ignitability*). De plus, nous avons observé un changement de dynamique de combustion pour les cistes en été. La faible présence de feuilles entraîne des réactions au feu faibles. Cependant, en s'enflammant les fleurs tombent au sol et transmettent la combustion aux feuilles présentes sur leurs passages tout en constituant une source d'allumage pour la litière sous l'arbuste. Le test du code de calcul WFDS a ensuite été réalisé pour un feu de litière d'aiguille de pin. Les puissances et vitesses de propagations en régime établi concordent avec celles observées expérimentalement. On note toutefois une extinction trop rapide dans les prévisions du modèle. Finalement, des simulations de combustion ont été réalisées pour un ciste type. Nous avons d'abord dimensionné la zone d'allumage pour un ciste sec. Puis nous avons simulé la combustion de cistes humides. Nous avons noté une bonne capacité du code WFDS à représenter les paramètres liés aux critères de réaction au feu étudiés. Cependant, un changement de dynamique lors de la phase d'ignition est présent. Une analyse de l'influence des paramètres d'entrée du code, et particulièrement ceux des termes sources de masse a été réalisée. Cette analyse nous a permis d'identifier les paramètres ayant le plus grand impact sur les résultats et qui doivent être estimés avec précision. Il s'agit des énergies d'activation du modèle de gazéification et du modèle de combustion des résidus charbonneux.

Résumé

Mots clé : Incendie de forêts, réaction au feu, calorimétrie, modèle physique-détaillé

Abstract :

For several years, forest management are conducted to limit the spread of wildland fires and thus to reduce their impacts. The common technique consists in a reduction of the fuel load to reduce the fire intensity and its rate of spread. These fuel break can be used during firefighting activities. However, the management of vegetation areas is still done without a sound scientific knowledge of the combustion dynamics of vegetative fuel. The main objective of this thesis work is to improve our fundamental knowledge on the combustion dynamics of natural and isolated shrubs while providing a validation basis for physics-based models. Thus, four studies have been carried out. The rockrose (*cistus monspeliensis*) was first characterized according to its structure and the *flammability* criterion. The characterization data was then used as input for the calculation code WFDS. As a first step, this code was validated for the fire spread of litters composed of a single type of particles based on experimental results obtained from a previous study. As a second step, WFDS was tested for the combustion of rockroses, composed of particles with different sizes. In addition, a sensitivity analysis of the parameters related to the source term of mass was conducted. The data collected during the characterization highlight the small variation of the composition of rockroses with similar dimensions. This allowed us to develop a numerical model for a typical *cistus* of size similar to those studied. A significant variation in the structure of the *cistus* was also observed during the summer period. Most of the leaves have fallen to form a litter of dead fuel under the shrub. In addition, flowers containing seeds, that appeared earlier in the year, are dry. The rockrose *flammability* has been experimentally studied according to the four criteria defined in the literature (*ignitability*, *sustainability*, *combustibility* and *consumability*). The experiments allowed us a better understanding of the ignition position. Moisture content was observed to significantly influence the combustion processes. An ignition in the upper part of the crown with a low surrounding quantity of fuel leads to a long *sustainability* and weak or moderate *combustibility* and *consumability* (low and moderate *flammability*). Conversely, an ignition in the upper part of the shrub, with a large amount of fuel in its vicinity, causes high *flammability*. The reaction to fire is fast with a moderate intensity (*high and fast flammability*) if the moisture content of the particles is high. It is slow with a high intensity if the moisture content is low, which leads to a high consumption of the thick twigs (*high and consumer flammability*). The moisture content of the leaves also has a significant effect on the ignition time (*ignitability*). The obvious change in the shrub properties, with the presence of flowers, observed for the rockrose in summer, led to a change in combustion dynamics. The weaker quantity of leaves in summer, compared to other seasons, leads to a low *flammability*. However, the flaming flowers, which fall during the combustion, not only ignite the leaves on their path but can also be a potential source of ignition for the litter under the shrub. Preliminary tests of WFDS were first performed for a fuel bed of pine needles, in order to assess its performance under more easy simulation case. The predicted intensity and steady rate of spread state agree with those observed experimentally but the model failed to represent accordingly the extinction phase that was too fast. Finally, simulations of the combustion of a typical *cistus* were performed. The dimension of the ignition zone was first characterized for a dry *cistus*. Then simulations of the combustion of *cistus* with fuel moisture content, were done. This revealed a good ability of WFDS to represent the parameters related to the *flammability* criteria. However, a change of dynamics during the simulation at the ignition phase is observed. An analysis of the input parameters, including those of the mass source term, has been carried out. This allowed us to identify the physico-chemical parameters that have the greatest impact on the results and that must be accurately estimated, namely the activation energies of both the gasification model and the char combustion models.

Abstract :

Keywords: Wildland fires, *flammability*, calorimetry, physics-based models