MUSEE DE L'AIR ET DE L'ESPACE - HALL 39/45

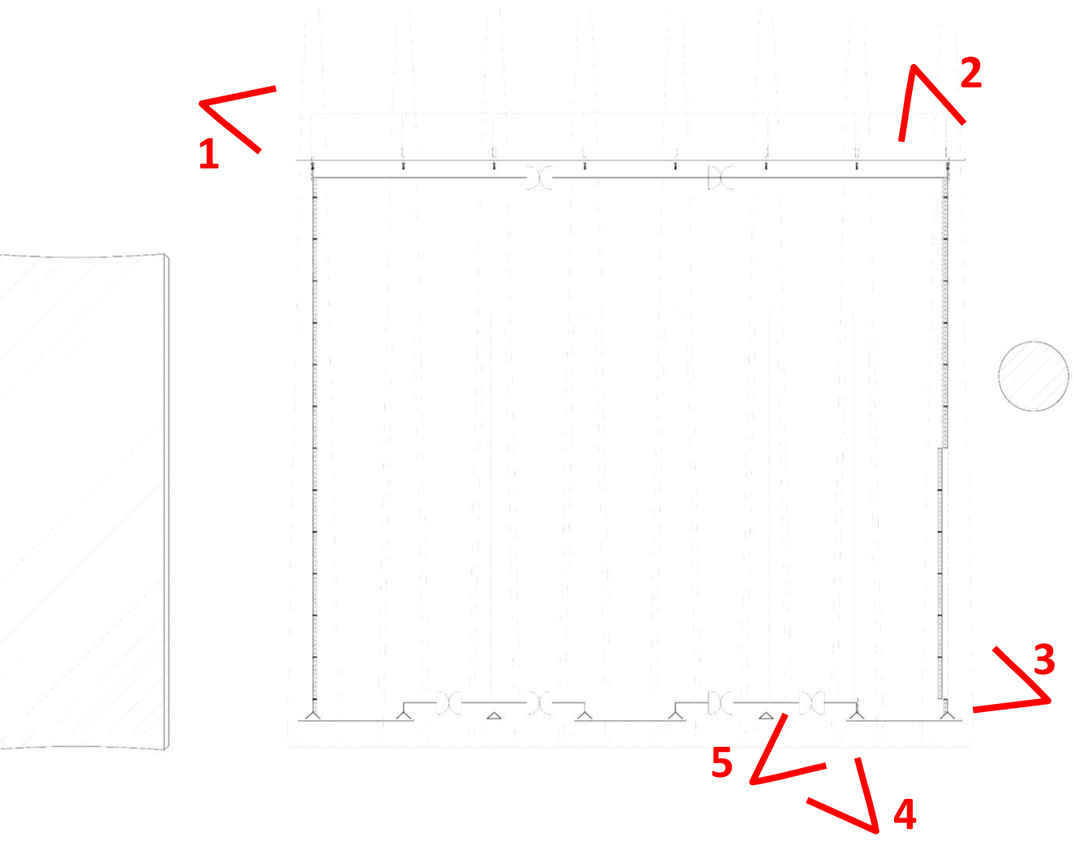
Etude de faisabilité – thermique

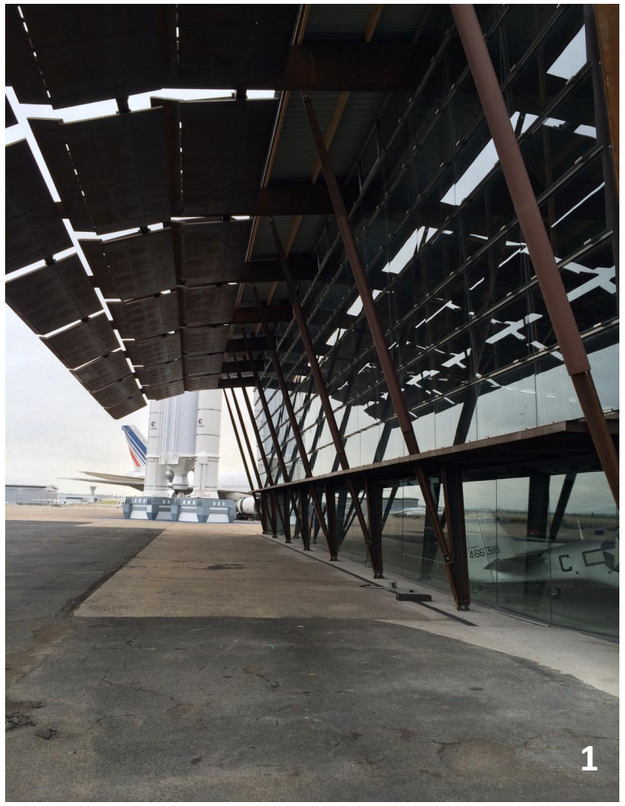
Rapport final – analyse de l'existant
30 mars 2026

MUSÉE AIR + ESPACE
AÉROPORT PARIS – LE BOURGET

NICOLAS KELEMEN | ARCHITECTURE

B2T Ingénierie


1
2
3
4
5

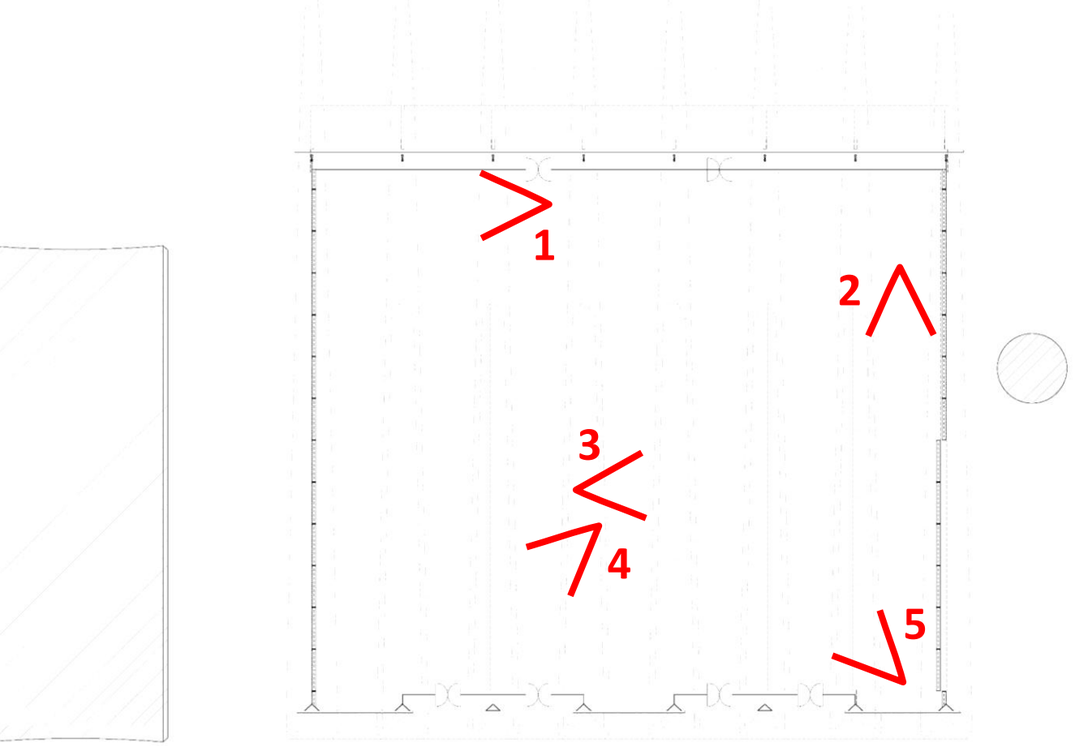

1


3


1939
1945
4

2


5


1
2
3
4
5

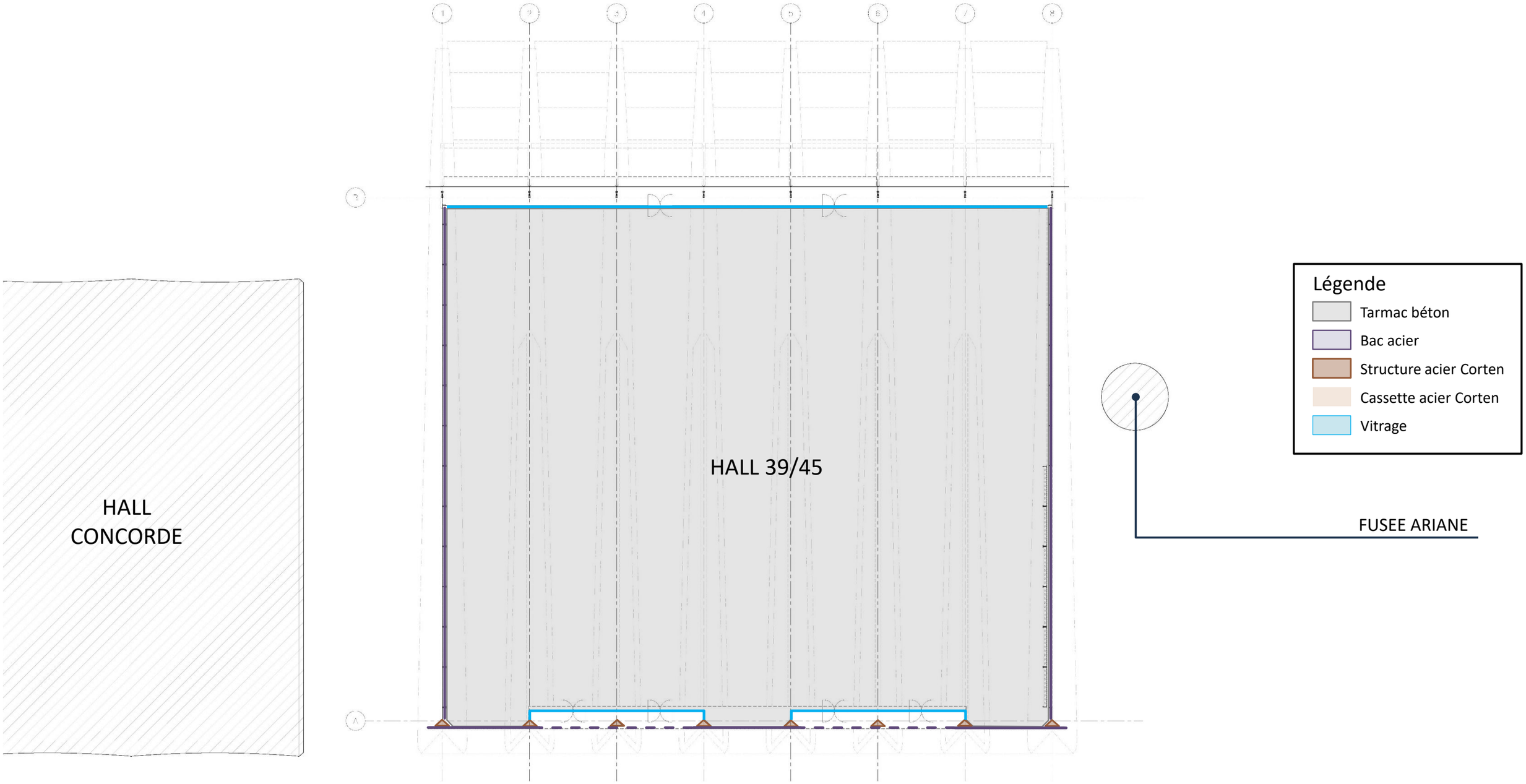

466 318
1

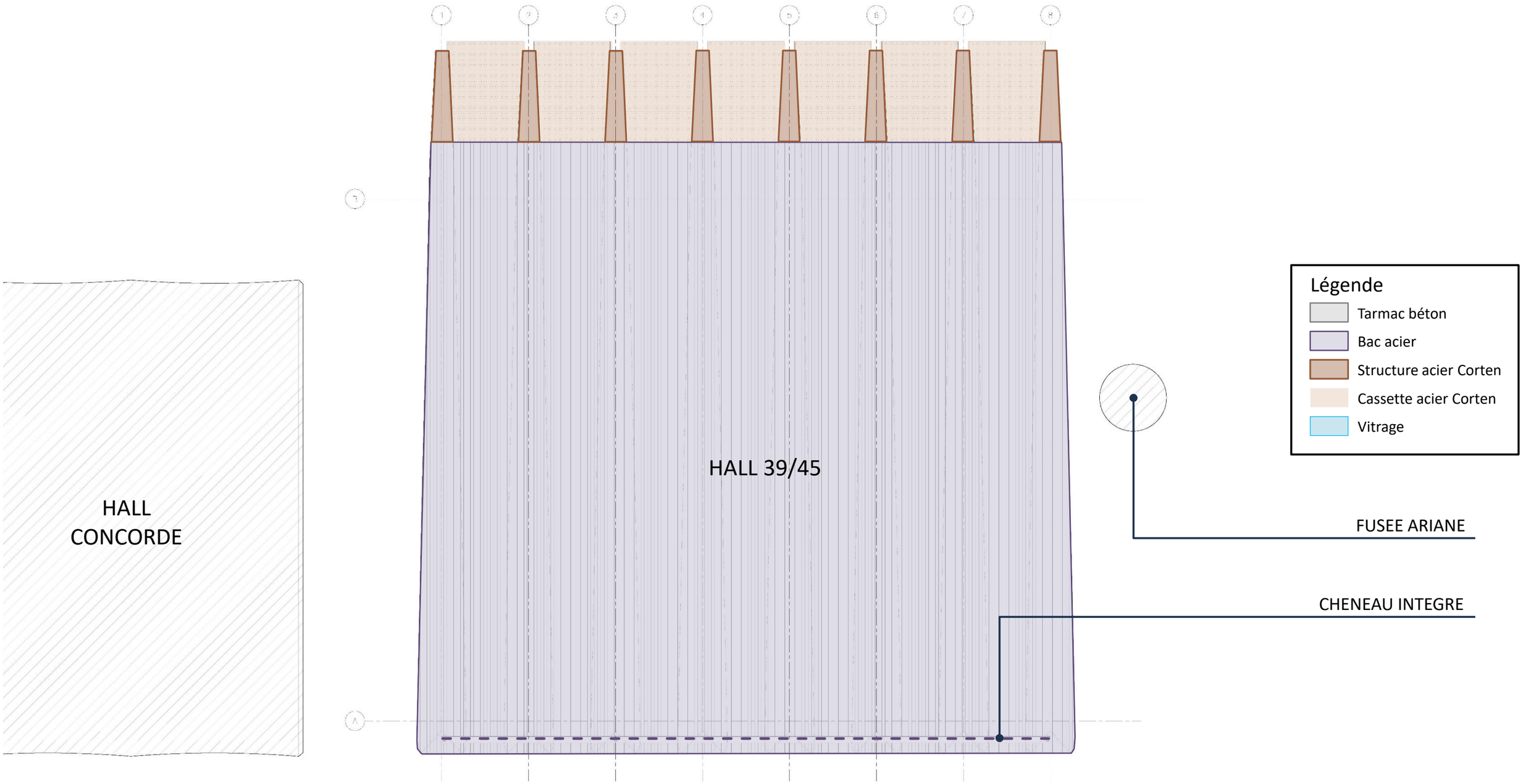

3

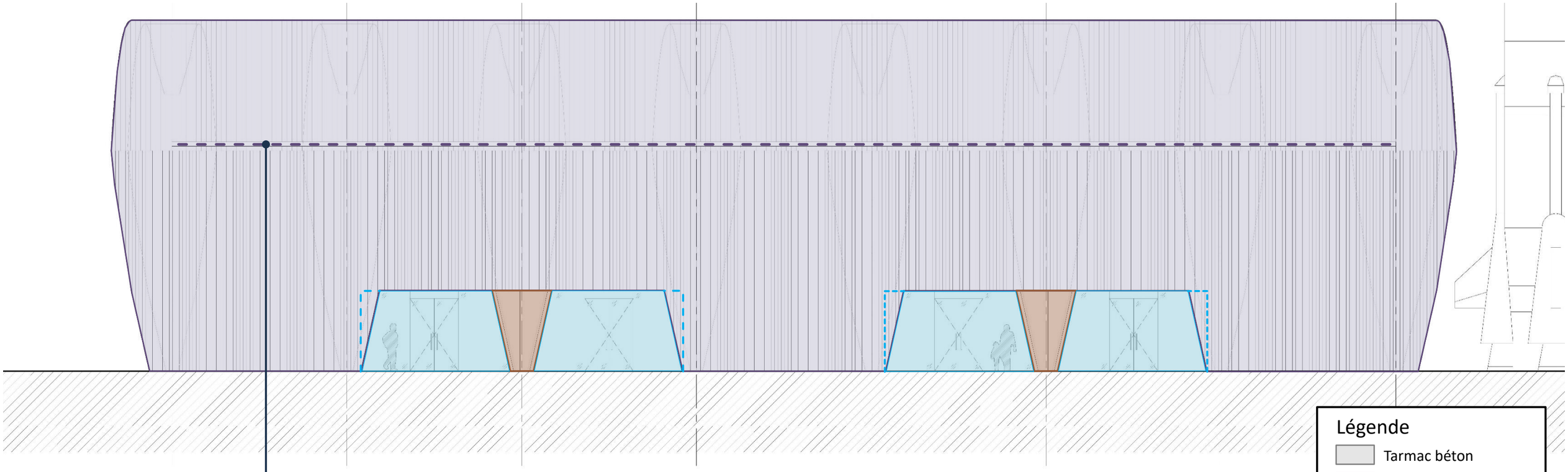

4

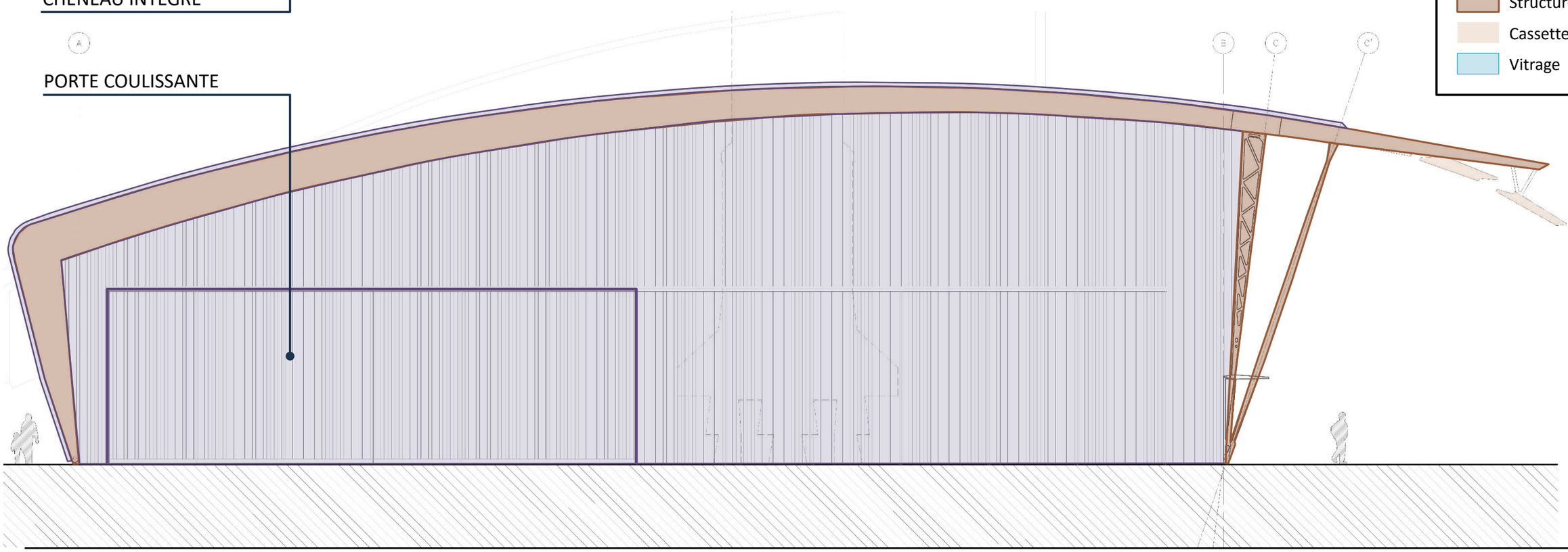

BOCW
2

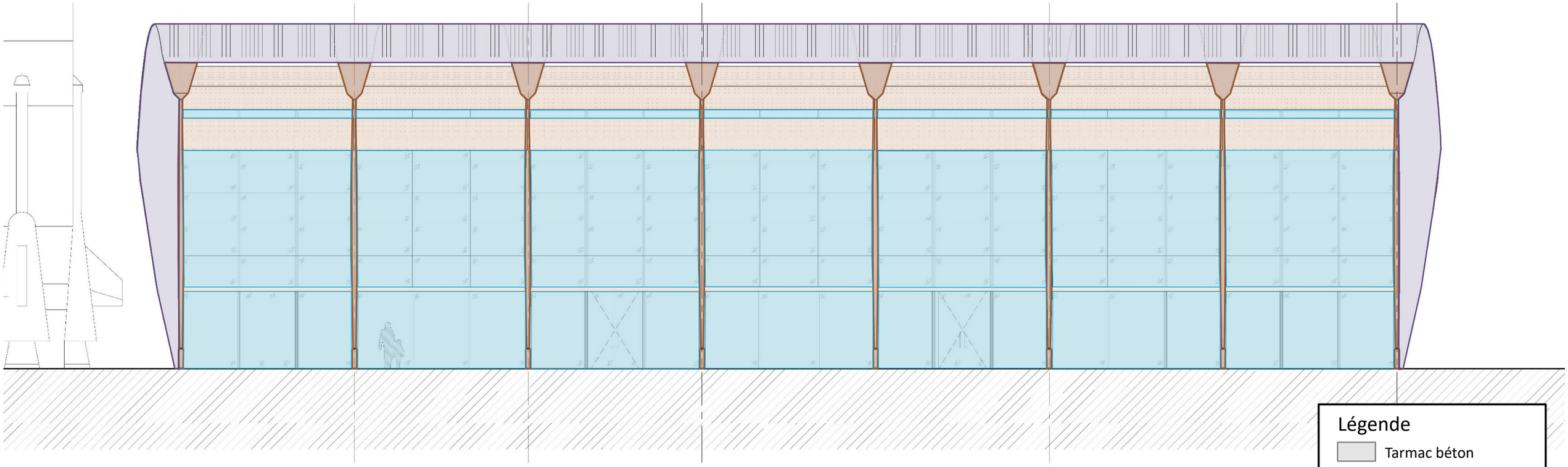

1939
1945
5

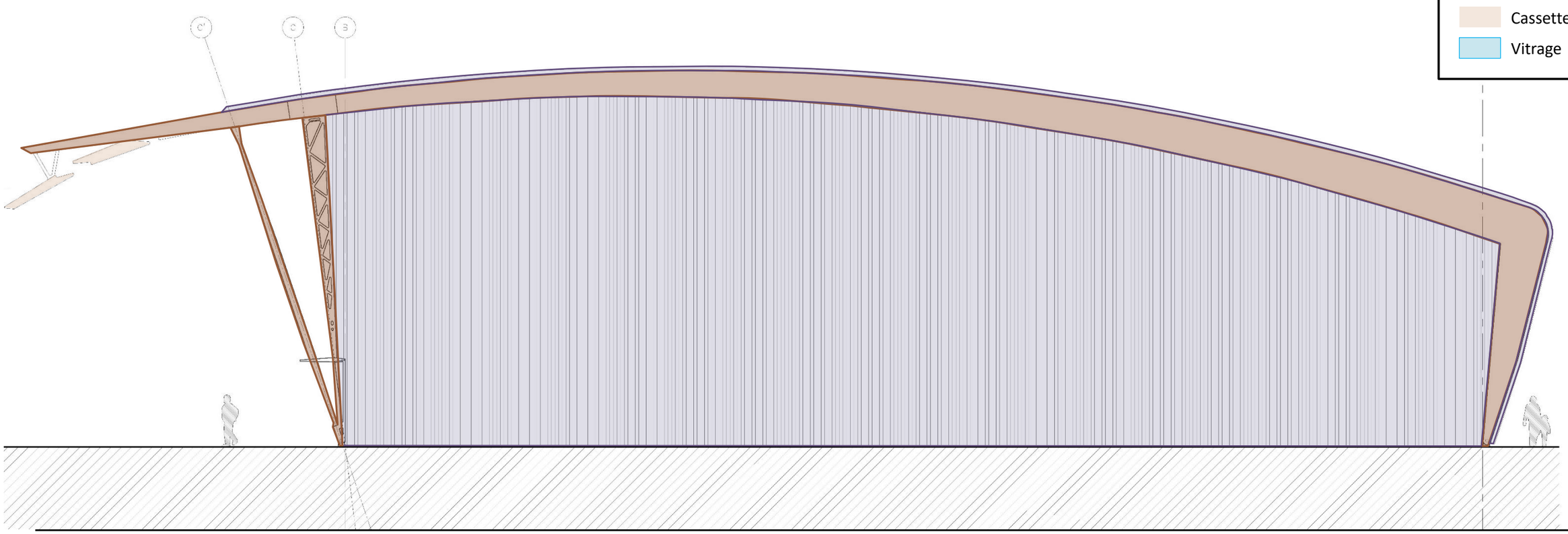

HALL
CONCORDE
HALL 39/45
FUSEE ARIANE
Légende
Tarmac béton
Bac acier
Structure acier Corten
Cassette acier Corten
Vitrage


HALL
CONCORDE
HALL 39/45
FUSEE ARIANE
CHENEAU INTEGRE
Légende
Tarmac béton
Bac acier
Structure acier Corten
Cassette acier Corten
Vitrage


CHENEAU INTEGRE
Légende
Tarmac béton
Bac acier
Structure acier Corten
Cassette acier Corten
Vitrage


PORTE COULISSANTE


Légende
Tarmac béton
Bac acier
Structure acier Corten
Cassette acier Corten
Vitrage



Repérage des principaux points de fuite d’étanchéité



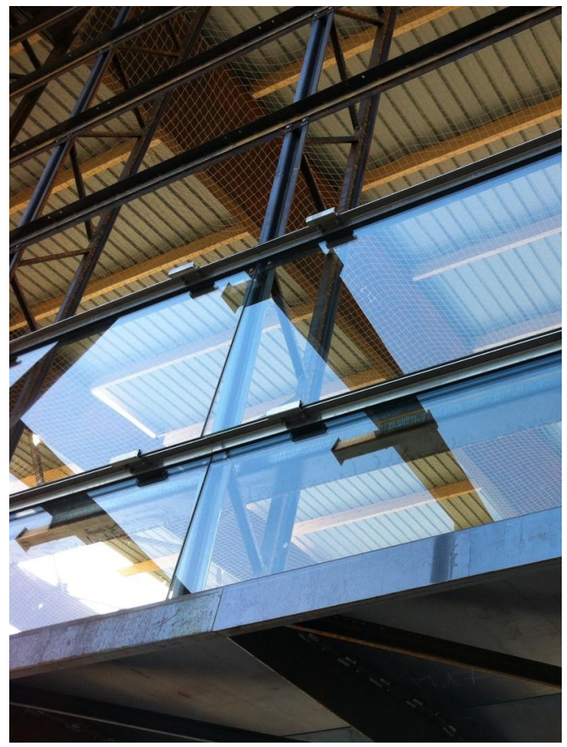
1 | contacte du verre bord à bord



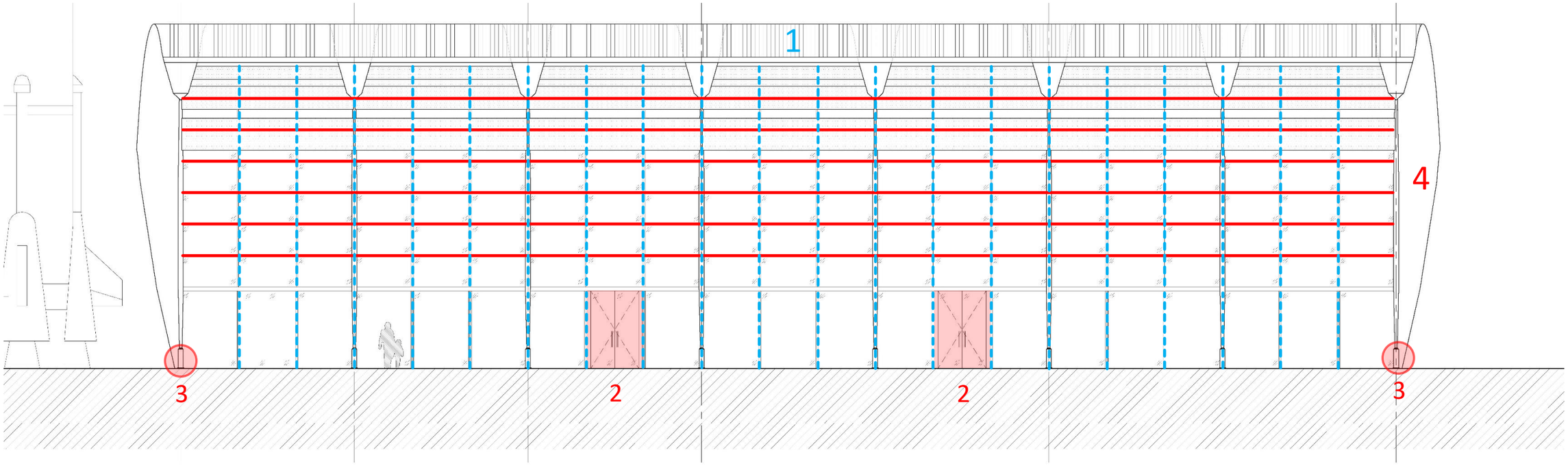
2 | Porte vitrée à pivot

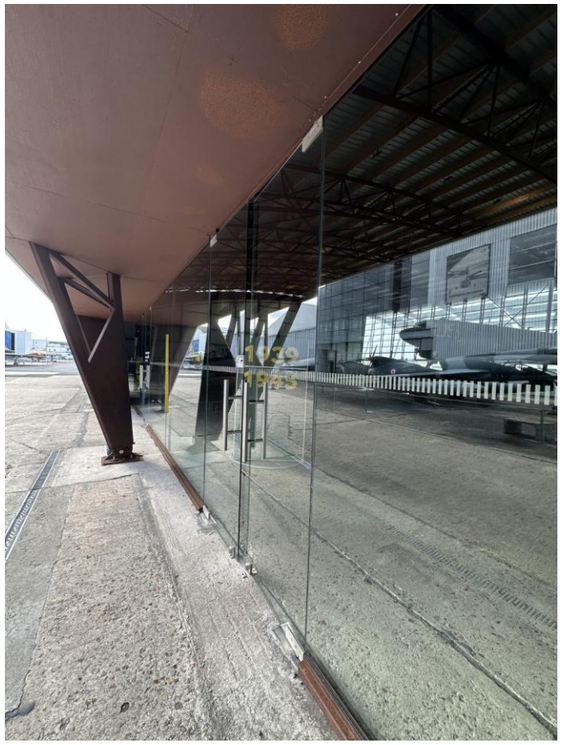


3 | Raccord menuiserie bac acier



4 | Jour du déport en pied vitrage





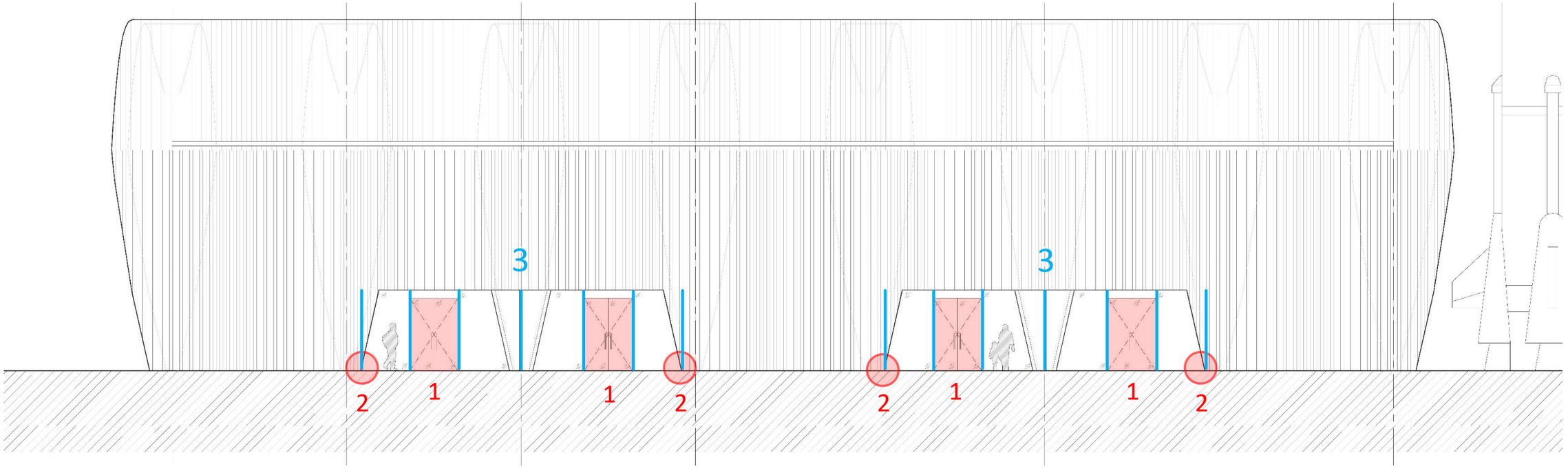
1 | Porte vitrée à pivot



2 | Jonction menuiserie structure

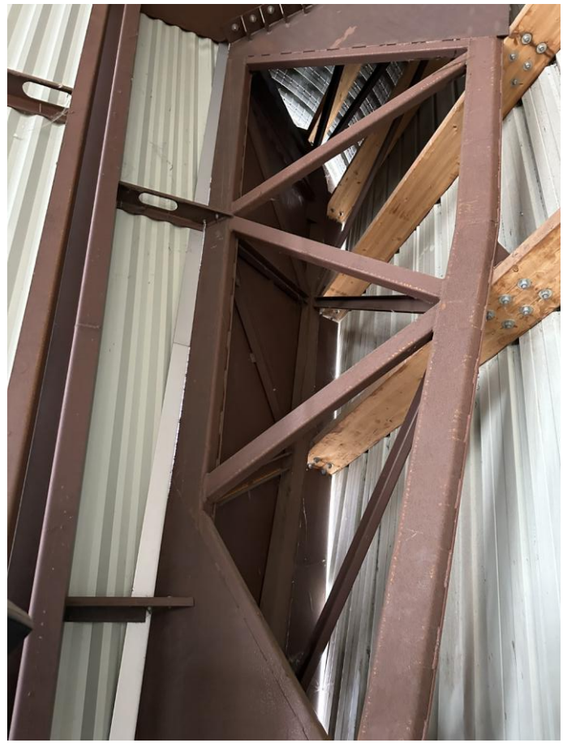


3 | contacte du verre bord à bord





1 | Jour résiduel des solives entre la structure corten et le bac acier

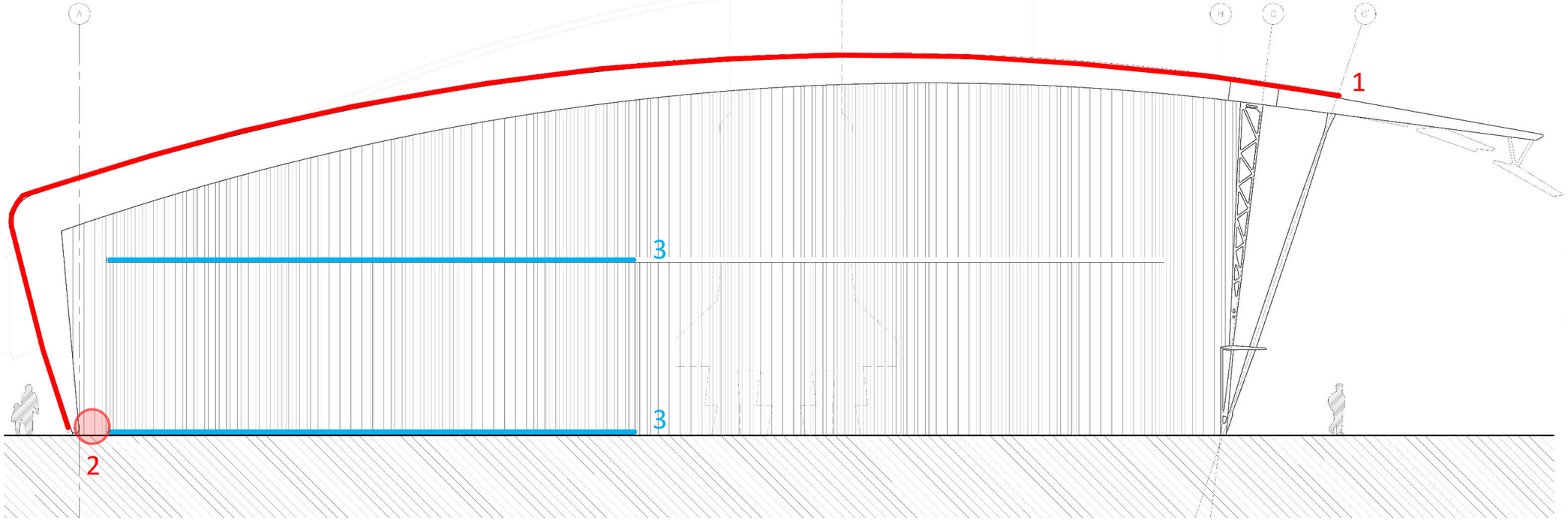




2 | Jonction porte structure



3 | jour porte coulissante



Inventaire des matériaux existants

icseo
BUREAU D'ETUDES

Forage : ST1

Sondage Géologique

Dossier : **LE BOURGET (93)** — X :

Construction d'un nouveau hall d'exposition — Y :

Affaire : **93.140351** — Z : **100,00 m** — Réf.

Date : 08/04/2014

Echelle : 1 / 100

Page : 1 / 1

JCA

cote z (m)	profondeur (m/TN)	Lithologie	Niveau d'eau (m)	Outils	Ech. Labo.	Remarque
100.00	0.00					
99.75	0.25	Remblai : dalle béton	Sec le 08/04/2014	THC Ø63 mm		
99.30	0.70	Remblai : sable graveleux				
		Limon brun				
97.20	2.80	Limon légèrement argileux brun				
95.40	4.60	Marne beige à blocs calcaires				
88.00	12.00					





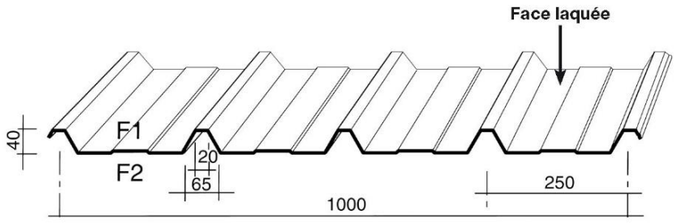
Cobacier 1004

Profil pour couverture sèche

monopanel

Epaisseur en mm	0,63	0,75	1,00
Masse en kg/m²	6,03	7,18	9,58

La face prélaquée est la face F1 sauf instruction particulière.

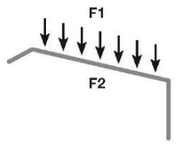


PORTÉES D'UTILISATION EN MÈTRES

PV Véritas GEN 1/000 242 V21

Portées admissibles sous charges descendantes en fonction de la valeur normale (non pondérée) des charges et du nombre d'appuis, pour une flèche 1/180 ème.

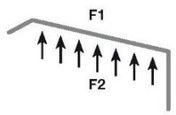
Charges descendantes



Charges daN/m²	Ep. 0,63 mm		Ep. 0,88 mm		Ep. 1,00 mm	
	▲▲	▲▲▲	▲▲	▲▲▲	▲▲	▲▲▲
50	2,35	2,90	3,00	3,55	3,25	4,00
75	2,35	2,90	2,65	3,55	2,90	3,90
100	2,35	2,80	2,45	3,25	2,65	3,55
125	2,15	2,25	2,25	3,05	2,50	3,55
150	1,90	1,90	2,15	2,85	2,35	3,15
175	1,65	1,65	2,05	2,75	2,25	3,00
200	1,45	1,45	1,95	2,55	2,15	2,85

La portée limite sous charges ascendantes (action globale du vent normal sur le profil), est donnée ci-dessous lorsque toutes les nervures sont fixées avec fixations en sommet de nervures dont les résistances mécaniques Pk/γm ont les valeurs minimum indiquées au verso.

Charges ascendantes



Charges daN/m²	Ep. 0,63 mm		Ep. 0,75 mm		Ep. 1,00 mm	
	▲▲	▲▲▲	▲▲	▲▲▲	▲▲	▲▲▲
50	2,35	2,90	3,30	3,95	4,15	4,75
75	2,35	2,90	3,30	3,95	4,15	4,75
100	2,35	2,90	3,30	3,70	4,15	4,65
125	2,35	2,65	3,30	3,25	4,15	4,10
150	2,35	2,40	2,95	2,95	4,15	3,75
175	2,05	2,05	2,50	2,55	3,95	3,45
200	1,75	1,80	2,20	2,20	3,45	3,20

Nous consulter pour d'autres charges, ou dans le cas de fixations réduites ou en plages.

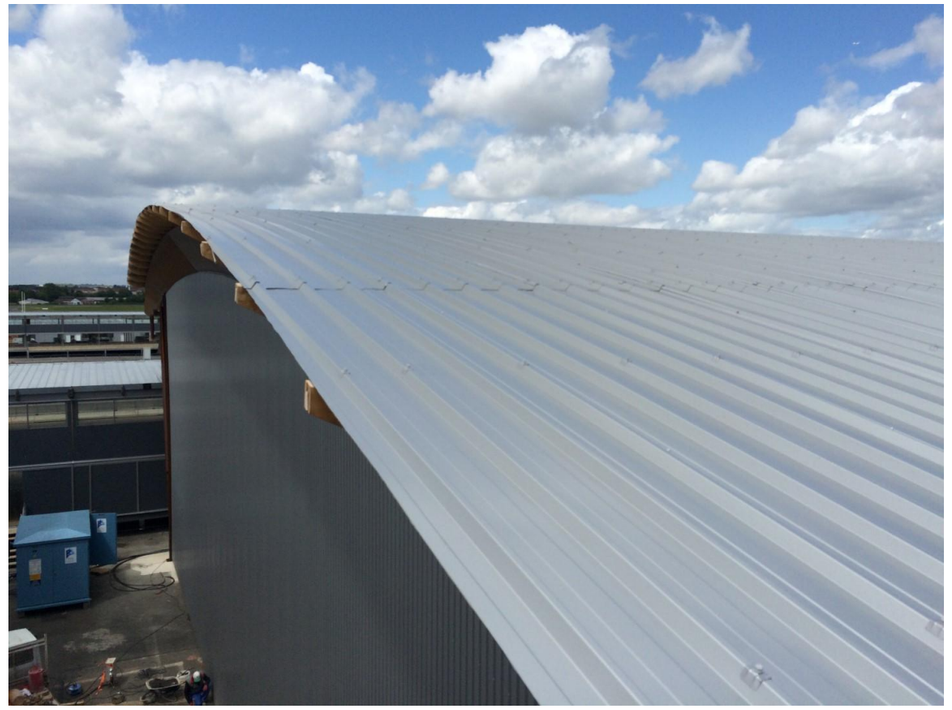
PROGRAMME DE FABRICATION

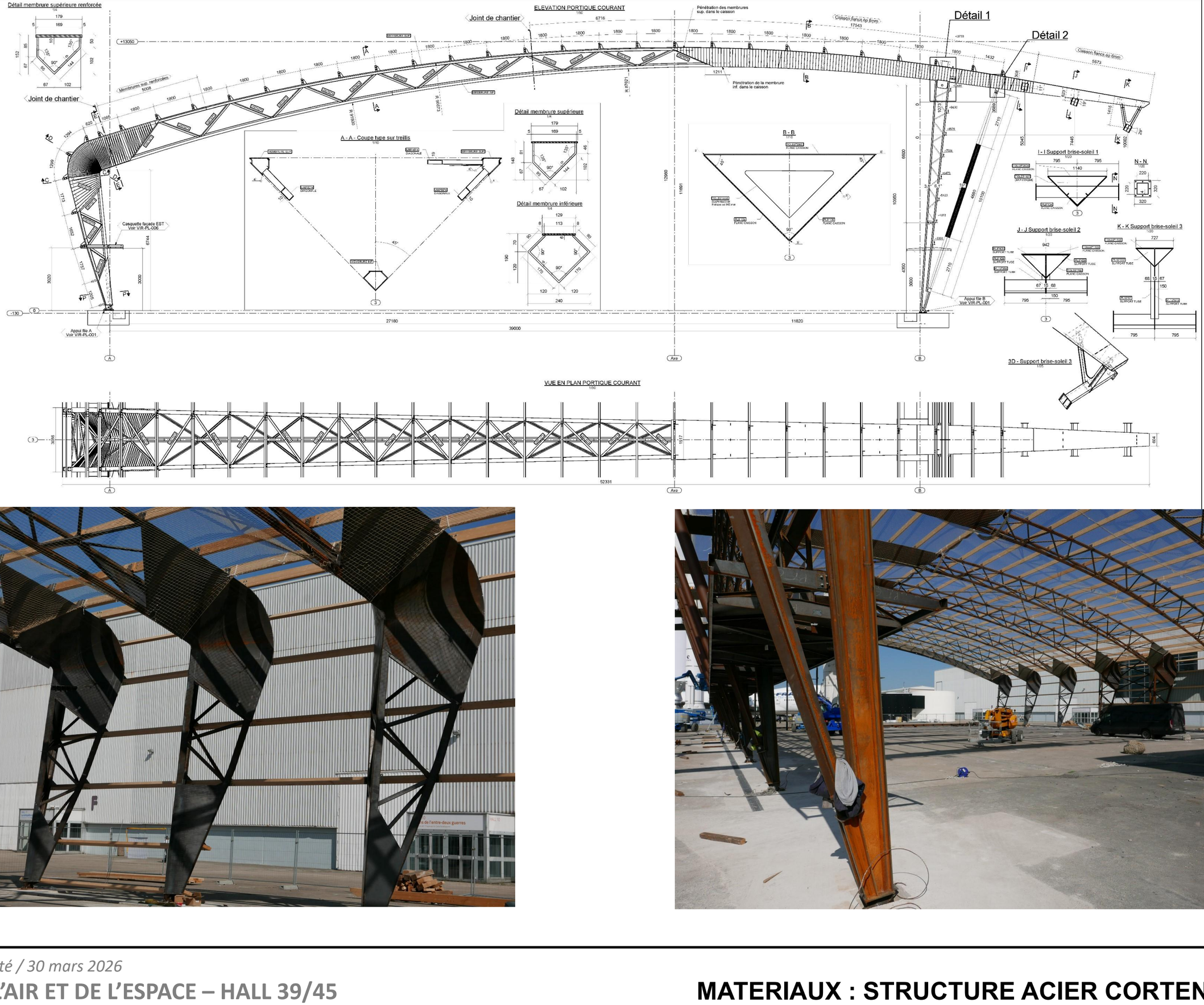
LONGUEURS	Longueurs standard de 2000 mm à 12000 mm.
MÉTAL	Tôle d'acier S320GD galvanisé en continu.
REVÊTEMENTS	Prélaqués standard : Polyester 25 µ, Polyuréthanne 35 µ, autres nous consulter.
COLORIS	Voir nuanciers.
CONDENSATION	Traitement Absofilm.
CINTRAGE	Cintra System réalisable en convexe et concave.

NORMES

ACIER GALVANISÉ	NF EN 10346 / P 34-310 tolérances décalées.
PRÉLAQUAGE	NF EN 10169-1 / NF XP P 34-301 appliqué sur galvanisation.
COTES/TOLÉRANCES	NF P 34-401.
ESSAIS	NF P 34-503 et interprétation suivant NF P 34-205-1 (référence DTU 40-35).



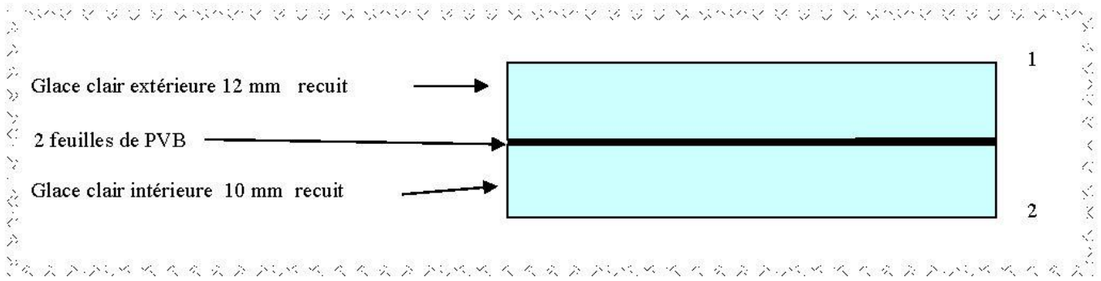



Détail membrure supérieure renforcée
ELEVATION PORTIQUE COURANT
Joint de chantier
Pénétration des membrures sup. dans le caisson
Caisson flanc ep 6mm
Détail 1
Détail 2
Membrures sup. renforcées
Pénétration de la membrure inf. dans le caisson
Détail membrure supérieure
A - A - Coupe type sur treillis
Détail membrure inférieure
B - B
Casquette facade EST
Voir VIR-PL-006
Appui file A
Voir VIR-PL-001
Appui file B
Voir VIR-PL-001
I - I Support brise-soleil 1
N - N
J - J Support brise-soleil 2
K - K Support brise-soleil 3
3D - Support brise-soleil 3
VUE EN PLAN PORTIQUE COURANT
27180
11820
39000
52331
Axe

Vitrage feuilleté 12/10-2

Définition produit.

Les panneaux verriers sont destinés à une utilisation en façade verticale extérieure.
Les vitrages seront composés comme ci dessous :



Tolérances dimensionnelles.

Tolérances de fabrication

- Défaut de planéité ≤ 2mm/m
- Défaut de décalage ≤ 3mm
- Composants verriers conformes aux normes de la série NF EN 572

Ecarts limites sur la longueur B et la hauteur H du produit fini

- Les écarts limites sont définis à +/- 2mm de la cote nominale définie sur les plans de débit.

Façonnage des bords

Les bords des composants verriers seront façonnés en JPI.

Contexte Normatif

Les différents produits et fabrications seront conformes aux normes suivantes. L'ensemble des essais demandés dans ces normes devra être consigné dans un dossier qualité.

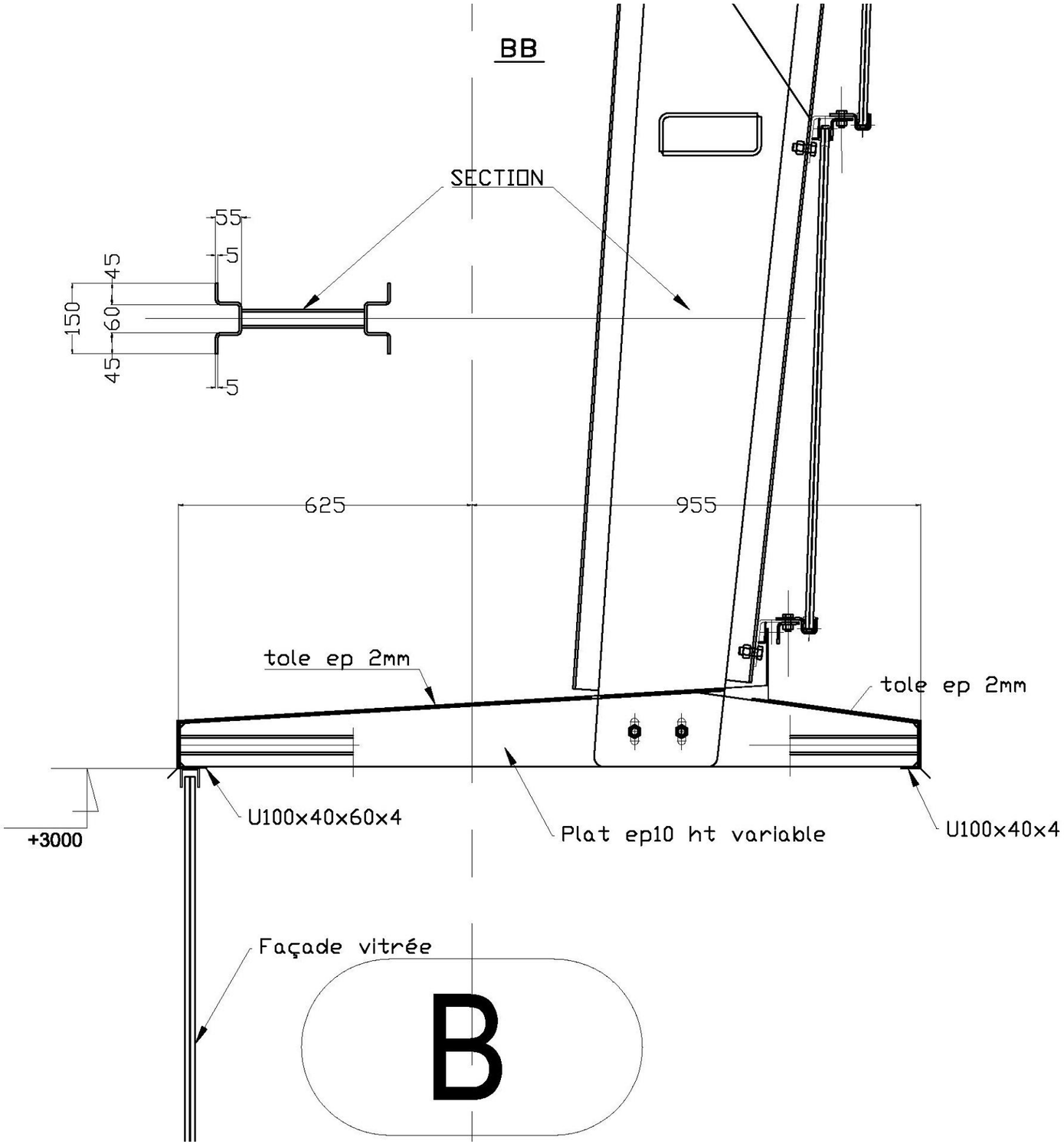
Produit de base	EN 572-2
Produit T.H.S	EN 14179
Produit feuilleté	EN 12543
Coefficient thermique Ug	= valeur nominale

Documents justificatifs

L'ensemble de ces points devra être vérifié dans le cadre des processus interne de contrôle du fournisseur et feront l'objet d'un dossier de contrôle à communiquer en fin de projet. Des contrôles par sondage seront effectués par VIRY au cours des différentes livraisons.
L'ensemble des tests et contrôles demandé dans les normes ci dessous devra être consigné dans un dossier qualité ou faire l'objet d'une démarche qualité de la part du fournisseur.






BB
SECTION
55
5
45
150
60
45
5
625
955
tole ep 2mm
tole ep 2mm
+3000
U100x40x60x4
Plat ep10 ht variable
U100x40x4
Façade vitrée
B





PEFC
10-4-8
Organisme Certificateur
pefc-france.org

ATTESTATION DE CERTIFICATION
CERTIFICATE OF

CHAÎNE DE CONTRÔLE PEFC
CHAIN OF CUSTODY PEFC CERTIFICATION

Société / *Company*

HAAS WEISROCK SA

88580 - SAULCY SUR MEURTHE

N° Chaîne de contrôle FCBA/10-01163
Chain of Custody Number

Ce certificat atteste la vérification de la chaîne de contrôle PEFC, fondée sur un contrôle permanent.
Il ne peut préjuger d'évolutions ou de décisions qui seraient prises en cours d'année.
La liste des entreprises sous certification est disponible sur les sites Internet :
www.fcba.fr et www.pefc.org.

This document testifies the certification of PEFC chain of custody, based on a permanent assessment.
There can not be any evolution or decision which would be taken in the course of the year after examination of the results of the audits of follow-up.
This document is the property of FCBA. In case of the mark's withdrawal, the original and all the copies must have returned to FCBA.
The central office that it shall not issue any self-made certificates or declarations to their participants that could be mistaken as formal PEFC certificates

La chaîne de contrôle de l'entreprise ci-dessus désignée est en conformité avec les exigences PEFC* en vigueur.
The chain of custody of the company appointed above is in compliance with the requirements PEFC in force.
Ce certificat est délivré selon le règlement de gestion de chaîne de contrôle PEFC de FCBA en vigueur.
This certificate is delivered according to the FCBA requirements for the PEFC chain of custody. .

Domaine d'application *Scope*	**Méthode utilisée** *Method*	**Origine des matières premières** *Raw materials origin*
Fabricant de charpente bois lamellé collé *Laminated wood frame glulam manufacturer*	Transfert en crédit de quantité *Volume credit method*	Certifié *Certified*

** annexes 15 et 16 du schéma français de certification forestière 2012-2017, traduction des annexes PEFC ST 2002 : 2013 et PEFC ST 2001 :2008 du document technique de PEFC C.*

Pour l'organisme certificateur / For Certification Body

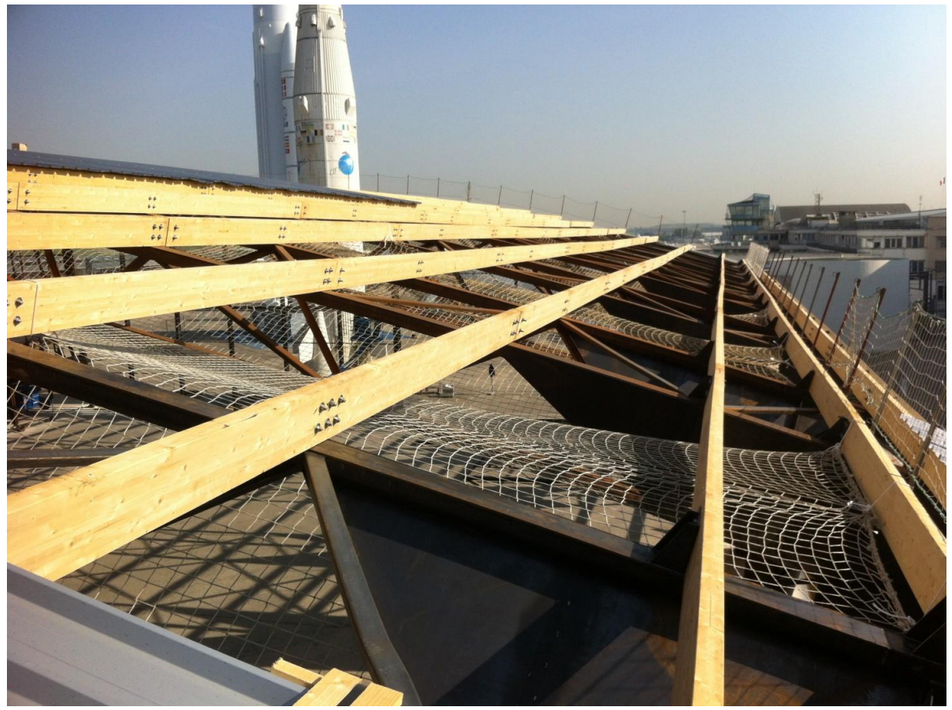
N° de Certificat : 0407/2015
Certificate N°0407/2015
Date : 12 avril 2015
Issued : April 12th 2015
Valable jusqu'au: 11/04/2020
Valid Until : April 11th 2020

DIRECTEUR CERTIFICATION
COCQUET

21447

cofrac
CERTIFICATION DE PRODUIT ET SERVICE
ACCREDITATION N°5-011
PORTEE DISPONIBLE SUR
WWW.COFRAC.FR

FCBA
INSTITUT TECHNOLOGIQUE
10, rue Galilée
77420 Champs sur Marne
Tél : +33 (0)1 72 84 97 84
www.fcba.fr





Une architecture qui prend son inspiration de l’aviation

Inauguré en 2015, le Hall 39–45 présente les aéronefs de la période de la Seconde Guerre mondiale du Musée de l'Air et de l'Espace. Conçu comme un vaste volume de type hangar industriel, il s’inspire des techniques constructives de l’aviation de 1939–45 afin de s’inscrire pleinement dans le contexte muséographique et son environnement aéroportuaire.

La structure du hall associe une charpente en acier Corten tridimensionnelle à une ossature secondaire en bois lamellé-collé, supportant une couverture simple peau en bac acier. Les études menées avec les bureaux d’études structure ont permis de réaliser un volume dégagé et aérien, mettant l’accent sur la légèreté et la lisibilité des éléments porteurs.

Côté pistes, la façade vitrée à écailles est protégée par 21 cassettes brise-soleil évoquant les volets déployés d’une aile d’avion à l’atterrissage. Cette composition permet un apport important de lumière naturelle et offre aux visiteurs une vue sur les pistes de Aéroport du Bourget, établissant un dialogue direct entre les avions contemporains et les aéronefs historiques présentés dans le hall.

Dans ce contexte, l’objectif d’amélioration des conditions thermiques et hygrométriques doit s’inscrire avec justesse dans une architecture forte, conçue pour mettre en valeur les collections tout en préservant l’identité du lieu.



Vue de la porte monumentale



Vue d’ensemble de l’intérieur du Hall 39-45

Enjeux

L’intervention a pour enjeu principal l’amélioration de la performance thermique du bâtiment, tout en préservant son expression architecturale.

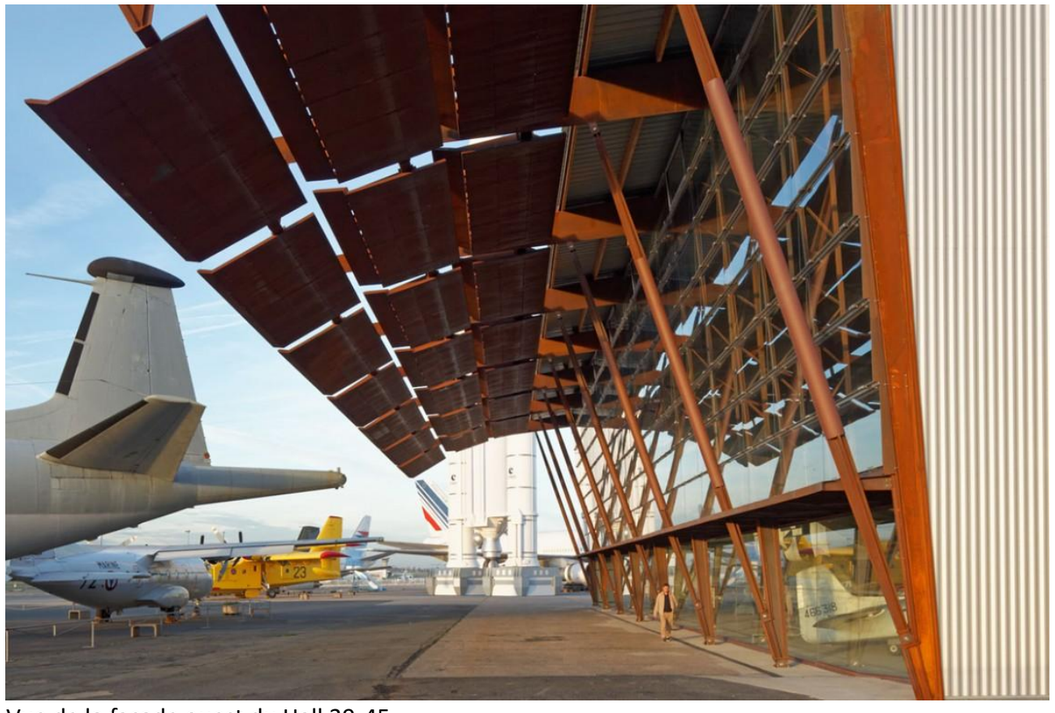
Il s’agit de mettre en œuvre une isolation performante et intégrée, afin de renforcer la performance énergétique globale, sans altérer la lisibilité de la structure en acier Corten ni la transparence de la façade ouest.

L’opération devra également maintenir la cohérence conceptuelle entre le site aéroportuaire, le contenu muséographique et l’enveloppe bâtie, en respectant l’identité architecturale du hall.

Périmètre d’intervention

Les travaux envisagés portent sur les éléments suivants :

- Isolation de la **toiture**
- Isolation des **façades nord et sud**
- Traitement thermique de la **porte coulissante monumentale**
- Remplacement des **vitrages et portes vitrées en partie basse**
- Amélioration thermique de la **façade vitrée ouest**
- Renforcement de **l’étanchéité à l’air de l’enveloppe**



Vue de la façade ouest du Hall 39-45



Vue du Hall 39-45 depuis l’entrée côte « rue » du Musée

MUSEE DE L'AIR ET DE L'ESPACE - HALL 39/45

Etude de faisabilité – thermique

Rapport final - étude des solutions techniques
30 mars 2026

MUSÉE AIR + ESPACE
AÉROPORT PARIS – LE BOURGET

NICOLAS KELEMEN | ARCHITECTURE

B2T Ingénierie

Une architecture qui prend son inspiration de l’aviation

Inauguré en 2015, le Hall 39–45 présente les aéronefs de la période de la Seconde Guerre mondiale du Musée de l'Air et de l'Espace. Conçu comme un vaste volume de type hangar industriel, il s’inspire des techniques constructives de l’aviation de 1939–45 afin de s’inscrire pleinement dans le contexte muséographique et son environnement aéroportuaire.

La structure du hall associe une charpente en acier Corten tridimensionnelle à une ossature secondaire en bois lamellé-collé, supportant une couverture simple peau en bac acier. Les études menées avec les bureaux d’études structure ont permis de réaliser un volume dégagé et aérien, mettant l’accent sur la légèreté et la lisibilité des éléments porteurs.

Côté pistes, la façade vitrée à écailles est protégée par 21 cassettes brise-soleil évoquant les volets déployés d’une aile d’avion à l’atterrissage. Cette composition permet un apport important de lumière naturelle et offre aux visiteurs une vue sur les pistes de Aéroport du Bourget, établissant un dialogue direct entre les avions contemporains et les aéronefs historiques présentés dans le hall.

Dans ce contexte, l’objectif d’amélioration des conditions thermiques et hygrométriques doit s’inscrire avec justesse dans une architecture forte, conçue pour mettre en valeur les collections tout en préservant l’identité du lieu.



Vue de la porte monumentale



Vue d’ensemble de l’intérieur du Hall 39-45

Enjeux

L’intervention a pour enjeu principal l’amélioration de la performance thermique du bâtiment, tout en préservant son expression architecturale.

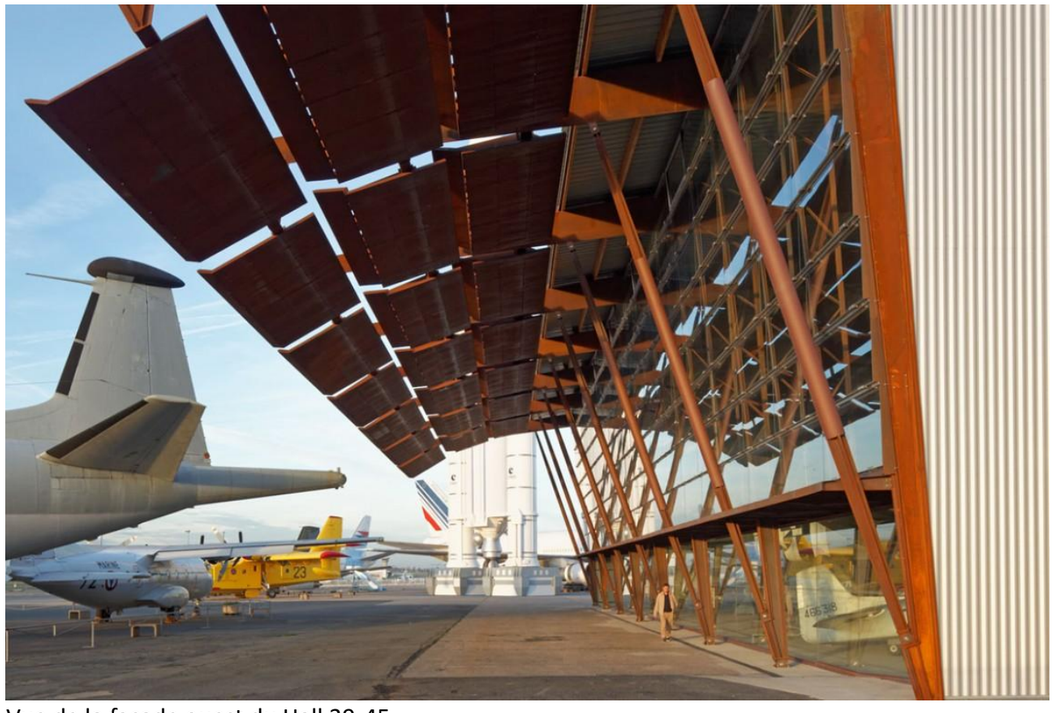
Il s’agit de mettre en œuvre une isolation performante et intégrée, afin de renforcer la performance énergétique globale, sans altérer la lisibilité de la structure en acier Corten ni la transparence de la façade ouest.

L’opération devra également maintenir la cohérence conceptuelle entre le site aéroportuaire, le contenu muséographique et l’enveloppe bâtie, en respectant l’identité architecturale du hall.

Périmètre d’intervention

Les travaux envisagés portent sur les éléments suivants :

- Isolation de la **toiture**
- Isolation des **façades nord et sud**
- Traitement thermique de la **porte coulissante monumentale**
- Remplacement des **vitrages et portes vitrées en partie basse**
- Amélioration thermique de la **façade vitrée ouest**
- Renforcement de **l’étanchéité à l’air de l’enveloppe**



Vue de la façade ouest du Hall 39-45



Vue du Hall 39-45 depuis l’entrée côté « rue » du Musée

Isolation toiture

Stratégie thermique toiture

Un confort thermique optimisé toute l'année

Les études thermiques montrent que la toiture constitue le poste majeur dans le comportement thermique du bâtiment. Une isolation performante permet d'améliorer l'inertie intérieure, de réduire fortement les déperditions hivernales et de limiter les surchauffes estivales, garantissant ainsi un confort thermique optimal toute l'année pour les visiteurs.

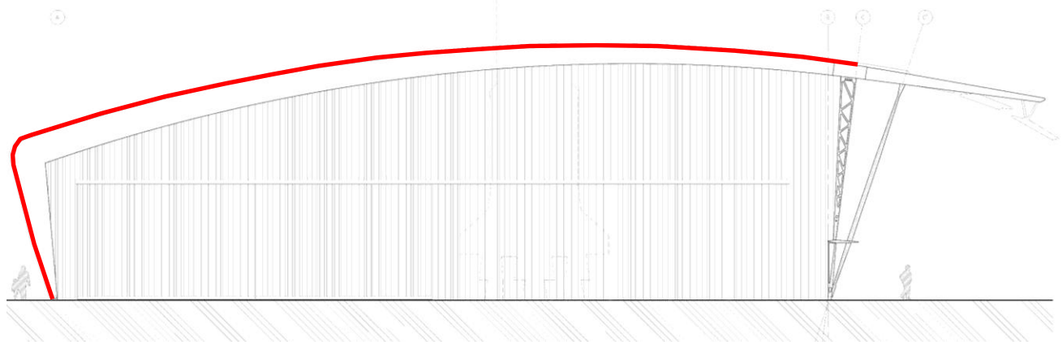
Une image architecturale maitrisée

La structure constitue la surface la plus visible depuis l'intérieur du volume. Afin de préserver l'élément central de l'identité architecturale du projet, il est essentiel de maintenir apparente la structure tridimensionnelle en acier Corten. Cette contrainte définit la limite de l'intervention : toute solution mise en œuvre doit améliorer la performance thermique tout en respectant et en valorisant la lisibilité de la structure principale.

Epaisseur d'isolant requise

Les simulations réalisées par B2T montrent qu'au-delà de 20cm d'isolant, les gains de performance deviennent limités au regard de l'épaisseur supplémentaire et du surcoût généré. Une épaisseur de 20cm apparaît ainsi comme le compromis le plus cohérent au regard des objectifs énergétiques et des contraintes du projet.

Variantes météo base (moyenne)		Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
20cm	V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	307 363 kWh	28 167 kWh	97 189 kWh	**432 719 kWh**
22cm	V4 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	302 074 kWh	27 949 kWh	97 189 kWh	**427 212 kWh**
26cm	V5 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	297 758 kWh	27 688 kWh	97 189 kWh	**422 635 kWh**



Plan de repérage de la couverture à isoler



Repérage de la couverture à isoler



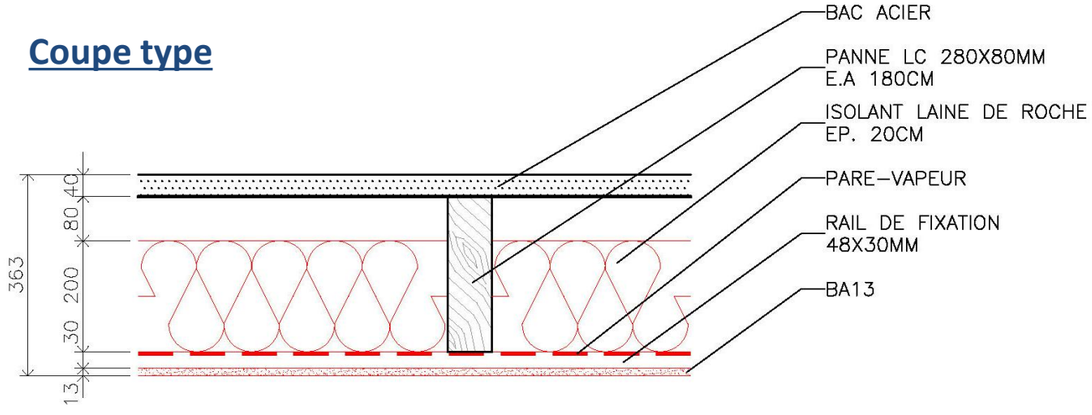
Repérage de la couverture à isoler

Variante 1 : Isolation intérieur finition sous pannes

Une solution intérieure continue à finition homogène

Une première approche partirait sur l'hypothèse que les pannes en lamellé-collé ne sont pas des éléments structurants de l'architecture du Hall 39-45 et peuvent être dissimulées, définissant ainsi la limite de l'intervention et permettant une couverture thermique continue tout en respectant l'intention architecturale globale. La solution retenue prévoit un complexe isolant en laine de roche entre les pannes existantes, avec un habillage en sous-face par plaques de plâtre, offrant non seulement une amélioration thermique significative, mais également un confort acoustique renforcé, notamment contre les bruits d'impact des précipitations.

Coupe type





Proposition de rendu de finition sous pannes

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de toiture mis en œuvre se compose des couches suivantes, mises en place de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Isolation thermique** : 20cm de laine de roche semi-rigide, disposée entre les pannes existantes en lamellé-collé, assurant une performance thermique continue et une inertie renforcée.
- **Pare-vapeur** : Mise en place d'un pare-vapeur continu et étanche, positionné sous l'isolant, destiné à contrôler les transferts de vapeur d'eau, prévenir tout risque de condensation dans l'isolant et garantir sa durabilité dans le temps.
- **Ossature secondaire** : Fixation d'une ossature métallique pour plaques de plâtre, fixée sous les pannes et par-dessus le pare-vapeur, permettant un support régulier et plan pour les plaques de finition.
- **Habillage intérieur** : Pose de plaques de plâtre BA13 sur ossature métallique, plafond peint en blanc mat, tout en préservant intégralement la visibilité de la structure tridimensionnelle en acier Corten.

Cette composition assure l'efficacité thermique et la pérennité du complexe, tout en maintenant l'expression architecturale de la structure Corten.

Sa mise en œuvre est toutefois complexifiée par la nécessité de fermer le Hall 39-45 et évacuer les aéronefs le temps des travaux. Elle implique également un entretien périodique du plafond peint afin de garantir un aspect homogène dans le temps.

Estimation variante n°1

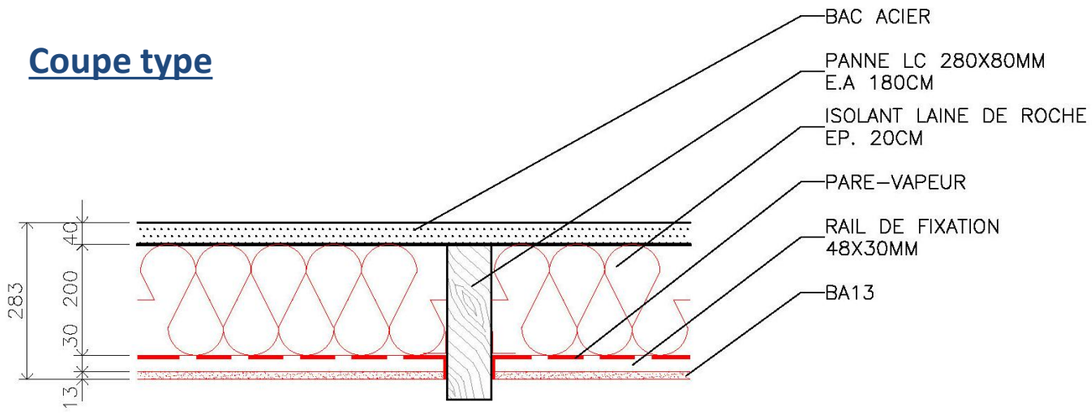
Toiture variante n°1	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	50 000 €	50 000 €
Isolant laine de roche 20cm	m²	2229,0	20 €	44 580 €
Plaques de plâtre BA13 sur rail	m²	2346,0	95 €	222 870 €
Peinture	m²	2346,0	25 €	58 650 €
TOTAL				**376 100 €**

Variante 2 : Isolation intérieur finition entre pannes

Un complexe intégré préservant la lecture structurelle

Une seconde approche consiste à préserver la lisibilité de la structure bois, considérant que dissimuler entièrement les pannes modifiera sensiblement l'architecture du hall. Dans cette hypothèse, les extrémités des pannes restent visibles, tandis que l'isolation est installée entre elles. Le parement de finition est également positionné entre les pannes, plutôt qu'en sous-face, afin de maintenir l'expression architecturale du volume. Cette solution permet de concilier confort thermique et acoustique avec le respect de l'identité du bâtiment, offrant un compromis entre performance et lisibilité structurelle.

Coupe type





Alternative de rendu de finition entre pannes

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de toiture mis en œuvre se compose des couches suivantes, mises en place de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Isolation thermique** : 20 cm de laine de roche semi-rigide, posée entre les pannes existantes en lamellé-collé, assurant une performance thermique continue et une inertie renforcée, tout en laissant visibles les extrémités des pannes afin de préserver l'identité architecturale du projet.
- **Pare-vapeur** : Mise en place d'un pare-vapeur continu et étanche, positionné sous l'isolant, destiné à contrôler les transferts de vapeur d'eau, prévenir tout risque de condensation dans l'isolant et garantir sa durabilité dans le temps.
- **Ossature secondaire** : Fixation d'une ossature métallique entre les pannes et par-dessus le pare-vapeur, permettant un support régulier et plan pour le parement de finition.
- **Habillage intérieur** : Pose de plaques de plâtre BA13 sur ossature métallique, peintes en blanc mat, positionnées entre les pannes pour conserver la lisibilité de la structure bois.

Cette stratification garantit également l'efficacité thermique du complexe, le confort acoustique et sa durabilité, tout en préservant la lecture architecturale de la charpente existante. Elle présente toutefois les mêmes contraintes de mise en œuvre et d'entretien que la variante n°1.

Estimation variante n°2

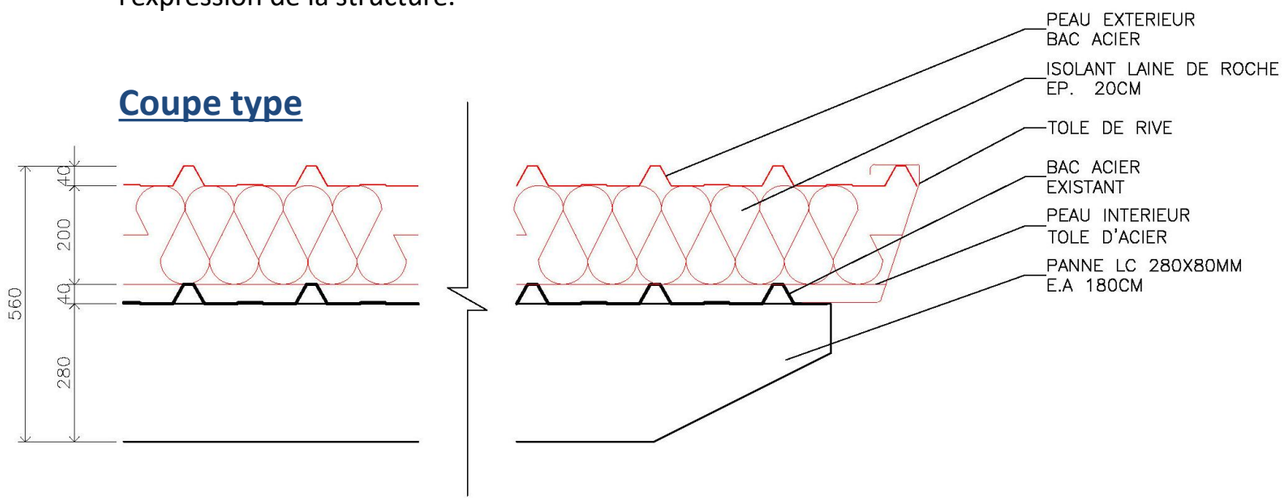
Toiture variante n°2	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	50 000 €	50 000 €
Isolant laine de roche 20cm	m²	2229,0	20 €	44 580 €
Plaques de plâtre BA13 sur rail	m²	2229,0	105 €	234 045 €
Peinture	m²	2346,0	25 €	58 650 €
TOTAL				**387 275 €**

Variante 3 : Isolation par l'extérieur

Une isolation qui conserve l'architecture du Hall 39-45

Une troisième approche consiste à améliorer la performance thermique du bâtiment en doublant le bac acier existant par l'extérieur grâce à la mise en œuvre de panneaux sandwich type bac acier avec âme en laine de roche. Cette intervention par l'extérieur permet de renforcer significativement l'isolation et de limiter les ponts thermiques au droit de la charpente, tout en conservant strictement l'aspect architectural existant, notamment à intérieur du hall. Elle offre ainsi un gain notable en performance thermique et acoustique sans modifier la perception du volume ni l'expression de la structure.

Coupe type



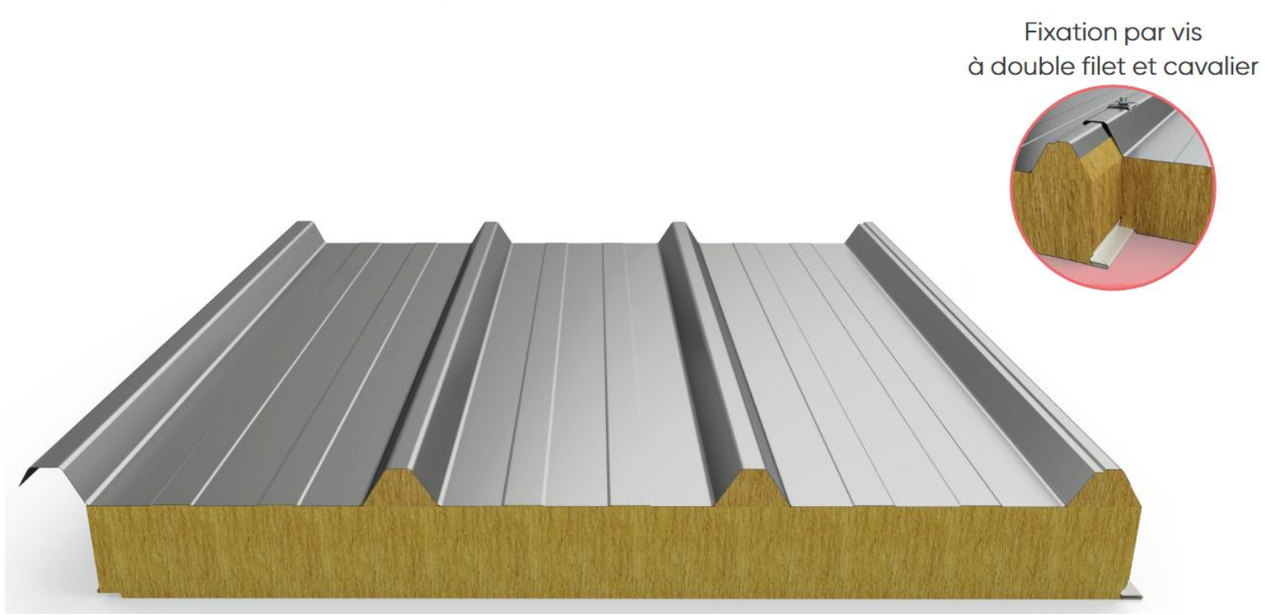


Schéma de composition d'un panneau sandwich en laine de roche

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de toiture mis en œuvre repose sur la fourniture et la pose d'un procédé industriel préfabriqué de type panneaux sandwich bac acier isolés type ARCELORMITTAL « Ondarock T », mis en œuvre en doublage par l'extérieur du bac acier existant. Ces éléments manufacturés en usine intègrent l'ensemble des composants et se composent des couches suivantes, de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Peau extérieure :** Tôle d'acier nervurée prélaquée, identique au bac acier existant, assurant protection et continuité esthétique de la couverture.
- **Isolation thermique intégrée :** Âme en laine de roche haute densité, garantissant une performance thermique élevée, une amélioration acoustique et une réduction significative des ponts thermiques grâce à la continuité de l'isolation par l'extérieur.
- **Parement intérieur métallique :** Sous-face en tôle d'acier à finition lisse et simple, non destinée à être visible, contribuant à la rigidité de l'ensemble et à la facilité de mise en œuvre du panneau.

Les panneaux sont fixés mécaniquement sur la structure porteuse existante au moyen de fixations traversantes. Un façonnage particulier sur les éléments cintrés sera à étudier. Cette solution permet d'améliorer significativement les performances thermiques de la toiture sans aucune interruption ou modification de l'aspect intérieur et extérieur du bâtiment.

Elle présente en outre l'avantage majeur d'une mise en œuvre permettant de maintenir le Hall 39-45 ouvert au public pendant les travaux et sans devoir déménager les aéronefs.

Estimation variante n°3

Toiture variante n°3	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	15 000 €	15 000 €
Panneau sandwich laine de roche 200mm	m²	2660,0	120 €	319 200 €
Tole de rive	ml	108,4	40 €	4 336 €
TOTAL				**338 536 €**

Isolation façades nord et sud

Stratégie thermique façades

Une isolation adaptée aux façades

Si la toiture reste le poste principal de déperdition thermique, les façades laterales constituent néanmoins des surfaces à traiter pour assurer une performance globale cohérente. La verticalité des parois implique des interactions spécifiques avec l'ensoleillement et le vent, et leur isolation contribue à limiter les pertes hivernales et les parois froides, tout en participant au confort intérieur des usagers.

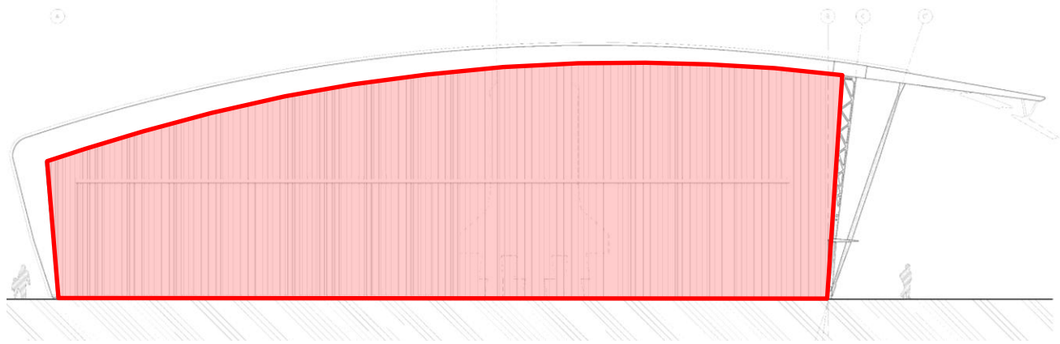
Une intervention respectueuse de l'architecture

Les façades, bien que secondaires par rapport à la toiture, participent fortement à l'identité du bâtiment. Toute solution d'isolation doit donc préserver l'expression verticale, notamment les poteaux et idéalement les lisses horizontales également. Cette approche définit la limite de notre intervention : améliorer la performance thermique tout en conservant la lisibilité et la cohérence architecturale de l'enveloppe.

Epaisseur d'isolant requise

Les simulations thermiques indiquent qu'une épaisseur de 11cm de laine de roche en façade permet d'atteindre un bon compromis entre performance énergétique, encombrement et contraintes constructives. Cette dimension optimise les gains thermiques sans générer de surcoût ou de modifications excessives de l'apparence.

Variantes météo base (moyenne)	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
11cm V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	307 363 kWh	28 167 kWh	97 189 kWh	**432 719 kWh**
15cm V4 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	302 074 kWh	27 949 kWh	97 189 kWh	**427 212 kWh**
19cm V5 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	297 758 kWh	27 688 kWh	97 189 kWh	**422 635 kWh**



Plan de repérage des façades à isoler



Repérage des façades à isoler



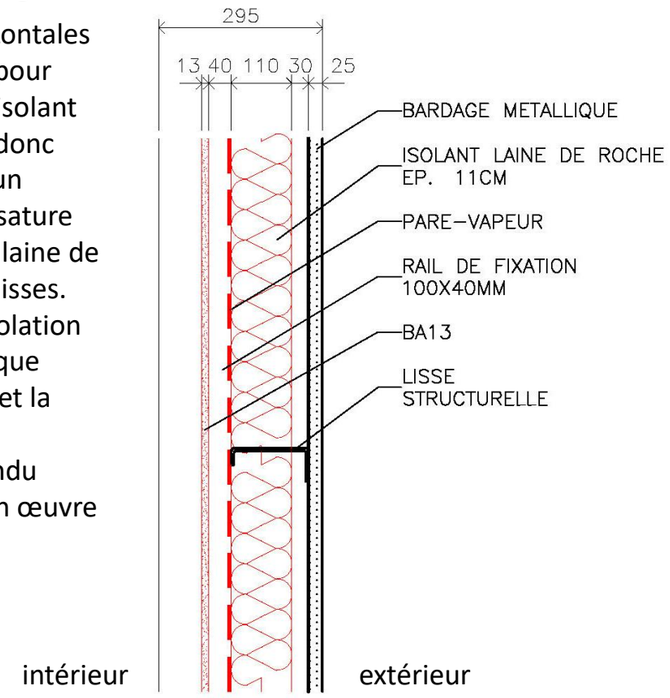
Repérage des façades à isoler

Variante 1 : Isolation intérieure

Une solution intérieure en remplissage

Dans cette solution, les lisses horizontales de 14cm sont trop peu profondes pour accueillir l'ensemble du complexe isolant tout en restant visibles. Elles sont donc entièrement camouflées derrière un parement rapporté fixé sur une ossature secondaire, tandis que l'isolant en laine de roche de 11cm est placé entre les lisses. Cette configuration garantit une isolation quasi continue, un confort acoustique renforcé, et préserve la verticalité et la lisibilité des poteaux. Le parement rapporté permet également un rendu intérieur homogène et une mise en œuvre simplifiée.

Coupe type





Vue projetée de la finition entre poteaux devant les lisses

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de façade mis en œuvre se compose des couches suivantes, de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Isolation thermique :** 11cm de laine de roche semi-rigide, posée entre les lisses horizontales existantes, assurant une isolation quasi continue.
- **Pare-vapeur :** Mise en place d'un pare-vapeur continu et étanche, positionné sur l'isolant, destiné à contrôler les transferts de vapeur d'eau, prévenir tout risque de condensation dans l'isolant et garantir sa durabilité dans le temps.
- **Ossature secondaire :** Fixation d'une ossature métallique renforcée positionnée devant les lisses horizontales et par-dessus le pare-vapeur. Une section élargie de 100 x 40 mm assure une rigidité suffisante pour supporter le parement sur toute la hauteur de la façade, jusqu'à 11m, tout en garantissant un support stable et plan pour les plaques de finition.
- **Habillage intérieur :** Pose de plaques de plâtre BA13 sur l'ossature métallique, peintes en blanc satiné, tout en laissant visibles les poteaux verticaux afin de conserver la perception de verticalité des façades.

Cette stratification garantit la continuité thermique, le confort acoustique et la durabilité du système, mais la lecture architecturale de des façades est impactée. L'accès du public devra être limité pendant les travaux.

Estimation variante n°1

Façades variante n°1	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	5 000 €	5 000 €
Isolant laine de roche 11cm	m²	811,0	20 €	16 220 €
Plaques de plâtre BA13	m²	811,0	55 €	44 605 €
Peinture	m²	811,0	20 €	16 220 €
TOTAL				**82 045 €**

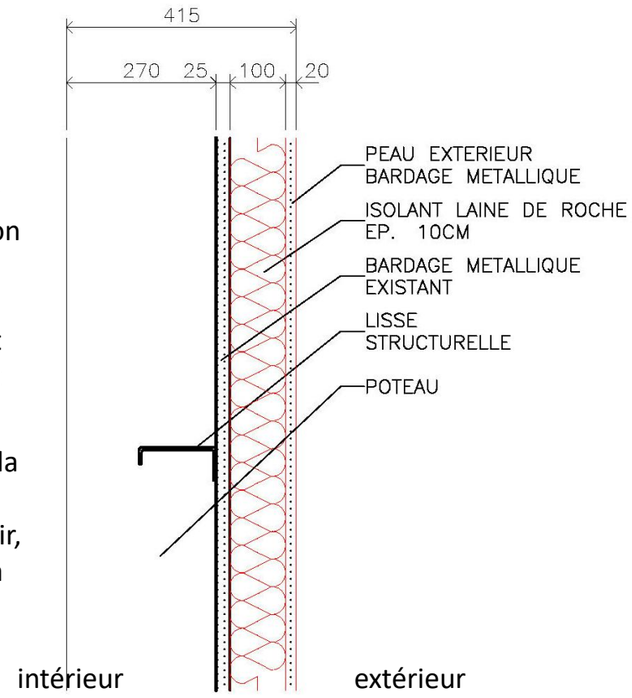
Variante 2 : Isolation extérieure

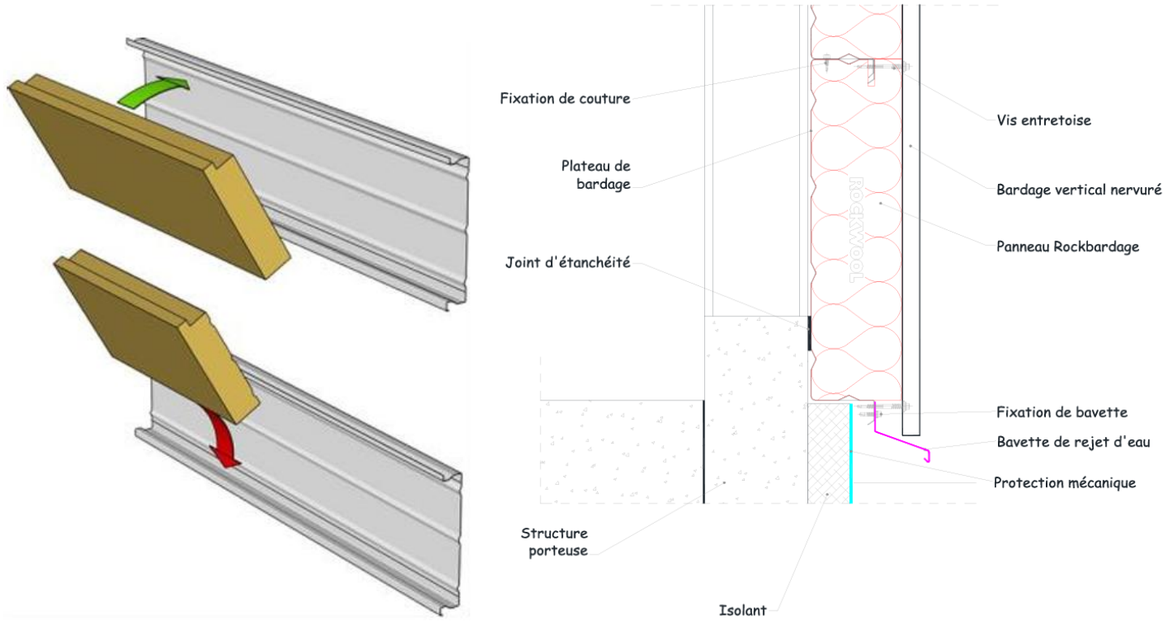
Une isolation en double couche

Une seconde approche consiste à améliorer la performance thermique des façades par la mise en œuvre d'un bardage métallique double peau par l'extérieur, intégrant une âme isolante en laine de roche de 11cm. Cette intervention par l'extérieur permet de renforcer significativement l'isolation et de limiter les ponts thermiques, tout en conservant l'aspect architectural intérieur existant et la lisibilité de la structure.

Cette solution offre une amélioration de la performance thermique (suppression ponts thermiques) et de l'étanchéité à l'air, sans altérer la perception du volume ni la verticalité des façades.

Coupe type





Mise en œuvre du bardage métallique double peau

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de façade mis en œuvre repose sur la fourniture d'un complexe laine de roche-bardage métallique installé par l'extérieur en doublage de la paroi existante. Cette solution se compose des couches suivantes, de l'intérieur vers l'extérieur :

- **Lisse horizontale:** « Z » de fixation galvanisé 50*110*50 15/10°
- **Isolation thermique :** Laine de roche haute densité d'épaisseur 11cm type ROCKFACADE PREMIUM, garantissant une performance thermique élevée et une réduction significative des ponts thermiques grâce à la continuité de l'isolation par l'extérieur.
- **Peau extérieure :** Tôle d'acier nervurée prélaquée, assurant protection et continuité de l'enveloppe.

Les lisses sont fixées mécaniquement sur la structure porteuse existante selon les prescriptions du fabricant, assurant stabilité et étanchéité. Cette solution améliore significativement la performance thermique globale tout en préservant la lecture architecturale du bâtiment, et sans impacter les activités du hall pendant les travaux.

Estimation variante n°2

Façades variante n°2	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	5 000 €	5 000 €
Isolant laine de roche 11cm	m²	811,0	20 €	16 220 €
Bardage métallique	m²	811,0	110 €	89 210 €
TOTAL				**110 430 €**

Isolation porte coulissante monumentale

Stratégie thermique porte coulissante monumentale

Une amélioration ciblée

La porte coulissante en bardage métallique constitue un point particulier de l'enveloppe thermique. Par sa surface et son mode de fonctionnement, elle représente une zone de déperdition et d'infiltration d'air. Les guides et rails au sol, nécessaires au coulissement, laissent un jour important, accentuant ces pertes. L'amélioration de son isolation et de son étanchéité vise donc à limiter les déperditions de chaleur, réduire les infiltrations d'air et renforcer le confort intérieur, tout en contribuant à la performance thermique globale du bâtiment.

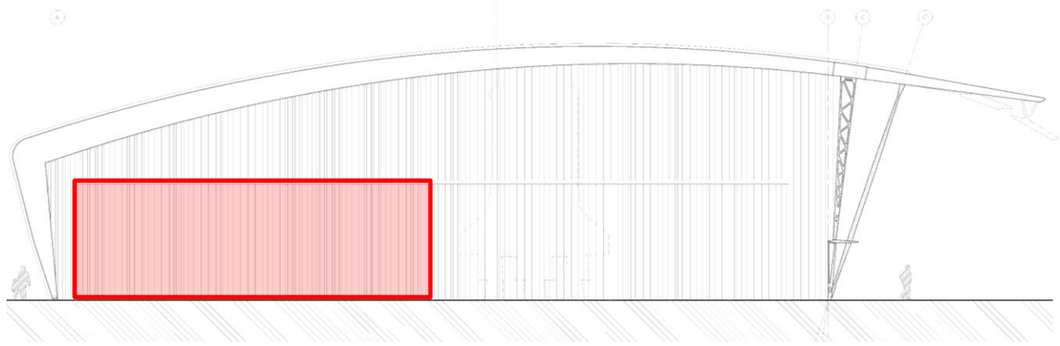
Une intervention respectueuse de l'architecture

La porte marque un élément majeur de la façade nord, intégré au rythme du bardage métallique. L'intervention doit préserver le principe constructif et l'aspect extérieur, tout en améliorant la performance thermique, sans altérer le fonctionnement de la porte.

Amélioration des performances thermiques

L'amélioration visée doit atteindre un niveau de performance cohérent avec celui des façades isolées, tout en restant compatible avec le coulissement et la structure existante. L'objectif est de réduire significativement les déperditions de cette zone sensible, sans compromettre son aspect ni sa fonctionnalité.

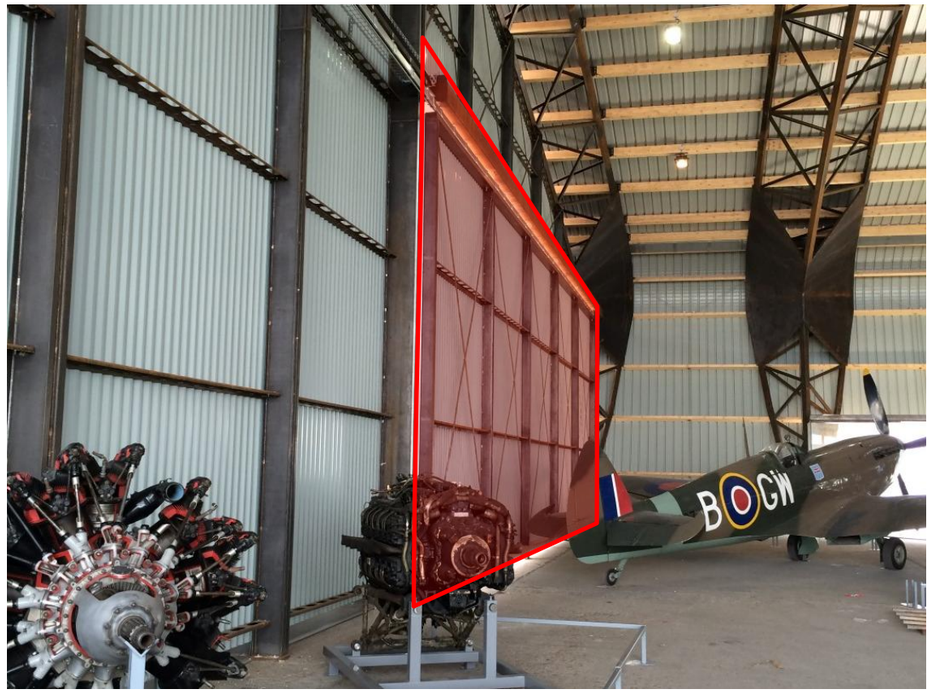
Variantes météo base (moyenne)	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
11cm V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	307 363 kWh	28 167 kWh	97 189 kWh	**432 719 kWh**
15cm V4 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	302 074 kWh	27 949 kWh	97 189 kWh	**427 212 kWh**
19cm V5 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	297 758 kWh	27 688 kWh	97 189 kWh	**422 635 kWh**



Plan de repérage de la porte monumentale à isoler



Repérage de la porte monumentale

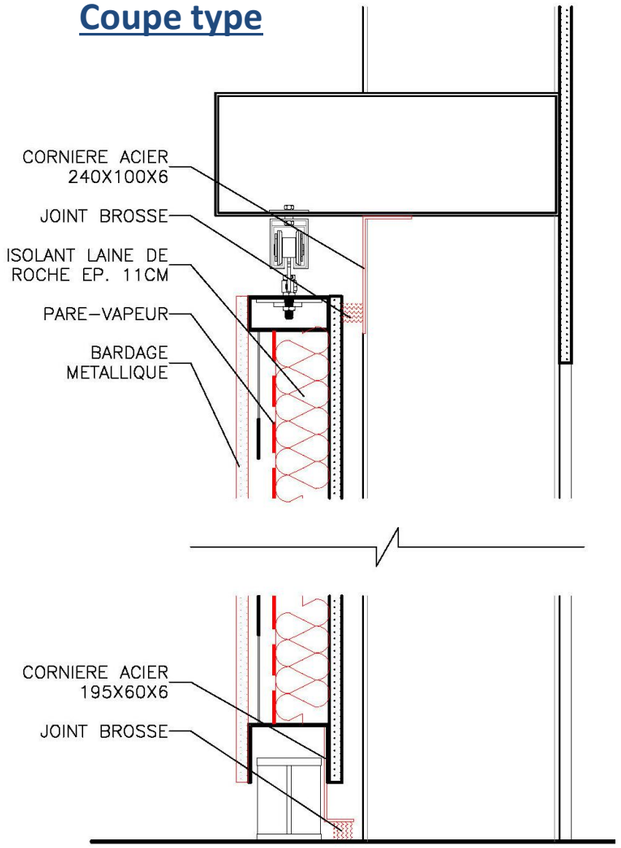


Repérage de la porte monumentale

Proposition : isolation intérieure

Le mode de fonctionnement de la porte ne permet pas l'isolation par l'extérieur, car la surépaisseur empêcherait le bon fonctionnement de la porte.
L'amélioration thermique de la porte coulissante repose donc sur une isolation intérieure de 11cm, intégrée dans les cadres structurels de la porte, permettant de conserver son principe constructif et son fonctionnement. Afin de limiter les infiltrations d'air, un joint brosse pour porte industrielle est installé en périphérie du cadre, fixé par une cornière métallique, assurant une étanchéité à l'air compatible avec le coulissement. Un habillage intérieur en bardage métallique sera fixé sur l'ossature, pour assurer la cohérence visuelle avec l'ensemble du hangar.

Coupe type





Proposition de finition porte coulissante

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de fermeture de la porte du hangar est conçu afin d'assurer la continuité de l'étanchéité à l'air et des performances thermiques de l'enveloppe. Il comprend les éléments suivants :

- **Étanchéité :** Mise en place d'un joint brosse en périphérie du cadre de la porte, fixé par une cornière métallique, garantissant l'étanchéité à l'air lorsque la porte est en position fermée.
- **Isolation thermique :** 11cm de laine de roche semi-rigide, posée entre les cadres métalliques existants de la porte, permettant une isolation quasi continue.
- **Pare-vapeur :** Mise en place d'un pare-vapeur continu et étanche, positionné côté intérieur de l'isolant, destiné à contrôler les transferts de vapeur d'eau, prévenir les risques de condensation dans l'isolant et garantir sa durabilité.
- **Habillage intérieur :** Pose d'un bardage acier nervuré, fixé sur une ossature métallique.

Cette composition garantit la continuité de l'étanchéité à l'air et la cohérence thermique de l'enveloppe du hangar, tout en préservant le principe constructif et le fonctionnement de la porte coulissante existante.

Estimation

Porte monumentale	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	3 000 €	3 000 €
Cornières acier	ml	36,0	70 €	2 520 €
Joint brosse 4cm	ml	47,9	15 €	719 €
Isolant laine de roche 11cm	m²	101,2	20 €	2 023 €
Bardage métallique	m²	107,4	120 €	12 884 €
TOTAL				**21 147 €**

Isolation vitrage partie basse

Stratégie thermique vitrage

L'entrée à l'est côté « rue » du musée se fait par deux larges ouvertures dans le bardage, avec quatre doubles portes en verre. La façade ouest, entièrement vitrée, se compose d'un vitrage continu sans montants verticaux, incluant deux doubles portes. Ce dispositif assure transparence, continuité visuelle et apports lumineux importants, mais génère des déperditions et des ponts thermiques liés aux vitrages simples et à leur pose bord à bord, révélant la faiblesse thermique de l'enveloppe.

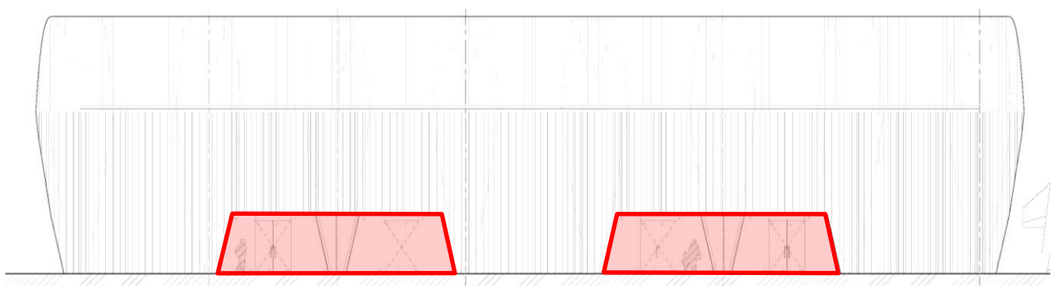
Préservation des qualités spatiales et lumineuses

Les ouvertures en partie basse, en lien avec la structure en Corten et la toiture en tôle, jouent un rôle clé dans l'ambiance et le parcours. Points d'appel dans l'espace, elles structurent les accès, apportent de la lumière naturelle et assurent transparence et transversalité. Les interventions devront préserver ces qualités, notamment l'apport lumineux et la lisibilité des accès, tout en améliorant les performances énergétiques.

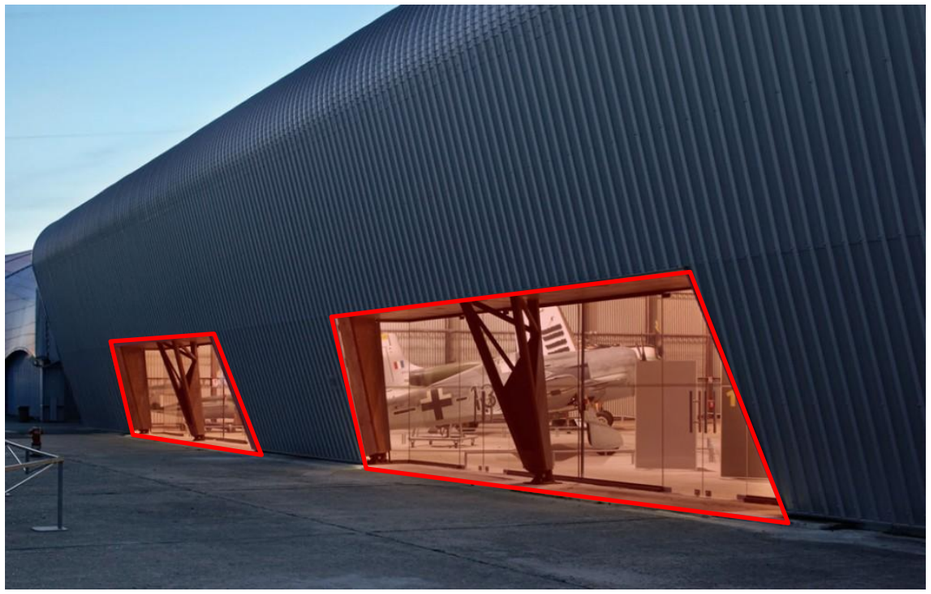
Optimisation des performances thermiques

Le passage au double vitrage constitue le principal levier, avec un gain d'environ 32% tout en conservant l'aspect existant. Le filtre solaire avec seulement 12 % apparaît comme secondaire. La mise en œuvre implique des adaptations, avec un coût et l'ajout possible de montants verticaux fins, traités de manière sobre pour préserver la continuité visuelle des façades.

Variantes météo 2040	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
avant travaux	1 033 936 kWh	141 050 kWh	97 189 kWh	1 272 174 kWh
V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	280 460 kWh	47 256 kWh	97 189 kWh	424 905 kWh
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	246 497 kWh	30 021 kWh	97 189 kWh	373 707 kWh
V2 - Rénovation menuiseries et isolation minimum (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	147 248 kWh	43 096 kWh	97 189 kWh	287 533 kWh



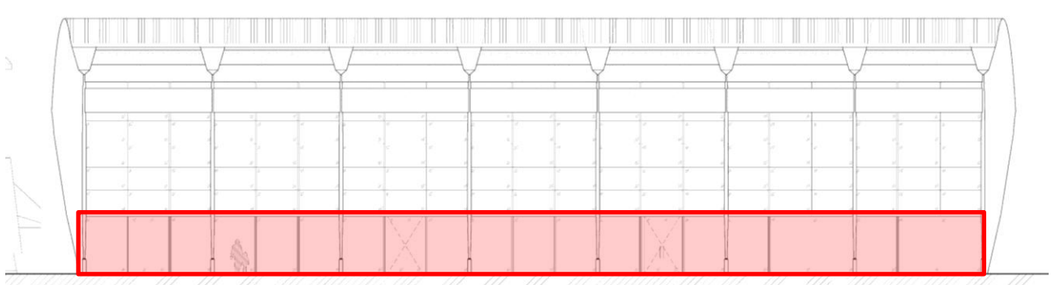
Plan de repérage des parties basses vitrées - façade est



Localisation des ensembles vitrés à remplacer en partie basse - Façade Est



Localisation des ensembles vitrés à remplacer en partie basse - Façade Ouest



Plan de repérage des parties basses vitrées - façade ouest

Proposition : double vitrage

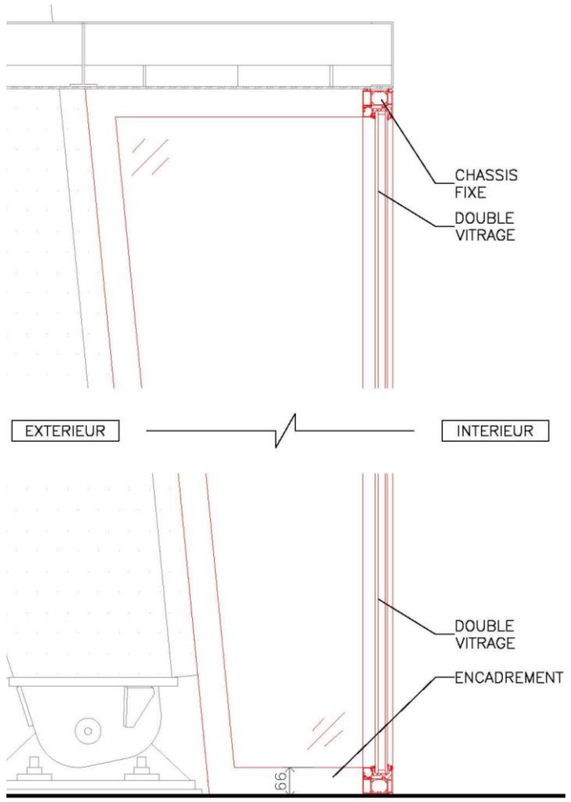
Optimisation thermique du vitrage

Cette proposition vise à améliorer les performances thermiques des ensembles vitrés en partie basses des façades Est et Ouest par le remplacement des simples vitrages sans montants par du double vitrage avec des ensembles industrialisés. Le passage au double vitrage implique le remplacement complet des façades actuelles. Le choix de la gamme de la nouvelle façade vitrée devra se porter sur des ensembles les plus fins possibles.

Cette intervention permet un gain significatif en performance thermique et en étanchéité à l'air, tout en conservant les accès et la lisibilité des ouvertures.

Un autre atout: le remplacement des portes simple vitrage sans encadrement par un ensemble type « mur rideau » permettra d'améliorer sensiblement la sécurisation de la façade.

Coupe type



Descriptif des travaux à réaliser

Le remplacement des ensembles vitrés se compose :

- **Ensembles vitrés fixes :** Dépose des vitrages existants et remplacement par des châssis fixes en aluminium à rupture de pont thermique, à profils fins, intégrant un double vitrage à profil fin du type TECHNAL « Soleal Next ».
- **Accessibilité :** Remplacement des doubles portes par des ensembles de mêmes dimensions en aluminium à rupture de pont thermique avec double vitrage isolant. Les accès existants sont conservés ; les nouvelles portes respectent les exigences d'accessibilité (passage libre, seuil réduit, équipements adaptés) tout en s'intégrant à l'écriture architecturale.
- **Étanchéité :** Mise en œuvre de joints périphériques en tableaux, en pied sur talon béton formant garde d'eau, et en tête au droit des interfaces avec la structure, complétées par des dispositifs de drainage intégrés assurant l'évacuation des eaux et la durabilité de l'ouvrage.
- **Intégration :** Les menuiseries sont appuyées en pied sur un talon béton et fixées en tête sur supports existants ou rapportés, assurant la reprise des charges et les gardes d'eau. Les raccords avec le sol et les éléments en surplomb sont traités pour garantir une continuité technique et visuelle, avec des profils aluminium thermolaqués en cohérence avec l'existant.




Vues projetées des menuiseries isolées en partie basse - façades ouest (à gauche) et est (à droite)

Estimation

Mur rideau	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	3 000 €	3 000 €
Mur rideau avec portes doubles vantaux	m²	222,0	600 €	133 200 €
TOTAL				**136 200 €**

Isolation façade vitrée ouest

Stratégie thermique façade vitrée ouest

La façade ouest, entièrement vitrée (hauteur 8m sur 45,5m de long), est composée de modules de simple vitrage posés bord à bord en écaille de haut en bas ; laissant circuler l'air par les interstices et décalages inter-verres, entraînant d'importantes déperditions en hiver.

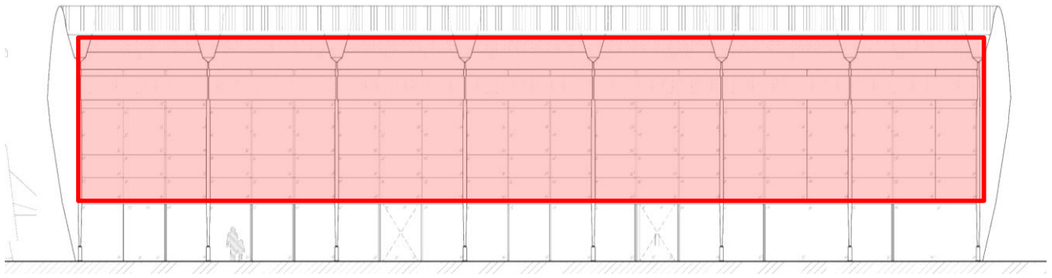
Isoler la transparence

Seule façade entièrement vitrée et la plus étendue, elle constitue un élément majeur de l'architecture du Hall 39-45. Par sa transparence elle ouvre une vue dégagée sur l'aéroport du Bourget, et permet l'apport de lumière naturelle. Toute intervention vise à préserver cette architecture singulière, ainsi que la lisibilité générale et la qualité des vues, afin de conserver l'identité du bâtiment.

Gain énergétique

Le remplacement par du double vitrage constitue le principal levier d'amélioration, permettant un gain thermique significatif (de l'ordre de 32%) tout en conservant l'aspect existant. Le recours à un simple filtre solaire (12%) reste une option techniquement beaucoup plus simple, mais moins performante.

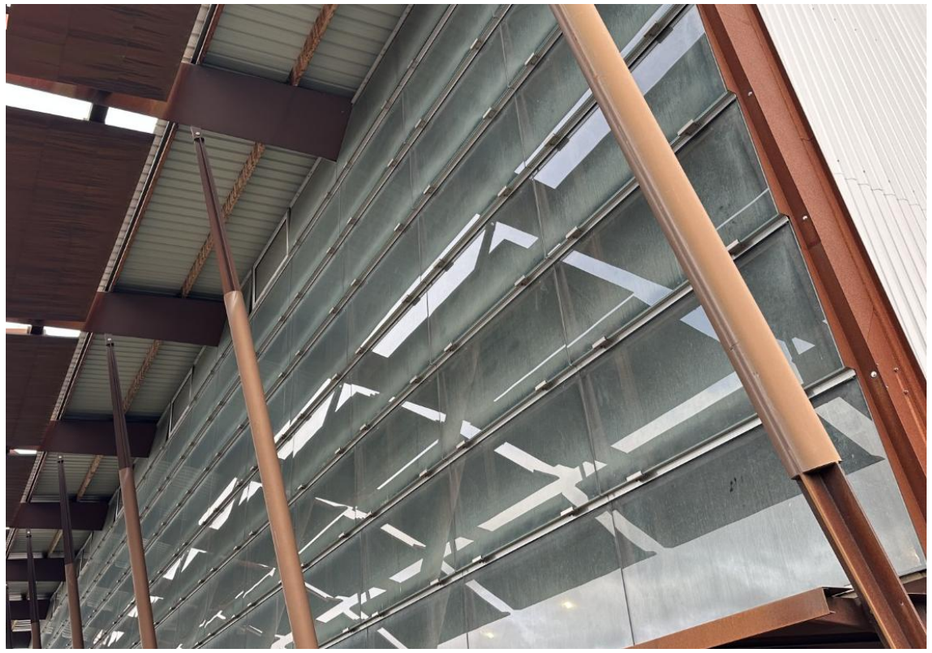
Variantes météo 2040	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
avant travaux	1 033 936 kWh	141 050 kWh	97 189 kWh	1 272 174 kWh
V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	280 460 kWh	47 256 kWh	97 189 kWh	424 905 kWh
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	246 497 kWh	30 021 kWh	97 189 kWh	373 707 kWh
V2 - Rénovation menuiseries et isolation minimum (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	147 248 kWh	43 096 kWh	97 189 kWh	287 533 kWh



Plan de repérage de la façade vitrée façade ouest



Repérage de la façade vitrée à traiter



Vue de la façade vitrée à traiter

Variante 1 : film solaire

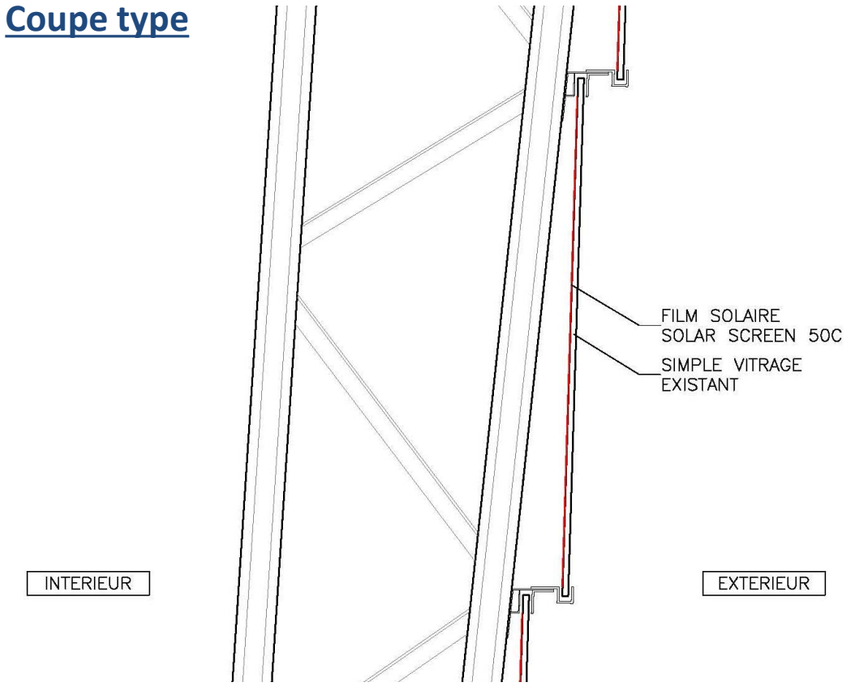
Une isolation simplifiée sans modification de l'existant

Cette première variante constitue l'approche la plus simple et la plus adaptée à la configuration existante. La façade existante est composée de simple vitrage feuilleté posé bord à bord, maintenu en partie haute et basse par des platines métalliques ponctuelles fixées sur des rails continus sur toute la longueur, avec un dispositif en décroché à chaque niveau de vitrage, formant un système modulaire difficile à modifier sans intervention lourde. Dans ce contexte, la mise en œuvre d'un film solaire apparaît comme une solution intéressante, directement applicable et sans modification de la structure ni des menuiseries.

Ce film solaire permet de réduire les consommations énergétiques, en limitant à la fois les déperditions thermiques et les apports solaires excessifs, ce qui améliore le confort en hiver comme en été. De plus, les espacements verticaux entre vitrages pourront être calfeutrés à l'aide d'un joint ou d'un profilé pour améliorer l'étanchéité à l'air.

À titre indicatif, un vitrage simple sans film ne rejette qu'environ 12% de l'énergie solaire tout en laissant passer 91% de la lumière visible. L'ajout d'un film permet d'augmenter ce rejet à environ 43%, avec une transmission lumineuse de l'ordre de 60 %. Une légère modification de la teinte et de l'opacité sont à prendre en considération.

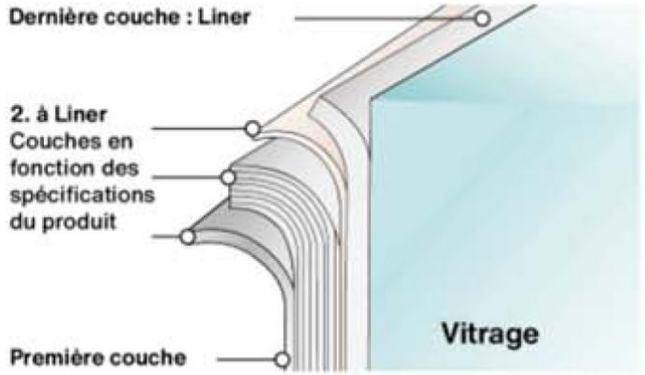
Coupe type



Descriptif des travaux à réaliser

Ce principe d'isolation de la façade vitrée ouest repose sur l'intervention suivante:

- **Film solaire:** Application sur la face intérieure du vitrage, d'un film thermique solaire de type Solar Screen 50C. Le film thermique permet de préserver parfaitement l'architecture de la façade existante en améliorant les performances thermiques du hall.
- **Calfeutrement**: Soit par injection d'un mastic silicone neutre transparent spécial vitrage, appliqué de manière continue à l'aide d'un pistolet extrudeur, en veillant au remplissage complet de l'espace sans inclusion d'air ; soit par fixation d'un profilé alu thermolaqué, mis en place entre les vitrages et maintenu par collage ou vissage.



Détail film thermique solaire Solar Screen 50C

Estimation

Façade vitrée ouest variante n°1	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	5 000 €	5 000 €
Film solaire	m²	377,5	85 €	32 084 €
Calfeutrement	ml	655,6	20 €	13 112 €
TOTAL				**50 195 €**

Variante 2 : Double vitrage

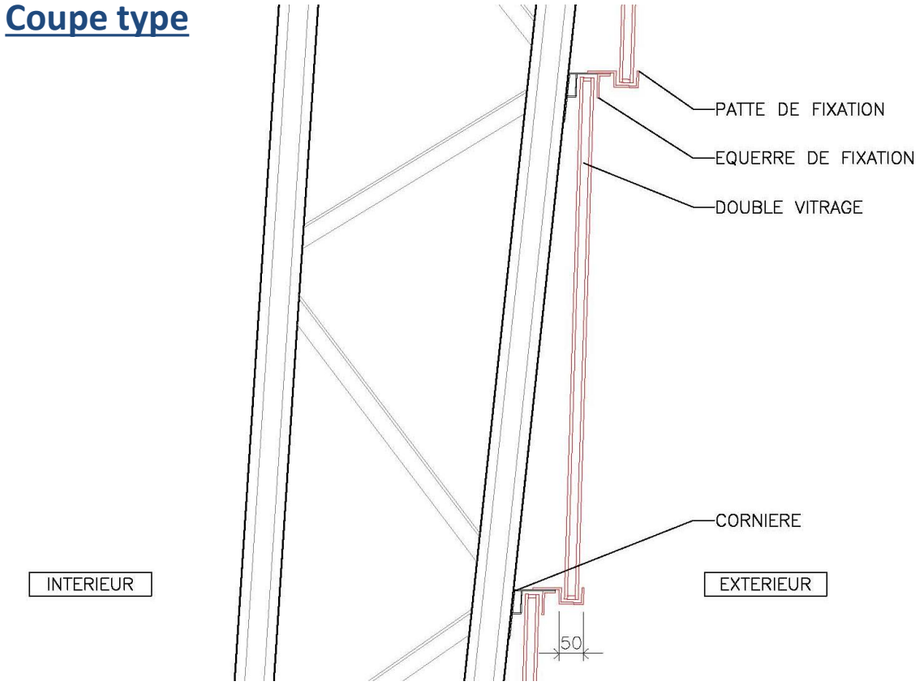
Une isolation par remplacement

Cette seconde proposition vise à améliorer les performances thermiques de la façade vitrée ouest en modifiant le système de fixation des vitrages et en remplaçant les simples vitrages par du double vitrage.

Les vitrages existants sont actuellement maintenus en partie basse par des pattes de fixation ponctuelles et en partie haute par une équerre. Afin d'améliorer les performances thermiques, il convient de réduire les infiltrations d'air et de tendre vers une paroi la plus continue possible. Dans cet objectif, en complément du remplacement des vitrages, les dispositifs de fixation (pattes et équerres) seront remplacés par des éléments élargis (pour recevoir le double vitrage) et continus (pour assurer l'étanchéité à l'air).

Le passage au double vitrage, associé à la continuité des appuis et des fixations, permet d'améliorer significativement l'isolation thermique en limitant les échanges entre l'intérieur et l'extérieur, avec une réduction des pertes de chaleur en période hivernale et des apports excessifs en période estivale, tout en préservant la transparence et l'aspect général de la façade. En revanche, cette solution implique une intervention très lourde et techniquement complexe, nécessitant le remplacement des supports existants, pour un coût largement supérieur à celui d'une solution par film solaire.

Coupe type



Descriptif des travaux à réaliser

Le remplacement des ensembles vitrés comprend les prestations suivantes :

- **Ensembles vitrés fixes :** dépose des vitrages existants pour remplacement par des doubles vitrages.
- **Dispositifs de fixation :** dépose des fixations par pattes ponctuelles et des équerres existantes, puis mise en œuvre de systèmes de maintien continus adaptés à la nouvelle configuration, avec des pattes de fixation élargies. Les vitrages sont positionnés et maintenus à l'aide de cales en caoutchouc assurant leur calage, leur mise en position et l'absorption des contraintes mécaniques.
- **Traitement des jonctions :** mise en œuvre de joints d'étanchéité performants à l'air et à l'eau en périphérie des vitrages et au droit des interfaces avec l'existant, complétée par un traitement soigné des raccords, afin d'assurer la continuité de l'enveloppe, de limiter les infiltrations et de garantir la durabilité de l'ouvrage.

Estimation

Façade vitrée ouest variante n°2	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	40 000 €	40 000 €
Cornière	ml	364,0	25 €	9 100 €
Equerre de fixation	ml	364,0	25 €	9 100 €
Patte de fixation	u	336,0	20 €	6 720 €
Double vitrage 1050x2150mm	u	379,3	680 €	257 897 €
TOTAL				**322 817 €**

Variante 3 : Double peau

Une isolation par mur rideau intérieur

Cette variante vise à améliorer les performances thermiques de la façade vitrée ouest, sans intervenir directement sur la façade existante. L'intervention consiste à créer une seconde peau intérieure, sous forme d'un mur rideau en double vitrage implanté en retrait de la façade existante et en continuité avec la partie basse vitrée, assurant une liaison continue du plancher à la toiture. Cette double paroi à l'avantage de créer une lame d'air ventilée qui joue un rôle de zone tampon qui limite les déperditions thermiques en hiver en réduisant les échanges directs avec l'extérieur et contribue à atténuer les surchauffes en été en amortissant les apports solaires.

L'impact visuel depuis l'extérieur est limité, la façade existante étant conservée en l'état, tandis que l'impact intérieur sera marqué par un nouveau mur rideau vitré, dont l'aspect ne sera pas particulièrement cohérent avec l'architecture du hall.

Cette solution permet donc d'améliorer significativement les performances thermiques en conservant l'aspect extérieur, mais a un cout élevé et en modifiant l'architecture de l'intérieur du hall.



Potentiel rendu du principe de double peau

Descriptif des travaux à réaliser

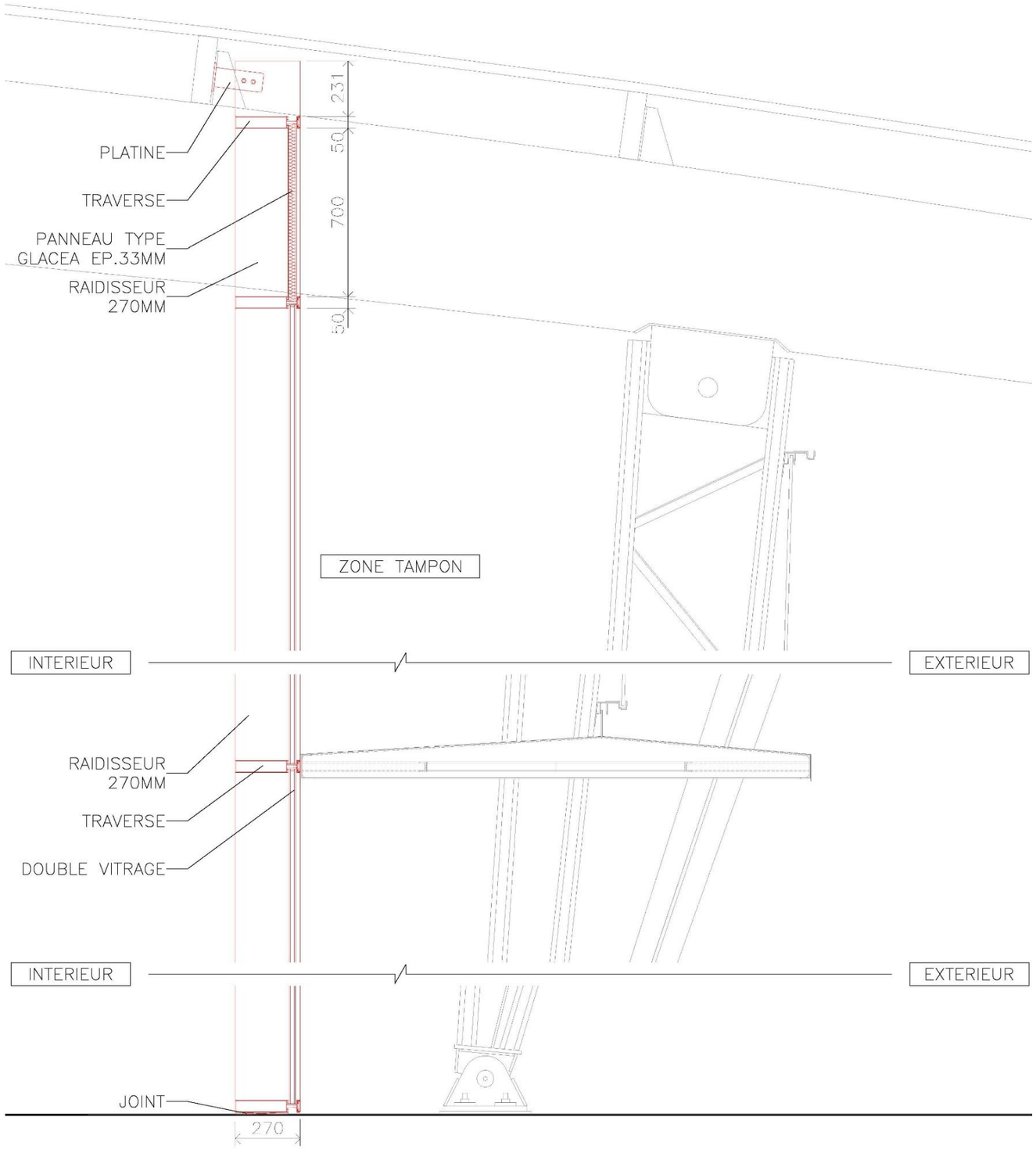
Réalisation d'un mur rideau avec profilé industrialisés du commerce du type TECHNAL « Soleal Next »:

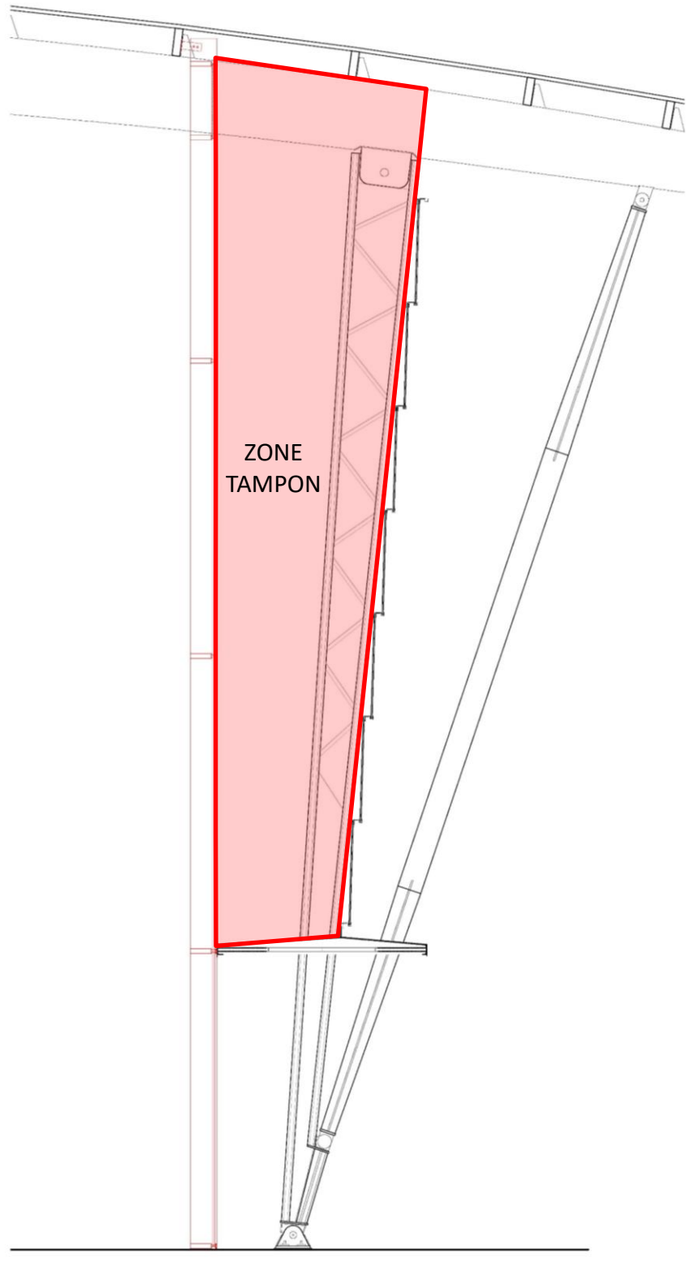
- **Ossature :** Mise en place d'une ossature primaire en complément de la charpente existante, composée de traverses et de raidisseurs. Ces éléments sont fixés au moyen de platines en acier, reposant sur la structure existante. L'ensemble assure le renforcement du mur-rideau tout en préservant l'identité architecturale.
- **Fixation :** Le mur-rideau s'aligne en partie basse sur les vitrages rénovés avec encadrement, et est repris en tête sur l'ossature existante du hangar, assurant la transmission des charges ainsi que le traitement des relevés d'étanchéité.
- **Mur-rideau :** Mise en œuvre de châssis fixes en aluminium à rupture de pont thermique, à profils fins, intégrant des doubles vitrages.
- **Étanchéité :** Application de joints périphériques en tableaux et en tête, au droit des interfaces avec la structure existante.

Estimation

Façade vitrée ouest variante n°3	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	40 000 €	40 000 €
Ossature primaire	ml	546,0	40 €	21 840 €
Mur rideau	m²	410,3	740 €	303 624 €
TOTAL				**365 464 €**

Coupes types





Compléments d’isolation de l’enveloppe

Stratégie thermique des casquettes

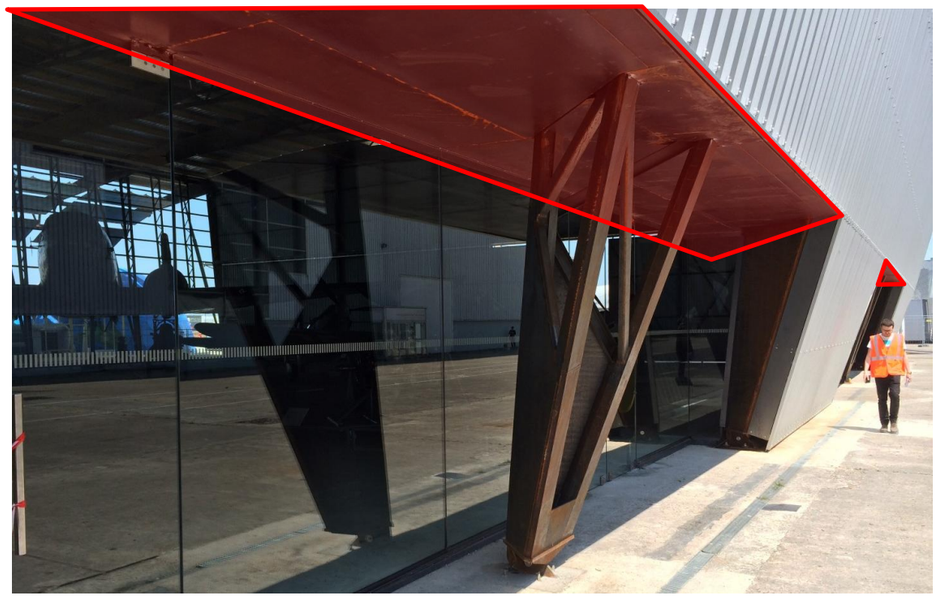
Les entrées côté est (donnant sur la « rue » du musée) sont protégées par deux auvents. La façade ouest (côté tarmac), quant à elle, présente une casquette continue, s'étendant sur toute la longueur de la façade. Ces casquettes sont réalisées en acier Corten, sans isolation, ce qui crée une discontinuité entre la partie basse et la partie haute des façades et engendre des ponts thermiques importants.

Une intervention respectueuse de l'architecture

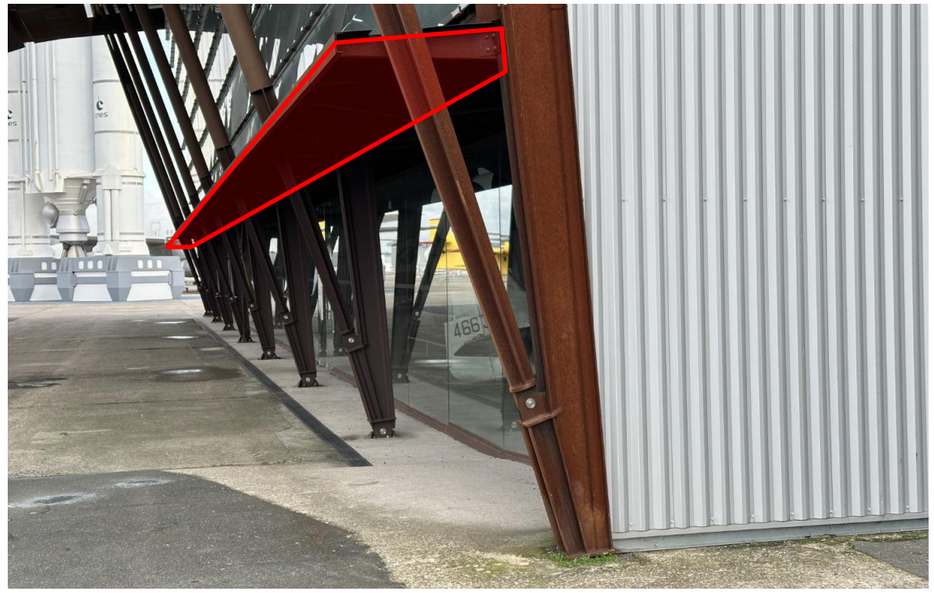
Les casquettes sont fines et intégrées de manière discrète à l'ensemble du hall, en cohérence avec l'esthétique globale du bâtiment. Les solutions envisagées devront donc préserver la forme et la fonction existantes tout en restant les plus discrètes possibles et harmonieuses avec l'architecture actuelle, tout en améliorant les performances énergétiques.

Amélioration des performances thermiques

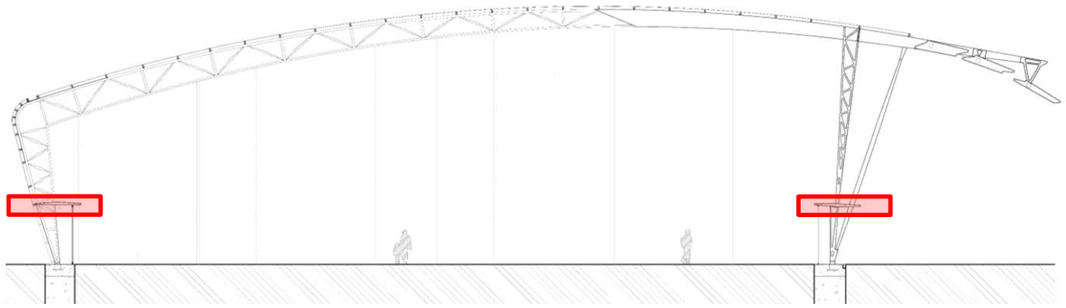
Même avec des solutions optimales d'isolation pour les façades et la toiture, les discontinuités créées par les casquettes peuvent réduire la performance thermique du hall. L'isolation des casquettes permettrait de pallier ces interruptions et d'optimiser l'efficacité énergétique des variantes choisies.



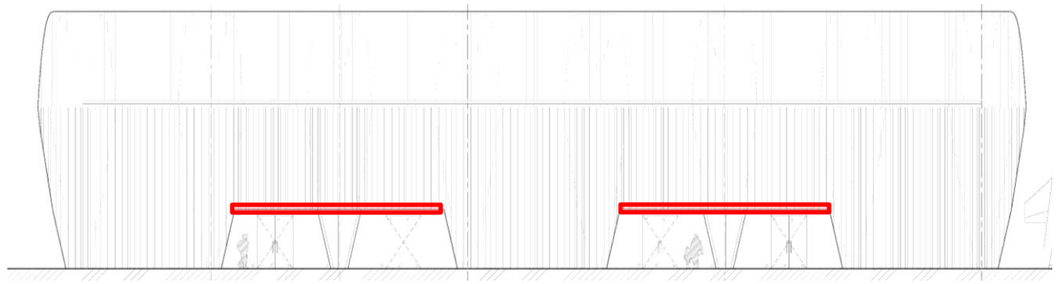
Repérage casquettes est



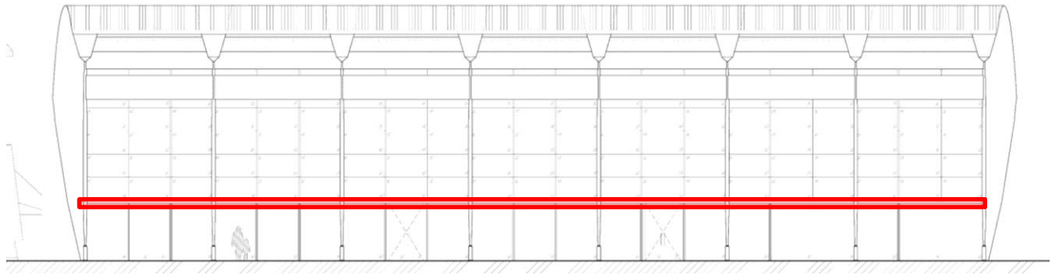
Repérage casquette ouest



Plan de repérage des casquettes est et ouest



Plan de repérage casquettes est



Plan de repérage casquette ouest

Proposition : isolations des casquettes

Cette solution vise à améliorer la performance thermique des casquettes en réduisant les ponts thermiques. Elle consiste à remplir la structure des casquettes avec de laine de roche.

Sur les deux casquettes côté est, un isolant pourra être déroulé par le dessus ou par le dessous, en démontant la plaque d'habillage du dessus de la casquette.

Sur la grande casquette côté ouest, l'isolant sera posé par le dessous avant fermeture par des plaques en acier Corten,

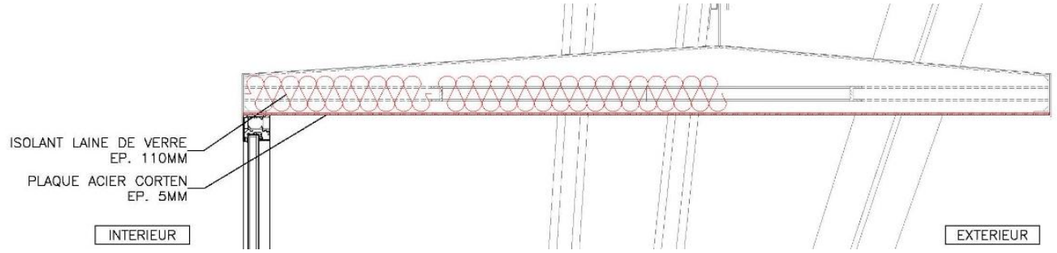
Cette intervention permet de limiter les discontinuités dans l'isolation des façades tout en préservant l'esthétique générale et l'intégration discrète des casquettes dans la structure du hangar.

Descriptif des travaux à réaliser

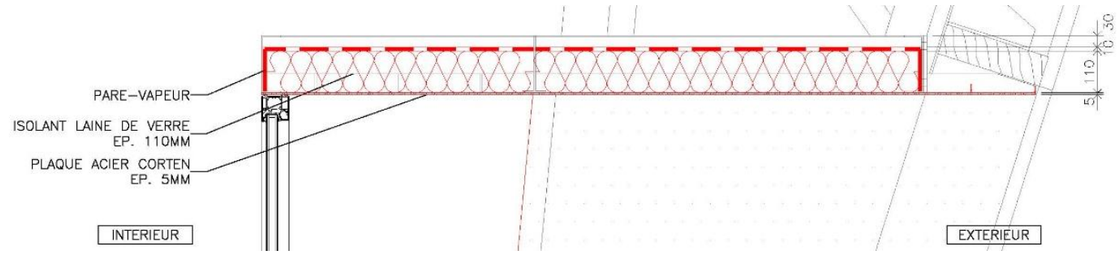
Le complexe d'isolation des casquettes se compose des éléments suivantes, mis en œuvre de haut en bas :

- **Pare-vapeur :** Mise en place d'un pare-vapeur continu et étanche, positionné sur la face vers l'intérieur du hangar, destiné à contrôler les transferts de vapeur d'eau, prévenir les risques de condensation dans l'isolant et garantir sa durabilité dans le temps. Le pare-vapeur n'est pas obligatoire, mais toute fois préférable.
- **Isolation thermique** : Mise en place de 11cm de laine de roche semi-rigide, posée entre les cadres structurels existants de la casquette.
- **Habillage extérieur** : Dépose de la plaque existante pour la façade est. Pose d'une plaque acier Corten sous l'ossature métallique de la casquette.

Coupe type



Casquette côté ouest (« tarmac »)



Casquettes côté est (« rue »)

Estimation

Casquettes	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	15 000 €	15 000 €
Façade Est				
Isolant laine de roche 11cm	m²	45,2	20 €	905 €
Plaque acier corten	m²	53,2	180 €	9 571 €
Façade Ouest				
Isolant laine de roche 11cm	m²	56,9	20 €	1 138 €
Plaque acier corten	m²	96,7	180 €	17 404 €
TOTAL				**44 017 €**

Stratégie thermique raccords ponctuels sol/façade

Amélioration ciblée des sources d'infiltrations d'air

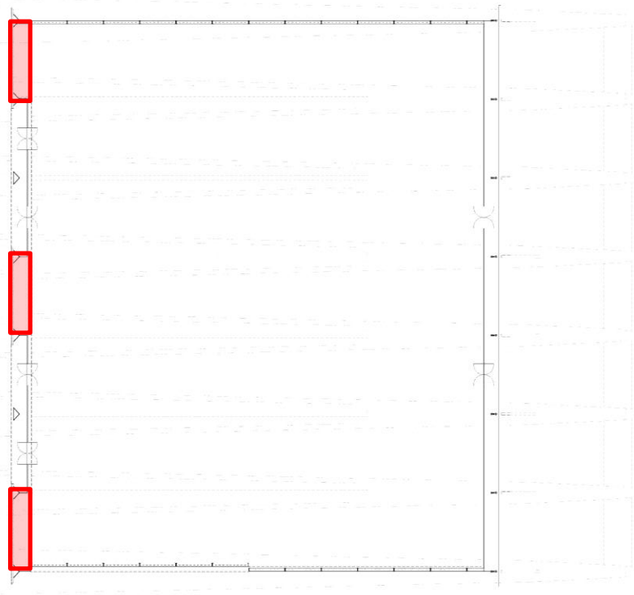
La liaison entre le sol et la façade est présente de nombreuses porosités à l'air, à l'origine de déperditions énergétiques. En complément des ensembles vitrés déjà traités, la partie basse du bardage ainsi que les ancrages des fermes des portiques en acier Corten constituent des points singuliers à traiter.

Une intervention respectueuse de l'architecture

Afin de préserver l'homogénéité et la lecture des façades, une intervention par l'intérieur est privilégiée. Les solutions retenues se doivent d'être discrètes, compatibles avec l'existant et cohérentes avec l'esthétique de l'enveloppe du bâtiment.

Amélioration des performances thermiques

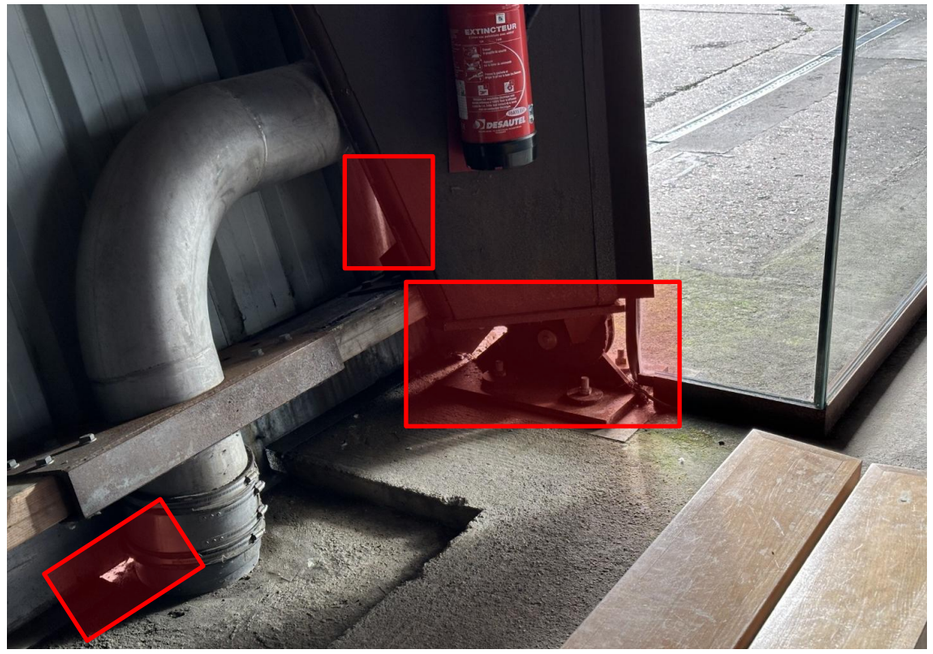
L'opération vise à traiter les points singuliers en pied de façade, en assurant la continuité de l'étanchéité à l'air et de l'isolation au droit de la jonction sol/façade. Elle permet de limiter les infiltrations et les pertes énergétiques, tout en proposant une réponse discrète et intégrée à l'architecture du bâtiment.



Plan de repérage calfeutrement liaison sol/façade



Repérage des infiltrations d'air



Répérage des infiltrations d'air

Proposition : isolation raccords sol/façade

Une isolation continue

Cette intervention vise à réduire les infiltrations d'air au niveau de la liaison entre la dalle et la façade Est en bac acier.

Le principe consiste à prolonger l'isolant des façades jusqu'au sol, en enveloppant la structure porteuse sans rupture. Afin d'englober les pieds de la structure tout en maintenant une isolation performante, un décroché est réalisé côté intérieur. Pour protéger l'isolant et garantir une cohérence esthétique avec l'existant, cet élément sera avec un revêtement en acier Corten. Cette intervention doit être assumée architecturalement.

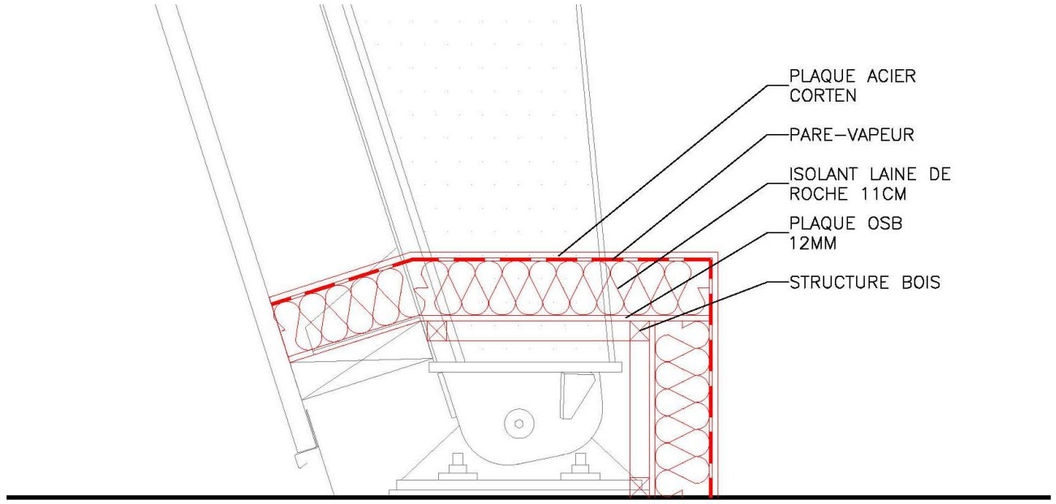
Le traitement continu des liaisons entre la dalle et la façade renforce l'efficacité des isolations déjà prévues en toiture et en parois. Cette continuité contribue à créer un espace thermiquement maîtrisé, tout en limitant l'impact visuel de l'intervention et en améliorant le confort des visiteurs dans l'espace d'exposition.

Descriptif des travaux à réaliser

Le complexe de calfeutrement proposé se compose des éléments suivants, disposés de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Ossature secondaire :** Pose d'une structure en bois avec un revêtement plein en OSB , fixé en continu pour garantir un support régulier à l'isolant.
- **Isolation thermique :** Pose de 11cm de laine de roche semi-rigide, permettant d'assurer une isolation performante et continue.
- **Pare-vapeur :** Pose d'un pare-vapeur continue et étanche côté intérieur de l'isolant, destiné à maîtriser les transferts de vapeur d'eau, prévenir les risques de condensation et assurer la durabilité des performances thermiques.
- **Habillage intérieur :** Pose de plaques d'habillage en acier Corten, en cohérence avec l'esthétique de l'existant.

Coupe type



Estimation

Raccords sol/façades	U	QTE	P/U €	TOTAL €
Installation chantier et études	Ens.	1,0	3 000 €	3 000 €
Plaque acier corten	m²	27,0	210 €	5 661 €
Isolant laine de roche 11cm	m²	23,4	20 €	467 €
Ensemble structure bois et platelage OSB	m²	23,4	105 €	2 454 €
TOTAL				**11 582 €**

B2T Ingēnierie

PHASE AUDIT/FAISABILITÉ

NOTICE TECHNIQUE DESCRIPTIVE

MUSÉE DE L'AIR ET DE L'ESPACE
Espace Hall 39/45
AÉROPORT PARIS LE BOURGET

THERMIQUE ET CVC

Maître d'ouvrage	Bureau d'études techniques
MUSÉE DE L'AIR ET DE L'ESPACE **AÉROPORT PARIS LE BOURGET** **Tél. :**	**B2T Ingénierie** **20, rue de Belfort** **75011 PARIS** **Tél. : 06 64 51 83 48**

30/03/2026	3	Ajout de solutions suite à présentation MO

Date	Indice	Modifications
20/02/2026	1	Création
27/02/2026	2	Solution bis – Films thermiques menuiseries extérieures
19/03/2026	3	Ajout de solutions suite à présentation MO
30/03/2026	4	Échanges travail MOE

SOMMAIRE

1. SOLUTIONS THERMIQUES 4
1.1. Hypothèses de base 4
1.1.1. PREAMBULE ET GENERALITES 4
1.2. Données d'entrées 4
1.3. Simulation Thermique Dynamtique (STD) 6
1.3.1. INTRODUCTION 6
1.3.1.1. Objet de l'étude 6
1.3.1.2. Cadre et hypothèses de calcul 6
1.3.1.3. Logiciel utilisé pour réaliser l'étude : 6
1.3.1.4. Démarche d'analyse 7
1.3.2. HYPOTHESE DE CALCULS 8
1.3.2.1 Fichier météo 2040 8
1.3.2.2 Vue 3D modélisation thermique avec masques environnants 9
1.3.2.3 Scenarios d'usage du bâtiment 10
1.3.2.4 Détail scenarios d'occupation par heure 10
1.3.2.5 Apports internes par personne 11
1.3.2.6 Performances thermiques 11
1.3.2.7 Jonctions à prévoir si isolation des parois 12
1.3.2.8 Jonctions à prévoir si remplacement des menuiseries 13
1.3.3. RESULTATS DES SIMULATIONS 14
1.3.3.1 Résultats fichier météo base 14
1.3.3.2 Résultats fichier météo 2040 15
1.3.4. Synthèse générale 23
1.3.5. COMPARATIF DE PLUSIEURS NIVEAUX D'ISOLATION 24
1.3.5.1 Résultats fichier météo base 25
1.3.5.2 Résultats fichier météo 2040 27
1.3.5.3 Analyse comparative des niveaux d'isolation des parois opaques 28

2. SOLUTIONS TECHNIQUES 30
2.1. Descriptions techniques sommaires 30
2.1.1. INTRODUCTION 30
2.1.2. CARACTERISTIQUES DU BATIMENT 30
2.1.2.1 Conditions extérieures de base 30
2.1.2.2 Conditions intérieures du bâtiment 31
2.1.2.3 Personnes 31
2.1.2.4 Apports internes 32
2.1.2.5 Compositions des parois 32
2.1.2.6 Menuiseries et portes 34
2.1.2.7 Ponts thermiques linéiques 35
2.1.3. CARACTERISTIQUES DU BATIMENT 36
2.1.3.1 Note de calculs de la CTA du Hall 39-45 36
2.1.3.2 Calcul de la batterie froide 38
2.1.3.3 Calcul de la batterie chaude 38

3. CONCLUSION 40

1. SOLUTIONS THERMIQUES

1.1. HYPOTHESES DE BASE

1.1.1. PRÉAMBULE ET GÉNÉRALITÉS

Le Hall 39/45 abrite à ce jour la collection d'avions du musée datant de la guerre 39/45 accessible aux visiteurs du Musée de l'Air et de l'Espace.

Ce hall est situé sur l'ancien tarmac de l'aéroport du Bourget, à l'extérieur de la partie « Musée » à proprement dit.

Ce hall est constitué de bac acier, sur 3 faces du bâti et d'une façade menuisée avec des simples vitrages.

L'analyse de l'existant suite à notre visite sur site et selon le rapport du 23 janvier 2026 réalisé par le cabinet d'architecture NKA avec lequel nous travaillons sur ce projet, a mis en exergue de multiples points ne permettant pas d'avoir une maitrise de la température et de l'hygrométrie dans ce hall.

En effet, les multiples ouvertures non étanches à l'air, ainsi que le manque d'isolation font qu'à ce jour, la température et les conditions d'hygrométrie intérieures sont proches de celles extérieures au bâti.

Ainsi, la problématique rencontrée à ce jour est d'étudier en phase de faisabilité, la possibilité d'isoler ce bâti selon plusieurs scénarii possibles d'une part et de proposer une solution technique d'autre part, qui permettrait de répondre au souhait de pouvoir maintenir une hygrométrie située entre 45 et 55% tout au long de l'année, afin de conserver au mieux les avions et autres pièces de collection situés dans ce hall.

1.2. DONNEES D'ENTREES

Les documents sur lesquels nous nous sommes appuyés pour réaliser la présente étude de faisabilité qui permettrait de répondre aux besoins mentionnés ci-avant, sont les suivants :

- Rapport thermique sur le bâti existant réalisé il y a quelques mois
- Notre visite de site du 16 janvier 2026
- Le rapport d'analyse de l'existant réalisé par le cabinet NKA le 23 janvier 2026, en commun avec nous par rapport aux relevés in situ

Nous tenons à noter que dans les préconisations du rapport thermique réalisé en amont de la présente étude de faisabilité par le cabinet RE-volution, il est mentionné qu'en cas de travaux il faudra se confirmer au respect de la réglementation thermique de type RT (Existante ou Globale).

Néanmoins, nous tenons à nuancer ce point.

À ce stade, d'un point de vue strictement réglementaire, la RT existante **devrait en principe s'appliquer**, dès lors que :

- le bâtiment devient chauffé à des températures comprises entre 19 et 26°C (donc > 12°C),
- la surface est supérieure à 1000 m²,
- et que le montant des travaux pourrait dépasser 25 % de la valeur du bâtiment.

Dans cette configuration, un calcul réglementaire Th-C-E ex serait normalement requis avant validation définitive du projet.

Cependant, il existe un point d'interprétation important :

Dans les réglementations applicables aux bâtiments neufs (RT 2012 et RE 2020), les locaux chauffés ou climatisés principalement pour un **process technique ou pour la préservation d'œuvres avec contrôle hygrométrique** ne relèvent pas du champ classique de la réglementation thermique.

Or, dans notre cas :

- le chauffage et la climatisation sont dimensionnés avant tout pour la **préservation des œuvres (avions)**,
- le contrôle hygrométrique est un élément central du projet,
- Le confort des visiteurs semble secondaire et non dimensionnant.

On pourrait donc considérer, par extrapolation de l'esprit des réglementations RT 2012 / RE 2020, que le bâtiment relève davantage d'un local à ambiance contrôlée que d'un bâtiment chauffé pour occupation humaine classique.

Cette extrapolation n'est toutefois pas explicitement prévue dans le texte de la RT existant. Il s'agit donc d'un point d'interprétation qui nécessite un positionnement clair du maître d'ouvrage, en lien avec la maîtrise d'œuvre et/ou le bureau de contrôle, afin de sécuriser le cadre réglementaire dans une phase ultérieure du présent projet.

Ainsi, à ce stade, nous avons orienté notre mission sur les points suivants :

- Réalisation des simulations thermiques dynamiques comparatives pour estimation des besoins énergétiques réels,
- Réalisation d'une note de calcul de CTA permettant de répondre aux besoins liés à l'hygrométrie principalement.

Ces études relèvent d'une logique de performance réelle et de dimensionnement technique. Elles ne constituent pas un calcul réglementaire Th-C-E ex, qui répond à une méthodologie distincte.

Il en est de même pour le respect du décret Tertiaire à horizon 2030. Ce point devra faire l'objet d'un arbitrage en cas de phase ultérieure du projet.

Néanmoins, à ce stade des études de faisabilité pour le présent projet, nous pouvons rester sur nos hypothèses de base de réalisation de notre mission pour déterminer les différentes solutions à réaliser pour obtenir une meilleure isolation du bâti d'une part et pour pouvoir contrôler l'hygrométrie d'autre part.

1.3. SIMULATION THERMIQUE DYNAMTIQUE (STD)

1.3.1. INTRODUCTION

1.3.1.1. Objet de l'étude

Le présent rapport a pour objet d'évaluer l'impact d'une **rénovation thermique de l'enveloppe** du bâtiment *Hall 39-45 – espace d'exposition* sur ses **besoins énergétiques de chauffage et de climatisation**, au moyen de **simulations thermiques dynamiques (STD)**.

L'étude vise à analyser le comportement thermique du bâtiment dans son **état existant**, puis à quantifier l'influence de différentes **variantes d'amélioration de l'enveloppe**, afin d'identifier les actions de rénovation les plus pertinentes en termes de réduction des besoins énergétiques.

1.3.1.2. Cadre et hypothèses de calcul

Les simulations sont réalisées en STD besoins, sans modélisation des systèmes énergétiques.

Les résultats présentés correspondent donc aux besoins thermiques du bâtiment (chauffage et refroidissement), indépendamment des rendements des systèmes, des équipements de production, de distribution ou de régulation.

La modélisation thermique intègre notamment :

- Le fichier météo base (moyen) et 2040 pour prise en compte du réchauffement climatique
- La modélisation 3D du bâtiment et les masques environnants
- les apports internes liés à l'éclairage et aux occupants,
- les apports et déperditions liés à l'air neuf traité par la CTA,
- le rendement de l'échangeur de la CTA
- l'inertie thermique du bâtiment, incluant la masse des avions exposés,
- les caractéristiques thermiques des parois, menuiseries et isolants,
- les ponts thermiques.

Une fois la variante thermique retenue une note de calcul de CTA devra être
faite pour dimensionnement des systèmes CVC au regard des besoins de l'enveloppe.

1.3.1.3. Logiciel utilisé pour réaliser l'étude :

Pleiade-Comfie Version à jour

COMFIE est le moteur de calcul de Simulation Energetique Dynamique (SED) de Pléiades.

Ce moteur de calcul reconnu est issu du Centre Efficacité énergétique des Systèmes de Mines ParisTech.

Il a été validé expérimentalement (plate-forme INCAS, cellule PASSYS) et par comparaison inter-logiciels (BESTEST de l'AIE).

1.3.1.4. Démarche d'analyse

Dans un premier temps, le bâtiment est modélisé dans son état initial non isolé, servant de situation de référence. Cette modélisation permet d'évaluer les besoins thermiques avant travaux.

Dans un second temps, plusieurs variantes de rénovation de l'enveloppe sont étudiées afin de quantifier l'impact de différents niveaux de travaux :

Variante 1 :

Isolation minimale des façades, des portes coulissantes et de la toiture, conforme aux exigences de la RT Existant

Variante 1 bis :

Isolation minimale des façades, des portes coulissantes et de la toiture, conforme aux garde-fous minimums de la RT existante + Filtres solaires Solar Screen 50C sur menuiseries simples vitrages conservées

Variante 2 :

Variante 1 complétée par le remplacement des menuiseries existantes simple vitrage par des menuiseries *double vitrage argon à rupture de pont thermique.*

Variante 3 :

Variante 2 complétée par l'isolation sous chape du plancher bas sur terre-plein.

Ces variantes permettent d'analyser, selon des niveaux croissants d'intervention, l'impact réel de chaque poste de travaux sur les besoins énergétiques du bâtiment, et d'en apprécier la pertinence relative.

Comparatif des niveaux d'isolation

Dans un second volet, un comparatif entre plusieurs niveaux de performance d'isolation (niveau minimal réglementaire, niveau intermédiaire et niveau performant) est réalisé afin d'évaluer les écarts de besoins thermiques entre ces scénarios.

1.3.2. HYPOTHÈSE DE CALCULS

Fichier météo base

a/ Site

Nom	Aéroport de Paris-Le Bourget (LBG)	Altitude	

B/ Station météorologique

Nom	Le Bourget - moyen fichier LeBourgetmoyen_V2.try	Altitude	66 m
Longitude	2° 27' 0"E	Latitude	48° 58' 12"N
Températures	Minimale	Maximale	Moyenne
	-6.10°C	34.50°C	12.13°C

C/ Degrés Jours Unifiés base 18°C

An-nuels	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
2384	403	351	294	206	118	50	27	32	79	159	289	376

1.3.2.1 Fichier météo 2040

A/ Site

Nom	Aéroport de Paris-Le Bourget (LBG)	Altitude	

B/ Station météorologique

Nom	Le Bourget - RCP4.5 2040 fichier LeBourget2040_V2.try	Altitude	66 m
Longitude	2° 27' 0"E	Latitude	48° 58' 12"N
Températures	Minimale	Maximale	Moyenne
	-5.30°C	35.80°C	13.17°C

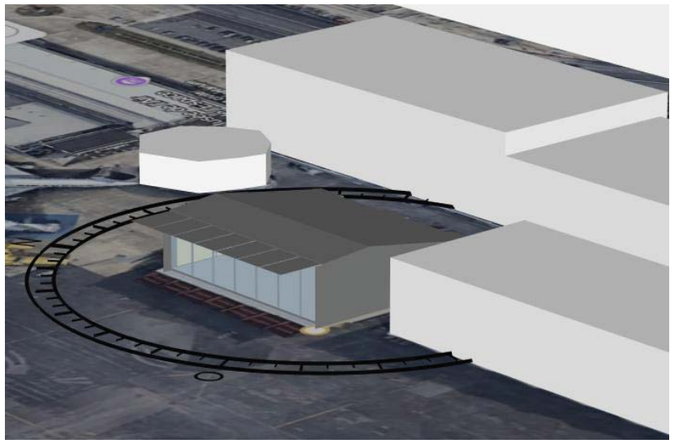
C/ Degrés Jours Unifiés base 18°C

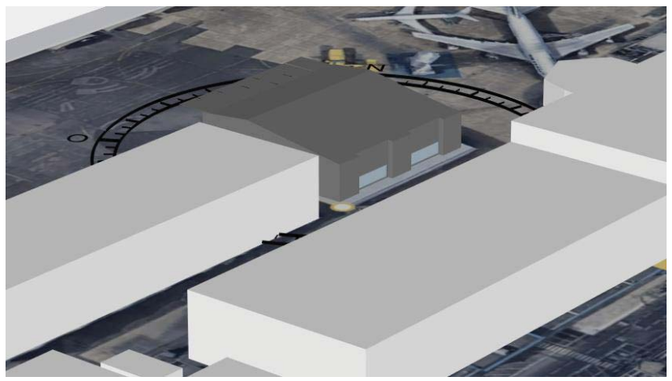
An-nuels	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
2128	374	338	268	182	100	32	17	15	57	126	258	361

1.3.2.2 *Vue 3D modélisation thermique avec masques environnants*

Hauteurs thermiques : 8.61 mètres coté SE, 13 mètres en sommet de toiture et 12 mètres coté







1.3.2.3 *Scenarios d'usage du bâtiment*

Catégories	Scénarios
Chauffage	19°C en permanence (1/10 au 20/05)
Climatisation	26°C en permanence (21/05 au 30/09)
Occupation	250 visiteurs / jour du Mardi au vendredi 500 visiteurs / jour du samedi au dimanche *Détails scénarios occupation par heure ci-dessous*
Ventilation	Débit d'air neuf : 35 pers *30 = 1 050 m³/h en soufflage et en reprise, en fonctionnement permanent Débits recyclés seront calculés avec dimensionnement des systèmes
Infiltration (estimatif)	Estimatif avant travaux N50 : 5 vol/h (forte perméabilité) Estimatif après travaux N50 : 3.5 vol/h (perméabilité réduite car traitement des jonctions parois/toitures et plancher et parois/menuiseries)
Eclairage (estimatif)	300 lux 9h-18h les jours d'ouverture (1h avant et 1h après la fermeture)
Apport interne	Aucun
Stockage (estimatif)	avions - 31 000 kg en permanence

Chaleur massique cp (J/kg.K)	Masse volumique (kg/m3)	λ moyen (W/m.K)	Compacité (m³/m²)
900	2700	150	0.01

1.3.2.4 *Détail scenarios d'occupation par heure*

Jours — Afficher le nom

S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	Mardi au vendredi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	45	37	30	45	43	25	0	0	0	0	0	0	0
	Samedi et dimanche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	90	75	60	90	85	50	0	0	0	0	0	0	0
	Lundi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Semaines

Nom	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Semaine	Lundi	Mardi au vendredi	Mardi au vendredi	Mardi au vendredi	Mardi au vendredi	Samedi et dimanche	Samedi et dimanche

1.3.2.5 Apports internes par personne

Cf donnés du COSTIC

ACTIVITE / TEMPERATURE AMBIANTE	TOTAL.	19 [°C]		21 [°C]		23 [°C]		25 [°C]		27 [°C]		29 [°C]	
		SENS	LAT.	SENS	LAT.	SENS	LAT.	SENS	LAT.	SENS	LAT.	SENS	LAT.
Assis, au repos	110	86	24	79	31	73	37	67	43	59	51	45	65
Debout, au repos	125	94	31	86	39	78	47	70	55	61	64	46	79
Activité modérée (ex. bureau, couture)	150	100	50	91	59	82	68	72	78	62	88	47	103
Activité moyenne (vendeur debout)	175	108	67	95	80	84	91	73	102	62	113	47	128
Activité importante	200	117	83	104	96	90	110	75	125	63	137	48	152
Marche 3 (km/h)	225	126	99	111	114	96	129	81	144	65	160	51	174
Mécanicien, peintre en bâtiment	250	136	114	119	131	103	147	87	163	70	180	53	197
Serveur de restaurant (très actif)	275	145	130	128	147	111	164	96	179	78	197	63	212
Marche 4 (km/h)	300	153	147	137	163	120	180	105	195	87	213	72	228
Marche rapide, danse	400	190	210	172	228	154	246	138	262	120	280	100	300

Tableau G-I - Métabolisme humain.

73 watts sensibles / personne

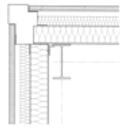
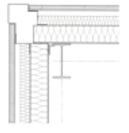
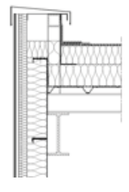
152 watts latents / personne

1.3.2.6 Performances thermiques

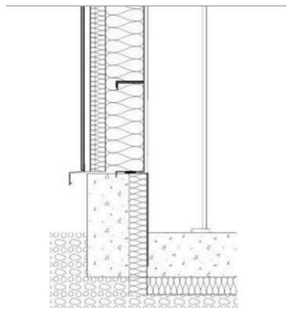
Catégories	Scénarios
Façades	Avant travaux : non isolée – bardages métalliques Variante envisagée : Isolation minimum 11 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 3.45m ².K/W entre bardages métalliques et monté sur rails métalliques (0.6 m)
Portes opaques coulissantes	Avant travaux : non isolée – bardages métalliques Variante envisagée : Isolation minimum 11 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 3.45m ².K/W entre bardages métalliques et monté sur rails métalliques (0.6 m)
Toitures	Avant travaux : non isolée sur bac acier Variante envisagée : Isolation minimum 20 cm Rockciel - Résistance isolant = 5.60 m ².K/W sur bac acier

Menuiseries (estimatif)	Avant travaux : simple vitrage Uw=5.71 / Sw=0.70 / Tlw=0.70 Variante 1 envisagée : ajout de filtres Solar Screen 50 c sur les menuiseries simple vitrage Uw=4.2 / Sw=0.40 / Tlw=0.40 Variante 2 envisagée : double vitrage argon aluminium à rupteur de ponts thermiques Uw=1.40 / Sw=0.55 / Tlw=0.62
Plancher bas sur terre-plein	Avant travaux : non isolée Variante envisagée : 12 cm Knauf Therm Chape Th38 Résistance isolant = 3.15 m². K/w
Réflexions lumineuses (estimatif)	Aluminium : réflexion lumineuse : 46% Béton : réflexion lumineuse : 30%

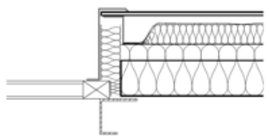
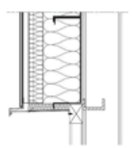
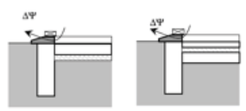
1.3.2.7 Jonctions à prévoir si isolation des parois

Nom	Classif.	Origine	y	Schémas
jonctions verticales des parois isolées angle sortant	4.1	CSTB	0.47	
jonctions verticales des parois isolées angle rentrant	4.2	CSTB	0.47	
Jonction Bardage double peau/Toiture+ complément d'isolant le long de la costière et sur le bardage	3.1	CSTB	0.19	

Uniquement si traitement isolation sous chape du plancher bas :

Nom	Classif.	Origine	y	Schémas
Jonction Bardage double peau/plancher bas OM 2.a.1-Bardage sur longrine isolée par l'int.	4.1	CSTB	0.21	

1.3.2.8 Jonctions à prévoir si remplacement des menuiseries

Nom	Classif.	Origine	y	Schémas
Tableau OM 2.d.6-Ebrasement avec complément d'isolant	5.3	CSTB	0.01	
Linteau OM 2.d.4-Linteau avec complément d'isolant	5.2	CSTB	0.11	
Appui DC 3.2. Pl. bas sur terre-plein sans remontée d'isolant	5.1	CSTB	0.16	

1.3.3. RESULTATS DES SIMULATIONS

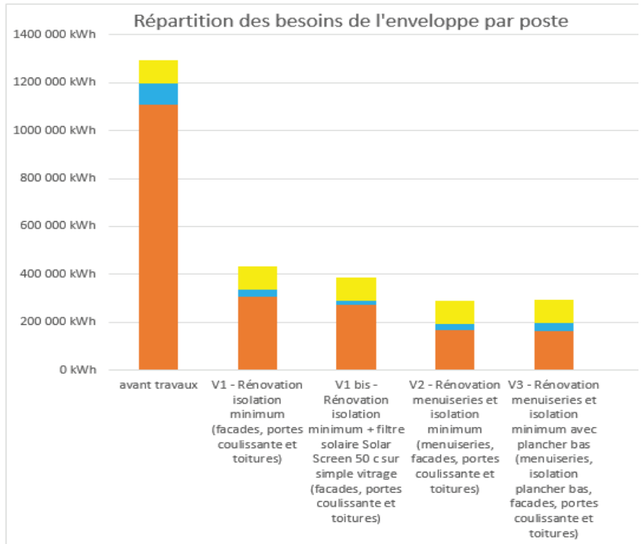
1.3.3.1 Résultats fichier météo base

Besoins en kwh sur une année type

Variantes météo base (moyenne)	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
avant travaux	1 109 899 kWh	87 262 kWh	97 189 kWh	**1 294 350 kWh**
V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	307 363 kWh	28 167 kWh	97 189 kWh	**432 719 kWh**
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	270 710 kWh	17 557 kWh	97 189 kWh	**385 455 kWh**
V2 - Rénovation menuiseries et isolation minimum (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	166 689 kWh	26 550 kWh	97 189 kWh	**290 428 kWh**
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	164 849 kWh	30 512 kWh	97 189 kWh	**292 550 kWh**

Variantes/ base	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V1 - Rénovation isolation (facades, portes coulissante et toitures)	-802 536 kWh	-59 095 kWh	0 kWh	-861 631 kWh
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	-839 189 kWh	-69 706 kWh	0 kWh	-908 895 kWh
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-943 210 kWh	-60 712 kWh	0 kWh	-1 003 922 kWh
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-945 050 kWh	-56 750 kWh	0 kWh	-1 001 800 kWh

Variantes/ base	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V1 - Rénovation isolation (facades, portes coulissante et toitures)	-72,31%	-67,72%	0,00%	-66,57%
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	-75,61%	-79,88%	0,00%	-70,22%
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-84,98%	-69,57%	0,00%	-77,56%
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-85,15%	-65,03%	0,00%	-77,40%



Besoins de chauffage en kWh
Besoins de climatisation en kWh
Consommation d'éclairage en kWh

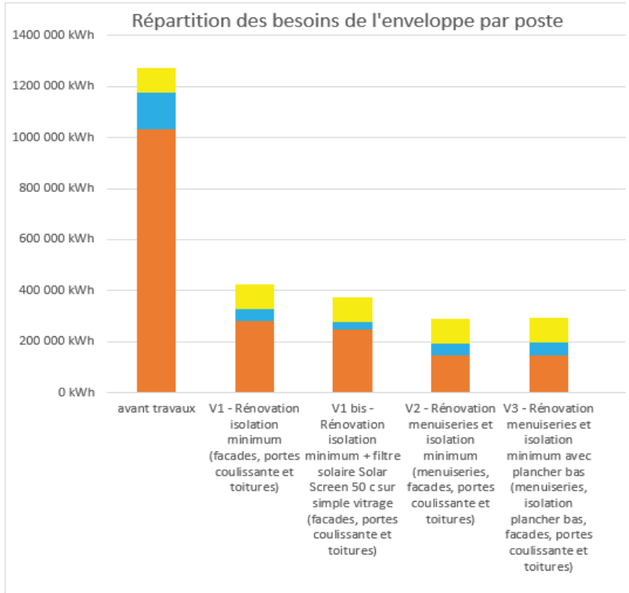
1.3.3.2 ***Résultats fichier météo 2040***

Besoins en kwh sur une année type

Variantes météo 2040	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
avant travaux	1 033 936 kWh	141 050 kWh	97 189 kWh	1 272 174 kWh
V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	280 460 kWh	47 256 kWh	97 189 kWh	424 905 kWh
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	246 497 kWh	30 021 kWh	97 189 kWh	373 707 kWh
V2 - Rénovation menuiseries et isolation minimum (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	147 248 kWh	43 096 kWh	97 189 kWh	287 533 kWh
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	147 274 kWh	48 278 kWh	97 189 kWh	292 741 kWh

Variantes/ base	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V1 - Rénovation isolation (facades, portes coulissante et toitures)	-753 476 kWh	-93 793 kWh	0 kWh	-847 269 kWh
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	-787 439 kWh	-111 029 kWh	0 kWh	-898 468 kWh
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-886 688 kWh	-97 954 kWh	0 kWh	-984 642 kWh
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-886 662 kWh	-92 771 kWh	0 kWh	-979 433 kWh

Variantes/ base	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V1 - Rénovation isolation (facades, portes coulissante et toitures)	-72,87%	-66,50%	0,00%	-66,60%
V1 bis - Rénovation isolation minimum + filtre solaire Solar Screen 50 c sur simple vitrage (facades, portes coulissante et toitures)	-76,16%	-78,72%	0,00%	-70,62%
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-85,76%	-69,45%	0,00%	-77,40%
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-85,76%	-65,77%	0,00%	-76,99%



Besoins de chauffage en kWh

Besoins de climatisation en kWh

Consommation d'éclairage en kWh

Analyse des variantes de rénovation thermique

Les simulations thermiques dynamiques réalisées à partir des fichiers météo actuel et horizon 2040 conduisent à des conclusions cohérentes quant à la hiérarchie des variantes étudiées. Le scénario climatique futur se traduit par une baisse des besoins de chauffage et une hausse des besoins de climatisation, sans remise en cause du classement global des solutions.

1. Isolation minimale de l'enveloppe – Variante V1

L'isolation des façades, des portes coulissantes et de la toiture constitue le principal levier d'amélioration énergétique du hall.

Cette intervention permet une réduction globale des besoins annuels de l'ordre de :

- **–66,57 % (météo actuelle)**
- **–66,6 % (météo 2040)**

Le gain porte principalement sur les besoins de chauffage, tout en réduisant également les besoins de climatisation.

Cette variante constitue le **socle technique minimal indispensable** pour améliorer significativement la performance énergétique du bâtiment.

Les performances atteintes supposent toutefois :

- un traitement rigoureux des jonctions entre parois,
- une continuité effective de l'isolation,
- une maîtrise de la perméabilité à l'air,
- un soin particulier au droit des menuiseries et des portes coulissantes.

NOTA sur l'isolation intérieure ou extérieure :

Positionnement de l'isolant – Bardage double peau

Dans le cas présent, la façade isolée sera constituée d'un bardage métallique double peau avec isolant intercalé entre plateaux et parement extérieur, posé sur une ossature secondaire métallique (entraxe ≈ 0,60 m).

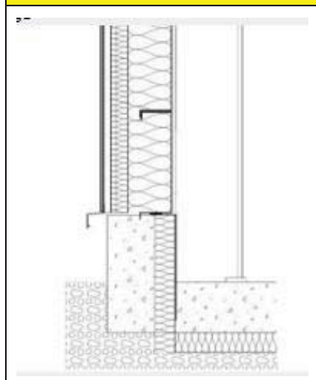
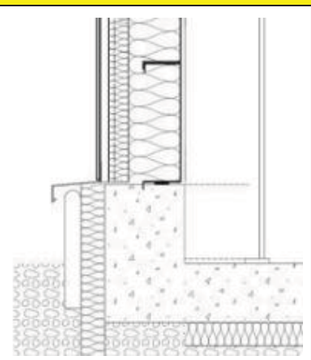
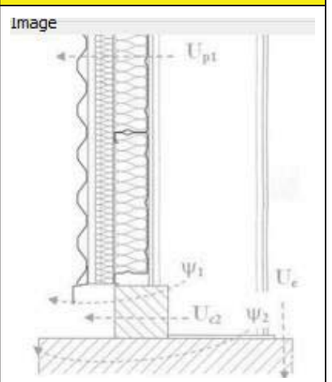
Point fondamental :

Contrairement à un système traditionnel (ITE vs ITI sur voile béton), la notion d'isolation intérieure ou extérieure n'existe pas ici, c'est surtout le type de jonction qui est important.

✔ **Explication :**

- L'isolant (Cladipan 32 – R = 3,45 m².K/W) en façade sera positionné dans l'épaisseur du complexe, entre plateaux métalliques dans les deux cas de figure.
- Les rails métalliques traversants créent des ponts thermiques linéiques intégrés au système, indépendants du "sens" de pose (c'est pareil si l'isolant et coté intérieur ou extérieur)
- En revanche, on peut avoir quelques différences au niveau des ponts thermiques (voir détails ci-dessous)

Différences au niveau de la jonction façade sur plancher bas sur terre-plein

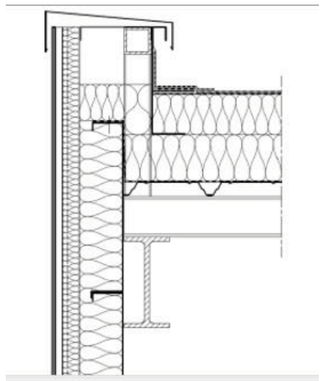
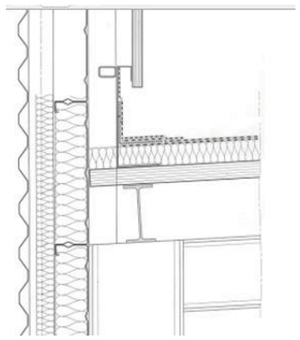
Isolant façades coté intérieur (cas 1)	**Isolant façades coté extérieur (cas 2)**	**Isolant façades coté extérieur (cas 3)**
		
Valeur PSI pont thermique = 0.21	Valeur PSI pont thermique = 0.18	Valeur PSI pont thermique = 0.37

- Il est toutefois vrai qu'isoler la longrine cotée extérieur ou lieu d'intérieur pourrait améliorer le résultat mais c'est léger (0.18 au lieu de 0.21)

- Mais si on est dans le cas 3 avec isolation sur la longrine le pont thermique est un peu plus important.

- **Donc tout dépend de bien isoler les longrines**

Différences au niveau de la jonction façade sur toiture bac acier

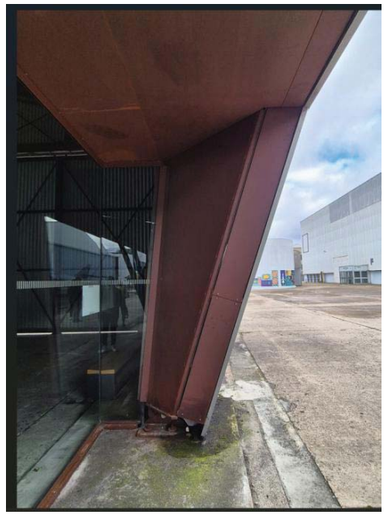
Hypothèses simulation	**Cas plus défavorable non simulé à ce jour**
	
Liaison Bardage double peau/Toiture avec complément d'isolant le long de la costière et sur le bardage Costière posée sur l'isolant Valeur PSI pont thermique = 0.19	Liaison Bardage double peau/Acrotère R partie courante ≤ 4 (m².K/W) - E (entraxe poteaux - baïonnette) ≥ 5m Ei : 120 mm Valeur PSI pont thermique = 0.52

- Les simulations prennent en compte l'hypothèse la plus favorable avec le complément d'isolant de long de la costière pour ne pas dégrader le pont thermique

- Ici que l'isolant soit positionné à l'intérieur ou l'extérieur ne change pas , il faut surtout vérifier la jonction ci-dessus

- **Donc tout dépend de bien isoler en complément les costières**

Point de vigilance spécifique : murs rideaux

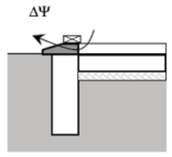
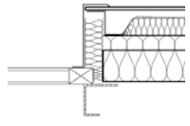
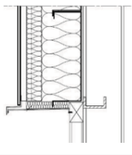


L'analyse des photos montre que :

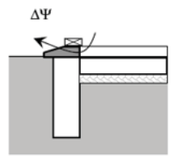
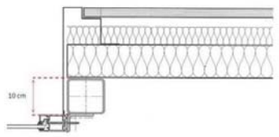
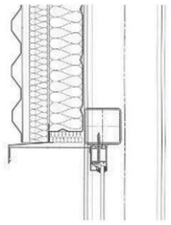
- Les murs rideaux sont positionnés côté intérieur du bardage (ici dans le renfoncement)

- Ici il faudra dans tous les cas assurer un retour de l'isolant jusqu'aux murs rideaux pour ne pas créer de pont thermique supplémentaire

Ponts thermiques menuiseries prévus dans les simulations

Appui		Valeur PSI=0.16
Tableau		Valeur PSI=0.01
Linteau		Valeur PSI=0.11

Ne pas prévoir de retour isolant pourrait augmenter les ponts thermiques menuiseries de la façon suivante :

Appui		Valeur PSI=0.16 A priori inchangé car jonction mur rideau / plancher identique
Tableau		Valeur PSI=0.6 Hausse importante si la jonction de l'isolant n'est pas complète Non simulée à ce jour Situation à éviter = bien traiter les jonctions
Linteau		Valeur PSI=0.68 Hausse importante si la jonction de l'isolant n'est pas complète Non simulée à ce jour Situation à éviter = bien traiter les jonctions

Synthèse et avis sur l'isolation extérieure

- Le système **bardage double peau ne relève pas d'une logique ITI / ITE classique**
- Les performances sont **globalement identiques** quel que soit le "sens" considéré

2. Isolation minimale + filtre solaire – Variante V1 bis

La variante V1 bis reprend le principe de V1 en y ajoutant un filtre solaire de type Solar Screen 50C appliqué sur les vitrages simples existants.

➢ **Comparaison avec V1 – Météo actuelle**

Par rapport à V1 :

- Les besoins de chauffage diminuent encore (–36 653 kWh/an).
- Les besoins de climatisation diminuent également (–10 610 kWh/an).
- Le gain global passe de –66,6 % à **–70,2 %**.
- Le filtre solaire améliore donc simultanément :

- la réduction des apports solaires estivaux,
- la limitation des charges de refroidissement, et, dans ce cas précis, le bilan annuel global.

➢ **Comparaison avec V1 – Météo 2040**

Dans le scénario futur :

- La réduction des besoins de climatisation est encore plus marquée.
- Le gain global passe de –66,6 % (V1) à **–70,6 % (V1 bis)**.
- L'intérêt du filtre solaire se renforce donc dans un contexte de réchauffement climatique, où la maîtrise des surchauffes devient un enjeu plus structurant.

Lecture technique

L'ajout du filtre solaire ne constitue pas un changement de stratégie énergétique, mais un **ajustement optimisant le comportement estival**.

L'impact énergétique annuel reste modéré par rapport au saut déjà réalisé avec V1, mais :

- il améliore la stabilité thermique,
- limite les pics de température intérieure,
- réduit les sollicitations des systèmes de climatisation,
- contribue à la maîtrise des ambiances thermo-hygrométriques.

Il s'agit donc d'une **optimisation pertinente**, notamment dans une logique de confort d'été et d'anticipation du climat futur.

3. Isolation + remplacement des menuiseries – Variante V2

Le remplacement des menuiseries en complément de l'isolation de l'enveloppe permet une amélioration supplémentaire.

Le gain énergétique global atteint environ :

➢ **–77,6 % (météo actuelle)**

➢ **–77,4 % (météo 2040)**

Soit un gain additionnel d'environ 7 à 8 points par rapport à V1.

L'amélioration reste modérée d'un strict point de vue énergétique, mais elle présente un intérêt technique important :

- élévation des températures de surface intérieure,
- réduction du risque de condensation locale,
- amélioration de l'étanchéité à l'air,
- meilleure stabilité des ambiances intérieures.

Le remplacement des menuiseries constitue ainsi un **complément cohérent**, particulièrement dans une logique de sécurisation du confort et de pérennité du bâtiment.

4. Isolation + menuiseries + isolation du plancher bas – Variante V3

L'ajout d'une isolation sous chape du plancher bas sur terre-plein n'apporte pas d'amélioration énergétique globale supplémentaire.

L'isolation sous chape entraine une perte d'inertie thermique entraîne :

- une légère augmentation des besoins de climatisation,
- une compensation partielle des gains sur le chauffage,
- un bilan annuel très proche de V2, voire légèrement dégradé en scénario 2040.

Cette variante ne se justifie donc pas au regard de la performance énergétique globale.

1.3.4. Synthèse générale

➢ **L'isolation des façades, des portes coulissantes et de la toiture (V1) constitue le socle minimal indispensable.**

Elle permet une réduction des besoins de l'ordre de 66 % et conditionne l'essentiel du gain énergétique du projet. Sans cette intervention, aucune stratégie d'optimisation n'est réellement pertinente.

➢ **L'ajout d'un filtre solaire sur les vitrages existants (V1 bis) améliore le comportement estival et renforce modérément le gain global.**

L'amélioration reste contenue en valeur absolue par rapport au saut énergétique déjà réalisé par V1, mais elle devient plus pertinente dans une logique de confort d'été et d'anticipation du climat futur.

Il s'agit d'une optimisation ciblée, principalement orientée vers la maîtrise des surchauffes.

➢ **Le remplacement des menuiseries (V2) constitue un palier supplémentaire en performance énergétique globale.**

A noter que l'on considère que le remplacement des vitrages intègre également le remplacement des cadres, soit un remplacement complet dans la mesure où :

- Un remplacement seul du vitrage sur les châssis existants serait techniquement plus contraint et moins performant, du fait des ponts thermiques que cela engendrerait d'une part et il nous semble difficile de pouvoir mettre en place des vitrages performants sur les châssis existant du fait de l'épaisseur de ces derniers par rapport à ceux actuels ;
- Un coût très élevé de fourniture et pose pour des résultats peu concluant, d'expérience et du fait que très peu d'entreprises prendront le risque de proposer ou de réaliser cette solution technique.

AVIS : Nous déconseillons fortement cette option dans le cadre de futurs travaux, mais plutôt de rester soit sur une solution globale, soit sur une solution de traitement par film comme proposée dans la solution V1 bis.

Le gain annuel est supérieur à celui de V1 bis et permet d'atteindre un niveau d'amélioration de l'ordre de 77 %.

Au-delà de l'impact énergétique, cette variante sécurise le comportement thermo-hygrométrique du bâtiment (températures de surface, limitation des infiltrations, réduction du risque de condensation).

Elle représente donc une amélioration plus structurante que l'ajout du seul filtre solaire.

L'isolation du plancher bas (V3) n'apporte pas de bénéfice énergétique supplémentaire significatif et peut légèrement dégrader le bilan annuel en raison de la perte d'inertie thermique.

En effet, le fait de ne pas isoler sous chape permet de réduire davantage les consommations de climatisation que l'augmentation des besoins en chauffage induite.

Ceci s'explique par le fait que le plancher bas reste en contact direct avec la dalle béton, ce qui renforce l'inertie thermique du bâtiment et permet de mieux absorber et évacuer les apports internes en été.

Ainsi, dans un cas de figue où les besoins en chauffage ou surtout en climatisation seraient moindres, l'isolation du plancher serait une bonne option. Dans notre cas de figure, outre le fait des contraintes techniques, des coûts de travaux et de la logistique nécessitant de de voir déplacer tous les avions du de cet espace et de fermer l'accès au Public d'une part et des besoins en équipements techniques pour assurer le contrôle de l'hygrométrie, nous déconseillons cette option.

1.3.5. COMPARATIF DE PLUSIEURS NIVEAUX D'ISOLATION

Afin de compléter les résultats précédents réalisation d'une analyse comparative avec différents niveaux d'isolation des parois :

Niveaux d'isolation	Descriptif
Base : V1 isolation minimum	Façades et portes coulissantes : 11 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 3.45m ².K/W Toiture : 20 cm Ondarock T- Résistance isolant = 4,51 m ².K/W
V4 : isolation moyenne	Façades et portes coulissantes : 15 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 4.70 m ².K/W Toiture : 22 cm Rockciel- Résistance isolant = 6.20 m ².K/W

V5 : isolation performante	Façades et portes coulissantes : 19 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 5.90 m ².K/W Toiture : 24 cm Ondarock T - Résistance isolant = 5.42 m².K/W

Ces variantes ne prennent pas en compte la rénovation des menuiseries qui ont été conservées en simple vitrage. On s'intéresse uniquement à l'impact sur l'isolation (hors menuiseries).

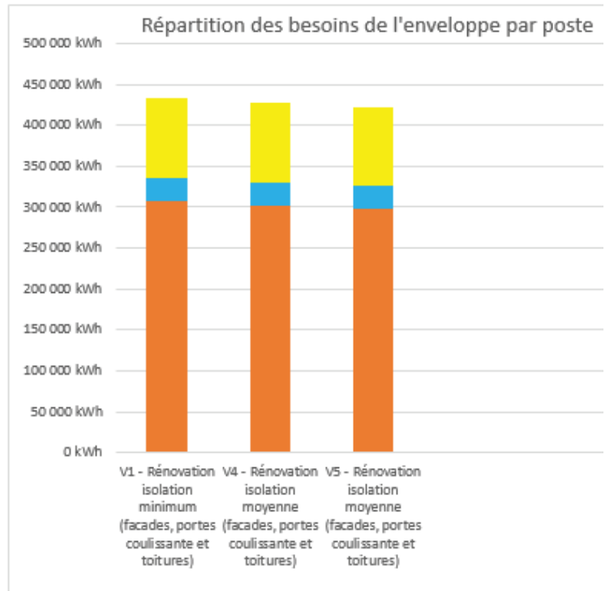
1.3.5.1 Résultats fichier météo base

Besoins en kwh sur une année type

Variantes météo base (moyenne)	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	307 363 kWh	28 167 kWh	97 189 kWh	**432 719 kWh**
V4 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	302 074 kWh	27 949 kWh	97 189 kWh	**427 212 kWh**
V5 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	297 758 kWh	27 688 kWh	97 189 kWh	**422 635 kWh**

V2 et V3 / V1	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-5 289 kWh	-218 kWh	0 kWh	-5 507 kWh
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-9 605 kWh	-479 kWh	0 kWh	-10 084 kWh

V2 et V3 / V1	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-1,72%	-0,78%	0,00%	-1,27%
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-3,18%	-1,71%	0,00%	-2,36%



Besoins de chauffage en kWh
Besoins de climatisation en kWh
Consommation d'éclairage en kWh

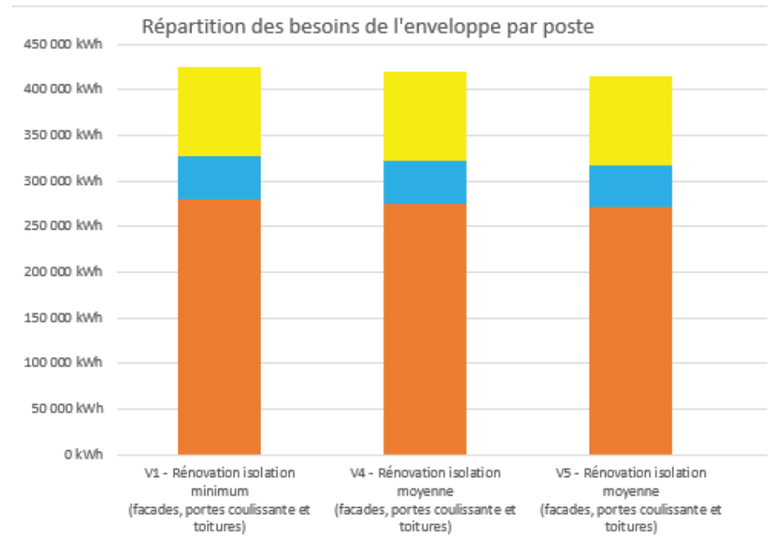
1.3.5.2 Résultats fichier météo 2040

Besoins en kwh sur une année type

Variantes météo 2040	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Conso / an
V1 - Rénovation isolation minimum (facades, portes coulissante et toitures)	280 460 kWh	47 256 kWh	97 189 kWh	**424 905 kWh**
V4 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	275 471 kWh	46 912 kWh	97 189 kWh	**419 572 kWh**
V5 - Rénovation isolation moyenne (facades, portes coulissante et toitures)	271 400 kWh	46 476 kWh	97 189 kWh	**415 065 kWh**

V2 et V3 / V1	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-4 989 kWh	-344 kWh	0 kWh	-5 333 kWh
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-9 060 kWh	-780 kWh	0 kWh	-9 840 kWh

V2 et V3 / V1	Besoins chauffage kWh	Besoins climatisation kWh	Eclairage kWh	Sur-conso. / an
V2 - Rénovation menuiseries et isolation (menuiseries, facades, portes coulissante et toitures)	-1,78%	-0,73%	0,00%	-1,26%
V3 - Rénovation menuiseries et isolation minimum avec plancher bas (menuiseries, isolation plancher bas, facades, portes coulissante et toitures)	-3,29%	-1,66%	0,00%	-2,35%



Besoins de chauffage en kWh
Besoins de climatisation en kWh
Consommation d'éclairage en kWh

1.3.5.3 Analyse comparative des niveaux d'isolation des parois opaques

Le comparatif entre plusieurs niveaux d'isolation des façades/portes coulissantes et de la toiture montre qu'une fois l'enveloppe isolée au niveau "minimum" (V1), l'augmentation des épaisseurs d'isolant n'apporte qu'un gain énergétique annuel limité.

Fichier météo actuel :

- V4 vs V1 : –5 507 kWh/an, soit –1,27 %
- V5 vs V1 : –10 084 kWh/an, soit –2,36 %

Fichier météo 2040 :

- V4 vs V1 : –5 333 kWh/an, soit –1,26 %
- V5 vs V1 : –9 840 kWh/an, soit –2,35 %

Ces résultats traduisent un effet de diminution des gains : l'essentiel de la performance est déjà obtenu avec la variante V1, et les renforcements d'isolation ne réduisent que marginalement les besoins (chauffage et climatisation).

En conséquence, le niveau d'isolation minimum retenu dans l'étude apparaît pertinent et proportionné pour le projet, avec :

- **Façades : R = 3,45 m².K/W (Cladipan 32, 11 cm),**
- **Portes coulissantes : R = 3,45 m².K/W (même principe),**
- **Toiture : R = 5,60 m².K/W (Rockciel, 20 cm).**

À titre optionnel, si le maître d'ouvrage souhaite viser une rénovation énergétique plus ambitieuse, les niveaux d'isolation renforcés (V4/V5) restent naturellement plus performants, mais avec un surcroît de performance énergétique annuel limité au regard de V1.

2. SOLUTIONS TECHNIQUES

2.1. DESCRIPTIONS TECHNIQUES SOMMAIRES

2.1.1. INTRODUCTION

Note de calcul de CTA avec calcul des déperditions et des apports selon la méthode NF EN 12831 et l'ASHRAE (méthode RTS) à l'aide du logiciel Pleiade Comfie pour le dimensionnement des besoins de chauffage et de climatisations.

Logiciel utilisé pour réaliser l'étude :

Pleiade-Comfie Version à jour – Certifié CSTB pour les études RT 2012

Logiciel certifié par le CSTB pour les études thermiques RT 2012 :

https://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/logiciels-dapplication.html

2.1.2. CARACTERISTIQUES DU BATIMENT

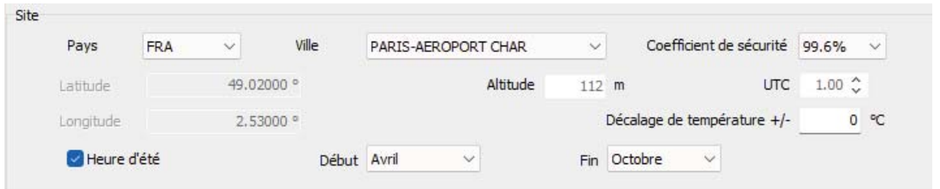
2.1.2.1 Conditions extérieures de base

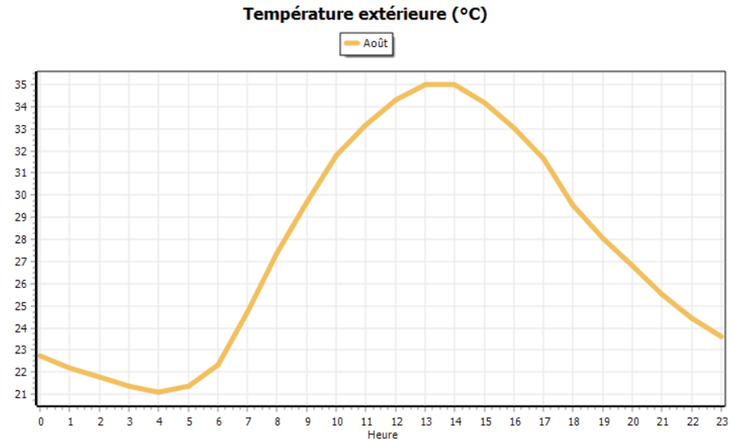
A/ Hiver

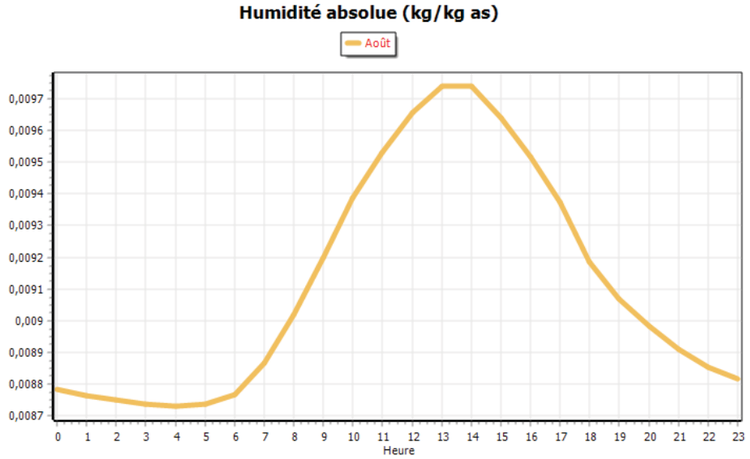
Département	93 - Seine-Saint-Denis (H1 a)
Altitude	47 m
Situation	Continental
Température de base extérieure	-7 °C

B/ Eté

Site météo le plus proche dans la bande de données Pléiades Comfie







2.1.2.2 ***Conditions intérieures du bâtiment***

- Température intérieure de chauffage : 19°C
- Humidité relative en hiver : 30%
- Température intérieure de climatisation : 26°C
- Humidité relative en été : 50%
- Infiltration : N50=5

2.1.2.3 ***Personnes***

RAPPEL :

Apports internes COSTIC

20 personnes (1 460 watts sensibles / 3 040 latents)

- 73 w sensibles/ personne
- 152w latents / personne

2.1.2.4 ***Apports internes***

- Eclairage : 20 W/m²
- Apports process : aucun

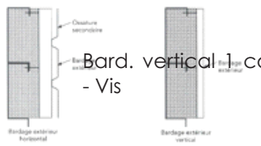
2.1.2.5 ***Compositions des parois***

A/ Façade et portes opaques coulissantes

Isolation - 11 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 3.45m ².K/W

Type de paroi	Paroi verticale					
Complement	|					
Origine des données						
Composition	Simple					
Nature de paroi	Mur extérieur					
Origine des données sur l'isolant	Document d'avis technique ou Document technique d'application					
Valeur Up	Calcul automatique - Up indicatif : 0.42 W/(m².K)					
Composante	Ep cm	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Bardage métallique	0.1	0.080	7800	0.125	100.00	0.01
Lame d'air > 4.7 cm	4.7	0.294	1	0.340	6.25	0.16
Cladipan 32 110_405_1500	11.0	0.032	25	0.256	0.29	3.45
Lame d'air > 14.3 cm	14.3	0.894	1	0.340	6.25	0.16
Bardage métallique	0.1	0.080	7800	0.125	100.00	0.01
Total					0.26	3.79

Pont thermique intégré	Type	Entraxe	ψ	Nb/m²	ξ	%	valeur

 Bard. vertical 1 couche - Vis	Ponctuel			4.00	0.01		0.05
 Profil U - 1	Linéaire	0.60	0.07				0.12
Total							0.17

B/ Toiture

Isolation - 20 cm Rockciel- Résistance isolant = 5.60 m ².K/W

Type de paroi	Plancher haut					
Complement						
Origine des données						
Composition	Simple					
Nature de paroi	Toitures métalliques					
Origine des données sur l'isolant	Marquage CE système 1+					
Valeur Up	Calcul automatique - Up indicatif : 0.17 W/(m².K)					
Composante	Ep cm	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Etanchéité bicouche à base de bitume élastomère	0.1	0.500	1900	0.208	1000.00	0.00
Rockciel L 1200 x l 600 x ép 200 (mm) R=5.60	20.0	0.036	100	0.256	0.18	5.60
Bac acier	0.1					0.00
Total					0.18	5.60

C/ Plancher bas sur terre-plein – non isolé

Type de paroi	Plancher bas					
Complement						
Origine des données						
Composition	Simple					
Nature de paroi	Terre plein					
Origine des données sur l'isolant	Valeur par défaut des Th bât "Fascicule parois					
Valeur Up	Calcul automatique - Up indicatif : 2.78 W/(m².K)					
Composante	Ep cm	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Béton plein (lourd)	30.0	2.000	2450	0.278	6.67	0.15
Total					6.67	0.15

2.1.2.6 ***Menuiseries et portes***

Mur rideau (facade NO) - simple vitrage non rénovée

Conduction thermique		**Transmission lumineuse**		**Facteurs solaires**				
Sans protection								
U vertical (W/m².K)	U horizontal (W/m².K)	Global	Diffus	Sw		Sw1	Sw2	Sw3
5.71	5.71	0.70	0.00	Hiver	0.70	0.00	0.70	0.00
				Eté	0.70	0.00	0.70	0.00

Menuiseries (facade SE)

Conduction thermique		**Transmission lumineuse**		**Facteurs solaires**				
Sans protection								
U vertical (W/m².K)	U horizontal (W/m².K)	Global	Diffus	Sw		Sw1	Sw2	Sw3
5.83	5.83	0.70	0.00	Hiver	0.70	0.00	0.70	0.00
				Eté	0.70	0.00	0.70	0.00

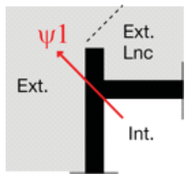
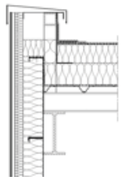
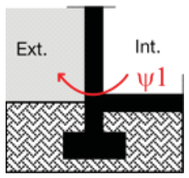
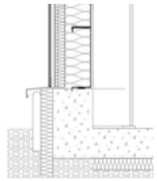
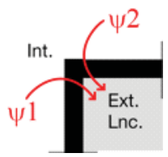
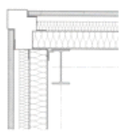
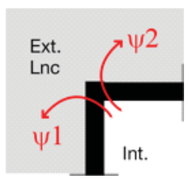
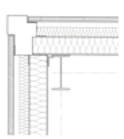
Porte opaque entrepôt coulissante - Isolation minimum Up=0.422 (11 cm Cladipan 32 - Résistance isolant = 3.45m ².K/W)

Coefficient U	0.42 W/(m².K)	Facteur solaire	

2.1.2.7 ***Ponts thermiques linéiques***

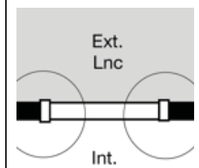
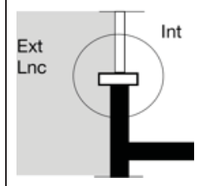
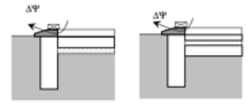
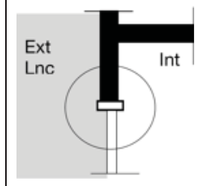
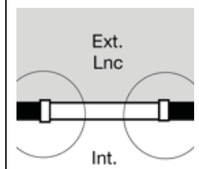
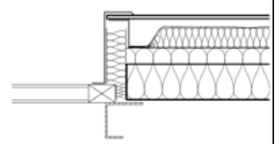
A/ Ponts thermiques linéiques structurels

Nota important: traitement des jonctions cf. les schémas ci-dessous nécessaire pour limiter l'infilrométrié trop importante à ce jour

Nom	Class.	Origine	ψ	Ψ1	Ψ2	Ψ3		
OM 2.b.2-Liaison Bardage double peau/Toiture avec complément d'isolant le long de la costière et sur le bardage	3.1	CSTB	0.19	0.19	0.00	0.00		
OM 2.a.2-Bardage sur longrine isolée par l'ext.	1.1	CSTB	0.18	0.18	0.00	0.00		
OM 1.c.2-Liaison Bardage/Bardage - Angle rentrant	4.2	CSTB	0.47	0.47	0.00	0.00		
OM 1.c.1-Liaison Bardage/Bardage - Angle sortant	4.1	CSTB	0.47	0.47	0.00	0.00		

B/ Ponts thermiques linéiques menuiseries

Nota important : traitement des jonctions cf. les schémas ci-dessous nécessaire pour limiter l'infilrométrié trop importante à ce jour

Nom	Class.	Origine	ψ	Ψ1	Ψ2	Ψ3		
d.3 - S Nisol - menuis. Milieu	tout	CSTB	0.49	0.49	0.00	0.00		
DC 3.2. Pl. bas sur terre-plein sans remontée d'isolant	5.1	CSTB	0.16	0.16	0.00	0.00		
OM 2.d.4-Linteau avec complément d'isolant	5.2	CSTB	0.11	0.11	0.00	0.00		
OM 2.d.6-Ebrasement avec complément d'isolant	5.3	CSTB	0.01	0.01	0.00	0.00		

2.1.3. CARACTERISTIQUES DU BATIMENT

2.1.3.1 ***Note de calculs de la CTA du Hall 39-45***

La centrale de traitement d'air a été dimensionnée afin d'assurer simultanément :

- La ventilation hygiénique en air neuf avec échangeur à plaques (récupération d'énergie)
- Le traitement thermique en chauffage et en refroidissement
- Le fonctionnement en recyclage partiel
- Le contrôle de l'hygrométrie en été (hiver pas besoin)

A/ Contrôle hygrométrique

L'objectif est de maintenir une hygrométrie estivale entre **45 % et 55 %**.

Pour cela le ou les Rooftop CTA doivent être composés dans le sens de l'air d'une batterie froide, d'une batterie chaude (le système trois batteries chaudes/froides/chaudes n'est pas nécessaire avec un débit d'air neuf si faible) et d'échangeurs à plaques (récupération d'énergie).

En période estivale, l'air sera soufflé à une température constante de **14 °C en sortie de batterie froide (cf. résultats de la note de calculs).**

Une **remontée en température par la batterie chaude** sera réalisée si nécessaire, en fonction du taux d'humidité mesuré, afin de maintenir une hygrométrie comprise entre **45 % et 55 % HR.**

En période hivernale, le taux d'humidité relative semble naturellement descendre en dessous de 30 % (cf. résultats note de calcul). Aucun système d'humidification n'est envisagé.

Le contrôle hygrométrique est donc assuré uniquement en été, par déshumidification.

B/ Débit de soufflage et brassage d'air

La centrale a été dimensionnée sur la base d'un taux de brassage de 2,3 volumes/heure.

Ce niveau de brassage constitue un minimum permettant :

- D'assurer l'homogénéisation thermique du volume
- De limiter les phénomènes de stratification
- De garantir un confort uniforme dans l'ensemble de l'entrepôt

C/ Delta T de soufflage en hiver

Le delta T de soufflage en chauffage a été limité à 10 °C (au lieu de 12 °C initialement envisagés) pour augmenter le brassage de l'air dans le bâtiment.

D/ Diffusion et homogénéisation

Afin d'assurer l'efficacité réelle du brassage :

- Des buses de soufflage adaptées aux grandes hauteurs doivent être prévues
- Des déstratificateurs d'air en partie haute sont nécessaires pour limiter l'accumulation d'air chaud sous toiture

C/ En conclusion, la centrale retenue permet d'assurer :

- La ventilation hygiénique de 35 personnes maximum à 30m3/h/personne (1050 m3/h d'air neuf)
- Le traitement thermique été/hiver
- Le contrôle hygrométrique estival
- Une homogénéité de confort adaptée aux caractéristiques volumétriques du bâtiment

Nota : Les déperditions et apports, calculés sans prise en compte de l'air neuf, ont été déterminés avec le logiciel Pleiades Comfie avant d'être intégrés dans la note de calcul de la centrale

Résultats conditionnés au respect des hypothèses présentées dans le rapport. Un changement d'hypothèses entrainerait une modification des résultats. Les résultats sont donnés sans surpuissance.

2.1.3.2 Calcul de la batterie froide

Il est prévu 47 110 m3/h de soufflage et 47 110 m3/h d'extraction avec 1 050 m3/h d'air neuf

Un échangeur à plaque ≥ 80% sur l'air neuf

Pour cela, prévoir une batterie froide de 213.82 kW

Température de consigne 26°C

Humidité relative intérieure estivale obtenue : 46.9%

RECUPERATEUR ÉTÉ					Altitude du Site en **m =**	47	Préssion :	100 762	**Pa**		
		Air neuf			1 255	kg/h(as)		**CTA tout air neuf**		**non**	
Type de Récupérateur		à plaques		Rapport massique Q repris / Q an	1	Récupération D'humidité	oui/non	**non**			
Rendement	fournisseur	80,0%	**Indice de récupération de chaleur ⦰ =**		**0,8**	**Indice de récupération teneur en eau =**			**0,500**	50,0%	

Désignation	Débit Massique kg/h(a.s)	Débit Volume m3/h	Bulbe sec °c	Teneur en eau g/kg air sec	Enthalpie Spécifique KJ/kg	Volume massique m3/kg air sec	Pw Saturante ASHRAE Pa	T.h °c	Wmax g/kg air sec	H.R %	T.r ASHRAE °c
Air neuf (3)	1 255	-	35,00	11,50	64,720	0,8941	5627,82	22,10	36,792	32,5%	16,12
Air repris (1)	**1 255**	-	28,0	10,76	55,639	0,8727	3782,21	19,38	24,26	45,3%	15,10
Air récupéré (4)	1 255	-	29,400	11,500	58,967	0,8778	4101,96	20,35	26,39	44,6%	16,12

Calcul de Batterie froide					Altidude du Site en **m =**	47	Préssion :	100 762	**Pa**		
Données de base de calcul											
Apports du Local (sans air neuf)		**Air neuf**	1 255	kg/h (a.s)	**1 050**	m3/h		**CTA tout air neuf**			**non**
										Ppv	**Pw**
Sensibles W	160 240		t°c Ambiante	26,0	Hr Ambiante	46,9%	Wa en g/kg	9,90	1 578,70	3363,13	
Latents W	3 040		Chute °c	10,0	tsb<tsa °c	**2,0**	**Puissance batterie >>>**		**213 820**	**W**	

Désignation	Débit Massique kg/h(a.s)	Débit Volume m3/h	Bulbe sec °c	Teneur en eau g/kg air sec	Enthalpie Spécifique KJ/kg	Volume spécifique m3/kg air sec	Pw Saturante ASHRAE Pa	T.h °c	W à 100% de HR g/kg air sec	H.R %	T.r ASHRAE °c
Air neuf	1 255		29,40	11,50	58,967	0,8778	4101,96	20,35	26,393	44,6%	16,12
Air repris	55 044		**27,00**	**9,90**	52,419	0,8687	3567,31	18,39	22,83	44,3%	13,84
Entrée batteri	56 299		27,05	9,94	52,572	0,8689	3577,80	18,45	22,90	44,3%	13,90
Sortie batterie	56 299		14,00	**9,82**	38,900	0,8309	1598,67	13,83	10,03	98,0%	13,71
Air Soufflé	**56 299**	**47 110**	**16,00**	**9,82**	40,948	0,8367	1818,44	14,60	11,43	86,1%	13,71
	soit		m^3/h								

2.1.3.3 Calcul de la batterie chaude

Il est prévu 47 050 m3/h de soufflage et 47 050 m3/h d'extraction avec 1 050 m3/h d'air neuf

Un échangeur à plaque ≥ 80% sur l'air neuf

Pour cela prévoir une batterie froide de 124.55 kW

Température de consigne 19°C

RECUPERATEUR HIVER					Altitude du Site en m =	47	Préssion :	100 762	Pa		
		Air neuf			1 215	kg/h (as)		CTA tout air neuf		non	
Type de Récupérateur		à Plaques		Rapport massique Q repris / Q an	1	Récupération D'humidité	oui/non	non			
Rendement	fournisseur	80,0%	Indice de récupération de chaleur ⍉ =		0,8	Indice de récupération teneur en eau (		0,000		0,0%	

Désignation	Débit Massique kg/h(a.s)	Débit Volume m3/h	Bulbe sec °c	Teneur en eau g/kg air sec	Enthalpie Spécifique KJ/kg	Volume massique m3/kg air sec	Pw Saturante ASHRAE Pa	T.h °c	Wmax g/kg air sec	H.R %	T.r ASHRAE °c
Air neuf (3)	1 215	-	-7,00	1,83	-2,489	0,7604	338,19	-7,54	2,094	87,4%	-8,54
Air repris (1)	**1 215**	-	18,0	3,20	26,218	0,8337	2064,29	8,64	13,01	25,0%	-2,04
Air récupéré (4)	1 215	-	13,000	1,830	17,699	0,8176	1497,81	4,53	9,38	19,7%	-8,54

Calcul de Batterie chaude					Altitude du Site en m =	47	Préssion :	100 762	Pa		
Données de base de calcu											
Bilan hiver du Local (sans air neuf)		Air neuf	1 215	kg/h (a.s)	1 050	m3/h		CTA tout air neuf		non	
									Ppv	Pw	
Déperditions W	158 710		t°c Ambiante	19,0	Hr Ambiante	13,4%	Wa en g/kg	1,83	295,60	2197,80	
Latents W	0		DT/Soufflage	10,4	tsb+/-tsa °c	1,3	Puissance Batterie >>>		124 550	W	

Désignation	Débit Massique kg/h(a.s)	Débit Volume m3/h	Bulbe sec °c	Teneur en eau g/kg air sec	Enthalpie Spécifique KJ/kg	Volume spécifique m3/kg air sec	Pw Saturante ASHRAE Pa	T.h °c	W à 100% de HR g/kg air sec	H.R %	T.r ASHRAE °c
Air neuf	1 215		13,00	1,83	17,699	0,8176	1497,81	4,53	9,385	19,7%	-8,54
Air repris	53 216		20,10	1,83	24,866	0,8378	2353,33	8,04	14,87	12,6%	-8,54
Entrée batteri	54 431		19,94	1,83	24,704	0,8374	2330,13	7,97	14,72	12,7%	-8,54
Sortie batterie	54 431		28,10	**1,83**	32,941	0,8607	3804,30	11,50	24,40	7,8%	-8,54
Air Soufflé	**54 431**	**47 050**	**29,40**	**1,83**	34,253	0,8644	4101,96	12,03	26,39	7,2%	-8,54
			m^3/h								

3. CONCLUSION

Afin de répondre à la problématique thermique du bâti et de maintien en hygrométrie du Hall 39/45, l'étude fait ressortir les travaux nécessaires à réaliser en isolation d'une part et en installation technique à prévoir.

A ce titre, nous préconisons de retenir la variante V1 bis à savoir la réalisation d'une isolation des parois et toiture, ainsi que la pose de filtre thermique sur les menuiseries extérieures pour optimiser les couts de travaux.

A noter qu'en plus d'une CTA pour traiter principalement l'hygrométrie, il sera nécessaire de prévoir l'installation d'une Pompe à Chaleur (PAC) de type Air/Eau dans l'espace technique qui devra être créé en première approche à ce stade des études dans l'espace entre le Hall 39/45 et le Hall Concorde. Ainsi, cette PAC permettra d'alimenter les batteries de la CTA en chaud et en froid quelle que soit la saison. Il est entendu que les éléments constituant cette installation (bouteille de mélange, pompes de circulation, circuit hydraulique, etc.) feront également l'objet d'une étude plus approfondie de stade ultérieur de type AVP ou PRO/DCE.

Il est également entendu qu'il sera nécessaire de prévoir des travaux d'électricité depuis le TGBT le plus proche pour créer une armoire électrique dédiée et les alimentations nécessaires au bon fonctionnement des équipements techniques CTA, PAC, etc.

A ce stade du projet, nous pouvons estimer en première approche que le coût nécessaire à l'installation technique (hors travaux d'isolation et hors travaux de gros oeuvre) pour le maintien de l'hygrométrie s'élèverait à un montant arrondi de .....450 000 €HT

La répartition serait la suivante :

Fourniture et pose d'une CTA dédié au Hall 39/45 selon la description faite en amont et toutes sujétions liées (gaines, calorifuge, grilles de soufflage et de reprise, etc.) pour un montant d'environ :.....**125 000 €HT**

Fourniture et pose d'une PAC dédié à la CTA du Hall 39/45 selon la description faite en amont et toutes sujétions liées (tuyauteries, pompes de circulation, etc.) pour un montant d'environ : .....**135 000 €HT**

Réalisation des installations d'électricité depuis le TGBRT le plus proche, compris la fourniture et la pose d'une armoire électrique dédiée à l'installation CTA/PAC du hall 39/45, compris liaisons, régulation, etc. pour un montant d'environ : .....**155 000 €HT**

Aléas de travaux à hauteur usuelle de 8% du montant des travaux ci-dessus soit un montant d'environ : .....**33 200 €HT**

Soit un total de travaux de 448 200 €HT arrondi à 450 000 €HT.
