

N° affaire : 26089176

**Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres
patrimoniales en cas d'un risque incendie.****Document de synthèse_26089176****Demandeur de l'étude :****Fédération Nationale des Sapeurs-Pompiers de France**

ADRESSE :

32 rue Breguet - 75011 PARIS

Rédacteur	Vérificateur	Approbateur	Version	Date
Véronique MARCHETTI 	El Mehdi KOUTAIBA 	El Mehdi KOUTAIBA 	0	20/06/2023
Rukshala ANTON 				
Stéphane MOULARAT 				

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 80 pages, dont 11 pages d'annexes.

DOCUMENT DE SYNTHESE

Version	Date	Principales modifications effectuées	Partie modifiée
		-	
		-	

1. INTRODUCTION	5
1.1. CONTEXTE & OBJECTIF	5
1.2. PERIMETRE ET DEMARCHE	6
2. LES OUTILS DE PROTECTION	7
2.1. PRODUITS UTILISES	7
2.1.1. Protection active	7
2.1.2. Protection passive	8
2.2. METHODES DE CARACTERISATION	8
2.2.1. Caractérisation thermique et mesures complémentaires	8
2.2.2. Caractérisations des émissions chimiques des protections passives	10
3. LES ŒUVRES PATRIMONIALES	12
4. LES SCENARIOS D'INCENDIE EN ENVIRONNEMENT MUSEAL	16
5. SYNTHESE DES ETUDES EXPERIMENTALES.....	18
5.1. CAS DES RESERVES.....	18
5.1.1. Agencement des réserves.....	18
5.1.2. Conditions thermiques du milieu	22
5.1.3. Evolutions des températures au niveau des collections pour les scénarios réserve	22
5.1.4. Réserve – essai avec brouillard d'eau.....	23
5.1.5. Bilan scénarios réserve	29
5.2. CAS DES CORRIDORS.....	30
5.2.1. Agencement des corridors.....	31
5.2.2. Conditions thermiques du milieu	33
5.2.3. Evolutions des températures au niveau des collections et constats d'état	34
5.2.4. Bilan scénario corridor	56
5.3. CAS DES GRANDS VOLUMES	57
5.3.1. Agencement du grand volume.....	57
5.3.2. Conditions thermiques du milieu	60
5.3.3. Evolution des températures au niveau des collections et constats d'état	60
5.3.4. Bilan grand volume	64
6. MESURES DE PREVENTION ET DE PROTECTION.....	65
6.1. FICHES DE PRECONISATION INCENDIE	65
6.2. LIMITES.....	65
7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	66
ANNEXE 1 : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70
ANNEXE 2 : EVOLUTION DU DEBIT CALORIFIQUE INSTANTANE DU BRULEUR ET DES TEMPERATURES DANS L'ENVIRONNEMENT D'ESSAI JUSQU'A EXTINCTION POUR LES SCENARIOS RESERVE	71
ANNEXE 3 : CONSTAT D'ETAT DES ELEMENTS DE COLLECTION DANS LE CAS DU SCENARIO INCENDIE AVEC EXTINCTION PAR BROUILLARD D'EAU.....	72

ANNEXE 4 : CONSTAT D'ETAT DES ELEMENTS DE COLLECTION DANS LE CAS DU SCENARIO INCENDIE AVEC EXTINCTION PAR SPRINKLAGE RESIDENTIEL.	73
ANNEXE 5 : EVOLUTION DU DEBIT CALORIFIQUE INSTANTANE DU BRULEUR ET DES TEMPERATURES DANS L'ENVIRONNEMENT D'ESSAI JUSQU'A EXTINCTION POUR LES SCENARIOS CORRIDOR.....	74
ANNEXE 6 : REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DE L'EVOLUTION DES PARTICULES AU COURS DE L'INCENDIE DANS LA RESERVE AVEC UNE EXTINCTION PAR SPRINKLAGE D'EAU (RESERVE 1- R1) ET PAR BROUILLARD D'EAU (RESERVE 2 - R2).....	75
ANNEXE 7 : REPRESENTATION GRAPHIQUES DE L'EVOLUTION DES PARTICULES AU COURS DE L'INCENDIE DANS LA RESERVE SANS EXTINCTION (RESERVE3-R3-1 ET R3-2).....	76
ANNEXE 8 : REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DE L'EVOLUTION DES PARTICULES AU COURS DE L'INCENDIE DANS LE CORRIDOR AVEC UNE EXTINCTION PAR BROUILLARD D'EAU (CORRIDOR 1- C1) ET PAR SPRINKLAGE D'EAU (CORRIDOR 2-C2).....	77
ANNEXE 9 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE L'EVOLUTION DES PARTICULES AU COURS D'UN INCENDIE DANS UN CORRIDOR SANS EXTINCTION ET SANS BACHE DE PROTECTION (CORRIDOR 3-C3) ET SANS EXTINCTION ET PRESENCE DE BACHES DE PROTECTION (CORRIDOR4-C4)	78
ANNEXE 10 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE L'EVOLUTION DES PARTICULES AU COURS D'UN INCENDIE DANS LE GRAND VOLUME (GV)	79
ANNEXE 11 : EVOLUTION DU DEBIT CALORIFIQUE INSTANTANE DU BRULEUR ET DES TEMPERATURES DANS L'ENVIRONNEMENT D'ESSAI JUSQU'A EXTINCTION POUR LE SCENARIO GRAND VOLUME.	80

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte & objectif

Suite au violent incendie dévastant la cathédrale notre Dame de Paris, le 15 avril 2019, de nombreuses entreprises privées ont très vite réagi pour apporter des aides de toute nature, notamment financières. Dans ce cadre, la fondation du groupe Renault a contacté la Fédération Nationale des Sapeurs-Pompiers (FNSPF) pour apporter son soutien. La fondation Renault a souhaité développer une approche globale visant à améliorer la sécurité incendie dans les bâtiments patrimoniaux français.

Soucieuse de préserver les œuvres patrimoniales, la FNSPF a proposé de conduire un projet se déroulant sur une période de trois ans. Ce projet intègre un volet d'études, de recherches et d'essais grandeurs réelles sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en situation d'incendie. Les objectifs de ce volet sont :

- Etablissement d'un état de l'art sur les outils de protections passive et active existantes,
- Développement de méthodes de caractérisation d'outils de protection passive et
- Préconisation dans la mise en application des outils de protection.

L'ensemble de ces éléments vise à constituer un support de référence dans le cadre de l'élaboration de plan de sauvegarde des biens culturels.

Le premier objectif a fait l'objet d'un précédent rapport en référence [R1]. Les avantages et les inconvénients de ces outils dans l'environnement muséal y sont reportés. Il est à noter trois catégories :

- les protections passives,
- les protections actives
- les systèmes innovants.

Les protections passives intègrent des produits souples (couvertures, housses, bâches, ...), ceux semi-rigides (écrans de cantonnements, ...) ou ceux spécifiques (verres spéciaux, éléments de stockages, ...). Dans les protections actives, le sprinklage, le brouillard d'eau, l'extincteur manuel ou la technique d'hypoxie et d'anoxie sont inclus.

Le document de synthèse reporte ici les analyses des résultats des phases expérimentales conduites à différents niveaux d'échelle. Pour plus de détails, les rapports d'essais sont attachés en annexes du document.

D'une part sont résumées les méthodes de caractérisation développées en laboratoire sur les outils de protection passive afin de pouvoir accéder facilement à leurs particularités et permettre une aide au choix de pour une protection adaptée aux différentes typologies d'œuvres patrimoniales vis-à-vis de l'incendie.

D'autre part, l'analyse des scénarios d'incendie à échelle 1 suivant les trois configurations réserve, corridor et grand volume essais à échelle 1, met en évidence les points forts et les faiblesses dans l'application de ces outils. Par ailleurs, sur la base des résultats expérimentaux, des pistes d'amélioration sont envisagées

dans le cadre d'une démarche innovante soutenue par la modélisation numérique. Des préconisations sont alors proposées sous forme de fiches afin d'offrir des éléments clairs destinés à différentes compétences professionnelles tels que les gestionnaires de biens patrimoniaux ou encore les services de secours concourant à la préservation du patrimoine.

1.2. Périmètre et démarche

Le projet adopte une approche performancielle basée sur la caractérisation des effets d'un incendie dit « réel » dans un contexte muséal en intégrant un système de protection. Dans toutes les configurations, la zone autour du foyer principal (donc à proximité des flammes) est exclue de l'étude. La courbe de développement du feu exposée ci-après indique dans quelle séquence du développement de l'incendie l'étude se positionne.

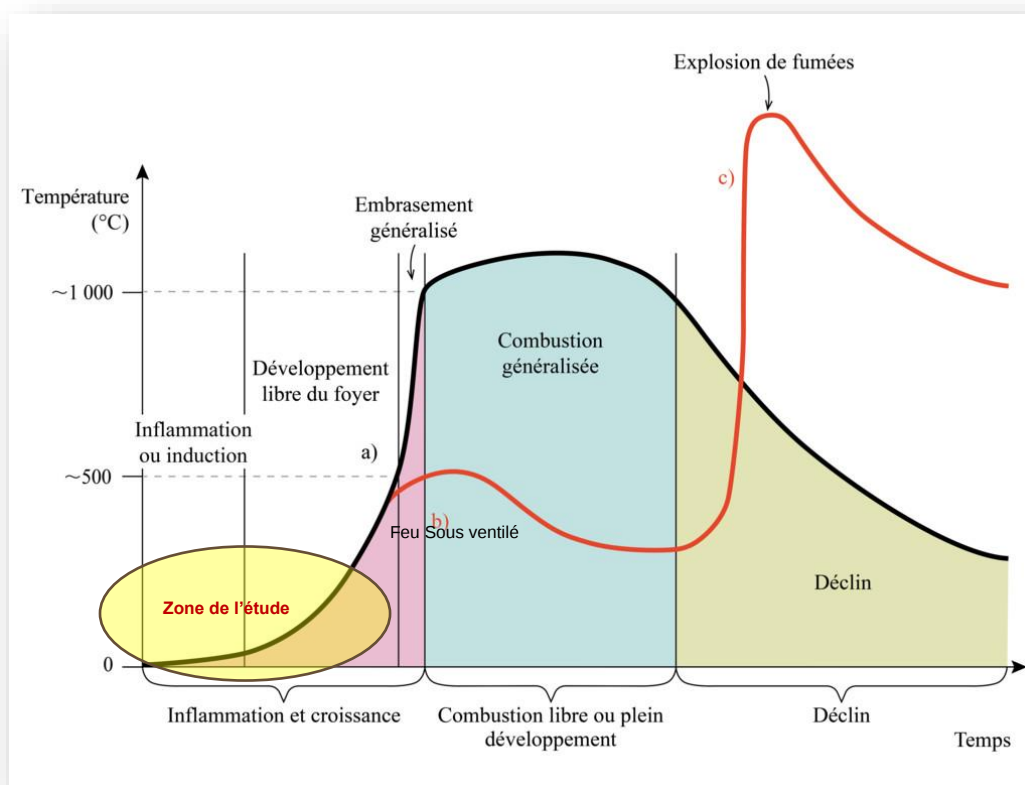


Figure 1 : courbes de développement d'un incendie

L'évaluation des outils de protection se situe dans la phase d'éclosion de l'incendie et de son développement juste avant l'embrasement généralisé.

Il est souligné le mécanisme de la démarche :

- L'objectif de sécurité est principalement la préservation des biens culturels auxquels il faut éviter les dommages ou les réduire au maximum par la mise en place de moyens de protection.
- Les exigences fonctionnelles portent exclusivement sur l'intégrité, et la pérennité de l'œuvre pendant la phase de sinistre où le moyen de protection est en déploiement, puis au cours du temps après le

sinistre afin de rendre compte des conséquences secondaires générées par la méthode/système de protection ou de contrôle de l'incendie.

- Les critères de performances associées seront liés à la vulnérabilité de l'œuvre face aux diverses agressions générées par l'incendie et/ou éventuellement par le moyen de protection n.

Les critères de performance correspondent ici aux exigences visant à traduire l'objectif de sécurité principal et les exigences fonctionnelles en termes quantifiables. Ces critères liés à la vulnérabilité représentent la sensibilité des œuvres à l'impact de l'incendie et/ou de son/ses moyen(s) de protection associé(s). Ils s'expriment sous forme de grandeurs physiques :

- Températures
- Taux d'humidité
- Suie/aérosols
- Gaz

2. LES OUTILS DE PROTECTION

2.1. Produits utilisés

2.1.1. Protection active

La société 2AI, partenaire de l'étude, a installé deux typologies d'extinction automatique :

- ✓ brouillard d'eau basse pression avec les caractéristiques suivantes :

température de déclenchement 65-75°C

densité d'eau utilisée : 2.3 à 3 L/min/m²



Figure 2 : tête de brouillard d'eau basse pression

- ✓ sprinklage résidentiel avec les caractéristiques suivantes :

température de déclenchement 68/80°C

densité d'eau utilisée : 5 L/min/m²



Figure 3 : tête de sprinklage résidentiel

2.1.2. Protection passive

Le choix des protections passives s'est orienté sur les bâches, housses et couvertures intégrées dans les plans de sauvegarde des biens culturels.

Les produits de trois fournisseurs ont été retenus pour participer au développement de méthodologies de caractérisation de ces produits via des essais laboratoire à petite échelle. L'anonymat des références commerciales est maintenu, seules les descriptions sommaires des produits sont reportées.

Le tableau suivant présente le référencement de ces produits ainsi que leurs principales caractéristiques :

Tableau 1 : Références produits de protection passive et caractéristiques sommaires

Fournisseurs	Produits	Caractéristiques	Références
Op1	Couverture	Tissu de verre avec revêtement aluminisé. Masse surfacique de 135 g/m² .	Op1-t
			Op1-c
Op2	Housse	Tissu de verre avec une face aluminium. Masse surfacique de 485g/m² .	Op2-t
			Op2-c
Op3	Housse	Tissu en satin de verre contrecollé deux faces avec un élastomère de polyuréthane ignifugé. Masse surfacique de 450 g/m² .	Op3-t
	Housse	Tissu de verre avec face aluminisée. Masse surfacique de 680 g/m² .	Op3-c

Les méthodes de caractérisation sont développées dans les sous-chapitres ci-après. Chaque évaluation faisant l'objet d'un rapport détaillé référencé en annexe de ce document

2.2. Méthodes de caractérisation

2.2.1. Caractérisation thermique et mesures complémentaires

- La caractérisation thermique est réalisée en laboratoire à l'aide d'un banc d'essai appelé calorimètre à cône. Le protocole s'appuie sur celui de la norme ISO 5660-1[R2] .L'adaptation de la méthode normative est réalisée au niveau du support porte éprouvette. Cette modification permet d'ajouter des thermocouples en contre face de la protection. L'objectif est de suivre l'évolution du transfert thermique au cours du temps. Des mesures complémentaires suivantes ont été également conduites :
- détection de gaz émis au cours de l'agression thermique à l'aide d'un spectrophotomètre infrarouge (FTIR)
- détection de particules aérosols à l'aide d'un dispositif ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) qui permet de mesurer en temps réel la distribution granulométrique et la concentration dans la plage de taille de 6 nm à 10 µm.

Les détails expérimentaux sont présentés dans le rapport d'essais correspondant référencé en annexe [R3].



Figure 4 : Faces exposées après essai des outils de protection de la gauche vers la droite : Op1t/c ; op2t/c ; op3t et op3c

Le tableau ci-dessous traduit l'évolution de la température à l'arrière d'un échantillon de bâche/couverture soumis à un éclairement énergétique comparable à celui généré par les flammes d'un démarrage d'incendie. Cet essai permet de montrer le niveau de température que pourrait recevoir une œuvre positionnée à 5 centimètres de la contre face de cette protection. Cette évolution est représentée ici sous forme de niveau de vitesse d'élévation de température désigné comme : 'réduit' ou 'modéré' ou 'élevé'. Les limites sont posées arbitrairement pour permettre de comparer les différents cas.' Les données de l'évolution des températures sont quant à elles reportées dans le rapport d'essai correspondant [R3] .

Tableau 2 : Evaluation de la vitesse d'élévation de température sur 30 minutes d'exposition sous différents niveaux d'éclairement énergétique

Références produits		Niveaux d'éclairement énergétique		
Produit Op1t/Op1c	Couverture aluminisée, 135 g/m²			
Produit Op2t/Op2c	Housse aluminisée, 485 g/m²			
Produit Op3t	Housse non aluminisée, 450 g/m²			
Produit Op3c	Housse aluminisée, 680 g/m²			
Niveaux de vitesse d'élévation de température				
≤2°C/min				
>2°C/min				
>8°C/min				

Il est remarqué que les produits présentant une face aluminisée permettent de réduire la vitesse d'élévation de température à l'arrière sur une durée d'agression thermique de 30 minutes, sollicitée par un éclairage énergétique inférieur ou égal à 25 kW/m². Lorsque le niveau d'éclairage énergétique augmente, cette vitesse d'élévation peut être plus élevée. Dans la majorité des cas, elle est ici considérée en niveau 'modéré'. Dans le cas de la housse non aluminisée, les niveaux de vitesses d'élévation vont de 'modéré' à 'élevé' à partir d'une agression de 25 KW/m².

Il convient donc d'être prudent dans l'utilisation d'outils non aluminisé en surface dans le cas d'œuvres patrimoniales qui seraient fortement vulnérables à des niveaux d'élévation de températures considéré 'réduit' à 'modéré'.

Concernant les mesures complémentaires d'émission de gaz et d'aérosol :

Dans le cas de la détection des aérosols avec le dispositif ELPI, les résultats recueillis ne dépassent pas 48000 particules/ cm³ quel que soit le produit et l'éclairage énergétique appliqué alors que les valeurs au niveau du dispositif sans présence de produit de protection varient entre 1000 à plus de 30 000 particules/cm³. Dans les conditions d'essai du cône calorimètre, les produits semblent émettre de faibles quantités d'aérosols concentrés majoritairement sur des tailles autour de 0.109 micromètre. L'environnement expérimental n'offre pas ici des conditions favorables à des mesures précises d'émission des particules pour ces zones de faibles concentrations estimées inférieures à 100 000 particules/cm³.

Dans le cas de la détection de gaz par FTIR, Il est noté à chaque fois un dégagement de CO₂ et CO et probablement des composés azotés NO_x à l'état de trace. Le produit Op3-t semble émettre une plus grande quantité de CO et CO₂ lorsque l'éclairage énergétique augmente, notamment à 50 KW/m². Les concentrations peuvent atteindre des valeurs de 200 ppm et 500 ppm respectivement pour CO et CO₂. Ceci peut s'expliquer probablement par une thermolyse de certains composants organiques contenus dans le produit.

2.2.2.Caractérisations des émissions chimiques des protections passives

2.2.2.1. Définitions des variables mesurées

La Directive européenne n°1999/13/CE du 11/03/1999 relative à la réduction des émissions de Composés organiques Volatils (COV) apporte une définition pour définir les COV comme étant tout Composé Organique ayant une pression de vapeur supérieure ou égale à 0,01 kPa à une température de 293,15K.

Dans la suite du rapport, les COV seront distingués et définis ainsi :

- COTV : Composés Organiques Très Volatils dont la chaîne carbonée est inférieure à 6
- COVT : Composés Organiques Volatils Totaux dont la chaîne carbonée est comprise entre 6 et 16
- COSV : Composés Organiques Semi-Volatils dont la chaîne carbonée est supérieure à 16

2.2.2.2. Caractérisation des émissions chimiques des bâches de protections en laboratoire

Afin de caractériser les émissions chimiques des protections passives en laboratoire, chaque protection (Op1, Op2, Op3, Op3_alu) a été découpée aux dimensions de la cellule micro-compacte, puis chacune des faces (C1/C2 Duplicat face 1 et C3/C4 Duplicat face 2) de la protection a été soumise à un programme de températures présentés en

Tableau 3 : Programme de températures auquel ont été soumises les bâches de protection en laboratoire

Prélèvements	Température	Débit (mL/min)	Echantillon	Durée (minutes)
P1	40°C	50	Non	15
P2	40°C	50	Oui	15
P3	40 -> 200°C	50	Oui	30
P4	200°C	50	Oui	15

Quatre prélèvements (P1, P2, P3 et P4) d'air ont été réalisés sur tube Tenax (voir description rapport d'essai COV [R8]) selon la durée indiquée en

Les émissions chimiques de chacune des protections sont listées de manière exhaustive dans le rapport d'essai [R8]. Le Tableau 4 résume et compare les COV émis lors des trois gammes de températures appliquées sur les protections passives.

Tableau 4 : Comparaisons des VVOC, TVOC et des SVOC des différentes bâches

Composé	Op1 [C] ET (µg/m³)						Op2 [C] ET (µg/m³)						Op3 [C] ET (µg/m³)						Op3_alu [C] ET (µg/m³)					
	C1-C2 / Face argentée			C3-C4 / Face blanche			C1-C2 / Face blanche			C3-C4 / Face argentée			C1-C2 / Face mate			C3-C4 / Face brillante			C1-C2 / Face blanche			C3-C4 / Face argentée		
	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C	40°C	40-200°C	200°C
VVOC	1.8	46.7	169.1	4.9	89.4	266.5	25.9	231.9	1343.1	38.7	892.7	1609.2	0.0	1278	9286	0.0	552	4163	284.4	505.7	1947.7	228.6	808.6	1761.4
TVOC	76.6	4512.8	14114.1	102.3	11612.9	26995.6	16.5	32006.2	157261.6	10.9	3905.9	76904.3	0.0	31010	80993	0.0	33274	139828	478.7	56040.1	109230.9	146.4	80856.5	146962.2
SVOC	0.0	13956.3	42782.7	0.0	18372.4	35324.7	0.0	56600.8	74911.3	0.0	40474.4	62213.8	0.0	32928	7822	1146	10042	21062	4854.5	10484.6	47051.6	1272.2	10450.1	54891.1

Comme attendu, les émissions chimiques augmentent avec la température que ce soit pour les VVOC, TVOC ou SVOC, quelle que soit la face étudiée, à l'exception d'Op3 face mate pour les SVOC.

Les plus fortes émissions de VVOC sont observées pour Op3 (les deux faces), contrairement à Op1 qui est la moins émissive.

En TVOC, les plus fortes émissions sont liées à Op2 Face blanche, Op3_alu face argentée et Op3 face brillante, contrairement à Op1 qui est la moins émissive.

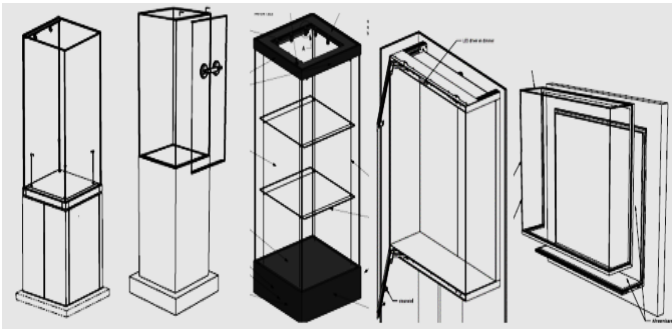
Les SVOC sont le plus émis par Op2 (les deux faces).

Les identifications de COV doivent être confrontées à la vulnérabilité des œuvres protégées et ont été recherchés dans les essais à l'échelle 1.

3. LES ŒUVRES PATRIMONIALES

Le tableau suivant rassemble les photographies des œuvres sacrificielles sélectionnées et préparées pour les essais échelle 1.

Typologies	Photos	Descriptifs sommaires
Tableau		✚ Toiles de coton pré-enduites sur châssis bois. -Dimensions 61X50 cm : toile 100% coton Monali, grain moyen. Avec préenduit universel. Référence 12F, Cultura -Dimensions 100X50 cm : toile double carré entoilé coton 300 g/m²-Châssis 3D 100% coton avec préenduit universel. Référence 447570, Créa, Rougié&Pié. ✚ Application peintures à l'huile et vernis au pinceau /CSTB -Peinture à l'huile -Rouge Cadmium foncé-Référence Sennelier-Rive gauche-618 -Peinture à l'huile, bleu outremer. Référence Lefranc Bourgeois -Peinture à l'huile, vert clair. Référence Lefranc Bourgeois
Chaise		✚ 3 lots de 4 chaises avec châssis en bois et assises en paille (occasion) -Fournisseur Selency

Meuble		 Meubles en bois Meuble type coiffeuse avec marbre et miroir à 4 tiroirs de dimensions 0.52 m (largeur) x 1 m (longueur) x 1 m (hauteur) Fournisseur -Emmaüs
Boîte		 Boîtes de conservation -Boîtes en polypropylène, dimensions 33 cm x 25 cm x 10 cm -Boîtes conservation intermédiaire (Dimab), dimensions 31cm x 28.5 cm x 40 cm -Boîtes longue conservation (Cauchard), dimensions 34 cm x 27 cm x 10 cm Fournisseur : Don Archives nationales
Vitrine		 Vitrines prototypes -vitrine sur socle : 0.6 m (largeur) x 0.6 m (longueur) x 1.250 m (hauteur) -vitrine sur socle : 0.613 m (largeur) x 0.613 m (longueur) x 1.25 m (hauteur) -vitrine autoportante : 0.8 m (largeur) x 0.8 m (longueur) x 2 m (hauteur) -vitrine murale avec capotage métallique : 0.581 m (largeur) x 1.568 m (longueur) x 1.9 m (hauteur) -vitrine murale : 0.351 m (largeur) x 1.6 m (longueur) x 1.25 m (hauteur) Fournisseur : Meyvaert

Etagère		✚ Etagères métalliques peintes 2 étagères de dimensions 0.455 m (largeur) x 0.91 m (longueur) x 1.83 m (hauteur) Fournisseur : Manutan
Grille		✚ Grilles métalliques 2 grilles de dimensions 0.03 m (largeur) x 1.2 m (longueur) x 1.87 m (hauteur) Fournisseur : Manutan
Armoire		✚ Petite armoire métallique peinte Avec 2 tiroirs supérieurs et une porte inférieure Dimensions 0.525 m (largeur) x 0.55 m (longueur) x 0.8 m (hauteur) Fournisseur : Manutan

Collections



✚ Textiles

- Rouleau de dentelle type polyester environ 50 cm, diamètre 10 cm (Emmaüs)
- carrée de coton 20 cm x 20 cm (CSTB)
- napperons coton dimensions divers (Emmaüs)
- carré de lin 20 cm x 20 cm (CSTB)

✚ Bois

- éprouvettes de bois 2.5 cm x 5 cm x 2 cm (CSTB)

✚ Papiers

- feuille A4 (CSTB)
- carré papier parchemin 20 cmX20 cm (CSTB)

✚ Livres

- Livres divers environ 50 Kg (Emmaüs)

4. LES SCENARIOS D'INCENDIE EN ENVIRONNEMENT MUSEAL

Le volet numérique de cette étude a pour objectif de définir les configurations d'essai les plus défavorables et critiques pour une œuvre. Les conditions thermiques auxquelles sont soumises ces œuvres au cours de ces simulations numériques permettent dans un second temps de dimensionner et orienter le choix des essais à grande échelle en termes de position du foyer et de débit calorifique instantané.

Une étude préliminaire des incendies dans les bâtiments patrimoniaux a permis d'extraire trois configurations bâtimementaires représentatives des volumes courants et 2 typologies de foyer majoritairement à l'origine d'incendies. Ainsi en combinant les configurations et les typologies de foyer, l'approche performancielle consiste à évaluer le niveau d'agression thermique auxquelles seraient soumises les œuvres. Le choix reposant sur le recours aux calculs numériques permet en particulier de quantifier les phénomènes de feu et les niveaux d'agressions thermiques sur des œuvres avant d'entamer la campagne expérimentale.

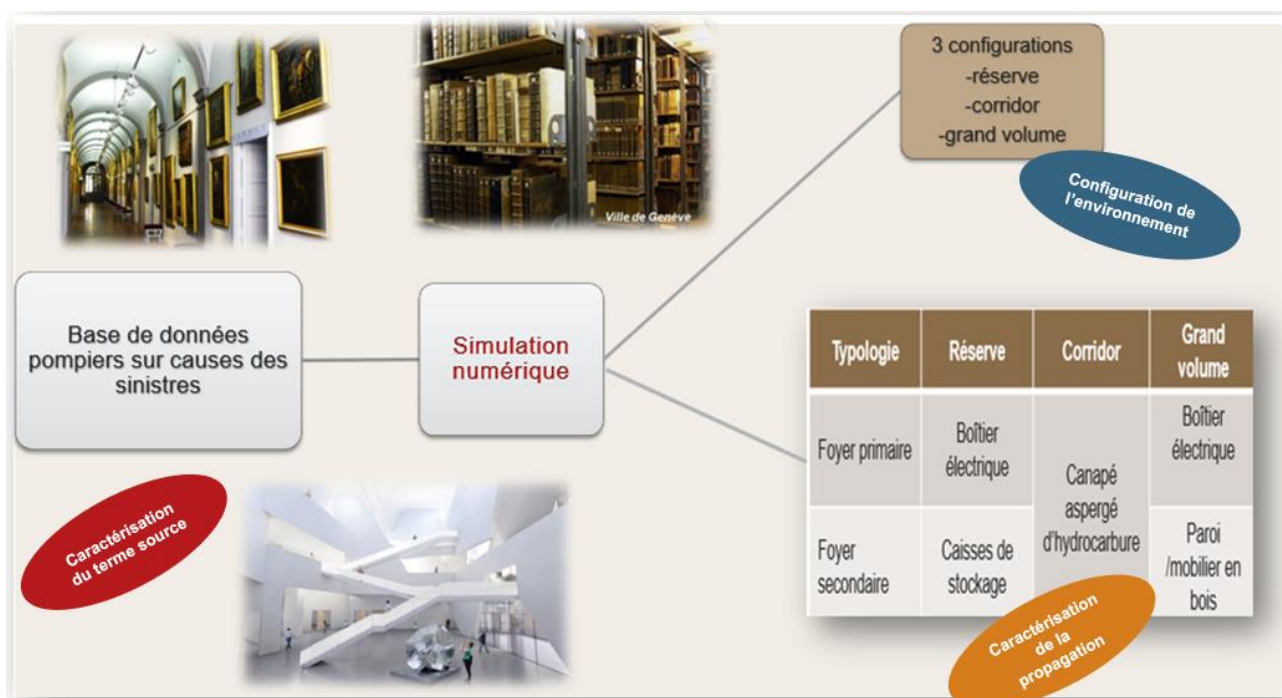


Figure 5 : Illustration de la démarche de simulation numérique dans le cadre de l'étude

Le détail du travail numérique est décrit dans le rapport d'étude en référence [R4]

Les figures extraites ci-après représentent l'isocontour de température adiabatique de surface aux parois dans le cas des 3 scénarios originels posés réserve, corridor et grand volume.

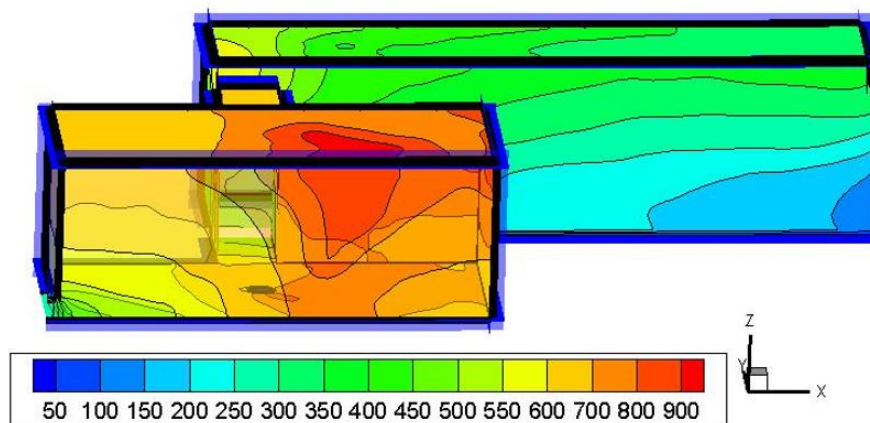


Figure 6 : Isocontour de température adiabatique de surface aux parois dans le cas de la réserve

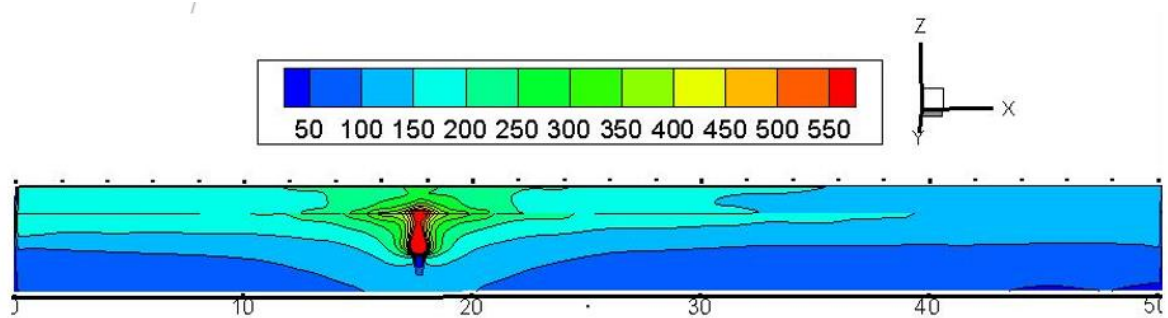


Figure 7 : Isocontour de température adiabatique de surface aux parois dans le cas du corridor

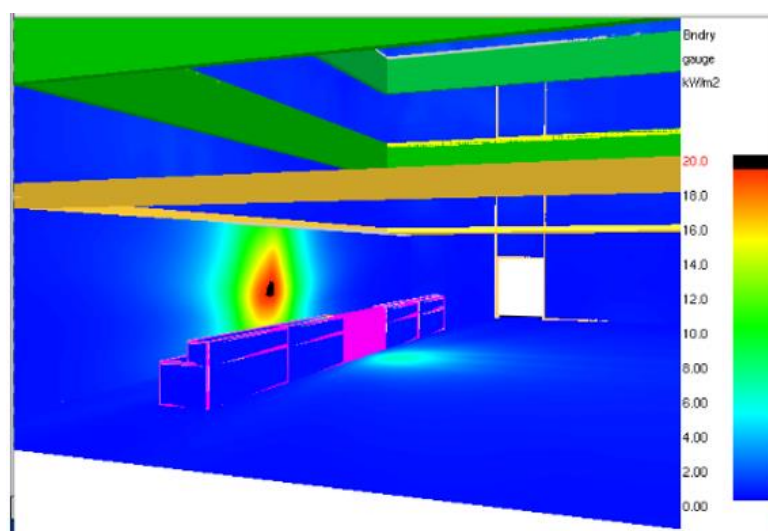


Figure 8 : Isocontour de température adiabatique de surface aux parois dans le cas du grand volume

5. SYNTHESE DES ETUDES EXPERIMENTALES

Pour chaque étude expérimentale, un rapport d'essai détaillé a été rédigé. Il est rattaché en annexe de ce document.

5.1. Cas des réserves

Une configuration de réserve muséale a été sélectionnée pour les trois différents scénarios d'incendie suivants :

- Démarrage d'un incendie avec extinction rapide par sprinklage résidentiel
- Démarrage d'un incendie avec extinction rapide d'incendie par brouillard d'eau basse pression
- Démarrage d'un incendie puis propagation jusqu'à atteindre 300°C dans la réserve.

Les détails expérimentaux sont exposés dans le rapport d'essais CSTB référencé [R5].

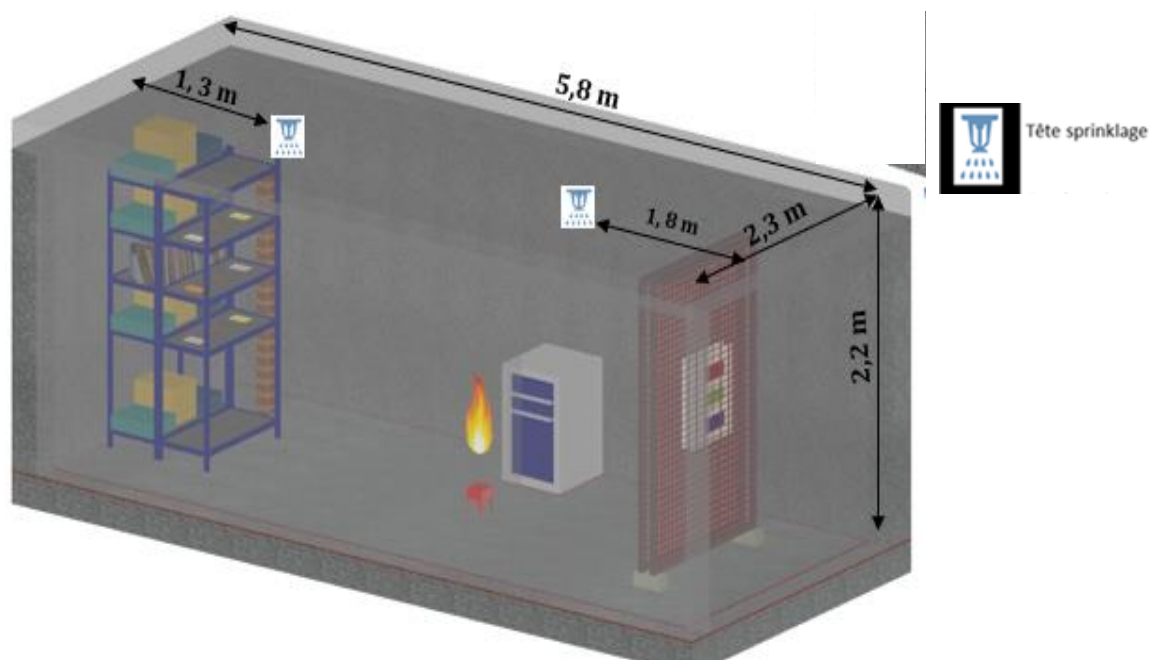


Figure 9 : Représentation du local réserve

5.1.1. Agencement des réserves

La figure ci-après montre les éléments disposés dans la réserve avec le détail de l'organisation et du contenu au niveau des collections.

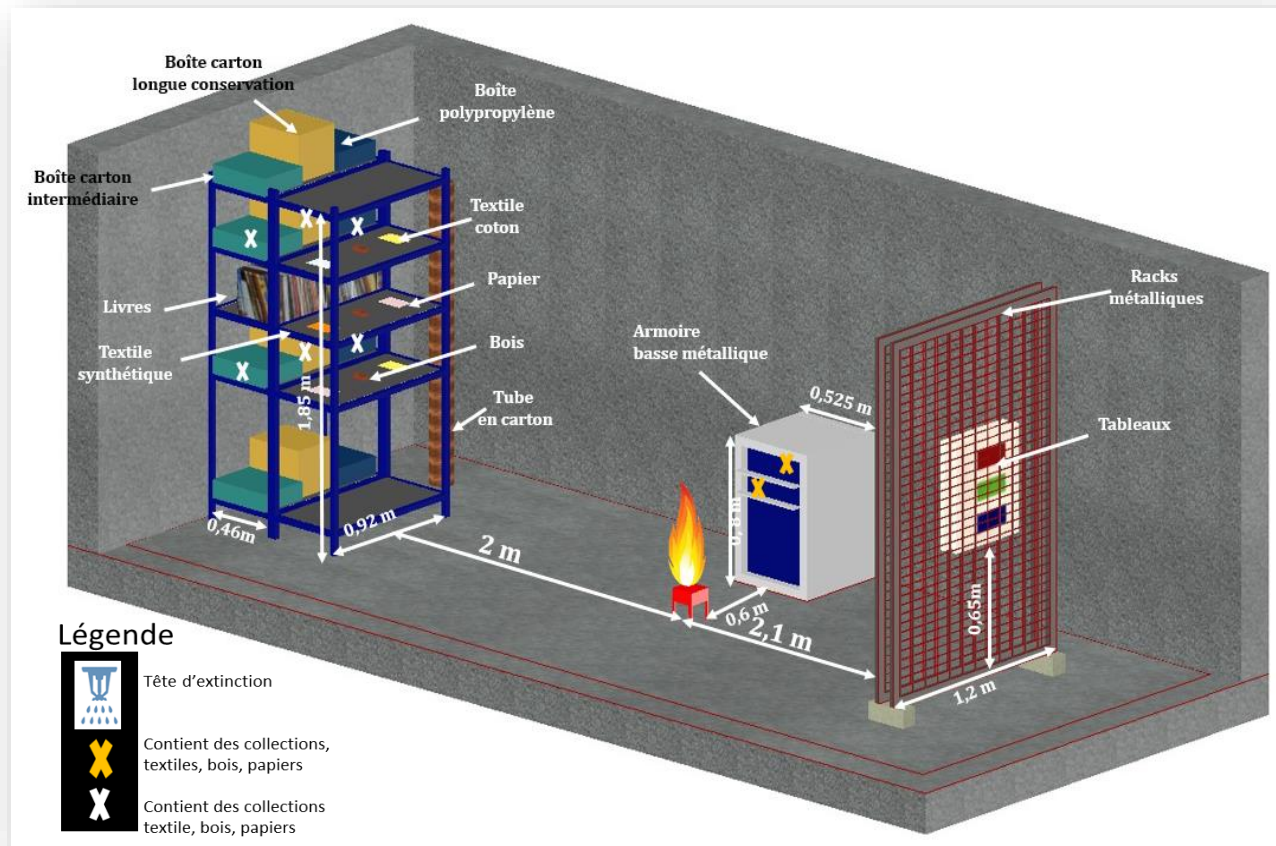


Figure 10 : Agencement du local réserve

Éléments de stockage

- rack métalliques pour tableau
- petite armoire métallique
- compactus métallique
- étagères métalliques
- 4 boîtes en carton (0.73 Kg/boîtes) pour archivage longue conservation
- 4 boîtes en carton (0.84 Kg/boîtes) pour archivage intermédiaire
- 4 boîtes d 'archivage (0.45 Kg/boîte) en polypropène

Typologie de Collection

- 2 Tableaux sur toile enduite sur châssis bois 50X60 mm
- 48 (+/- 2) kg de Livres, papier, parchemins....
- 2 (+/-0. 2 kg) de textiles divers coton, polyester, nylon
- environ 1 (0.1) kg de petits objets en bois

Les photographies suivantes correspondantes aux éléments placés dans la réserve.



Etagère métallique avec boîtes de conservation et collections et tube carton à droite.



Grille métallique support de tableaux



Petite armoire métallique avec collections à l'intérieur

Figure 11 : photos des éléments de la réserve

La figure ci-après montre le référencement des éléments et schématise leur position les uns par rapport aux autres dans l'espace.

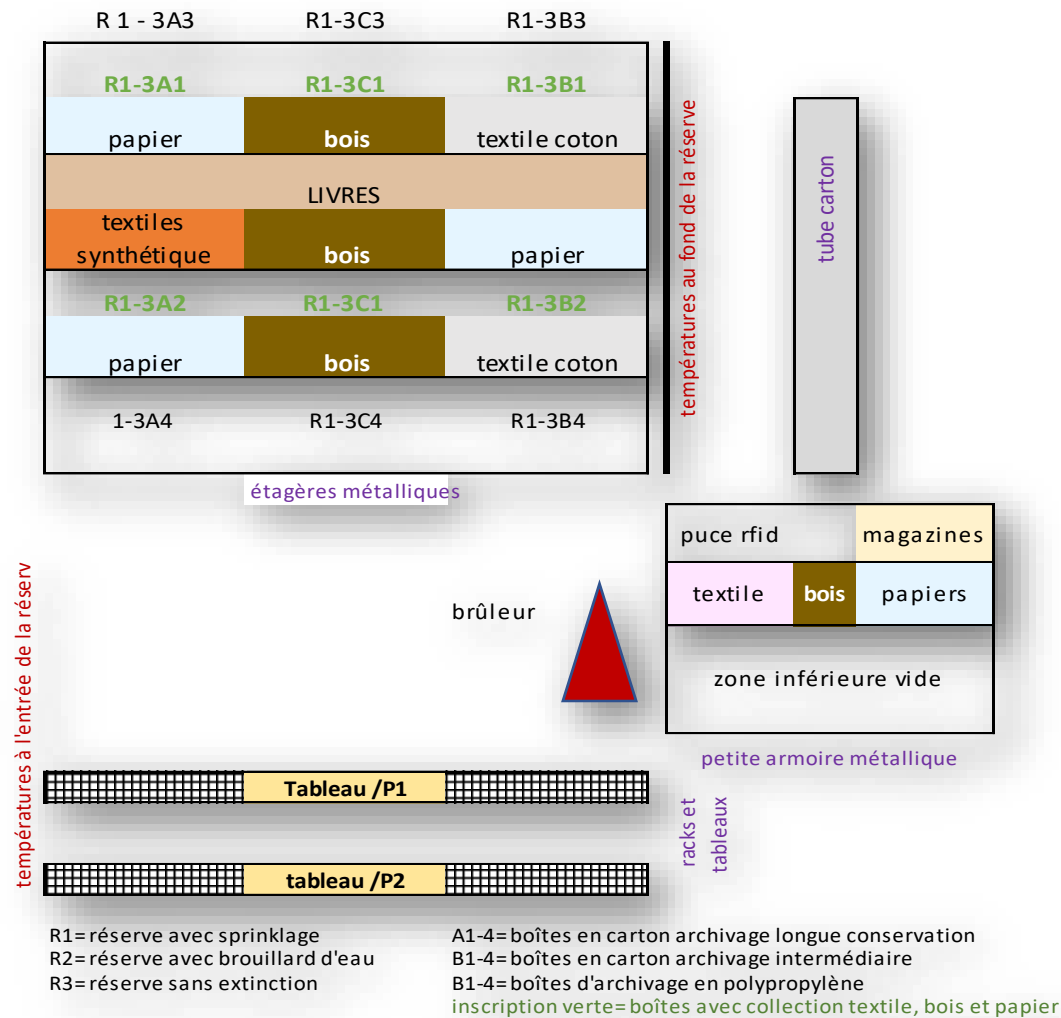


Figure 12 : Schéma de l'agencement réserve

5.1.2. Conditions thermiques du milieu

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en page suivante expose les différentes évolutions thermiques du local au cours des trois scénarios incendie de la réserve. Les courbes de température montrent les valeurs atteintes depuis le sol, à 0.8 m, 1.2 m, 1.6 m, 1.8 m et 2 m grâce aux deux arbres de thermocouples positionnés dans le local, l'un au fond de la réserve, l'autre à l'opposé, proche des racks supportant les tableaux. La goutte d'eau reportée sur les graphes indique le déclenchement de l'extinction automatique

5.1.3. Evolutions des températures au niveau des collections pour les scénarios réserve

Les présentations des différents relevés de température effectués au cours des essais feu au niveau des collections dans les 3 scénarios réserve, sont présentés en Annexe 2 .

5.1.4. Réserve – essai avec brouillard d'eau

Les relevés de température en fonction du temps sont reportés dans le schéma ci-dessous pour le scénario avec brouillard d'eau basse pression.

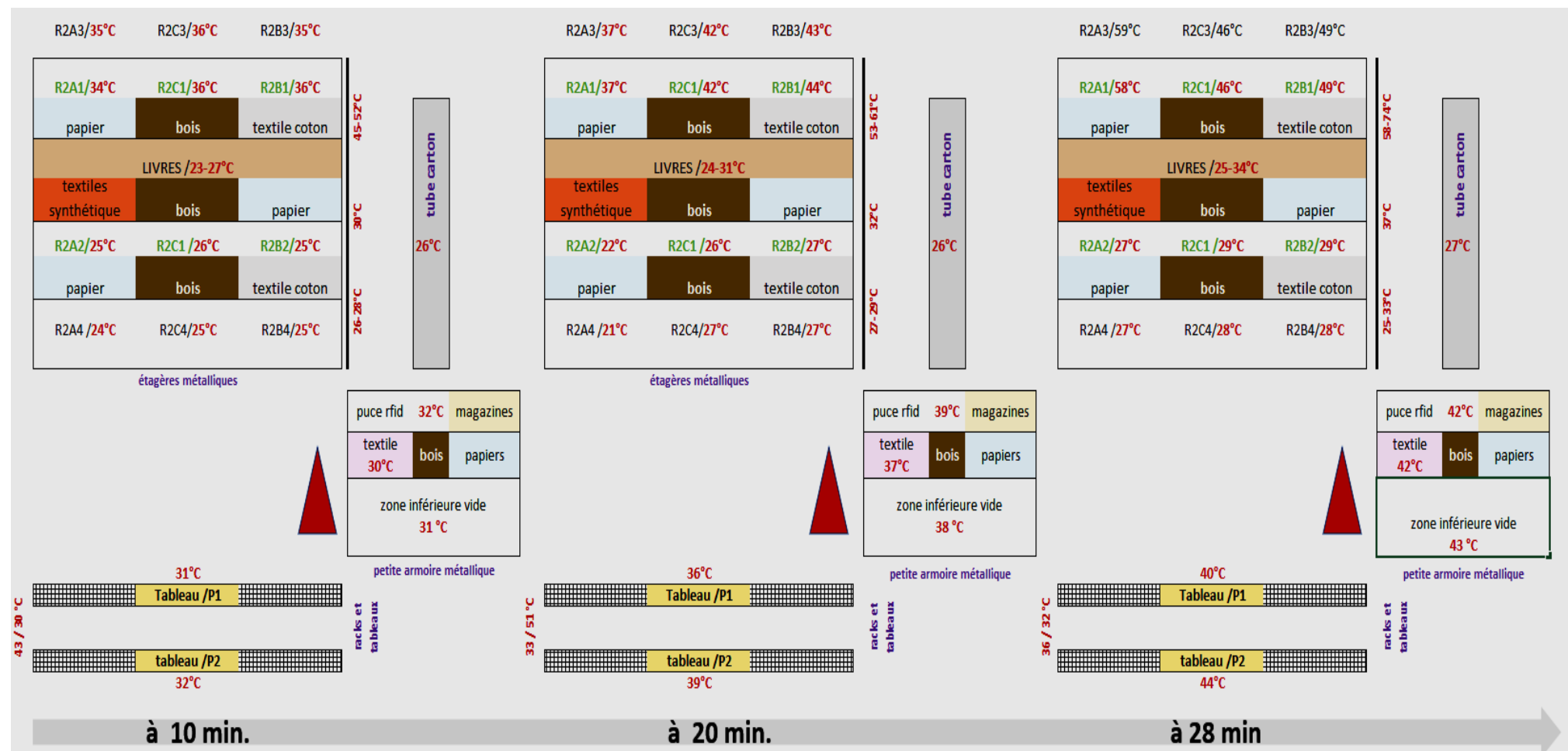


Figure 13 : Représentation schématique de l'évolution des températures au niveau des collections et dans le volume du local au cours du temps pour le cas réserve avec brouillard d'eau basse pression se déclenchant à 28 minutes.

Les photographies suivantes exposent les éléments après essais.



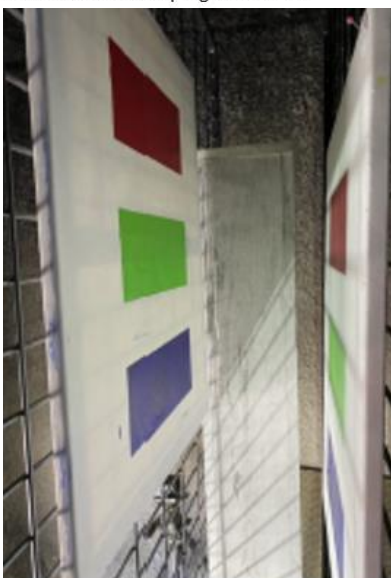
Boîtes en carton exposées juste sous la tête de diffusion du brouillard d'eau se sont imprégnées d'eau.



Livres et Textile synthétique : pas de dégât visible.



Boîtes & collections entre deux étagères



Tableaux sur rack



Petite armoire métallique



1^{er} tiroir : livres souples



2^{ème} tiroir : textile, papier et bois

Figure 14 : Photographies des éléments sacrificiels après essai avec brouillard d'eau basse pression dans réserve.

Les constatations générales réalisées suite à l'observation des restaurateurs sont exposées en Annexe 3. Globalement il est observé peu d'altération sur les éléments. Il est à noter que les éléments sacrificiels présentent à l'état initial des défauts et quelques dégâts qui n'ont pas été évalués par les restaurateurs avant les essais feu.

5.1.4.1. Réserve – essai avec sprinklage automatique

Les relevés de température en fonction du temps sont reportés dans le schéma ci-dessous pour le scénario avec sprinklage résidentiel.

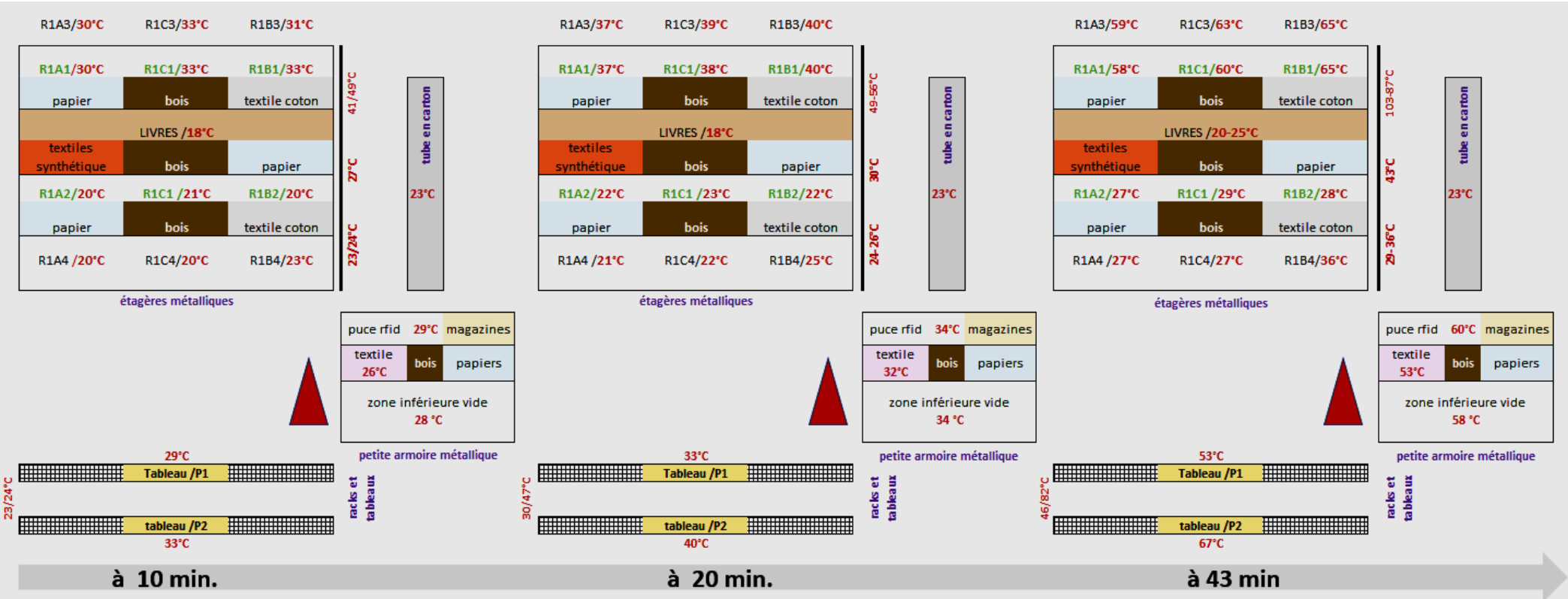


Figure 15 : Représentation schématique de l'évolution des températures au niveau des collections et dans le volume du local au cours du temps pour le cas réserve avec sprinklage résidentiel se déclenchant à 43 minutes.

Les photographies suivantes exposent les éléments après essais.



Aucun dégât sur les boîtes car la tête de sprinklage ne s'est pas déclenchée à cet endroit



Livres



Papier, bois, textile coton sur étage 3



Papier, bois, rouleau dentelle sur Etage 2



Tableaux



1^{er} tiroir : livres souples



2^{ème} tiroir : textile, papier et bois

Figure 16 : Photographies des éléments sacrificiels après essai avec sprinklage résidentiel dans réserve.

Les constatations générales réalisées suite à l'observation des restaurateurs sont exposées en Annexe 4. Globalement il est observé peu d'altération sur les éléments. Il est à noter que les éléments sacrificiels présentent à l'état initial des défauts et quelques dégâts qui n'ont pas été évalués par les restaurateurs avant les essais feu.

5.1.4.2. Réserve – essai sans extinction

Les relevés de température en fonction du temps sont reportés dans le schéma ci-dessous pour le scénario avec sprinklage résidentiel.

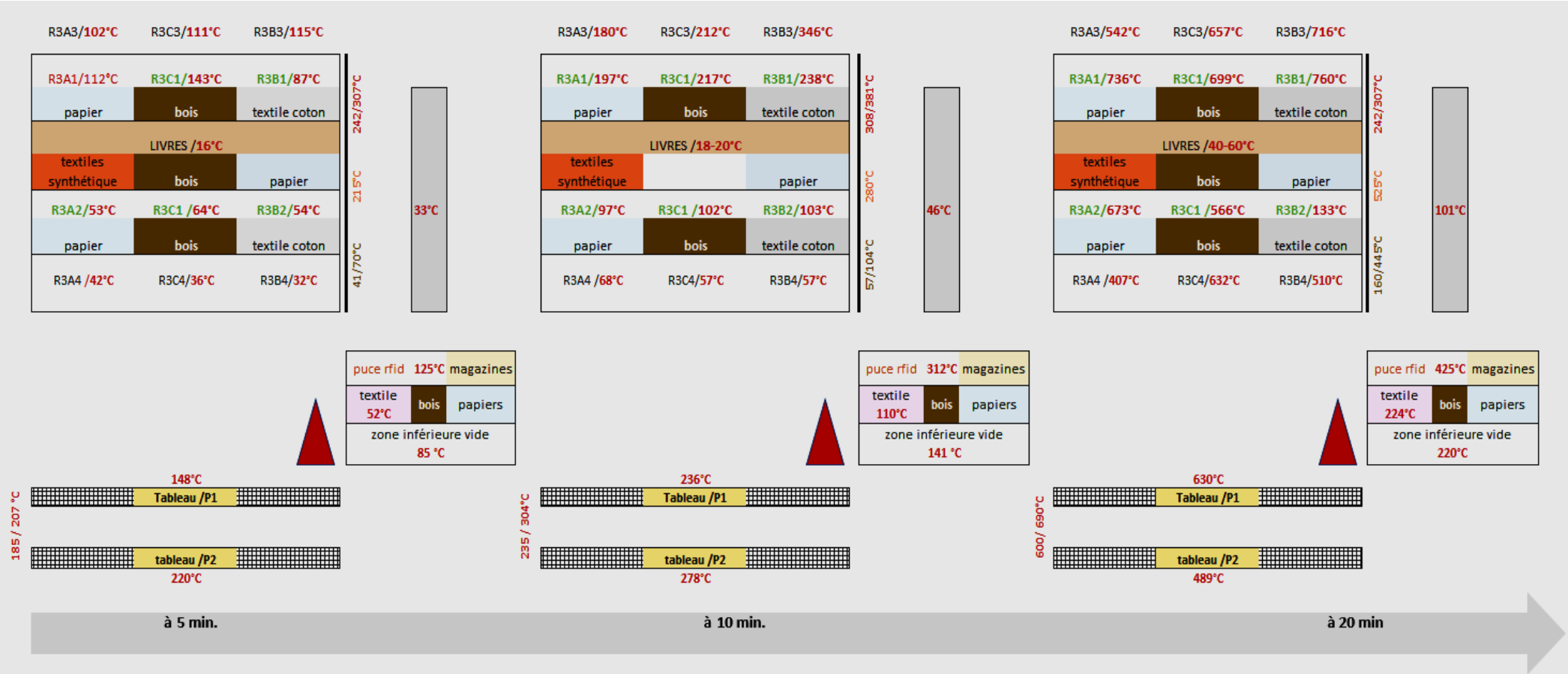


Figure 17 : Représentation schématique de l'évolution des températures au niveau des collections et dans le volume du local au cours du temps pour le cas réserve sans extinction pendant 20 minutes.

Les photographies suivantes rassemblent les éléments résiduels récupérés après l'essai.



Figure 18 : Eléments de la réserve après essai feu sans extinction (a=étagère, b=armoire métallique, c= châssis résiduels des tableaux)

Constat : tous les éléments ont brûlé. Les boîtes en polypropylène ont fondu, générant des coulures et gouttes enflammées qui ont contribué à la propagation de l'incendie. Un phénomène de feu couvant s'est produit au niveau des livres avant l'apparition de flammes entraînant une combustion complète.

5.1.5. Bilan scénarios réserve

Réserve sans extinction automatique

Les œuvres sont complètement détruites par l'incendie au bout de 15 minutes.

- ✓ Les éléments organiques combustibles rassemblés ou serrés entre eux tels que les livres peuvent favoriser l'apparition de feu couvant dans le local.
- ✓ Les boîtes en polypropylène génèrent des gouttes enflammées qui peuvent être source de foyers secondaires accélérant la propagation du feu.

Réserve avec extinction automatique

Les œuvres sont globalement peu altérées par les effets de l'incendie.

- ✓ Les collections placées dans les boîtes de conservation sont protégées temporairement de l'eau d'extinction.
- ✓ Les collections sur les étagères peuvent être altérées par les effets de l'eau ; notamment déformation et colmatage pour les matériaux hydrophobes et potentiellement développement de moisissures si ces dernières ne sont pas prises en charge rapidement.

5.2. Cas des corridors

Une configuration de type corridor a été sélectionnée pour les trois différents scénarios d'incendie suivants :

- Démarrage d'un incendie avec extinction par sprinklage résidentiel, et avec protections passives
- Démarrage d'un incendie avec extinction par brouillard d'eau basse pression et avec protections passives
- Démarrage d'un incendie puis propagation jusqu'à atteinte de 300°C dans le corridor avec protections passives et sans protections passives (=cas témoin)

Les détails expérimentaux sont exposés dans le rapport d'essais référencé [R6]. Le schéma ci-dessous présente la configuration de la pièce corridor avec ses dimensions ainsi que la localisation des œuvres sacrificielles et du foyer source.

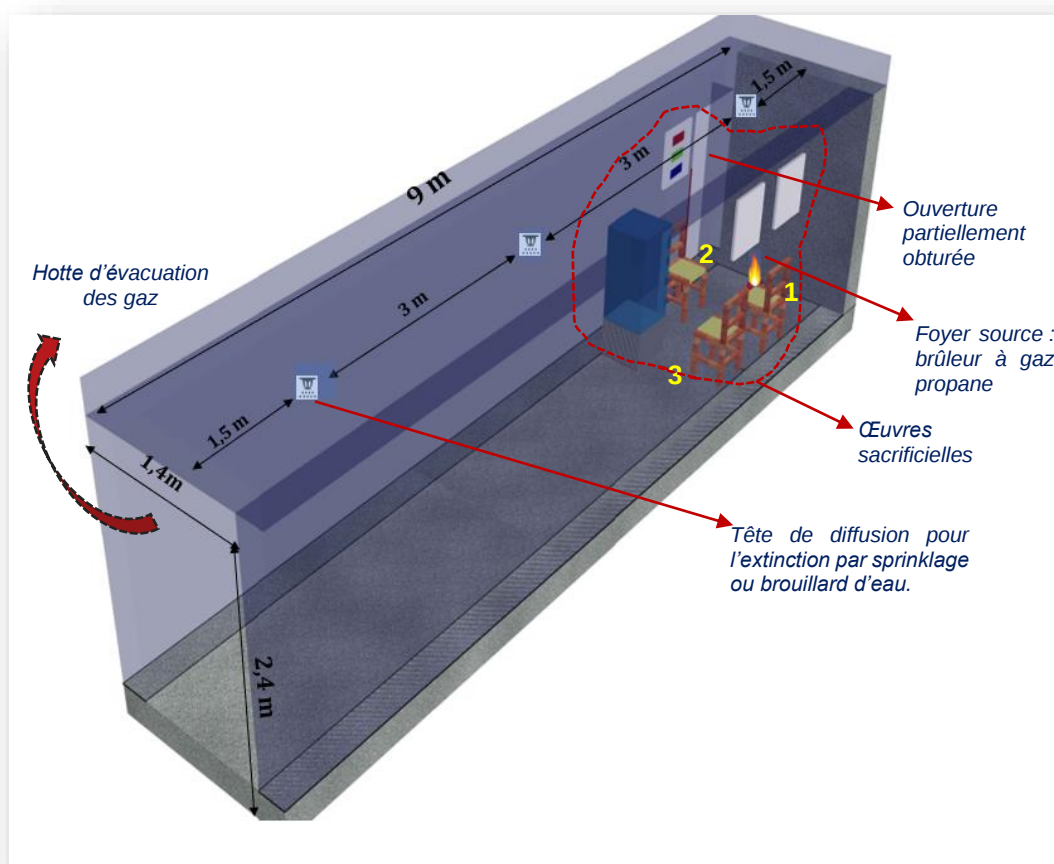


Figure 19 : Représentation du local corridor

(1,2, 3 indiquent les zones d'œuvres sacrificielles protégées ou non par des bâches ou couvertures d'un même fournisseur par numéro de zone)

5.2.1. Agencement des corridors

La figure ci-après montre les éléments disposés dans le corridor avec le détail de l'organisation et du contenu au niveau des collections.

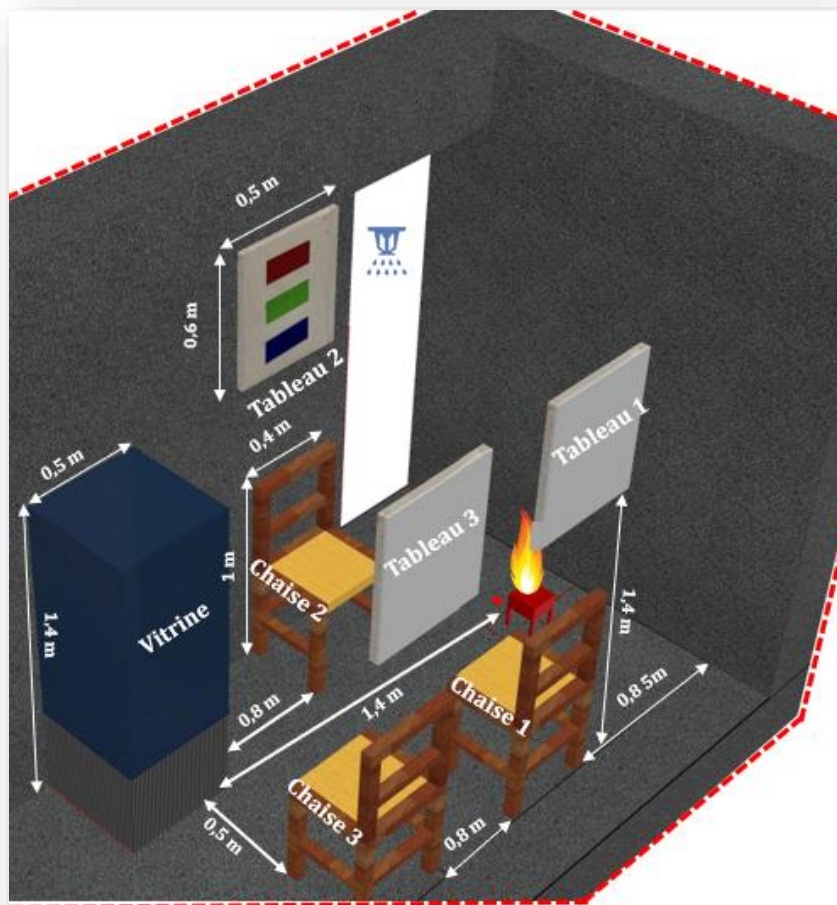


Figure 20 : Détails sur les dimensions des œuvres et leur agencement

Les bâches, housses ou couvertures sont adaptées à chaque typologie d'œuvre sacrificielle afin d'assurer une offre enveloppe des éléments associant des moyens de fermetures divers.

Les photos ci-dessous exposent les différentes configurations d'outils en fonction de l'œuvre à protéger.



Figure 21 : Protection des chaises avec couverture ou housse avant essai



Figure 22 : Protection des tableaux avec couverture ou housse avant essai

5.2.2. Conditions thermiques du milieu

Les conditions thermiques dans l'environnement du local pour chaque scénario incendie réalisé sont exposées en Annexe 5.

5.2.3. Evolutions des températures au niveau des collections et constats d'état

Les présentations suivantes montrent les différents relevés de température effectués au cours des essais feu au niveau des collections dans les 3 scénarios corridor.

5.2.3.1. Niveaux de température sur les collections

Des relevés de température entre l'œuvre et sa housse ou couverture de protection ont été effectués au cours du temps afin de montrer ce que peut subir l'œuvre dans un tel scénario. Des données de température extraites du rapport d'essai référencé [R7] sont exposées dans les figures du tableau ci-après.

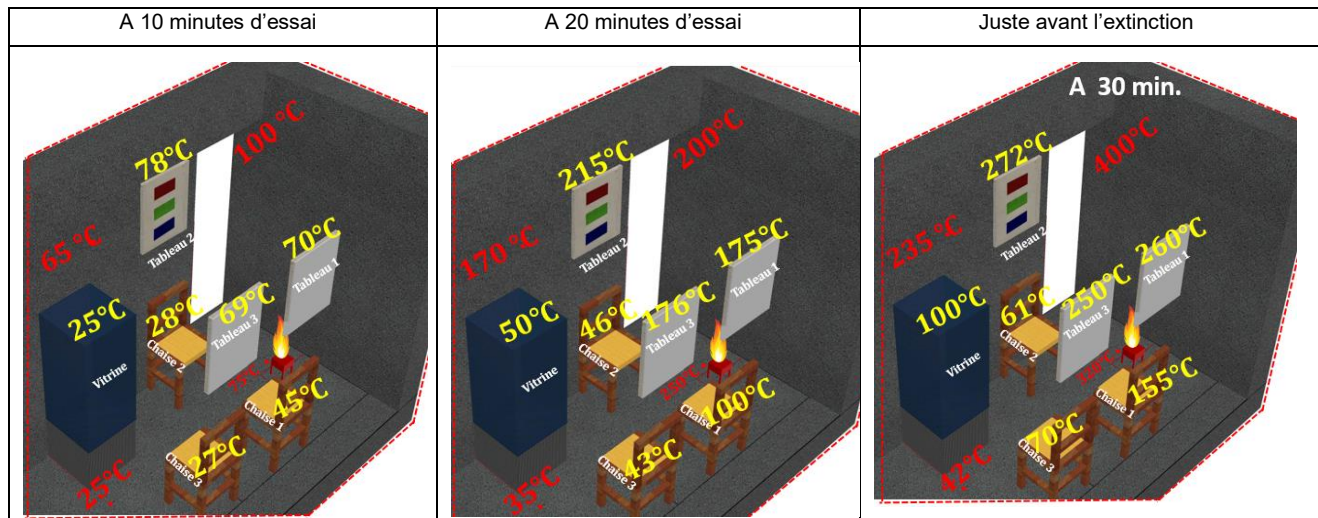
Tableau 5 : Relevés de température au niveau des œuvres protégées par housses/couvertures pour les scenarios corridor

	A 10 minutes d'essai	A 20 minutes d'essai	Juste avant l'extinction
Corridor avec sprinklage résidentiel	Diagram showing temperatures at 10 minutes for a corridor with residential sprinkler protection. Red temperatures (environment): 40°C, 49°C, 22°C. Yellow temperatures (protected area): 38°C, 36°C, 30°C, 22°C, 18°C, 19°C.	Diagram showing temperatures at 20 minutes for a corridor with residential sprinkler protection. Red temperatures (environment): 46°C, 90°C, 22°C. Yellow temperatures (protected area): 45°C, 41°C, 34°C, 24°C, 19°C.	Diagram showing temperatures just before extinction (A 51 min.) for a corridor with residential sprinkler protection. Red temperatures (environment): 73°C, 150°C, 21°C. Yellow temperatures (protected area): 76°C, 69°C, 58°C, 34°C, 21°C.
Corridor avec brouillard d'eau basse pression	Diagram showing temperatures at 10 minutes for a corridor with low-pressure water mist protection. Red temperatures (environment): 38°C, 50°C, 19°C. Yellow temperatures (protected area): 36°C, 33°C, 29°C, 18°C, 18°C.	Diagram showing temperatures at 20 minutes for a corridor with low-pressure water mist protection. Red temperatures (environment): 45°C, 80°C, 19°C. Yellow temperatures (protected area): 42°C, 39°C, 34°C, 20°C, 18°C.	Diagram showing temperatures just before extinction (A 43 min.) for a corridor with low-pressure water mist protection. Red temperatures (environment): 50°C, 100°C, 20°C. Yellow temperatures (protected area): 61°C, 56°C, 42°C, 27°C, 23°C.
Corridor sans extinction	Diagram showing temperatures at 10 minutes for a corridor without extinction protection. Red temperatures (environment): 65°C, 80°C, 23°C. Yellow temperatures (protected area): 58°C, 58°C, 58°C, 20°C, 20°C.	Diagram showing temperatures at 20 minutes for a corridor without extinction protection. Red temperatures (environment): 185°C, 200°C, 19°C. Yellow temperatures (protected area): 145°C, 115°C, 115°C, 58°C, 25°C.	Diagram showing temperatures just before extinction (A 30 min.) for a corridor without extinction protection. Red temperatures (environment): 250°C, 320°C, 45°C. Yellow temperatures (protected area): 265°C, 200°C, 195°C, 58°C, 54°C.

Les températures dans l'environnement sont notées en rouge, celles entre l'œuvre et la bâche, housse ou couverture sont en jaune

Le tableau suivant montre l'évolution des températures sans aucune protection passive sur les œuvres.

Tableau 6 : Relevés de température au niveau des œuvres sans aucune protection pour le scenario corridor témoin



Les températures dans l'environnement sont notées en rouge, celles entre l'œuvre et la bâche, housse ou couverture sont en jaune.

➤ Analyses des vitesses d'élévation de températures

Le tableau suivant rassemble l'évolution des températures durant l'essai qui sont relevées au niveau des œuvres à 10 minutes, 20 minutes et juste avant l'extinction pour chaque scénario incendie.

Tableau 7 : Elévation de température au niveau des œuvres

	Oeuvres	Température à 10 min.	Température à 20 min.	Température juste avant l'extinction	Elévation de la température en °C /min entre 10 et 20 min d'essai	Elévation de la température en °C/min entre 10 min et l'extinction
corridor avec sprinklage (extinction à 51 min)	Tableau 1	36	41	69	0.5	0.8
	Tableau 2	38	45	76	0.7	0.9
	Tableau 3	30	34	58	0.4	0.7
	Chaise 1	27	24	34	-0.3	0.2
	Chaise 2	18	19	24	0.1	0.1
	Chaise 3	18	19	21	0.1	0.1
corridor avec brouillard d'eau (extinction à 43 min)	Tableau 1	33	39	56	0.6	0.7
	Tableau 2	36	42	61	0.6	0.8
	Tableau 3	29	34	50	0.5	0.6
	Chaise 1	18	20	27	0.2	0.3
	Chaise 2	18	19	22	0.1	0.1
	Chaise 3	18	18	23	0	0.2
corridor sans extinction avec bâche (extinction à 30 min)	Tableau 1	50	115	200	6.5	7.5
	Tableau 2	58	145	265	8.7	10.4
	Tableau 3	50	115	195	6.5	7.3
	Chaise 1	30	58	100	2.8	3.5
	Chaise 2	24	36	34	1.2	0.5
	Chaise 3	21	25	57	0.4	1.8
	Vitrine	20	50	100	3	4.0
corridor sans extinction (extinction à 30 min)	Tableau 1	70	175	260	10.5	9.5
	Tableau 2	78	215	272	13.7	9.7
	Tableau 3	69	176	250	10.7	9.1
	Chaise 1	45	100	155	5.5	5.5
	Chaise 2	28	46	61	1.8	1.7
	Chaise 3	27	43	70	1.6	2.2
	Vitrine	25	50	100	2.5	3.8
	avec housse aluminisée (135 g/m²)					
	avec housse aluminisée (485 g/m²)					
	avec housse non aluminisée (450 g/m²)					
	avec housse aluminisée (680 g/m²)					

La détermination de vitesses d'élévation de température a été réalisée à partir de 10 minutes d'essai afin de sélectionner une séquence où il est estimé que les œuvres sacrificielles sont 'préconditionnées' dans l'ambiance de démarrage de l'incendie. Cette hypothèse étant appliquée à chaque cas pour permettre de faire des évaluations comparatives par rapport à un scénario témoin où aucune protection n'est mise en place. Il est constaté que pour les scénarios impliquant une extinction avec eau (sprinklage et brouillard d'eau), les vitesses d'élévation de température restent fortement réduites sans jamais excéder 2°C/min. Dans le cas d'une protection avec bâche/couverture, les vitesses d'élévation de température sont modérées et ne dépassent pas les valeurs de 8°C/min. Enfin, il est noté que le scénario témoin sans protection conduit à des vitesses d'élévation de température considérées élevées pour les œuvres se trouvant à plus de 1.2 m du sol, zone où les gaz chauds dépassent dès les premiers instants du démarrage de l'incendie 100°C après seulement 10 minutes jusqu'à aboutir à des niveaux de température proches de 400°C après 30 minutes d'essais.

5.2.3.2. Caractérisation des émissions chimiques et particulaires lors des essais échelle 1

Caractérisation des dépôts particulaires.

Des observations sur des fibres de quartz déposées dans les environnements ont permis d'évaluer le dépôt particulaire *Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10*).

Tableau 8 : Exemples de photographies des différentes fibres de quartz déposées dans les boîtes et sur les étages lors de l'incendie dans la réserve avec extinction par brouillard d'eau (R2)

	Avant incendie	Après incendie
R2A1 (Réserve 2 Boîte en carton pour archivage longue conservation 1)		
R2E4 (Réserve 2 Etagère 4)		

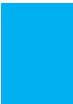
Tableau 9 : Récapitulatif des dépôts particulaires sur des fibres de quartz au cours des différents essais dans les réserves et les corridors

	Absence de collection (A) ou fibre non retrouvé (FNR)		Absence de particules visibles		1 à 3 particules visibles		3 à 10 particules visibles		Plus de 10 particules visibles
---	--	---	-----------------------------------	--	---------------------------	---	----------------------------	---	-----------------------------------

	Boîte en carton pour archivage longue conservation.				Boîte en polypropylène				Boîte en carton pour archivage intermédiaire				Etagères				Tiroirs			Peintures			Chaises		
	A1	A2	A3	A4	B 1	B2	B 3	B 4	C1	C2	C3	C4	E1	E2	E4	E5	T0	T1	T2	P1	P2	P3	CH1	CH2	CH3
Réserve 1	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+++	++	-	++	X	+	+	+++	+++	X	X	X	X
Réserve 2	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	++	+++	+++	++		-	-	+	+	X	X	X	X
Réserve 3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	+++	X	X	X	X	X	X	X	X
Corridor 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	+	+	+	+
Corridor 2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	-	-	*	+
Corridor 3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	++	++	++	+	+	+
Corridor 4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	+	++	++	+	-

* Liquide marron potentiellement issus de la bâche lorsqu'elle a été enlevée

Tableau 10 : Récapitulatif des dépôts particuliers sur les fibres de quartz au cours de l'essai dans le grand volume

	Absence de collection (A) ou fibre non retrouvé (FNR)		Absence de particules visibles		1 à 3 particules visibles		3 à 10 particules visibles		Plus de 10 particules visibles
VL	Vitrine Longue	VH	Vitrine Haute	VV	Vitrine Vide	MB	Meuble en bois	GT	Grand Tableau
P	Petit tableau	T	Tiroir	M	Milieu	HD	Haut Droite	BG	Bas Gauche

	VL_P1	VL_P2	VH_P3	VH_P4	MB_T1	MB_T2	MB dessus	VH_dessus	GT_M	GT_HD	GT_BG	VL_dessus	P 1	P2	P3	P4	VV_dessus
Grand Volume	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Concernant les essais dans les réserves, un dépôt particulaire est constaté pour les fibres de quartz se trouvant près de l'ampoule de sprinklage (ou brouillard d'eau) qui a éclaté. Pour les deux types d'extinction, il y a un dépôt plus important sur les fibres de quartz déposées sur les étagères. De plus, il est constaté qu'il y a plus de dépôt particulaire dans le cas d'une extinction par brouillard d'eau.

Globalement, les boîtes ont permis de limiter les dépôts particuliers, mais certaines ont été plus efficaces que d'autres. Par exemple, il est constaté que pour une extinction par sprinklage, les boîtes en polypropylène ont été plus efficaces que les boîtes en carton pour archivage longue durée, elles-mêmes plus efficaces que les boîtes en carton pour archivage intermédiaire. Dans le cas d'une extinction par brouillard d'eau, les boîtes en polypropylène et les boîtes en carton pour archivage longue durée ont eu la même efficacité.

Concernant les essais dans les corridors, l'essai avec le moins de dépôts particuliers est celui avec une extinction par sprinklage et présence de bâche, à l'inverse l'essai avec le plus de dépôts particuliers a été l'essai sans extinction. De légères traces ont été objectivées sur la peinture P1 et sur la peinture P3 avec une extinction par sprinklage (C2). Ces traces peuvent être apparues lorsque les bâches de protection ont été enlevées et que l'eau a ruisselé. Néanmoins, l'extinction par sprinklage et les bâches permettent de limiter les dépôts particuliers.

Dans le cas de l'essai sans extinction et sans bâche, il y a eu davantage de dépôts particuliers sur les fibres de quartz placés en hauteur (sur les tableaux).

Pour les essais avec extinction, les températures maximales atteintes sont inférieures à 100°C et pour les essais sans extinction, comme attendu, de plus hautes températures ont été atteintes. Concernant l'essai dans le grand volume, il y a eu davantage de dépôts pour les éléments situés en hauteur dans le fond de la pièce. Des dépôts particuliers ont également été observés à l'intérieur de la commode.

Caractérisation de la pollution chimique.

Les prélèvements d'air réalisés au cours des différents essais ont été analysés. Le laboratoire d'analyse du CSTB a réalisé un screening avec une limite d'identification à 1 µg/m³. Les COV issus des témoins ont été soustraits aux essais incendie, ainsi, il est possible de comparer les émissions chimiques issues de l'incendie pour chaque essai (Tableau 11).

Tableau 11 : VVOC, TVOC, SVOC émis lors des différents essais à échelle 1 (soustraction des émissions du témoin à celles de l'incendie)

	R1	R2	R3	C1	C2	C3	C4	GV
Protection				Oui	Oui		Oui	Oui
Extinction	Sprinklage	Brouillard		Brouillard	Sprinklage			
VVOC	0.0	12.0	25.5	0.0	40.1	10.6	4.8	0.0
TVOC	41.4	12.0	312.5	1153.1	68.1	0.4	401.6	0.0
SVOC	90.0	14.6	67.1	0.0	11.1	80.9	13.8	48.3

L'impact en termes de COV dépend des typologies et des protections utilisées. Il est constaté une variabilité des types de COV en fonction des scénarios :

- Les VVOC ont été les plus émis dans le corridor avec une extinction par sprinklage (C2) et la réserve sans extinction (R3).
- Les TVOC ont été les plus émis dans le corridor avec une extinction par brouillard d'eau (C1) et sans extinction avec présence de bâches (C4) et les réserves sans extinction (R3).
- Les SVOC ont été le plus émis dans les corridors sans extinction et sans bâche (C3) et la réserve sans extinction (R3).

Concernant les réserves, l'essai sans outils de protections actives a été le plus émissif en termes de TVOC et VVOC. Il semblerait que le sprinklage et le brouillard d'eau réduisent les émissions de ces deux types de composés. Cette observation pourrait être expliquée par la dissolution de ces composés dans l'eau. En revanche, l'essai dans la réserve avec une extinction par sprinklage a été plus émissive en SVOC que celui sans aucune protection, laissant penser qu'elle génère des SVOC.

Pour les corridors, la comparaison entre l'essai sans aucune protection (passive ou active) (C3) et celui avec les bâches de protection (C4) montre que la présence de ces protections passives engendre une augmentation des TVOC. En revanche, ces bâches s'accompagnent d'un abaissement des émissions de VVOC et de SVOC lorsqu'il n'y a pas de protections actives de type sprinklage ou brouillard d'eau. Une explication de cet abaissement de VVOC et de SVOC peut être que les bâches de protections empêchent l'émission issue des œuvres qu'elles protègent.

Ensuite, lorsque le brouillard d'eau est ajouté aux protections passives (comparaison entre C1 et C4), les émissions de VVOC et SVOC sont inhibées alors qu'il y a une génération plus importante de TVOC. Une explication de cet abaissement de SVOC peut être qu'ils se déposent davantage sur les bâches de protections et qu'ils sont donc moins retrouvés dans l'air. Comme pour les réserves, les VVOC pourraient se dissoudre dans l'eau. Dans les essais C2 et C4 où il y a des protections passives et où le sprinklage est testé à la place du brouillard d'eau, une réduction des TVOC et des SVOC est constaté alors qu'il y a une augmentation des VVOC.

Concernant le grand volume, il est plus difficile de conclure, car il constitue un milieu très dilué. En revanche, une émission de SVOC est constatée.

D'après ces résultats, il n'est pas possible ici d'associer les plus fortes émissions de composé à seulement un type d'extinction ou une typologie. Seules les protections passives ont eu pour conséquence de baisser les SVOC par rapport à la même situation sans extinction.

Caractérisation de la pollution particulière

L'émission des particules aéroportées lors d'un incendie a été évalué dans une réserve, dans un corridor ainsi que dans un grand volume.

Pour cela, un appareil GRIMM a été positionné à l'entrée de la réserve, du corridor et du grand volume avant et pendant l'incendie afin d'enregistrer les concentrations en PM 1, 2.5 et 10 sur un pas de temps de 6 s.

Les moyennes de l'émission de ces différentes tailles de particules sont résumées dans le Tableau 12.

Tableau 12: Résumé des concentrations moyennes observées dans les différents scénarios

	R1	R2	R3	C1	C2	C3	C4	GV
Protection				Oui	Oui		Oui	Oui
Extinction	Sprinklage	Brouillard		Brouillard	Sprinklage			
Incendie PM10	53	25	36	114	303	137	11	2
Extinction PM10	726	196	x	450	266	x	x	x
Incendie PM2.5	9	6	13	10	33	30	30	6
Extinction PM2.5	167	58	x	25	29	x	x	x
Incendie PM1	3	2	41	3	14	16	246	48
Extinction PM1	50	28	x	6	12	x	x	x

- Durant l'incendie :

- les corridors (à l'exception du C4) ont été les plus favorables aux PM10, suivie des réserves et enfin du grand volume. Cette tendance est la même pour les PM2.5 mais avec des concentrations similaires dans les réserves et le grand volume. Pour les PM1 cette tendance ne se retrouve pas avec comme ordre C4>GV>R3>C3=C2>R1=R2=C1.

- lorsque des bâches de protections sont ajoutées, pour les corridors, en comparant C3 et les autres essais corridors C1, C2 et C4, aucune tendance globale n'est observée pour les PM10 et pour les PM1, les PM2.5 restent similaires.

- L'extinction a généré dans les réserves des concentrations plus fortes de PM1, PM2.5 et PM10. Dans les corridors, cette augmentation est observée pour les PM10 mais les PM2.5 et PM1 restent stables.

Concernant les réserves, le sprinklage génère plus de particules (quelle que soit la taille), vient ensuite le brouillard d'eau. A l'inverse, concernant les corridors, le sprinklage génère moins de PM10 et plus de PM2.5 et PM1.

Les représentations graphiques de l'évolution des particules au cours des différents scénarios d'incendie dans la réserve sont présentées en Annexe 6 et Annexe 7.

Ces différentes représentations graphiques fournissent les informations suivantes :

-Réserve 1 : augmentation de la génération de l'ensemble des particules lors de l'extinction, avec une concentration en PM10 plus grande qu'une concentration en PM2.5 elle-même plus grande qu'une concentration en PM1. Cet effet est ponctuel, il est visible par une présence d'un pic à un même temps pour les différentes tailles de particules.

-Réserve 2 : augmentation de la génération de particule lors de l'extinction par brouillard d'eau, comme pour l'extinction par sprinklage la concentration en PM10 est supérieure à celle en PM2.5 qui est elle-même supérieure à celle en PM1. Cet effet dure plus longtemps, il est visible par la présence de 3 pics pour les différentes tailles de particules en fin d'essai.

-Réserve 3 : augmentation de l'ensemble des tailles de particules en fin d'essai, les concentrations des différentes tailles de particules se rejoignent approximativement.

-Réserve 3 bis : augmentation des PM10 tout au long de l'essai, les PM2.5 et PM1 n'augmentent qu'en fin d'essai.

Ces différents résultats permettent de constater les facteurs influant l'augmentation de la génération de particules sont :

-le type d'extinction : l'extinction par sprinklage génère davantage de particule sur un temps plus court qu'une extinction par brouillard d'eau.

-l'augmentation de la température, en effet, comme il est possible de constater dans les réserves 3 et 3 bis après avoir passé un certain seuil de température, les différentes tailles de particules sont générées.

Pour l'ensemble des essais les pics qui sont observés en début d'essai sont dus à l'allumage de l'incendie.

Un appareil GRIMM a été positionné à l'entrée du corridor tout au long de l'essai avec et sans incendie. Les extinctions se font par brouillard d'eau (corridor 1) qui dure 5 minutes et par sprinklage (corridor 2) qui dure 2 minutes, sans extinction et sans bâche de protection (corridor 3) et sans extinction et présence de bâche de protection (corridor 4).

Les représentations graphiques de l'évolution des particules au cours des différents scénarios d'incendie dans le corridor sont présentées en Annexe 8 et Annexe 9.

Dans tous les cas, les PM10 ont été les particules les plus aérosolisées par les incendies, suivies des PM2.5 puis des PM1. Les systèmes d'extinction ont provoqué une augmentation de la génération particulaire pour les réserves 1 et 2 ainsi que le corridor 1 (entre 87 et 94 % pour les réserves et entre 50 et 74% pour le corridor 1). Seul le corridor 2 a eu un abaissement ou une stabilisation suite à l'extinction. Les variations observées sont imputables aux différents scénarios mais aucune ne semble liée à un type d'extinction. Les corridors ont été plus favorables à la génération de particules durant l'incendie.

Pour finir, la génération de particules dans un grand volume a été étudié en plaçant un appareil GRIMM à proximité du grand volume

Pour les corridors :

Le corridor 1 : augmentation de la génération de particules en début d'essai et une augmentation en fin d'essai. Cependant, les PM10 sont générés tout au long de l'incendie.

Le corridor 2 : génération de particules PM10 tout au long de l'essai, pas d'augmentation particulière lors de l'extinction par sprinklage.

Le corridor 3 : génération de particules en début d'essai, notamment des plus grandes tailles, puis stabilisation tout le long de l'essai.

Le corridor 4 : Les mêmes observations que le corridor 3 ont été faite.

Ces résultats sont à prendre avec des précautions, car l'appareil de mesure se trouvait à une plus grande distance des têtes de sprinklages (ou de brouillard d'eau) et du brûleur par rapport à l'essai dans la réserve.

Pour le grand volume :

La représentation graphique de l'évolution des particules au cours de l'incendie est présentée en Annexe 10

Tout comme le corridor, les PM10 ont été générées tout au long de l'essai.

Dans tous les cas, les PM10 ont été les particules les plus aérosolisées par les incendies, suivies des PM2.5 puis des PM1.

5.2.3.3. *Constats d'état*

Les photographies suivantes présentent l'état des œuvres après essai. Des constats d'état réalisés par des restaurateurs ont été effectués afin d'estimer le degré de dégradation des œuvres suite aux différentes sollicitations impliquées dans le scénario d'incendie depuis son démarrage (agressions thermiques) jusqu'à son extinction (agression par l'eau).

i. Œuvres soumises au scénario incendie sans aucune protection

Tableau 13 : Photographies et constat d'état des œuvres sacrificielles sans protection (scénario témoin)

Œuvres	Référence 1*	Référence 2*	Référence 3*
Tableaux 	 	 	 
Chaises 			

*Voir figure 11 agencement

Tableau 14 : Photographies de la vitrine sans protection (scénario témoin)

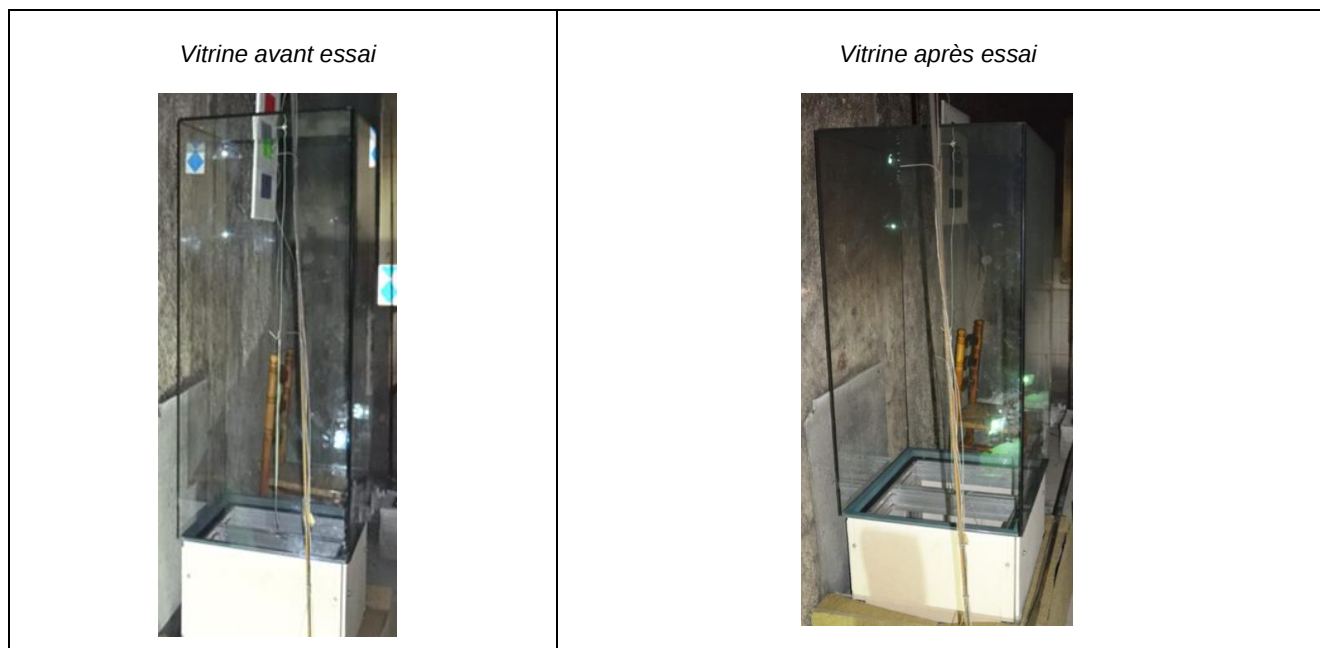


Tableau 1 (proche du brûleur)

Aspect très détérioré : les informations de couleur ont été profondément modifiées (assombrissement certain du rouge, brunissement très foncé du vert) voire annulées (transformation du bleu en noir profond). Il ne s'agit pas d'un dépôt de surface (encrassement) mais d'une modification du vernis qui a grisé et des couleurs dans leur épaisseur : les cotons de décrassage sont très peu ou pas teintés. Sur le vert, la peinture et vernis s'effritent sous le trait de crayon marquant le test de décrassage : perte de plasticité, tendance au clivage entre les deux couches. La couleur s'est diffusée autour de la zone peinte (halo local). Le plot de mastic/colle du revers (servant à coller un thermocouple) a induit une déformation très importante du support. Le vernis comporte des zones de matités/brillance hétérogènes, des zones plus ou moins grises en fonction des points d'accrochage et de l'impact protecteur du châssis (les traverses ont marqué par endroit). Le revers de la toile et les montants du châssis sont irrégulièrement roussis. Exsudats de résine fondue en plusieurs endroits, jusqu'à l'ébullition.

Tableau 2 (proche brûleur et porte accès réserve)

Aspect nettement détérioré : l'assombrissement du tableau est généralisé, le fond est gris soutenu, les couleurs sont modifiées. Il ne s'agit pas d'un dépôt de surface (encrassement) mais d'une modification du vernis et des couleurs dans leur épaisseur. Le vert s'est détérioré : il dégorge nettement sur le coton, il a « bavé » sur les contours de la zone. Une cloque en forme de boucle semble correspondre à un gonflement de la matière localement posée en surépaisseur. Le rouge laisse des micro-pertes de matières sur le coton : il est fragile et cassant sur les crêtes des coups de pinceau. Le plot de mastic/colle du revers (servant à coller un thermocouple), peu épais, a produit une légère déformation. Le vernis comporte des zones plus ou moins grises en fonction des points d'accrochage et de l'impact protecteur du châssis (les traverses ont marqué par endroit). Le revers de la toile et les montants du châssis sont irrégulièrement roussis et noircis de suie de manière hétérogène.

Tableau 3 (éloigné du brûleur)

Aspect nettement détérioré : l'assombrissement du tableau est généralisé, le fond est gris soutenu, les couleurs sont modifiées. Il ne s'agit pas d'un dépôt de surface (encrassement) mais d'une modification du vernis et des couleurs dans leur épaisseur. Le vert s'est détérioré : il dégorge nettement sur le coton, il a « bavé » sur les contours de la zone. Une cloque en forme de boucle semble correspondre à un gonflement de la matière localement posée en surépaisseur. Le rouge laisse des micro-perles de matières sur le coton : il est fragile et cassant sur les crêtes des coups de pinceau. Le plot de mastic/colle du revers, peu épais, a produit une légère déformation. Le vernis comporte des zones plus ou moins grises en fonction des points d'accrochage et de l'impact protecteur du châssis (les traverses ont marqué par endroit).

Le revers de la toile et les montants du châssis sont irrégulièrement roussis et noircis de suie de manière hétérogène.

Chaise 1 (proche du brûleur)

Sur le châssis bois, il est noté : 30% de bois consommé au niveau des pieds. Pas de désassemblage des éléments. Un taux de noircissement global de 3 sur une échelle de 5.

Sur l'assise paille, il est noté : un dépôt de 10% de suie sur la surface. Pas de destruction ni de perte de cohésion, mais une perte de tension de 1 sur une échelle de 5. Enfin, il est relevé un léger noircissement global de l'assise et une perte d'intensité de sa couleur de 1 sur une échelle de 4.

Chaise 2 (proche brûleur et porte accès réserve)

Sur le châssis bois, il est noté : 30% de bois consommé au niveau des pieds. Pas de désassemblage des éléments. Un taux de noircissement global de 3 sur une échelle de 5.

Sur l'assise paille, il est noté : un dépôt de 30% de suie sur la surface. Pas de destruction, mais une perte de cohésion et de tension de 2 sur une échelle de 5. Enfin, il est relevé un léger noircissement global de l'assise (1/5) et une perte d'intensité de sa couleur de 2 sur une échelle de 4.

Chaise 3 (proche brûleur et porte accès réserve)

Sur le châssis bois, il est noté : le bois n'est pas consommé au niveau des pieds. Pas de désassemblage des éléments et pas de noircissement. Petite altération au niveau du vernis (petits cloquages au niveau du film de vernis)

Sur l'assise paille, il est noté : un dépôt de 10% de suie sur la surface. Pas de destruction, ni de perte de cohésion et de tension. Enfin, il est relevé une perte d'intensité de sa couleur de 2 sur une échelle de 4.

Vitrine

Quelques bulles à l'intérieur du vitrage en partie haute. Joints très légèrement décollés. Aspect peu dégradé.

ii. Œuvres soumises aux scénarios incendie avec protection

Tableau 15 : Photos et constats d'état des tableaux après essais pour housse aluminisée (135 g /m²)

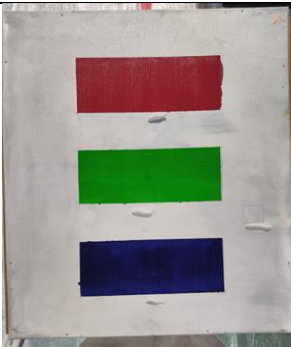
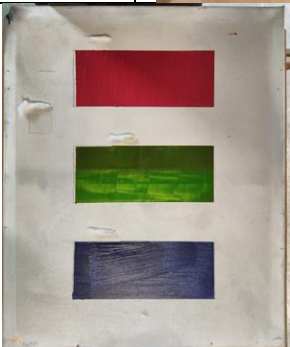
Après essais	Scénario avec sprinklage	Scénario avec brouillard d'eau	Scénario sans extinction
Avec couverture			
Face peinte			
Contre face			
Constat	Bon état général, légère empoussièrément	Bon état général. Très peu encrassé, légèrement empoussiéré.	L'attaque du feu est particulièrement hétérogène : très vif en partie basse jusqu'à carboniser un angle du châssis, avec gouttes de résine fondue, et brunir la toile au revers, mais avec des traces beaucoup plus légères en partie haute (le revers de toile est très peu coloré). Les couleurs se sont toutes assombries, et plus particulièrement le vert qui a bruni en moitié inférieure. Il dégorge au test de décrassage. Une matière non identifiée a fondu au revers et s'est déposée sur la traverse centrale

Tableau 16 : Photos et constat d'état des tableaux après essais pour housse aluminisée (485 g /m²)

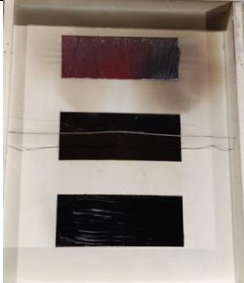
Après essais	Scénario avec sprinklage	Scénario avec brouillard d'eau	Scénario sans extinction	
Avec couverture				
Face peinte				
Contre face				
Constat	Bon état général, légère empoussièrement.	Bon état général. Très peu encrassé, légèrement empoussière.	L'attaque du feu est particulièrement sévère, la partie supérieure de la toile est complètement « cuite », jusqu'au noir au revers et brun sur la face. Un choc de manipulation a fait éclater le tableau en multiples déchirures complexes. La toile se « découpe » sur le bord supérieur du rectangle rouge. Elle est très distendue et affaissée sur le reste de la surface, pliée sur le bord de la traverse centrale. Contrairement aux autres séries qui ont plutôt grisé, la toile ici a jauni ou bruni. On note les zones d'accrochage (pourtour) restées blanches. Les couleurs se sont toutes considérablement assombries, y compris le rouge. Le bleu et le vert sont méconnaissables, (noir et brun). Le vert a diffusé autour du rectangle. Le châssis est fortement voilé.	

Tableau 17 : Photos des tableaux après essais pour housse non aluminisée (450 g /m²)

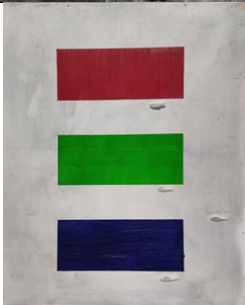
Après essais	Scénario avec sprinklage	Scénario avec brouillard d'eau	Scénario sans extinction	
Avec couverture				
Face peinte				
Contre face				
Constat	Bon état général, légère empoussièrement	Bon état général. Très peu encrassé, légèrement empoussiéré.	La toile est légèrement jaunie sur la totalité de sa surface (sauf les zones d'accrochage), avec la marque grise de la traverse centrale. Les couleurs sont modifiées, spécialement le vert en partie bruni et le bleu un peu assombri. Le vert dégorge au décrassage. Les cotons de décrassage sont très peu sales : la coloration est intrinsèque au feuil peint. Le châssis est fortement voilé.	

Tableau 18 : Photos et constat d'état des chaises après essais pour housse aluminisée (135 g /m²)

Après essais	Scénario avec sprinklage	Scénario avec brouillard d'eau	Scénario sans extinction
avec couverture			
Après retrait de la couverture	 	 	 
Constat	Très légère trace de suie sur assise	Très légère trace de suie sur assise	Zone consommée au niveau du châssis inférieur à 15%. Trace de suie sur assise sur environ 0.5 % de la surface.

Tableau 19 : Photos et constat d'état des chaises après essais pour housse aluminisée (485 g /m²)

Après essais avec couverture	Scénario avec sprinklage	Scénario avec brouillard d'eau	Scénario sans extinction
			
Après retrait de la couverture	 	 	 
Constat	Trace de coulures et taches type gouttelettes (suie + eau). Trace de suie sur assise sur environ 30 % de la surface. Déformation de la paille liée à une présence d'eau et de chaleur.	Trace de suie sur assise sur environ 30 % de la surface.	Trace de suie fine sur assise sur environ 5 % de la surface.

Tableau 20 : Photos et constat d'état des chaises après essais pour housse aluminisée (680 g /m²)

Après essais avec couverture	Scénario avec sprinklage	Scénario avec brouillard d'eau	Scénario sans extinction
			
Après retrait de la couverture	 	 	 
Constat	Trace de suie sur assise sur environ 15 % de la surface.	Trace de suie sur assise sur environ 15 % de la surface.	Trace de suie fine sur assise sur environ 5 % de la surface.

Tableau 21 : Photos de la vitrine avec protection sans extinction automatique

<i>Avant essai</i> 	<i>Après essai</i>  <i>Changement de coloration intérieure de la housse, partie supérieure.</i>
	
<i>Constat</i>	<i>Jaunissement dans le vitrage en partie supérieure avec formation de bulles. Décollement des joints et décrochement de la façade mobile</i>

5.2.4. Bilan scénario corridor

Corridor sans aucune protection

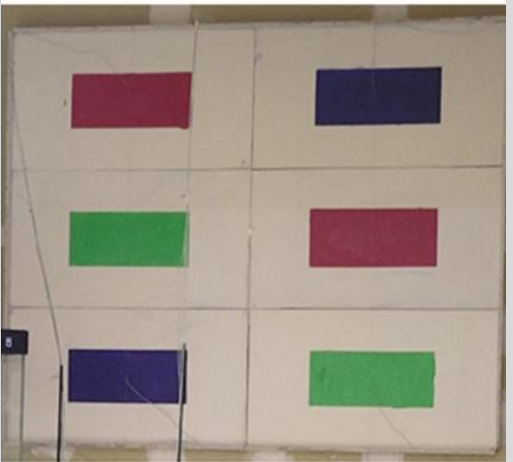
Les œuvres sont globalement altérées par les effets de l'incendie à des degrés plus ou moins importants en fonction de leur position par rapport au foyer source.

Corridor avec protection

Les œuvres sont globalement peu altérées par les effets de l'incendie :

- ✓ Le couplage protection passive et extinction automatique n'implique ici aucune dégradation majeure des œuvres. Celles -ci ont été évacuées juste après l'extinction et placées dans un local sec pour éviter tout développement potentiel de moisissure.
- ✓ La protection passive seule permet ici de limiter les dégradations de l'œuvre sous réserve que cette protection puisse envelopper le plus entièrement possible la zone à protéger. En effet, un entrebâillement de la housse ou de la couverture au niveau de l'œuvre favorise un piégeage des gaz chauds. Ce phénomène peut alors entraîner une altération accélérée de l'œuvre.
- ✓ Enfin, les éléments de fermeture de la bâche ou de la couverture de protection constitués de matériau thermofusible et/ou inflammable ajoutent un risque supplémentaire d'altération.

Tableau 22 : Photos des œuvres sacrificielles protégées par housse et couverture.

Grand tableau		
Vitrine		
Commode		

L'installation des outils de protection a été réalisée avant le démarrage du brûleur. Les méthodes de pose diffèrent en fonction de la typologie de l'œuvre. Le tableau ci-dessous rassemble les photos de mise en place ainsi que les supports nécessaires à cette action avec les temps associés.

Grand tableau		✓ Utilisation d'escabeau/échelle de hauteur suffisante ✓ Assistance possible avec l'aide de perche ✓ 3 personnes ✓ Temps (hors rassemblement des supports de pose) : 17 min.
Vitrine haute		✓ Utilisation d'escabeau/échelle de hauteur suffisante ✓ 2 personnes ✓ Temps (hors rassemblement des supports de pose) : 2 min. 42s
Meuble bas		✓ 2 personnes ✓ Temps (hors rassemblement des supports de pose) : 53 s

5.3.2. Conditions thermiques du milieu

Les conditions thermiques dans l'environnement proche des œuvres protégées sont présentées en Annexe 11.

5.3.3. Evolution des températures au niveau des collections et constats d'état

5.3.3.1. Niveaux de température sur les collections

Des relevés de température entre l'œuvre et sa housse ou couverture de protection ont été effectués au cours du temps afin de montrer ce que peut subir l'œuvre dans un tel scénario. Des données de température extraites du rapport d'essai référencé [R7] sont exposées dans la figure ci-après.

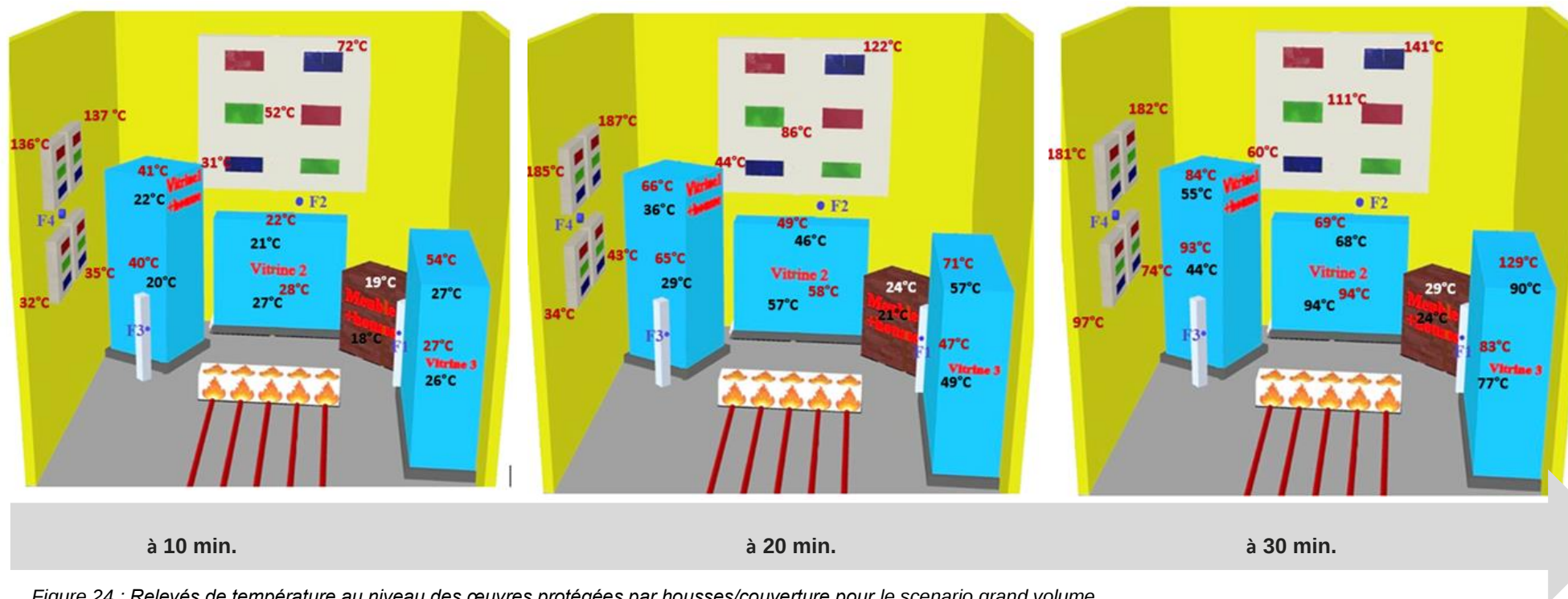


Figure 24 : Relevés de température au niveau des œuvres protégées par housses/couverture pour le scenario grand volume

➤ Analyses des vitesses d'élévation de température

Le tableau suivant rassemble l'évolution des températures durant l'essai relevées à 10 minutes, 20 minutes et juste avant l'extinction au niveau des œuvres.

Tableau 23 : Elévation de température au niveau des œuvres protégées

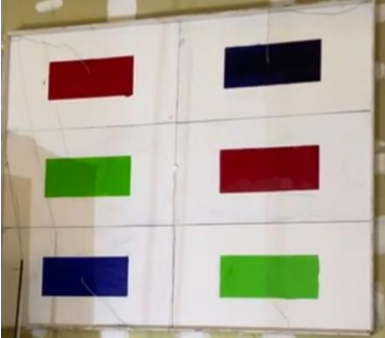
	Oeuvres	Température à 10 min.	Température à 20 min.	Température juste avant l'extinction	Elévation de la température en °C /min entre 10 et 20 min d'essai	Elévation de la température en °C/min entre 10 min et l'extinction
Avec protection	Grand tableau	72	122	141	5	3.5
	Vitrine	41	66	93	2.5	2.6
	Meuble	19	24	29	0.5	0.5
	avec housse aluminisée (135 g/m²)					
	avec housse aluminisée (485 g/m²)					
	avec housse non aluminisée (450 g/m²)					
	avec housse aluminisée (680 g/m²)					

Il est constaté que les vitesses d'élévation de température restent fortement réduites sans jamais excéder les 2°C/min seulement dans le cas du meuble bas protégé par une housse. Pour le grand tableau et la grande vitrine, les vitesses d'élévation de température sont modérées et ne dépassent pas les valeurs de 8°C/min comparativement à ce qui est observé dans le scénario corridor sans protection où les vitesses des élévations de température considérées sur les tableaux non protégés peuvent dépasser les 9°C/min.

5.3.3.2. Constats d'état

Les photographies suivantes présentent l'état des œuvres après essai. Des constats d'état réalisés par des restaurateurs ont été effectués afin d'estimer le degré de dégradations des œuvres suite aux différentes sollicitations impliquées dans le scénario d'incendie depuis son démarrage (agressions thermiques) jusqu'à son extinction (agression par l'eau).

Le tableau ci-après rassemble les photos et constat des éléments protégés après essais feu.

	Tableau	Vitrine	Commode
Avec protection			
Après retrait de la protection	 	  	    
Constat d'état	L'ensemble est en bon état, tant au niveau des couleurs que du support. La toile au revers présente quelques traces grises ou noires légères qui ont pu être provoquées lors des manipulations post-incendie. Certaines couleurs paraissent très empoussiérées par rapport à l'ensemble (le vert en bas à droite, les 2 bleus...), le vert marquant les petites poussières de suie noires, les bleus des poussières ou fibres blanches. Le bleu en haut à droite comporte une griffure verticale. Le vert en bas à droite et le rouge du milieu présentent des taches ou traces (griffures) plus sombres.	Décollement localisé sur joint avec jaunissement en partie haute côté mur * Coloration face intérieur de la housse partie supérieure, haut de vitrine et face extérieure, partie inférieure rabat sol près des sacs de lestage.	Aucune dégradation observées sur la commode.

5.3.4. Bilan grand volume

Sans aucune protection

Les éléments /œuvres peuvent être altérés par les effets de l'incendie (petits tableaux positionnés en hauteur ou vitrine avec capotage en métallique).

Avec protection

Les éléments/œuvres sont globalement peu altérés par les effets de l'incendie.

La protection passive seule permet ici de limiter les dégradations sous réserve que cette protection puisse envelopper le plus entièrement possible la zone à protéger. En effet, un entrebâillement de la housse ou de la couverture au niveau de l'œuvre favorise un piégeage des gaz chauds. Ce phénomène peut alors entraîner une altération accélérée de l'œuvre.

6. MESURES DE PREVENTION ET DE PROTECTION

6.1. Fiches de préconisation incendie

Des fiches de préconisation incendie ont été élaborées afin de rassembler les principaux éléments de l'étude permettant d'améliorer la gestion du risque et de guider sur les points de vigilance et les recommandations à suivre :

- Fiche pour corridor -sprinklage + protection passive [R8]
- Fiche pour corridor -brouillard d'eau + protection passive [R9]
- Fiche pour corridor -sans extinction + protection passive [R10] [R12]
- Fiche pour grand volume-sans extinction + protection passive [R11]
- Fiche pour réserve -sprinklage [R12]
- Fiche pour réserve -brouillard d'eau [R9][R13]

L'objectif est d'avoir à disposition un support servant de guide dans l'élaboration des plans de sauvegarde des biens culturels dans le cas de risque incendie.

Ces fiches sont le reflet de l'étude actuelle avec les scénarios incendie sélectionnés. Elles peuvent évoluer en fonction des projets à venir dans le domaine de la protection des œuvres vis-à-vis de l'incendie.

6.2. Limites

L'évaluation des outils de protection passive telles que les bâches, les housses et couvertures permet de mettre en avant leur efficacité à protéger l'œuvre vis-à-vis des effets directs de l'incendie liés au rayonnement et aux gaz chauds.

Les potentiels effets collatéraux sur les œuvres, liés aux émissions des COV et COSV, au passage d'aérosol ainsi que ceux dus à l'eau et la vapeur d'eau issues de l'extinction du feu ne sont pas caractérisés directement à travers les dégradations observées sur les œuvres

Il serait nécessaire de connaître les critères de vulnérabilité prépondérants pour chaque typologie d'œuvre afin de choisir le meilleur outil de protection en fonction de ces seuils de vulnérabilité pour réduire le risque d'impact des effets collatéraux sur l'œuvre.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude menée sur les outils de protection des œuvres patrimoniales a permis d'apporter auprès de la FNSPF les éléments demandés suivants :

- ❖ **Un panorama** des différents outils de protection passive et active pour les œuvres patrimoniales dans le cas d'un risque incendie.
- ❖ **Des protocoles de caractérisation** en laboratoire des outils de protection passive type bâche, housse ou couverture. Ces caractérisations portent sur :
 - l'évaluation du transfert de température à travers l'outil face à un rayonnement thermique afin de qualifier ses propriétés d'écran thermique temporaire pour l'œuvre à protéger.
 - l'évaluation des émissions types COV et COSV sous différentes températures afin d'identifier la nature chimique des composés émanant de ces outils qui potentiellement peuvent présenter un caractère agressif pour l'œuvre à protéger.
- ❖ **Des essais feu échelle 1 démonstrateurs** permettant de voir l'efficacité des outils de protection passive couplés ou non avec une protection active.

L'étude montre que l'outil de protection passive bâche, housse ou couverture à base de fibres de verre avec un revêtement aluminisé ou non peut être efficace pour la protection de l'œuvre patrimoniale. Pour que cette efficacité soit optimale, il est primordial de suivre certaines préconisations et de s'adapter en fonction de la typologie de l'œuvre patrimonial ainsi que de l'environnement muséal considéré. Dans certains cas, le couplage de l'outil de protection passive avec l'extinction automatique par sprinklage résidentiel ou brouillard d'eau basse pression peut s'avérer encore plus efficace sous réserve de respecter certains points de vigilance mentionnés ci-après. Il reste à souligner que la durée de mise en place de l'outil de protection au démarrage de l'incendie est un critère prépondérant pour assurer le maintien de conditions tenables pour l'œuvre à protéger temporairement en attendant l'arrivée des secours.

Dans le cas particulier des réserves, l'extinction automatique reste un outil efficace pour limiter les dégâts causés par l'incendie. En revanche, il est indispensable de mettre en place certaines installations spécifiques comme des conduites d'eau adaptées, des systèmes de mise sous pression dans le cas du brouillard d'eau, etc..., qui peuvent être lourdes à supporter financièrement pour les petites structures. Il est aussi nécessaire de mettre en place une organisation pour la gestion des dégâts collatéraux générés par l'eau et la vapeur d'eau dus à l'extinction. Dans ces conditions, les boîtes de conservation semblent être un moyen indirect pour préserver de façon temporaire les collections les plus sensibles à l'eau en attendant leur évacuation.

Dans ce cadre, l'analyse des résultats d'essai avec différents scénarios feu a permis de construire des fiches de préconisation qui résument l'ensemble des cas étudiés et proposent des recommandations au niveau des systèmes de surveillance à mettre en place, de l'agencement des espaces muséaux et du positionnement des œuvres pour permettre l'installation des outils de protection mais également au niveau de l'outil lui-même. En effet, l'outil doit être adapté à son environnement et aux dispositifs de sécurité existants. Par exemple, il est mis en avant la nécessité d'une surface aluminisée lorsque l'environnement n'est pas doté d'un système d'extinction active ou bien la nécessité d'avoir des housses ou couvertures imperméables à l'eau dans le cas de la présence d'un système d'extinction automatique avec de l'eau. Ces points de vigilance sont bien sûr à adapter en fonction du contexte muséal et de la typologie des œuvres patrimoniales le constituant.

Il est donc important de pouvoir approfondir certains aspects de la caractérisation des bâches, housses ou couvertures de protection. Ainsi, la détermination de leur perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau constitue ici un élément de qualification important. D'autres aspects ont été également évoqués par les acteurs du patrimoine et les fabricants d'outils eux même comme la durabilité des produits au cours du temps sous deux aspects :

- le maintien des propriétés de l'outil après des conditions stockage longue durée
- le maintien des propriétés de l'outil après plusieurs manipulations lors des exercices (par exemple pliage et dépliage des couvertures/housses de très grandes dimensions)

La résistance mécanique de ces protections passives n'a pas été éprouvée dans le cas d'une contrainte générée par la pression de l'eau, notamment dans le cas d'utilisation d'extincteur manuel qui représente un outil couramment employé lors de l'intervention sur un démarrage de feu. Une prise en compte des contraintes environnementales intégrant l'accessibilité des œuvres à protéger est également à intégrer dans les réflexions sur l'amélioration de la mise en œuvre de ces outils afin de réduire au maximum leur temps d'installation et de permettre d'assurer une enveloppe protectrice la plus couvrante possible.

Le schéma suivant illustre les performances essentielles que doit posséder l'outil de protection passive au regard de la sensibilité de l'œuvre à protéger.

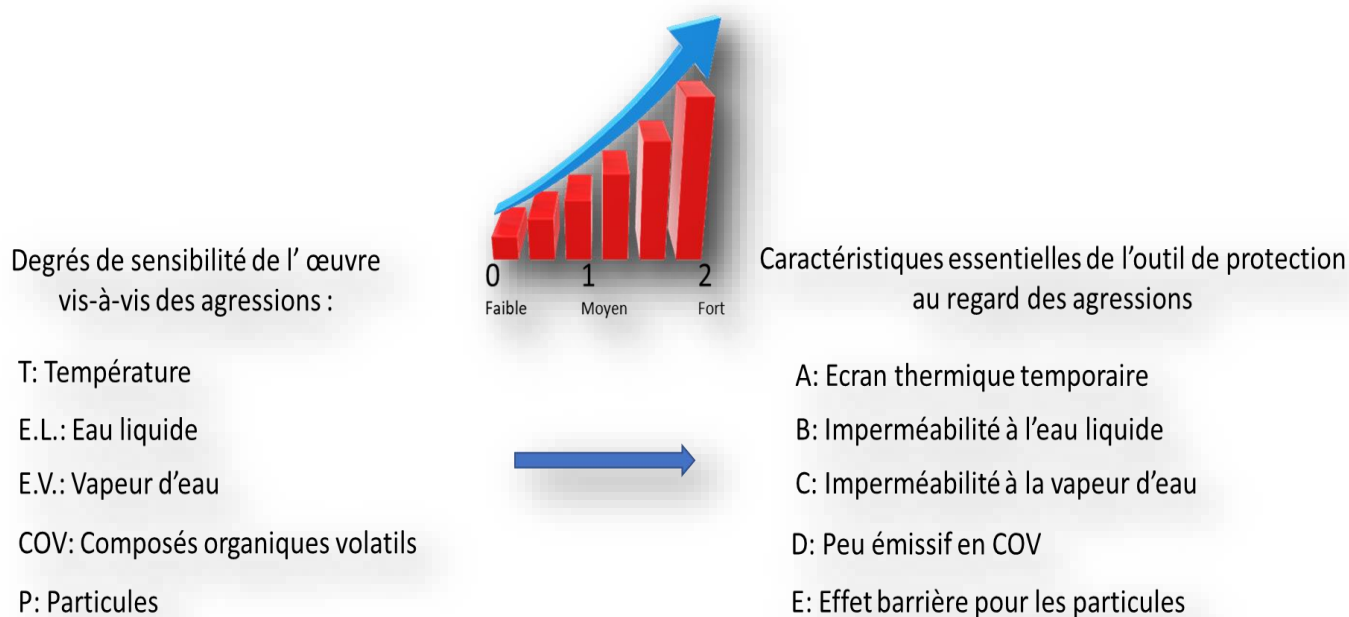


Figure 25 : sensibilité de l'œuvre et caractéristiques essentielles de l'outil de protection associé

Ainsi, sur la base de l'illustration en figure 25, un exemple de combinaison pourrait être donné comme suit :

Degrés de Sensibilité de l'œuvre	Caractéristiques essentielles requises pour l'outil
T=2 ; E.L.=1 ; E.V.=1 ; COV=0 ; P=0	A ; B et C

Cela signifie que l'outil doit montrer des performances répondant à ces caractéristiques grâce à un programme d'évaluation en laboratoire, basé sur des protocoles éprouvés, comme ceux développés dans le cadre de cette étude afin qu'il puisse être associé à l'œuvre considéré dans cet exemple.

L'aide au choix pour adapter la protection vis-à-vis de l'œuvre et de son environnement doit s'appuyer sur les propriétés des outils.

Une présentation du niveau de performances des outils utilisés spécifiquement dans cette étude est exposée ci-dessous. Elle s'appuie sur les résultats relatifs aux caractéristiques déterminées par les essais en laboratoire.

Caractéristiques/ Outils	A	D		
	Ecran thermique	COV très volatils (COTV)	COV totaux C6 à C16 (COVT)	COV semi volatils C >16 (COSV)
Couverture aluminisée, 135 g/m ² / (Op1)	++	+/-	+/-	+/-
Housse aluminisée, 485 g/m ² / (Op2)	++	+/-	-	-
Housse non aluminisée, 450 g/m ² / (Op3)	+/-	-	-	+/-
Housse aluminisée, 680 g/m ² / (Op3_alu)	+	+/-	+/-	+/-

++ = bon niveau de performance pour écran thermique ou peu émissif en COV

+/- = Niveau moyen de performance pour écran thermique ou moyennement émissif en COV

- = faible niveau de performance pour écran thermique ou fortement émissif en COV

Il est à noter que les caractérisations de performance liées à l'imperméabilité à l'eau et à l'effet barrière pour les particules n'ont pas été réalisées dans cette étude.

Il apparaît donc important d'acquérir des connaissances au niveau des seuils de vulnérabilité des œuvres pour pouvoir adapter efficacement l'outil à l'œuvre. A l'heure actuelle très peu de données sur les seuils de vulnérabilité des œuvres patrimoniales sont accessibles. Ce travail est considérable au regard de la diversité des œuvres existantes cependant nécessaire pour acquérir, au moins dans un premier une approche de valeurs seuils par typologie d'œuvre comme les peintures inamovibles ou bien les matériaux très poreux présentant une irréversibilité aux salissures par les suies par exemple.

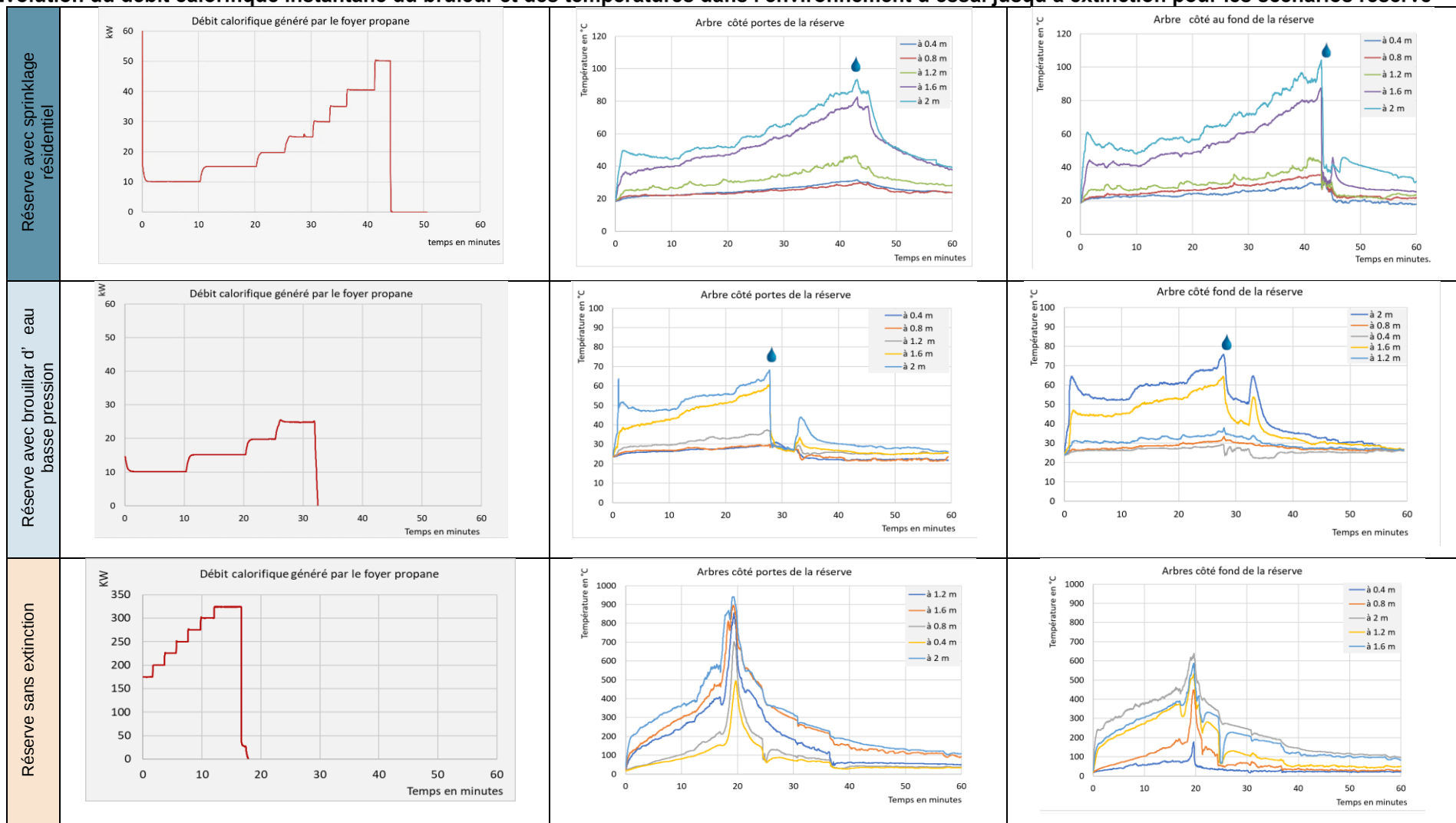
Ces données pourraient ensuite être placées dans une base de données à alimenter au cours des différentes études réalisées dans ce domaine.

Dans cet optique, le CSTB en partenariat avec le LRMH et le C2RMF encadre une thèse de doctorat portant sur la vulnérabilité des peintures de chevalet et peintures murales vis-à-vis des effets de l'incendie. Ce travail de recherche sur 3 ans a démarré en octobre 2022. Il permettra de développer des méthodologies expérimentales pour accéder à ces valeurs seuils d'acceptabilité des œuvres face aux différents critères de l'incendie tels que le rayonnement thermique, les températures, les émissions chimiques, les aérosols, l'eau etc...De plus, il fournira des données sur la vulnérabilité de certains pigments et systèmes de peinture retrouvés dans des tableaux historiques.

Annexe 1 : Références bibliographiques

- [R1]** Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie. Rapport état de l'art n° 26089176.
- [R2]** ISO 5660-1 Essais de réaction au feu-Débit calorifique, taux de dégagement de fumées et taux de perte de masse-Partie 1 Débit calorifique (méthode au calorimètre à cône) et taux de dégagement de fumée (mesurage dynamique), 2015
- [R3]** Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie. Rapport d'essais n° 26089176/A (calorimètre à cône)
- [R4]** Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie. Rapport Etude numérique° 26089176
- [R5]** Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie. Rapport d'essais n° 26089176/B (Réserve)
- [R6]** Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie. Rapport d'essais n° 26089176/C (Corridor)
- [R7]** Etude sur les outils destinés à la protection des œuvres patrimoniales en cas d'un risque incendie. Rapport d'essais n° 26089176/D (grand volume)
- [R8]** Fiche n°1_PROTECTION INCENDIE CORRIDOR, CSTB
- [R9]** Fiche n°2_PROTECTION INCENDIE CORRIDOR, CSTB
- [R10]** Fiche n°3_PROTECTION INCENDIE CORRIDOR, CSTB
- [R11]** Fiche n°4_PROTECTION INCENDIE GRAND VOLUME
- [R12]** Fiche n°5 _ PROTECTION INCENDIE RESERVE
- [R13]** Fiche n°6 _PROTECTION INCENDIE RESERVE

Annexe 2 : Evolution du débit calorifique instantané du brûleur et des températures dans l'environnement d'essai jusqu'à extinction pour les scénarios réserve



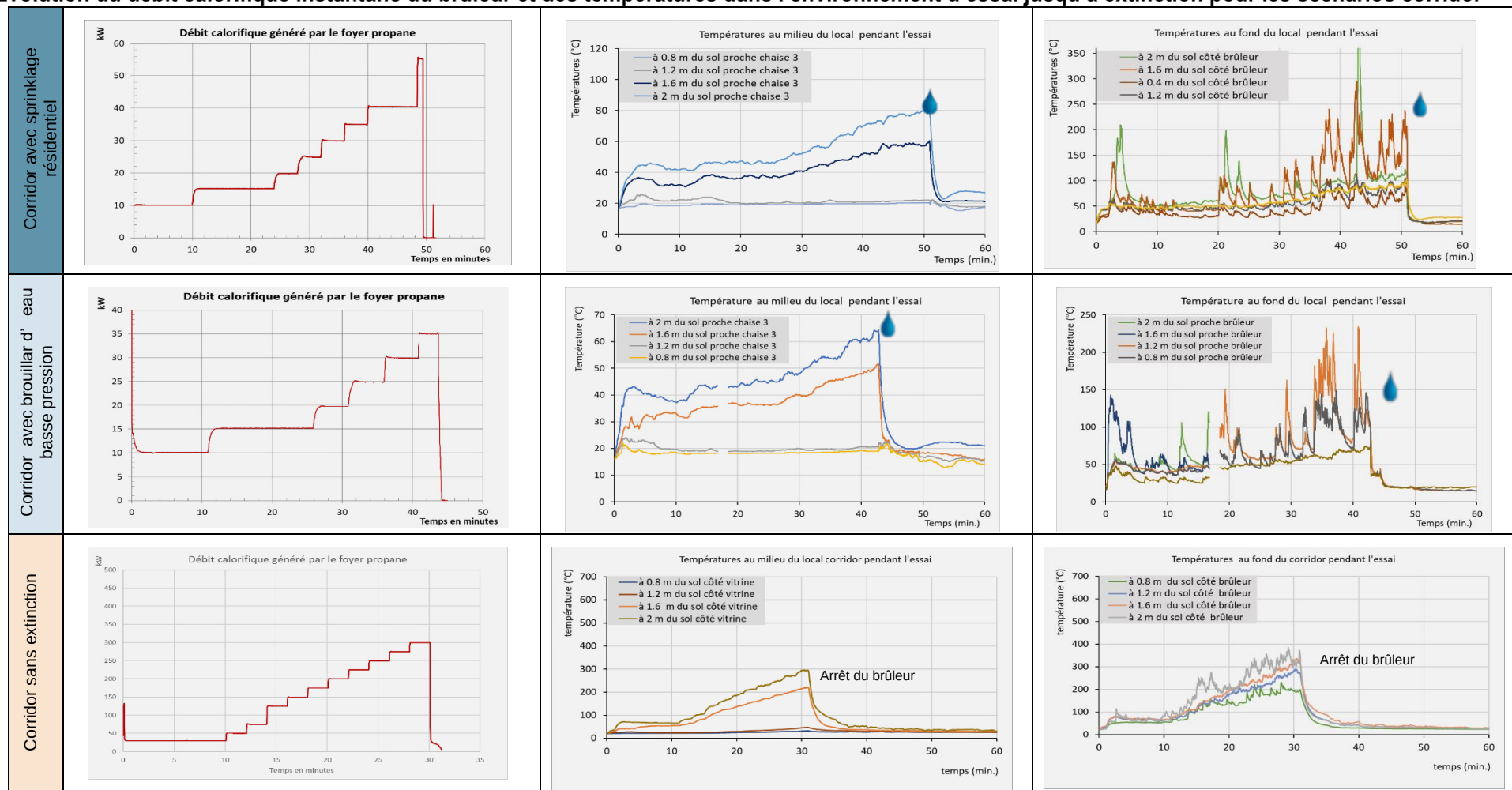
Annexe 3 : Constat d'état des éléments de collection dans le cas du scénario incendie avec extinction par brouillard d'eau

Typologie d'œuvre	Localisation	Commentaire général
Tableaux	Sur grille support	Etat de conservation observé : Bon état général. Empoussièrement moyen, encrassement léger. Ces 2 altérations touchent l'ensemble de la surface de l'éprouvette mais sont plus visibles sur les couleurs : sur le rouge et le bleu, qui présentent beaucoup de petites peluches collées à la surface. La perte d'intensité de ces couleurs est due aux dépôts et non à une modification profonde : elles retrouvent leur intensité au test de décrassage. Noircissement du châssis : le dépôt de suie n'est pas perceptible à l'œil nu mais au ramassage au coton humide et sur le doigt.
Livres	Sur étagère métallique -3ème plateau en partant du haut	Peu touchés par les effets de l'incendie.
Papiers	Sur étagères métalliques : 2 ^{ème} , 3 ^{ème} et 4 ^{ème} plateau en partant du haut	Papier avec salissure et gondolements importants. (échelle 5/5)
	Dans boîtes d'archivage 2 ^{ème} et 4 ^{ème} plateau en partant du haut	Pas de dégât visible.
Papier et magazines	Dans petite armoire métallique - 1 ^{er} et 2 ^{ème} tiroir	Pas de dégât visible.
Textile coton	Sur étagères métallique 2 ^{ème} et 4 ^{ème} plateau en partant du haut	Bon état physique du tissu. Salissures sur la moitié du tissu sur la face endroit qui était repliée (dépôt de suie étalé sous l'effet de l'eau ? avec des petits points plus noirs présentant plus de relief mais également incrustés). L'étalement de la suie rend particulièrement visible les petits faux plis.
	Dans boîtes d'archivage 2 ^{ème} et 4 ^{ème} plateau en partant du haut	Bon état physique, légers dépôts (de suie ?) à peine visibles. Tâches légères sur tissus pouvant être d'origine ou post incendie
	Dans petite armoire métallique - 2ème tiroir	Pas de dégât visible
Textile synthétique	Sur étagère métallique 3 ^{ème} plateau en partant du haut	Pas de dégât visible
Petits éléments en Bois	Sur étagères métallique 2 ^{ème} et 4 ^{ème} plateau en partant du haut	Léger dépôt de fines particules en surface du bois. Possible exsudation de résine dans le cas d'élément en bois résineux
	Dans boîtes d'archivage 2 ^{ème} et 4 ^{ème} plateau en partant du haut	Pas de dégât visible
	Dans petite armoire métallique - 2ème tiroir	Pas de dégât visible

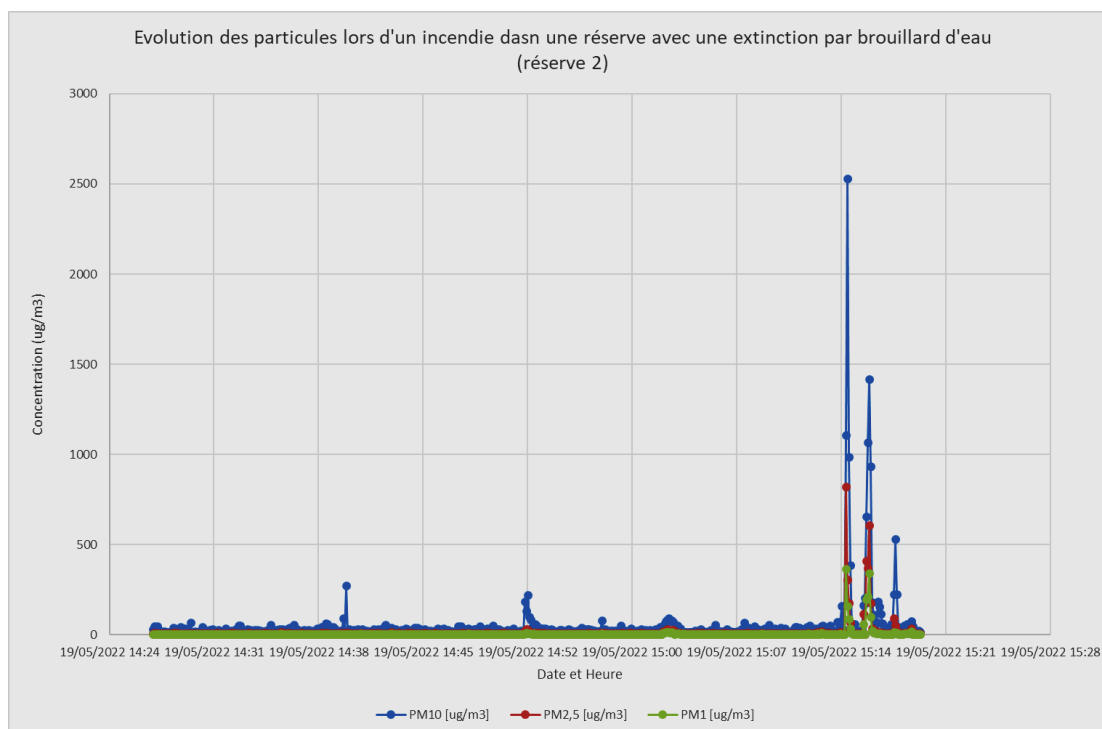
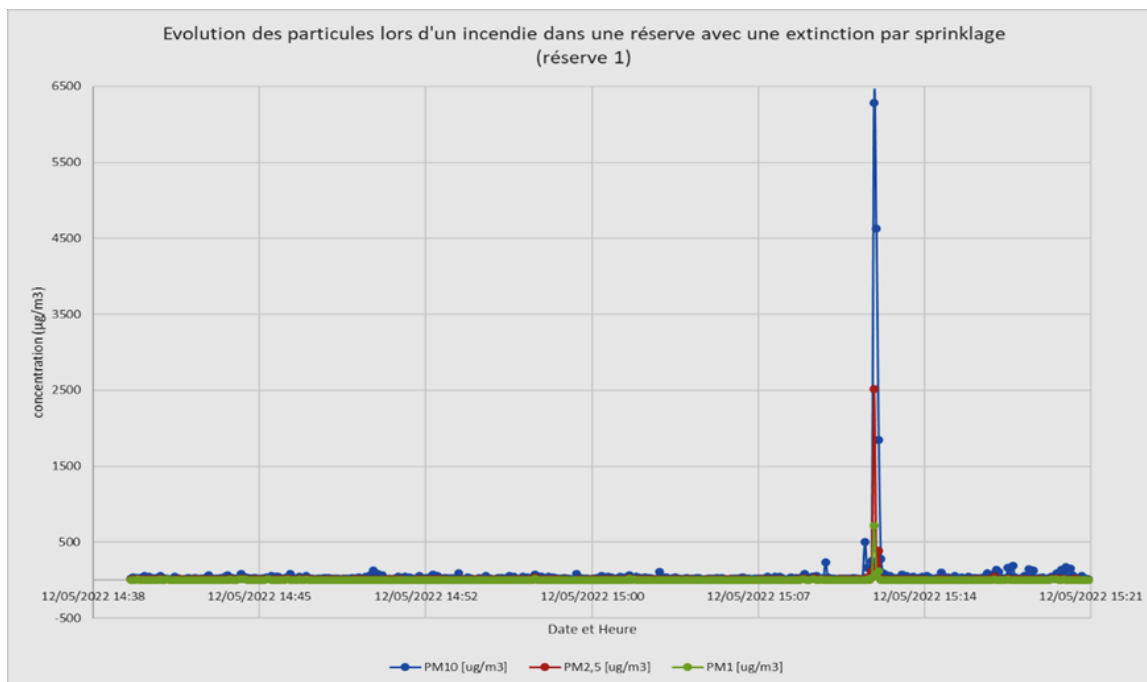
Annexe 4 : Constat d'état des éléments de collection dans le cas du scénario incendie avec extinction par sprinklage résidentiel.

Typologie d'œuvre	Localisation	Commentaire général
Tableaux	Sur grille support	Bon état général. Fort empoussièrement, encrassement moyen. Ces 2 altérations touchent l'ensemble de la surface mais sont plus visible sur les couleurs : sur le rouge et le bleu, on note particulièrement la poussière blanche (cendre ?), sur le vert et le blanc (préparation) on remarque plus les petites poussières noires. Il pourrait s'agir à priori d'un seul biais optique, mais au test de dégrassage on note que la couleur bleue est plus sale que les autres. On remarque sur le bleu et le rouge des petites matités rondes, comme des gouttelettes. Forme de condensation de surface ? Microbulles lors de l'application du vernis, qui réagissent différemment à la chaleur ? Sur bleu et rouge : petites peluches en surface (ramollissement peinture ?) / perte d'intensité des couleurs due aux dépôts noirs (sur teinte vert et fond blanc) et blancs (cendre ?)
Livres	Sur étagère métallique -3ème plateau en partant du haut	Peu touchés par les effets de l'incendie.
Papiers	Sur étagères métalliques : 2ème, 3ème et 4ème plateau en partant du haut	Dépôts de surface (salissure faible à moyenne) mais peu de dégradation
	Dans boîtes d'archivage 2ème et 4ème plateau en partant du haut	Pas de dégât visible.
Papier et magazines	Dans petite armoire métallique -1er et 2ème tiroir	Pas de dégât visible.
Textile coton	Sur étagères métallique 2ème et 4ème plateau en partant du haut	Bon état physique du tissu Dépôt de particules (léger et clairsemé) et salissures noirâtres (suie étalée ?) en surface surtout situées à l'endroit des faux-plis sur la partie repliée envers de même que sur le bord droit au niveau de l'ourlet. Plis du pliage en 4 plus très nombreux petits faux plis qui semblent d'origine. L'étalement de la suie rend particulièrement visible les petits faux plis."
	Dans boîtes d'archivage 2ème et 4ème plateau en partant du haut	Bon état physique, nombreux faux-plis qui semblent antérieurs au test. La présence de nombreux plis rend l'appréciation de l'évolution de la couleur difficile sur tous les échantillons
	Dans petite armoire métallique - 2ème tiroir	Pas de dégât visible
Textile synthétique	Sur étagère métallique 3ème plateau en partant du haut	Bon état physique du tissu Sur l'une des faces envers repliée et sur le repli de l'ourlet, légères salissures (dépôt de suie incrusté ?) et dépôts très légers qui ressemblent à des petites particules de suie. Plié en 4. Très nombreux petits plis qui semblent d'origine en plus des plis du pliage en 4. Ces petits plis sont rendus plus visibles là où la poussière de suie s'est étalée.
Petits éléments en Bois	Sur étagères métallique 2ème et 4ème plateau en partant du haut	Léger dépôt de fines particules en surface du bois.
	Dans boîtes d'archivage 2ème et 4ème plateau en partant du haut	Pas de dégât visible
	Dans petite armoire métallique - 2ème tiroir	Pas de dégât visible

Annexe 5 : Evolution du débit calorifique instantané du brûleur et des températures dans l'environnement d'essai jusqu'à extinction pour les scénarios corridor

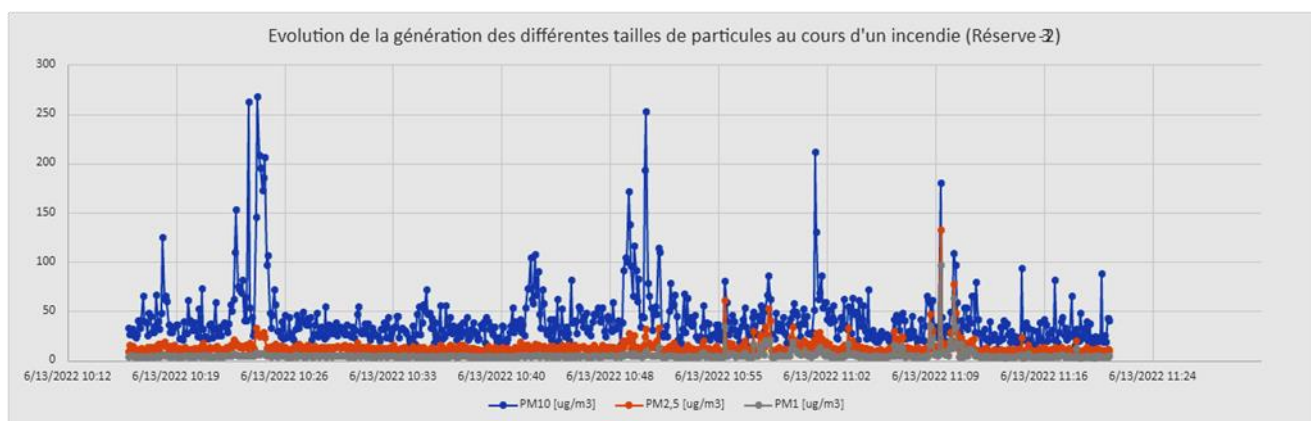
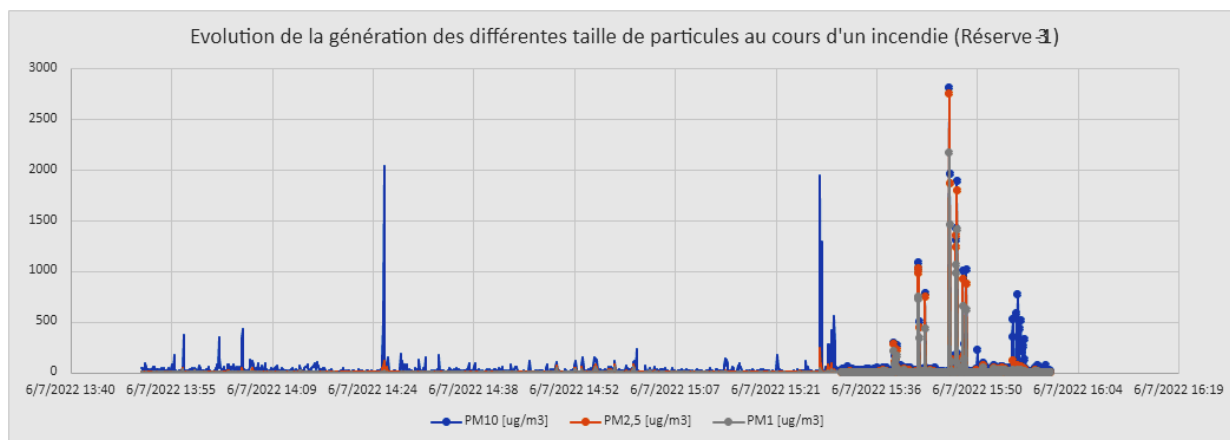


Annexe 6 : Représentations graphiques de l'évolution des particules au cours de l'incendie dans la réserve avec une extinction par sprinklage d'eau (Réserve 1-R1) et par brouillard d'eau (Réserve 2 - R2)

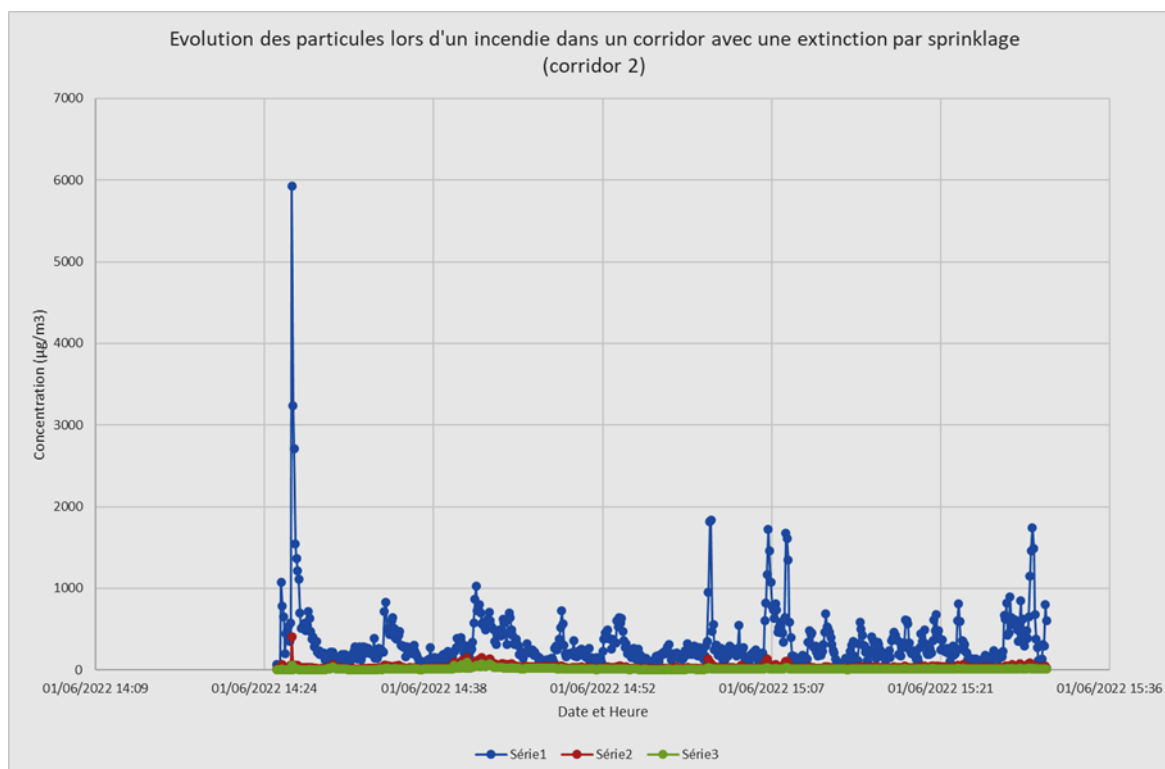
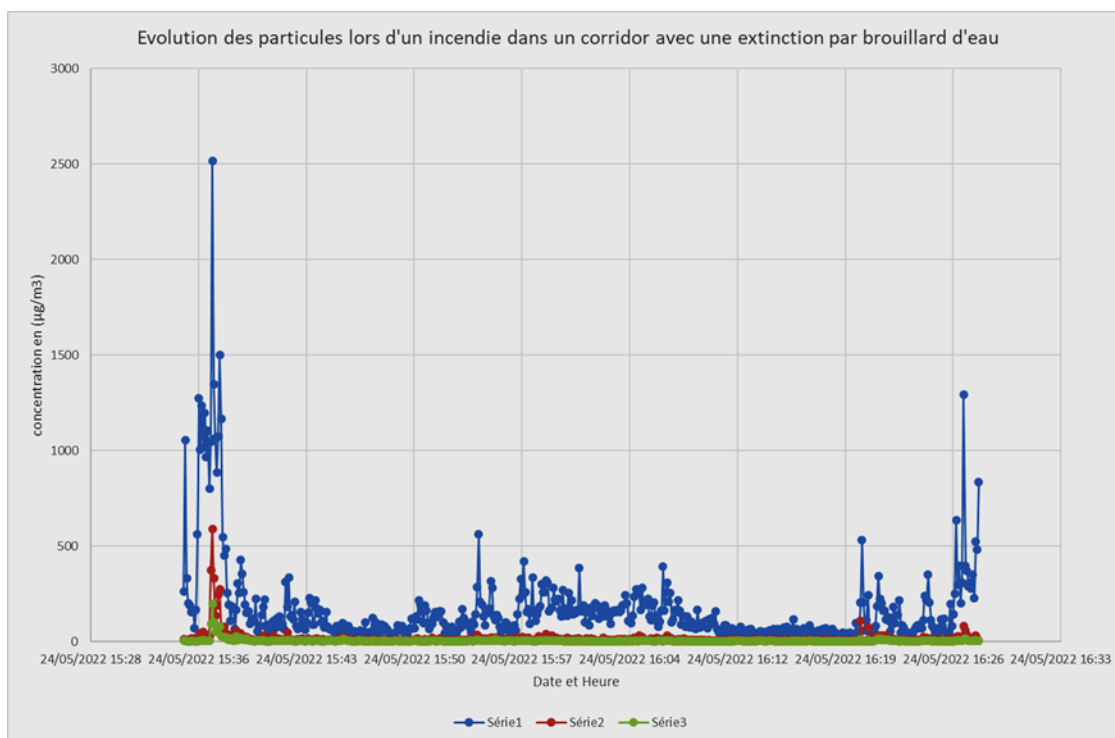


NB : Les extinctions se font par sprinklage de 2 minutes (réserve 1) et par brouillard d'eau de 5 minutes (réserve 2).

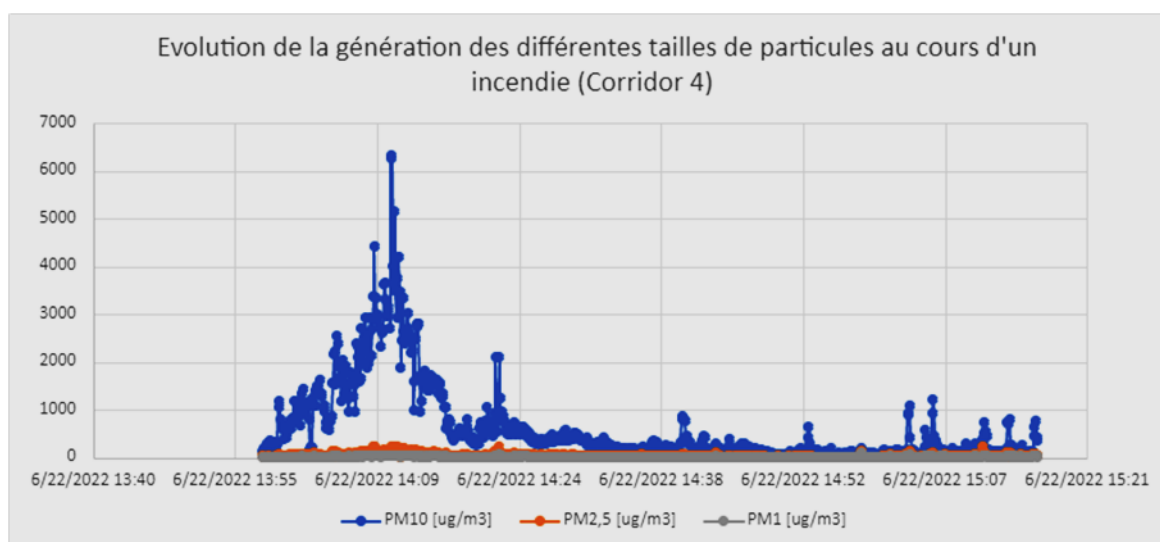
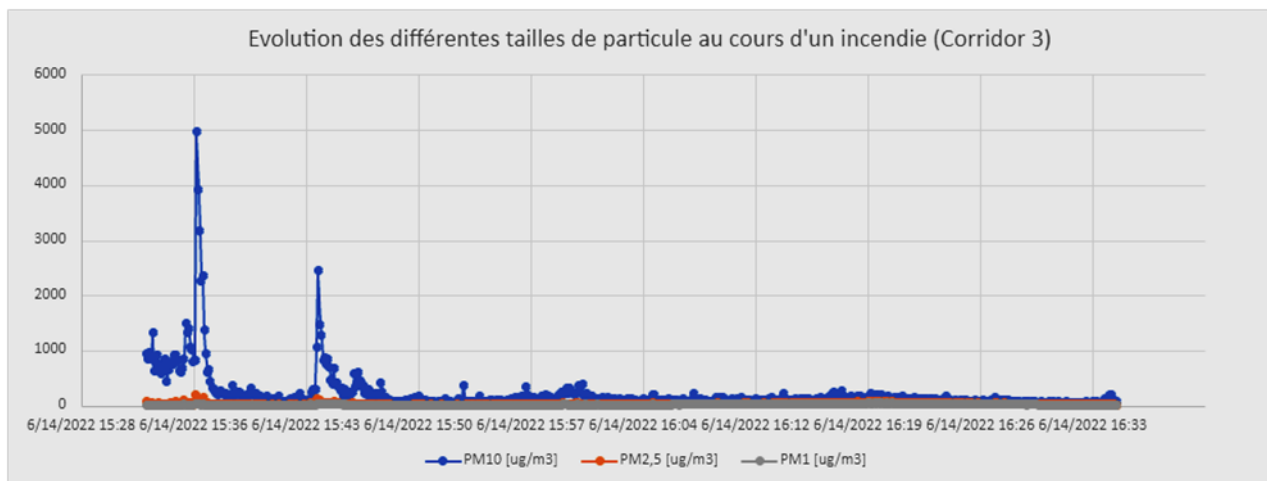
Annexe 7 : Représentations graphiques de l'évolution des particules au cours de l'incendie dans la réserve sans extinction (Réserve3-R3-1 et R3-2)



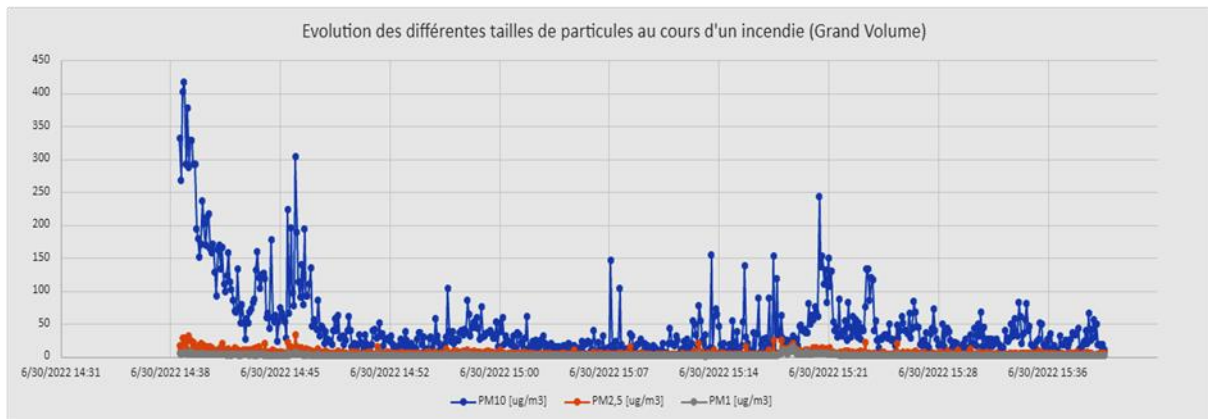
Annexe 8 : Représentations graphiques de l'évolution des particules au cours de l'incendie dans le corridor avec une extinction par brouillard d'eau (Corridor 1-C1) et par sprinklage d'eau (Corridor 2-C2)



Annexe 9 : Représentations graphiques de l'évolution des particules au cours d'un incendie dans un corridor sans extinction et sans bâche de protection (Corridor 3-C3) et sans extinction et présence de bâches de protection (Corridor4-C4)



Annexe 10 : Représentation graphique de l'évolution des particules au cours d'un incendie dans le grand volume (GV)



Annexe 11 : Evolution du débit calorifique instantané du brûleur et des températures dans l'environnement d'essai jusqu'à extinction pour le scénario grand volume.

