

THEORIE ET SCIENCE DU FEU

Hugues Chicoine CFEI
(avril 2002, septembre 2007)

Introduction.....	1
Consigner les données d'une expérience	2
Mesure de température de la combustion dans la masse.....	5
Matériaux et procédés.....	5
Lecture des températures	10
Températures colligées	11
Plage des températures du feu	13
Applications pratiques et conceptuelles.....	15

Introduction

Depuis l'invention des thermomètres et leur perfectionnement, il a été relativement facile de connaître les températures des épiphénomènes du feu, et l'on s'est principalement intéressé aux manifestations les plus spectaculaires et les plus intenses – les flammes, c'est-à-dire la combustion en phase gazeuse ; les références abondent. Il en va tout autrement des températures du feu dans les autres modes de la combustion -- en phase solide ou dans la masse, que l'on désigne généralement sous incandescence.

Dans le but de cerner le concept du feu ordinaire dans ses deux modes de combustion, nous avons conçu, réalisé puis analysé une expérience de mesure de la température du feu dans ses manifestations à basse température. Un exercice de compilation nous indique dans quelle continuité s'inscrivent les plages de température respectives de la combustion en phase solide et de la combustion en phase gazeuse.

La mesure de la température des flammes du feu ordinaire et la mesure de l'incandescence ou de la combustion dans la masse sont des approches qui permettent de concevoir le feu sans cet autre épiphénomène qu'est l'accumulation des calories – le principe du four – grâce à quoi la température peut s'élever bien au-delà de celle des flammes.

Les manuels traitant de sécurité incendie [38] mis à jour aux cinq ans depuis 1969 consignent les températures de la combustion en milieu expérimental et les températures du feu mesurées dans les conditions d'incendie sous deux rubriques principales : pour les températures basses, on rapporte les températures d'ignition des matériaux, et pour les températures hautes on énumère les températures des flammes.

Températures basses. Les plages d'ignition des matériaux inflammables¹ et combustibles² servent à classer les matériaux selon leur susceptibilité au feu.

Températures hautes. La communauté scientifique concernée tient par ailleurs pour valide et applicable la courbe température-temps empirique (circa 1914 [70, 77]) et normalisée (mathématique, circa 1973 [49]) à titre de représentation générale ou globale d'un incendie en heures pour le classement des matériaux les moins susceptibles au feu, et on en est venu à considérer la courbe température-temps comme globalement représentative de l'incendie en milieu confiné. Les efforts consentis pour mathématiser la courbe empirique témoignent de la valeur que l'on accorde à la notion température-temps.

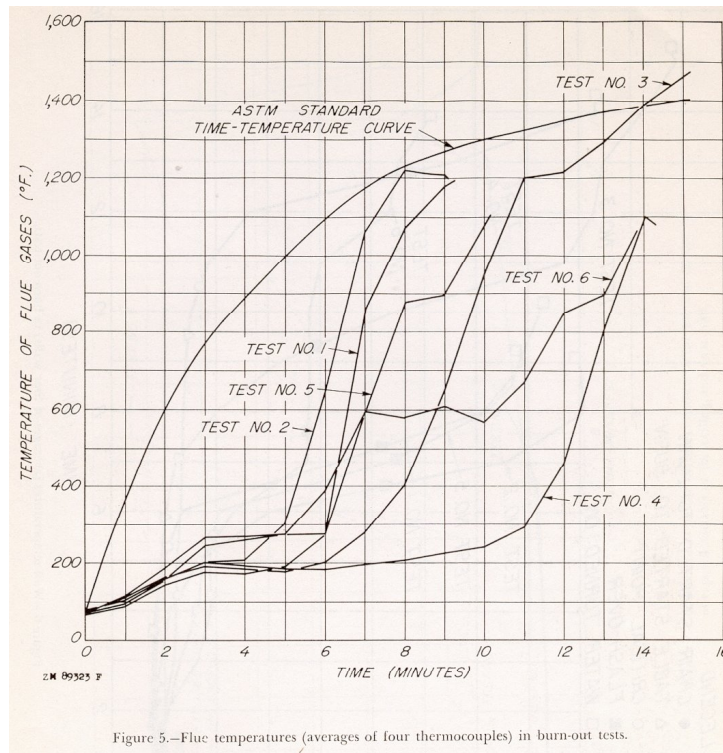
Consigner les données d'une expérience

Des recherches menées en 1953 [17] et de 1994 à 1997 [55] portant sur les températures d'incendies dans des conditions ordinaires³, ont utilisé des méthodes scientifiques de consignation des données qui révèlent que la courbe température-temps de ces expériences convient moins pour caractériser le feu dans le premier quart d'heure de l'incendie — sur 16 minutes ou moins. Or, dans la société québécoise depuis 2000-2001, on met en œuvre, par directive ministérielle, des moyens substantiels pour intervenir aux incendies au plus tard dans une plage de temps de l'ordre de quinze minutes [25, 62].

Dans la plupart des cas expérimentaux ainsi consignés [17, 55], l'élévation de la température s'accomplit d'une manière irrégulière et apparemment imprévisible ([figure 1](#)), mais la courbe enregistrée peut s'avérer comparable à la courbe normalisée

dans la première minute - quoique non congruente - lorsqu'un produit inflammable est en cause ([figure 2](#) en page suivante).

Figure 1 : Apposition de la courbe température-temps avec les courbes consignées de six incendies expérimentaux réels [17].



[17] BRUCE, H.D., *Experimental dwelling-room fires*, No.D1941, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory & University of Wisconsin, 1953, 19 p.

Figure 2 : Courbes température-temps (en secondes) de l'essai # 6, *USFA fire burn pattern tests* ⁴. Cet essai repose sur l'ignition de 1,25 litre (0.33 U.S. gal.) de gazoline au plancher.[55] La courbe température-temps normalisée a été ajoutée par nos soins d'après les valeurs calculées en quarts de minute au moyen de la fonction : $T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1)$.

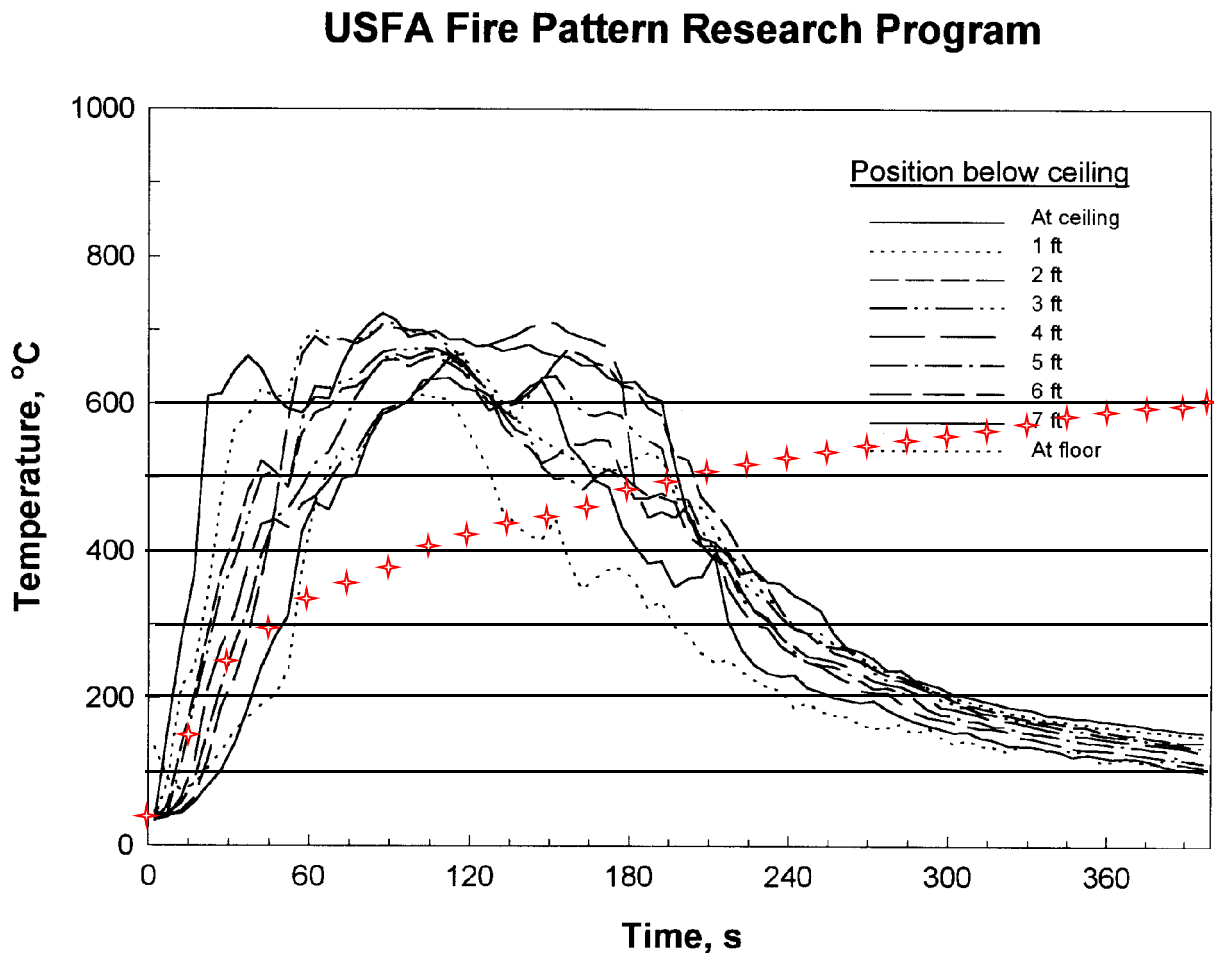


Figure 29 Center of Room Temperature Profile, Test 6

[55] KENNEDY, P.M. et SHANLEY J.A. *Report of the United States Fire Administration Program for the Study of Fire Patterns, USFA Fire Burn Pattern Tests*, Federal Emergency Management Agency, United States Fire Administration, July 1997, 210 p.

Face à ce problème qui a pour effet d'occulter les basses températures du feu, d'autant plus qu'un incendie peut se réaliser entièrement et exclusivement dans le mode incandescent, nous avons entrepris de reconsidérer les notions de température à notre disposition. En cours de réflexion, nous avons rencontré une situation déficitaire à l'égard des températures basses du feu, c'est-à-dire le pied de la courbe température-temps.

Ceci nous a amené à concevoir et réaliser une expérience de combustion dans la masse mettant aussi en œuvre l'incandescence. Une désignation du feu à titre de phénomène ordinaire doit par ailleurs répondre aux définitions généralement admises, comme suit :

- le feu produit de la chaleur
- c'est une réaction en chaîne soutenue ou auto-accélérée par laquelle
 - l'oxygène se combine (oxydation) par contact direct avec les matériaux susceptibles, ce que l'on désigne sous combustion en phase solide ou incandescence, qui se manifeste par un rougeoiement parfois visible et qui peut se maintenir longtemps à des températures basses
 - et/ou c'est une réaction par laquelle l'oxygène se combine avec les gaz distillés issus des matériaux soumis à la chaleur ; ce mode est désigné sous combustion en phase gazeuse ; ce mode de combustion est caractérisé par des flammes et l'émission de lumière, et l'on enregistre des températures plus élevées.

Mesure de température de la combustion dans la masse

En compagnie de l'ingénieur David Matte, nous avons effectué un essai de combustion dans la masse aux fins de mesurer les températures de l'incandescence.

Matériaux et procédés

Nous avons utilisé des cartons d'œufs fabriqués à 100 % de fibre de papier recyclé, c'est-à-dire de la cellulose⁵ moulée⁶, un matériau représentatif des matières organiques

végétales solides (figure EXP-1). Cette matière et son objet (le carton d'œufs) sont suffisamment courants pour être considérés comme étant d'usage domestique.



Carton d'œufs, papier 100 % recyclé (fibre cellulosique). Un carton mesure 11 ½ po. de largeur (29 cm), et 9 ½ po. (23,5 cm) avec le couvercle ouvert. Un carton occupe une aire approximative de 681,5 cm² (109,25 po²) et il pèse 0.120680 lb⁷ (1.93088 oz ou 54,6439 grammes).

Figure EXP-1 : Matériau (toutes les photographies par l'auteur)

Deux masses de 25 cartons, emboîtés en position ouverte, furent individuellement emballés dans du papier kraft ; chaque masse pèse 3,017 lb (1,3660 kg).

Les deux masses furent placées côte à côte dans un foyer circulaire d'un diamètre intérieur de 60 cm (24 po.). Le foyer est une installation de 1,14 m de hauteur au pied de laquelle on a enlevé une pièce au niveau du sol pour favoriser l'apport d'air par le bas de manière à ne pas interdire la convection naturelle). Le papier d'emballage fut allumé au moyen d'une flamme appliquée entre les masses. Rapidement, chaque masse de cartons fut enveloppé par les flammes (figure EXP-2).



Figure EXP-2 : Allumage et combustion du papier d'emballage.

Comme nous voulions mesurer la température de la combustion dans la masse jusqu'à l'incandescence et non l'inverse (la combustion en phase gazeuse jusqu'à l'incandescence, comme un feu de bois dans un foyer) — nous avons supprimé les flammes en appliquant un jet d'eau au moyen d'un boyau de jardin ordinaire, mais pas suffisamment pour imbiber la masse des cartons et supprimer la combustion sous le carbone superficiel (figure EXP-3).



Figure EXP-3 : Suppression des flammes.

L'expérience aurait pu se terminer là si l'on avait utilisé trop d'eau pour abattre les flammes, mais comme la suite le démontre à partir de ce point, la température s'est de nouveau élevée sans reprise de la combustion avec flammes. Nous avons séparé les masses en retirant la pile de droite afin d'éliminer l'effet de réverbération radiante entre les deux masses. À l'interruption de la combustion en phase gazeuse, la combustion dans la masse s'est maintenue avec production de fumée. Toutefois, au sommet de l'assemblage, on remarque encore une petite flamme (figure EXP-4).



Figure EXP-4 : La combustion dans la masse s'accompagne d'une émission de fumée.

Nous n'affirmons pas que la combustion dans la masse s'accompagne nécessairement de flammes au sommet (figure EXP-4), ni que cette manifestation ait quelque influence sur la température dans la masse (figure EXP-5). La combustion dans la masse n'est pas un mode de combustion applicable à tous genres de matériaux.



Figure EXP-5 : En l'absence de toute flamme, l'émission de fumée est le seul indice visible qui témoigne de la combustion.

Enfin, vers la fin de l'expérience, nous pouvions apercevoir une première zone de combustion incandescente dans la partie inférieure de la masse. Nous l'avons photographiée et y avons placé la tige du thermomètre sans remanier la masse en combustion (figure EXP-6.).



Figure EXP-6 : Une zone incandescente est visible à la base de la masse de cartons.

Finalement, nous avons rabattu quelque peu ce qui restait de la masse de gauche dans le foyer et qui semblait n'être que de la cendre et du carbone. Ce faisant, nous avons exposé au maximum la zone incandescente, entraînant un apport d'air à la pression atmosphérique normale, et y avons inséré la tige du thermocouple ou bi-métal (Figure EXP-7).



Figure EXP-7 : La zone incandescente est exposée à un apport d'air direct.

À la comparaison des figures EXP-2 et EXP-7, on constate qu'il y a eu une nette perte de substance. L'expérience a duré environ quarante-cinq minutes entre le moment de l'ignition et celui de la dernière lecture.

Lecture des températures

Notre lecture des températures dans la masse ne s'est pas déroulée de manière continue dans l'ensemble de la masse expérimentale.

Alors que des flammes s'élevaient encore à la surface des masses expérimentales après consommation du papier d'emballage, on lisait une température de 875 °F (468 °C) dans la masse de la pile de gauche à l'intérieur de laquelle on avait fiché le câble chromel-alumel du thermomètre (EXP-2). Cette température est donnée à titre de renseignement seulement et nous n'avancions pas qu'il s'agit là de la température de la combustion

dans la masse à ce stade de l'expérience car une partie de la sonde est soumise aux flammes.

Toutefois, dès après la suppression des flammes (figure EXP-3), le cadran du thermomètre indiquait 662 °F (350 °C). C'est la température la plus basse que nous ayons enregistré.

Lorsque toute trace de vapeur d'eau fut dissipée (figure EXP-4), on pouvait noter une émission de fumée, et la lecture du thermomètre indiquait 725 °C (385 °C) c'est-à-dire une température encore inférieure à la température enregistrée au cours de la combustion en phase gazeuse.

La combustion dans la masse est un phénomène lent, et plus la masse est volumineuse, moins on aura l'assurance de mesurer effectivement le phénomène à l'étude.

Dans le cas d'une petite masse, l'expérience est plus facile à contrôler et les résultats sont plus fiables. C'est pourquoi nous avons piqué ailleurs l'extrémité du thermocouple où l'on pouvait lire une température de l'ordre de 800 °F (427 °C) (figure EXP-5).

Avec le temps, nous avons vu poindre une petite zone d'incandescence à la base de la masse, et à ce site précis la température enregistrait 875 °F (468 °C) (figure EXP-6).

Finalement, nous avons quelque peu ouvert la zone incandescente à un apport d'air naturel (figure EXP-7), et la combustion incandescente a entraîné la température jusqu'à 1125 °F (607 °C). Nous pensons qu'il s'agit là de la température incandescente la plus élevée que l'on puisse obtenir avec ce matériau dans des conditions normales, c'est-à-dire sans apport d'air additionnel (vent, air forcé) et à l'exclusion du réchauffement de la masse par l'effet des calories accumulées dans l'environnement immédiat (c'est-à-dire sans augmentation substantielle de la température ambiante).

Températures colligées

La figure EXP-8 collige les températures mesurées au cours de l'expérience de combustion dans la masse. Les points représentent les lectures montrées aux figures

EXP-3 à EXP-7 inclusivement. Nous avons exclu la température ambiante au temps zéro (0) – 20 °C, la lecture enregistrée en EXP-2 au temps zéro au cours de la combustion en phase gazeuse de l’emballage des masses de cellulose, et nous avons ajouté la température d’ignition théorique (232 °C).

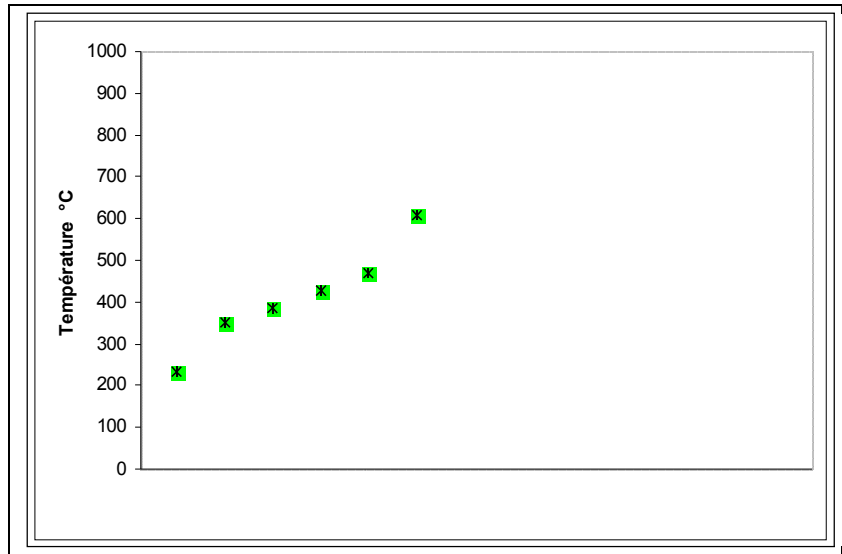


Figure EXP 8 : Températures mesurées au cours de notre expérience de combustion dans la masse – fibre cellulosique à 100 % de papier recyclé.

Notre première lecture enregistrait 350 °C, alors que la cellulose de papier recyclé est susceptible au feu – à l’ignition⁸ – à partir de 232 °C (450 °F) selon certaines sources. Ceci met en relief combien la température d’ignition et la température de combustion diffèrent car une fois amorcé, le phénomène de combustion fait augmenter la température du matériau soumis au processus d’oxydation auto-accélééré.

Le premier point du graphique EXP-8 représente la température d’ignition théorique atteinte au cours de l’allumage. Les autres points représentent les températures de combustion enregistrées : 350 °C (662 °F), 385 °C (725 °F), 427 °C (800 °F), 468 °C (875 °F) et 607 °C (1125 °F). Ainsi, même dans la masse, c’est-à-dire dans les moins bonnes conditions pour la disponibilité d’air de combustion, le feu – oxydation par contact de l’oxygène - demeurerait un phénomène auto-accélééré.

Plage des températures du feu

L'un des buts de l'exercice consistait à tenter d'établir une plage des températures du feu ordinaire, de manière à ne pas considérer les températures d'ignition comme autant de repères pour la combustion, c'est-à-dire une plage des températures qui corresponde spécifiquement au feu à titre de manifestation (figure 3).

Nous avons observé des températures entre 662 et 1125 °F (350 à 607 °C) pour l'incandescence, alors que d'autres sources rapportent une plage moins étendue dans les températures basses : pour le tabac à cigarette, entre 930–1300 °F (500–700 °C) en combustion libre, et 1520–1670 °F (830–910 °C) avec aspiration (l'équivalent de l'effet d'un soufflet).

D'autre part et après étude, Babrauskas estime que les températures à la pointe de flammes de diffusion turbulentes [zones de flammes dites intermittentes] doivent être estimées dans l'ordre de 320~400°C (608 à 752°F). Dans la région continue d'autres flammes (issues de déversements d'hydrocarbure d'environ 1 m de diamètre), on peut s'attendre à des températures de l'ordre de 900°C (1652°F) ; dans des déversements sur une plus grande aire, cette valeur peut s'élever à 1100~1200°C (2012—2192°F).

Incandescence (plage de 350 à 910 °C)	Flammes (plage de 900 à 1200 °C)
Oxygène en contact avec un solide combustible dans la masse ou en surface	Oxygène se combinant aux hydrocarbures gazeux [Babrauskas]
350 ~ 607 °C (662 ~ 1125 °F), Chicoine et Matte (fibre cellulosique)	
Phase pyrolytique dont le plateau se situe à 445°C (833 °F), NASA	
500 ~ 700 °C (930 ~ 1300 °F), NFPA 921, 2001 (tabac)	
830 ~ 910 °C (1520 ~ 1670 °F avec apport d'air), NFPA 921, 2001 (tabac)	900 °C (1652 °F)[5]
	1100 ~ 1200 °C (2012 ~ 2192 °F)[5]

Figure 3 : Continuité des températures de combustion en phase solide et en phase gazeuse. Le chevauchement s'avère relativement étroit.

Les données de la figure 3 peuvent être représentées sous forme graphique comme suit (figure 3A) :

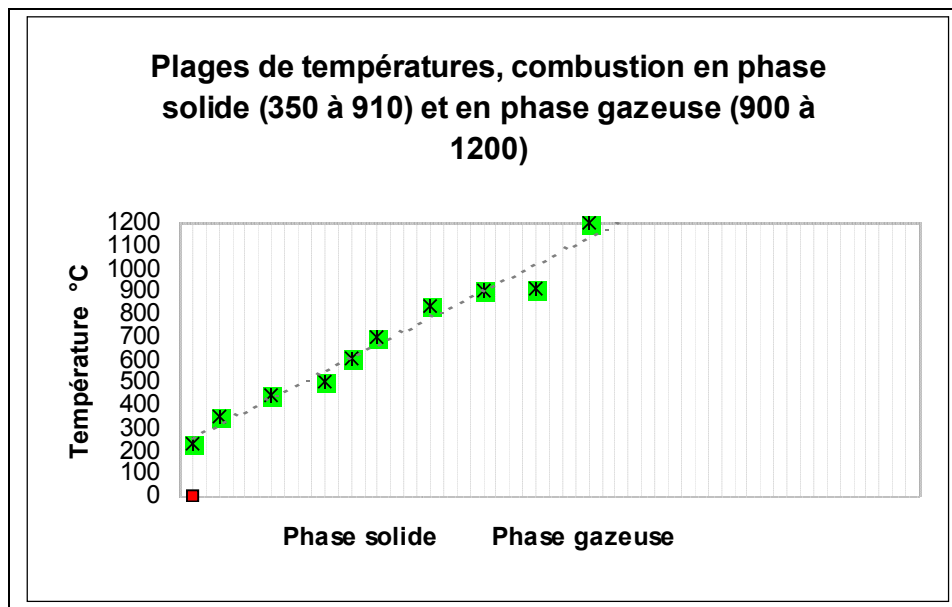


Figure 3A : Représentation graphique des plages de températures de la combustion en phase solide de la cellulose de papier recyclé (température d'ignition 232 C, max. 607 C) et de la combustion en phase gazeuse (min 900/max. 1200) de n'importe quelle substance ou matériau susceptible.

Une courbe générale du feu ordinaire ne doit pas tenir compte du temps pour deux raisons : (i) cela implique l'accumulation des calories dans l'environnement en cause, et (ii) on ne peut pas inclure tous les matériaux car les flammes des substances gazeuses pré-mélangées ou en quasi stœchiométrie, atteignent leurs températures maximales instantanément. Pour le feu ordinaire et la plupart des substances susceptibles d'être rencontrées à l'état naturel, cette courbe serait linéaire et n'excéderait pas 1200 °C. Si cette approche devait avoir quelque valeur, c'est tout l'historique de la science du feu qui s'en trouverait réaménagé.

Pour les matériaux spécifiques, des essais doivent être menés afin de déterminer, outre leurs températures d'ignition, leurs plages de températures de combustion (pour la cellulose de papier recyclé, nous avons obtenu de valeurs de 350 à 607 °C juste pour la combustion en phase solide) car en situation d'incendie le phénomène du déficit

d'oxygène est plus souvent la règle que l'exception : « **L'extension du foyer**. Quelques minutes après la formation galopante de ce foyer, l'oxygène commence à ne plus arriver en quantité suffisante dans l'intérieur même de celui-ci (ce phénomène n'est pas surprenant puisqu'il se constate déjà dans la flamme, qui est partagée en trois zones, d'une bougie). » [Gayet 1973, p.152]

Applications pratiques et conceptuelles

L'approche qui consiste à aborder la susceptibilité des matériaux à l'ignition s'enrichit de celle qui consiste à connaître les températures de combustion dans les situations réelles d'incendie, en particulier dans la plage relativement limitée des températures du feu ordinaire. Pour visualiser l'effet de cette approche selon les plages de températures du feu ordinaire, nous avons adapté un tableau par Wood (1995) et y avons inséré les données élaborées aux figures 3 et 3A (figure 4). La figure 4 présente les points de fusion des matériaux et non leurs points de feu ou leurs températures de combustion, de sorte qu'aux fins d'applications pratiques, on peut employer la figure 4 comme matrice de référence pour l'interprétation tracéologique du feu selon l'énoncé de Gayet afin de ré-introduire la notion du temps quand les matériaux et températures atteintes sont connus :

« Le foyer initial se situe à l'endroit où la combustion a duré le plus longtemps: pendant toute la période de formation du foyer d'abord, pendant l'incendie ensuite. C'est donc, en vertu de la loi température-temps, là où la température aura été la plus élevée. Le vent, les courants d'air, les exutoires des pompiers interviennent seulement pour entraîner l'incendie sans une direction ou une autre, mais ils n'affectent pas la loi. Dans ces conditions, l'examen des lieux visera à établir le bilan des destructions et dégâts en vue d'estimer la durée de la combustion et les températures atteintes. [...] On cherchera ainsi à établir les courbes d'égales températures atteintes. Elles s'enveloppent et se resserrent autour d'un ou plusieurs épicentres. » [Gayet 1973, p.204]

D'autres, comme Wood (1995) utilisent la même approche mais en d'autres termes⁹.

Dans ce tableau, on note que l'embrasement et les températures post-embrasement ont fait l'objet de recherches poussées et suivies, et ce phénomène transitoire d'un incendie se situe dans la partie haute des températures de l'incandescence, à tel point que ce phénomène tant redouté chez les pompiers peut se produire sans même qu'une flamme soit apparue dans l'environnement sinistré par le feu.

THEORIE ET SCIENCE DU FEU - HUGUES CHICOINE CFEI
(avril 2002, septembre 2007)

Tableau PLAGE DES TEMPÉRATURES DU FEU Figure 4 : Le feu à titre de phénomène en fonction des matériaux constituant un environnement construit moderne : points de fusion des matériaux d'aéronefs d'après [76] et repères thermométriques d'incendie.

Phénomène	Température°C	Point de fusion des matériaux
	3410	tungstène
	2627	molybdène
	1888	chromium
	1732	vanadium
	1704	titane pur
	1549-1649	alliages de titane
	1538	fer
	1482	acier inoxydable
	1454	nickel
	1243	manganèse
	1232	glaçure porcelaine
Pic de température, flammes[5]	1200 ↓	
	1060	fusion de l'or
	960	argent
	913	bronze
Incandescence. à 910°C ↓ température post-embraselement	900-1000°	
Combustion phase gazeuse	900 ↑	
Les flammes enregistrent des températures de 900 à 1200°C, incluant les hydrocarbures déversés.		
	760-871	amollissement du verre
	677	alliages magnésium, aluminium
	649	tissus de fibre de verre, magnésium
	635	panneau d'aluminium, Al pur
	629-788	soudure à l'argent
seuil embrasement (Babrauskas)	600	
seuil embrasement (NFPA 921)	590	
seuil embrasement général [62b]	500	
mode pyrolytique	480	
	477	eutectique d'aluminium
	454	perte de rigidité aluminium
	416	zinc
Incandescence (350 - 910°C) ↑	Oxygène en contact avec le solide combustible organique.	
	329	plomb
	321	cadmium
	249	nylon
	221	sélénium
	135	décomposition laine
	121	délaminage des phénoliques
	99	distorsion méthyle méthacrylate, polystyrène
	85	distorsion PVC
	54	cire

Nous avons trouvé que le feu dans le mode de la combustion dans la masse se manifeste entre 350 et 607 degrés C pour les matières ordinaires comme la cellulose de papier recyclé, alors que dans des conditions normales, en dehors des systèmes de combustion (moteurs, chambres de combustion, etc.) les flammes d'hydrocarbures ne dépassent pas un pic de 1200 degrés C (Babrauskas). Les températures basses déterminées par nos soins abaissent substantiellement les niveaux de température de la combustion rapportées dans les ouvrages scientifiques qui traitent incidemment de cette question.

Nous concevons qu'en deçà des températures expérimentales de l'incandescence on assiste à un processus naissant qui est virtuellement auto-portant. Et qu'au-delà des températures des flammes on ne mesure que l'accumulation des calories (mesures de la température ambiante, mesure de la température des gaz et des sous-produits de la combustion) et divers effets énergétiques (radiation, effets des radicaux libres).

Au-delà et en deçà de la plage des températures du feu, 350 – 1200 degrés C, les phénomènes que l'on observe peuvent être considérés comme des épiphénomènes. On pense ici à la distillation des solides combustibles et aux changements d'état, avant l'ignition pour les matériaux directement concernés ; et après l'ignition pour les autres matériaux en présence, d'où l'utilité de cette approche basée sur la plage des températures de combustion plutôt que sur les températures d'ignition.

Bien qu'elle soit simple et directe, l'expérience de combustion que nous avons réalisée pourrait avantageusement être validée par des essais plus complexes et mieux instrumentés sur une plus grande variété de solides communs et synthétiques carbonisables.

Bibliographie

- [1] ABRAN, F., BOISVERT, A.-M., FREMONT, J., LANGELIER, R. et TRUDEL P. *Le cadre juridique de la gestion des sinistres au Québec*, Étude réalisée pour la Commission scientifique et technique du Verglas janvier 1998, Centre de recherche en droit, Université de Montréal, Gouvernement du Québec, avril 1999, 385 p.
- [2] ANSI/NFPA 921, *Guide for fire and explosion investigations*, An American National Standard, Quincy (éd. 1992 - , éd. 1995 - 162 p., éd. 1998 - 167 p., éd. 2001 - 232 p.)
- [3] *Avant-projet de loi, Loi sur la sécurité incendie*, Éditeur officiel du Québec, déc. 1999
- [4] *Loi sur la sécurité incendie*, L.Q. c.20, 2000, juin 2000
- [5] BABRAUSKAS, V. *Temperatures in flames and fires*, Fire Science and Technology Inc., Issaquah, April 1997, <http://www.doctorfire.com/flametmp.html>, accédé le 20 septembre 2007.
- [6] BACHELARD, G. *La psychanalyse du feu*, Gallimard, Coll. Folio/Essais, ISBN 2-07 032325-0, 1938
- [7] BACHELARD, G. *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, 4^{ième} édition, Vrin, Paris, 1960
- [8] BEARE M.E. et NAYLOR R.T. *Enjeux majeurs sur le crime organisé : dans le contexte des Rapports économiques*, Nathanson Centre for the study of organized crime and corruption, Commission du droit du Canada, avril 1999
- [9] BEAULIEU, L.-P., DUVAL, R., KUTTEH, R., ROUSSEL, J.-M., DEKU J.K. et TOLEDANO M. *L'étude d'impact sur les primes d'assurance incendie d'un regroupement des services d'incendie municipaux*, Groupement Technique des Assureurs, Montréal et Toronto, 1997
- [10] BENNER L. *Introduction to investigation*, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1997
- [11] BENNER L. *Accident investigation*, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1997, 107 p.
- [12] BENNER L. *Hazmat investigation*, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1997, 107 p.
- [13] BENNER L. *Fire investigation*, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1997, 93 p.
- [14] BERLAD, A.L. et TANGIRALA, V. *Autoignition of fuel-oxidizer mixtures in microgravity*, NASA 1988
- [15] BLOSHENKO, V.N. *Ignition and combustion of a single hydrocarbon fuel droplet in microgravity*, Zel'Dovich Memorial, 1994, 3 p.
- [16] BOUCHARD D. *Analyse comparative des régimes juridiques en matière de sécurité incendie: situation au niveau municipal et perspectives pour le Québec*, mars 1998
- [17] BRUCE, H.D., *Experimental dwelling-room fires*, No.D1941, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory & University of Wisconsin, 1953, 19 p.
- [18] BUCKMASTER, J. et JOULIN, G. *Flame balls stabilized by suspension in fluid with a steady linear ambient velocity distribution*, J. Fluid Mech., vol.27, pp.407-427, 1991
- [19] BUCKMASTER, J. « The role of mathematical modeling in combustion », *Combustion in high-speed flows*, pp.447-459, J. Buckmaster et al. (eds), Kluwer, 1994
- [20] BUCKMASTER, J. et LOZINSKI, D. « An elementary discussion on forward smoldering », *Combustion and flame*, 104: 300-310, The Combustion Institute, Elsevier, 1996
- [21] BUCKMASTER, J. *A theory of shallow smoulder waves*, IMA Journal of Applied Mathematics, 56, 87-102, Oxford University Press, 1996
- [22] CANTWELL, E.R. et FERNANDEZ-PELLO, A.C. *Smoldering combustion under low gravity conditions*, American Institute of Aeronautics and Astronautics - AIAA-90-0648, Washington, 1990, 7 p.
- [23] CAPLAN, J.B., GERRITSEN, H.J., LEDELL, J.S. *The hidden complexities of a 'simple' experiment*, The Physics teacher, vol.32, pp.310-314, 1994
- [24] CHARTRAND, S.G. *Outils pour l'enseignement des discours argumentatifs*, Québec français #96, hiver 1995
- [25] CHICOINE, H. « La planification comme outil de la prévention », *Feu vert à la planification et à la prévention*, Mémoire présenté en commission parlementaire, Association des techniciens en prévention incendie du Québec, nov. 1999.
- [26] COLLINA-GIRARD, J. *Le feu avant les allumettes*, Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris, 1998,
- [27] COUTURE, M. et al. *Guide d'étude*, «Projet scientifique CST 4000», 3^{ième} réimpression, avril 2001, 74 p.
- [28] DEHAAN, J.D. *Kirk's Fire Investigation*, Brady Fire Sciences Series, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1991, 416
- [29] DELÂGE C. *Rapport portant sur la révision du système d'enquêtes sur les incendies volontaires*, déc. 1997
- [30] DUBREUCQ, É. « Le texte *Des Opinions des Philosophes*, du Pseudo-Plutarque a été copié dans l'édition des *OEuvres Mêles* de Plutarque, traduites par Jacques Amyot à la Renaissance. Les mots d'ancien français dont l'usage

s'est perdu depuis l'époque de J. Amyot sont traduit en notes (ce sont les définitions du *Dictionnaire de l'Académie Française*, dans l'édition de 1740, du *Dictionnaire d'Ancien Français* de Gransaignes d'Hauterive, ou du *Dictionnaire de l'Ancien Français jusqu'au milieu du XIV^e siècle* de Greimas qui sont fournies). »

[31] *Encyclopédie universelle française*, vol.2, Leland, Montréal/Paris

[32] « Épître du feu philosophique, Lettre concernant la pierre dite philosophale », in *Theatrum Chemicum* (1614 vol III), Transcribed by Philippe Laurent, http://www.levity.com/alchemy/epitre_du_feu.html (consulté le 20 septembre 2007)

[33] FAURE, A. et BELTRAMELLI, R. *Le feu*, 1^{ière} éd., coll. « Que sais-je », Paris, PUF, 1952, 126 p.

[34] FERNANDEZ-PELLO, C. et PAGNI, P.J. *A fundamental study of smoldering with emphasis on experimental design for zero-g*, NASA Contractor report 198378, 1995, 6 p.

[35] FERNANDEZ-PELLO, C. « The solid phase: On ignition and flame spread », Chapter 2, *Combustion treatise on fire*, Geoff Cox, Ed., National Institute of Standards and Technology, 73 p.

[36] *Feu vert à une réforme de la Sécurité incendie au Québec: Pour une plus grande efficacité et de meilleures performances de notre organisation en sécurité incendie*, Gouvernement du Québec, juin 1999

[37] *Fire Cause Determination*, International Fire Service Training Association -- IFSTA, Oklahoma State University, Stillwater, 1986

[38] *Fire Protection Handbook*, NFPA, Boston, 1976

[39] FORTIN J.-L. et GIRARD J.D. (sous la direction de) *La fraude à l'assurance*, Actes du Colloque organisé conjointement par le Bureau d'assurance du Canada, l'université de Montréal et la Fondation Conrad-Leblanc de l'Université Laval, Université de Montréal, 1992

[40] FRIEDMAN Raymond. *Principles of Fire Protection Chemistry*, 2nd edition, NFPA, Quincy, 1989, 254 p.

[41] FRIEDMAN, Robert., SACKSTEDER, R., et URBAN, D. *Risks, designs, and research for fire safety in spacecraft*, NASA Technical Memorandum 105317, 1991, 19 p.

[42] FRIEDMAN, Robert et DIETRICH, D.L. *Fire-suppression in human-crew spacecraft*, J. Applied Fire Science, vol.1:3 243-258, Exec Ed. P. DeCicco, Baywood Publishing, 1991

[43] FRIEDMAN, Robert et URBAN, D.L. *Contributions of microgravity test results to the design of spacecraft fire-safety systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics - AIAA-93-1152, Washington, 1992, 11 p.

[44] FRIEDMAN, Robert. *Risks and issues in fire safety on the space station*, NASA technical memorandum 106430, 1993, 6 p.

[45] FRIEDMAN, Robert. *Fire safety practices and needs in human-crew spacecraft*, J. Applied Fire Science, vol.2(3) 243-259, Exec Ed. P. DeCicco, Baywood Publishing, 1993

[46] FRIEDMAN, Robert. et LYONS, V. *Potential commercial applications from combustion and fire research in space*, NASA Lewis Research Center, Cleveland, c.1995, 12 p.

[47] FRIEDMAN, Robert. *Fire safety designs and operations in spacecraft*, NASA Lewis Research Center

[48] FRIEDMAN, Robert et OLSON, S.L. *Fire safety applications for spacecraft*, conference proceedings 467, Aircraft Fire Safety, North Atlantic Treaty Organization, Advisory Group for Aerospace research & Development, Neuilly-sur-Seine, (non daté) 15 p.

[49] GAYET, J. *ABC de police scientifique*, Bibliothèque scientifique Payot, Paris, 1973, 269 p.

[50] GRAPIN, P. *Les incendies*, PUF, Paris, 1979 (4^e éd., coll. « Que sais-je », Paris, PUF, 127 p.)

[51] HATTANGADI, A. A. *Electrical Fires and Failures, A Prevention and Troubleshooting Guide*, McGraw-Hill, New York, 2000

[52] HIRANO, T. et SAITO, K. *Fire spread phenomena: The role of observation in experiment*, Pergamon/Elsevier, Prog. Energy Combust. Sci., Vol.20, pp.461-485, 1994

[53] *Human Behavior in Fire : Proceedings of the First International Symposium*, University of Ulster, 1998

[54] KENNEDY J. & KENNEDY P. *Fires and explosions : Determining cause and origin*, Investigations Institute, Chicago, 1985

[55] KENNEDY, P.M. et SHANLEY J.A. *Report of the United States Fire Administration Program for the Study of Fire Patterns, USFA Fire Burn Pattern Tests*, Federal Emergency Management Agency, United States Fire Administration, July 1997, 210 p.

[56] KIRK, P.L. *Fire Investigation*, Wiley, New York, 1969, 255 p.

[57] LAYMAN, L. *Fire Fighting Tactics*, NFPA International, Boston, 1953, 109 p.

[58] LAYMAN, L. *Attacking and Extinguishing Interior Fires*, NFPA International, Boston, 1955, 149 p.

[59] LECLERC, E. *Statistiques rouges*, Prévôt des incendies de la Cité de Québec, 1932,

[60] *Le crime d'incendie*, Document de travail 36, Commission de réforme du droit du Canada, Droit pénal, Les dommages aux biens, Ottawa, 1984

THEORIE ET SCIENCE DU FEU - HUGUES CHICOINE CFEI
(avril 2002, septembre 2007)

- [61] *Motive, Means and Opportunity, Guide to Arson Investigation*, American Re-Insurance Company, Princeton, 1996, 244 p.
- [62a] *Orientations du ministre de la Sécurité publique en matière de sécurité incendie*, Québec, Mars 2001, ISBN 2-5550-37257-3, 84 p.
- [62b] *Orientations du ministre de la Sécurité publique en matière de sécurité incendie*, Québec, Mai 2001, ISBN 2-550-37687-0, p. 30.
- [63] PAULING L. *Chimie Générale : Introduction à la Chimie Descriptive et à la Chimie Théorique Moderne*, Dunod, Paris, 1958, 728 p.
- [64] PUTORTI, A.D. *Full Scale Room Burn Study*, National Institute of Standards and Technology, National Institute of Justice, NIJ Report 601-1997, 52 p.
- [65] RICARD P. et ROUSSEAU C. *Le feu et les matières inflammables*, Notes de cours, Deuxième édition, Certificat de technologie de la prévention d'incendie, École polytechnique de Montréal, 1996
- [66] ROSS H. *Candle Flames in Microgravity (CFM) USML-1 Glovebox Experiment #8*, Amended Experiment Data Management Plan, <http://microgravity.grc.nasa.gov/fcarchive/combustion/edmps/cfmedmp.html>, NASA Lewis Research Center, 1990-1993, accédé le 20 septembre 2007.
- [67] ROSS, H.D., T'IEN, J.S., DIETRICH, D.L. « Observations of candle flames in low pressure and low gravity », annexé à FRIEDMAN, R., SACKSTEDER, R., et URBAN, D. *Risks, designs, and research for fire safety in spacecraft*, NASA Technical Memorandum 105317, 1991, 4 p.
- [68] ROY M.A., coord. *Guide de la technique 2 : Les matériaux*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1991
- [69] SACKSTEDER, K. *Solid Surface Combustion Experiment*, Amended Experiment Data Management Plan, NASA Lewis Research Center, <http://microgravity.grc.nasa.gov/fcarchive/combustion/edmps/ssceedmp.html> (consulté le 20 septembre 2007).
- [70] *Standard methods of fire tests of building construction and materials*, NFPA 251-1979, p.14, National Fire Codes 1984, vol.4, National Fire Protection Association, Battery March Park, 1984
- [71] STICKNEY, C. W. « Recognizing Where Arson Exists », *Firemen Magazine*, NFPA, Boston, sept./dec. 1960 (cet article a été traduit en français et diffusé au Québec sous *Comment déterminer les causes d'incendie*, tiré de « Le dépistage des incendies criminels » -- 48 pages -- traduction non datée)
- [72] STOCKER, D. *Smoldering Combustion in Microgravity (SCM) Glovebox Investigation*, Amended Experiment Data Management Plan, NASA Lewis Research Center.
- [73] *TERMIUM*, Base de données terminologiques, Approvisionnement et Services Canada, Bureau de la traduction, Ottawa, 1996
- [74] THIBAUT G. *Rapport sur les causes d'incendies électriques*, Bureau des examinateurs électriciens, Ministère du Travail, Québec, 1982
- [75] VAUJOUR J. *La sécurité du citoyen*, PUF, Paris, 1980
- [76] WOOD, R.H. et SWEGINNIS, R.W. *Aircraft Accident Investigation*, Endeavor Books, Casper, 1995, 452 p.
- [77] WOOLSON, I.A. « Report of committee on fire-resistive construction », *Proceedings of 18th Annual Meeting*, NFPA, Boston, 1914, p.217-219

Notes

¹ INFLAMMABLE... : *FLAMMABLE LIQUID* (International Association of Arson Investigators) : « A combustible liquid that has a flash point below 80F according to the Coast Guard, 100F according to the NFPA. Liquids having a vapour pressure over 40 pounds per square inch at 100F are classified as flammable gases. *Flammable liquids are a special group of combustible liquids.* » (Glossary Of Terms Related To Chemical And Instrumental Analysis Of Fire Debris, British IAAI Forensic Science Committee). (Glossaire)

FLAMMABLE SOLID : « Any solid material, other than one classed as an explosive, which under conditions normally incident to transportation is liable to cause fires through friction, retains heat from manufacturing or processing, or which can be ignited readily and when ignited burns so vigorously and persistently as to create a serious transportation hazard. Included in this class are spontaneously combustible and water-reactive materials. » (49 CFR 173.150) HAZARDOUS MATERIALS EMERGENCY RESPONSE GLOSSARY OF STANDARDIZED TERMS, State of California's Chemical Emergency Planning and Response Commission, 1991

² COMBUSTIBLE (matériau) : « se dit d'un matériau qui s'enflamme ou qui cause une augmentation de température de plus de 65F (18,3C) dans le four d'essai, lorsqu'il est soumis à l'essai, selon la norme ACNOR B 54.1-1972 *Determination of Noncombustibility in Building Materials.* » (Glossaire)

INCOMBUSTIBLE : «...se dit d'un matériau qui ne s'enflamme pas, ou qui cause une augmentation de température de moins de 65F / 18,3 C, dans le four d'essai, lorsqu'il est soumis à l'essai selon la norme ACNOR / CSA B 54.1-1972 - *Determination of Noncombustibility in Building Materials.* » (Code du bâtiment du Québec, 1976) [S-3, r.2, LOI SUR LA SÉCURITÉ DANS LES ÉDIFICES PUBLICS, CODE DU BÂTIMENT, (L.R.Q., c. S-3)]

³ Expérimentations sur le feu libre. Pour ces expériences menées dans les années 1950 et 1990, les chercheurs ont adopté des modalités d'enregistrement qui permettent une autre forme d'observation, d'évaluation et de représentation du phénomène étudié sur le mode de la courbe température-temps, mais à d'autres fins que la détermination des propriétés des matériaux et notamment pour l'investigation des incendies sur le terrain.

⁴ Les données du programme de recherche ne sont pas disponibles, Monsieur Putorti n'ayant pas répondu à notre demande. L'auteur, Patrick M. Kennedy, nous a tout de même informé comme suit : «Subject: Re: request for information-data. Date: Mon, 9 Apr 2001 08:11:12 -0400. From: Patrick Kennedy. To: "Hughes Chicoine"»

Hughes, I do not have the raw data. NIST served as the data collection function of our testing and then supplied to us the temperature graphs. I do not know if the raw data is still available. You may want to check with Anthony Putorti as the National Institute of Science and Technology Building and Fire Research Laboratory in Gaithersburg, Maryland. Pat

----- Original Message -----

From: Hughes Chicoine . To: Patrick Kennedy. Sent: Friday, April 06, 2001 7:16 PM. Subject: request for information-data

Good evening Pat K., I would like to make good use of the temperature data related to the USFA test # 6 (attached), that is if you have the data and if you can make it available. The data could be in any form. Many thanks, Hughes Chicoine CFEI.

⁵ « L'hydrolyse complète de la cellulose entraîne la formation de glucose. La résistance de la cellulose à la dissolution par des agents de défibrage et de blanchiment permet d'éliminer le

maximum de lignine sans dégradation et d'obtenir ainsi *des fibres composées principalement de cellulose*, substance de base du papier fin. » (Glossaire des termes techniques du blanchiment, Association canadienne des pâtes et papiers, 1990) [73].

⁶ « Pâte à papier chimique constituée de *cellulose* que l'on moule à partir de formes et qui sert à la fabrication de divers *articles d'emballage, tels les bacs à fruits et à oeufs*, les barquettes alimentaires, les suremballages protecteurs, etc. » (Paper, board, pulp and related terms : Vocabulary, International Organization for Standardization, 1978) [73].

⁷ Poids mesuré sur une pesée électronique Toledo.

⁸ « *Avoid Open Flame. Product May Ignite At Temperatures In Excess Of 450 °F* » (232 degrés C). [MATERIAL SAFETY DATA SHEET, HOMASOTE BOARD* RECYCLED PAPER (CELLULOSE) FIBER, J D Russell Company, P.O. Box 36795, Tucson, Arizona 85740, 4/11/00)

⁹ « It gives the investigator a visual picture of the temperature gradient. On a couple of occasions I've been able to draw a "temperature contour" diagram of part of the aircraft and show [how] the temperature (and therefore the fire) progressed. » (R.H. Wood [auteur de 76], communication personnelle).