



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



COULISSES

Didot Christophe, architecte
Fabre Aubrespy Marine, architecte, ingénieure
Montaudouin Emile, ingénieur
Pinchon Fanny, ingénieure
Shi Tingnan, ingénieure

Projet février 2012
Master pédagogique : Master ABC 2011-2012

Sommaire

Partie1 : Notice architecturale

Partie 2 : Notice technique

- I- Composition et fonctionnement des principaux éléments de « Coulisse »**
 - A- Composition d'un « tiroir »**
 - 1- Le plancher
 - 2- Les parois
 - B- Etude des portes**
 - 1- Composition d'une porte
 - 2- Dimensionnement de la charnière
 - C- Le coulissage des planchers**
 - 1- Cas critique du déploiement du premier plancher, avant mise en place des pieds
 - 2- Calcul des efforts appliqués sur l'axe des roulements
 - 3- Choix final des roulements
 - D- Détail d'un pied**
 - 1- Composition
 - 2- Modélisation
 - 3- Vérification en compression oblique de la partie bois d'un poteau
 - 4- Vérification du flambement d'un poteau
 - 5- Pied métallique réglable
 - E- Structure et levage du toit**
 - 1- La composition du toit
 - 2- Détail du levage
 - F- Etude d'un profil**
 - 1- Composition d'un profil
 - 2- Modélisation
 - 3- Calcul des forces et des moments résultants
 - 4- Dimensionnement des boulons
 - G- Compartiment entrée-billetterie**
 - H- La scène et les gradins**
- II- Etude de la stabilité du bâtiment**
 - A- Hypothèses de calcul pour la neige**
 - B- Hypothèses de calcul pour le vent**

- C- Etude de la structure complète**
- D- Etude du solivage de plancher**

III- Aspect thermique et qualité de l'air

- A- Notice thermique**
- B- La ventilation au sein du bâtiment**

IV- Chiffrage de « COULISSES »

Partie 1 : Notice architecturale

Pour répondre aux besoins de l'association Scènes & Territoires qui intervient dans des petites communes rurales de la région Lorraine et qui souhaite avoir une salle de spectacle itinérante, le groupe « COULISSES » a imaginé un bâtiment mobile qui se déploierait depuis une semi-remorque de camion.

Le concept même du projet est inhérent au titre : « COULISSES ». En effet, ce mot renvoie à l'univers du spectacle, ce qui se passe en arrière scène, ce que les spectateurs ne voient pas, l'univers des artistes et de tous les acteurs qui participent au montage du spectacle. Mais le mot coulisse désigne également le concept de base, à savoir, faire coulisser les planchers et les murs depuis un camion de transport pour constituer un bâtiment.



Un camion avec une semi-remorque équipée de toute la structure du bâtiment permettra à l'association Scènes et Territoires de se rendre dans

les différents villages lorrains.



Une fois arrivée sur la place du village ou sur un terrain mis à disposition par la commune, la semi-remorque (de 13,50m de longueur) est mise de niveau et calée grâce au déploiement des vérins latéraux stabilisateurs. L'ensemble est ensuite débâché.

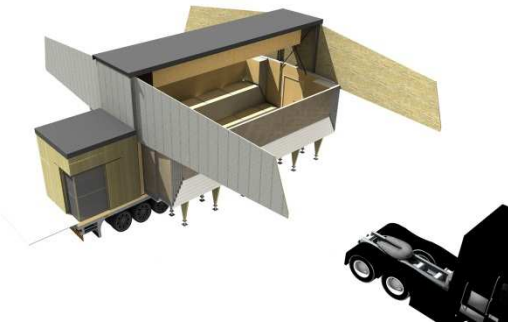


Un système de vérin hydraulique intégré à la structure permet de coulisser verticalement la toiture de la semi-remorque et d'obtenir la

hauteur voulue pour la salle de spectacle. De 4,20m (gabarit réglementaire de transport) on passe à 6,40m de hauteur.



Des portes de 7,50m de long sont ensuite déployées. Elles constituent la partie supérieure du bâtiment. Le gabarit de la salle de spectacle commence à se dessiner.

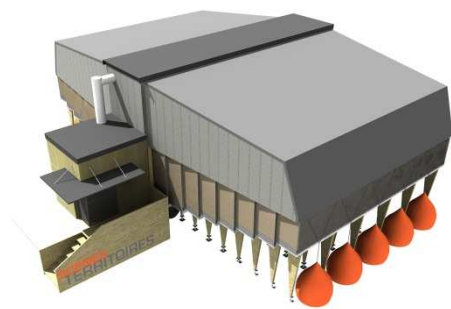
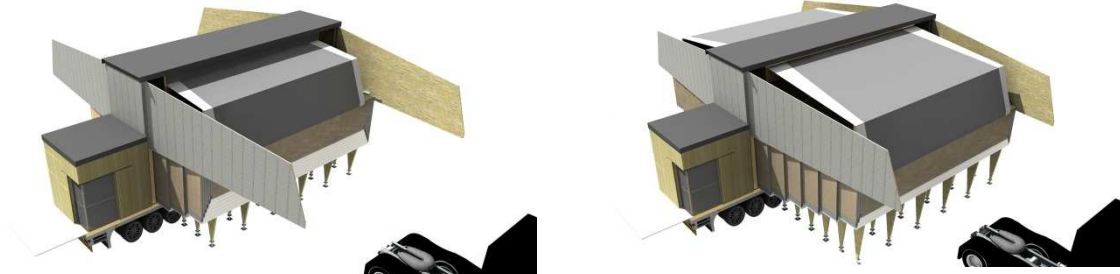


L'équipe de montage peut ensuite s'aider du camion pour tracter le premier « tiroir ». La sortie de ce premier tiroir est une opération délicate car il supporte tous les autres. Des pieds sont ensuite ajustés en hauteur et fixés au sol afin de soutenir les tiroirs et d'absorber les différences de niveaux naturelles qu'il peut exister.



Des profils en bois sont montés à l'intérieur de la structure. La bâche est ensuite fixée à ces profils. Ces 6 éléments permettent d'atteindre une hauteur de 3m à l'intérieur de la salle par rapport au dernier plancher.

Les autres tiroirs peuvent ensuite être coulissés les uns après les autres, les pieds étant ajustés et fixés au fur et à mesure. La bâche se déroule et suit le déplacement des planchers.



Une fois tous les tiroirs coulissés, la bâche est dépliée latéralement et vient recouvrir les portes sur une petite hauteur. Des escaliers sont installés et permettent d'atteindre l'entrée avant et la sortie arrière. L'accès handicapé s'effectue grâce au haillon de la semi-remorque. La ventilation et le chauffage sont mis en place depuis l'entrée. Des ballons sont remplis d'eau, ils contribuent au lestage de la bâche et à l'architecture éphémère du bâtiment. Enfin, ils barrent l'accès des spectateurs au-dessous de la structure.



De l'extérieur, le bâtiment attise la curiosité, ses façades « typographiques » indiquent aux habitants du village ce qu'il se passe à l'intérieur.



Le volume intérieur apparaît très spacieux et chaleureux.

De plus, la forme en redan permet d'optimiser l'acoustique. En effet, les ondes sonores sont réfléchies vers le spectateur.

Partie 2 : Notice technique

Le théâtre se produira à travers la région Lorraine. Nous travaillons avec les Eurocodes pour le dimensionnement.

Situation de l'ouvrage :

Notre bâtiment est un bâtiment recevant du public, il est classé C2, en effet, les sièges seront immobiles, ils peuvent donc être considéré comme fixes.

N'ayant pas d'étages, nous ne nous intéressons qu'à la toiture. Nous sommes en classe H : toiture non accessible sauf pour l'entretien, soit une charge d'exploitation de $q_k = 4\text{kN/m}^2$.

I- Composition et fonctionnement des principaux éléments de « Coulisses »

A- Composition et fonctionnement d'un « tiroir »

1- Le plancher

- Composition

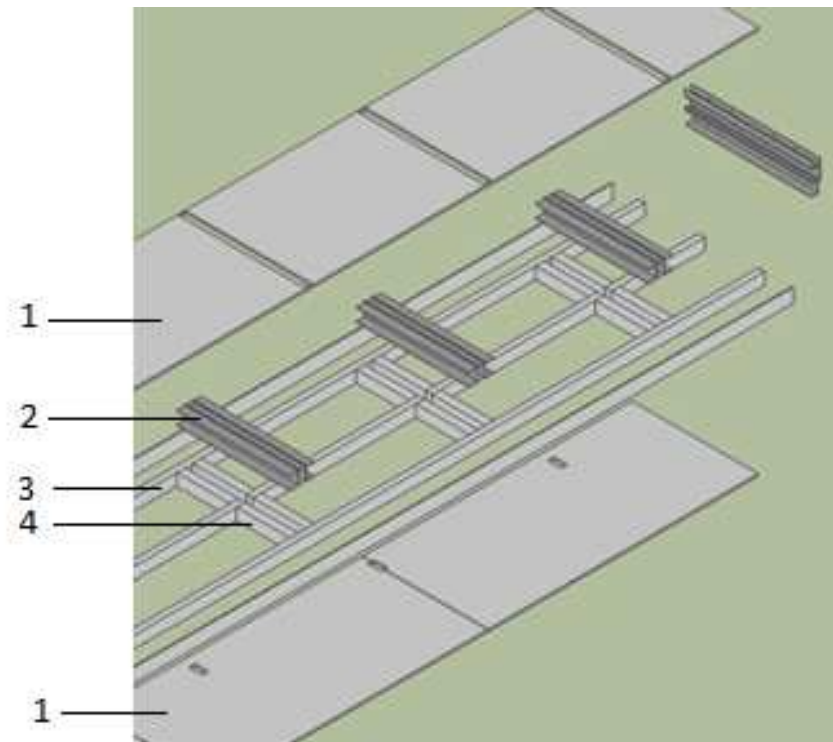


Figure 1: Composition d'un plancher

Légende :

- 1 : Panneau d'OSB d'épaisseur 15 mm
- 2 : rail métallique
- 3 : solive
- 4 : entretoise encadrant le rail

Comme le montre cette vue éclatée, chaque plancher est constitué d'un solivage en Epicéa de classe d'utilisation 2 et de classe de résistance C24 de section 110*80, encadré de deux panneaux d'OSB : d'épaisseur 28 mm pour le panneau supérieur et 15 mm pour le panneau inférieur. Ceux-ci seront ponçés et vitrifiés de façon à éviter une usure prématurée du fait du piétinement par les spectateurs.

Il y a ainsi 3 solives avec un entraxe de 480 mm. Entre celles-ci, on dispose des panneaux semi-rigides de 100 mm d'épais de laine de bois et chanvre ISONAT+ de masse volumique 55kg/m³. C'est un très bon isolant thermique pour l'hiver, de plus, il procure un excellent confort l'été car il dispose d'une forte inertie (jusqu'à 10 heures). L'isolant Isonat+ possède également des propriétés acoustiques qui lui permettent d'atténuer la transmission des bruits d'impact.

Les solives portent aux extrémités sur un « U » métallique et les deux solives les plus externes reposent sur six pieds.

On dispose des entretoises entre les solives pour éviter le déversement de ces dernières. Comme le montre la figure ci-dessous, les entretoises encadrent les quatre rails intermédiaires qui permettront de guider le plancher au cours de sa sortie.

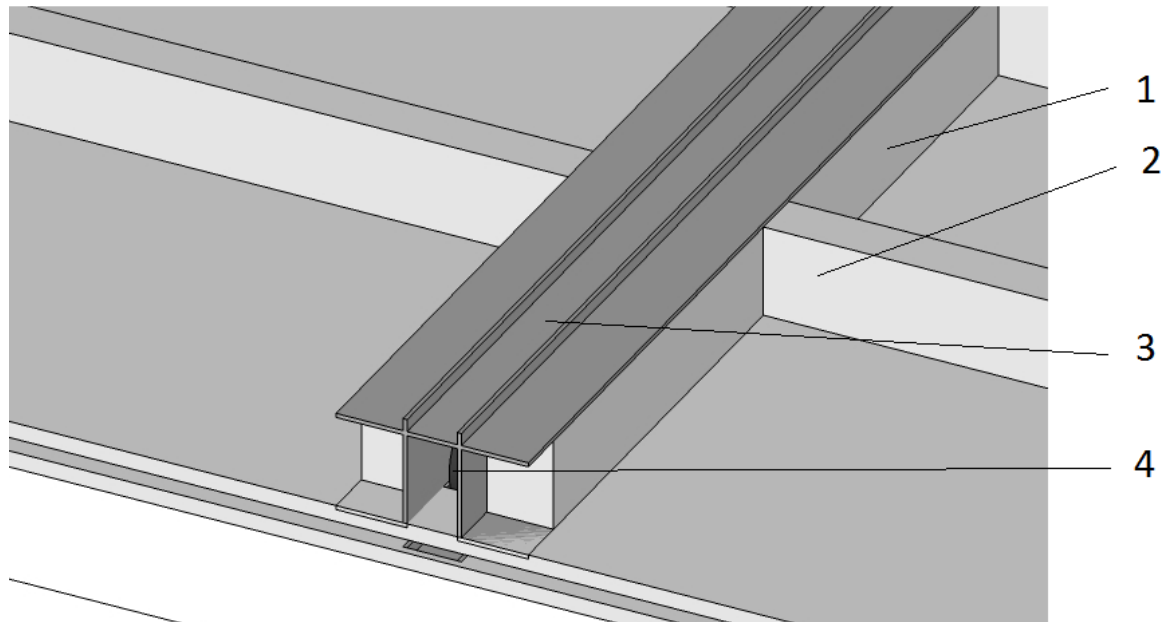


Figure 2: Détail d'un rail

Légende :

- 1 : entretoise
- 2 : solive
- 3 : rail qui accueille le roulement du plancher supérieur
- 4 : roulement qui permet le coulissage sur le plancher inférieur

- **Descente de charge au sein du plancher :**

Lorsque la structure est repliée, les charges descendent directement en suivant le chemin de la structure métallique : en passant du roulement du plancher supérieur au rail du plancher inférieur. Ainsi, le poids du plancher de dessus ne porte ni sur les solives ni sur les entretoises.

2- Les parois

- **La paroi latérale**

Chaque paroi est constituée de montants de 45*60 en Epicéa de classe d'utilisation 2 et de classe de résistance C24 encadrés de deux panneaux contreventant d'OSB de 15 mm d'épaisseur. Nous avons choisi d'utiliser de l'OSB 3, pouvant être utilisé en extérieur. Cependant, il doit être abrité et en aucun cas exposé directement aux intempéries. C'est

pourquoi, les panneaux seront recouverts d'un revêtement protecteur en polycarbonate. Nous envisageons de plus de réaliser un traitement d'ignifugation sur les panneaux. Enfin, on dispose entre les montants, une isolation semi-rigide de 60 mm de laine de bois de densité 50kg/m³.

Afin d'éviter le retour des tiroirs une fois qu'ils sont sortis, nous insérons, au niveau du passage d'une paroi latérale à l'autre, une pièce trapézoïdale de contreplaqué d'okoumé de 5 mm d'épaisseur (ce type de panneau est compatible avec un usage extérieur). Sur celle-ci sont fixées deux pâtes métalliques venant se glisser dans un emplacement réservé au niveau de chacune des deux parois.

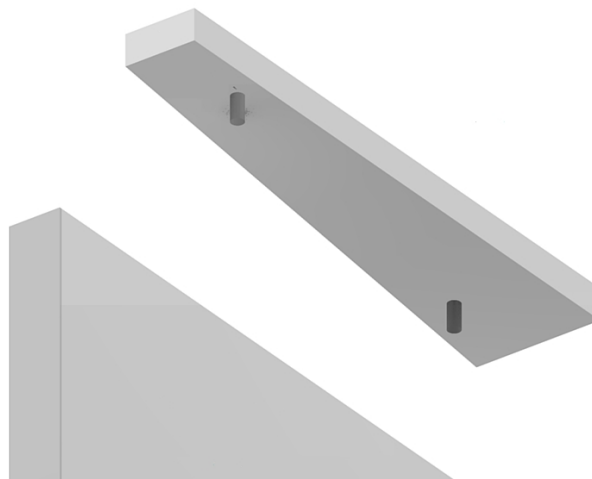


Figure 3: Une cale "anti-retour"

Les images ci-dessous montrent le positionnement de cette cale « anti-recule » :

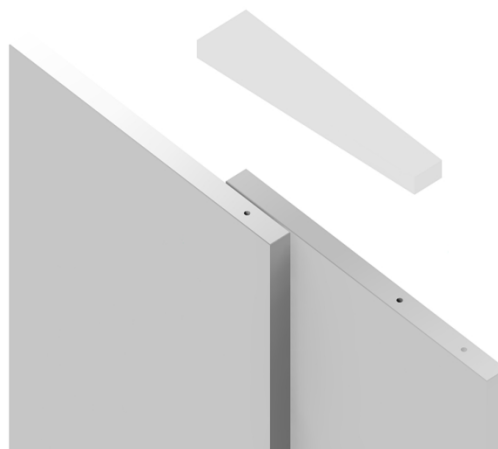


Figure 4: Positionnement de la cale

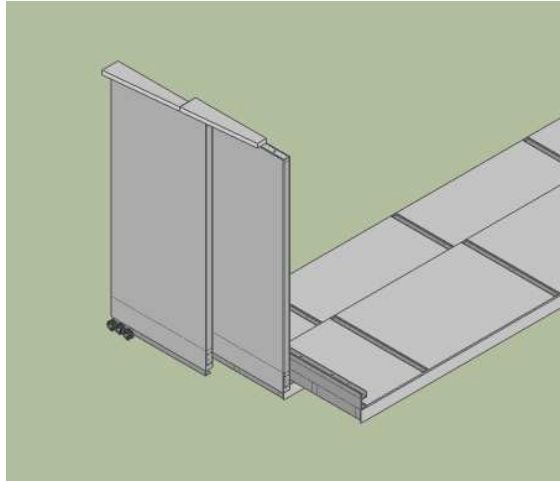


Figure 5: Vue d'ensemble des parois bloquées

- **La paroi du « fond »**

Sa composition est identique à celle des parois latérales. Elle s'étend sur toute la longueur du dernier tiroir et atteint une hauteur de 1.42 m. C'est sur cette paroi que sont fixés les profils.

B- Etude des portes

1- Composition d'une porte

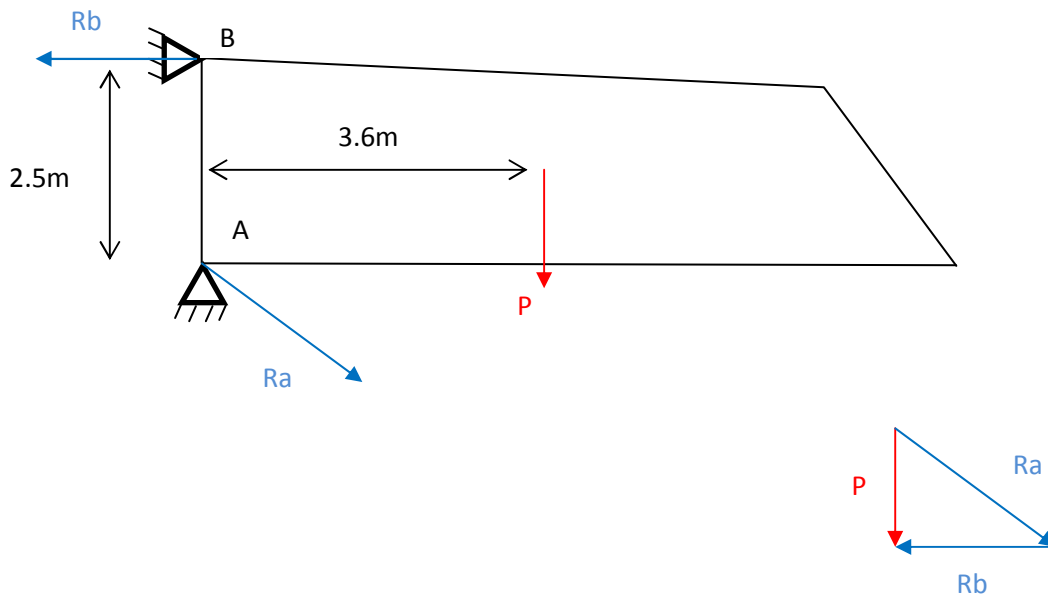
Les portes sont constituées d'une plaque de contreplaqués en Okoumé de 10 mm d'épaisseur, choisit pour sa résistance alliée à sa faible densité en comparaison avec les autres contreplaqués (Douglas, Hêtre). Cette plaque est encadrée de deux feuilles de fibre de verre d'épaisseur 0.5 mm choisie pour leur haute résistance. Ces feuilles de fibre de verre sont formées d'un quadrillage et reprennent donc les efforts dans les deux dimensions. Les joints présents dans le panneau de contreplaqués sont recouverts par deux plis de fibre de verre.

Cette structure composite des portes permet d'obtenir un élément assez légère (au vue de ses grandes dimensions : hauteur maximale de 2.5m et longueur de 7.5m) mais de haute résistance.

Les deux feuilles extérieures en fibre de verre protègent les portes des intempéries.

2- Dimensionnement de la charnière

La masse de la porte s'élève à : $M = 85 \text{ Kg}$. Il est possible de modéliser la situation de la façon suivante :



On applique le principe fondamental de la statique :

$$P = R_a + R_b \text{ avec } P = M \cdot 9.81 = 834 \text{ N}$$

On effectue un bilan des forces au point A :

$$\text{Le moment en A vaut : } M_a = P \cdot 3.6 = 3000 \text{ N.m}$$

$$\text{Ainsi } R_b = M_a / 2.5 = 1200 \text{ N} \text{ et } R_a = P - R_b = 366 \text{ N}$$

On considère ensuite un coefficient de sécurité de 2. Ainsi, on choisit des charnières de 2.5 m de haut, qui résisteront à un effort de $1200 \times 2 = 2400 \text{ N}$ de traction normale à l'axe de rotation.

C- Le coulissage des planchers

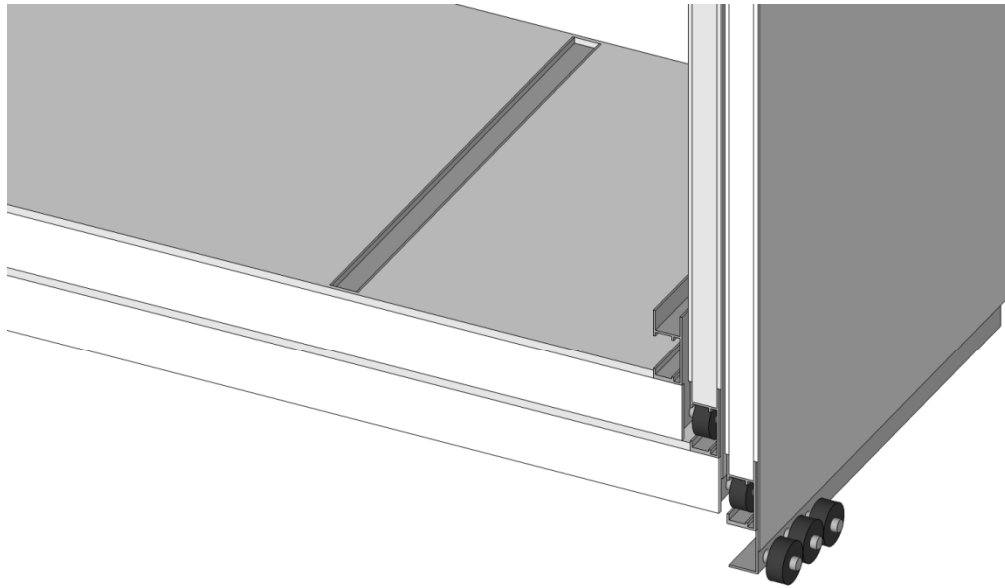
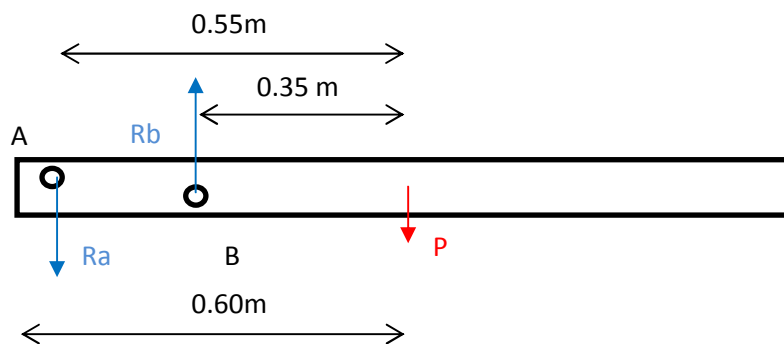


Figure 6: Coulissage des planchers

1- Cas critique du déploiement du premier plancher, avant mise en place des pieds :

Les roulements ne sont pas placés sur une même horizontale afin de fournir un contact en haut et en bas entre les roulements et la glissière. Ainsi, le plancher reste stable : il reste horizontal.



La masse totale à supporter s'élève à : $M_t = 8 \cdot 602 = 4816 \text{ Kg}$. On applique le principe fondamental de la statique :

$$P = R_a + R_b \text{ avec } P = M_t \cdot 9.81 = 47245 \text{ N}$$

On calcul ensuite les moments aux points A et B :

- Moment en A : $M_a = 0,55 \cdot P = 25984,8 \text{ N.m}$
- Moment en B : $M_b = 0,35 \cdot P = 16535,8 \text{ N.m}$

Ainsi, les résultantes sont égales à :

- Résultante en A: $R_a = M_b/0,20 = 82678 \text{ N}$
- Résultante en B: $R_b = M_a/0,20 = 129924 \text{ N}$

2- Calcul des efforts appliqués sur l'axe des roulements :

Sur un plancher, on a 4 roulements en A (sur l'horizontale passant par A) et 10 en B (sur l'horizontale passant par B) et le diamètre des axes est de 30mm.

On étudie les contraintes de cisaillement :

- $T_a = (4/3 \cdot R_a/S)/4 = 39 \text{ MPa}$
- $T_b = (4/3 \cdot R_b/S)/10 = 24 \text{ MPa}$

On a donc une contrainte de cisaillement acceptable car elle est inférieure à 720 Mpa, ce qui correspond à la contrainte admissible de l'acier.

Pour ce qui est de la charge statique, on a :

- $82678/4 = 20669 \text{ N}$ pour les roulements en A
- $129924/10 = 12992 \text{ N}$ pour les roulements en B

3- Choix final des roulements :

On choisit finalement des roulements rigides à deux rangées de billes de la marque SKF ayant les dimensions suivantes :

- Diamètre intérieur = 30mm
- Diamètre extérieur = 72mm
- Largeur = 27 mm
- Charge statique = 30 000 N
- Charge Dynamique = 41 000 N
- Poids = 500 grammes

D- Détail d'un pied

1- Composition

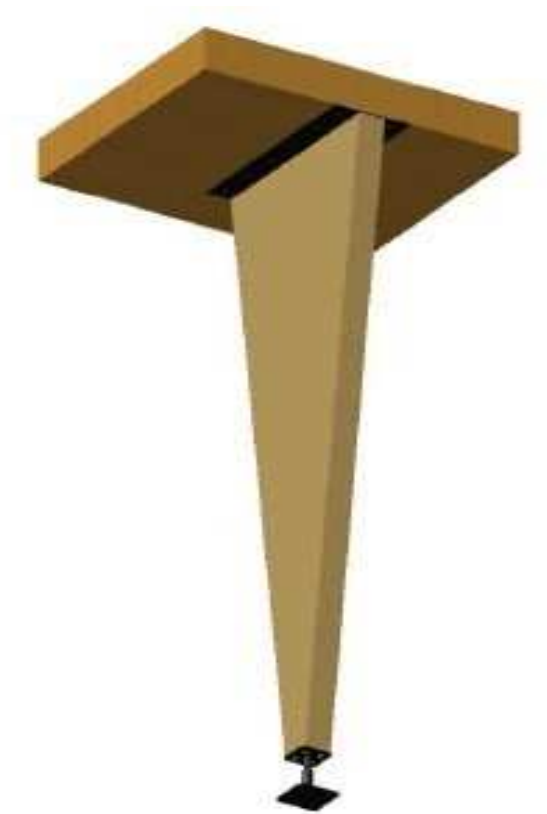


Figure 7: Un pied porteur

Les poteaux sont réalisés en lamellé collé (GL28H) et présentent une section de 640*100 mm² en partie haute et une section de 100*100 mm² en partie basse. La hauteur des poteaux varient en fonction de leur destination. En effet, les poteaux qui ont une position plus externe par rapport à la semi seront plus longs. Voici un tableau qui récapitule les différentes hauteurs :

Numéro de plancher	Hauteur (cm)
1	105
2	121
3	137
4	153
5	169
6	185
7	201
8	217

Figure 8: Tableau des hauteurs des poteaux

2- Modélisation :

Afin de simplifier la vérification, on considère qu'il y a deux poteaux de section fixe de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ du haut en bas supportant une compression oblique. Ces poteaux forment un angle de 12.4° par rapport à la verticale. Ainsi, l'effort appliqué forme un angle de 12.4° par rapport aux fibres du bois.



Figure 9: Modélisation du poteau

Le fait qu'il y est en réalité de la matière qui lie ces deux poteaux présente deux avantages :

- Cela augmente la résistance du poteau car il y a en réalité une plus large bande de bois qui reprend les efforts
- les efforts qui s'appliquent sur l'assemblage liant le poteau au plancher (efforts horizontaux dirigés vers l'intérieur du poteau qui empêche ce dernier de tomber vers l'extérieur) sont diminués car une partie est reprise par le bois, c'est-à-dire par la cohésion des fibres de bois entre elles.



Figure 10: Efforts repris par l'assemblage poteau-plancher

3- Vérification en compression oblique de la partie bois du pied de poteau -

Cette compression oblique est due : au poids propre de la structure, à la charge d'exploitation, au vent et à la neige.

Nous calculons dans un premier temps la force résultante en utilisant la combinaison de charge la plus défavorable :

$$\begin{aligned}
 F_{c,\alpha,d} &= (1.35 G + 1.5 Q + 0.75 S + 0.9 W) \times \text{bande chargement} \times \text{entraxe montant} \\
 &= (1.35 \times 1158.8 + 1.5 \times 4000 + 0.75 \times 60 + 0.9 \times 127.8) \times 1.2 \times 2.1 \\
 &= 19\,465.5 \text{ N} = 19.5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

On calcul ensuite la contrainte résultante :

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{19465.5}{100 \times 100} = 1.95 \text{ MPa}$$

Or, la résistance en compression oblique du lamellé collé n'est pas égale à la résistance en compression axiale. Il faut donc calculer la contrainte admissible dans le cas d'une compression oblique.

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k c_{90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

Avec $f_{c,0,d} = f_{c,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_m} = 26.5 * \frac{1.1}{1.3} = 22.4 \text{ MPa}$

Et $f_{c,90,d} = f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_m} = 3.0 * \frac{1.1}{1.3} = 2.5 \text{ MPa}$

De plus, α vaut 12.4° et $k c_{90} = 1.75$

On obtient ainsi $\sigma_{adm} = 18.8 \text{ MPa}$

On remarque donc que la contrainte effectivement appliquée est nettement inférieure à la contrainte admissible, cela correspond à un taux de travail de 10.4%. Ce qui est tout à fait acceptable

4- Vérification du flambement des poteaux

A l'aide du logiciel Accord Bat 3d et des hypothèses de modélisation et de chargement évoquées ci-dessus, nous avons pu étudier la résistance d'un poteau à l'ELS. Voici les résultats obtenus :

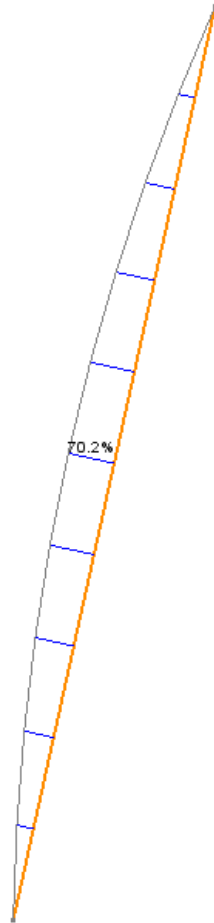


Figure 11: Déplacement maximal du poteau

On obtient ainsi, dans le cas le plus défavorable, un déplacement qui correspond à 70.2% du déplacement maximal acceptable. Cela est donc satisfaisant.

5- Pied réglable de poteau



Figure 12: Pied de poteau réglable

Il permet de régler la hauteur d'un poteau de 135 à 200 mm. La platine supérieure a une dimension de 100 x 100 x 6 mm et la platine inférieure une dimension de : 130 x 130 x 6

mm. La contrainte admissible en compression est de : $\sigma_{adm}=2300\text{daN}$. Cela est suffisant au vue des efforts en compression que les poteaux doivent supporter.

Le pied réglable est fixé au poteau en bois par 4 boulons.



Figure 13: Assemblage poteau bois-pied de poteau

Le poteau en bois est fixé au plancher au moyen d'une platine qui est préalablement fixée au poteau. Douze boulons sont préinstallés (six de chaque côté), on serre l'ensemble au moment du montage.

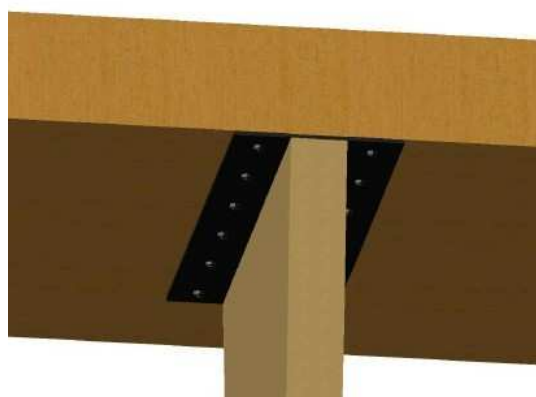
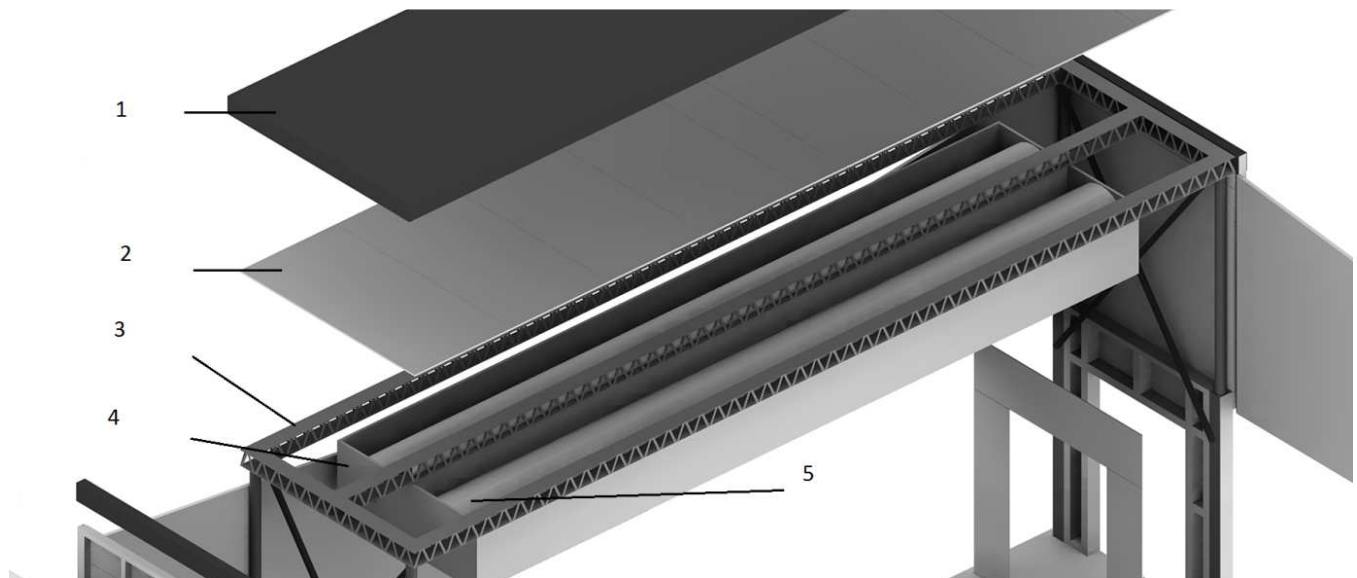


Figure 14: Fixation du poteau au plancher

E- Structure et levage du toit

1- La composition du toit



Légende :

- 1 : tôle
- 2 : panneaux d'OSB de 15 mm d'épaisseur
- 3 : poutres creuses en aluminium de section extérieure 10*10cm² avec une épaisseur d'aluminium de 5 mm.
- 4 : compartiment de rangement des bâches réalisé en OSB
- 5 : deux rouleaux de bâche

La structure porteuse du toit est réalisée au moyen de trois poutres en aluminium, recouvertes d'un panneau d'OSB, lui-même protégé des intempéries extérieures par une tôle métallique.

Sous ces poutres est fixé un caisson en OSB avec deux compartiments, recevant chacun un rouleau de bâche.

Des tubes métalliques à section carrée creuse sont fixés à une de leur extrémité sur le toit et à l'autre extrémité sur les profils KLH (deux tubes par profil). Ils sont fixés une fois que l'ensemble des planchers sont sortis. La bâche, qui se déroule au fur et à mesure de la sortie du plancher, se limite à la partie supérieure de l'édifice car les portes et les parois sont déjà protégées de la pluie.

La couverture choisie est une bâche isotherme en polyester avec enduit PVC sur les deux faces, réalisée sur mesure. Elle sera préalablement traitée au feu : classe M1, c'est-à-dire non inflammable. De plus, elle recevra un traitement anti-UV et fongicide. La finition est faite par ourlets avec des œillets tous les 50 cm.



La bâche redescend un peu sur les portes et sur la paroi du fond. Elle est fixée au moyen de crochets acier zingués préalablement fixés sur les supports rigides :

Longueur 42mm
Hauteur 15mm



Crochet acier zingué

Figure 15: Crochet de fixation de la bâche

Cette toile présente un petit plus qui est d'être personnalisable, que ce soit au niveau des couleurs, des logos,...

2- Détail du levage

Le cahier des charges exigeait une hauteur de 3.30 m au-dessus de la scène. Or, lorsque nous avons conçu le théâtre « COULISSES », une de nos volontés était que le camion de transport ait une hauteur réglementaire afin de pouvoir passer sous les ponts. C'est pourquoi, nous avons dû trouver une solution permettant de rehausser la partie « toit » qui serait rangée pendant le transport. Ainsi, la semi du camion sera équipée de quatre vérins hydrauliques ayant une course de 2.5 mètres permettant de soulever le toit jusqu'à la hauteur voulue. Pour ce qui est de la charge à soulever, elle est de 5.3kN (soit un quart du poids du toit) par piston. Si l'on prend un coefficient de sécurité de 30%, chaque vérin doit supporter une charge de 6,8 kN. La marque « 3A industrie » par exemple, propose des vérins hydrauliques en acier avec une course pouvant atteindre 3 mètres et pouvant soulever aisément 1 tonne.

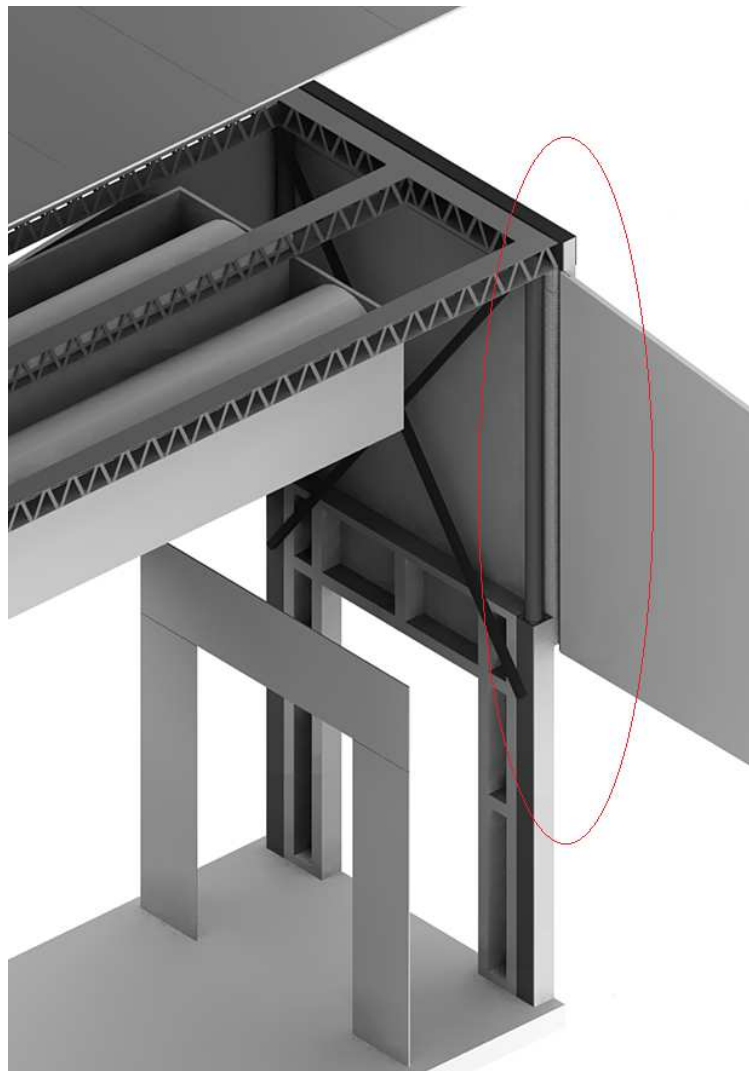


Figure 16: Système de levage du toit

Une fois la structure rehaussée, une croix de saint André métallique est posée afin de rigidifier la structure.

F- Etude d'un profil

1- Composition d'un profil

Les profils sont réalisés en bois massif contrecollé de type KLH 3 plis. On choisit d'utiliser du KLH de type Q, c'est-à-dire ayant des plis extérieurs transversaux car les panneaux vont travailler principalement en cisaillement et non en compression. L'épaisseur totale d'un profil est donc de 94 mm.

Nous avons choisi d'utiliser le produit KLH pour sa capacité à reprendre les efforts en cisaillement. De plus, nos profils atteignent une hauteur de 3.14 m, or les panneaux contreplaqués n'offrent pas de telles dimensions.

2- Modélisation

Le vent en pression verticale crée une force sur les tubes métalliques liés au toit et aux profils. Cette force engendre de la traction dans les tubes, qui ont tendance à fléchir et donc à arracher les profils de la paroi du fond et du plancher.

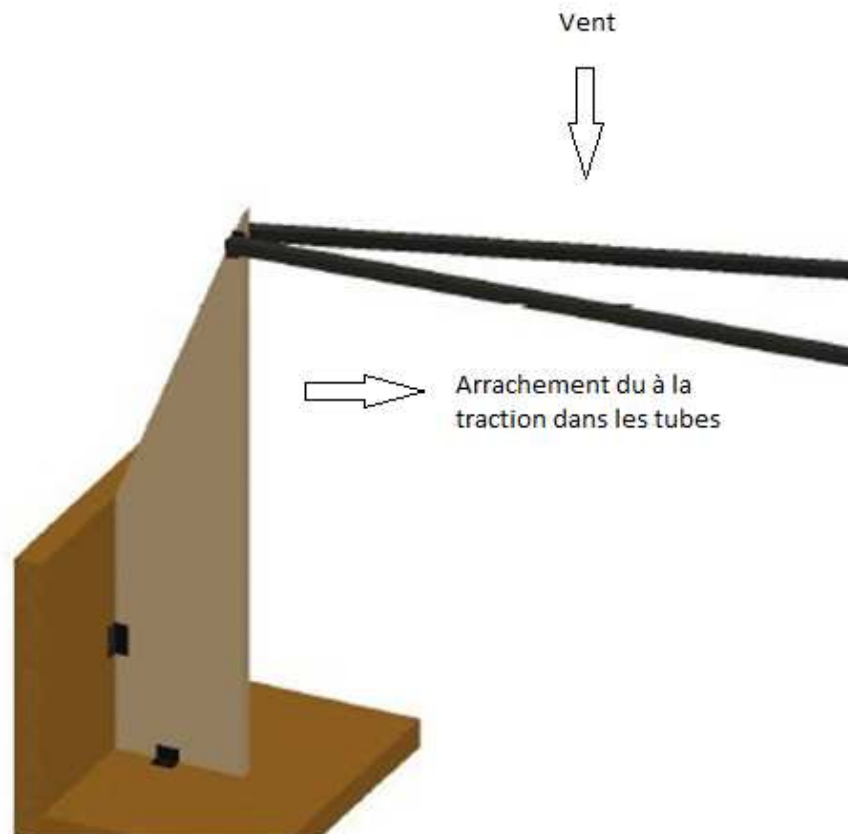


Figure 17: Fixation des tubes métalliques sur un profil

Il y a donc, pour la moitié de la structure, douze tubes métalliques fixés deux par deux sur six profils.

Pour simplifier le modèle, on considère une tranche de profil qui contient les tubes et toutes les forces uniformes sont simplifiées en forces ponctuelles.

3- Calculs des forces et moments résultants

Les fixations métalliques 1 et 2 sont assimilées à des appuis encastrés pour le profil et la fixation 3 représente la liaison entre les tubes et le profil.

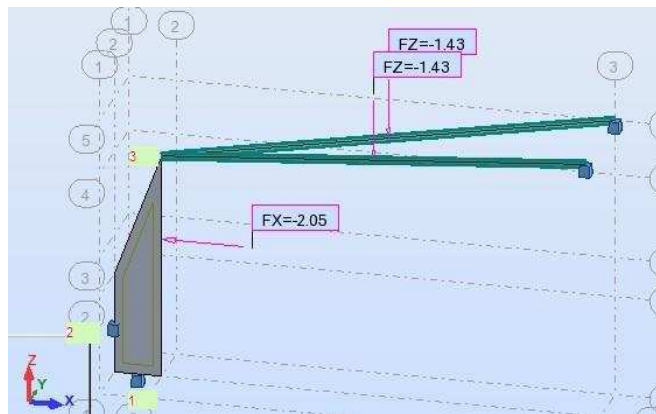


Figure 18: Position des différentes fixations et efforts dus à la surpression inférieure

Surpression inférieure

Il existe une surpression sous les planchers et donc sous les profils de 30.37 daN/m^2 répartie sur une surface de 40.53 m^2 (avec $h=3.86 \text{ m}$ et $L=10.5 \text{ m}$). Cela correspond donc à une force ponctuelle par profil de 2.05 kN . De plus, la partie supérieure de la structure, qui repose sur les profils représente un poids de 1.43 kN pour chacun des tubes.

Le tableau ci-dessous récapitule les forces et moments résultants sur chacune des fixations :

fixation	Fx(kN)	Fz(kN)	M(kN.m)
1	-5.89	-11.04	0.55

2	10.66	12.70	1.39
3	1.46	0.67	0.98

Figure 19: Forces et moments résultants de la surpression inférieure

Dépression inférieure

De la même façon, pour une dépression inférieure de 59.31 DaN/m^2 , on obtient une force ponctuelle de 4 kN par profil. Voici le tableau récapitulatif des forces et des moments résultants :

Fixation	Fx(kN)	Fz(kN)	M(kN.m)
1	-1.55	-4.51	0.46
2	1.22	6.29	1.51
3	1.94	0.67	0.99

Figure 20: Forces et moments résultants de la dépression inférieure

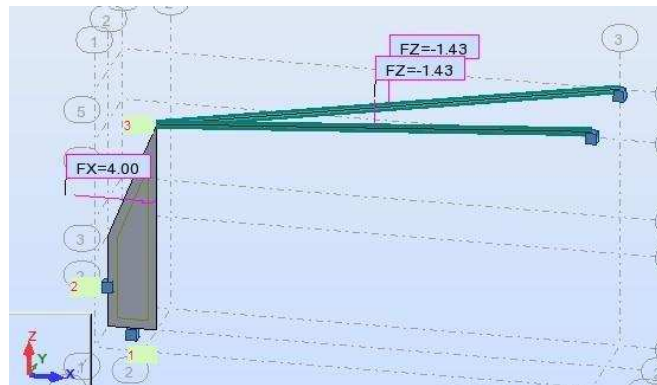


Figure 21: Position des différentes fixations et efforts dus à la dépression inférieure

On remarque que le cas de surpression est le plus défavorable ; C'est la raison pour laquelle nous utiliserons les résultats correspondant pour dimensionner les ferrures.

4- Dimensionnement des boulons

On utilise des boulons Nuance 4.6, de diamètre $d=8\text{mm}$. Ils présentent une contrainte ultime f_{ub} égale à 400MPa et une aire résistante de $A_s=36.6\text{mm}^2$.

La résistance en traction vaut : $F_t = \frac{0.9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} = 6.58\text{kN}$ (coefficient de sécurité $\gamma_{Mb}=2$) ;

Et la résistance en cisaillement est égale à : $F_{v,rd} = \frac{0.6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} = 4.39\text{kN}$.

Cas de la fixation 1 :



La fixation est symétrique de l'autre côté du profil

- nombre de boulons résistants en traction (pour les deux côtés) = $F_{x,1}/F_t = 11.04/6.58 = 2$
- nombre de boulons résistants en cisaillement (pour les deux côtés) = $F_{z,2}/F_{v,rd} = 5.89/4.39 = 2$
- platine de 120mm×70mm

Cas de la fixation 2 :



Figure 23: Ferrure du côté du profil

La fixation est symétrique de l'autre côté du profil

- nombre de boulons résistants en traction (pour les deux ferrures) = $F_{x,2}/F_t = 10.66/6.58 = 2$
- nombre de boulons résistants en cisaillement (pour les deux ferrures) = $F_{z,2}/F_{v,rd} = 12.70/4.39 = 3$
- platine de 170mm×70mm

Pour assurer la symétrie, on prend 4 boulons

Cas de la fixation 3 :

Les platines sont fixées de la façon suivante sur le profil :



Figure 25: Ferrure de fixation des tubes sur le profil

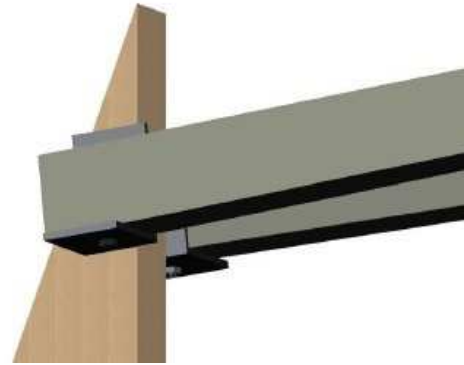


Figure 24: Pose des tubes sur le profil

On installe les tubes sur les platines une fois que l'ensemble des tiroirs est sorti et que les cales « anti-recule » sont posées.

G- Compartiment entrée-billetterie :

C'est une petite pièce de 2.40*2.74 m² qui se trouve à l'arrière du camion.

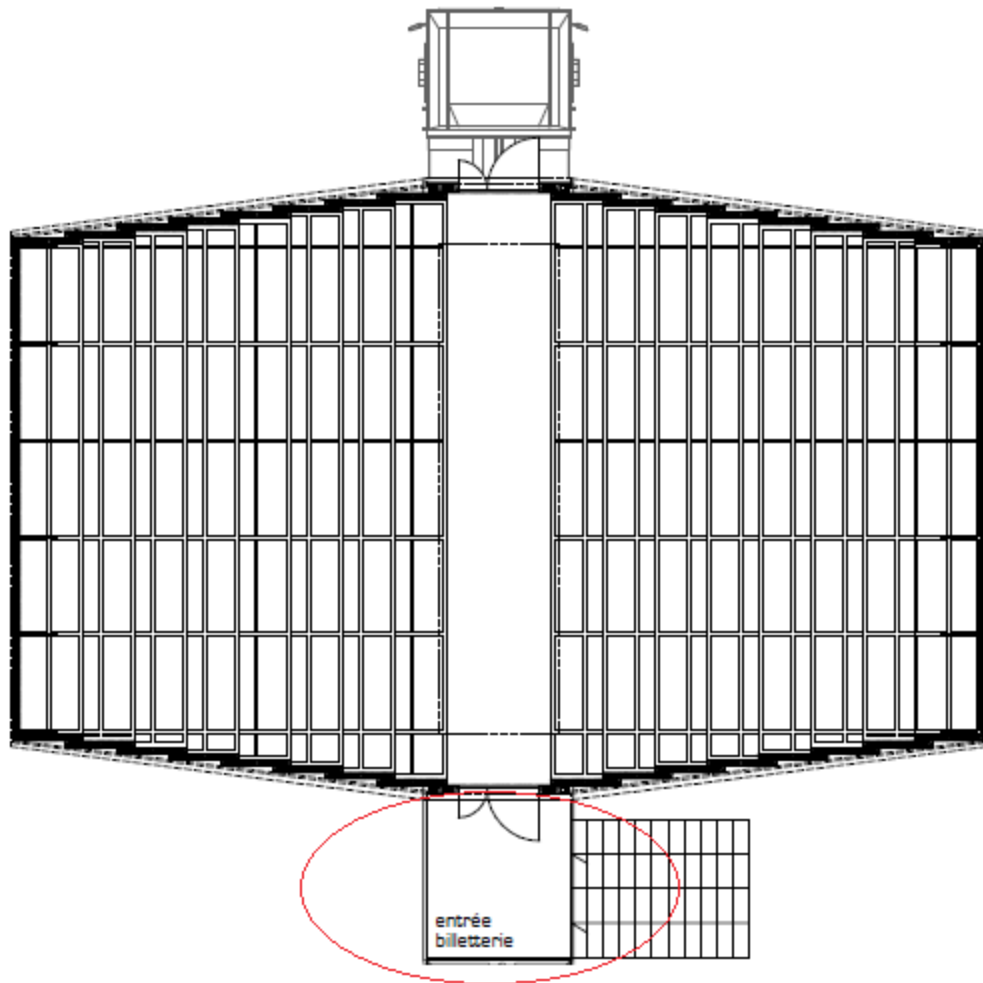


Figure 26: Localisation du sas d'entrée

Elle constitue un lieu de stockage de matériel pendant le transport et est utilisée comme hall d'entrée et billetterie une fois le théâtre déployé. Ses parois ont la même constitution que les parois latérales des planchers.

H- La scène et les gradins :

La scène est formée d'un panneau d'OSB de 28 mm d'épaisseur qui repose sur des poutres composites en I. Celles-ci sont formées de deux solives de section $110 \times 80 \text{ mm}^2$ et d'une âme constituée d'un panneau d'OSB de 28 mm d'épaisseur. La hauteur des poutres est variable. En effet, celles placées au plus près de la scène seront plus hautes, puis les planchers s'élèvent et la hauteur des poutres diminue.

II- Etude de la stabilité du bâtiment

A- Hypothèses de calcul pour la neige

On considère que la charge surfacique verticale de neige est de 60 N/m^2 .

B- Hypothèses de calcul pour le vent

Région de vent : 2

Valeur de base de la vitesse du vent : $V_{b,0}=24$ m/s (norme CTS donne : $V_{b,0}=27.8$ m/s).

Coefficient de probabilité : $C_{prob} = 1$

Hauteur maximale de la construction : 6.4 m

Hauteur de calcul des pressions : 6.4m

Catégorie de terrain : campagne avec haies : rugosité IIIA

Calcul de la vitesse moyenne du vent : $v_m(z)$

$$\begin{cases} c_r(z) = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \times \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \text{ pour } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) = c_r(z_{\min}) \text{ pour } z \leq z_{\min} \end{cases}$$

Coefficient de rugosité : $C_r = 0.7256$

Coefficient d'orographie : $C_o = 1$

Catégorie de terrain	z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]
0 Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km	0,005	1
II Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0,05	2
IIIA Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0,20	5
IIIB Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0,5	9
IV Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface sont recouvertes de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15

Terrain plat

Type d'obstacles constituant l'orographie : Aucun

$v_m(z) = C_r(z) \times C_o(z) \times V_b = 20.17$ m/s avec $V_{b,0}=27.8$ m/s.

Calcul de l'intensité de turbulence I_v

$I_v(z) = k_1 / [C_o(z) \times \ln(z/z_0)]$, avec $z = 6.4$ m.

Coefficient de turbulence en site orographique : k_1

$$k_1 = 1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)$$

$$k_1 = 1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(0.2) + 3)$$

$$k_1 = 0.99954$$

$$I_v(z) = 0.99954 / [1 \times \ln(6.4/0.2)]$$

$$I_v(z) = 0.288$$

Calcul de la pression dynamique du vent $q_p(z)$

ρ = masse volumique de l'air = 1.225 kg/m^3

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot I_v(z) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$$

$$q_p(z) = (1 + 7 \cdot 0.288) \cdot 0.5 \cdot 1.225 \cdot 20.17^2$$

$$q_p(z) = 751.535 \text{ N/m}^2 \text{ et } W = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot q_p(z)$$

C- Etude de la structure complète

1- Stabilité de la structure avec un vent en arrachement :

Pour l'étude du bâtiment complet au vent en arrachement, on utilise la valeur moyenne de « $C_{pe}-C_{pi}$ » la plus défavorable en dépression, soit « -0.79 ». Ainsi, la force de vent en dépression moyenne vaut : -593.7 N/m^2 . Quant au poids propre, il est égal à $26\,203.85 \text{ kg}$.

La combinaison de charges utilisée pour le dimensionnement est le cas de charge le plus défavorable: $G_k+1.5W$. On obtient ainsi une force résultante positive, cela signifie que le poids propre de la structure est suffisant pour contrer le vent en soulèvement.

2- Stabilité de la structure avec un vent en pression verticale :

On utilise la valeur moyenne de « Cpe-Cpi » la plus défavorable en pression, soit « 0.17 ». Ainsi, la force moyenne du vent en pression vaut : 127.8 N/m^2 .

Le vent en pression appui sur la bâche, ce qui crée un effort de traction dans les tubes métalliques sur lesquels elle repose. Cela crée un effort de cisaillement et un effort en compression dans les profils. L'effort en cisaillement est repris par les ferrures alors que l'effort de compression redescend dans les solives (par l'intermédiaire des profils) puis dans les rails métalliques. Enfin, ces derniers transmettent leurs efforts dans les poteaux qui supportent la structure.

Ainsi, cela revient à vérifier les poteaux en compression et en flambement, comme nous l'avons fait précédemment.

3- Le cisaillement et la torsion du bâtiment :

Le contreventement du bâtiment est réalisé par les voiles travaillants, c'est-à-dire, par les panneaux d'OSB des parois et du plancher. Les tubes métalliques participent également à la stabilité du bâtiment car ils rigidifient le « toit » de la structure. C'est également l'ensemble de ces éléments qui évitent la torsion de la structure.

Nous avons vérifiés que la largeur des panneaux était bien supérieure au quart de leur hauteur afin que leur fonction de voile travaillant soit effectivement remplie. De plus, la couture des panneaux d'OSB sur les montants ou sur les solives est assurée par des pointes, placées tous les 150 mm.

D- Vérification du plancher :

1- Hypothèses utilisées :

On considère deux types de vent :

- Le vent en arrachement : on prend dans ce cas la différence « Cpe-Cpi » locale la plus négative et donc défavorable possible.

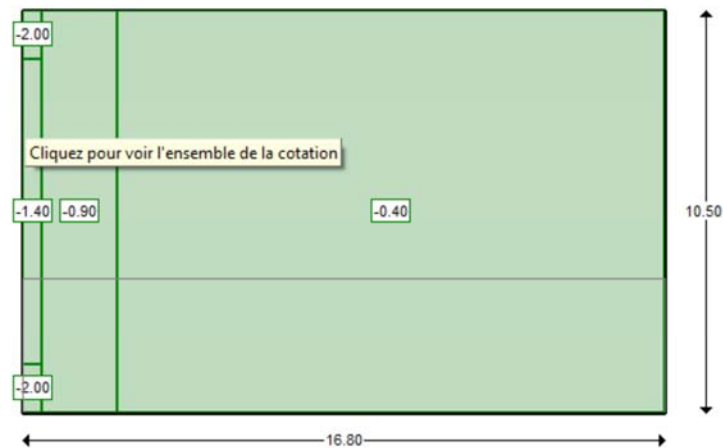


Figure 27: Différence "Cpe-Cpi" locale pour un vent en dépression

On obtient ainsi une force de vent en dépression maximale de : $-2.0 \cdot 751.535 = \mathbf{1503.1 \text{ N/m}^2}$.

- Le vent en pression : on prend dans ce cas la différence « Cpe-Cpi » locale la plus grande et donc la plus défavorable possible.

On obtient ainsi une force de vent en pression maximale de : $0.47 \cdot 751.535 = \mathbf{353.2 \text{ N/m}^2}$.

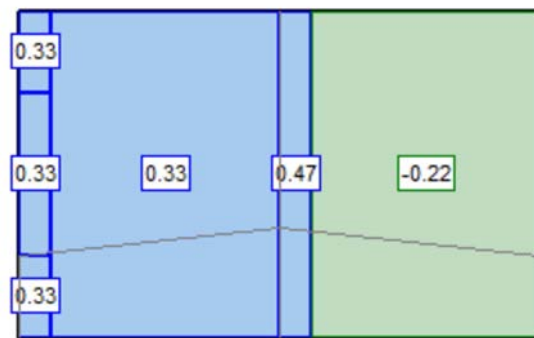


Figure 28: Différence "Cpe-Cpi" locale pour un vent en pression

Concernant la charge d'exploitation, la charge de neige et de vent et le poids propre, on utilise les hypothèses exprimées précédemment

2- Vérification des solives à l'état limite ultime :

A l'aide du logiciel Accord bat et en suivant les hypothèses ci-dessus, nous avons pu vérifier les solives du plancher à l'ELU, une fois la structure déployée. Voici les résultats obtenus pour la combinaison la plus défavorable :

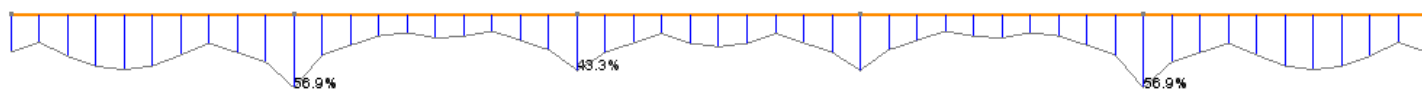


Figure 29: Vérification d'une solive à l'ELU

On note que le taux de travail maximum obtenu est de 56.9%, ce qui est satisfaisant.

3- Vérification des solives à l'état limite de service :

On s'intéresse dans ce paragraphe au déplacement des solives. Voici les résultats obtenus :



Figure 30: Vérification d'une solive à l'ELS

Soit une flèche maximale de 1.61mm correspondant à 19% du déplacement maximal acceptable. Ceci est tout à fait raisonnable.

III- Aspect thermique et qualité de l'air

A- Notice thermique

Lors des représentations, la salle de théâtre sera chauffée au moyen d'une soufflerie. Ce système nous permettra d'atteindre une température intérieure de 20°C pendant les mois les plus froids des représentations. Nous pensons qu'un matériel de puissance 100kWatt serait nécessaire.

Afin de réaliser une première approche thermique de notre structure, nous décidons de calculer le coefficient de transmission thermique et la résistance thermique des différents ensembles qui constitue notre projet.

Pour l'ensemble de l'étude, la température extérieure est prise égale à 12°C pour une humidité de 72%. Ceci représente une moyenne des données relevées à Nancy pour les mois de montage du théâtre). La température intérieure choisie est de 20°C pour une humidité de 65%.

1- Cas des parois

	Épaisseur (cm)	U (w/m².k)	R =1/U (m².k/w)
Panneau OSB	1.5	8.67	0.12
Laine de bois 50kg/m³	6	0.65	1.54
Panneau OSB	1.5	8.67	0.12
TOTAL	9.0	0.52	1.94

Figure 31: Calcul des caractéristiques thermiques des parois

Le coefficient de transmission thermique des parois est donc de **0.52 w/m².k**. Cela est donc supérieur à la valeur imposée par la RT2005 qui demande un coefficient maximal de .45 w/m².k pour les murs extérieurs. Il faudrait augmenter l'épaisseur d'isolant mais cela entrainerait des murs plus larges et plus lourds, ce qui est difficilement envisageable au vue de notre projet.

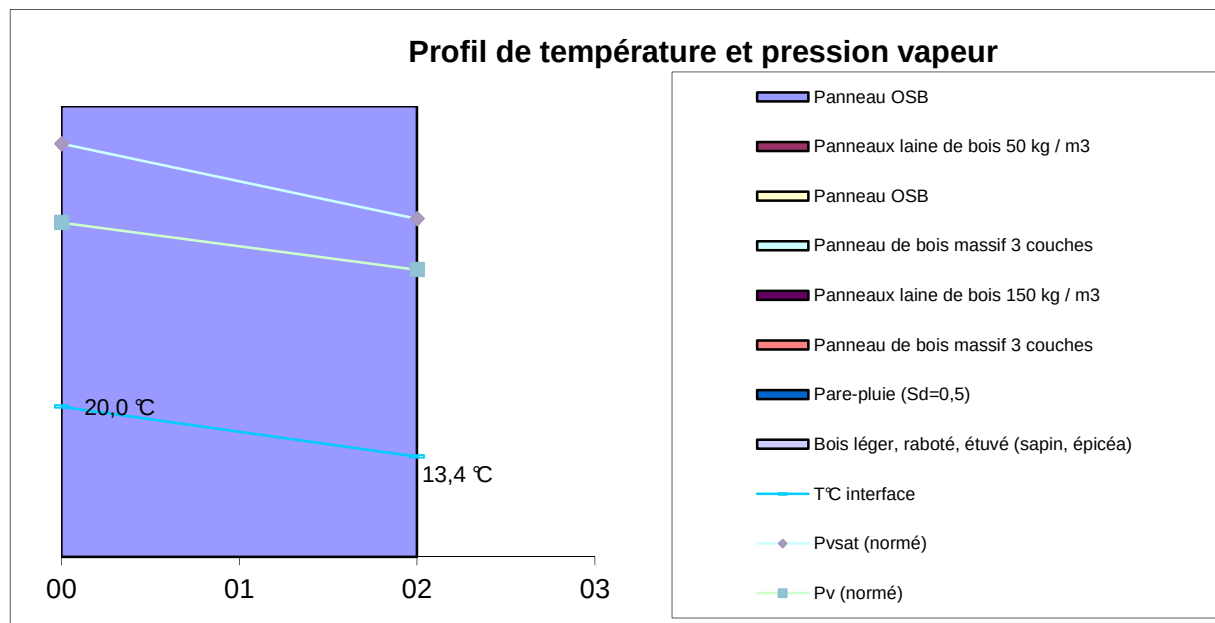


Figure 32: Profil de température et pression de vapeur

On remarque que la courbe représentant la pression de vapeur d'eau dans l'air ne recoupe pas la courbe de pression de vapeur saturante. Il n'y a donc pas de condensation d'eau au sein des parois.

2- Cas des planchers :

	Épaisseur (cm)	U (w/m².k)	R =1/U (m².k/w)
Panneau OSB	2.8	4.64	0.22
Laine de bois 50kg/m³	11	0.35	2.82
Panneau OSB	1.5	8.67	0.12
TOTAL	15.3	0.30	3.30

Figure 33: Calcul des caractéristiques thermiques des planchers

Le coefficient de transmission thermique exigé par la RT 2005 pour les planchers est de $0.36 \text{ w/m}^2.\text{k}$. Nous respectons donc cette exigence.

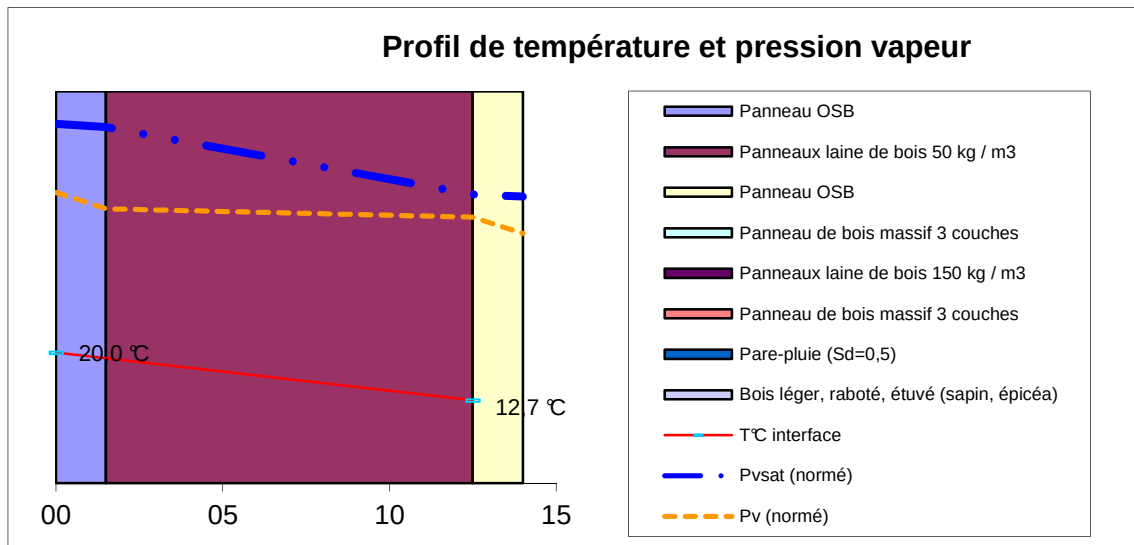


Figure 34: Profil de température et pression de vapeur

Au vu du schéma ci-dessus, on note qu'il n'y aura pas de condensation d'eau au sein du plancher.

3- Etude de la toiture

	Épaisseur (cm)	U ($\text{w/m}^2.\text{k}$)	R = $1/U$ ($\text{m}^2.\text{k/w}$)
Bâche isotherme	2	1.2	0.83
TOTAL	2	1	1

Figure 35: Calcul des caractéristiques thermiques de la bâche

La RT 2005 donne un coefficient de transmission thermique maximal de $0.28 \text{ w/m}^2.\text{k}$. Notre système pourrait donc être amélioré. Cependant, les gaines de ventilation envoient de l'air chaud depuis le plafond vers les spectateurs limitant ainsi la sensation de froid.

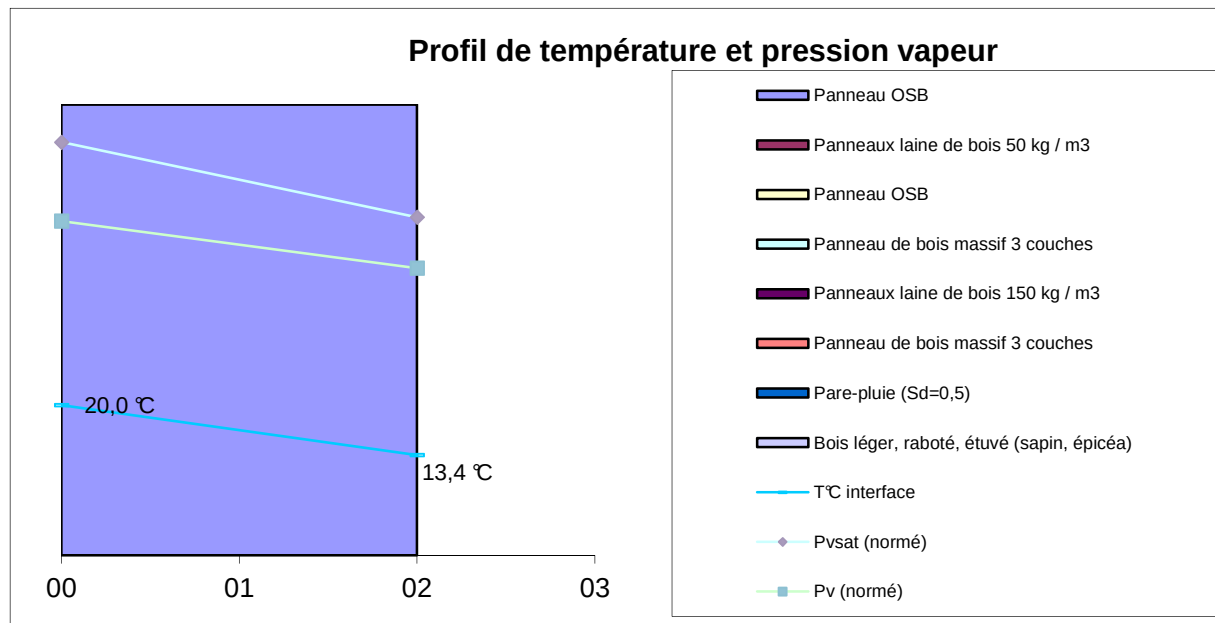


Figure 36: Profil de température et pression de vapeur

Une fois de plus, on remarque que les deux courbes ne se croisent pas. Ainsi, il n'y aura pas de condensation d'eau au sein de la bâche isotherme.

B- La ventilation au sein du bâtiment

1- Le cycle du renouvellement d'air

Un ventilateur central, qui remplit également la fonction de chauffage est mis en place à côté de l'entrée. Le réseau de gaines traverse la salle et chauffe le local (flux représenté par les flèches roses). Pour renouveler l'air intérieur, les bouches d'extraction sont installées et positionnées à l'opposé de l'entrée (flux représenté par les flèches bleues).

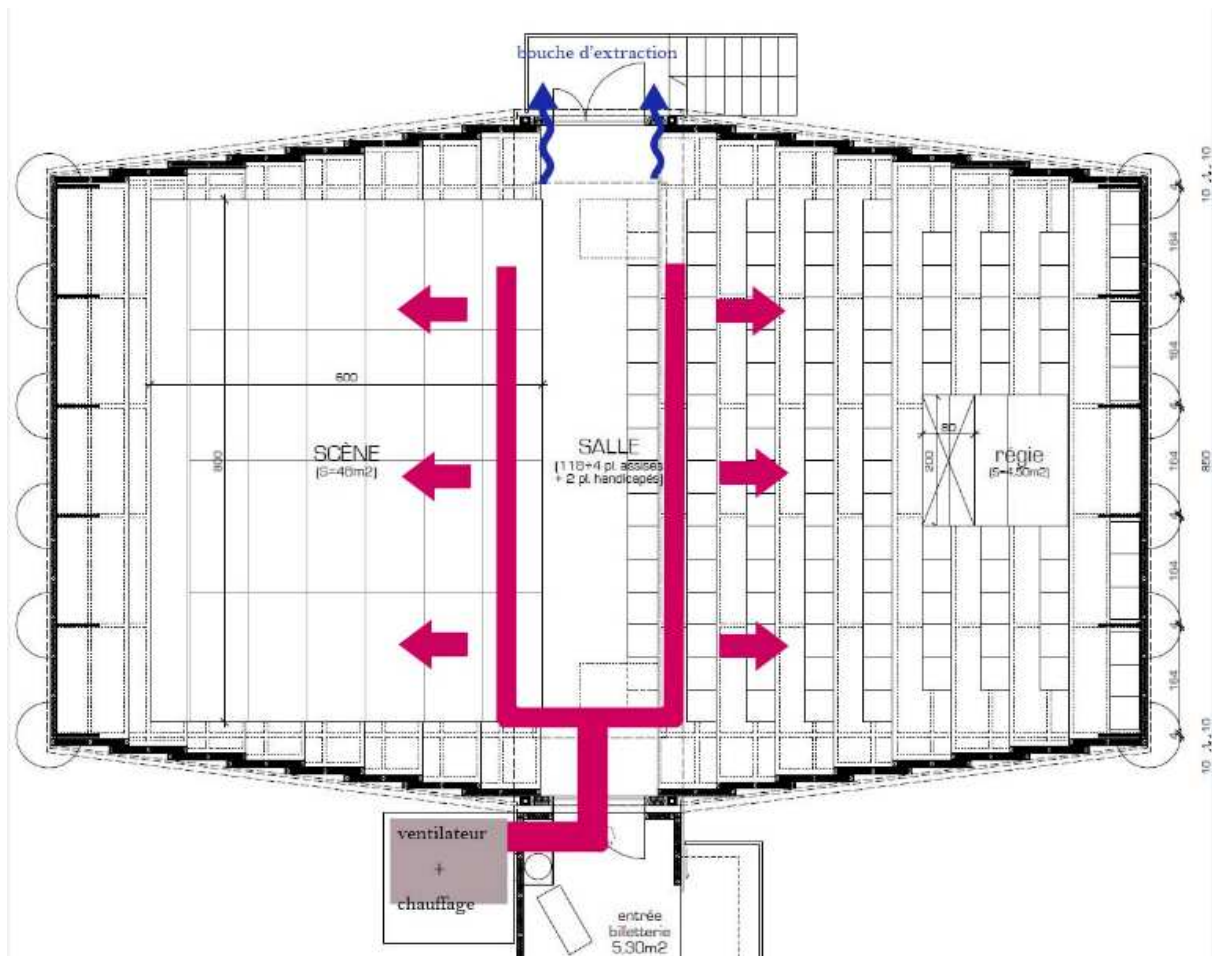


Figure 37: flux et évacuation d'air au sein de "COULISSES"

2- Le réseau de gaines

Les gaines sont réalisées avec un matériau flexible et léger et sont accrochées sur la grille technique.

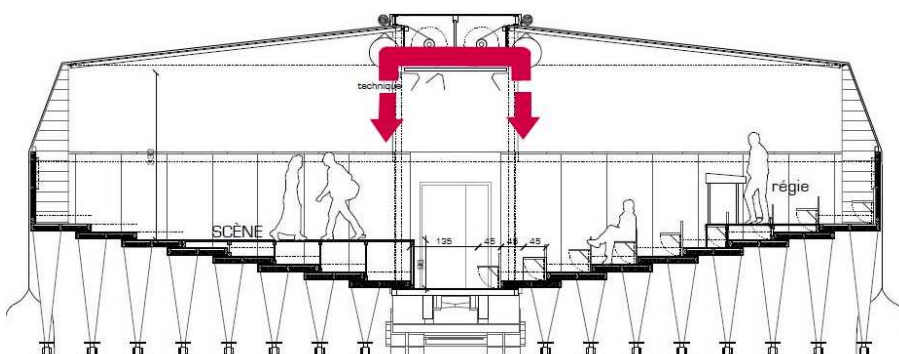


Figure 38: flux d'air au sein de "COULISSES"

3- Débit de ventilation

Il doit être au minimum égal à $25m^3$ par heure et par personne d'après le code du travail.
Ainsi, pour une contenance de 120 personnes, le débit minimal est de $3000m^3/h$.

IV- Chiffrage de « COULISSE »

OUVRAGES	U	quantité	Nb	Quantité totale	Prix unitaire	Prix Total H.T.	Prix TTC
MATERIAUX							
Planchers ossature bois							
Solives (80x110mm)	m3	4,78	1,3	6,21	350,00	2 174,90	
Panneaux OSB 4+ (15mm)	m2	384	1,4	537,60	7,63	4 101,89	
Isolant (100mm)	m2	326,4	1,2	391,68	24,55	9 615,74	
Equerres 90° (95x100x100x3mm)	m3	576	1,1	633,60	1,14	722,30	
Total H.T.						16 614,84	
Murs ossatures							
Montants (45x60mm)	m3	0,72	1,3	0,94	350,00	327,60	
Panneaux OSB 4+ (15mm)	m2	105,34	1,4	147,48	7,63	1 125,24	
Isolant (60mm)	m2	89,539	1,2	107,45	21,27	2 285,39	
Equerres 90° (40x60x70x2mm)	m3	576	1,1	560,00	0,20	112,00	
Total H.T.						3 850,24	
Portes							
Contreplaqué Okoumé (10mm)	m2	60	1,3	78,00	13,93	1 086,54	
Fibre de verre - Epoxy (2x2couches)	m2	120	1,2	144,00	7,00	1 008,00	
Total H.T.						2 094,54	
Nervures							
Contrecollé (90mm)	m2	12	1,2	14,4	150,00	2 160,00	
Total H.T.						4 254,54	
Glissières							
Profilé acier latéral (Ep 5mm)	m3	0,112896	1,1	0,12	8 000,00	993,48	
Profilé acier intermédiaire (Ep 5mm)	m3	0,10464	1,1	0,12	8 000,00	920,83	
Roulements	un	160	1	160,00	59,80	9 568,00	
Roulettes	un	160	1	160,00	10,00	1 600,00	
Total H.T.						13 082,32	
Structure principale							
Ossature Bois (Ep 100mm)	m3	71	1	71,00	36,67	2 603,49	
Portiques Acier	m3	0,0405	1,1	0,04	8 000,00	356,40	
Poutres aluminium	m3	0,04284	1,1	0,05	4 590,00	216,30	
Vérins	un	4	1	4,00	2 000,00	8 000,00	
Total H.T.						11 176,19	
Menuiseries							

Portes tiercés pleines (0,9+0,50x2,10m)	un	2	1	2,00	150,00	300,00	
Total H.T.						300,00	
Gradins							
OSB (15mm)	m2	75	1,3	97,50	7,63	743,93	
Total H.T.						743,93	
Scène + régie							
Plancher scène + Régie : OSB 19mm	m2	48,6	1,4	68,04	10,00	680,40	
Poutres en I	ml	96	1	96,00	16,00	1 536,00	
Total H.T.						2 216,40	
Escaliers							
Structure en bois brut (Ep 50mm)	m3	1	1,5	1,50	600,00	900,00	
Marches en bois brut (Ep 50mm)	m3	0,8	1,3	1,04	600,00	624,00	
Total H.T.						1 524,00	
Couverture							
Bâche	m2	200	1	200,00	20,00	4 000,00	
Tubes de contreventement, section carré, Ep 5mm (30x30mm)	ml	133,2	1,1	146,52	16,00	2 344,32	
Caisson bâche OSB3 (EP 9mm)	m2	50	1,3	65,00	6,50	422,50	
Total H.T.						6 344,32	
Quincaillerie							
Visserie	un	5000	1,2	6 000,00	0,50	3 000,00	
Total H.T.						3 000,00	
Finition							
Peinture extérieure	m2	380	1,3	494,00	1,00	494,00	
Total H.T.						494,00	
Total H.T. Matériaux						61 440,76	
TVA 19,6%						12 042,39	
Total TTC							73 483,15
ELEMENTS EXT							
Semi-remorque	un	1	1	1,00	17 000,00	17 000,00	
Etais	un	96	1	96,00	50,00	4 800,00	
Poteaux contrecollés (Ep 90mm)	m3	2,52	1,1	2,77	1 500,00	4 158,00	
Total H.T. ELEMENTS EXT						25 958,00	
TVA 19,6%						5 087,77	
Total TTC							31 045,77
MAIN D'ŒUVRE							
Acier	h	160	1	160,00	40,00	6 400,00	
Bois	h	320	1	320,00	40,00	12 800,00	

Atelier	h	480	1	480,00	100,00	48 000,00	
Total H.T. MAIN D'ŒUVRE						67 200,00	
TVA 19,6%						13 171,20	
Total TTC							80 371,20
TOTAL PROJET							184 900,12

Figure 39: Tableau de chiffrage du projet "COULISSES"

Le budget prévu par l'association scène et territoire était fixé à 200 000€. Notre projet respecte donc cette volonté.