

Isopa

PERFORMANCE DES PRODUITS DE CONSTRUCTION
EN POLYURÉTHANNE EN CAS D'INCENDIE

RÉSUMÉ

La performance des produits de construction en mousse PU dans des situations d'incendie de bâtiment a été examinée de manière rigoureuse. Ce rapport décrit pour les familles de polyuréthanes rigides les applications typiques dans le bâtiment ainsi que les différents produits actuellement sur le marché européen du bâtiment. Vous trouverez des statistiques feu ainsi que la description des principaux aspects de sécurité incendie dans le bâtiment.

Cette publication traite du classement feu des mousses polyuréthane et des produits de constructions à base de mousses PUR en ce qui concerne leur conformité à la réglementation d'incendie et de leur comportement dans des conditions d'utilisation réelle. Puis, elle décrit les principaux dangers liés aux fumées et gaz toxiques et les méthodes d'essai. Dans ce domaine, des données - publiées ou non - sur la fumée et les gaz toxiques de polyuréthane rigide sont proposées.

Le but de cette publication est de fournir au lecteur des informations et des données scientifiques sur la performance générale de cette famille variée de produits et de décrire les critères d'évaluation.

Enfin, c'est aussi une opportunité de montrer la conformité des produits de construction en mousse PUR aux normes des essais à petite ou grande échelle et le comportement satisfaisant de ces produits dans des conditions d'utilisation réelle.

PERFORMANCE DES PRODUITS DE
CONSTRUCTIONS EN POLYURÉTHANNE
(PUR) EN CAS D'INCENDIE

CONTENU	page
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
APPLICATIONS TYPIQUES DE LA MOUSSE RIGIDE PUR	3
OBJECTIFS DE SÉCURITÉ INCENDIE	7
STATISTIQUES	8
SÉCURITÉ INCENDIE DANS LES BÂTIMENTS	10
FUMÉES ET GAZ TOXIQUES	17
RÉFÉRENCES	23

Auteurs : Wittbecker, Daems et Werther

Dr W. Wittbecker, Bayer AG, Leverkusen, Allemagne

Dr D. Daems, Huntsman Polyuréthannes, Everberg Belgique

Dr U. Werther, BASF GmbH, Karlsruhe, Allemagne

INTRODUCTION GENERALE

2

Les mousses rigides de polyuréthane sont souvent utilisées comme un matériau d'isolation pour des applications variées dans le bâtiment. Depuis la première crise pétrolière dans les années 70 et l'augmentation du coût de l'énergie, les matériaux isolants ont été utilisés de plus en plus dans la construction de bâtiments. Depuis, les normes de contrôle et les recommandations pour atteindre un coefficient de conductivité thermique conséquent sont entrées en vigueur dans plusieurs pays. Logiquement, la plupart des nouveaux bâtiments sont aujourd'hui thermiquement isolés. A l'avenir, les exigences réglementaires en matière d'économie d'énergie seront de plus en plus grandes; en effet, elles permettront de réduire efficacement les émissions de CO₂ provenant de la combustion d'hydrocarbures fossiles. Des calculs ont montré que 40% des émissions de CO₂ sont dues au chauffage et à l'air conditionné dans les bâtiments. L'émission de gaz à effet de serre, parmi lesquels le CO₂ est le plus important, doit être contrôlée pour se conformer aux normes imposées à KYOTO pour combattre le réchauffement de la planète. Un règlement plus sévère sur l'isolation de bâtiments et la modernisation de tous les bâtiments européens selon ces normes apporterait des résultats significatifs. Une étude a montré que l'Union Européenne parviendrait, par une meilleure isolation des bâtiments, à diminuer suffisamment les émissions de gaz à effet de serre et atteindrait ainsi la moitié de ses objectifs de réduction fixés pour 2010.

La capacité d'isolation du polyuréthane rigide est très performante et exemplaire. De plus, les mousses ont des propriétés physiques excellentes telles que la résistance mécanique, la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau, etc. En plus de leur légèreté, les panneaux rigides de polyuréthane sont très faciles à installer et peuvent être fabriqués industriellement. Ils offrent de nombreux avantages comparé aux procédés traditionnels.

Les mousses polyuréthane sont toutefois combustibles. Leur utilisation est contrôlée par le règlement du bâtiment et influencée par les exigences supplémentaires des assurances. Tout produit de construction doit se conformer aux normes incendie décrites plus loin. De nombreuses personnes se font de fausses idées sur le comportement des produits de construction à base de polyuréthane en cas d'incendie. Cette publication scientifique a donc été produite pour informer sur le comportement général de la mousse PUR et de ses produits de construction dérivés en cas d'incendie. Elle décrit aussi les exigences réglementaires. Puis, elle démontre l'utilisation sûre de ces produits par des essais réalisés à grande échelle et dans des conditions d'utilisation réelle.

Le premier chapitre résume les emplois des mousses PUR et décrit la grande variété des produits de construction et leurs utilisations. La publication se concentre ensuite sur les objectifs de sécurité incendie et les statistiques feu. Au chapitre 4 figure une description des aspects généraux de sécurité incendie, des propriétés feu de mousse PUR et des produits de construction. Enfin, le chapitre 5 se concentre sur les fumées et gaz toxiques, les modèles de décomposition et les méthodes d'essai. De nombreuses données publiées ou non sur les produits polyuréthane sont proposées.

LES APPLICATIONS TYPIQUES DE LA MOUSSE RIGIDE PUR DANS L'ISOLATION

La mousse PUR est un matériau thermodurcissable de faible densité apparente, fortement réticulé et de structure cellulaire. Le polyuréthane présente de ce fait de nombreux avantages :

- Il n'est pas fusible
- Il est très résistant aux produits chimiques
- Sa température de déformation est très haute

Elle est un matériau d'isolation thermique exceptionnel. Elle se distingue aussi par ses propriétés physiques telles que la résistance mécanique (par ex. en compression), la stabilité dimensionnelle et la résistance à l'eau. La formulation du matériau peut être modifiée afin de produire des mousses adaptées à des applications particulières.

Polyuréthane est un terme générique qui couvre une grande gamme de formules différentes. Les principales liaisons formées durant la polymérisation sont essentiellement l'uréthane mais d'autres liaisons telles que l'isocyanurate, l'urée et d'autres encore pourraient être introduites jusqu'à un certain point. Les mousses polyuréthane comportant des liaisons isocyanurate, par exemple, ont une plus grande résistance thermique, une production de volatils plus faible et une meilleure carbonisation que le polyuréthane classique. Dans ce texte, elles seront désignées par le vocable de «mousses PIR».

La mousse PUR se conforme à la majorité des exigences structurales, économiques et réglementaires imposées aux systèmes d'isolation dans l'industrie du bâtiment. Le polyuréthane dans l'isolation offre de nombreux avantages aux maîtres d'oeuvre et usagers :

- Un gain d'espace grâce à une isolation plus mince : dans le cas des toitures inclinées, la deuxième couche, normalement nécessaire pour d'autres types d'isolation, n'est pas utile et, pour les toits plats et sols, la minceur des plaques est un avantage

- Une plus grande liberté architecturale car les murs sont plus minces
- Des économies de chauffage qui améliorent la qualité de l'environnement
- Un plus grand confort et une ambiance plus agréable à l'intérieur des bâtiments
- Une absence de ponts thermiques



Fig.1. Epaisseurs thermiquement équivalentes à une mousse PU de 50mm pour différents matériaux.

La capacité du polyuréthane à adhérer à d'autres matériaux de construction, parements ou revêtements, ouvre la porte à une large gamme d'applications allant des plaques isolantes pour toits, murs, sols et plafonds aux panneaux sandwich à parements métalliques autoportants.

Le faible poids des plaques de mousse PU, particulièrement sous la forme de panneaux sandwich encourage aussi les techniques innovantes de construction légère grâce à la capacité de franchir de longue portée.

ISOLATION POUR TOITURE

Toitures inclinées

Dans bien des pays, l'espace de vie et l'énergie sont devenus si précieux et si rares que peu de propriétaires d'immeubles ou de maisons peuvent se permettre d'avoir une toiture inclinée non seulement mal isolée mais prenant aussi de l'espace qui pourrait être très utile. Aujourd'hui, que ce soit dans les nouveaux bâtiments ou dans de vieilles constructions en cours de rénovation, elle doit répondre à toutes les normes de construction en terme d'intégrité structurelle, d'économie et de confort.

Les plaques isolantes fabriquées à base de mousse PUR sont extrêmement performantes dans la toiture inclinée. Une fois installée sous le chevronnage, l'isolation polyuréthane prend beaucoup moins de place que les autres types d'isolants, grâce à l'efficacité thermique de ces plaques très minces.

Les systèmes à liteaux intégrés, les assemblages à feuillure ou à profil étanche s'adaptent parfaitement à une pose sur un chevronnage classique. Les panneaux autoportant à parement bois permettent de faire l'économie d'un chevronnage. Les panneaux sont posés directement sur charpente, donnant un aspect architectural parfaitement fini aux combles.



Isolation d'une toiture inclinée.

Toitures plates



L'isolation d'une toiture plate doit satisfaire des normes particulièrement strictes. Une toiture terrasse, doit par exemple être systématiquement isolé par le haut. Le matériau d'isolation doit associer à un haut degré d'isolation thermique une résistance à la chaleur ainsi qu'une bonne stabilité dimensionnelle pour supporter des températures générées par la radiation solaire qui peuvent monter jusqu'à 80°C, voire plus. C'est là que la mousse PU s'impose avec sa bonne résistance thermique même après une très longue durée. Elle peut aussi résister sur de courtes durées à des températures jusqu'à 250°C, lui permettant ainsi d'être posée avec du bitume chaud.

La résistance en compression des plaques isolantes est telle qu'elles peuvent supporter une couche de gravillons voire des dalles béton pour terrasses accessibles à la circulation et pour les terrasses-jardins.

La résistance en compression du PUR peut être adaptée à des contraintes particulières de charges. Une résistance en compression à hauteur de 1.0 N/mm² peuvent être obtenues sans pour autant nuire à la performance thermique. En ce qui concerne les terrasses, la faible épaisseur et le faible poids de l'isolation en mousse PUR offrent un véritable avantage structurel.

ISOLATION POUR MURS, SOLS ET PLAFONDS

Isolation extérieure des murs

Afin de limiter la consommation d'énergie, l'isolation efficace des murs d'un bâtiment est essentielle. Isoler la totalité d'un mur extérieur avec de la mousse PU économise une grande quantité d'énergie.

La mousse PUR associée à une vêtue assure une protection continue contre les intempéries et élimine les ponts thermiques au niveau des plafonds et linteaux. Ce système fonctionne pour différents types de murs.

Isolation de double mur



Isolation de double murs.

L'isolation en mousse PUR sans lame d'air entre la maçonnerie extérieure et l'isolant est très souvent utilisée dans la construction de nouveaux bâtiments. Les murs sont donc minces et permettent ainsi une plus grande liberté architecturale. La mousse de PU est un système facile à installer, qui optimise l'isolation thermique et permet d'économiser une grande quantité d'énergie. Le mur interne est protégé contre les contraintes thermiques et la pénétration de l'humidité.

Isolation des sols et des plafonds



Avec une épaisseur minimale, la mousse PU se conforme aux exigences de la réglementation thermique dans le bâtiment. Cela signifie qu'une isolation du sol efficace peut être obtenue grâce à de faibles épaisseurs de mousse. De plus, sa résistance en compression son excellente performance isolante et sa capacité à résister aux passages piétons sont des avantages cruciaux.

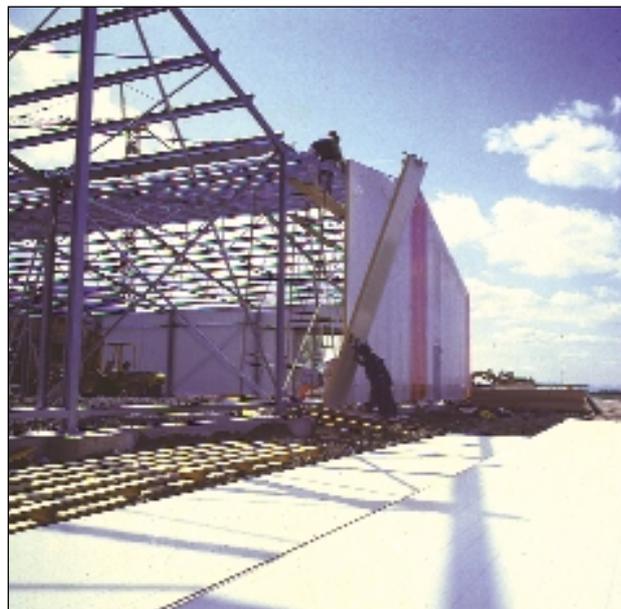
Pour les panneaux de sous-toiture (par ex. pour les bâtiments d'élevage) le procédé de fabrication en continu permet la production de plaques isolantes de grand format, par ex. 4 m et plus, économisant ainsi du temps, du travail et de l'argent.

PANNEAUX SANDWICH À PAREMENTS MÉTALLIQUES

Les panneaux sandwich en polyuréthane à parements métalliques sont aujourd'hui des produits de choix pour construire de grands bâtiments industriels, des entrepôts frigorifiques, bureaux, salles de concert, halls d'exposition, écoles et gymnases, etc.

Dans les bardages et les toitures préfabriqués la mousse de PU associe étroitement les parements métalliques entre eux. En aluminium ou en acier, ils sont eux-mêmes prélaqués et peuvent être plans ou profilés. Les panneaux sandwich de polyuréthane arrivent finis avec des assemblages à fausse languette spécialement conçus assurant une adaptation parfaite et une intégrité maximale. La pose est rapide, facile et économique.

Au cours de la production, la mousse PU passe par une phase poisseuse, d'où résulte une adhérence solide et durable avec les parements. Les panneaux sandwich supportent des charges beaucoup plus importantes que celle supportée par les constituants pris distinctement. Ainsi, les panneaux sandwich minces et légers permettent de clore et couvrir des volumes avec de grandes portées, en toute sécurité. Par exemple, la portée d'un panneau de 100mm d'épaisseur peut facilement atteindre 6 mètres.



Construction d'un bâtiment industriel avec des panneaux à parement acier.

Les panneaux sandwich utilisés dans la construction de bâtiments industriels présentent les avantages suivants :

- Un degré d'isolation thermique optimal et absence de ponts thermiques
- La pose facilitée par la légèreté du produit sur des structures variées
- Un assemblage rapide et simple, même en cas de mauvais temps
- Une grande liberté architecturale
- Un système de bardage pour les bâtiments de petite ou grande taille
- Une facilité de démontage et remontage

Panneaux sandwich pour construction industrielle.

OBJECTIFS DE SÉCURITÉ INCENDIE

L'évaluation de la sécurité incendie commence par l'identification des objectifs de sécurité incendie et des niveaux acceptables de sécurité. La spécification d'un produit et les conditions d'utilisation réelles sont nécessaires pour déterminer son comportement au feu.

Des méthodes d'essai permettent d'établir si les objectifs prédéfinis seront atteints. Pour que la procédure d'évaluation des dangers liés au feu soit valable, il convient de

- partir de scénarios feu spécifiques et de leurs objectifs
- soumettre le produit à des essais feu correspondants
- et comparer les résultats enregistrés aux objectifs des scénarios qui doivent permettre l'estimation du succès ou de l'échec.

Le premier objectif de sécurité incendie est de s'assurer que les occupants aient le temps de fuir en toute sécurité avant que les conditions deviennent insoutenables dans l'enceinte en feu. Le temps d'évacuation inclus le temps mis par les occupants pour arriver en lieu sûr. La capacité à résister aux conditions extrêmes est évaluée sur la base des effets du feu sur les occupants, comprenant aussi bien les effets directs, comme la chaleur, les gaz toxiques et le manque d'oxygène, que les effets indirects tels que la visibilité réduite à cause de la fumée.

Le deuxième objectif de sécurité incendie est d'éviter un embrasement à l'intérieur de l'établissement. Des objectifs supplémentaires de sécurité incendie portant sur la sécurité des pompiers seront aussi pris en compte.

L'analyse du risque incendie porte soit sur un matériau, un produit ou encore un système :

- Le produit peut-il être la source d'inflammation ?
- Le produit peut-il être le deuxième élément à prendre feu ?

- Le produit est-il combustible de manière significative même s'il n'est pas le premier élément ni le second à prendre feu ?
- En quoi peut-il potentiellement contribuer au risque (et au danger) ?
- A quelle distance de l'origine du feu se trouvent les occupants et les équipements critiques ?

Dans le cadre des directives de l'ingénierie de sécurité incendie, les décisions pourront être prises de la manière décrite. Les normes internationales ne tiennent compte qu'en partie de cette stratégie d'évaluation liée



Le revêtement du mur PIR est resté intact lors de cet incendie bien que charpente se soit totalement désintégrée.

au produit. Les essais feu varient considérablement et simulent des risques différents (murs, toits, etc.). Ceci conduit à des classifications variées selon la procédure d'essai choisi et les conditions d'utilisation réelle comme pour les éléments composites bien que la composition du matériau soit chimiquement identique. De nombreux systèmes de classification exigent différents niveaux de performance pour les éléments composites : tant pour la mousse elle-même, que pour le produit fini.

source : EPIC (57)

STATISTIQUES

Les statistiques feu sont un élément important pour obtenir des informations sur la fréquence de certains types de feu, leur cause, la source d'inflammation et l'envergure de l'incendie. Elles permettent de relier entre eux, le type de feu, le genre de bâtiment, les activités des personnes et le taux de décès. Historiquement, le Royaume-Uni et les Etats-Unis sont les pays possédant les statistiques les plus détaillées en la matière.

Les mesures de sécurité peuvent être déduites de l'analyse statistique des incendies. Pour effectuer des essais de probabilité, les ingénieurs de la sécurité considèrent la probabilité d'un départ de feu dans un type de bâtiment en se référant à des données statistiques portant sur un bâtiment et une destination comparables. En cas d'absence de ces données, les chiffres indiqués dans le tableau 1 peuvent être utilisés.

Les incendies criminels sont les plus nombreux; c'est le cas pour 70% d'entre eux dans les écoles. En revanche, ils ne sont que de 20% environ dans les lieux d'habitation. Le tableau 2 recense les statistiques du Royaume-Uni pour 1995 portant sur la cause de tous les incendies accidentels. Dans les lieux d'habitation, la cause la plus fréquente est le mauvais usage des appareils de cuisson. Pour les autres types de bâtiment, les appareils défectueux sont souvent la cause principale des départs d'incendie. Une proportion de 88% se confie dans la pièce où réside la source d'inflammation et les conséquences sont en général assez mineures.

Tableau 1. Probabilité globale de départ d'incendie dans différents types d'habitation.

Usages du bâtiment	Départs d'incendie/an par usage de bâtiment	Probabilité de départ
Lieux d'habitation	0.0030	Basse
Bureaux	0.0062	
Entrepôts	0.013	Moyenne
Locaux de réunion (non résidentiels)	0.020	
Ecoles	0.044	
Locaux de réunion (loisirs)	0.12	Haute
Hôpitaux	0.30	

Tableau 2. Incendies dans les lieux d'habitation et autres bâtiments. Statistiques du ministère de l'Intérieur britannique.

Cause des incendies accidentels	Lieux d'habitation	Autres bâtiments
Mauvaise usage de l'équipement	26,400	5,200
Appareils défectueux	7,500	5,700
Usage imprudent du feu ou de substances chaudes	5,700	3,400
Articles placés trop près de source de chaleur	3,900	2,000
Total	51,500	24,700

Bien que la probabilité de départs d'incendie soit très basse dans les habitations, c'est là où se produit la majorité des décès. La cause la plus courante de décès est l'asphyxie par la fumée ou les gaz. C'est ce que confirment les données britanniques et américaines. Aux USA, 66% à 75% des décès sont dus à l'asphyxie contre 40% en Grande-Bretagne.

Cette différence entre le Royaume-Uni et les Etats-Unis pourrait s'expliquer par un compartimentage et une utilisation de portes coupe-feu plus importants dans la conception architecturale européenne, limitant ainsi la propagation du feu. C'est au moment où le feu se propage au-delà de la pièce d'origine que la majorité des décès se produit. En cas de décès, le facteur dominant parmi les causes possibles correspond à la période qui suit l'embrasement, c'est à dire lorsqu'une grande quantité de fumée et de gaz contenant du monoxyde de carbone se produit.

Pour évaluer les valeurs potentielles, tels que celle de la toxicité de la fumée et le dégagement de chaleur, il est nécessaire de différencier entre les sources de gaz selon les conditions de développement du feu : en distinguant par ex. entre feu couvant, phase d'inflammation, propagation et la ventilation. Les risques de visibilité réduite causée par la fumée pourraient aussi être évalués selon le matériau et les conditions environnantes.

L'utilisation de détecteurs de fumée est significativement différente dans les pays européens, allant de quelques pour cent dans le Sud, en France à 90% dans le Nord, en Suède. Une norme réglementaire européenne réduirait le nombre de grands incendies de manière conséquente. Par exemple, durant la période de 1988 à 1995, l'utilisation de détecteurs de feu a augmenté de 15 à 70% dans les lieux d'habitation au Royaume-Uni. Parallèlement, le nombre d'incendies découverts par ces appareils est passé de 2 à 10%.

En résumé, les avantages des détecteurs de fumée dans les lieux d'habitation sont :

- Découverte plus rapide des départs d'incendie
- Moins de victimes
- Des dégâts moins importants (les feux se confinent souvent au premier élément enflammé)

Logiquement, plus l'intervalle sera court entre l'inflammation et sa découverte, plus le temps d'évacuation et les premières interventions seront rapides. C'est pourquoi le taux de mortalité dans les lieux d'habitation est plus bas pour les incendies découverts grâce aux détecteurs de fumée et l'étendue du feu plus réduite.



Détecteur de fumée.

source : Benelux Press

SÉCURITÉ INCENDIE DANS LES BÂTIMENTS

SCÉNARIOS D'INCENDIE

Les incendies peuvent se développer de manière différente selon les facteurs tels que le type et la grandeur de l'enceinte, les conditions de ventilation, les mouvements de chaleur et de fumée. Huit scénarios différents ont été identifiés lors d'un programme de recherche prénormatif mené en 1995 [6] : une petite et une grande cellules, un espace horizontal et vertical vides, une façade, un couloir, un escalier et une toiture.

embrasement, c'est la résistance au feu d'ouvrages complets qui prévaudra. Le règlement incendie dans le bâtiment opère la distinction entre ces deux situations. La fumée et les gaz toxiques sont des paramètres secondaires et dépendent de la phase de l'incendie. Ils sont décrits en détail dans un autre chapitre. Le tableau 3 résume les paramètres feu importants associés à la réaction et à la résistance au feu.

Le schéma 2 représente le moment précédant l'inflammation jusqu'à l'achèvement de la combustion dans une enceinte avec une charge calorifique suffisamment importante pour que l'embrasement ait lieu. Un certain nombre de paramètres influencent le développement du feu. On peut en distinguer cinq depuis le pré-embrasement jusqu'au post-embrasement. Dans la phase de pré-embrasement, la réaction au feu du produit est importante alors que dans la phase post-

Tableau 3. Paramètres feu associés à la classification et aux essais.

Feu en phase de développement	Réaction au feu	Inflammabilité Pouvoir calorifique Extension des flammes
Feu complètement développé	Résistance au feu	Limite de charge Isolation Intégrité

10

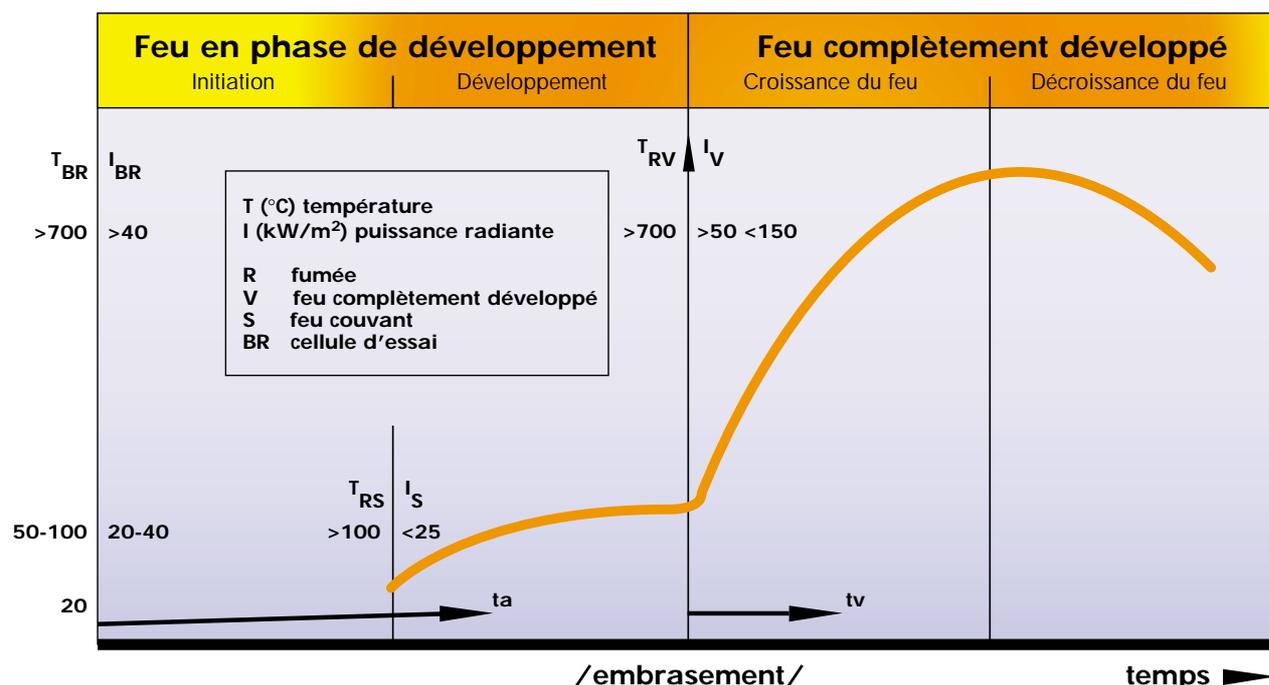


Fig. 2. Développement de feu dans des enceintes.

Description plus approfondie de différentes configurations d'incendie :

- La source d'inflammation est faible (ex : bougies, allumettes, fils électriques chauds).
- Le premier élément enflammé ne rayonne pas. La teneur en oxygène dans l'air est de presque 21%. Le risque se réduit essentiellement à l'extension des flammes. Les personnes dans la pièce en question peuvent éventuellement éteindre le feu, s'échapper ou être facilement sauvées.
- Un feu couvant peut se propager à l'intérieur des éléments de structure avec un matériau qui se décompose à une température quasiment constante. Un feu couvant par oxydation sous le revêtement de murs et plafonds (ou tout autre parement) peut être initié par la même source qui enflamme les autres matériaux brûlant dans la pièce. Il a été démontré que la visibilité est notamment réduite avec les matériaux à base de cellulose car ils se décomposent à des niveaux de rayonnement relativement bas, comme cela est montré au chapitre 7.
- Les matériaux combustibles à proximité de la source d'inflammation sont échauffés par convection et rayonnement. La teneur en oxygène dans la pièce en feu diminue. Après un certain délai, l'embrassement peut se produire si la température dépasse 500°C et si le rayonnement est de 25 kW/m².

Le développement d'un feu dépend de la taille de la pièce et des conditions de ventilation: divers scénarios sont mentionnés dans les exemples suivants.

- Dans les petites pièces, la quantité d'oxygène est normalement insuffisante pour une combustion complète. Dans les grandes pièces, l'oxygène n'est pas limité dans la phase de développement d'un feu.

Tableau 4. Définition de la taille d'une pièce.

1	Petites pièces	$A < 25\text{m}^2$ et $h < 4\text{m}$
2	Moyennes pièces	$25\text{m}^2 \leq A < 100\text{m}^2$ et $h < 6\text{m}$
3	Grandes pièces	$100\text{m}^2 \leq A < 400\text{m}^2$ et $h < 12\text{m}$
4	Très grandes pièces	$A \leq 400\text{m}^2$ et $h < 12\text{m}$
5	Pièces à tailles spéciales	non défini

A : surface h : hauteur

Le ratio longueur/largeur par pièce devrait être inférieur à 1/3

- Dans certains locaux, le type de mobilier combustible est plus ou moins bien défini, par exemple pour les salles de classe une chaise et une table par enfant. Un incendie déclaré dans une corbeille à papier est en général d'envergure modérée.
- Dans les locaux à plafond suspendu, un feu couvant peut se produire dans le plénum, en général à cause d'un court-circuit. Ce qui détermine la nature de cet incendie c'est la combustion oxydante sans flamme. La pièce est rarement touchée tant que le plafond reste intact. En raison d'une teneur en oxygène limitée, le feu peut pourtant couver pendant une longue période.
- Dans les magasins, centres commerciaux, entrepôts etc., les charges calorifiques élevées peuvent être la cause d'un embrassement accéléré. Le ratio CO₂/CO décroît rapidement en dessous de 10. Quand les portes et fenêtres sont fermées, la combustion est incomplète. L'ouverture augmente la ventilation et donc l'intensité de l'incendie.
- Dans les grandes et très grandes salles, par exemple les théâtres, bureaux «open-space», entrepôts, supermarchés, salles de sport etc., les volumes en feu sont librement ventilés pendant de longs laps de temps. Contrairement à la situation dans les petites pièces, il y a peu d'effets interactifs et le développement du feu dépend directement de la combustion successive des éléments en feu.

- Dans les stockages de liquides inflammable, de petites sources d'inflammation entraînent un développement accéléré de l'incendie donc un embrasement immédiat. La chute du ratio CO_2/CO est instantanée.

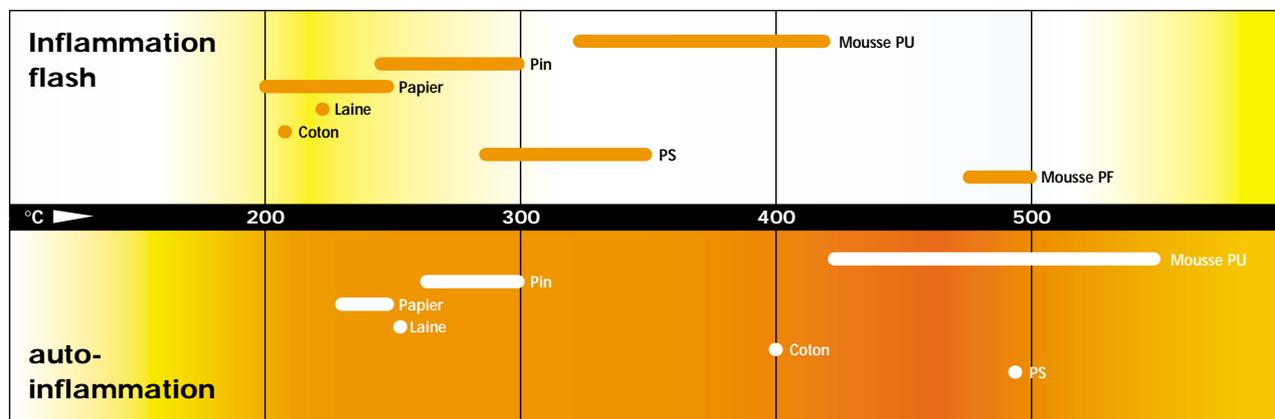
Le dégagement de chaleur pourrait être représenté par la courbe de feu d'hydrocarbure. Une ventilation relativement importante est requise pour atteindre un tel développement de la température, le ratio CO_2/CO est de 100 environ; une ventilation faible mènerait à une plage de température plus basse allant de 600°C à 900°C.

Les effets toxiques et corrosifs, ainsi que l'atténuation de la visibilité et l'augmentation de la température par les gaz émanant du feu dépendent de la quantité de matériau en feu. Toutefois le taux maximal de formation de fumée en relation avec la surface en feu doit être normalisé.

Les conséquences suivantes devraient être estimées, si possible, dès le départ d'un feu :

- Contribution possible de divers facteurs à la propagation de la flamme
- Contribution de tout matériau à l'extension du feu; ceci dépend de l'efficacité des revêtements de protection.
- Production de fumée pour chaque matériau en fonction de la durée du feu.

Tableau 5. Températures d'inflammation des matériaux. Un classement est donné pour des familles de produits.



Tout en considérant les phases post-embrasement d'un incendie, il faut considérer les problèmes liés à la propagation de fumées en fonction de leur débit.

Comme les données sur la fumée dépendent essentiellement de la surface en feu lors de différents essais, les potentiels fumée et leur comparaison devraient être fondés sur le volume et non sur le poids de matériau.

PARAMÈTRES DE COMBUSTION DE LA MOUSSE RIGIDE PUR

Comme toutes les matières organiques, la mousse de polyuréthane est combustible. Quand elles sont exposées à des sources de chaleur ou d'inflammation, les mousses rigides de polyuréthane commencent à se décomposer à des températures de $T > 250^\circ C$. En général elles ne fondent pas et il n'y a pas de formation de gouttes brûlantes durant l'incendie. Le feu n'a pas tendance à couvrir comme on a pu le voir pour le liège ou pour d'autres matières minérales à haute densité.

La décomposition des produits inflammables se fait en pratique à des températures de $300^\circ C - 320^\circ C$. Les propriétés d'inflammation des matériaux sont définies par exemple par l'appareil SETCHKIN (ASTM-D 1929). Le tableau 5 représente l'inflammation sans flamme pilote dite auto-inflammation et inflammation avec flamme pilote dite inflammation flash d'après cette méthode.

Tableau 6. Matériaux et temps d'inflammation lors d'essais avec un cône calorimètre [48].

Echantillon	Joint		Protection des bords		Délais d'inflammation	CO ₂ /CO
	Sans	Avec	Sans	Avec	t _{ign} (s)	Ratio
1. Panneaux sandwich PUR/Acier	●			●	104	11
2. Panneaux sandwich PUR/Acier		●		●	46	11
Mousse non revêtue	●		●		2	5

Durant les travaux de construction, le risque d'inflammation apparaît lorsque les revêtements de protection n'ont pas encore été installés. Il est illustré par le tableau n° 6. Les conditions d'utilisation réelle des produits sont normalement différentes de celles de la ligne 1.

Le dégagement de chaleur constitue également un danger lié au feu. Le tableau 7 représente les valeurs typiques pour quelques produits soumis au cône calorimètre.

Tableau 7. Dégagement de chaleur de mousse PUR non revêtue et de panneaux sandwich [48], voir tableau 6 pour les détails des différents produits.

Echantillons	Valeur moyenne		Intégrale moyenne		
	q'' max (kW/m ²)	t max (s)	q'' 60s (kW/m ²)	q'' 180s (kW/m ²)	q'' 300s (kW/m ²)
1. Panneaux sandwich PUR/Acier	80	131	35	11	0
2. Panneaux sandwich PUR/Acier	305	65	154	76	50
3. Mousse non revêtue	153	11	122	0	0

Les valeurs calorifiques nettes des mousses PUR sont H=27MJ/kg ou 6,7 kWh/kg. En tenant compte dans le tableau 8 des densités variables de produits, les comparaisons peuvent être effectuées pour une plaque de construction ramenées à 1m² par 1cm d'épaisseur ou une couche épaisse de 1cm dans le cas de l'asphalte.

Tableau 8. Valeurs calorifiques nettes selon le matériau.

Matériau	Masse volumique apparente	Pouvoir calorifique
Bois, pin	r = 500 kg/m ³	80 MJ
Bois, chêne	r = 700	120
PUR	r = 30	8
PUR	r = 40	11
PF	r = 35	9
EPS	r = 16	7
Bitume	r = 1200	480

Si l'on considère [42] un bâtiment industriel, avec une surface de 1000 m², une hauteur de 8 m, une isolation de 10 cm d'épaisseur et de 40 kg/m³ de masse volumique, la masse de mousse est de 8 tonnes. En supposant que 30% environ du matériau contribue à la charge calorifique (norme allemande DIN 18230 qui indique aussi un PCS du PUR de 6,7 kWh/kg), $qr = 8000 * 0,3 * 6,7 / 1000 = 16 \text{ kWh/m}^2 = 57,6 \text{ MJ/m}^2$.

La chaleur de combustion de l'isolant n'est cependant libérée que lorsque le bâtiment se trouve de toutes les façons en proie à un incendie déjà avancé. La performance isolante se perd par suite de la destruction de la mousse : le bardage et la toiture de l'enceinte en feu rayonnent ainsi de la chaleur et contribuent à soulager l'enceinte du feu. La résistance au feu est alors rallongée pour les autres éléments porteurs du bâtiment. Cet effet positif pourrait plus que compenser la contribution calorifique de la mousse.

Dans le domaine industriel, le «Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein» suisse recommande par exemple dans le document n°81 (tableau 9) que la charge calorifique soit prise comme une moyenne.

Tableau 9. Charges calorifiques typiques.

Type de bâtiment	Coefficient calorifique MJ/m ²
Bureaux	800
Magasin d'ameublement	500
Restaurants	500
Magasin de voitures	300
Bibliothèque	2000

CARACTÉRISTIQUES FEU DES PRODUITS DE CONSTRUCTION PUR

Bien que les mousses de polyuréthane soient combustibles, leurs propriétés feu peuvent être modifiées pour convenir à une gamme variée d'applications dans le bâtiment. La performance feu désirée peut être obtenue de différentes manières : par le choix de sa formulation, l'utilisation d'additifs et la mise en oeuvre en bâtiment. Par exemple, les mousses isolantes sont souvent installées de telle manière qu'elles ne sont pas directement exposées à la chaleur et aux flammes et sont protégées par un revêtement.

Un produit peut être utilisé dans un bâtiment ou un immeuble s'il est conforme aux normes de contrôle. L'inflammabilité, la propagation des flammes et le dégagement de chaleur sont en cours d'évaluation en raison des contrôles en Europe par des méthodes d'essai de réaction au feu à petite échelle qui diffèrent d'un pays à l'autre. L'importance accordée aux paramètres feu varie selon la méthode d'essai actuellement en vigueur. Les essais sont effectués soit sur le matériau soit sur un composite de petite ou moyenne dimension. En Allemagne, tous les matériaux à base de mousse pour la construction doivent avoir un classement minimum B2 selon DIN 4102 partie 1. Les autres pays, tels que la France, l'Espagne, le Royaume-Uni ou Benelux n'exigent pas un tel classement minimum, tant que l'ouvrage répond aux normes incendie spécifiées dans le règlement concernant la construction.

Les membres de L'UE se concertent en vue d'un système de classification de réaction au feu harmonisé. Ce système devrait être mis en œuvre à la fin de ce siècle¹. Les produits de construction seront alors classés de A1, A2, B jusqu'à F. Les méthodes d'essai les plus importantes pour les produits de construction en polyuréthane seront le single burning item (SBI) et le essai «Kleinbrenner». Ce système de classification permettra aux produits d'être essayés dans des conditions d'utilisation réelle. Le classement des différents produits polyuréthane est en cours d'établissement selon cette nouvelle norme.

Tableau 10. Représentation simplifiée du système de classification européen.

Situation d'incendie	Euroclasses	Méthodes
Feu complètement développé dans une pièce	A1	Bombe calorimétrique et essai de combustion + liste des produits non-combustibles
	A2	Bombe calorimétrique et/ou essai de combustion + SBI
	B	SBI + Kleinbrennen (30 s)
Un élément unique brûlant dans une pièce	C	SBI + Kleinbrenner (30 s)
	D	SBI + Kleinbrenner (30 s)
Petites attaques du feu dans un espace limité	E	Kleinbrenner (15 s)
	F	Pas de performance définie

Le matériau polyuréthane peut être additivé pour se classer B2 selon la norme DIN 4102 et être conforme aux règles allemandes dans le bâtiment. Cela signifie que des petites sources d'inflammation, comme les bougies ou allumettes, ne conduiront pas à une inflammation étendue de la mousse mais seulement au point d'impact.

La performance des matériaux polyuréthane peut être renforcée par la formulation ad hoc des principaux composants. Chimiquement, la structure polymère peut être modifiée pour limiter la quantité de produits volatils formés à 320°C durant une exposition au feu. Un exemple bien connu est la mousse PIR. Elle carbonise

1. faire un renvoi pour actualiser l'état actuel du projet de normalisation européenne SBI.

superficiellement et protège ainsi la sous-couche. Par conséquent les émissions de chaleur et de fumée sont réduites de manière conséquente.

En pratique les mousses de polyuréthane sont rarement utilisées tel quelles mais sont essentiellement parementées. Des parements adéquats peuvent renforcer la performance des produits pour se conformer à des normes plus exigeantes. Le tableau 11 illustre leurs effets sur la propagation de la flamme, mesurés en conformité avec la norme BS 476 partie 7.

Tableau 11. Propagation de la flamme selon la norme BS 476 partie 7 sur mousse de PUR et PIR avec des différents parements.

Parement	Classification du type de mousse	
	PUR	PIR
Aucun	classe 1-3	classe 1
Papier enduit	classe 3	classe 3
Feuille d'aluminium (1)	classe 3	classe 1
Feuille d'aluminium (2)	classe 1	classe 1
Acier prélaqué	classe 1	classe 1
Plaque de plâtre cartonée	classe 1	classe 1

Configuration LPS 1181, observation et enregistrement.



exigences supplémentaires de performance. Ces essais à grande échelle prennent aussi en compte les paramètres de réaction au feu mais sont en général plus lourds que les essais de contrôle classiques. Les produits polyuréthane et leurs dérivés ont obtenu l'approbation dans différentes applications. Un exemple est la performance des panneaux composites PUR à parement acier dans les agréments LPS 1181 ou FM 4880 [57].

Essais sur une construction selon la configuration LPS 1181.



source : EPIC (57)

En 1992, ISOPA a mené une série de grands essais feu au Laboratoire de recherche et d'essais pour la construction de Leipzig sur les panneaux composés de mousse PUR à parement acier. Ce programme faisait suite aux directives de recherche sur le feu de l'Union Européenne et démontrait :

- Que la performance feu du panneau ne dépendait pas de l'agent gonflant utilisé dans la mousse B2
- Que l'attaque thermique du début d'inflammation jusqu'à l'embrasement d'une cellule conduisait à une propagation très limitée des flammes sur la façade.

En ce qui concerne les applications en utilisation réelle, les sociétés d'assurances telles que Factory Mutual (FM) et Loss Prevention Council (LPC) ont introduit des

Les essais en coin ont impliqué une façade de 80m² et de 10 mètres de haut et un bûcher de bois de 40 kg pour simuler l'effet «fenêtre» rencontré dans les feux de

façade. Ces résultats montrent la performance satisfaisante des panneaux en terme d'inflammation et de propagation des flammes pour les essais à grande échelle [8].

De plus l'ISOPA a mené une série d'essais à grande échelle sur les toitures en tôle d'acier nervuré avec isolation plus étanchéité. Les résultats de ces essais ont montré que la contribution de l'isolation au dégagement de chaleur n'était pas un facteur dominant. De plus, le type d'isolation n'a pas d'impact sur la propagation du feu sur le toit. On peut conclure que le polyuréthane utilisé dans ces toitures légères ne constitue pas un risque particulier d'incendie pourvu que les travaux d'installation aient été menés correctement. [9]. Les résultats d'autres essais à grande échelle confirmant ces conclusions sont rapportés dans [18, 19, 40].

Traditionnellement, les produits de mousse de polyuréthane étaient utilisés dans des applications où la résistance au feu n'était pas nécessaire. Utilisés derrière un mur de maçonnerie, ils ne posaient pas de problème particulier, pourtant, en ce qui concerne les cloisons légères isolées, on préjugeait l'impossibilité d'une résistance au feu de 30 minutes. Aujourd'hui, il a été démontré que certaines conceptions, par exemple à base de panneaux sandwich, peuvent conférer une résistance au feu de 30 minutes voire plus.



Mise à nu latérale de la mousse : contribution à la propagation du feu dans l'essai en coin.

source : ISOPA (9)

FUMÉES ET GAZ TOXIQUES

Historiquement, les règlements en matière de bâtiment se sont concentrés sur les essais et la classification des feux. Certains pays ont des règlements concernant les risques liés à la fumée, mais les essais menés ne sont pas très pertinents. La fumée est la conséquence du feu et il est difficile d'en définir les dangers..

Pour les dangers liés à la fumée la considération essentielle est le temps nécessaire à l'évacuation de la zone en feu, avant que la visibilité ou la concentration de produits toxiques n'atteigne un niveau insoutenable. Dans le cas d'une évaluation portant sur le matériau, il ne faut pas seulement considérer le type de gaz dégagé ou leur densité de fumée qui seront dégagés, mais aussi leur durée. Il est aussi essentiel de savoir si le produit peut prendre feu, si le feu peut couvrir ou s'il y a inflammation et quelle est l'influence des facteurs tels que la nature de l'incendie, la situation du local et le taux de combustion du produit.

Par le passé, un grand nombre de méthodes d'essais à petite échelle ont été utilisées pour obtenir des données sur la toxicité des matériaux en combustion. Malheureusement, les essais à petite échelle actuellement disponibles sont incapables de reproduire la dynamique de croissance d'un feu ainsi que les profils temps/concentration des effluents produits dans des incendies à grande échelle. C'est un obstacle crucial car les effets des émissions de l'incendie sont maintenant connus pour dépendre bien plus des taux et de la nature de la combustion que de la chimie des matériaux. La seule manière d'évaluer le comportement d'un matériau de manière réaliste est :

- a) de mesurer son potentiel de toxicité de manière à évaluer sa contribution dans une certaine situation d'incendie.
- b) et de vérifier comment les situations différentes d'incendie contribuent au danger en combinant les

essais et les prédictions modélisées afin de parvenir à l'évaluation réaliste de la contribution globale d'un produit aux risques.

Des études ont été effectuées pour prévoir les effets de la fumée dans les incendies [43, 61]. Alors que la réponse aux différents niveaux de protection relève essentiellement de l'ingénierie, cette démarche s'applique plutôt à assurer l'évacuation des occupants en toute sécurité. Ces approches fournissent des méthodes de calcul pour les composants mortels. Elles incluent la toxicité des produits volatils de combustion, la chaleur et l'opacité de la fumée.

MODÈLES DE DÉCOMPOSITION

La performance des matériaux du point de vue des fumées - densité optique, potentiel toxique, etc.- est presque exclusivement déterminée par des essais à petite ou moyenne échelle. Les modèles d'incendie choisis pour les matériaux ou produits décomposables doivent permettre de simuler amplement les différents feux.

Pendant des années, les essais feu sur les produits de construction ont été utilisés pour mesurer les valeurs potentielles et classer les produits de construction, [20],



Enregistrement de données et de texte sur le SBI.

[21], [22]. Ceux qui ont été par ex. menés au TNO (Pays Bas), ont révélé le manque de pertinence de la relation entre les essais en laboratoire et le comportement au feu dans les scénarios spécifiques [23].

Il semblerait logique d'ajouter aux méthodes existantes, des moyens d'évaluer les paramètres fumée, mais de nombreux problèmes doivent encore être résolus.

En général, le paramètre fumée est mesuré par des méthodes statiques ou dynamiques. La méthode statique le détermine pour un volume donné, tandis que la méthode dynamique le mesure de manière continue.

La méthode statique la plus connue est la «NBS Chamber» [25], développée par l'ancien «National Bureau of Standards» et utilisée dans l'industrie de l'aéronautique [26, 27] même si le SAFER (Special Aviation Fire and Explosion Reduction) Advisory Committee [28] a trouvé que leurs résultats ne convenaient pas.

Une autre méthode statique est la «boîte à double chambre», qui suit la variation d'intensité lumineuse, bien qu'elle donne des mesures différentes des autres méthodes. Elle n'a pas suffisamment bénéficié de soutien auprès de l'ISO pour son développement comme norme internationale. Néanmoins, «boîte à double chambre» est une méthode officielle aux Pays-Bas.

Selon DIN 53436/37, l'essai tubulaire est une méthode authentiquement dynamique [30]. Une masse, ou un volume et ou une surface donnés sont décomposés à intervalles réguliers afin qu'un courant presque constant de gaz de composition inchangée soit généré tout au long du essai. Avec ce système, la relation temps/température peut être simulée pour différents types de scénarios, comme c'est décrit ailleurs [30,31].

La méthode- dynamique - du cône calorimètre semble négliger des principes fondamentaux bien connus. Les cas de feu couvant, qui jouent parfois un rôle

Tableau 12. Modèles de décomposition internationaux standardisés.

Essai (normes) S - Statique D - Dynamique	Impact thermique	Dimensions de l'échantillon (mm)	Volume de l'échantillon (cm ³)	Durée du essai (min)
Chambre NBSS ASTM E662	25 kW/m ² avec et sans flamme pilote	76 - 76 ≤ 25	144	6 20
Chambre NBSS ISO 5657	25 kW/m ² avec et sans flamme pilote	76 - 76 ≤ 25	144	20
Pièce XP2 ON B3800 ASTM-D 2843	Brûleur	30 - 30 4 60 - 60 25	3,6 90	≤ 15
GOST 12.1044.89	panneau radiant 400°C - 700°C	40 - 40 ≤ 10	16	
IEC TC 89 essai du câble	source d'inflammation: fuel	300 300 - 2- 25 2 - 400 - 4 00 - 25 1000 - 50 0 - 2 - 4	225/1 80	2
Boîte à fumée ISO BOX ISO 5924	10 kW/m ² 50 kW/m ²	165 - 165 - <70	<190 6	20
DIN 53436	100°C - 900°C	270 - 5 - 2	2,7	20
NF-16-101	100°C - 900°C	270 - 5 - 2	2,7	10 - 15
DIN 54837	Brûleur	500 - 190 - d	190	5
Essai en cheminée DIN 4102	Brûleur	4 - (1000 - 1 90 - 80)	60800	10
ORE 14	Panneau radiant/flamme	50cm ² - 2mm	10	5
DIN 4102 T14	Panneau radiant/brûleur	1050 - 230 - d		12...30
Cône calorimètre ISO/DIS 5660	Panneau radiant	100 - 100 - ≤ 50	500	60

dominant en ce qui concerne la production de fumée sont totalement laissés pour compte. Et pour les sources d'inflammation plus grande, l'influence de la ventilation (démontrée par les mesures issues de procédures de décomposition), est aussi négligée.

Dans [32,33] les systèmes statiques et dynamiques ont été comparés en utilisant une maquette à échelle réduite de pièces-couloirs. Une divergence flagrante a été remarquée : les mesures dynamiques sous-estimaient fortement les mesures statiques. Des méthodes de libre ventilation comme le cône calorimètre, pourraient fournir des données incorrectes pour les matériaux à base de cellulose. Dans des situations réalistes le bois et la viscosité ont des niveaux de fumée jusqu'à 10 fois plus hauts.

Des informations concernant la raréfaction en oxygène en cours d'essai et le ratio CO_2/CO au sein des modèles de décomposition permettent une comparaison entre les conditions d'essai et les situations réelles d'incendie. Le modèle de décomposition choisi (tableau 12) doit pouvoir simuler les scénarios d'incendie réels pour être évalué.

Les détails des principaux essais fumée sont donnés par Troitzsch [24]. Ces essais sont réalisés dans des conditions très spécifiques uniquement.

PROPRIÉTÉS OPTIQUES DE LA FUMÉE

La réduction de la visibilité dépend en premier lieu de la quantité de fumée produite par les matériaux en feu [10-13], bien que d'autres effets doivent aussi être pris en compte. Alors que la laine de bois sèche brûle sans générer de fumée réduisant la visibilité s'il y a suffisamment d'air, le même matériau peut constituer un danger plus important, par exemple si la teneur en humidité est suffisamment importante.

Le coefficient d'extinction lumineuse dépend aussi des propriétés optiques des particules, de leur taille et de

leur nombre. Dans [10], il est constaté que la taille des particules augmente lorsque le rayonnement thermique augmente. Par exemple, comparativement au polyuréthane, le bois produit des densités de fumées défavorables à des niveaux de rayonnement plus bas [39]. Un autre fait à prendre en compte est que l'effet absorbant domine dans le cas de fumée noire, alors qu'il y a une réflexion majeure dans le cas de fumée blanche.

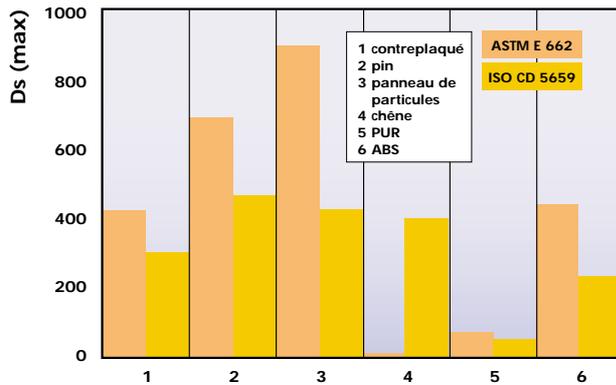
Par le passé, des enquêtes ont été menées sur de nombreuses méthodes d'évaluation du potentiel de production de fumée. La plupart des méthodes utilisent un système optique comprenant une petite ampoule électrique et un récepteur dont la sensibilité (380-780 NM) est semblable à celle de l'œil humain [14-15]. Plusieurs méthodes développées récemment, dont le cône calorimètre, utilisent un laser à faible puissance [16-17].

Des tentatives variées ont été effectuées pour évaluer les dangers liés à la fumée, par ex. dans [49], où la relation entre la visibilité et la densité optique D étaient un des points fondamentaux. Selon Jin [49], le produit de la visibilité et de la densité optique D est constant pour les objets réfléchissants; ce fut confirmé par Silversides [11].

Les coefficients de densité de fumée dépendent du flux thermique [34] et de la surface de l'échantillon exposé. Plusieurs enquêtes ont montré que l'on peut obtenir des coefficients de densité de fumée très divers pour le même matériau si ces paramètres, et d'autres, tels que la ventilation et l'orientation de l'échantillon, sont modifiés.

Dans S.D., Christian [35] a comparé les méthodes et révélé l'influence de l'essai sur les résultats. Cela vise les effets des barrières thermiques et les points singuliers tels que les joints et recouvrements. Selon H.L. Malhotra [15], la surface de décomposition devrait être de 200 cm^2 au moins. Le tableau 13 illustre les variations possibles du potentiel fumée selon les conditions de décomposition.

Tableau 13. Densité optique du polyuréthane par rapport aux autres produits pour deux modèles de décomposition différents mais similaires [39].



Les risques de réduction de visibilité réduite lors d'un incendie doivent être en rapport avec les différents scénarios. Dans le cas d'un feu couvant, par exemple le risque peut être réduit de manière significative grâce à des systèmes d'alarmes précoces. Lors de la phase de développement de l'incendie, la menace de réduction de visibilité réduite dépendra de la propagation du feu. Tant que le matériau en question résiste à la source d'inflammation simulée, la quantité limitée de matériau brûlé ne sera pas la cause d'une réduction significative de visibilité. Si l'incendie se propage, un calcul approximatif peut être fait en évaluant la fumée produite par la surface en feu. Les données du potentiel fumée doivent être en rapport avec l'environnement menacé et le temps de combustion.

En ce qui concerne le cas de l'embrasement, la surface totale de l'espace en feu - murs, plafond, revêtement de sol et autres éléments - doit être pris en compte. Si l'embrasement a lieu, il ne faut pas espérer réduire significativement les dangers en jouant sur les densités optiques spécifiques aux matériaux, mais seulement en prenant des mesures de prévention ayant rapport à la formation et aux mouvements de la fumée.

POTENTIEL TOXIQUE DES MATÉRIAUX ET DANGERS DANS DIFFÉRENTS CAS D'INCENDIE

Le potentiel de toxicité correspond à la dose d'exposition aux produits toxiques issus de la décomposition thermique d'un matériau donné, entraînant un effet toxique donné, provoquant par exemple des malaises. Une des manières d'utiliser ces données concernant le potentiel toxique est de les exprimer en terme de coefficient LC50, soit le taux de dose d'exposition calculé pour produire la létalité pour 50% des animaux exposés durant un temps d'exposition spécifique qui est souvent de 30 minutes [43].

Par le passé, le potentiel toxique avait été évalué lors de essais en laboratoire à petite échelle. (tableau 14). Avec les conditions connues de feu couvant et d'inflammation, les matériaux ont été brûlés à une température allant de 400 à 600°C et les produits de décomposition ont été mis dans une chambre d'exposition avec des animaux. Afin de valider les essais en laboratoire à petite échelle, des enquêtes grandeur nature sont nécessaires mais rares. L'identification claire de la situation d'incendie simulée pour un modèle de décomposition est pourtant essentielle.

La méthode et l'appareil utilisé selon DIN 53436 [30] sont tout à fait adéquats car la ventilation et la température-deux des trois paramètres les plus importants- peuvent être simulés avec précision. Seule la pression, le troisième paramètre, varie constamment durant un incendie et ne peut être contrôlée. Jusqu'à présent, il n'a pas encore été possible de simuler correctement l'influence de la pression dans des essais en laboratoire à petite échelle. Les autres appareils de décomposition ne sont pas aussi adéquats que le tube DIN, car les effets de la ventilation ne peuvent être pris en compte.

Aujourd'hui, l'utilisation de essais sur animaux pour évaluer le potentiel toxique est très restreinte. Les résultats obtenus rassemblés au cours des nombreuses expériences ont permis leur combinaison avec des modèles mathématiques, étalonnés lors d'essais effectués sur des animaux, afin que le potentiel toxique d'un produit puisse être évalué avec précision. La prédiction mathématique se fonde sur l'analyse des principaux toxiques : CO, CO₂, SO₂, HCN, Nox, NH₃ et l'appauvrissement en O₂.

Tableau 14. Potentiel toxique (LC50) pour différentes méthodes de décomposition.

Méthodes de décomposition	Toxicité (g/m ³)		
	Bois	Laine	PUR
DIN 53436	25	7	7
Potts-Pott	19	15	11
U-Pitt	106		13
US-Radiant	60		
GUS-IMO	15		13

Les résultats de essais disponibles [38,58,59] n'ont pas montré de différences fondamentales entre les produits plastiques et naturels (tableau 15), mais des différences entre le bois et la laine et/ou des différences entre polystyrène, polyamide et polyvinylchloride par exemple. La fumée de tous les matériaux essayés, y compris ceux contenant de l'azote, se range au même niveau. Température (schémas 4 et 5) et ventilation sont approximativement de même importance, tout comme la nature des différents matériaux impliqués.

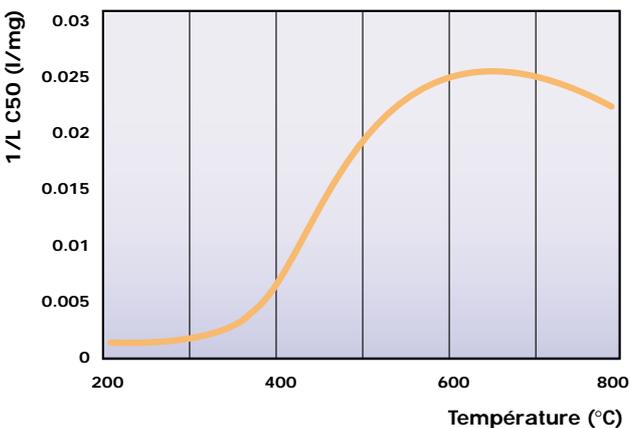
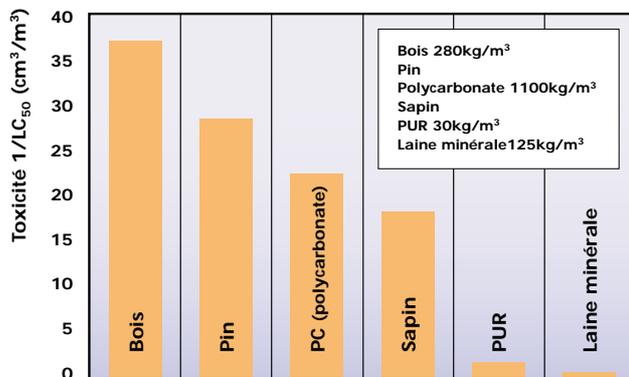


Fig. 3. Potentiel toxique d'un produit rigide de polyuréthane par rapport à la température [38].

Au cours des incendies, le niveau d'oxygène décroît pendant que se forme un mélange de gaz à nocivité synergique de CO, CO₂, HCN et NO_x (N₂O, NO₂ etc). HCN et NO_x pourraient apparaître à la suite de

l'oxydation de l' azote provenant de matériaux comme la laine, le cuir, la mousse de polyuréthane et le polyamide [47]. Dans les études portant sur le mélange binaires de gaz à base de NO₂, l'ajout de CO et/ou CO₂ accroît la toxicité de NO₂, alors que se produit l'effet contraire dans le cas de NO₂ et HCN. Les résultats des mélanges ternaires NO₂, CO₂, et HCN- qui sont bien plus réalistes que les mélanges binaires de gaz dans le cas d'un incendie, indiquent que le CO₂ ne cause pas d'effet toxicologique synergique comme pour les mélanges binaires de gaz. Des animaux ont survécu à une exposition à divers mélanges ternaires de HCN, NO₂ et CO₂ qui représentaient l'équivalent de 4,7 à 5,5 fois les concentrations léthales combinées des gaz.

Tableau 15. Potentiel toxique des différents matériaux.



Dans [60], 4000 expériences différentes sur des matériaux variés de même que différentes situations d'incendie sont décrites. Dans 92% des cas, la léthalité a été causée par CO, dans 2% des cas par HCl et 2% par des effets inconnus. Dans 4% des cas seulement, les effets combinés de HCN et CO ont été la principale contribution de HCN à la mort des animaux.

Ce n'est pas le cas pour les matériaux contenant une grande quantité d'azote. On peut donc affirmer que la toxicité globale des émissions d'un feu provoquées par les matériaux contenant de l'azote comme les mousses polyuréthane, n'augmente pas automatiquement et se situe au niveau de toxicité des matériaux n'en contenant pas, à conditions comparables d'essais.

PRODUCTION DE DIOXINE ET DE FURANE DANS UN INCENDIE

Dans la plupart des incendies impliquant des produits naturels ou plastiques, une variété de produits de décomposition- connus sous les noms de dioxine et furane auxquels appartient le groupe des dioxines et furanes dibenzoyles polyhalogénés- est produite en même temps que les composants globalement connus de la fumée [42,50].

Au cours d'un incendie complètement développé, des températures élevées sont atteintes et favorisent ainsi la production de dioxines, si le matériau en feu contient des halogènes. Les produits naturels soi-disant non halogénés, contiennent aussi des halogènes par suite de la pollution ambiante. Ainsi, dans tous les cas d'incendie la production de dioxines et de furanes est possible à un niveau inférieur au ppm.

De plus, les dioxines et les furanes sont générées dans tous les processus de combustion contrôlés et sont présents dans l'environnement. Sachant cela, il faut donc relativiser les cas catastrophique d'incendie. Enfin, la disponibilité biologique des dioxines liée à la suie dans les incendies est très limitée.

Les résidus d'un feu contiennent en général des dioxines. Leur potentiel de danger ne peut être évalué sur une base générale.

Le groupe des dioxines et furanes comprend environ 210 composés chlorurés différents et un même nombre de dérivés bromés. Seules des données analytiques peuvent servir de base à une évaluation des risques si le type de dioxine et la concentration trouvée sont connus. A peu près 25 dioxines et furanes chlorurés et bromés ont été identifiés comme toxiques. Des mesures réglementaires particulières existent dans certains pays pour cette catégories de dioxines. La 2.3.7.8 TetraChloroDibenzoDioxine (TCDD) est la substance de référence. A l'aide des hypothèses et des facteurs d'équivalence toxicologiques reconnus internationalement, tous les dioxines et furanes peuvent être évalués par rapport au TCDD.

Dans les feux de polyuréthane, la quantité de dioxine/furane chlorurés ou bromés n'excède en général pas la somme équivalente de 2 µg/kg de TCDD, concentration maximum autorisée par la Réglementation allemande sur les matières dangereuses; ce fut confirmé par des essais contrôlés en laboratoire. Des essais ont été effectués à échelle industrielle et dans un laboratoire indépendant. Les mousses rigides de polyuréthane contiennent des ignifugeants halogénés ou non-halogénés. L'agent gonflant utilisé dans des enquêtes plus anciennes était le CFC11. Lors d'essais récents, le HCFC a aussi été utilisé [46]. Avec ce dernier pour agent gonflant des mousses rigides, la formation de dioxines n'a pas lieu d'être différente de celle relevée avec les CFC.

RÉFÉRENCES

- [1] Home Office Statistical Bulltin, summary of fire statistics UK, 1995 (issued April 1997).
- [2] R.G. Gann, V. Babrauskas, D. Peacock and J.R. Hall: Fire Conditions for smoke toxicity measurement, *Fire and Materials*, 18, 193-199 (1994).
- [3] J. Hall: Fire Statistics, Patterns of Fire Experience related to Toxicity, conference proceedings, Smoke Toxicity - International conference, March 1996, Munich.
- [4] ISO TR 9122 Toxicity testing of fire effluents.
- [5] F. -W. Wittbecker: Smoke Detectors and Escape Times, *Fire Europe*, 4, 5-8 (1997).
- [6] A. Pinney: Update on the European Construction Harmonisation Programme, *Flame retardants* 96, 23-33 (1996).
- [7] Hoffmann, Sand, *Kunststoff Rundschau*, 10/74.
- [8] C. Hildebrand, F.H. Prager, E. Levio, B. Cope: Fire performance of PUR steel sandwich panels used for facades, Leipzig 1992.
- [9] I. Kothoff, R. Walter, F. -W. Wittbecker, "Fire performance of Polyurethane Steel Deck Roofing, ISOP, 1997.
- [10] B.T. Zinn et al.: Analysis of Smoke Produced during the Thermal Degradation of Natural and Synthetic Materials, Int. Symp. Salt Lake City, 1976.
- [11] R.G. Silversides: Measurement and Control of Smoke in Building Fires, ASTM-STP 22, 1966.
- [12] R.W. Bukowski: Smoke Measurements in Large and Small Scale Fire Testing, NBSIR-78-1502.
- [13] C.P. Bankston, R.A. Cassanova, E.A. Powell, B.T. Zinn: Initial Data on the Physical properties of Smoke Produced by Burning Materials under Different Conditions, *J.F.F.*, 7:165. 1976.
- [14] DIN 50055, Lichtmeßstrecke für Rauchentwicklungsprüfungen.
- [15] H.L. Malhotra: Smoke-Tests-A Critique, QMC Symp. January 1982.
- [16] EUREFIC „European Reaction to Fire Classification,“ Proceedings, Kopenhagen 1991.
- [17] V. Babrauskas: Application of Predictive Smoke Measurements, *Jff* 12, p. 51., 1981.
- [18] C. -D. Sommerfeld, R. Walter, F.-W. Wittbecker: Fire performance of facades and roofs insulated with rigid polyurethane foam - a review of full scale tests, proceedings, Interflam 96.
- [19] J. Wiese, F. -W. Wittbecker: Verhalten einer PUR Sandwich-Paneele bei lokaler Brandbeanspruchung (Performance of a polyurethane sandwich cladding panel wall during local fire exposure, *VdS Magazin Schadenverhütung + Sicherheitstechnik*, 6/95.
- [20] ASTM-E 83 (NFPA 255, UL 723). Method of Test of Surface Burning Characteristic of Building Materials.
- [21] NEN 3883. Bepaling van de mate van rookontwikkeling bij brand.
- [22] DIN 4102 part 12. „Radiant Panel Test.“
- [23] T. van Dijk, T. Twilt, H. Zorgman: Smoke Problems in Buildings of Fire, A TNO research project.
- [24] J. Troitzsch: Brandverhalten von Kunststoffen - Grundlagen - Vorschriften, Prüfverfahren, München, Wien: Karl Hanser Verlag.
- [25] ASTM-STP 422. „NBS-Smoke Density Chamber.“
- [26] Airbus Industries. „Smoke Emission Requirements.“ Techn. Specification ATS 10000.01.
- [27] Boeing BMS-8.226 R. „Smoke Emission Toxic Gas Concentration Requirements.“
- [28] SAFER Advisory Committee. 1978-80. FAA-ASF-80-4 Final Rep. Vol. 1.
- [30] DIN 53436. „Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung“, part 1-3
- [31] F.H. Prager, H. -J. Einbrodt, J. Huppfeld, B. Müller, H. Sand: Risk Orientated Evaluation of Fire Gas Toxicity Based on Laboratory Scal Experiments-The DIN 53436 Method,“ *Journal of Fire Science*, Vol. 5., 1987.
- [32] D.D. Drysdale et al.: A Note on the Measurement of Smoke Yields, *Fire Safety Journal*, 15:331, 1989.
- [33] D.D. Drysdale et al.:Smoke Production in Fires, *Fire Safety Science and Engineering*,“ ASTM-STP 882, p. 285, 1985.
- [34] P.G. Edgerly, K. Pettett: Variation of Smoke Density with Heat Flux, *J. Fire and Flamm.* 10, 1979.
- [35] S.D. Christian: The Performance and Relevance of Smoke Tests for Material Selection for Improved Safety in Fires, Polytechnic of the South Bank Borough Road, London SO1 OAA, 1984.
- [36] M. Mann, F. -W. Wittbecker: Der Einfluß von Rauchmeldern auf Flucht- und Rettungszeiten - Vergleich von design fires mit gemessenen Wärmefreisetzen von Polstermöbeln (Influence of smoke detectors on escape and rescue times - comparison of design fires and measured heat release characteristics of furniture), *vfdb-journal*, 3/97.
- [37] C. -D. Sommerfeld, R. Walter, F. -W. Wittbecker: Polyurethan Hartschaumstoffe im Europa 2000 (Polyurethane rigid foams in Europe 2000), Güteschutzgemeinschaft Hartschaum, Frankfurt, 1997.
- [38] M. Mann, W. Pump, F. -W. Wittbecker: Zur Abschätzung der akuten Toxizität im Brandfall (A contribution for the estimation of acute toxicity in fires), *vfdb-Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz* 4/95.
- [39] F. -W. Wittbecker: Zur Problematik, die Sichtbeeinträchtigung infolge Rauch wirklichkeitsnah abzuschätzen (The problem of assessing visibility in real fires) , *Bauphysik* 3/93.
- [40] R. Walter, F. -W. Wittbecker: PUR - sandwich panels in the building industry - development of fire regulations in Europe, *Makromol. Chem., Macromol. Symp.* 74, 1993.
- [41] G. Heilig, F. H. Prager, R. Walter, R. Wiedermann, F.-W. Wittbecker: Pentan getriebene Polyurethan (PUR) - Hartschaumstoffe - Bauphysikalische Eigenschaften (Pentane blown polyurethane (PUR) - rigid foams - physical properties) , *Bauphysik* 3/92.

- [42] M. Giersig, F. -W. Wittbecker: Polyurethan Dämmstoffe - Toxikologisch - ökologische Aspekte (PUR-rigid foam - ecotoxicological aspects), gi – Der Gesundheitsingenieur, Nr. 4/1998.
- [43] ISO 13344 Determination of the Lethal Toxic Potency of Fire Effluents.
- [44] F.H. Prager: Sicherheitskonzept für die Brandschutztechnische Bewertung der Rauchgastoxizität, TH Aachen, 1985.
- [45] DIN 53436 Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen unter Luftzufuhr und ihre toxikologische Prüfung.
- [46] J. Vehlou et al., "Co-combustion of Building Insulation Foams with Municipal Solid Waste", APME-EXIBA-ISOPA, 1996.
- [47] B.C. Levin: New research avenues in toxicology: 7-gas N-Gas Model, toxicant suppressants, and genetic toxicology, Toxicology 115, 89-106, 1996.
- [48] F. -W. Wittbecker: Zur szenarioabhängigen Ermittlung und Beurteilung des brandtechnologischen Materialverhaltens (A contribution to the scenario dependent determination and assessment of the fire performance of materials), Wuppertal University, will be published in 1999
- [49] T. Jin: Visibility through fire smoke, journal of fire and flammability, Vol. 9 (1978) S. 135-155.
- [50] Engler, A.; Pieler, J. und Einbrodt, H.J.: Gefährdungsabschätzung von Brandgasen und Brandrückständen unter humantoxikologischen Gesichtspunkten, Wissenschaft und Umwelt 191,1990.
- [51] Roßmann, G.: Sanierung von Brandschäden, Teil I: Gefahrstoffe nach Bränden., vfdB - Zeitschrift (1996) Nr. 4.
- [52] Troitsch, J., Bericht: Brand in Firma Micro-Plast, Lengerich, am 4.10.1992, Nr. TR 042993.
- [53] Verband der Sachversicherer e.V.: Leitfaden zur Brandschadensanierung.
- [54] Empfehlung zur Reinigung von Gebäuden nach Bränden, Bundesgesundheitsamt (BGA) Bekanntmachung Januar 1990, Bundesgesundheitsblatt 33 (1990) Nr. 32.
- [55] Roßmann G.: Sanierung von Brandschäden, Teil II: Gefährdungseinschätzung kalter Brandstellen vfdB - Zeitschrift (1997) Nr.1
- [56] S. Young: Do we need a European smoke alarm crusade?, Fire Europe, June 1998.
- [57] P. Trew: Insulated cladding systems performance in fire, Engineered panels in construction – EPIC, in publication.
- [58] H.Th.Hofmann, H. Oettel: Zur relativen Toxizität von Kunststoff - Verschwelungsprodukten am Beispiel von Hartschaumstoffen aus Polystyrol, Kunststoffe-Rundschau 15, 1968, 6, p.261.
- [59] H.Th.Hofmann, H.Sand: Further Investigations into the relative toxicity of decomposition products given off from smouldering plastics, JFF/Combustion Toxicology, Vol.1, 1994, p.250.
- [60] H.J. Einbrodt: Zur Toxikologie von Brandgasen, Chemie und Fortschritt, 1, 1987.
- [61] ISO TR 13387,1-8: The application of fire performance concepts to design objectives; Design fire scenarios and design fires; Assessment and verification of mathematical fire models; Initiation and development of fire and generation of fire effluent; Movement of fire effluent; Structural response and fire spread beyond the enclosure of origin; Detection, activation and suppression; Life safety: Occupant behaviour, location and condition.
- [62] D. Daems et al.: "Factors affecting the Long Term Dimensional Stability of Rigid Foam for the Construction Industry", Journal of Cellular Plastics, vol32 (1996) 485-500.
- [63] Study for EUROACE by Caleb Management Services, April 1998.
- [64] BING report (Federation of European Rigid Foam Associations), "The Environmental Contribution of Polyurethane Thermal Insulation Products - Eco-profile", November 1998.



European Isocyanate



Producers Association

ISOPA

Avenue E. van Nieuwenhuysse 4, Box 9

Brussels B-1160, Belgium

Tel: +32 2 676 74 75

Fax: +32 2 676 74 79

E mail: main@isopa.org

www.isopa.org