Mécanismes, enjeux et verrous scientifiques intervenant dans les incendies de grande ampleur. Le cas de la Cathédrale Notre-Dame de Paris.

Etat des connaissances des laboratoires français et efforts de recherche à apporter

Rédigé sous la coordination du GDR CNRS 2864 FEUX

Benjamin Batiot[(1)], Pascal Boulet[(2)], Axel Cablé[(3)], Khaled Chetehouna[(3)], Alexis Coppalle[(4)], Anthony Collin[(2)], Jean-Pierre Garo[(1)], Dominique Morvan[(5)], Frank Richard[(1)], Thomas Rogaume[(1)], Paul-Antoine Santoni[(6)]

[(1)] Université de Poitiers – CNRS – ISAE-ENSMA, UPR 3346 Institut P', BP 40109 Futuroscope, France
[(2)] Université de Lorraine – CNRS, UMR 7563 LEMTA, F-54500 Nancy, France
[(3)] INSA Centre Val de Loire – Univ. Orléans, PRISME,18022 Bourges, France
[(4)] INSA Rouen – CNRS, UMR 6614 CORIA, 76801 Saint Etienne du Rouvray cedex, France
[(5)] Aix-Marseille Université – CNRS, UMR 7340 M2P2, 13000 Marseille, France
[(6)] Université de Corse – CNRS, UMR 6134 SPE, 20250 Corte, France

Le drame de l'incendie qui a ravagé la toiture de la Cathédrale Notre-Dame de Paris en avril 2019 est très loin d'être une exception. On sait que par nature ces structures sont particulièrement vulnérables au risque incendie, en raison des matériaux utilisés, de la mise aux normes incendie difficile à réaliser, de l'accumulation de matière combustible, ou encore des interventions extérieures pour travaux par exemple. La liste des monuments historiques de premier plan en partie détruits à la suite du même type d'évènement est malheureusement longue, pour n'en citer que quelques-uns : la Cathédrale de Nantes en 1972, le palais de Windsor en 1992, le parlement de Bretagne à Rennes en 1994, le théâtre La Fenice à Venise en 1996, l'hôtel de Ville de La Rochelle en 2013, le Musée National du Brésil à Rio de Janeiro en 2018.

Dans de nombreux cas, le feu a démarré alors que le bâtiment était en travaux et à chaque fois la taille du sinistre a été telle que la charpente et la toiture ont été rapidement affectées, participant au caractère particulièrement massif et destructeur de ces sinistres. Les constatations après incendie ont montré, qu'à la suite d'un démarrage dans un environnement confiné, comparable aux feux de bâtiments classiques, dans un délai assez rapide, ces feux se sont propagés au niveau de la charpente, avec comme conséquence un large débordement des flammes et du panache à l'extérieur du bâtiment. C'est en ce sens que ces feux présentent quelques caractéristiques que l'on retrouve dans les feux massifs de bâtiments de grande hauteur ou les feux de végétation.

La présente note a pour objectif de montrer l'état de l'art dans le domaine des sciences de l'incendie, en particulier en ce qui concerne la recherche française, dans le périmètre du GDR 2864 Feux du CNRS. Elle apporte des éclairements sur le combustible, les transferts de masse (dégradation) et d'énergie (rayonnement, convection), la combustion et plus généralement les mécanismes physiques intervenant dans les incendies comme celui s'étant produit à Notre-Dame de Paris, ou encore sur la lutte contre l'incendie. Elle n'a pas vocation à donner la cause et l'origine de ce sinistre, des experts ont été nommés pour cela. Il s'agira surtout de présenter les enjeux et les verrous scientifiques intervenant dans la naissance et la propagation de tels incendies.

1- Nature et propriétés du combustible bois

Le bois est constitué de tissus cellulaires dont la densité varie en fonction de l'espèce. La figure 1 présente différentes parties du bois [Picard, 2019].

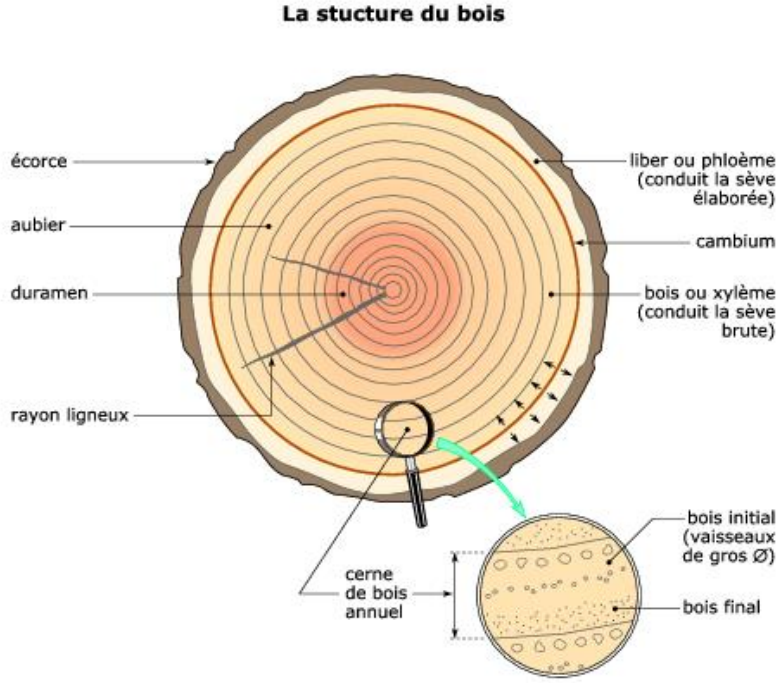

Figure 1 Détails de la structure du bois à différentes échelles d'après Picard [Picard, 2019].

A l'intérieur du tronc se trouve l'aubier et le duramen qui constituent les parties dans lesquelles les planches sont extraites selon leur utilisation. Concernant les éléments de structures, comme les poutres et charpentes, elles proviennent du duramen. Ensuite, à des échelles encore plus fines, sont présentes les cernes de croissance, les trachéides, les parois cellulaires, les microfibrilles et enfin les molécules constituées d'atomes.

Le bois est essentiellement constitué de trois polymères, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, ainsi que d'extractibles [Kanury, 1970, Roberts, 1971]. La répartition en ces différents constituants varie en fonction de la lignée végétale (feuillu, résineux, autre), de l'espèce, l'organe, le tissu de la plante ainsi que des essences de bois [Kanury, 1970, Roberts, 1971]. Il contient également une faible part (de 0,3 à 1% de sa masse) de substances minérales (composés inorganiques comme K, Ca, Mn et Mg [Kanury, 1970, Roberts, 1971]) qui se retrouvent après combustion dans les cendres. Il se distingue par son hétérogénéité et sa complexité. Il a également la particularité d'avoir une haute teneur en matières volatiles, de l'ordre de 73 à 87%, et contient de 13 à 26% de carbone fixe [Mermoud, 2006, Zhou, 1994].

- La cellulose représente 40 à 50 % de la composition du bois. C'est un polymère linéaire composé majoritairement de D-glucose ($C_6H_{12}O_6$).
- L'hémicellulose participe aux environs de 30 à 50 % de la composition du bois. Elle se compose de polymères branchés avec du D-xylose ($C_5H_{10}O_5$) et d'un stéréo-isomère du glucose, le D-mannose ($C_6H_{12}O_6$).

- La lignine à hauteur de 25 à 30 % complète la composition du bois. Bien que la lignine soit un réseau tridimensionnel complexe de polymères de monolignols dont la variabilité même au sein d'une même espèce peut être grande, l'unité de base se résume essentiellement à une unité de phénylpropane.

Lors de la décomposition thermique du bois, il convient d'être attentif aux fortes interactions entre les constituants : la lignine joint les fibres de bois entre elles, les hémicelluloses joignent la lignine à la cellulose. Pour le bois sec, une formule chimique globale est proposée. Tenant compte de l'azote, elle est de forme globale : $C_6H_{8,4}O_{3,5}N_{0,1}$ [Deglise, 2004]. La composition pondérale du bois sec évolue selon l'essence (Tableau 1) mais est relativement constante en fonction des différentes parties de l'arbre, l'écorce mise à part.

Eléments (% pondéral)	Moyenne de 11 types de bois de feuillus [Tillman *et al.*, 1981]	Moyenne de 9 types de bois de conifères [Tillman *et al.*, 1981]	Pin [Anon, 1972]	Chêne [Anon, 1972]
Carbone (C)	50,2	52,7	54,9	52,6
Hydrogène (H)	6,2	6,3	5,8	5,7
Oxygène (O)	43,5	40,8	39,0	41,5
Azote (N)	0,1	0,2	0,2	0,1
Soufre (S)	/	0,0	0,1	0,1

Tableau 1 Composition élémentaire moyenne de différents bois [Tillman *et al.*, 1981, Anon 1972].

Le bois est très hygroscopique, c'est-à-dire que la quantité d'eau qu'il retient varie très facilement et rapidement. Elle dépend fortement de l'environnement : température, humidité, pression. Après une période de séchage assez longue, le taux moyen d'humidité sur brut passe de 50 à 15 %, correspondant à l'humidité qui prend part à sa structure [Dumon, 1982]. Le pouvoir calorifique inférieur (P.C.I.) du bois varie selon les essences, mais reste relativement faible, de l'ordre de 15 à 20 $MJ.kg^{-1}$. Les propriétés du bois évoluent également selon son vieillissement : humidité, porosité périphérique, propriétés mécaniques, fissurations, etc.

On voit ici que le bois est un matériau présentant une composition complexe et une forte variabilité de ses propriétés, ce qui complique la modélisation des phénomènes de pyrolyse et combustion que l'on mènera aux différentes échelles. On ne dispose pas toujours des connaissances et appareils nécessaires pour établir les propriétés de ce matériau (capacité calorifique, conductivité thermique, porosité) pour le domaine de température associé à sa dégradation thermique.

2- Décomposition thermique et inflammation du bois

L'inflammation des solides (tels que le bois) se produit pour des conditions adéquates de mélange d'air et de gaz combustibles (limites d'inflammabilité), et d'apport énergétique [Drysdale, 2004]. La possibilité d'atteindre les limites d'inflammabilité dépend de la décomposition thermique du matériau, qui produit les gaz combustibles nécessaires au processus de combustion, comme illustré sur la Figure 2.

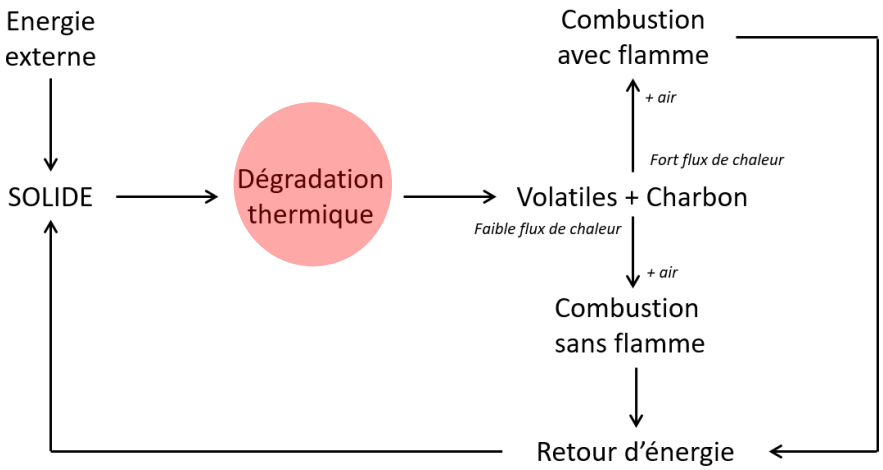

Figure 2 Diagramme schématique du processus de décomposition thermique et de combustion des matériaux charbonneux [Di Blasi, 1993].

Les processus de décomposition thermique et d'inflammation sont étudiés par une approche multi-échelles [Torero, 2013, Gerandi *et al.*, 2019]. L'échelle la plus fine (quelques milligrammes) correspond à l'analyse thermogravimétrique (A.T.G.), dont la Figure 3 présente une illustration sous azote (on affiche ici une vitesse de perte de masse en fonction de la température de l'échantillon, avec une courbe globale pour l'échantillon et une analyse des contributions des différents constituants du bois).

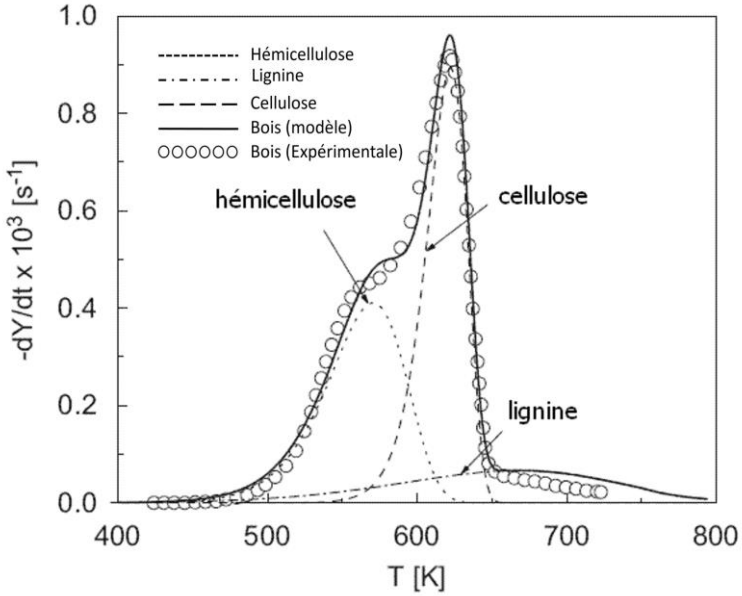

Figure 3 Analyse A.T.G. du bois, identification de la décomposition des principaux constituants, [Gronli, 2002].

L'évaporation de l'eau (8 à 15% de la masse initiale) a lieu entre 80°C et 120°C. L'énergie consommée par cette évaporation est de 2,26 $MJ.kg^{-1}$. Il faut ensuite chauffer le bois jusqu'aux environs de 200°C pour qu'il commence à se dégrader [Di Blasi, 2008]. L'énergie consommée entre 120°C et 200°C est caractérisée par la capacité thermique du bois, soit 2,5 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ (cette valeur varie en fonction de l'essence de bois). Entre 200°C et 350°C, la décomposition concerne les hémicelluloses, suivi par la cellulose entre 270°C et 380°C alors que la lignine se décompose entre 200°C et 550°C. Plusieurs approches sont possibles pour représenter le mécanisme réactionnel de décomposition thermique du bois. La première consiste à étudier la décomposition de chaque constituant (hémicelluloses, cellulose et lignine) [Batiot, 2014],

comme le montre la Figure 4, qui propose des mécanismes de réactions de production et de dégradation des masses solides, chaque réaction $\dot{\omega}$ s'accompagnant d'une production de gaz. La deuxième considère le bois comme un ensemble [Shafizadeh, 1977], et est illustrée sur la Figure 5.

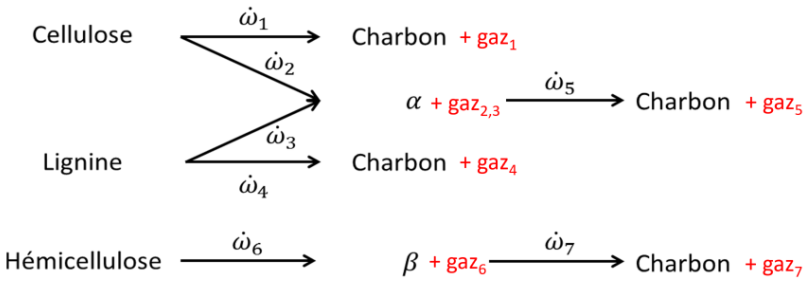

Figure 4 Mécanisme de dégradation du bois par constituants [Batiot, 2014]

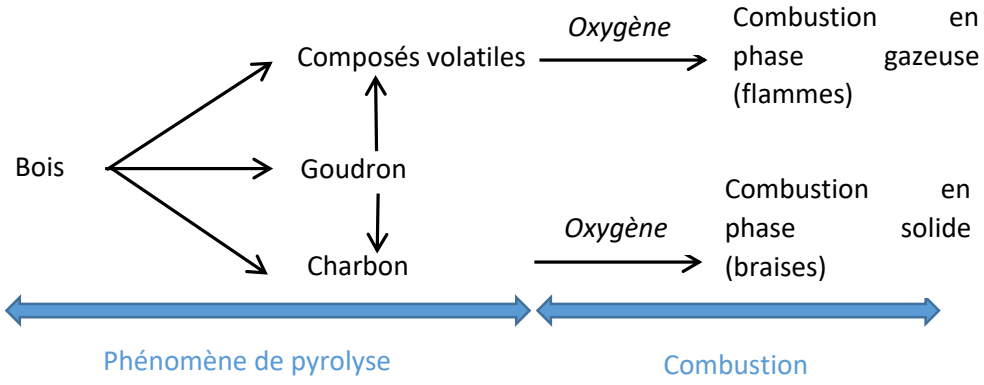

Figure 5 Mécanisme de dégradation du bois de Shafizadeh et Chin [1977].

Dans la littérature, l'énergie de gazéification du bois (l'ensemble des étapes dans les mécanismes précédents) est comprise entre 1,4 et 7 $MJ.kg^{-1}$. Sous atmosphère inerte, la décomposition du bois produit environ 15 à 20% de la masse initiale en charbon. Lorsque la particule de bois est placée dans un environnement oxydant, l'oxydation de ce charbon se produit principalement entre 500°C et 800°C.

L'échelle supérieure à l'A.T.G. (quelques dizaines de grammes, 100 cm^2) est décrite par Torero [Torero, 2008]. Elle permet la prise en compte de la diffusion et donc des gradients d'énergie, de masse et de quantité de mouvement dans le solide et en phase gazeuse. La Figure 6 présente un essai réalisé avec un cône calorimètre [Babrauskas, 1984] pour une densité de flux thermique de $30kW.m^{-2}$ appliqué en surface d'un échantillon de pin d'épaisseur 18mm.

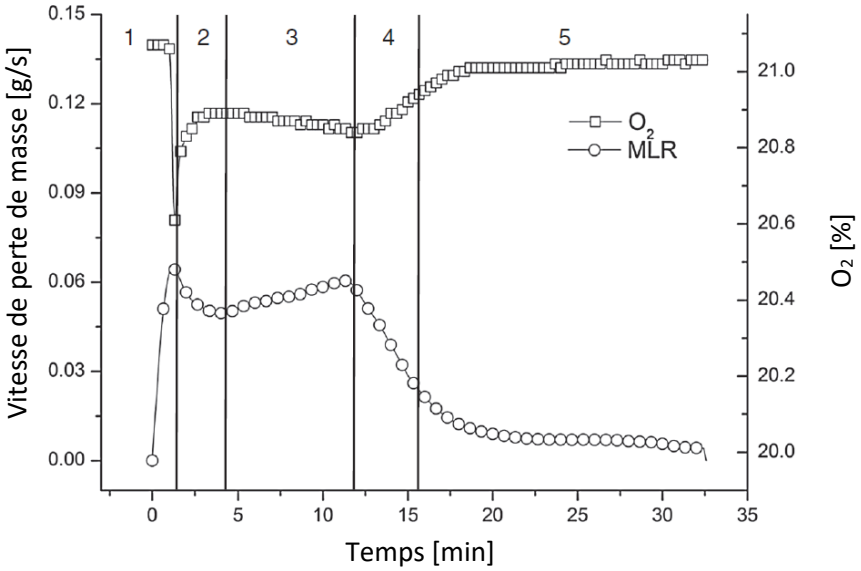

Figure 6 Vitesse de perte de masse et consommation d'oxygène pour la dégradation du bois soumis à une densité de flux thermique de 30 kW.m^{-2} (institut Pprime, UPR 3346)

L'étape 1 correspond à la croissance de la dégradation du bois sous l'effet de l'exposition à un flux thermique. En même temps que le bois se dégrade, il produit du charbon. Le charbon est plus poreux et de conductivité thermique plus faible que le bois, ce qui assure une protection thermique. Ainsi, l'étape 2 marque la décroissance de la production de gaz sous l'effet de la protection du charbon. La face arrière du bois étant isolée, l'ensemble du matériau monte progressivement en température jusqu'à la température de pyrolyse. L'étape 3 montre une reprise de la dégradation sous l'effet de ce deuxième mécanisme thermique. L'étape 4 montre l'appauvrissement du solide en matière combustible jusqu'à l'extinction à l'étape 5. En l'absence d'isolation en face arrière, nous aurions eu une décroissance progressive et continue de l'étape 2 à l'étape 5.

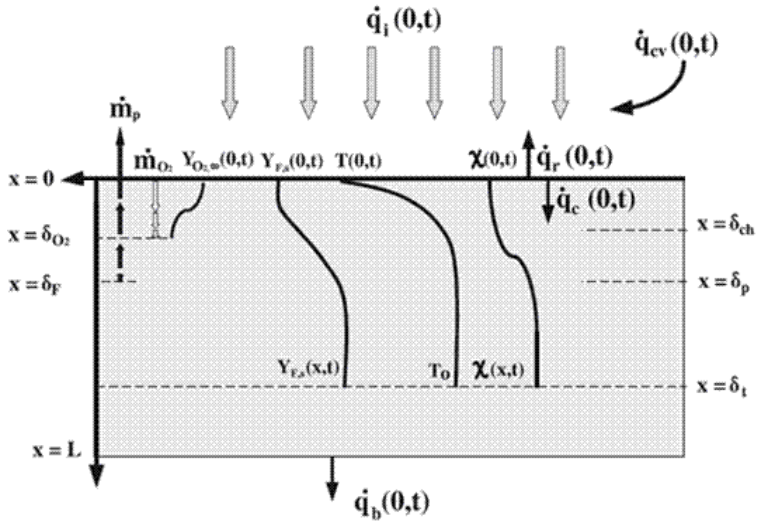

Figure 7 Représentation 1D de la dégradation d'un solide, Torero [Torero, 2008].

Les phénomènes prenant place peuvent être schématisés par les éléments rapportés sur la Figure 7. La première étape est la montée en température du solide sous l'effet du flux incident. La valeur maximale de la température se trouve à la surface, puis elle varie en fonction du temps

au sein de l'épaisseur du solide ($T_{x,t}$). L'évolution unidirectionnelle de la température est décrite par la résolution de l'équation de l'énergie entre les deux faces du solide, où $x = 0$ est la surface exposée et $x = L$ représente l'épaisseur. L'augmentation de la température du matériau entraine la production de gaz de pyrolyse (au-dessus de 200°C), représentée par $\dot{m}_p$, dont l'accumulation en surface peut entrainer l'inflammation. Le temps nécessaire à l'inflammation peut être décrit par l'expression suivante :

$$t_{ig} = t_p + t_m + t_i \quad (1)$$

avec t_{ig} délai d'inflammation, t_p temps pour établir la pyrolyse du solide, t_m temps pour atteindre les conditions adéquates de mélanges et t_i temps d'induction. L'hypothèse est généralement faite que $t_{ig} \approx t_p$, et que $T_{ig} = T_p$.

Les conditions liées à l'inflammation pilotée, sont une densité de flux thermique critique de 10 à 12 kW.m^{-2}. À partir de 20 kW.m^{-2}, l'inflammation peut avoir lieu en quelques dizaines de secondes [Batiot *et al.*, 2014, Tihay *et al.*, 2016]. La figure 6 montre alors une croissance de la vitesse de perte de masse et donc de la dévolatilisation, laquelle évolue en fonction de la formation de charbon en surface de l'échantillon. En fin de processus, le charbon est oxydé jusqu'à épuisement de la matière. Les gaz de pyrolyse sont alors émis en très faible quantité permettant une diffusion lente de l'oxygène dans le charbon.

Le bois étant un matériau complexe, il demeure des verrous scientifiques pour mieux comprendre sa dégradation, parmi lesquels :

- la caractérisation fine de ses propriétés physicochimiques en fonction de la température (conductivité, capacité calorifique, porosité…) ;
- la description du modèle cinétique (comprenant les mécanismes et les équations) qui atteint des limites dans certaines conditions d'utilisation, notamment à bas flux ;
- l'intégration de certains phénomènes physiques comme la délamination pour les bois contreplaqués.

3- Combustion du bois

La combustion du bois est gouvernée principalement par quatre phases, sièges de processus physico-chimiques complexes en forte interaction : la décomposition thermique en phase condensée, les transferts de chaleur et de masses à l'interface entre la surface du solide et la phase gazeuse, la combustion des produits de dégradations (flamme) et la combustion des charbons. Les essences de bois sont diverses et présentent des caractéristiques intrinsèques différentes pouvant impacter l'inflammation, le maintien des conditions de flamme ainsi que la dynamique d'un feu. Il a été précisé dans la section précédente que l'inflammation prend place lorsque les conditions requises sont atteintes, tant en termes de mélange combustible (atteinte des limites d'inflammabilité) que d'énergie apportée pour initier la réaction. Le maintien du processus de combustion dépend également de ces conditions :

- La décomposition thermique du solide doit être suffisante pour alimenter la flamme en matières combustibles, tout en conservant une concentration suffisante en oxygène.
- L'énergie apportée au système, via la combustion elle-même (énergie dégagée) doit être suffisante pour initier les réactions.

Dans ce cadre, l'étude de la combustion des solides demande une caractérisation précise des processus qui prennent place en phase condensée (décomposition thermique), en phase gazeuse (zone de flamme) ainsi que leurs interactions. La particularité du bois entraine également la

mise en place d'une combustion hétérogène, avec des réactions liée notamment à l'oxydation du charbon formé à la surface du matériau.

La grandeur fondamentale en incendie est la puissance de combustion (Heat Release Rate) qui peut être déterminée soit par calcul, soit par l'expérience, et qui dépend des conditions de ventilation de l'incendie (régimes sous-ventilé ou sur-ventilé). Cette puissance, issue de l'oxydation des produits de pyrolyse et de l'oxydation des charbons est donnée par le produit entre la vitesse de perte de masse du combustible et son enthalpie effective de combustion (caractéristique du combustible considéré). Elle gouverne la dynamique de l'incendie. Le débit de gaz de pyrolyse, dépend quant à lui principalement de la température du solide, avec une cinétique suivant une loi d'Arrhenius. De nombreuses techniques, de l'échelle laboratoire [Walter et Lyon, 1997] à la pleine échelle [ISO, 1991] ont été développées afin de déterminer la puissance dégagée lors de la combustion de matériaux solides et de comparer leur combustion. La figure 8 représente l'évolution temporelle de la puissance dégagée par la combustion d'un échantillon de chêne (de 100 cm^2) exposé à une densité de flux radiatif de 52 $kW.m^{-2}$. Ces expériences permettent de caractériser la cinétique de combustion du bois : suite au processus d'inflammation, la montée en puissance est liée à la présence de la flamme dont l'énergie libérée accentue la décomposition thermique et ainsi la combustion. Du charbon est formé en surface du solide (figure 9).

Cette couche de charbon joue un rôle de « barrière thermique », le flux de chaleur transmis par conduction jusqu'au bois vierge est alors diminué, ce qui a pour conséquence de ralentir le processus de dégradation thermique. Lorsque la couche de charbon en surface atteint une épaisseur critique, le débit de gaz de pyrolyse n'est plus suffisant pour maintenir la présence d'une flamme à la surface du solide. S'en suit alors le processus lent de combustion de cette couche de charbon qui est exothermique.

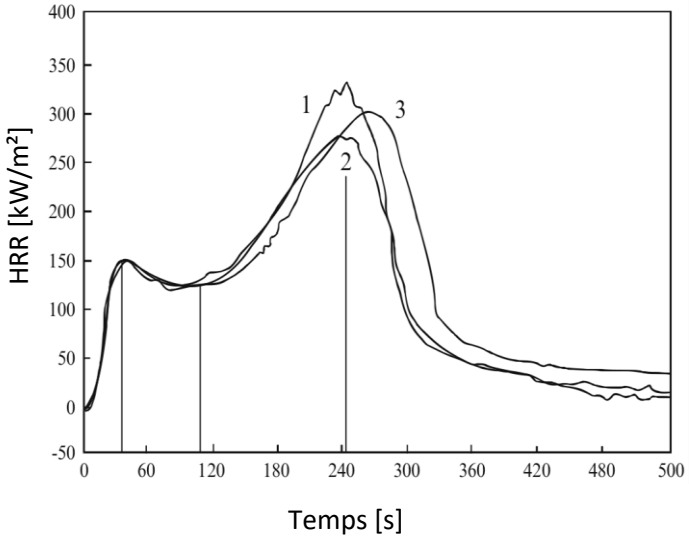

Figure 8 Puissance de combustion d'un échantillon de chêne exposé à une densité de flux de 52 $kW.m^{-2}$ [Aseeva *et al.*, 2014]

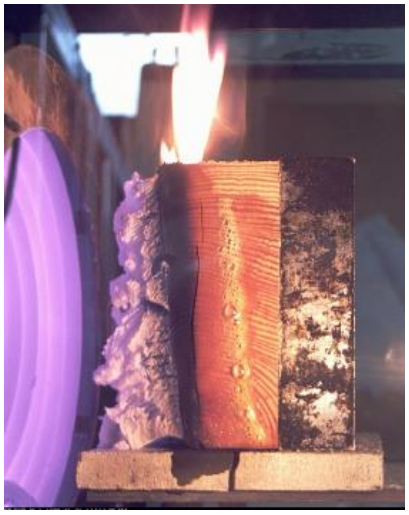

Figure 9 Combustion d'un échantillon de sapin en cône calorimètre ISO 5660 [Reska, 2008]

A l'aide de ces expériences, un certain nombre de paramètres relatifs au comportement au feu du matériau peuvent être déterminés, comme par exemple les puissances moyennes et maximales dégagées ainsi que les temps caractéristiques auxquels sont atteints les régimes critiques. Le bois est un matériau charbonneux, c'est-à-dire que le produit en phase condensée résultant du phénomène de pyrolyse est du charbon, principalement composé de carbone, ayant une structure fortement poreuse. L'épaisseur de la zone de pyrolyse dépend de l'épaisseur de pénétration de l'onde thermique qui est directement liée aux paramètres intrinsèques du bois tels que sa conductivité thermique, sa capacité thermique massique et sa masse volumique. La vitesse caractéristique de propagation d'un front de pyrolyse dépend des caractéristiques du matériau mais aussi des conditions d'incendie. Elle reste néanmoins faible, inférieure au mm/s mais pouvant aller jusque plusieurs cm/s dans le cas de propagations verticales. Les incendies de structures bois peuvent perdurer sur des temps relativement longs, mais aussi dégager une puissance importante de l'ordre de 100 kW/m^2 en moyenne, avec des pics de puissance pouvant atteindre des valeurs supérieures à $300kW/m^2$.

Comme mentionné précédemment, les phénomènes réactionnels en phase condensée sont encore mal connus. Ces phénomènes gouvernent en partie la dynamique d'inflammation, de développement et de propagation d'un incendie. De plus l'interaction entre la flamme et la paroi du solide, nécessite de bien identifier les espèces solides et gazeuses produites, la quantité de masse gazeuse produite, les quantités de mouvement des gaz sortant du solide…L'apparition de nouveaux modes de constructions (isolation des bâtiments par l'extérieur) ou encore l'utilisation de nouveaux types de matériaux (composites, bio-sourcés) rend l'étude de ces processus de combustion indispensable afin de garantir la sécurité des nouveaux ouvrages.

La modélisation et la simulation fine de ces phénomènes, en configuration complexe, reste un challenge pour la communauté scientifique et demande des efforts de recherche soutenus.

4- La propagation des flammes sur le bois

Après l'inflammation, le phénomène important est la propagation d'une flamme à la surface d'un élément de bois. Elle est due à la combustion du bois, après réchauffement du matériau vierge par le flux de chaleur de la flamme elle-même ou par un flux externe apporté par réflexion ou émission de rayonnement par l'environnement extérieur. Il existe deux cas extrêmes de propagation, contre-courant ou co-courant [Quintiere, 2006], comme le montre la Figure 9. Dans le premier cas, les gaz frais aspirés par la flamme sont entrainés dans la direction opposée à la propagation de la flamme, qui est alors lente (inférieure à quelques mm/s) [Fernandez-Pello et Hirano, 1982] et assez constante. A l'inverse dans le second cas, les gaz frais aspirés par la flamme sont entrainés dans la même direction que la propagation, qui est alors plus rapide et augmente fortement avec le temps (de l'ordre de quelques cm/s ou plus). Le Tableau 2 rappelle ces ordres de grandeurs.

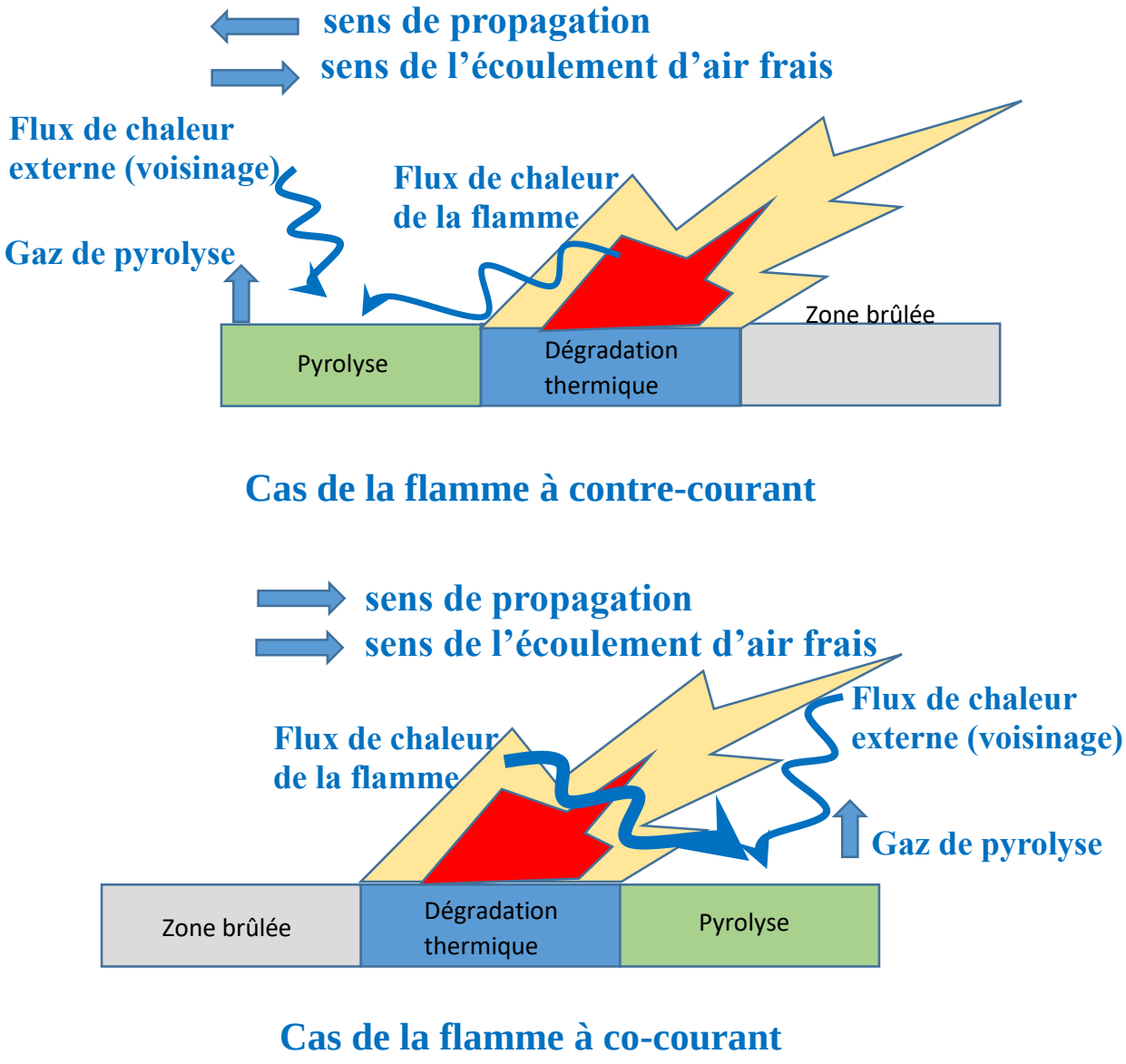

Figure 9 Différents modes de propagation d'une flamme sur un matériau solide

Phénomènes	Vitesse de propagation [cm/s]
Braises	$10^{-3} – 10^{-2}$
Propagation descendante sur solide	10^{-1}
Propagation ascendante sur solide	$1 - 10^{2}$
Propagation horizontale sur liquide	$1 - 10^{2}$
Propagation de feux urbains ou de végétation	$1 - 10^{2}$
Flammes pré-mélangées :	
- Déflagration laminaire	$10 - 10^{2}$
- Détonation	3.10^{5}

Tableau 2 Exemple de vitesses de propagation de flammes [SFPE handbook, 2008]

La différence de propagation entre les deux régimes est principalement liée à l'intensité des flux sur la zone vierge du matériau. Ce flux est beaucoup plus grand dans le cas d'une flamme à co-courant. Le confinement du foyer induit également des flux de chaleur par rayonnement émis ou réfléchis. Cela explique qu'il est plus ou moins difficile d'initier une flamme sur un matériau combustible, une poutre massive en chêne par exemple, en l'absence de confinement.

Plus précisément, lors de la combustion d'éléments horizontaux, le flux de chaleur au sein du matériau dépend des flux rayonnés, des échanges convectifs à la surface par l'entrainement de l'air environnant du fait des forces de flottabilité ainsi que des pertes par rayonnement à la surface du matériau. Lors de la combustion d'éléments verticaux, ou obliques, l'énergie transférée à la surface du solide par rayonnement augmente, en raison du facteur de forme important entre la flamme verticale et la surface du solide en regard. Dans ce cas, la flamme est très proche de la paroi et les échanges convectifs deviennent importants, contribuant également à réchauffer le combustible au travers de l'interaction flamme-paroi. La vitesse de propagation de la flamme n'est pas constante et peut augmenter (notamment pour les propagation verticale) en fonction du temps en raison de l'augmentation du transfert de chaleur. En effet, la chaleur transmise au matériau vierge augmente avec la longueur de flamme. La vitesse de propagation verticale d'une flamme sur la surface d'un solide combustible dépend donc de l'épaisseur de la zone de préchauffage du matériau vierge, du flux de chaleur provenant de la flamme et de l'inertie thermique du matériau pouvant varier d'un facteur 5 à 10 en fonction des différentes essences de bois, et du confinement.

Il faut aussi rappeler 'l'effet cheminée' qui se rencontre quand la flamme progresse verticalement dans un espace semi-ouvert ou clos, comme par exemple l'espace entre deux poutres de bois assez rapprochées. A cause des effets de canalisation, l'écoulement ascensionnel est accéléré, ce qui augmente la vitesse de propagation.

Lorsque plusieurs éléments sont enflammés, la puissance du foyer devient importante. La destruction éventuelle de la toiture au niveau du foyer, entrainera une meilleure ventilation, ce qui augmentera encore sa puissance. Si on s'intéresse à la croissance rapide des incendies comme celui de Notre-Dame, en s'appuyant sur une analogie avec les incendies de forêt ou les incendies urbains massifs, on peut dire que la dynamique de l'incendie est pilotée par deux forces : d'une part la force de flottabilité qui résulte du gradient de densité entre le panache chaud et l'air frais environnant et d'autre part la force d'inertie due à l'action du vent [Pitts, 1991]. La principale action de ces deux forces peut se résumer au pilotage de la trajectoire de la flamme et du panache thermique, dans la direction verticale pour la force de flottabilité et

dans la direction horizontale pour la force d'inertie [Pitts, 1991, Morvan, 2011]. Dans le cas des feux de charpente, la quantité de combustible disponible et par conséquent la puissance dégagée par le foyer correspond plutôt à des incendies ou la force de flottabilité est dominante. Les flammes sont de volumes substantiels. Ainsi, le rayonnement thermique est un des moteurs de la propagation du feu sur l'ensemble de la structure. Le rayonnement des flammes et des fumées est principalement dû aux gaz de combustion, aux particules de suies, et aux cendres. Ces dernières sont émises en quantités non négligeables, comme cela est généralement observé lors de la combustion de la biomasse [Barboni *et al.*, 2019]. Ce type d'incendie, marqué par la formation d'un puissant panache quasi vertical au-dessus du foyer, au sein duquel on peut relever des vitesses ascensionnelles très élevées, va favoriser l'éjection de particules enflammées dans l'atmosphère (les brandons) qui contribuent aussi à la dissémination de l'incendie dans la charpente et potentiellement sur des habitations environnantes [Porterie *et al.*, 2005].

La caractérisation des flammes (composition, température, propriétés radiatives, flux dissipés) est un sujet important qui demande des travaux expérimentaux et de modélisation en lien avec les thèmes de la combustion et des transferts thermiques. La part des flux rayonnés ou convectés est un autre sujet déterminant. La propagation de la flamme est un problème évident de transferts couplés, que l'on doit résoudre sur des échelles de plusieurs ordres de grandeur. Tous ces points demandent des efforts complémentaires en lien avec des expérimentations conduites aux différentes échelles.

5- Influence du confinement et de l'enveloppe

L'analyse des risques générés par un incendie doit également tenir compte de l'environnement où il se produit et notamment de l'enveloppe dans laquelle il est initié. Dans les lignes qui suivent l'enveloppe désigne la toiture, c'est-à-dire le matériau externe protégeant des intempéries l'ensemble des boiseries.

Dans le cas des habitations, l'ensemble des éléments participant à l'isolation (thermique, phonique, lutte contre les effractions) peuvent limiter les pertes thermiques. Pour un monument ancien, il n'y a pas généralement d'installation d'isolation. De plus, afin d'éviter des dégradations apportées par l'humidité ambiante, les toitures de ces bâtiments ne sont pas étanches, ce qui permet de ventiler les combles.

La présence de l'enveloppe, avant qu'elle ne soit détruite par l'incendie, conduit au confinement des fumées et du rayonnement émis par la source de feu.

Au cours du développement d'un incendie dans un local, le feu émet un rayonnement thermique qui est absorbé ou réfléchi par les parois. Il produit également des fumées chaudes qui réchauffent les parois et le plafond par rayonnement/conduction/convection. L'effet du rayonnement, émis à la fois par les fumées et les parois chaudes, est un mécanisme important. Cela engendre un flux 'additionnel' au flux de la flamme issue du matériau en feu (voir paragraphe 4). Ceci favorise l'échauffement des solides et entraine une augmentation de leur débit surfacique de pyrolyse. Ce phénomène est bien connu dans le cas des locaux d'habitation [Drysdale, 2004] ou industriels [Nasr *et al.*, 2013, Loo *et al.*, 2016]. Par contre, peu d'études ont été réalisées dans le cas des feux de charpentes.

Généralement, les feux qui se développent dans des locaux peuvent devenir rapidement limités par la ventilation. C'est-à-dire, que l'intensité du foyer à l'intérieur du local est fonction de la quantité d'air qui peut rentrer et être disponible pour la combustion. Ce n'est certainement pas ce qui est intervenu dans l'incendie de Notre-Dame. En effet, il est raisonnable de penser, comme cela a été dit plus haut, que les combles étaient bien ventilées et que le foyer a eu

suffisamment d'air au début pour se développer. Ensuite quand une partie importante de la charpente est en feu, l'effondrement de la toiture permet aussi une bonne ventilation du foyer par l'air extérieur.

Certaines parties des charpentes des monuments anciens sont assez complexes et comportent des enchevêtrements qui augmentent la charge combustible potentielle. On pense par exemple à la flèche, et aux intersections de la nef, du chœur et du transept. Il n'y a pas eu non plus de travaux sur la propagation des flammes pour ce type de configuration. Mais une analogie avec les piles de bois, 'wood cribs', permet de dire que le dégagement de chaleur sera influencé par la 'porosité' de l'assemblage [Drysdale, 2004], c'est-à-dire par le rapport S_{comb}/S_{air}, ou S_{comb} est la surface combustible disponible et S_{air} la section de passage disponible pour l'air. L'ordre de grandeur du dégagement de chaleur est alors de quelques centaines de kW/m^2 (de surface combustible).

6- Extinction

L'eau a une chaleur latente de vaporisation élevée (2260 kJ/Kg), elle est idéale pour éteindre les feux de combustibles solides et peut être efficace pour les feux de liquide avec l'ajout de certains additifs. Toutefois, il faut, pour un maximum d'efficacité, qu'elle soit introduite à la surface du combustible. Son action peut être multiple :

- Soit par refroidissement de la surface combustible, entrainant une diminution du débit de pyrolyse ;
- Soit par refroidissement de la flamme, diminuant le retour d'énergie vers la surface combustible et limitant la dégradation de celui-ci, donc la source de l'incendie,
- Soit par inertage, venant pénaliser le mélange entre les gaz de pyrolyse et le comburant, limitant ainsi la combustion.

Au plan opérationnel, les sapeurs-pompiers disposent de lances à incendie (dont les débits maxima peuvent varier de 500 à 1000 L/min) et de lances dites « canons » (dont les débits peuvent atteindre les 6000 L/min d'eau). De manière optimale, une lance incendie de 500 L/min permet d'absorber théoriquement 20 MW (par échauffement et vaporisation de la totalité de l'eau). En réalité, toute l'eau n'est pas utilisée efficacement pour combattre l'incendie. D'un point de vue thermique, seule une partie de la capacité d'absorption est utilisée. D'un point de vue opérationnel, on considère que le rendement classique pour une lance est de l'ordre de 20 à 60%. La capacité des moyens en eau à combattre le feu doit être mis en regard de la puissance développée par l'incendie. Pour le cas de Notre-Dame, des estimations différentes ont permis de démontrer, qu'à son paroxysme, la puissance maximale atteinte par l'incendie devait être de l'ordre 1 800 à 2 500 MW [Carlotti 2019]. Cette puissance très importante est à comparer aux 2 à 5 MW d'un feu d'appartement, ou aux 30 à 200 MW d'un feu de poids lourd. Dans ces conditions, il aurait fallu déployer 120 lances « parfaites », soit 60 m^3/s d'eau, pour éteindre instantanément l'incendie. Au-delà des problématiques liées à la disponibilité de la ressource en eau, il n'a pas été possible de mettre œuvre autant de moyens de lutte. 18 lances incendie ont été déployées sur des grandes échelles et bras articulés pour limiter au maximum la propagation de l'incendie depuis l'extérieur du bâtiment. On notera également l'utilisation d'un drone terrestre équipé de moyens en eau (jusqu'à 3000 l/min) pour combattre l'incendie à l'intérieur de la nef tout en évitant le risque humain en cas d'effondrement de la voûte. L'enjeu lors de la phase d'extinction est d'utiliser des moyens en eau sous sa forme optimale, en particulier sous forme divisée pour augmenter la surface d'échange eau / environnement et favoriser le refroidissement de la flamme, ou sous une forme plus directe pour refroidir les surfaces combustibles et limiter le phénomène de pyrolyse, tout en traversant un milieu ambiant particulièrement chaud (flammes et fumées).

La prévention des incendies dans le patrimoine culturel et bâti (églises, cathédrales, châteaux, musées, archives…) se limite généralement en France à la mise en œuvre d'un système de détection d'incendie permettant l'intervention rapide des sapeurs-pompiers suite au départ d'un feu. Les installations d'extinction automatique d'incendie, à base de sprinkler ou brouillards d'eau, sont à ce jour très peu employées dans le contexte de la protection de ces monuments aux contraintes bien spécifiques. L'intégration de ces systèmes au bâti (passage de canalisations, emplacement des buses d'aspersion) qui se doit de préserver les critères esthétiques du bâtiment et qui requiert l'approbation des architectes des monuments de France en est un des premiers freins. En phase de veille, les dégâts potentiels engendrés par les fuites ou déclenchements intempestifs, ou encore la vulnérabilité au gel des canalisations situées dans des zones souvent non chauffées (combles, charpentes…) constituent un second défi [Cablé et coll., 2018] pour ces bâtiments dont le mobilier, les œuvres d'arts, et le bâti en lui-même sont très vulnérables aux risques de dégâts des eaux. Les systèmes d'aspersion peuvent être de deux types : eau pulvérisée (sprinkler) et brouillards d'eau. Les premiers font appel à de grosses gouttes (d'un diamètre de l'ordre du millimètre ou plus), les seconds à une granulométrie plus fine (typiquement inférieure à 400 µm). Le brouillard d'eau, plus finement divisé, offre une surface d'échange plus importante, pour la vaporisation, et laisse donc présager une efficacité plus grande pour des quantités d'eau utilisées bien moindres. Les systèmes sprinklers emploient une quantité d'eau importante ce qui les rend indésirables dans un grand nombre de situations : par exemple les incendies se développant dans la salle des machines de navires ou encore concernant du matériel électrique ou des musées, mais dont la mise en œuvre est néanmoins préférable à celle de l'absence de systèmes automatiques qui laisse l'incendie se développer jusqu'à l'arrivée des sapeurs-pompiers. Dans la pratique, un grand nombre d'installations brouillards d'eau a déjà été réalisé dans le monde pour la protection dans des domaines aussi divers que : cabines ou espaces publics à bord de navires, salles d'archives, musées, bibliothèques, édifices religieux en bois (comme de très nombreuses églises en Norvège, souvent en bois). Du fait de la taille des gouttelettes générées, le brouillard d'eau peut jouer un rôle d'écran au rayonnement bien plus efficace que l'eau pulvérisée, et ainsi protéger les structures, équipements et personnes environnantes. Des travaux théoriques à l'échelle laboratoire [Coppalle et coll. 1993, Collin et coll. 2007, Garo et coll. 2010], comme à une échelle proche du réel [Parent et coll. 2006, Blanchard et coll. 2014] sur le « blocage » du rayonnement thermique par des sprays, montrent que l'atténuation dépend énormément du diamètre des gouttelettes et de leur concentration.

Si les mécanismes d'actions prépondérants de l'apport d'eau par brouillards d'eau et sprinklers sont maintenant bien identifiés (refroidissement et dilution dans la flamme du fait de la vaporisation et atténuation des flux de chaleur rayonnés), il demeure des verrous scientifiques pour mieux comprendre leurs effets sur l'incendie tels que :

- La détermination des mécanismes d'action lors d'un incendie en milieu confiné pour différents régimes de ventilation
- La caractérisation du temps d'arrivée d'eau et du débit d'eau au dispositif d'aspersion en fonction des critères géométriques des systèmes d'extinction automatique et des conditions initiales (pression, type de fluide employé) suite au déclenchement
- La compréhension des effets sur les délais d'extinction. Une attention particulière est à porter sur les phénomènes de refroidissement des surfaces et de la flamme, de déplacement d'O_2 et d'atténuation des flux radiatifs.

On le voit dans les paragraphes ci-dessus, la compréhension des incendies, et la prévention vers laquelle nous souhaiterions aller, est un problème complexe, impliquant des phénomènes couplés à différentes échelles. Les efforts entrepris par la communauté scientifique portent sur tous les points évoqués plus haut : propriétés des matériaux, dégradation, inflammation, propagation, lutte. La connaissance acquise par le biais des essais instrumentés et des efforts de modélisation et simulation est bien meilleure depuis quelques années et le GDR Feux joue un rôle crucial pour coordonner notre communauté. Le cas du sinistre de Notre-Dame de Paris, montre toutefois les limites actuelles de nos capacités. Une des clés est en particulier l'échelle du sinistre et l'ampleur de la puissance développée qui a exacerbé les phénomènes couplés. A ce niveau et depuis la rédaction de ce document, on ne peut que faire référence à l'incendie de Lubrizol, qui, s'il a mis en œuvre des combustibles différents, présente aussi des similitudes en termes de puissance développée, ou encore d'emballement. Les laboratoires engagés dans la compréhension des incendies et la lutte contre les feux, de bâtiments, industriels ou de végétation, doivent poursuivre leurs efforts et leur coopération. Le GDR Feux est en particulier un espace collaboratif crucial pour ces échanges et pour l'interaction entre laboratoires et services opérationnels.

Références

Anon, thermo physical properties of matter, thermal radiative properties of non-metallic solids plenum press, New York, 8 (1972).

Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. "Fire behavior and fire protection in timber buildings", Springer Series in Wood Science, 2014.

Babrauskas V. Development of the Cone Calorimeter – A Bench-scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption. Fire and Materials, Vol. 8, p. 81-95, 1984.

Barboni T., Leonelli L., Santoni P.A., Tihay-Felicelli V., Study of the burning of Pteridium aquilinum L. and risk for the personnel involved: Thermal properties and chemical risk, online, in press, 2019

Batiot B. Etude et modélisation de la cinétique de décomposition thermique des matériaux solides. Application à la dégradation du bois en cas d'incendie. Thèse de l'école nationale supérieure de mécanique et d'aéronautique, 2014.

Batiot B., Luche J., Rogaume T. Thermal and Chemical analysis of flammability and combustibility of fir wood in cone calorimeter coupled to FTIR apparatus. Fire and materials, Vol. 38, p. 418-431, 2014.

Blanchard E., Boulet P., Fromy P., Desanghere S., Carlotti P., Vantelon J.P., Garo J.P. Experimental and numerical study of the interaction between water mist and fire in an intermediate test tunnel, Fire and Technology, Vol. 50 (3), p. 565-587, 2014.

Cablé A., Chetehouna K., Gascoin N., Van Herpe K., Kadoche M. Évaluation d'un système sprinkler « sous-vide » d'air pour la protection incendie du patrimoine bâti. 3ème Envirorisk – Forum de la gestion des risques naturels et technologiques– Bourges, 12-13 Juin 2018.

Carlotti P., « Quelques ordres de grandeur pour mieux comprendre le feu de Notre-Dame », sur Face au risque, 18 avril 2019

Collin A., Boulet P., Parent G., Lacroix D. Numerical simulation of a water spray – Radiation attenuation related to spray dynamics. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, p. 856 – 868, 2007.

Coppalle A., Nedelka D., Bauer B. Fire protection: water curtains, Fire Safety Journal, Vol. 20, p. 241-255, 1993.

Deglise X., Donnot A. Bois énergie, Techniques de l'Ingénieur BE8535, p. 1-21, 2004.

Di Blasi C. Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring

solid fuel. Progress Energy Combustion Sci., Vol. 19, p. 71-104, 1993.

Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Progress in energy and combustion science, Vol. 34, pp. 47-90, 2008.

Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Ed Wiley, 2ème edition, 2004.

Dumon R., Gelus M. Valorisation chimique du bois. Chap. III : Préparation du bois de feu, édition Masson, 1982.

Fernandez-Pello A.C., Hirano T. Controlling Mechanisms of Flame Spread, Combustion Science and Technology, p. 1-31, 1982.

Garo J.P., Vantelon J.P., Lemonnier D. Effect on radiant heat transfer at the surface of a pool fire interacting with a water mist, ASME, Journal of Heat Transfer, Special issue on radiative heat transfer, Vol. 132 (2), p. 1-9, 2010

Gerandi G., Tihay-Felicelli V., Santoni P.A., Leroy V., Cancellieri D., Multi-scale modeling of the degradation of thermally thin wood plates, Fire Safety Journal, 108, 102823, 1-13, 2019

Gronli M.G., Varhegyi G., Di Blasi C. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. Ind Eng Chem Res, vol. 41, p. 4201-4209, 2002.

ISO 9705 fire tests – reaction to fire – full scale room fire test for surface products. International Standards Organization, Geneva, 1991.

Kanury A.M., Blackshear P.L. Some Considerations Pertaining to the Problem of Wood-Burning, Combustion Science and Technology, Vol. 1, p. 339-355, 1970.

Loo A. S.-X., Coppalle A., Yon J., Aîné P. Time-dependent smoke yield and mass loss of pool fires in a reduced-scale mechanically ventilated compartment, Fire Safety Journal, Vol. 81, p. 32-43, 2016.

Mermoud F. Gazéification de charbon de bois à la vapeur d'eau de la particule isolée au lit fixe continu, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.

Morvan D. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling, Fire Technology, Vol. 47, p. 437-460, 2011.

Nasr A., Suard S., El-Rabii H., Garo J.P., Gay L. Heat feedback to the fuel surface of a pool fire in an enclosure, Fire Safety Journal, Vol. 60, p. 56-63, 2013.

Picard R. La structure du bois, Rue des écoles,

https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/1_w402i01

Pitts W.M. Wind effects on fire, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 17, pp. 83-134, 1991.

Parent G., Boulet P., Gauthier S., Blaise J., Collin A. Experimental investigation of radiation transmission through a water spray, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 97, p. 126 – 141, 2006.

Porterie B., Zekri N., Clerc J.-P, Loraud J.-C. Influence des brandons sur la propagation d'un feu de forêt, Comptes Rendus Physique, Vol. 6 (10), p. 1153-1160, 2005.

Quintiere J.G. Fundamentals of Fire Phenomena, Wiley-Blackwell, 2006.

Reska P. "In-Depth temperature profiles in pyrolyzing wood, Phd Thesis, 2008

Roberts A.F. The heat of reaction during the pyrolysis of wood, Combustion and Flame, Vol. 17, pp. 79-86, 1971.

SFPE handbook of Fire Protection Engineering. Fourth edition, SFPE – NFPA, p. 2-260, 2008.

Shafizadeh F., Chin P.S. Thermal deterioration of wood, Wood Technology, Washington, DC, ACS Press, 1977.

Tihay V., Santoni P.A., Barboni T., Leonelli, L., Autoignition of dead shrub twigs: Influence of diameter on ignition, Fire Technology Vol. 52 (3), p. 897-929, 2016.

Tillman D.A., Rossi A.J., Kitto W.D., Wood Combustion. Principles, Processes and Economics, Academic Press, New York, 203 (1981).

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

Torero J. Scaling up fire. Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, p. 99-124, 2013.

Walter R.N. and Lyon E., Microscale combustion calorimeter for determining flammability parameters of materials. In: Proceedings of 8th annual BCC conference on recent advances in flame retardancy of polymeric materials, Stamford, CT, USA, 1997.

Zhou X. Contribution à l'étude de l'incinération des déchets urbains : expérimentation en réacteur à lit fixe à contre-courant, approche théorique du déplacement du front d'inflammation. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1994.