Direction Sécurité, Structures et Feu
Division RECHERCHE et INGENIERIE pour la SECURITE des CONSTRUCTIONS

N° affaire : 26089176

Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie

Rapport état de l'art n° 26089176

Demandeur de l'étude :

Fédération Nationale des Sapeurs-Pompiers de France
ADRESSE :

32 rue Breguet - 75011 PARIS

Rédacteurs	Vérificateur	Approbateur	Version	Date
Véronique MARCHETTI Rukshala ANTON Stéphane MOULARAT 	El Mehdi KOUTAIBA 	El Mehdi KOUTAIBA 	0	30/05/2023

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.

Ce document comporte 45 pages, dont 5 pages d'annexes.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT
Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2
Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – www.cstb.fr
MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

Rapport état de l’art des outils de protection

Version	Date	Principales modifications effectuées	Partie modifiée
		-	
		-	

Sommaire

1. INTRODUCTION 4

1.1. CONTEXTE & OBJECTIF 4

1.2. PERIMETRE 5

1.3. METHODOLOGIE 6

2. LA PROTECTION DES ŒUVRES PATRIMONIALES EN FRANCE 6

2.1. LES OUTILS DE PROTECTION PASSIVE 7

2.1.1. Produits souples 7

2.1.2. Autres outils de protection passive 10

2.2. LES OUTILS DE PROTECTION ACTIVE 17

2.2.1. Sprinklage 18

2.2.2. Brouillard d'eau 20

2.2.3. Extincteurs manuels 22

2.2.4. Hypoxie / anoxie 25

3. LA PROTECTION DES ŒUVRES PARTIMONIALES AU NIVEAU INTERNATIONAL 26

3.1. GENERALITE 26

3.2. EXEMPLES DE PROTECTION ET MESURES DE SECURITE INCENDIE 27

4. LES OUTILS DE PROTECTION AU REGARD DE LA VULNERABILITE DES ŒUVRES PATRIMONIALES 31

4.1. LES EFFETS POLLUANTS DANS UN INCENDIE 31

4.1.1. Composés gazeux émis par les feux 33

4.1.2. Principaux produits de pyrolyse/combustion émis par les matériaux facilement combustibles ou inflammables 33

4.1.3. Les COV émis par un incendie 34

4.2. NOTIONS DE VULNERABILITE DES ŒUVRES 35

5. INNOVATIONS 36

6. CONCLUSION 39

ANNEXE 1 : PRINCIPAUX FOURNISSEURS DE PRODUITS DE PROTECTION SOUPLES SELECTIONNES EN FRANCE 41

ANNEXE 2 : PRINCIPAUX FOURNISSEURS DE VERRES SPECIAUX RESISTANTS AU FEU 42

ANNEXE 3 : QUELQUES FOURNISSEURS DE PRODUITS DE PROTECTION SEMI-SOUPLE 43

ANNEXE 4 : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 44

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte & objectif

Les premières préoccupations visant une protection du patrimoine culturel vis-à-vis des catastrophes naturelles datent de la Convention de La Haye de 1954 sous l'égide de l'UNESCO. ***[R1]***
Depuis, plusieurs Arrêtés, Circulaires, Guides et Notes imposent aux gestionnaires d'établissements culturels d'organiser la protection de ces biens.
La note du 10 Juin 2016 de la Direction Générale des Patrimoines du ministère de la Culture demande aux chefs d'établissements culturels et aux conservateurs des cathédrales de réaliser leur Plan de Sauvegarde des Biens Culturels (**PSBC**) et fournit des éléments méthodologiques pour la réalisation de ce document à vocation opérationnelle. Ce plan de sauvegarde constitue une priorité du ministère de la Culture dans sa Directive Nationale d'Orientation 2016/2017. ***[R2]***

Face à une situation d'urgence, le **PSBC** a vocation à constituer l'outil opérationnel qui oriente et facilite les décisions prises par le chef d'établissement (ou son représentant) et le commandant des opérations de secours. Il permet de faire face aux premiers instants d'un évènement indésirable sur un établissement culturel.

Dans le cas spécifique d'un sinistre incendie, le **PSBC** est sans conteste un enjeu majeur pour la sauvegarde des collections patrimoniales. ***[R3]***
Dans ce contexte très complexe, les mesures préventives (règlement de sécurité) doivent s'allier à la stratégie d'intervention (démarche prévisionnelle, doctrine opérationnelle). La démarche méthodologique permet de répondre aux questions fondamentales suivantes :

- Quoi ? identification des œuvres à sauvegarder en priorité
- Qui ? désignation des personnes pouvant agir durant le sinistre
- Comment ? définition des mesures d'urgence
- Avec quoi ? détermination du matériel d'urgence nécessaire à l'intervention
- Avec qui ? identification des prestataires externes

C'est dans la définition des mesures d'urgence et la détermination du matériel associé que l'étude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie se situe précisément. En effet, si les œuvres ne peuvent être évacuées à cause d'un problème d'accessibilité ou de trop grandes dimensions ou de leur caractère inamovible, car faisant partie intégrante du bâti (ex : fresque murale, …), des moyens de protections adaptés et efficaces doivent être déployés rapidement.

Cet état de l'art a pour objectif d'établir un panorama national et international en matière de moyens de protections des biens patrimoniaux mobiliers et immobiliers contre les risques d'incendie.

1.2. Périmètre

Cette bibliographie permet de classer les outils et matériels de protection dans trois catégories suivantes :

- les protections passives déjà existantes
- les protections actives déjà existantes
- le développement de protections innovantes (R&D)

La démarche est orientée en fonction de la destination de l'œuvre et de sa « sensibilité » au changement environnemental (ex : augmentation de la température ambiante, augmentation de l'humidité, etc…). Il est pris en compte les différentes destinations suivantes :

- cas des expositions permanentes : exposition continue dans une configuration spatiale.
- cas des expositions temporaires : exposition dans diverses configurations spatiales, phase de transports/conditionnement (caissons, emballage…), phase de stockage transitoire.
- cas des œuvres non exposées : réserves, magasins (coffres, rayonnage, caissons, etc…)

Une analyse bibliographique adjacente rassemblant les impacts des différents types d'agressions sur l'intégrité de l'œuvre ainsi que sur l'intégrité de la protection elle-même est réalisée afin de mettre en adéquation les moyens de protections et les conséquences collatérales prévisibles sur les œuvres en fonction de leur typologie.

Le schéma suivant illustre l'organisation bibliographique proposée afin d'établir un catalogue de solution de protection le plus exhaustif possible mettant en exergue les points forts et les limites de chacune des solutions étudiées en fonction de la typologie de l'œuvre et de sa destination.

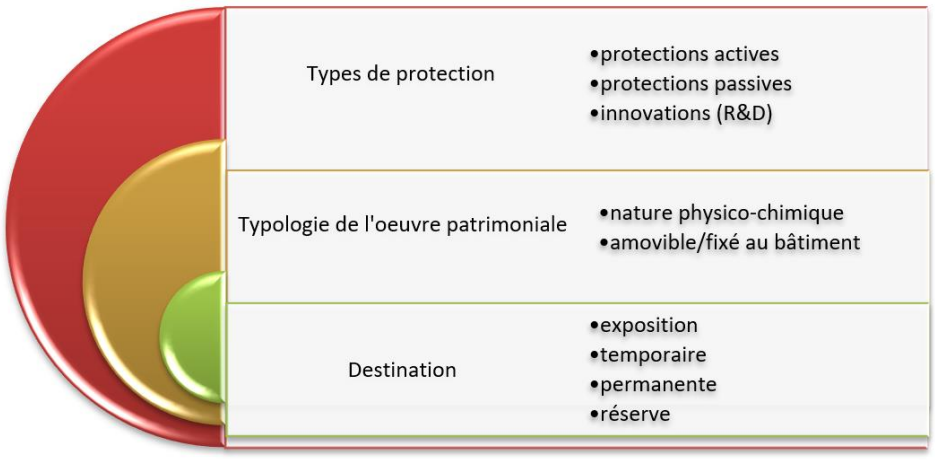


Figure 1 : Illustration de l'organisation bibliographique

1.3. Méthodologie

L'état de l'art réalisé ici se base sur plusieurs démarches suivantes :

-Recherche d'informations sur internet

-Recherche bibliographique scientifique (Scholar Google)

-Contacts avec différents organismes à l'étranger :

- ✓ Institut Canadien de conservation, ministère du Patrimoine canadien (CANADA)
- ✓ World Monuments Fund (USA)
- ✓ Direction et secrétariat du département de la culture et de la transition numérique à Genève (SUISSE)

-Contacts avec différents établissements et organismes en France (C2RMF, LRMH, Louvre, école d'Histoire de l'art, Université Paris I, Sorbonne, FFMI, …)

-Contacts avec différents fournisseurs de protections actives et passives.

2. LA PROTECTION DES ŒUVRES PATRIMONIALES EN FRANCE

Les systèmes de protection incendie peuvent être globalement divisés en deux groupes principaux ; les systèmes de protection incendie actifs et les systèmes de protection incendie passifs.

Les systèmes actifs sont ceux qui « réagissent » à un incendie ou aux produits de combustion d'un incendie, et fournissent une réponse définie et prédéterminée. Les systèmes de protection active contre l'incendie ont tendance à se répartir en deux catégories distinctes ; systèmes destinés à avertir d'un incendie et systèmes destinés à contrôler et/ou éteindre un incendie ou les produits de combustion associés.

Ces systèmes actifs comprennent :

- systèmes de gicleurs automatiques d'eau ;
- systèmes d'extinction automatique à gaz ;
- systèmes de désenfumage ;
- systèmes automatiques de détection et d'alarme incendie, etc.

La seule caractéristique que tous les systèmes actifs ont en commun est qu'ils ont tendance à avoir un mécanisme de réponse automatique à un ou plusieurs des produits de combustion communs.

Les systèmes passifs de protection contre l'incendie comprennent ceux qui font généralement partie du tissu du bâtiment, tels que les sols, les murs, les portes, etc., et qui ont une résistance mesurable à l'exposition aux principaux produits de combustion. Sont également inclus dans cette catégorie les produits qui réagissent à une élévation de température afin d'améliorer la réaction d'un élément de la structure du bâtiment lors d'un incendie, c'est-à-dire les revêtements de surface intumescents et ablatifs. Un autre type de protection passive contre l'incendie comprend des produits isolants inertes qui démontrent une réponse stable à l'exposition au feu et qui ont invariablement un degré élevé d'inertie thermique. Ces matériaux thermiquement « épais» sont souvent utilisés pour fournir une couche supplémentaire de protection thermique aux éléments de construction de bâtiments qui, autrement, présenteraient une quantité inacceptable de transfert de chaleur à travers l'élément.

2.1. Les outils de protection passive

Dans le domaine de la protection passive contre l'incendie, plusieurs solutions se présentent pour la sauvegarde des biens culturels. Les outils choisis doivent être adaptés dans ce cas aux typologies de biens patrimoniaux considérés, ainsi que de leur environnement et de leur accessibilité. Toutes ses solutions peuvent jouer un rôle primordial dans la sauvegarde des collections sur une durée limitée (moins d'une heure généralement), en attendant l'intervention des services de sécurité.

La protection passive est ici une protection temporaire et son efficacité s'exprimera dans les premiers instants de développement de l'incendie soit directement dans la zone où se localisent les collections soit en zone adjacente d'un local déjà en feu impliquant la survenue de gaz chauds à proximité des biens ne dépassant pas 200°C.

Il est à noter que ces outils ne sont donc pas considérés ni comme des écrans coupe-feu, ni comme des boucliers thermiques agissant contre un feu pleinement développé dans le local.

La protection peut être mise en place au cours d'une évacuation de certaines collections amovibles mais également pour les collections inamovibles ou monumentales afin d'assurer sur un court laps de temps une sauvegarde temporaire avant l'arrivée des pompiers et le déclenchement des systèmes d'extinction automatiques et/ou manuels.

Les différentes typologies de produits de protection passive sont exposées ci-après.

2.1.1.Produits souples

Les produits souples sont des outils de protection qui présentent plusieurs avantages comptent tenu de leur maniabilité, et de leur légèreté. Leur souplesse permet de s'adapter à une très grande variabilité de configurations en offrant une enveloppe unique à l'œuvre patrimoniale. Ces produits doivent être confectionnés sur mesure afin d'assurer une protection la plus efficace possible et sont associés à des accessoires pour leur mise en place et leur fixation.

2.1.1.1. *Description*

- Compositions et caractéristiques

Les produits de protections souples sont majoritairement composés d'une base en fibre de verre fibre ayant subi un procédé enduction (traitement de surface) avec divers polymères tels que par exemple des élastomères de polyuréthane ou des silicones conférant des propriétés surfaciques intéressantes, comme par exemple résistance mécanique, résistance à la salissure ou une imperméabilité.

Les épaisseurs peuvent être variables de quelques micromètres mais souvent inférieures à 1mm. La gamme de masses surfaciques s'étend d'une centaine de grammes par mètre carré à plus de mille grammes par mètre carré.

- Confection

Ce type de produits peut être façonné sur mesure compte tenu de sa souplesse. Les dimensions très grandes sont accessibles par assemblage de plusieurs lés soit par couture (par exemple via des fils en Kevlar ou autres) soit via des bandes adhésives ou techniques de soudage). La dénomination des configurations peut être diverse :

- couvertures
- toiles à tendre
- housses
- bâches

Le produit doit pouvoir comporter des éléments de fixations pour recouvrir convenablement l'œuvre en fonction de sa géométrie. Plusieurs méthodes existent :

- velcros fixés préalablement sur le produit
- existence d'œillets métalliques pour permettre la mise en place de sangles assurant un bon recouvrement
- poignées de positionnement dans le cas d'une configuration housse
- crochets métalliques pour suspendre sur une structure préexistante
- prolongement de la housse par des rabats (pour pose au sol ou enveloppement au niveau des angles).

2.1.1.2. *Application & stockage*

- Mise en place

Le positionnement de protection souple sur l'œuvre nécessite une préparation préalable en fonction des points suivants :

- ✓ Nombre de personnes pour la manipulation, notamment déploiement de la bâche, housse ou couverture
- ✓ Equipement associé pour la pose en fonction de l'accessibilité de l'œuvre et de ses dimensions (perches, échelles, cadres modulables, accroches supplémentaires murales, etc…)

Figure 2 : exemples de mise en place de bâches avec accessoires ***[R3]***

Figure 3 ***:*** *Exemple de pose de housses sur des œuvres monumentales* ***[R5]***

Dans le cas du stockage, les points suivants sont à surveiller :

- Produits positionnés à proximité de l'œuvre à protéger, soit dans une housse spécialement confectionnée, soit dans un coffre ou armoire à proximité,
- Durée de validité à surveiller avec le fabricant : à l'heure actuelle pas de donnée sur la durée maximale de stockage de la protection en fonction des conditions environnementales.

2.1.1.3. *Avantages & limites*

Le tableau suivant rassemble les avantages et limites d'utilisation des protections souples en fonction de l'environnement considéré.

Tableau 1 : Avantages et limites dans l'utilisation des outils de protection souples (CSTB)

Désignations	Environnement sans système d'extinction automatique	Environnement avec système d'extinction automatique	Manipulation
Composition			
Peu combustible M1-avec face aluminisée			
Peu combustible M1-sans face aluminisée			
Incombustible (M0) -avec face aluminisée			
Incombustible (M0) -sans face aluminisée			
Masse surfacique			
< 200 g/m²			installation facile
200 à 500 g/m²			installation contraignante
> 500 g/m²			
Fermeture			
Non enveloppant			installation rapide
Enveloppant			installation à durée variable en fonction de la configuration de l'œuvre
Fermeture thermofusible/combustible			
fermeture non combustible			
Propriétés			
barrière thermique temporaire	important	partielle	
peu émissive (COV, COSV)	de préférence à important en fonction de l'œuvre		de préférence
imperméabilité à l'eau/vapeur d'eau	non nécessaire	important	
résistance mécanique		important	important
résistance à l'usure			importatnt

risque colatéral faible sur l'oeuvre
risque colatéral modéré sur l'oeuvre
risque colatéral élevé sur l'oeuvre

Ce constat montre qu'il est important de connaitre les caractéristiques des produits de protection pour une aide au choix en fonction de l'environnement muséal et des œuvres patrimoniales existantes.
Une fiche synthétique avec des citations de produits du commerce, des caractéristiques sommaires et des contacts est présentée en Annexe 1.

2.1.2. Autres outils de protection passive

2.1.2.1. *Produits semi-rigides & rigides*

Les outils de protection semi-rigides concernés ici sont principalement les rideaux coupe-feu ou rideaux pare-flamme. Ces systèmes constituent une protection passive isolant un compartiment d'un autre, en empêchant le passage des flammes, des fumées pour les rideaux pare-flammes, auxquelles est ajoutée l'isolation à la chaleur pour les rideaux coupe-feu.

Une fiche synthétique avec des citations de produits du commerce, des caractéristiques sommaires et des contacts est présentée en Annexe 2.

2.1.2.2. *Produits à base de verre*

La vitrine d'exposition du musée doit remplir simultanément deux fonctions différentes : conserver et protéger les objets qu'elle expose tout en respectant l'aspect esthétique mis en avant afin que le visiteur puisse en profiter.

Cette panoplie d'outils peut être également efficace pour la protection de l'œuvre patrimoniale vis-à-vis des effets générés par l'incendie.

- Cas des verres spéciaux résistants au feu ***[R8][R9], [R10]***

Deux catégories principales de verre résistant au feu existent : les verres monolithiques et les verres composites/feuilletés.

Le verre monolithique sodo-calcique qui a été modifié pour satisfaire les critères d'intégrité, en incorporant des fils d'acier intégrés, en réduisant le coefficient de dilatation thermique en ajoutant du borosilicate au verre ou en augmentant la conductivité thermique.

Les verres composites constitués de verre monolithique en combinaison avec des matériaux intercalaires intumescents. Les couches intermédiaires assurent l'intégrité et deviennent également opaques lorsqu'elles sont exposées à la chaleur, réduisant ainsi la transmission du rayonnement à travers le verre et offrant un certain degré d'isolation.

Les verres coupe-feu et pare-flamme existent :

- en verres trempés simples -
- en verres trempés à couche -
- en verres feuilletés.

Le film sert alors de barrière intumescente. En condition normale, le film est transparent à la lumière. En cas d'incendie, le film gonfle sous l'effet de la chaleur et se transforme en une mousse isolante opaque qui absorbe quasiment intégralement la fumée, les flammes et les gaz chauds toxiques, pour des durées de 30 à 60mn. La transmission de la chaleur, elle, est limitée par rayonnement et par conduction (plus le nombre de films augmente, plus la durée de résistance au feu du vitrage augmente).

Son usage est préconisé principalement pour l'intérieur et assure une protection de part et d'autre de la paroi vitrée.

L'installation de vitrages résistants au feu est coûteuse (plus de 800€ /m²) et nécessite des entrepreneurs spécialisés. Le vitrage ne peut pas être installé seul ; il doit être spécifié comme un système complet, c'est-à-dire cadres et matériau de scellement, car il doit être assuré que le système de vitrage et d'encadrement est compatible et que le système d'encadrement lui-même possède des capacités de résistance au feu suffisantes. Cela coûte donc cher, mais c'est souvent le seul moyen d'assurer une séparation coupe-feu tout en préservant l'accès visuel et l'esthétique, ce qui peut être particulièrement important dans les bâtiments patrimoniaux. ***[R6]***

- Cas des verres employés au niveau des vitrines de musée

Dans ce cas, les vitrines sont évaluées selon la norme XP X80-002 ***[R7]***. Cette norme définit les caractéristiques des vitrines permettant de garantir une bonne préservation des fonds patrimoniaux. Les vitrines se doivent d'être un espace sécurisé et offrir un espace clos limitant les échanges d'air et de composants avec l'espace extérieur. En cas de nécessité la vitrine est équipée d'un système de contrôle et de régulation hygrométrique. Les éclairages utilisés doivent être exempts d'UV.

Il existe différentes natures de verre :

- Le verre feuilleté est un assemblage de plusieurs feuilles de verre et un ou plusieurs films de Butyral de polyvinyle (PVB) d'une épaisseur de 0,38 mm. Un verre 44.2 est l'assemblage de deux verres de 4 mm et de 2 films PVB. Ce type de verre présente de nombreux avantages en termes de conservation. Or, les films intermédiaires garantissent une protection aux rayons UV. En cas de casse les films ne permettront pas au débris de se détacher ce qui protégera davantage vos objets de valeurs en vitrine.
- Le verre float (ou verre plat) flotte sur l'étain et on obtient ainsi une surface égale et parfaitement lisse. La vitesse de refroidissement détermine l'épaisseur du verre et libère des surfaces polies.
- Le verre ultra-clair : en abaissant la quantité de fer, le verre ainsi transformé devient totalement transparent pour une visibilité sans déformation de couleur des collections exposées.
- Le verre anti-reflet : grâce à un traitement de surface totalement invisible pour conserver la qualité du verre ultra-clair vos œuvres sont vues sans aucun reflet. Le verre se fait totalement oublier pour un effet vu à l'œil nu.

Toutes ces vitrines peuvent potentiellement présenter un intérêt car elles constituent une barrière physique face aux aérosols émis lors de l'incendie, mais également à l'eau utilisée lors de la phase d'extinction.[***R12***]

Figure 4 : Médiathèque Amalric

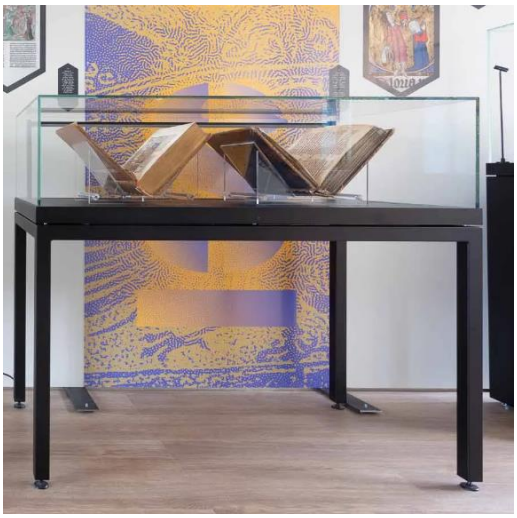


Figure 5 : Le Laboratoire Culturel de Cambrai (©Maxime Decarsin)

Figure 6 : Exposition Fukami

- Limites et précaution

  - Il est important de caractériser les joints constituants la vitrine car ces derniers peuvent émettre dans le cas d'un scénario incendie des COV potentiellement agressifs pour les collections localisées dans cette vitrine.

  - Il est important de caractériser l'étanchéité des vitrines vis-à-vis des aérosols et notamment des suies à des températures environnantes croissantes suivant la phase de démarrage d'un incendie.

  - Il est important de caractériser l'impact du système de régulation de l'air lors d'un scénario incendie et ainsi que de l'ambiance de confinement intérieur de la vitrine pendant la phase d'échauffement des parois dans le cas de verres non résistants au feu.

  - Il est important de caractériser l'impact de l'association d'outils de protection passive, tels que les housses enveloppant les vitrines à verre non résistant au feu.

2.1.2.3. *Produits de stockage*

Les produits de stockage les plus conventionnels rencontrés dans les réserves de musée sont :

- boîtes en carton longue conservation
- boîtes en carton conservation temporaire
- boîtes hermétiques en polypropylène
- caisses en bois

Figure 7 : Quelques boîtes de conservation rencontrées dans les réserves ***[R13], [R14], [R15]***

Ces produits peuvent présenter une action temporaire protectrice vis-à-vis de certains effets de l'incendie telles que les poussières, la suie ou bien l'eau/vapeur d'eau générée par les extinctions automatiques ou manuelles.

Toutefois ces produits composés de matériaux combustibles ne peuvent pas constituer une barrière temporaire face à l'élévation de températures liée au développement du feu.

Face au rayonnement thermique et au gaz chaud existant durant la phase d'incendie, seuls les armoires ou caissons résistants au feu durant une durée déterminée sont efficaces. Ce type de produit se trouve généralement en milieu industriel pour le stockage et la sécurisation de produits solides, liquides ou gazeux classés dangereux et inflammables.

Il existe une large gamme d'armoires coupe-feu pour produits inflammables avec une résistance de 15 à 90 minutes selon la courbe normalisée ISO 834. ***[R16]***

Figure 8 : Illustration armoires et caissons résistants au feu

Le tableau suivant propose une première approche de classement des produits de stockage en fonction des configurations environnantes dans un scénario d'incendie :

Tableau 2 : Exemple de classement possible des produits de stockage vis-à-vis de leur protection temporaire face à l'incendie (CSTB)

Types de produits	Local avec extinction automatique	Local sans extinction automatique	
		Evacuation difficile	Evacuation facile
Boîtes en carton conservation temporaire			
Boîtes en carton conservation permanente			
Boîtes en polypropylène			
Caisses en bois			
Caisson /armoire résistant au feu			

	A proscrire
	A utiliser avec précautions
	A préconiser

Cette proposition de classement se base à la fois sur la réaction au feu des matériaux composant les produits de stockage (inflammable, thermofusible, résistant au feu …) mais également sur leur tenue vis-à-vis de l'eau (barrière temporaire à l'eau ou non, résistance mécanique, …).

2.1.2.4. *Produits pour le transport*

Les produits de protection des œuvres pour le transport peuvent être de simples boîtes de conservation standards ou bien des réalisations sur mesure en fonction des dimensions de l'œuvre et de son estimation. Ces emballages spéciaux ont avant tout un rôle de calage et réduction des chocs et contraintes mécaniques. Peu de produits de protection sont dimensionnés pour protéger d'un risque d'incendie pendant le transport. Dans le cas de boîte standard de transport, il s'agit souvent d'une caisse en carton constituée d'une ou plusieurs feuilles de papier cannelé, collées sur une ou plusieurs feuilles de papier kraft. Le carton ondulé est constitué de l'assemblage par encollage de papiers maintenus par des papiers de cannelure de forme ondulée dont l'épaisseur varie de plusieurs millimètres.

Les couvertures kraft participent à la résistance mécanique et climatique de l'emballage. Les cannelures assurent la rigidité de l'emballage mais aussi une élasticité maximale puisqu'elles servent d'amortisseurs en cas de chocs.

Figure 9 : Photos illustrant des caisses en bois d'emballage d'œuvres patrimoniales

Pour un transport, un emballage complet comprend trois épaisseurs que ce soit une simple caisse ou un tamponnage :

- La première épaisseur est au contact de l'œuvre. Elle la protège donc de la poussière, des éraflures ou des traces de doigts à la surface.
- La seconde est comme un coussin intermédiaire qui réduit les vibrations, amortit les chocs et atténue les variations de températures
- La troisième est une sorte de coquille rigide qui est utilisée pour résister aux chocs et faciliter les manipulations des manutentionnaires.

Deux sortes de caisses et de contre caisses existent : il y a le modèle vertical ou celui de forme rectangulaire horizontale. Les contre caisses protègent directement l'œuvre et la caisse englobent la contre caisse. Cela permet d'assurer une protection supplémentaire en cas de choc durant le transport en camion. La contre caisse épouse l'œuvre pour la maintenir immobile, de même qu'un tapis en mousse permettant d'isoler les parois extérieures.

La préparation et l'emballage sont importants pour assurer une bonne protection de l'œuvre pendant le transport. Le choix du conditionnement va dépendre ensuite de plusieurs critères. Le risque incendie dans le cas du transport n'est pas visé spécifiquement car plusieurs autres paramètres sont à prendre en compte.***[R17]***

2.2. Les outils de protection active

Les systèmes actifs sont ceux qui « réagissent » à un incendie ou aux produits de combustion d'un incendie, et fournissent une réponse définie et prédéterminée. Les systèmes de protection active contre l'incendie ont tendance à se répartir en deux catégories distinctes ; systèmes destinés à avertir d'un incendie et systèmes destinés à contrôler et/ou éteindre un incendie ou les produits de combustion associés.

Ces systèmes actifs comprennent :

- systèmes de gicleurs automatiques d'eau ;
- systèmes d'extinction automatique à gaz ;
- systèmes de désenfumage ;

- systèmes automatiques de détection et d'alarme incendie, etc.

2.2.1.Sprinklage

Les systèmes de gicleurs d'eau automatiques/sprinklage ont été le premier système de protection incendie actif, introduit pour la première fois il y a environ 200 ans. Les systèmes de gicleurs se sont depuis développés pour fournir une protection contre les incendies fiable, efficace et économique aux bâtiments, assurant l'extinction des incendies dans les premiers stades de développement du feu. Dans un contexte patrimonial, les systèmes de gicleurs peuvent être très avantageux à la fois pour la protection des biens et du tissu du bâtiment (cela peut être encore plus important dans les bâtiments éloignés où les temps de présence des services d'incendie peuvent être excessifs) et pour la sécurité des personnes.

Une protection par sprinklage implique un système fixe d'extinction automatique à eau. L'installation est un ensemble hydraulique constitué par un poste de contrôle et un réseau de canalisations en acier, maintenu sous pression permanente d'eau (ou d'air, dans les conditions de risque de gel).
Les canalisations sont équipées de têtes sprinklers, situées à proximité des plafonds des bâtiments protégés et disposées de façon à s'ouvrir sous l'action de la chaleur de l'incendie. Le principe du système consiste à déverser une quantité d'eau sur une zone d'une surface prédéterminée, adaptée au risque de sinistre.
L'ouverture d'une tête sprinkler est due à l'élévation de la température. La chaleur dégagée par le feu s'élève jusqu'au plafond. À une certaine température, l'ampoule (ou fusible) qui maintient la tête sprinkler fermée, éclate et libère l'eau à l'aplomb du foyer. [***R18***]

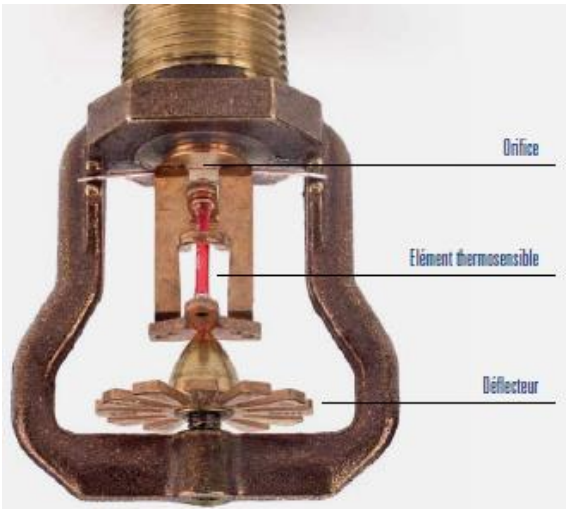


Figure 10 : Détail tête sprinkler

L'arrosage est également progressif. Si le refroidissement est insuffisant, les sprinklers voisins s'ouvrent également et participent à la maîtrise du feu. L'aspersion est donc limitée à la zone de départ de feu et son environnement le plus proche pour les systèmes sprinkler usuels. La chute de pression provoquée par l'ouverture du premier sprinkler entraîne le démarrage des pompes.

Le passage de l'eau actionne un gong hydraulique et un contact électrique de report qui donnent l'alarme. L'arrosage est maintenu pour contenir le feu jusqu'à l'intervention des secours et la fermeture manuelle des vannes *[R19]*

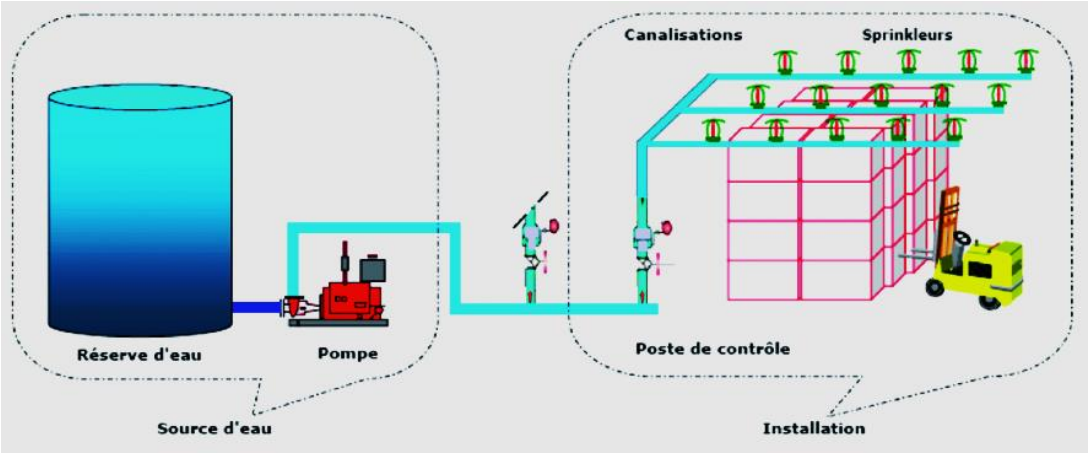


Figure 11 : mode de fonctionnement d'un système fixe d'extinction automatique à eau type sprinklage[R19]

Depuis le 1er juillet 2017, le règlement de sécurité autorise désormais tout système d'extinction automatique à eau, tant qu'il est adapté aux risques, dans les ERP de type M (magasins de vente et centres commerciaux).

Par ailleurs, les sprinklers restent obligatoires dans certains lieux à risque accueillant du public, comme,

- Les salles d'expositions et de spectacles (sur demande de la commission de sécurité),
- les parcs de stationnement couverts à partir du 3e niveau ou au-dessus du niveau d'accès (sauf lorsqu'ils sont largement ventilés).

Certains musées dans le monde sont équipés d'un réseau de sprinklage, comme indiqué ci-dessous.

TABLE 2 – CULTURAL HERITAGE SITES PROTECTED BY SPRINKLER SYSTEMS	
CULTURAL HERITAGE SITE	**LOCATION**
Abby Aldrich Rockefeller Folk Art Museum	Colonial Williamsburg, VA, USA
Bodleian Library – Storage Facility	Swindon, UK
DeWitt Wallace Decorative Arts Museum	Colonial Williamsburg, VA, USA
Getty Villa	Los Angeles, CA, USA
Huntington Library	San Marino, CA, USA
Los Angeles County Museum of Art	Los Angeles, CA, USA
Louvre-Lens	Lens, France
Museo del Oro (Gold Museum)	Bogotá, Colombia
National Gallery of Ireland	Dublin, Ireland
National Gallery (retrofit in some areas)	Washington D.C., USA
National Library of Congress	Washington D.C., USA
National Library of Scotland	Edinburgh, Scotland
National Portrait Gallery	London, UK
San Francisco Museum of Modern Art	San Francisco, CA, USA
Smithsonian Institution	Washington D.C., USA
The British Library	London, UK

Figure 12 : Quelques musées équipés par un système de sprinklage ***[R18]***

Cas particulier du sprinklage résidentiel

Le sprinklage résidentiel est très développé au Canada et aux États-Unis. Selon la NFPA (National Fire Protection Association) [***R20***], une réduction de 82 % de la mortalité dans les bâtiments qui en sont équipés y est constatée. Plusieurs avantages sont soulignés :

- Les systèmes peuvent être adaptés pour répondre aux besoins et aux exigences spécifiques de l'environnement. Cela signifie que la conception peut être personnalisée en fonction de facteurs tels que la taille du local, la disposition des pièces et le type de matériaux de construction utilisés.
- Les coûts d'installation et de maintenance sont réduits : les systèmes sont généralement plus faciles à installer et à entretenir que les grands systèmes de sprinklage commerciaux ou industriels.
- La consommation d'eau est réduite : les systèmes résidentiels sont conçus pour utiliser moins d'eau. Cela signifie qu'il y a moins de risques de dégâts d'eau sur la propriété et que le système est plus respectueux de l'environnement.

Son périmètre d'application n'est pas réservé aux seules habitations. Il peut être installé dans les ERP (Établissements recevant du public) de type J (maison de retraite) ou O (hôtels). Son dimensionnement est plus léger qu'un système sprinklage classique. En effet, il peut être adapté pour être directement branché sur le réseau d'eau de ville du bâtiment. ***[R21]***

2.2.2.Brouillard d'eau

Le brouillard d'eau correspond à l'utilisation d'eau sous forme finement divisée en gouttelette. L'agent extincteur n'est pas l'eau à proprement parlé, mais bien le brouillard qui suivant son mode de génération, sa

finesse et son énergie cinétique est doté de propriétés différentes. Le brouillard d'eau n'est pas stocké, mais produit « in situ » au niveau de la buse. Le procédé brouillard d'eau connait un fort développement dans les milieux des établissements recevant du public, des bâtiments tertiaires et industriels.

Le système est constitué d'une alimentation en eau, d'un système de mise sous pression et d'un réseau de buses de diffusion.

Les buses de diffusion peuvent être fermées (ampoule/fusible) ou ouvertes (type déluge, pilotées en manuel ou en automatique).

Il existe plusieurs types de systèmes pour produire du brouillard d'eau : le système à extinction automatique, le système à pompe et le système à réservoir pressurisé.

Les dispositifs Brouillard d'eau sont envisageables en Protection d'Ambiance (volume) ou en Protection d'objet. ***[R22]***

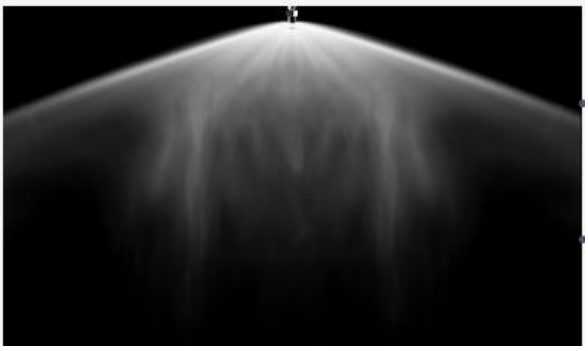


Figure 13 : Illustration brouillard d'eau basse pression (Photo 2AI)

- Avantages
  - Pas de toxicité pour les personnes directement liée au procédé utilisant de l'eau
  - Pas de contrainte d'étanchéité particulière
  - Moins contraignant pour les secours
  - Autonomie illimitée dans le cadre d'un branchement sur un réseau d'eau
  - Peu dépendant de la mise en configuration incendie du local
  - Possibilité de plusieurs déclenchements
  - Faible consommation d'eau
  - Pas d'effet mécanique dû au jet.

- Inconvénients
  - Extinction non garantie pour certaines applications et configurations
  - Sensible aux zones d'ombre (espace caché)
  - Rétention et récupération de l'eau à prévoir
  - Arrêt énergie électrique conseillée

- Incompatibilité avec certains combustibles

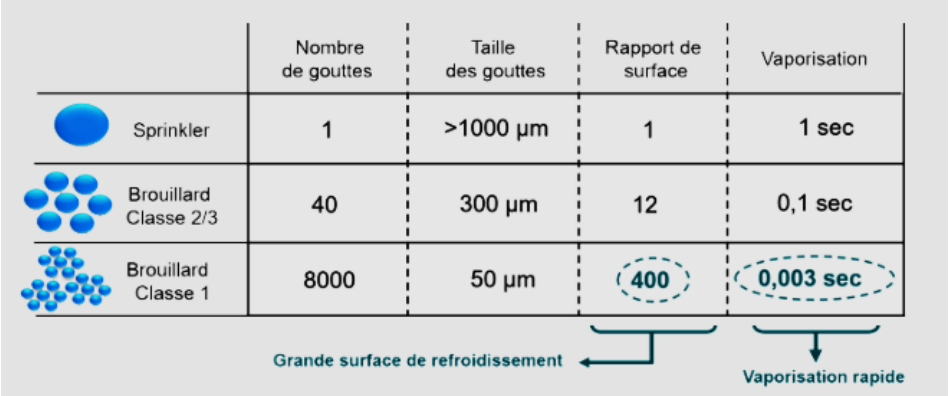


Figure 14 : Comparaison gouttelettes d'eau sprinkler et brouillard d'eau ***[R23]***

2.2.3.Extincteurs manuels

La plupart des législations nationales exigent généralement que des extincteurs soient disponibles dans les établissements recevant du public pour les premiers secours en cas d'incendie par des personnes dûment formées. Le type d'extincteur dépend de la nature des matériaux présents ***[R24]***.

Plusieurs types d'extincteurs sont classés en fonction de la nature des feux à combattre.

- Extincteurs portatifs à eau et additif : Très efficace sur les feux avec braises (incandescence)
- Extincteurs portatifs à poudre : La poudre ABC agit par isolement sur les feux de solides en créant une "croute" sur les braises.
- Extincteurs portatifs à CO2 : Ils sont utilisés sur les feux de liquides inflammables et matériels sensibles.
- Extincteurs portatifs pour risques spéciaux : pour les Feux de métaux, huile.
- Des tests et un entretien réguliers sont nécessaires pour maintenir les extincteurs en parfait état de fonctionnement.

Ce matériel d'extinction peut être adapté à l'environnement muséal à condition de s'assurer de la compatibilité de l'agent d'extinction avec les œuvres à protéger (réactions chimiques, gonflements, moisissures, délavage ou lixiviation des peintures ou des dessins, abrasion ou chute par effet de jet).
La mise à disposition d'équipements de lutte contre l'incendie de premiers secours peut avoir un impact visuel dans une pièce car ils sont conçus pour être facilement identifiables.

Les tableaux suivants reportent les avantages et inconvénients de certains systèmes de gicleurs automatiques et de systèmes d'extinction d'incendie vis-à-vis des œuvres patrimoniales.

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des systèmes d'extinction automatique

Système	Description	Avantages	Inconvénients
Système de sprinkler sous pression	-Les tuyaux d'arrosage sont constamment remplis d'eau -Installé dans des structures climatisées ou dans des climats supérieurs à 5°C. -Généralement utilisé dans des environnements qui ne sont pas sensibles au gel	− Extrêmement fiable − Réponse plus rapide que les systèmes sous air − Tuyaux moins sensibles à la corrosion que dans les systèmes sous air − Relativement facile et économique à installer et à entretenir	− Ne pas utiliser dans des environnements susceptibles de geler - Une décharge accidentelle peut entraîner des dégâts d'eau et de moisissures -Les objets qui ne sont pas stockés dans des armoires fermées sont susceptibles d'être endommagés par l'eau
Système de sprinkler avec tuyau sec	-Les tuyaux sont remplis d'air sous pression ou de l'azote plutôt que de l'eau. -Utilisé dans des climats inférieurs à 5 °C et dans des environnements non climatisés et structures non chauffées -Lorsque la tête d'arrosage est activée, l'air comprimé est libéré et l'eau peut s'écouler dans les tuyaux -Les systèmes à préaction sont un type de système de tuyauterie à têtes fermées sans eau dans la tuyauterie ; le système de détection du feu ouvre une vanne qui charge les tuyaux avec de l'eau	-Peut être utilisé dans des environnements sensibles au gel, généralement dans les climats nordiques − Fuite d'eau minimale et déversement accidentel d'eau − Moins susceptible de causer des dégâts d'eau et de moisissure aux collections	-Délai de réponse initiale (le code autorise jusqu'à 60 secondes) -Nécessite plus d'entretien qu'un système de canalisations humides -Tuyaux sensibles à la corrosion si pas constamment remplis d'air comprimé ou d'azote -Nécessite une alimentation fiable pour maintenir la pression en ligne -Après le fonctionnement, les tuyaux peuvent se corroder s'ils ne sont pas complètement égouttés et séchés. -Les objets qui ne sont pas stockés dans des armoires fermées sont susceptibles de dégâts d'eau.
Système de suppression gazeux (agent propre)	Décharge un gaz extincteur au lieu de l'eau pour une inondation totale de la structure Doit être conforme à la norme NFPA 2001 : Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems	− Peut être utilisé dans les chambres froides et autres zones soumises à des températures inférieures à 5°C et dans les zones sensibles − Élimine la possibilité de dégâts d'eau sur les collections à cause de l'extinction des incendies	−S'il n'est pas correctement entretenu et pressurisé, le système ne se déchargera pas -Le gaz nécessite des compartiments hermétiquement fermés pour un fonctionnement efficace. -Les niveaux d'agent de suppression doivent être maintenus pendant plusieurs minutes après la décharge pour éviter le rallumage. -Les objets qui ne sont pas stockés dans des armoires fermées peuvent subir des dommages physiques dus à la pression du gaz et à d'éventuelles altérations chimiques.
Système de brouillard d'eau à haute pression	Un système à haute pression et à basse eau qui expulse des particules d'eau extrêmement petites	− Réduit les risques de dégâts d'eau sur les collections et le tissu historique − Utilise moins d'eau qu'un système de tuyauterie humide ou sèche typique − Peut être utilisé pour protéger les structures manquant d'eau et d'un service public fiable − Peut être entretenu avec un réservoir de stockage d'eau ou une citerne	−Le coût est plus élevé que les systèmes de canalisations humides ou sèches -Nécessite une expertise spécialisée en conception et en installation -Nécessite une expertise spécialisée en inspection, test et maintenance.

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des extincteurs portatifs

Système	Description	Avantages	Inconvénients
ABC	-Extincteur à poudre polyvalente -L'agent extincteur est une poudre fine -Utilisé sur les feux de classe† A, B et C	-Facile à utiliser -Plus efficace pour prévenir les dommages causés par la suie que les autres extincteurs portatifs.	-Peut causer des dommages chimiques aux métaux et aux objets composites. -Les dépôts de poudre peuvent causer des dommages permanents s'ils ne sont pas nettoyés immédiatement. -Le spray couvre une zone plus large que les autres extincteurs. -L'agent extincteur chimique peut irriter la peau et les yeux ou poser des problèmes respiratoires.
CO2	-Utilise du gaz CO2 sous pression pour déplacer l'oxygène d'un incendie -Utilisé sur les feux de classe B et C -Largement utilisé dans les salles électriques et les salles informatiques	-Facile à utiliser -Ne laisse pas de résidu	-Ne peut pas être utilisé sur les incendies de classe A, donc a une applicabilité limitée au musée. -Peut poser des problèmes de santé s'il est utilisé dans un espace confiné sans protection respiratoire.
Agent inerte	-Extincteur à liquide ou à gaz sous pression -Utilisé sur les feux de classe A, B et C	-Facile à utiliser -Pulvérisation plus contenue que les extincteur de type ABC	-Peut causer des dommages physiques/basculement importants aux objets autoportants -Peut entraîner de la suie dans des objets organiques. -Peut faire gonfler les adhésifs et faire couler l'encre – Peut poser un problème de santé s'il est utilisé dans un très petit espace confiné.
Eau	-Utilise un jet d'eau (du robinet, désionisée ou distillée) pour éteindre le feu -Utilisé sur les feux de classe A	-Facile à utiliser -Ne cause pas de dommages chimiques aux objets -Les extincteurs utilisant de l'eau distillée ou désionisée aident à récupérer les collections mouillées lors d'un incendie.	-Peut causer des dommages physiques/basculement importants aux objets autoportants -Peut causer des dégâts d'eau aux collections autoportantes et aux structures abritant des collections -Peut entraîner de la suie dans les objets organiques - Peut faire gonfler les adhésifs et faire saigner l'encre -Ne peut pas être utilisé sur les feux de classe B et C
Brouillard d'eau	-Utilise un fin brouillard d'eau (déionisée ou distillée) pour éteindre le feu -Sous pression à l'azote Utilisé sur les feux de classe A et C -Largement utilisé dans les expositions de musée et les zones de stockage et les archives	-Facile à utiliser -Ne cause pas de dommages chimiques aux objets -Risque le plus faible de dommages physiques/de renversement aux objets autoportants -Les extincteurs utilisant de l'eau distillée ou déionisée aident à récupérer les collections mouillées lors d'un incendie Pulvérisation plus contenue que les extincteurs de type ABC.	-Peut causer des dégâts d'eau aux collections autoportantes et aux structures abritant des collections. -Peut entraîner de la suie dans les objets organiques -Peut faire gonfler les adhésifs et faire saigner l'encre. -Plus lourd que les extincteurs chimiques -Ne peut pas être utilisé sur les feux de classe B

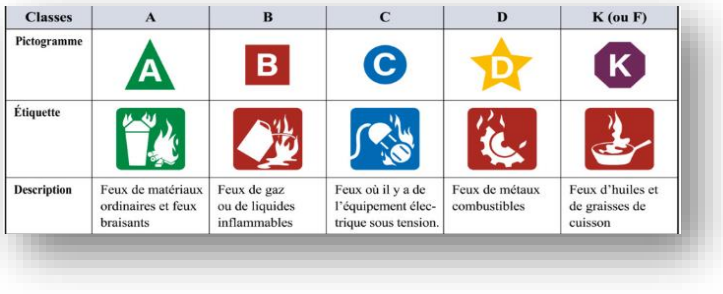


Figure 15 : Classes de feu

2.2.4.Hypoxie / anoxie

Les systèmes d'extinction de gaz sont conçus pour éteindre les incendies à leur stade le plus précoce et ne causent aucun dommage collatéral au contenu de la pièce ou à la structure du bâtiment. Les systèmes à gaz sont plus adaptés à une utilisation dans des espaces relativement petits en raison du volume de gaz nécessaire, et la zone à protéger doit être relativement étanche. Dans un contexte patrimonial, un système gazeux peut être approprié pour une voûte ou une zone de stockage similaire, en particulier lorsque le matériel stocké peut être vulnérable aux dégâts des eaux. Divers systèmes gazeux ont été développés, chacun employant différents gaz et principes d'extinction.***[R25].***

Lors de la sélection d'un système de suppression de gaz, il convient de noter certains points généraux :

- Un degré élevé d'intégrité est nécessaire dans l'enceinte pour s'assurer que la concentration requise d'agent peut être établie et maintenue pendant la période requise, généralement 10 minutes. Cela peut signifier des quantités importantes de travail pour améliorer l'intégrité du compartiment, en particulier dans les bâtiments patrimoniaux généralement « fuyants». Dans le cas des systèmes au CO2, la fuite pourrait constituer un risque considérable pour les occupants des compartiments adjacents.
- Un système d'extraction adapté sera nécessaire pour évacuer les gaz de l'enceinte après décharge.
- Le stockage des bouteilles de gaz sera nécessaire. Les gaz inertes peuvent être stockés à une certaine distance de la zone à risque en raison des pressions élevées impliquées. Cependant, une grande zone de stockage est nécessaire, ce qui peut ne pas être pratique dans de nombreux bâtiments. Les systèmes de gaz halocarbure doivent être stockés relativement près de la proximité en raison des basses pressions impliquées. Cependant, ils nécessitent une fraction de l'espace de stockage nécessaire aux systèmes de gaz inerte.

<u>Exemple du coffre-fort du Bourget</u>

Le coffre-fort du Bourget dispose de réserves d'une surface disponible de 19 300 m² répartie sur quatre niveaux. Le lieu bénéficie de caractéristiques techniques particulières permettant de contrôler l’humidité et la température, hors poussière. Le risque incendie est maitrisé grâce à un système d'hypoxie, qui appauvrit l'air en oxygène à un taux de 17 % au lieu de 21 % » et permet d'éviter que les flammes « prennent » en privant l'air de sa composante oxygène.

Figure 16 : installation d'un système d'hypoxie

3. LA PROTECTION DES ŒUVRES PARTIMONIALES AU NIVEAU INTERNATIONAL

3.1. Généralité

Au niveau international, la protection des œuvres patrimoniales passe avant tout par la protection active des environnements. Ainsi, aux Etats-Unis, il est distingué essentiellement ***[R26]***

- ✓ Système à sprinklage
- ✓ Système à brouillard d'eau
- ✓ Systèmes à base de gaz pour les petits espaces contenant des éléments de grande valeur patrimoniale.

Il a été créé un guide de référence sur la gestion, la conservation, la documentation, l'accès et l'utilisation des collections des musées. Manuel à trois parties ***[R24]*** (Partie I _ Collections muséales décrit des procédures et des conseils pour la préservation, la protection et l'entretien de toutes les disciplines et matériaux représentés dans les collections du National Park Service : entreposage, normes environnementales, infestation biologique, protection contre les incendies (chap.9), planification et préparation aux situations d'urgence.

- Partie II _ Archives du musée décrit les procédures de tenue des archives du musée, y compris l'acquisition, le catalogage, les prêts, la cession, la photographie et la communication des données annuelles de gestion des collections.
- Part III _ Museum Collection fournit des conseils et aborde les questions d'accès et d'utilisation des collections des musées (questions juridiques, publications, reproductions en 2 et 3 dimensions ; autres utilisations des collections muséales ; utiliser les collections des musées dans les expositions ; et des structures historiques meublées ; et autres problèmes liés).

3.2. Exemples de protection et mesures de sécurité incendie

- Getty Museum *[R27]*

Mise en place d'un système de protection passive via une organisation architecturale adaptée permettant de lutter contre les incendies de forêt. La configuration extérieure du musée est façonnée pour limiter l'emprise du feu sur le bâtiment avec les caractéristiques suivantes :

- ✓ Le bâtiment en travertin, un type de roche calcaire et acier.
- ✓ Au total, 300 000 blocs de travertin composent l'extérieur du musée.
- ✓ Toit recouvert de pierres concassées pour une protection contre les braises.
- ✓ Système spécialement conçu peut inverser le flux d'air en cas d'infiltration de fumée dans le bâtiment.

Figure 17 : configuration extérieure du Getty Museum à Los Angeles

- Mesures de sécurité incendie, appliquées spécifiquement à la protection des peintures pendant le transport, l'exposition et le stockage.

Dans le cas de l'emballage pour le transport, un guide européen est édité par la Confédération européenne des associations de protection contre l'incendie [*R28*]

Les points de vigilances à adopter sont soulignés ci-dessous :

- Ignifugé : l'emballage doit conserver son intégrité structurelle lorsqu'il est soumis à des températures élevées pendant un certain temps.
- Isolation thermique : la température à l'intérieur de l'emballage ne doit pas dépasser une certaine valeur lorsqu'il est soumis à des températures élevées pendant une période de temps.
- Etanchéité à l'eau : en cas d'aspersion d'eau pendant un certain temps, l'humidité à l'intérieur de l'emballage ne doit pas varier.
- Stabilité climatique : l'intérieur de l'emballage ne doit subir aucune variation lorsqu'il est exposé aux conditions climatiques extérieures pendant une période de 12 heures.

- Sondage sur les protections des collections au Canada

L'Association canadienne pour la conservation et la restauration des biens culturels (ACCR) et l'Association canadienne des restaurateurs professionnels (ACRP) ont présenté un premier sondage national portant sur l'état actuel du soin et de la conservation des collections au sein des institutions du patrimoine au Canada. Les réponses furent récoltées par le biais d'un logiciel de sondage en ligne entre le 23 mai et le 31 juillet 2018 au niveau de plusieurs régions canadiennes

36 % des répondants n'ont aucun système d'extinction automatique des incendies dans au moins l'une des installations principales pour les collections ; 11 % n'ont aucun système de détection incendie (386 réponses) Les institutions font face à une vaste gamme de défis qui, dans plusieurs cas, mettent leurs collections à risque. Au sein des plus petites institutions (budget < 40 000 CAD), l'absence de système d'extinction automatique des incendies occupe le premier rang, tandis que pour les plus grosses institutions (budget > 1 million CAD), ce sont les unités de rangement et allées surencombrées dans les réserves. Les institutions en Atlantique sont plus nombreuses à ne pas disposer de système d'extinction automatique des incendies par rapport aux autres régions du pays. Les principaux problèmes identifiés par les institutions autochtones étaient le surencombrement des unités de rangement et des allées dans les réserves ainsi que le risque d'endommagement des objets en raison d'un mauvais conditionnement ; ***[R29]***

Figure 18 : Problèmes affectant toute installation principale où sont situées des collections (386 réponses)

Les principales recommandations au niveau de la protection des œuvres dans les musées est exposées dans la figure ci-après :

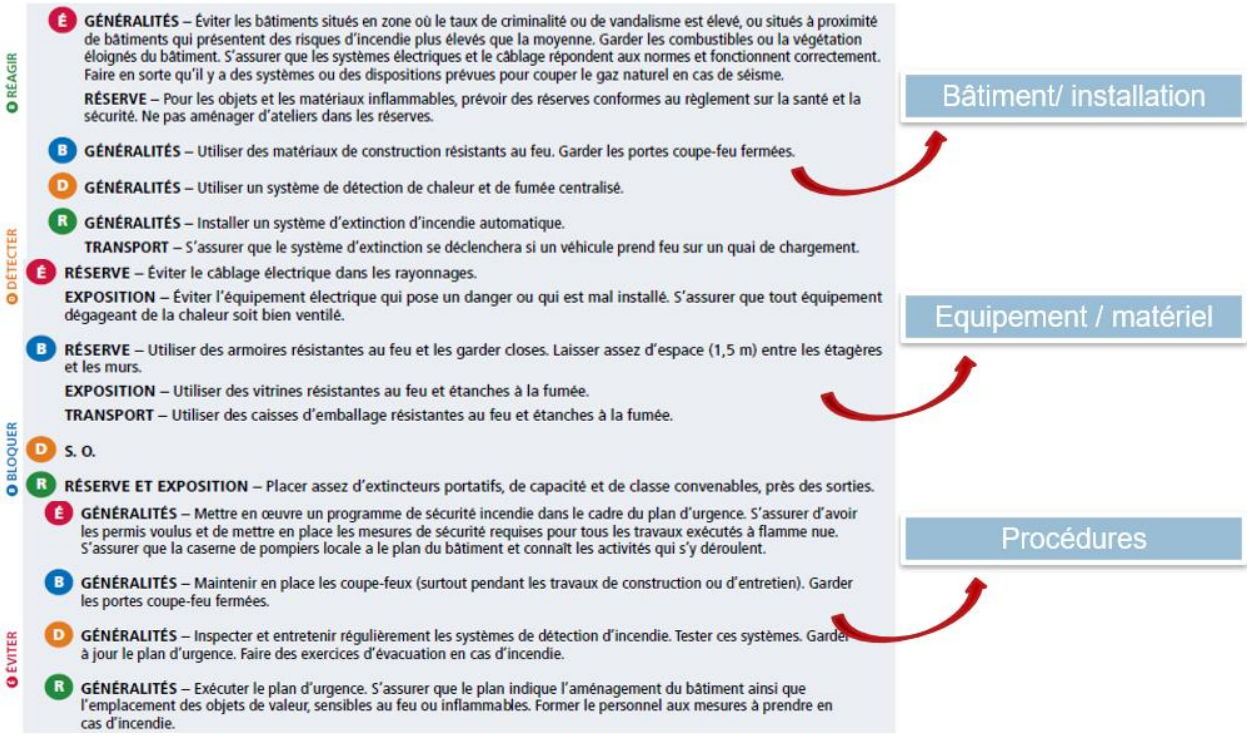


Figure 19 : Principales recommandations pour la protection des œuvres patrimoniales au Canada [R30]

- Editions au niveau international

- Fire safety and heritage places, New Zealand historic places Trust Pouhere Taonga, 25 June 2012.
- The use of intumescent paint to provide passive fire protection to heritage buildings, heritage Council of New South Wales, December 2012.
- Site de ressources https://www.wmf.org/fire

4. LES OUTILS DE PROTECTION AU REGARD DE LA VULNERABILITE DES ŒUVRES PATRIMONIALES

4.1. Les effets polluants dans un incendie

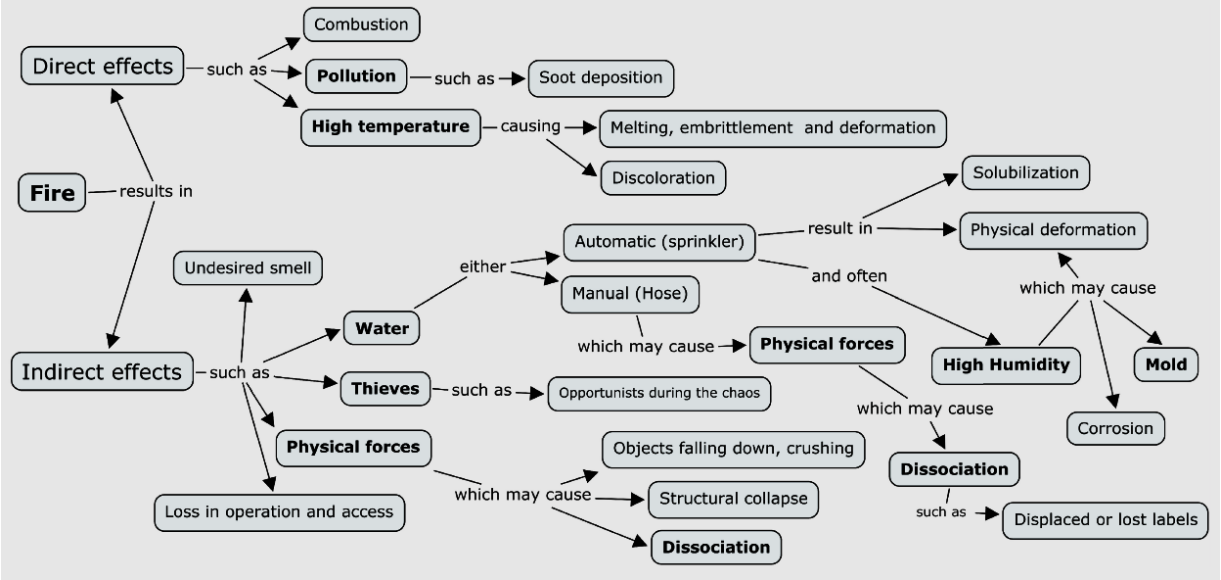


Figure 20 : Chaîne des causes et effets due à un incendie ***[R31]***

Les œuvres patrimoniales sont souvent considérées comme des biens précieux qui nécessitent une protection particulière en cas d'incendie. En effet, les matériaux utilisés dans la fabrication de ces objets sont souvent sensibles à la chaleur et aux produits de combustion. Les toiles peintes à l'huile, les sculptures en bois, les tapisseries et les livres anciens sont autant d'exemples d'œuvres vulnérables aux incendies. De plus, la plupart des œuvres sont conservées dans des espaces clos et souvent confinés, ce qui peut rendre difficile leur évacuation en cas d'urgence.

Plusieurs indicateurs existent notamment pour le patrimoine bâti, dont la Méthode d'Analyse pour la Sauvegarde des Œuvres, plus connue sous le sigle MASO. Cette méthode consiste en une analyse de risques destinée à prévenir et limiter les dommages occasionnés aux œuvres d'art lors d'un sinistre. Elle a été développée en France dans les années 1990 par le ministère de la Culture et de la Communication en collaboration avec des experts en conservation-restauration et des professionnels de la sécurité incendie.

La méthode MASO repose sur une approche multidisciplinaire et prend en compte l'ensemble des facteurs susceptibles de compromettre la sauvegarde des œuvres, notamment les risques d'incendie, d'inondation, de vol, de vandalisme… Elle vise à évaluer les risques encourus par les collections et à déterminer les mesures à mettre en place pour en assurer la sécurité.

La méthode MASO s'appuie sur une analyse précise des caractéristiques des œuvres, de leur environnement et des moyens de protection existants. Elle prévoit également des simulations de scénarios d'urgence pour évaluer les réactions à adopter en cas de sinistre. Enfin, elle recommande des solutions spécifiques pour

chaque œuvre en fonction de sa fragilité et de sa valeur patrimoniale. La méthode MASO constitue ainsi un outil précieux pour la préservation du patrimoine culturel et artistique (Figure 21).

➢ **IO = Classement de l'intérêt de l'œuvre à être sauvegardée = a x b**
a. Renommée de l'œuvre : internationale, nationale, locale
b. Intérêt artistique de l'œuvre : majeur, notable, mineur

➢ **NC = Niveau de Criticité = (A x a) + (B x b) + (C x c) + (D x d) + (E x e) + (F x f)**
Sensibilité de l'œuvre (importante, modérée, nulle)
a. à la fumée
b. à la chaleur
c. aux flammes
d. aux gaz de combustion
e. aux éclaboussures
f. à l'immersion

• Efficacité de la protection (100%, 50%, inefficace)
A. à la fumée
B. à la chaleur
C. aux flammes
D. aux gaz de combustion
E. aux éclaboussures
F. à l'immersion

Figure 21 : Méthode MASO ***[R32]***

Cette méthode permet également de recenser la liste des agressions sur les œuvres : fumée, chaleur, flammes, gaz de combustion, eaux éclaboussures, immersion.

La Figure 22 reprend les types d'agression liées à un incendie susceptibles de dégrader les biens culturels.

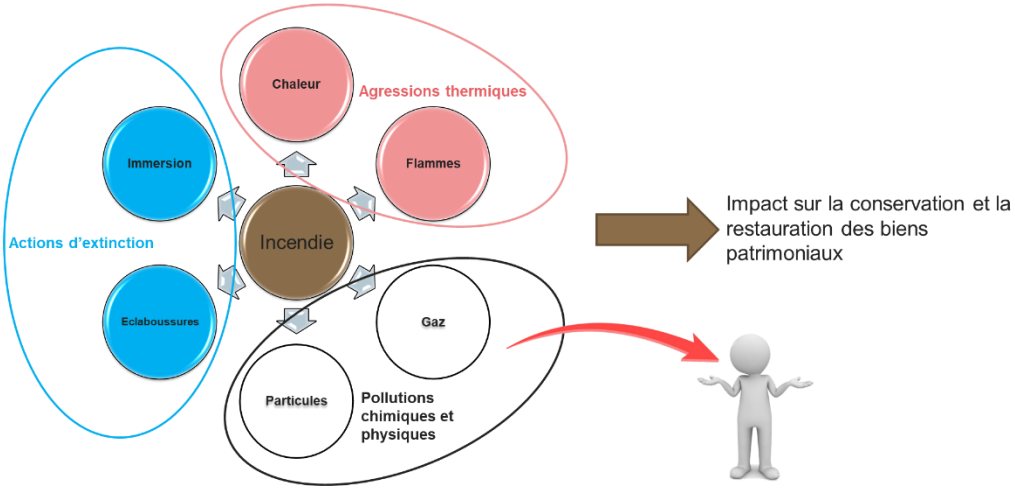


Figure 22 : Agressions liées à un incendie (©Stéphane Moularat-CSTB)

Si les types d'agressions sont connus, l'impact des COV et des particules aéroportées sur la conservation et la restauration des biens patrimoniaux reste peu étudié. Sont décrits par la suite ces polluants.

4.1.1. Composés gazeux émis par les feux

Lorsqu'un incendie se déclare, différents types de composés gazeux peuvent être émis en fonction des matériaux impliqués dans la combustion. Le Tableau 5 présente différentes émissions chimiques produites en fonction de la plage de température ***[R33], [R34].***

Tableau 5 : Emissions chimiques produites en fonction de la plage de température

Plage de températures	Produits émis dans les feux
100-300°C	Acides halogénés, HCN, monomères
300-400°C	NOx, CH_4, C_2H_4, CH_3OH, C_2H_5OH, HCOOH, CH_3COOH, H_2CO, CH_2=CH-CHO, Furanes, Cétones…
400-500°C	Hydrocarbures C_7-C_{10}, Hydrocarbures chloré…
500-600°C	Hydrocarbures C_{10}-C_{30}, BTX, HPA, Hydrocarbures aromatiques cholrés, PCDD, PCDF
>300°C	NOx, Suies
Toutes plages de températures	H_2O, CO_2, CO, SO_2
Non déterminée	Cl_2, $COCl_2$, Mercaptans, H_2S, Aldéhydes, Nitriles, Amines…

4.1.2. Principaux produits de pyrolyse/combustion émis par les matériaux facilement combustibles ou inflammables

Les produits de combustion varient en fonction du type de matériau combustible. Par exemple, les produits de combustion des matériaux organiques tels que le bois, les papiers, les tissus et les plastiques contiennent de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et des Composés Organiques Volatils. Les produits de combustion des métaux, tels que l'aluminium, le magnésium et le titane, contiennent des oxydes métalliques qui peuvent réagir avec l'eau pour produire de l'hydrogène gazeux, qui est hautement inflammable. Les produits de combustion des polymères halogénés, tels que les plastiques contenant du chlore ou du fluor, produisent des gaz tels que l'acide chlorhydrique et le fluorure d'hydrogène. Enfin, les produits de combustion des matériaux de construction, tels que le béton et les plaques de plâtre, peuvent contenir des particules minérales. Le Tableau 6 recense certains gaz émis durant une combustion en fonction du matériau ***[R33], [R34], [R35].***

Tableau 6 : Exemples de gaz émis durant une combustion en fonction du matériau

Gaz	Source
CO – CO_2	Tous les matériaux carbonés
HCN – NOx – NH_3	Laine, Soie, PAN, ABS, PUR, Nylon, Solvants nitrés
Hydrocarbures aliphatiques	Polyoléfines et autres polymères hydrocarbonés
Aldéhydes	Bois, Papier, Coton, Résines phénoliques
Acroléine	Bois, Coton, Papier, polymères urée-formaldéhyde et formophénoliques
Benzène	Polystyrène, PVC, Polyesters, polyoléfines
HCl – HBr	PVC, Matériaux résistants au feu traités avec produits ignifugeants halogénés
SO_2 – H_2S	Soufres viticoles, laine, caoutchouc vulcanisé, polymères soufrés
HNO_3	Engrais ternaires
Cl_2	Engrais ternaires
HF	Téflon, Polymères fluorés

4.1.3.Les COV émis par un incendie

Les Composés Organiques Volatils (COV) sont des produits de combustion courants lors d'un incendie. Ils sont émis par les matériaux tels que les plastiques, les colles, les revêtements de sol, les peintures, les vernis et les produits de nettoyage.

La Figure 23 donne des exemples de COV émis lors d'incendies dans des résidences et industries ***[R36]***

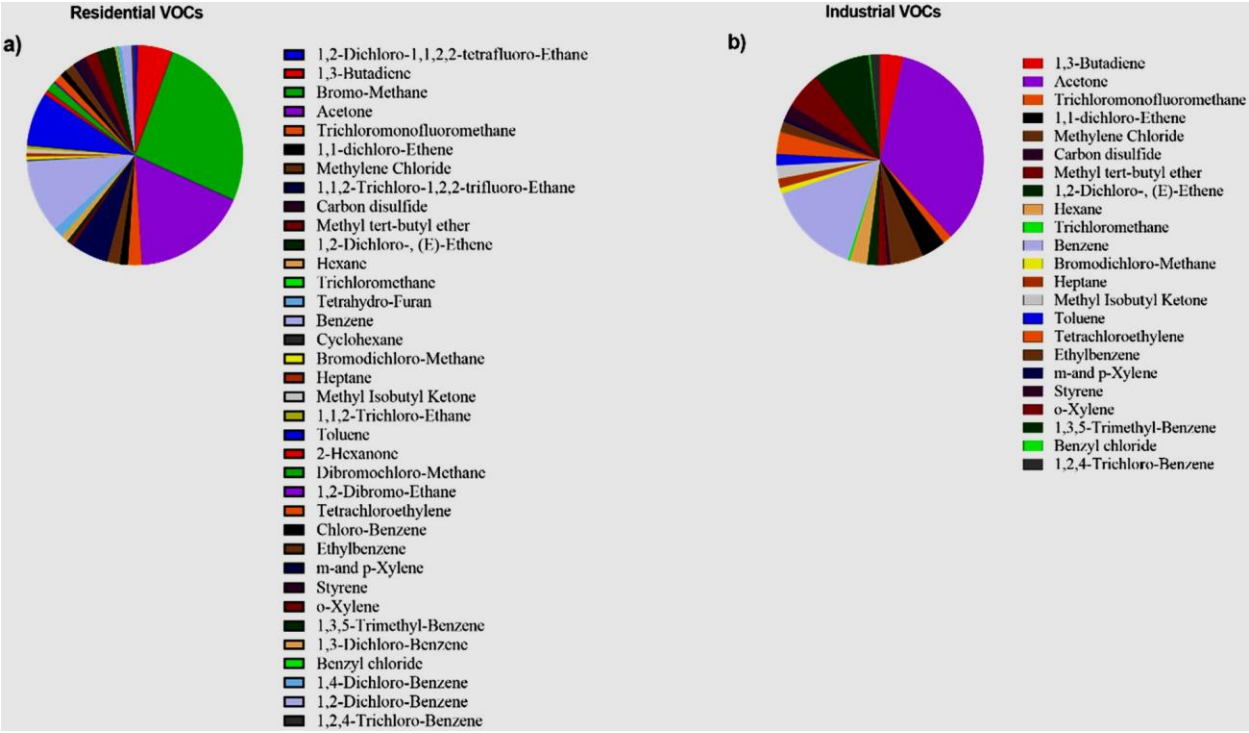


Figure 23 : COV émis lors d'incendies dans des résidences et industries ***[R36]***

4.2. Notions de vulnérabilité des œuvres

Le Tableau 7 recense les polluants nuisibles aux collections des musées avec leur origine, les réactions qu'ils causent sur les collections ainsi que les concentrations acceptables indicatives ***[R37], [R38], [R39]***.

Tableau 7 : Liste des polluants, de leur source, des réactions sur les collections et des concentrations acceptables indicatives

Polluant	Origine	Réaction sur les collections	Concentrations acceptables indicatives
Oxydes d'azote (NOx)	Combustion à haute température de combustibles fossiles (charbon, fuel, pétrole) : trafic routier et chauffage. Polluant interne : décomposition du nitrate de cellulose NO_2 peut s'oxyder en acide nitrique (HNO_3)	Affadissement des matières colorantes, détérioration du papier, du cuir, du textile, altération des photographies. Transformation et action de HNO_3	Papier 0 – 2.5 ppb Musée air intérieur <5 ppb NO_2 : 10 µg/m^3
Dioxyde de soufre (SO_2)	Combustion du charbon, du fuel en baisse du fait de la forte diminution des émissions, baisse du taux de soufre dans le gasoil. Risque de transformation en acide sulfurique	Acidification du papier, altération des photographies, corrosion du cuivre, ternissement de l'argent, fragilisation du cuir et du textile, dégradation de matières colorantes	Documents papier 0 - 0.4 ppb Livre en cuir <0.1 ppb Musée air intérieur <4 ppb 10 µg/m^3
Sulfure d'hydrogène (H_2S)	Anthropique : industrie des pâtes à papier et du pétrole, matériaux de décoration, caoutchouc vulcanisé naturel : océans, activité volcanique et géothermique, marais, végétation, objets archéologiques gorgés d'eau.	Ternissement argent, décoloration des photographies argentiques	
Ozone (O3)	Polluant secondaire se forme par réaction oxydes d'azote + hydrocarbures + UV dépoussiéreurs électriques des climatisations, épurateurs d'air, photocopieurs	Altération caoutchouc, matières colorantes, matériaux organiques (rupture liaisons entre les atomes de carbone), photographies	Papier <13 ppb Musée air intérieur 0 ppb 26 µg/m^3
Sulfure de carbonyle (OCS)	Environnement externe, processus biochimiques et géochimiques dans les océans généralement pas de sources intérieures	Ternit les métaux, en particulier l'argent	
Formaldéhyde (HCHO)	Peut-être oxydé en acide formique	Produits en panneaux de particules de bois, résines, certains plastiques thermodurcissables.	
Acide formique (HCOOH)	Séchage de la peinture, oxydation du formaldéhyde de certains bois	Corrode certains métaux, en particulier le plomb, le zinc, les alliages de cuivre, attaque les matières calcaires, attaque des spécimens minéralogiques	Acide formique : 100 µg/m^3
Acide acétique (CH3COOH)	Bois et produits du bois, adhésifs et produits d'étanchéité, décomposition du film d'acétate de cellulose	Corrode certains métaux, en particulier le plomb, le zinc, les alliages de cuivre, attaque les matériaux calcaires, attaque les spécimens minéralogiques, peuvent attaquer le papier, les pigments et les textiles	Acide acétique : à partir de 3000 µg/m^3/an
Vapeur d'eau	Multiple	Par hydrolyse, peut endommager les objets à base de cellulose (livres, œuvres en papier...). L'acétate et le nitrate de cellulose, particulièrement en feuilles minces, pellicules enroulées, papiers et bandes magnétiques, sont sensibles. Effets synergiques avec d'autres polluants	
Dioxygène	Atmosphère	Procédés de détérioration de matières organiques (colorants, polymères, objets à base de cellulose, peaux...). Détérioration après photo–excitation par les rayons ultraviolets ou visibles entraînant des altérations physiques (fragilisation, apparition de fissures…) ainsi que des altérations chimiques (jaunissement, décoloration...). Dans un milieu humide, les métaux comme le fer rouillent.	
PM2,5, PM10	Environnement extérieur, circulation automobile, abrasion, pollens, combustion, bougies, bio détérioration, surfaces en plâtre, insectes, brouillard salin, sel de voirie…	Décolorent, salissent les surfaces, amorce ou accélère les dégradations, dégradations biologiques, impact des nettoyages successifs. Peut engendrer de la corrosion.	Musée air intérieur PM10 < 75 µg/m^3

En résumé

Les données disponibles sur les polluants émis lors d'un incendie dans les bâtiments sont loin d'être exhaustives. En effet, même si une dizaine de polluants sont souvent cités, il est important de souligner qu'un incendie résidentiel peut émettre jusqu'à une quarantaine de polluants majoritaires et encore plus en quantité moindre. De plus, peu de valeurs seuils sont disponibles pour ces polluants, et elles sont souvent spécifiques à certains types de polluants ou de biens. Les émissions de particules, de COV, de COSV et d'autres composés gazeux tels que les NOx et les SO_2 sont particulièrement agressives pour les biens culturels. Il est donc important de prendre en compte ces polluants lors de l'évaluation des risques d'incendie pour les biens culturels et de mettre en place des mesures préventives et des plans de sauvegarde adaptés pour minimiser les dommages en cas d'incendie.

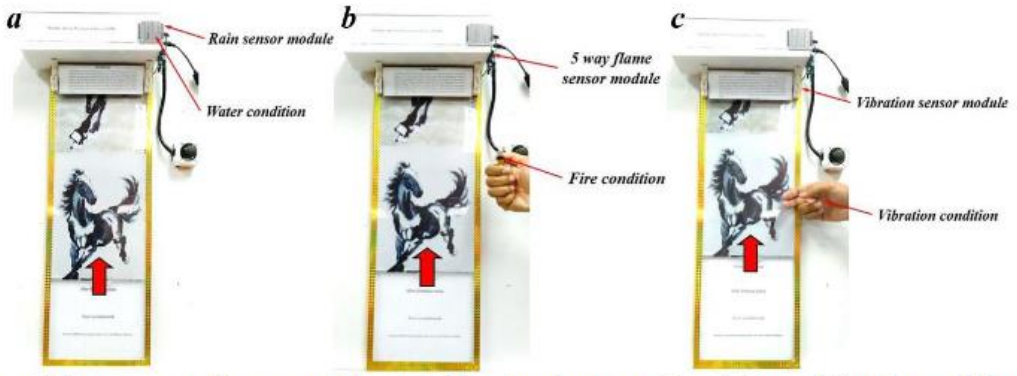
5. INNOVATIONS

Très peu de pistes innovantes ont été relevées dans la littérature concernant le développement de systèmes de protection pour les œuvres patrimoniales vis-à-vis des risques incendie. Il est cité ici trois articles présentant des développements originaux.

- Développement d'un dispositif d'enroulement automatiquement pour la protection d'œuvres souples ***[R40]***

Un dispositif portable de préservation des œuvres d'art a été conçu et testé avec succès en fonction des paramètres d'agressions extérieurs liés aux conditions d'incendie, d'eau et de vibration/séisme.

Le système mis en place permet d'enrouler automatiquement une œuvre souple telle qu'une affiche en papier ou en soie par exemple en 10 secondes afin de placer l'œuvre dans une boîte de protection vis-à-vis de l'eau ou de la température ou des chocs liés à des effondrements. Pour s'assurer que l'appareil fonctionne, les performances de réponse du dispositif portable sont étudiées et testées, comme l'illustre le schéma ci-dessous



ure 11 Response performance of the portable artwork preservative device: (a) water condition; (b) fire condition; (c) vibration or stealing condition

Figure 24 : représentation du dispositif de protection en fonction des différentes natures d'agression

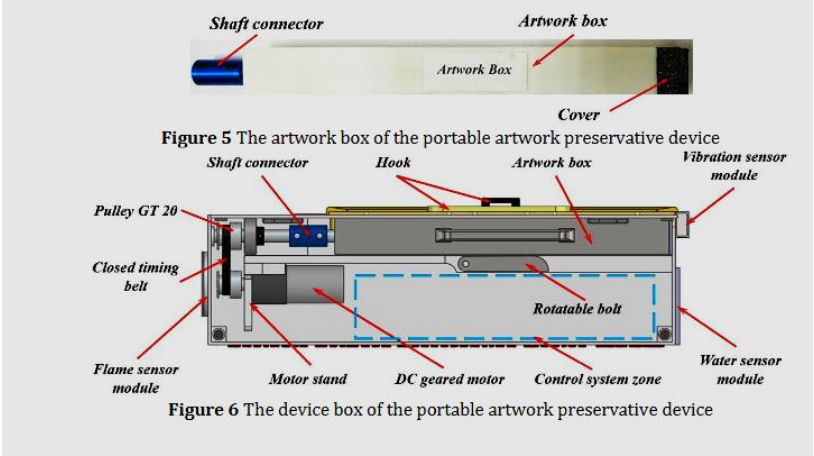


Figure 5 The artwork box of the portable artwork preservative device

Figure 6 The device box of the portable artwork preservative device

Figure 25 : Détail du dispositif

- Papier peint intelligent à capteurs thermosensibles ***[R41]***

Une recherche porte sur le développement de papier peint « intelligent » intégrant une alarme incendie préparée à base de nano fils d'hydroxyapatite ultra longs (HN) et de capteurs thermosensibles à l'oxyde de graphène (GO). Le capteur thermosensible GO devient électriquement conducteur à haute température. En cas d'incendie, une température élevée entrainera un processus de transformation de GO d'un état électriquement isolé à un état électriquement conducteur. De cette façon, le voyant d'alarme et le buzzer d'alarme connectés au capteur thermosensible GO enverront immédiatement les alertes.

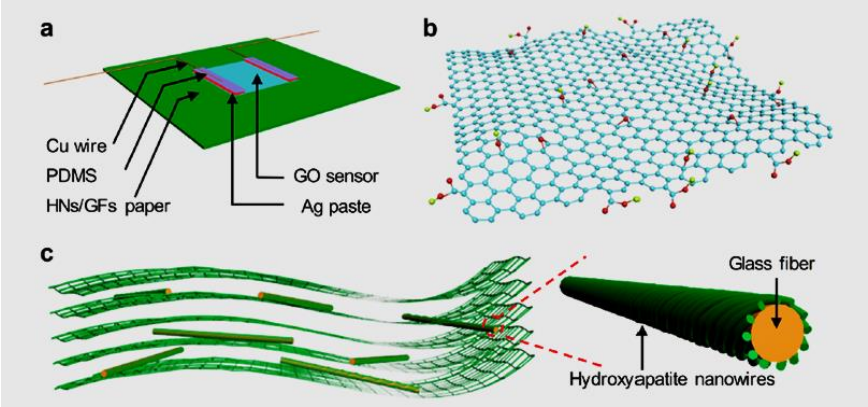


Figure 26 : Illustration des nano fils contenant les capteurs

Après la modification de surface, les performances d'ignifugation sont encore améliorées, en raison de l'excellente ininflammabilité et de la résistance à haute température des HN, qui peuvent protéger le capteur thermosensible GO des flammes.

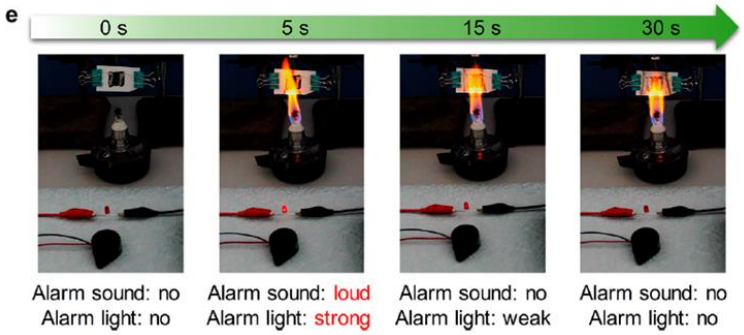


Figure 27 : essais de fonctionnement du capteur et déclenchement de l'alarme

Le papier peint peut être transformé en différentes formes, teint avec différentes couleurs et imprimés.

6. CONCLUSION

En France, le développement des plans de sauvegarde des biens culturels (PSBC) accélère la mise en place des moyens de protections pour les œuvres patrimoniales. L'état de l'art réalisé ici montre un panorama des différents outils de protection. Deux grandes catégories sont applicables ou déjà appliquées dans le domaine du patrimoine :

- Les outils de protection passive :

Certains outils sont spécifiquement conçus pour permettre un effet barrière thermique temporaire et sont mis en place au moment du sinistre. C'est le cas des outils de protection souples : telles que les bâches, les housses ou les couvertures.
D'autres ne présentent pas spécifiquement une performance de barrière thermique, mais peuvent indirectement protéger les œuvres temporairement. C'est le cas des vitrines, des produits de stockage en réserve tels que certaines boîtes d'archives ou produits d'emballage et de transport également (caisses en bois par exemple).

- Les outils de protection active

Ces outils ont une action directe sur l'extinction des flammes dès les premiers instants de l'incendie. Ils permettent d'abaisser rapidement la température de la pièce dans le cas des extinctions par eau type sprinklage, brouillard d'eau ou extincteur automatique. D'autres permettent de réduire la teneur en oxygène de la pièce comme l'hypoxie. Chaque moyen présente ses avantages et ses inconvénients qui ont déjà été rapportés.

Dans tous les cas, il est important de bien connaitre les caractéristiques de chaque outil pour pouvoir les adapter au mieux au contexte muséal, aux contraintes d'intervention mais surtout à la typologie et sensibilité des œuvres à sauvegarder.
En effet, la difficulté se situe bien dans le choix adéquat pour permettre une protection optimale de l'œuvre au regard de ses seuils de vulnérabilité. Ainsi une œuvre patrimoniale sensible à l'eau devra être protégée vis-à-vis des effets collatéraux d'une extinction automatique par exemple.
Une œuvre sensible à certains composés organiques volatils devra être protégée vis-à-vis de l'émission de certains composés organiques potentiellement émis par une bâche par exemple.

La combinaison d'outils peut s'avérer très efficace dans la mesure où les caractéristiques de ces derniers sont connues afin d'être compatibles avec les œuvres à protéger.

Au niveau international, il n'a pas été relevé d'utilisation d'outil de protection passive pour les œuvres patrimoniales. Les moyens mis en place sont principalement focalisés sur l'extinction automatique par sprinklage et brouillard d'eau. Les actions sont concentrées exclusivement sur le bâtiment et l'évacuation des personnes.

Perspectives

- La recherche doit s'inspirer d'autres domaines pour dégager de nouvelles innovations.

Pour les outils de protection passive, quelques exemples de pistes sont cités pour agir localement au niveau de l'œuvre :

-Pouvoirs d'adsorption d'aérosols, suies.

-Pouvoir de relargage de gaz inerte (cf. pyro stickers relarguant localement un gaz inerte)

-Séquestration de gaz nocifs pour les œuvres ***[R42]***

- Les dispositifs existants peuvent être améliorés suivant la typologie des œuvres à protéger :

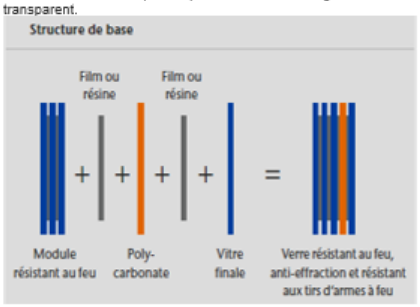
Par exemple pour les protections passives souples, il est important de travailler au niveau des configurations, du design et des systèmes de fermetures de façon à apporter un caractère plus enveloppant pour l'œuvre. L'adaptabilité de l'outil à la forme de l'œuvre et son accessibilité peuvent être améliorées afin de réduire au maximum le délai de mise en place au moment du sinistre.

Enfin, il serait nécessaire de poursuivre des recherches afin de construire une cartographie de combinaisons de plusieurs outils adaptables aux différents environnements muséaux et compatibles avec la vulnérabilité des œuvres à protéger.

Annexe 1 : Principaux fournisseurs de produits de protection souples sélectionnés en France

Fournisseurs	Contact	Dénominations	Caractéristiques sommaires
APRONOR	1900 Rte de Dieppe, 76230 Quincampoix ; Tél. 02 35 33 04 10 https://www.apronor.com/	Couverture anti feu APRONOR 3150-2-SS	100% fibres de verres revêtu sur les deux faces d'une enduction à base de silicone et de charges.Masse surfacique nominale du support tissé : 415 g/m² Masse surfacique nominale totale : 515 g/m² Epaisseur nominale : 0.4 mm Classement feu M0
		TISSUS anti feu 3400 2 TS, 3400 2 TW, 3400 2 PW, 3400 2 TC, 3400 2 TCY, 3400 2 TCB, 3200 2 PW, 3200 2 SP, TEX SCREEN M0, TEXTHERM M0 et APRO-SCREEN M0	Tissu constitué d'un support 100 % fibres de verre enduit d'un polymère thermodurcissable ignifugé sur les deux faces. Classement Mo. Epaisseur mesurée : environ 0,4 mm. Masse surfacique nominale du support fibres de verre : 440 g/m2. Masse surfacique nominale totale : 480 g/m2.
		TISSU anti feu APRONOR 426 FI 755	Tissu composé de fibres de verre et de résine acrylique. Epaisseur nominale : 0,68 mm. Masse surfacique nominale du tissu de verre : 595 g/m2. Masse surfacique nominale totale : 610 g/m2. Clasement M0.
		TISSU de verre .	Contrecollage aluminium 1 face 12/18 mm. Masse surfacique nominale totale: 485 g/m². Epaisseur : 0.42 mm. Classement feu : IMO résolution A.653 (16)
OTEGO	465 Rue des Chartinières 01120, Dagneux, France www.otegotextile.com	FIREGUARD 100	Fibre de verre aluminisée.Masse surfacique nominale totale: 135 g/m². Classement feu selon ISO 11612: A-B et C
PROTECFLAM	31, Rue de L'étoile du matin 44600 Tél. 02 40 90 10 80 https://protecflam.com/	Veriflam®TG600/Karo	Tissu de verre trame quadrillée incombustible avec feuille d'aluminium contrecollée sur une face . Aspect blanc avec une face aluminisée.Epaisseur : 600 mm .Masse surfacique nominale totale: 680 g/m². Classement feu M.0
		Veriflam®9379D/390	Tissu en satin de verre contrecollé sur les deux faces avec un élastomères de polyuréthane ignifugé. Toile incombustible, couleur gris satiné.Epaisseur : 390 mm. Masse surfacique nominale totale: 450 g/m². Classement feu M0.
WELTEK	tel. 04 37 85 54 27 / info@weltk.fr	TOILE 550°C-fibre	Fibre de verre . Epaisseur 0.75mm. Masse surfacique totale nominale: 591 g/m². Classement feu M0.
		TOILE 600°C-Quadrillée	Fibre de verre , enduction polyuréthane . Epaisseur 0.68mm. Masse surfacique totale nominale: 610 g/m². Classement feu M0.
		TOILE 850°C-double enduction	Fibre de verre , enduction double polyuréthane . Epaisseur 1.6 mm. Masse surfacique totale nominale: 1200 g/m². Classement feu M0.
		TOILE 1300°C-silicate	Fibre de silicate , enduction vermiculite . Epaisseur 0.67 mm. Masse surfacique totale nominale: 600 g/m². Classement feu M0.
DAVRAY INDUSTRIES	28 Rue de Verdun, 69490 Vindry-sur-Turdine ; tel.0474053951 contact@davray.com	DAVM0PU	Tissu de verre enduction polyuréthane . Masse surfacique totale nominale: 455 g/m².Classement au feu A2-s1,d0. Couleur gris
		DAVM0SIL	Tissu de verre enduction silicone . Masse surfacique totale nominale:530 g/m².Classement au feu M0. Couleur gris.
BACHE PLUS/groupe Maillestore	06.48.94.86.35/ contact@bache-plus.fr	Tissu de verre M0	Tissu de verre avec endiuction en polyuréthane sur les deux faces.Classement au feu M0.masse surfacique totale nominale : 455 g/m².Epaisseur : 4 mm
SINTHYLENE	254 Chem. des Nivres, 01190 Pont-de-Vaux Tél. 03 85 30 31 64	Tisus de verre enduits TVA 200B	Tissus de verre enduit silicone , couleur blanc. Masse surfacique totale nominale: 240 g/m². Classement feu M0.
		Tisus de verre enduits TVET 517E/ TV 500/TV 650 /TV 900 / TV 1000	Tissus de verre enduit polyuréthane , couleur gris. Masse surfacique totale nominale: 490 à 1035 g/m². Classement feu M0.
DR Technologie	1 Chemin de la coume 09300 Lavelanet / tel: +33 5 67 07 14 73	housse pour œuvres monumentales	M1/pas de descriptif disponible

Annexe 2 : Principaux fournisseurs de verres spéciaux résistants au feu

<table>
<tr><th>Fabricant</th><th>Référence produit</th><th>Composition</th><th>Comportement au feu</th><th>Caractéristiques techniques</th></tr>
<tr>
<td>SCHOTT</td>
<td>Verre spécial résistant au feu pour application intérieur
PYRANOVA®
PYRANOVA® secure
NOVOLAY® secure
PYRAN®</td>
<td>Verre composite ou feuilleté clair, composé au minimum de deux vitres en verre flotté séparées par un intercalaire en gel intumescent transparent.
 
</td>
<td>Résistance au feu conforme à la norme DIN EN ISO 12543</td>
<td>
<table>
<tr><th>Produits</th><th>Classification</th><th>Épaisseur</th><th>Poids</th><th>Transmission de la lumière</th><th>Réduction acoustique</th></tr>
<tr><td></td><td>acc. EN 13501-2</td><td>[mm]</td><td>[kg/m²]</td><td>[%]</td><td>[dB]</td></tr>
<tr><td colspan="6">Intérieur</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® EW</td><td>EW 30</td><td>7</td><td>17</td><td>89</td><td>33</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® EW</td><td>EI 15 / EW 30</td><td>11</td><td>26</td><td>87</td><td>36</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® 30</td><td>EI 30</td><td>15</td><td>35</td><td>86</td><td>38</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® 45</td><td>EI 45</td><td>19</td><td>44</td><td>85</td><td>38</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® 60</td><td>EI 60</td><td>23</td><td>55</td><td>87</td><td>41</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® 90</td><td>EI 90</td><td>37</td><td>86</td><td>84</td><td>44</td></tr>
<tr><td>PYRANOVA® 120</td><td>EI 120</td><td>52</td><td>106</td><td>74</td><td>42</td></tr>
</table>
</td>
</tr>
<tr>
<td>AGC GLASS</td>
<td>Verre spécial résistant au feu
Pyrobelite,
Pyrobel
Pyrobel T</td>
<td>Verres feuilletés à intercalaires intumescents transparents. Dès que le vitrage atteint une température d'environ 100°C, les intercalaires foisonnent et se transforment en une barrière protectrice, rigide et opaque qui absorbera le rayonnement et la chaleur.</td>
<td>Intégrité et rayonnement (EW) ou intégrité et isolation (EI).
Homologué EW30 et EW60, EI15, EI30, EI45, EI60, EI90, EI120, EI180</td>
<td>Protection contre les incendies allant de 30 à 180 minutes.
Epaisseurs variables→28 mm
Masse surfacique variable → 60 Kg/m²
Pyrobelite absorbe le rayonnement (maxi 15 KW/m²)
Pyrobel protège de la chaleur maxi 140°C en température moyenne
Pyrobel -T verre format XXL (2 mètres de large et 4.5 m de haut (9 m²)

-Distorsion optique très faible/ verres extra blanc/Protection de UV (versions protégeant à 99,9 des UV) / Retard à l'effraction /Résistance à l'eau même après le test feu/ Possibilité de faire de la signalétique sur les verres (sablage, sérigraphie ou impression numérique)</td>
</tr>
<tr>
<td>PYROGUARD</td>
<td>Vitrage Pyroguard T-EI30/18-2</td>
<td>Verres feuilletés à intercalaires intumescents transparents.</td>
<td>Coupe-feu de 30 min</td>
<td>-Résistant au feu avec deux intercalaires intumescents
-Excellent classement au choc
-Taille minimum 300 X 400 mm/ maximum2040 X 3600 mm
-82% transmission lumineuse
-Epaisseur 18mm et Masse surfacique 39Kg/m²</td>
</tr>
</table>

Annexe 3 : Quelques fournisseurs de produits de protection semi-souple

Fournisseurs	Contact	Dénominations	Caractéristiques sommaires
PROMAT	Bormstraat 24 2830 Tisselt Belgique tel: +32 (0) 15 71 80 50 info@promat.be	Nappe isolante 3D SLIMFLEX	Nappe isolante constituée d'un mélange opacifié de silice pyrogénée renforcée de filaments.Epaisseur 5 à 10 mm
		Panneau microporeux Microtherm Panel	Panneau avec une enveloppe extérieure en tissu de verre . Mélange opacifié de silice pyrogénée renforcée de filaments de verre réfractaire.Epaisseur 3 à 50 mm. Masse volumique totale nominale de 240 à 400 Kg/m^3
		Panneau microporeux isolant haute température Microtherm® Panel	Panneau avec une enveloppe extérieure en tissu de verre qui les rend propres et faciles à manipuler. La formulation est un mélange opacifié de silice pyrogénée (alumine pour la qualité 1200), renforcée de filaments de verre réfractaire. Température 1000-1200°C
Sinthylene	254 Chem. des Nivres, 01190 Pont-de-Vaux Tél. 03 85 30 31 64	Rideau de protection	Tissu de verre enduit Polyuréthane , jusqu'à 1035 g/m² Classement M0

Annexe 4 : Références bibliographiques

[R1] **https://fr.unesco.org**

[R2] https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/Securite-Surete/Securite-et-surete-des-biens/Plan-de-sauvegarde-des-biens-culturels

[R3] Desplanches Anne, Proposition d'une stratégie de réponse en cas d'incendie, Bachelor of Arts HE-Arc CR en conservation,20.07.2015.

[R4] Ministère de la culture et de la communication, « Etablissement culturels, tome II. Le plan de sauvegarde des œuvres »

[R5] Revue de l'institut patrimoine 2018-2019/N°14

[R6] FIRETECH : 2001-2005/ Réseau thématique d'experts et de praticiens européens de la protection incendie

[R7] Norme XP X80-002 « Conservation des biens culturels - Recommandations pour concevoir, aménager, choisir et utiliser une vitrine d'exposition de biens culturels », Décembre 2007

[R8] https://www.batiproduits.com/fiche/fabricant/meyvaert-119895

[R9] https://www.schott.com/

[R10] https://www.pyroguard.eu

[R11] https://www.agc-yourglass.com

[R12] https://promuseumcreation.com/conservation-preventive/#jp-carousel-28

[R13] https://cauchard.com/

[R14] http://www.boite-dimab.fr/

[R15] https://www.arden-plast.com/

[R16] Norme NF EN 1047-1 » Unités de stockage en lieu sûr - Classification et méthodes d'essai de résistance au feu - Partie 1 : meubles de rangements fermés et cartouches à disquettes », janvier 1997.

[R17] Le Transport d'œuvres d'art, Mémoire de Master II de Droit des Transports Terrestres, Albane FORZY FACULTE DE DROIT ET DE SCIENCE POLITIQUE D'AIX-MARSEILLE, 2011 / 2012)

[R18] https://www.fmglobal.com › media › p6924_FRA

[R19] https://entreprise.mma.fr/connexionpro/sprinkler-fonctionnement

[R20] https://www.nfpa.org/Solutions/By-topic/FPS

[R21] Qualité construction, N°179, Mars/Avril 2020

[R22] https://www.ffmi.asso.fr

[R23] www.ffmi.asso.fr/procede-brouillard-deau/

[R24] https://www.doi.gov/museum/nps-handbooks

[R25] Steven Cooper, WFRC – Convenor WG4Fire Tech Report, Existing Technologies, Their acceptabilities, Reliabilities and Cost, 2005

[R26] https://www.wmf.org/fire

[R27] https://www.getty.edu/news/why-the-getty-center-is-the-safest-place-for-art-during-a-fire

[R28] Protection of painting: transport, Exhibition and Storage, CFPA-E Guideline, N°29.2019F, 2019

[R29] Sondage canadien sur le soin des collections », Simon Lambert, Gyllian Porteous, Sophia Zweifel, CAC-ACCR&CAPC-ACRP,2019

[R30] https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/agents-deterioration/incendie.html

[R31] Jean Tétrault, Fire risk assessment for collections in Museum, Journal of Canadian Association for conservation, volume33, 2008

[R32] Prunet, R., Godin, D., Bilquez, Y., Peltier, F. Sirven, A., 2012. Comment garantir la sauvegarde des oeuvres patrimoniales ? ENSOSP: 45.

[R33] Höleman, H., 1994. Environmental Problems Caused by Fires and Fire Fighting Agents. 4eme symposium international de l'IAFSS.

[R34] Marlair, G. Marliere, F., 2014. Incendie et risque toxique : pour une stratégie préventive et prévisionnelle sur site industriel. HAL, p. 15.

[R35] Evanno, S. Marlair, G., 2004. Emissions de polluants engendres par un incendie de stockage de déchets combustibles : processus associes de dissémination dans l'air, dans les eaux d'extinction d'incendie et en retombées au sol. INERIS: 210.

[R36] Alharbi, B. H., Pasha, M. J. Al-Shamsi, M. A. S., 2021. Firefighter exposures to organic and inorganic gas emissions in emergency residential and industrial fires. Science of The Total Environment 770, p. 145332.

[R37] Blades, N., Oreszczyn, T., Bordass, B., Bordass, W. Cassar, M., 2000. Guidelines on pollution control in heritage buildings. 44.

[R38] Lazaridis, M., Katsivela, E., Kopanakis, I., Raisi, L., Mihalopoulos, N. Panagiaris, G., 2018. Characterization of airborne particulate matter and microbes inside cultural heritage collections. Journal of Cultural Heritage 30, p. 136-146.

[R39] Tétreault, J., 2021. Agent de détérioration : Polluants. Gouvernement du Canada https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/agents-deterioration/polluants.html

[R40] Ma Quanjin, Zhang Zhenggang, MRM Rejab, MS Idris, Bo Zhang, MH Abdullah, MNM Merzuki- "Design and fabrication of the portable artwork preservative device ", Journal of Modern manufacturing system and technology, 2018 .07.020

[R41] Fei-Fei Chen, Ying-Jie Zhu*, Feng Chen, Li-Ying Dong, Ri-Long Yang, and Zhi-Chao Xiong, Fire Alarm Wallpaper Based on Fire-Resistant Hydroxyapatite Nanowire Inorganic Paper and Graphene Oxide Thermosensitive Sensor, ACS Nano 2018, 12, 4, 3159–3171

[R42] Thao M.Ho, Tony Howes, Bhesh R. Bhandaria " Encapsulation of gases in powder solid and their applications: A review", Powder Technology , Volume 259, June 2014, Pages 87-108