

Théâtre / **Grand Théâtre de Genève**
Objet / **Expertise machinerie**
Date / **06/05/2020**
Indice de révision / **C – 19/06/2020**
Auteur / **Benoît Probst** *Ingénieur Arts et Métiers*
Destinataire / **Ville de Genève** *Direction du Patrimoine Bâti*
Commande N°4500441834



Sommaire

1	Introduction	2
2	Cintre	2
2.1	Poutres mobiles : analyse de l'existant	2
2.1.1	Principe général des poutres	3
2.1.2	Analyse des rails de guidage	4
2.1.3	Analyse des poutres	5
2.1.4	Prototype de système alternatif	7
2.1.5	Conclusion	7
2.2	Poutres mobiles : proposition de système alternatif	8
2.2.1	Éléments du cahier des charges dans le cadre d'une amélioration du système actuel	8
2.2.2	Choix du pas du blocage en position	8
2.2.3	Principes généraux retenus	9
2.2.4	Hypothèses de prédimensionnement sommaire	9
2.2.5	Conception des rails	9
2.2.6	Principe de conception des chariots	12
2.3	Poulies de renvoi verticales	14
2.3.1	Descriptif général	14
2.3.2	Observation des assemblage vis/écrou	15
2.3.3	Analyse mécanique des poulies	17
2.3.4	Conclusion	19
2.4	Poulies de renvoi horizontales	19
2.4.1	Descriptif général	19
2.4.2	Analyse mécanique des poulies	20
2.4.3	Conclusion	20
2.5	Procédures de contrôle périodique	20
3	Dorsale	21
3.1	Descriptif	21
3.2	Analyse de comportement	22
3.2.1	Hypothèses	22
3.2.2	Maillage	22
3.2.3	Résultats	23
3.3	Conclusion	24
4	Porteuse d'avant-scène	26
4.1	Rappel du contexte	26
4.2	Analyse de la structure	27
4.3	Solutions techniques pour les porteuses	27
4.4	Conclusion	28

Introduction

Le présent document fait la synthèse d'analyse des éléments suivants :

→ Cintre

- Analyse structurelle et fonctionnelle des poutres mobiles des renvois de poulies. Proposition de conception d'un nouveau système de guidage et de maintien en position
- Examen des poulies de renvoi horizontales et verticales
- Conseil méthodologique sur les procédures de contrôle périodique

→ Poutre support plateau dite 'Dorsale'

- Approche d'analyse de comportement sous charge

→ Porteuse avant-scène

- Conseils en vue de l'implantation de porteuses motorisées en salle, à la face du cadre de scène.

Observation :

Cette expertise comprend des phases de calcul de structures.

Ces calculs constituent une approche permettant de donner un cadre global. Ce qui nous intéresse ici est d'avoir des ordres de grandeur de contraintes maxi ou de déformées. La cohérence des équipements avec les normes en vigueur ne fait pas l'objet de notre prestation.

1 Cintre

La structure du gril matérialise 7 travées cour/jardin équipées de poutres mobiles d'une CMU de 500 daN chacune.

Ces poutres se déplacent manuellement, dans chaque travée, dans la direction Face/Lointain afin de se positionner aux aplombs souhaités.

Elles sont équipées de renvois de poulies horizontales ou verticales permettant de faire cheminer les câbles des treuils ponctuels (CMU 250kg) depuis le lointain du plateau vers la position de suspente souhaitée.

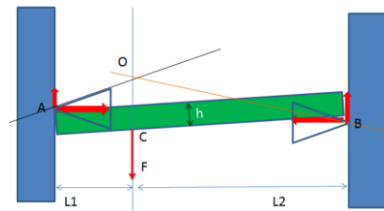
Notre analyse englobe l'ensemble de la chaîne de composants de levage que constitue ce dispositif (excepté les treuils). Elle permet de faire un point sur l'existant, d'en relever les défauts et de proposer une ou plusieurs pistes de réflexion dans le cadre d'une amélioration ou rénovation de ces équipements.

1.1 Poutres mobiles : analyse de l'existant

Les poutres mobiles présentent des problèmes fonctionnels pouvant engager la sécurité des équipements et personnels. Elles requièrent une attention particulière en exploitation en raison notamment de deux défauts liés à leur conception :

- guidage insuffisant ou imprécis dont le jeu laisse la possibilité à un phénomène d'arc-boutement de la poutre, voire, un risque de dégorgement et de chute.
- maintien en position par friction sur les rails sous l'effet d'efforts horizontaux dus aux renvois de poulies. Notons que le freinage est manuel et que l'opérateur ne dispose pas de système de contrôle lui garantissant l'efficacité de son action.

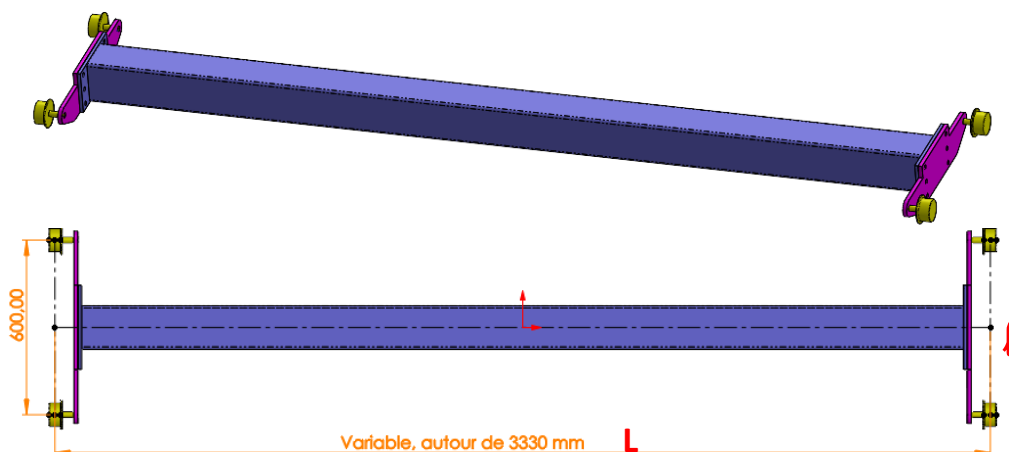
Un défaut de blocage en position, doublé du défaut de guidage génèrent un risque élevé de chute d'une poutre sous l'effet d'une charge horizontale, notamment si elle est décentrée (la chute d'une poutre est déjà arrivée).



1.1.1 Principe général des poutres

Ce type de système 'poutre roulante' est classique et s'apparente à la technologie des ponts roulants. Cependant, là où les ponts roulants ne supportent que des charges verticales, les équipements de théâtre sont souvent soumis à des sollicitations dans leur plan horizontal suivant l'axe de déplacement de la poutre. C'est le cas au GTG

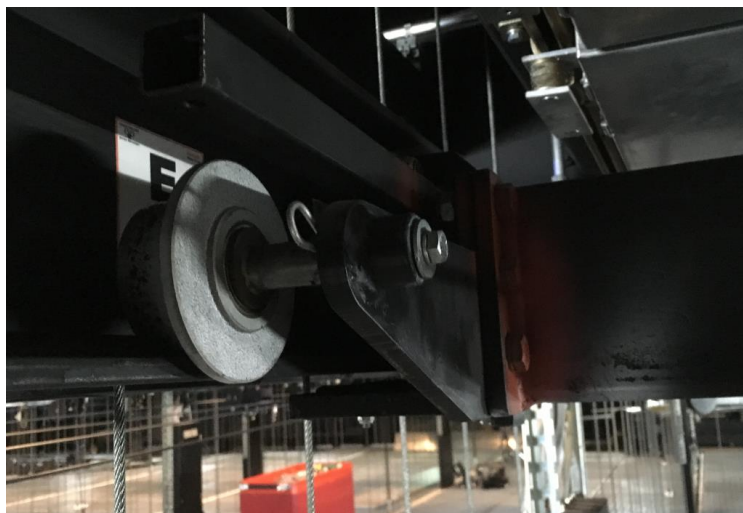
Les poutres ont une portée de l'ordre de 3,30 m (L) pour une longueur de chariot de guidage de 0,60 m de long (ℓ).



Le guidage latéral est assuré par des galets à boudins.

Ce type de guidage, pour avoir un minimum d'efficacité, nécessite une bonne géométrie des rails pour limiter les jeux. Il est particulièrement adapté lorsque le rapport L/ℓ est faible. Beaucoup moins dans le cas de ces poutres.

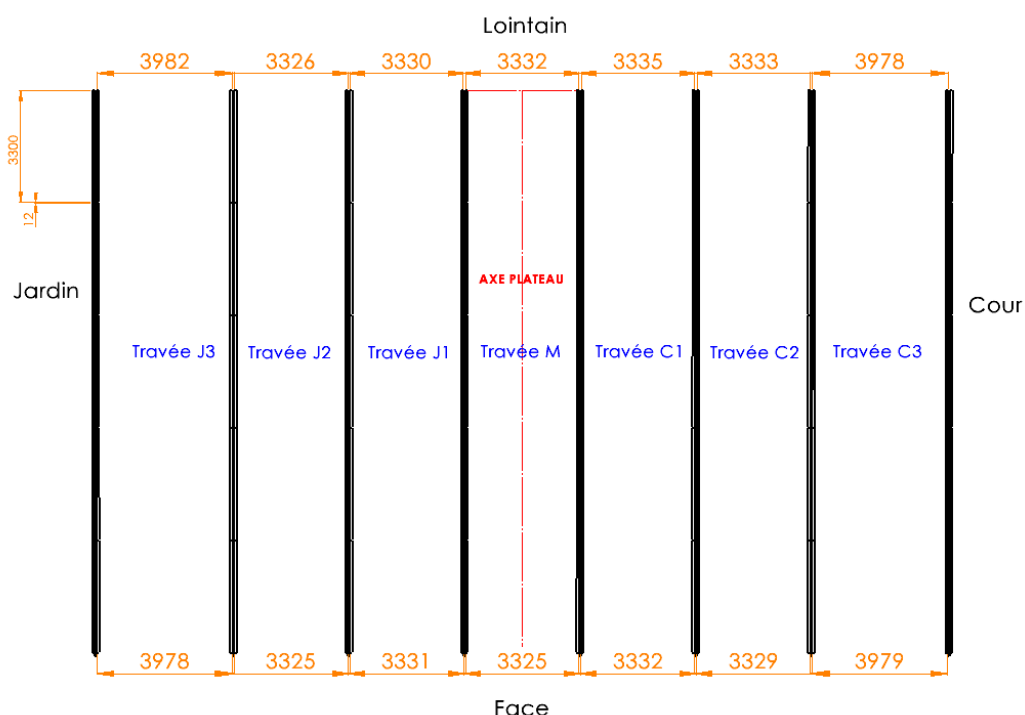
Lorsqu'il y a un défaut de parallélisme, l'arc-boutement est inévitable et, dans ce cas, comme le galet peut assez facilement se dégager de son guide, le risque de déraillement est très important.



1.1.2 Analyse des rails de guidage

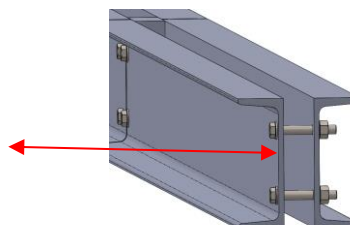
Les rails supports des poutres mobiles sont constitués de profilés **UPN 200**.

Le gril est composé 7 travées suivant le relevé ci-dessous :

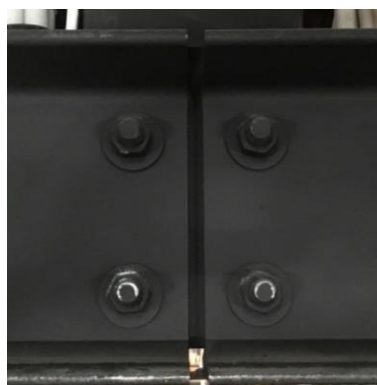
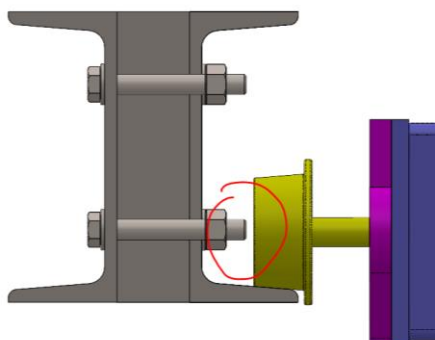


Chaque ensemble de rails est constitués de deux UPN assemblés en symétrie avec un espace intermédiaire de 50 mm.

Les cotes entre rails détaillées ci-dessus sont relevées à l'intérieur des U.



Sur la profondeur du plateau, chaque rail est composé de 5 sections d'UPN de 3,3 m, espacées de 12 mm. On observe que les boulons, dépassant généreusement, limitent les largeurs de bande de roulement. Pour une largeur de bande de roulement théorique de 65mm, seuls 35 mm sont disponibles pour l'appui de la poutre. Ceci tend à augmenter encore le risque de dégorgement en cas d'arc-boutement.



Le relevé des entraxes de rails présente des défauts de parallélisme dans une même travée :

- Travée J3 : 4 mm
- Travée J2 : 1 mm
- Travée J1 : 1 mm
- Travée M : 7 mm
- Travée C1 : 3 mm
- Travée C2 : 4 mm
- Travée C3 : 1 mm

Le défaut maxi de parallélisme est de 7 mm

Par ailleurs, il y a une irrégularité d'écartements de rails d'une travée par rapport à une autre :

- Travée J3 : 3980,0 mm
- Travée J2 : 3325,5 mm
- Travée J1 : 3330,5 mm
- Travée M : 3228,5 mm
- Travée C1 : 3333,5 mm
- Travée C2 : 3331,0 mm
- Travée C3 : 3978,5 mm

L'écart maxi est constaté entre les travées J2 à C1, il est de 8 mm

Dans la conception actuelle des guidages par galets à boudins, les défauts de parallélisme nécessitent de laisser du jeu pour éviter les coincements.

De plus, les différences d'écartements moyens imposent des poutres de longueur adaptée à chaque travée.

Toute permutation de poutre, sans attention particulière, peut aboutir à des défauts de guidages et des jeux accrus.

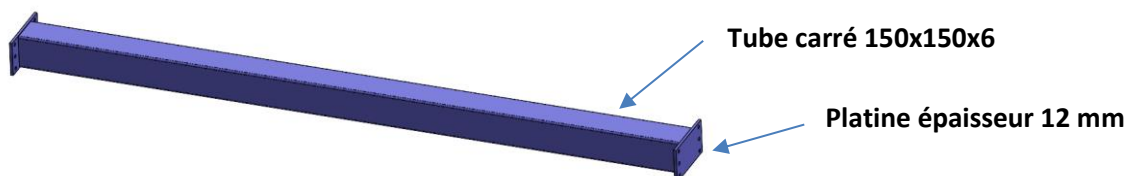


1.1.3 Analyse des poutres

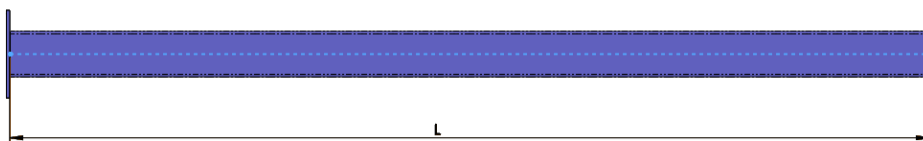
Structure et chariots

Les poutres sont constituées d'un tube acier de **section carrée 150x150x6**.

Les chariots sont boulonnés à la poutre au niveau de platines d'extrémité d'épaisseur 12 mm.



Les longueurs de poutres entre platines varient suivant les travées



- Travées J3 et C3 : $L = 3701 \text{ à } 3704 \text{ mm}$
- Autres travées : $L = 3050 \text{ à } 3054 \text{ mm}$

Rappel : cette imprécision cumulée aux défauts de rails accentue l'absence totale de maîtrise des guidages. Chaque poutre doit être appairée à une ou plusieurs travées en cohérence avec sa longueur.

Maintien en position

Les chariots de poutres sont équipés d'un mécanisme de maintien en position par freinage mécanique. L'opérateur agit sur une came qui pivote et vient serrer une aile de l'UPN (principe de mâchoire). Dans le même temps, l'opération soulève la poutre dont les galets ne sont plus en appui.

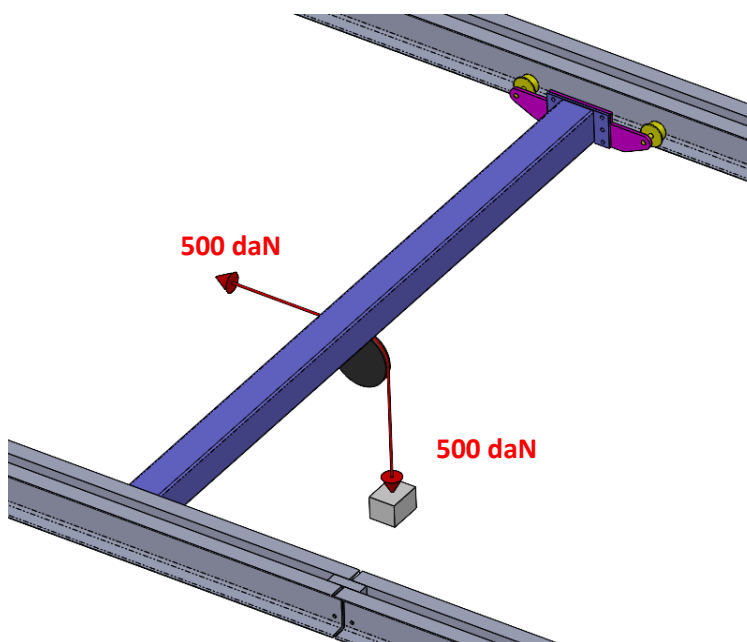
Ce système, correctement mis en œuvre, bloque efficacement la poutre en position.

Cependant, aucun élément ne permet de s'assurer que le blocage est efficace à 100%. L'opérateur n'a pas de moyen de contrôle.



Rappelons que, sous l'effet d'une charge verticale renvoyée sur les moteurs ponctuels via les poulies, la poutre est soumise à un effort horizontal qui sollicite le système de maintien en position.

Si cette charge est décentrée sur un côté de poutre. Tout l'effort devra être absorbé par un seul frein. Dans le cas extrême, un système de freinage doit assurer le maintien d'une charge de 500 daN correspondant à la CMU totale de la poutre (cas de deux pontuels 250 kg côte à côte en extrémité de de poutre).



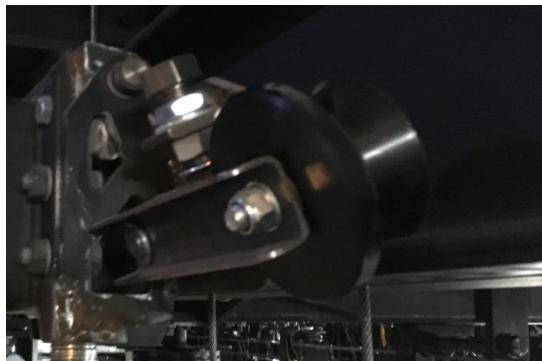
1.1.4 Prototype de système alternatif

La travée J2 présente un prototype réalisé il y a quelques années afin de tester des améliorations concernant les deux problématiques.

Guidage latéral

Test avec des galets coniques mais toujours sur la base d'un maintien latéral par épaulement sur les galets.

Compte tenu des défauts géométriques des rails, ce principe ne peut pas donner satisfaction et les tests ne présentent pas d'amélioration significative du guidage d'après les utilisateurs.



Maintien en position

Mise en place d'un plat découpé, soudé sous le rail.

Ce principe permet de garantir le verrouillage en position de la poutre. Il est efficace et satisfaisant de ce point de vue.

Cependant, le pas des orifices de verrouillage est trop important et ne permet pas d'ajuster correctement les aplombs de câbles ponctuels par rapport au caillebotis.



1.1.5 Conclusion

Les défauts géométriques des rails de guidages ne permettent pas d'assurer un fonctionnement correct des poutres roulantes avec ce type de guidage quelle que soit la forme du galet. Cependant, comme les poutres mobiles offrent l'avantage d'avoir un chariot démontable, il peut être envisagé de concevoir un système de guidage qui s'adapte mieux à la géométrie et aux imprécisions de parallélisme des UPN.

Par ailleurs, un principe d'un verrouillage par friction est théoriquement possible en suivant un protocole de mise en oeuvre strict. Mais, sur un plateau de théâtre, compte tenu de l'usage, il sera toujours moins sécurisant qu'un arrêt mécanique.

Nous préconisons d'opter pour ce dernier type de solution de maintien en position.

1.2 Poutres mobiles : proposition de système alternatif

1.2.1 Éléments du cahier des charges dans le cadre d'une amélioration du système actuel

Ces éléments de CDC, que nous définissons, ont pour unique objectif de fixer un cadre de conception suivant le contexte lié à cette prestation. Nous partons du principe d'une amélioration de l'installation actuelle. La solution proposée pourra toutefois participer à la réflexion dans le cadre d'un éventuel projet de rénovation plus complet du gril.

- Amélioration de la précision de guidage des poutres
- Sécurisation des poutres au niveau des rails pour éliminer tout les risques de dégorgement
- Modification du blocage en position avec une capacité d'absorber une charge horizontale en cohérence avec la CMU de la poutre
- Fiabilité à 100% du blocage en position
- Blocage en position suivant un pas fonctionnel (compatible avec le caillebotis)
- Déplacements et sécurisation manuels par deux opérateurs
- Conservation de la structure tubulaire actuelle (seuls les chariots sont à remplacer)
- Pas de modification structurelle du gril et des rails de guidage
- Réemploi d'un maximum de composants constitutifs du système actuel
- Eviter une mise en œuvre complexe

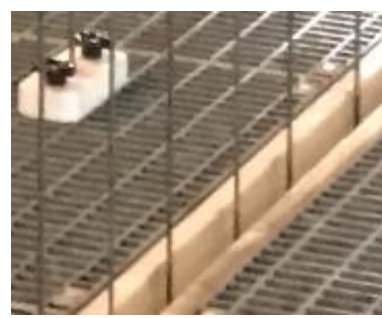
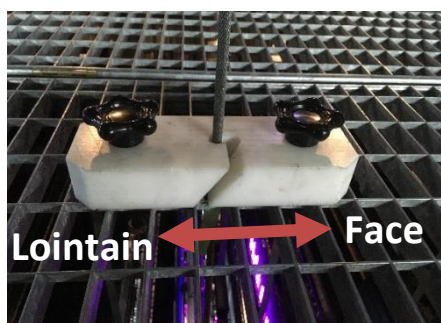
La proposition de conception est au stade de l'étude de principe. Le cas échéant, il reviendra au théâtre, et à l'entreprise chargée des travaux, de réaliser le relevé précis, l'étude détaillée (validée par test) et les notes de calcul respectant les normes en vigueur.

1.2.2 Choix du pas du blocage en position

- La poutre mobile se déplace dans la direction face/lointain.
- Le câble ponctuel de Ø8mm traverse les mailles 33/66 de caillebotis standard de façon la plus centrée possible (le câble vertical ne doit pas frotter contre l'aile du caillebotis).

On observe que le caillebotis est posé dans un sens défavorable par rapport au déplacement des poutres : avec la largeur de la maille de 33 mm dans la profondeur du plateau.

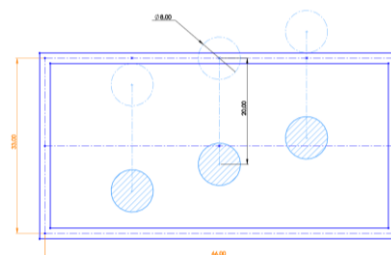
Ce caillebotis tourné de 90° permettrait de limiter les contraintes de positionnement (remarque à considérer dans le cadre d'une rénovation complète)



Deux systèmes sont envisageables pour le blocage mécanique :

1. doigt d'indexation suivant un pas maxi de 18 à 20mm
2. doigt d'indexation suivant un pas plus important (50 mm par ex) monté sur vis de réglage pour l'ajustement

Notre étude privilégie la conception 1., plus simple et rapide à mettre en œuvre.



1.2.3 Principes généraux retenus

Guidage

Les défauts de géométrie des rails de guidage ne sont pas rectifiables simplement. L'absence de précision du parallélisme est donc à prendre en compte dans la conception du chariot et impose de ne pas chercher à maintenir la poutre latéralement en se guidant par rapport aux deux rails.

Notre étude privilégie donc :

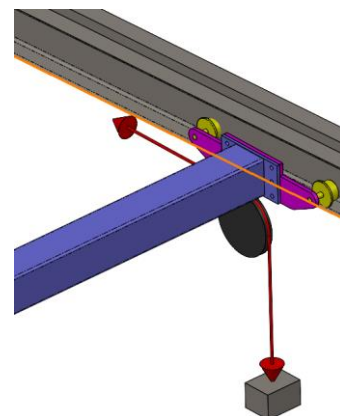
- **Le choix d'un unique rail de référence sur un côté afin de réaliser un guidage de qualité**
- **Pas de guidage latéral du côté opposé, mais simplement la mise en place d'un anti-dégorgement pour éviter tout risque de chute de la poutre en cas arc-boutement accidentel.**

Verrouillage

- **Verrouillage physique par mise en place d'un doigt d'indexage suivant un pas de 18 mm.**

1.2.4 Hypothèses de prédimensionnement sommaire

La conception présentée se base sur l'hypothèse d'un double renvoi de poulie positionné d'un côté de la poutre, contre le rail. Dans ce cas, nous considérons que la totalité des efforts horizontaux est absorbée par un seul système de verrouillage.



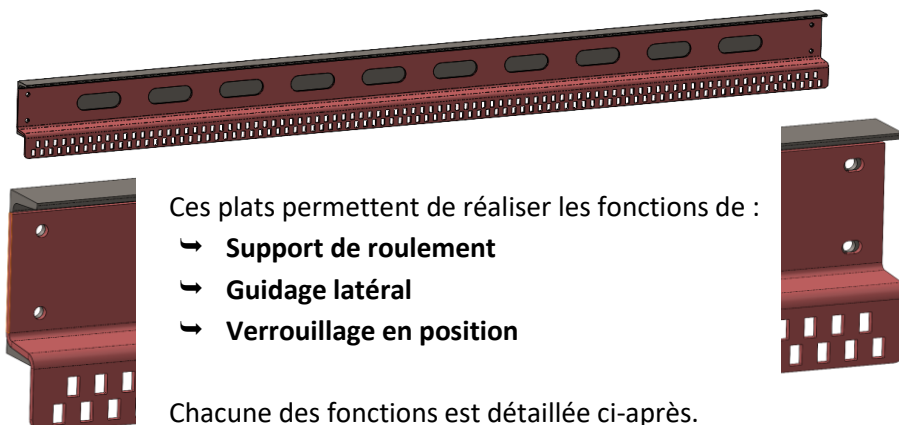
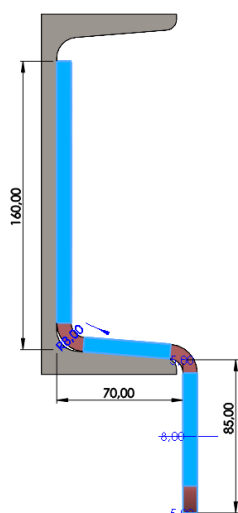
1.2.5 Conception des rails

Nous proposons l'intégration de plats découpés-pliés en acier, d'épaisseur 8 mm à l'intérieur des UPN existants.

Ils suivent la même logique de sections de poutres et peuvent être, soit :

- **boulonnés** par l'intermédiaire des points d'assemblage des UPN sur la charpente. *Ceci nécessite de déboulonner les UPN au fur et à mesure de la mise en place des plats.*
- **soudés** par soudure bouchon en fond d'UPN (avec l'inconvénient d'être une solution définitive).

Dans le cadre de cette pré-étude de principe, la solution boulonnée, plus défavorable du point de vue du calcul, est prise en compte.



Ces plats permettent de réaliser les fonctions de :

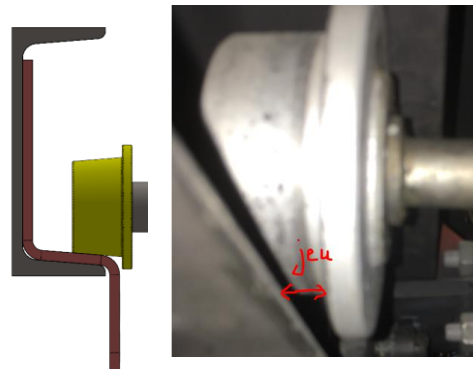
- ↳ **Support de roulement**
- ↳ **Guidage latéral**
- ↳ **Verrouillage en position**

Chacune des fonctions est détaillée ci-après.

Fonction de support de Roulement

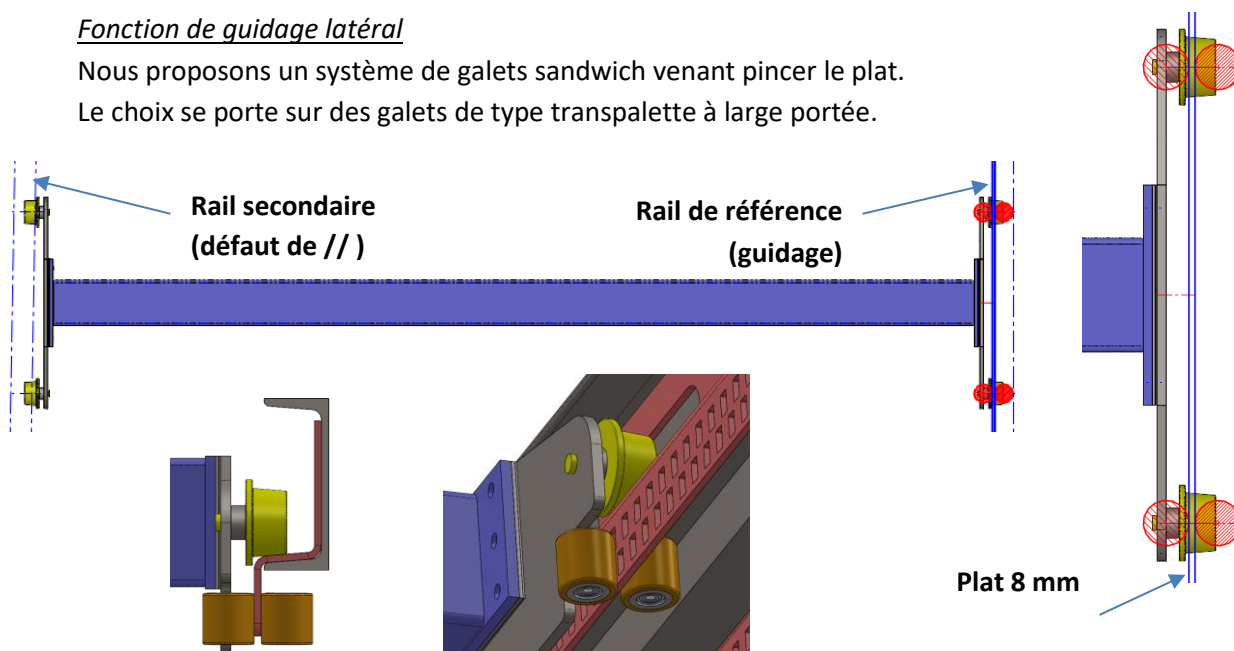
L'appui de la poutre sur le rail est du même type qu'aujourd'hui avec la présence du plat de 8 en intermédiaire entre l'UPN et le galet.

Il est envisageable de conserver les galets actuels en veillant à laisser un jeu suffisant par rapport aux boudins pour qu'il n'y ait pas de risque de contact avec le plat.



Fonction de guidage latéral

Nous proposons un système de galets sandwich venant pincer le plat. Le choix se porte sur des galets de type transpalette à large portée.



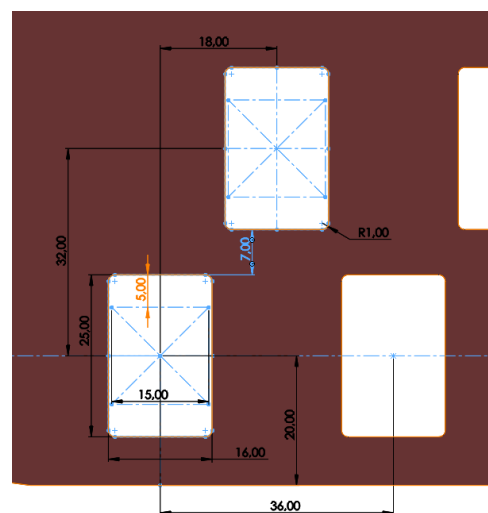
Fonction de verrouillage en position

Le pas mini de **18mm** nécessite un dispositif mécanique en quinconce pour recevoir le doigt d'indexage et garantir une bonne solidité du plat.

Le doigt d'indexage est conçu à partir un profil carré de 15x15 mm en acier

- ➔ *Le choix du profilé carré est privilégié par rapport au rond pour assurer une plus grande portée d'appui dans la découpe femelle.*
- ➔ *Pour information, sous un effort au cisaillement de 500 daN, un doigt en acier S355JR présente un coefficient de sécurité minimal de 11 par rapport à la limite élastique. Ceci permet de valider la faisabilité suivant ce principe.*

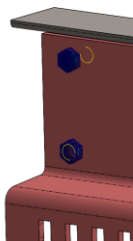
Les découpes recevant le doigt d'indexage sont des rectangles permettant une tolérance de positionnement dans le plan vertical de +/- 5mm.



Validation de principe

Les rails en tôle de 8 mm, défini ici en acier S355JR, sont vérifiés au calcul dans le cas d'un boulonnage dans les UPN et sous l'effet d'une charge d'exploitation horizontale de 500 daN non pondérée.

Simulation des boulonnages avec l'UPN

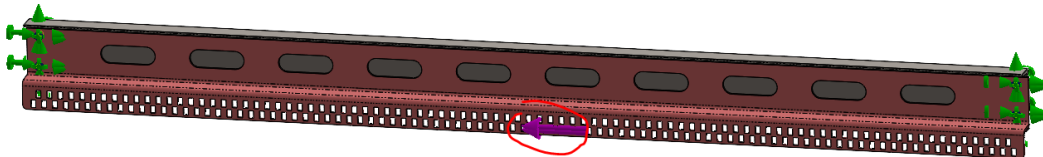


3 cas de charges sont testés :

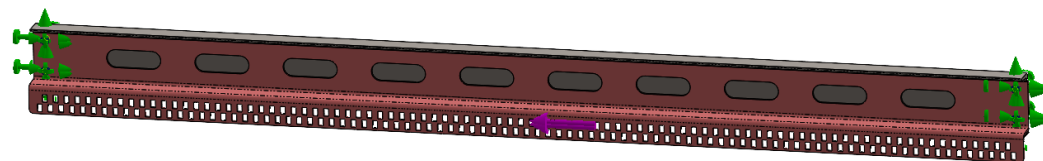
- **CAS 1 : 500 daN dans la première découpe**



- **CAS 2 : 500 daN à mi-rail dans le trou du bas**



- **CAS 3 : 500 daN à mi-rail dans le trou du haut**

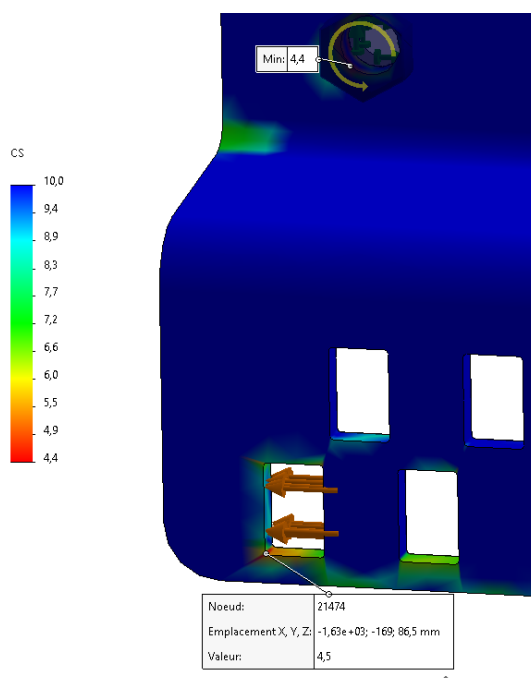


Les trois cas de charge présentent des contraintes maxi du même ordre de grandeur :

- ↳ **CAS 1** : $\sigma_{\max} = 8,2 \text{ daN/mm}^2$
- ↳ **CAS 2** : $\sigma_{\max} = 7,7 \text{ daN/mm}^2$
- ↳ **CAS 3** : $\sigma_{\max} = 7,1 \text{ daN/mm}^2$

Le cas le plus défavorable est le **CAS 1**.

Pour info, il présente un coefficient de sécurité minimal de 4,3 par rapport à la limite élastique.

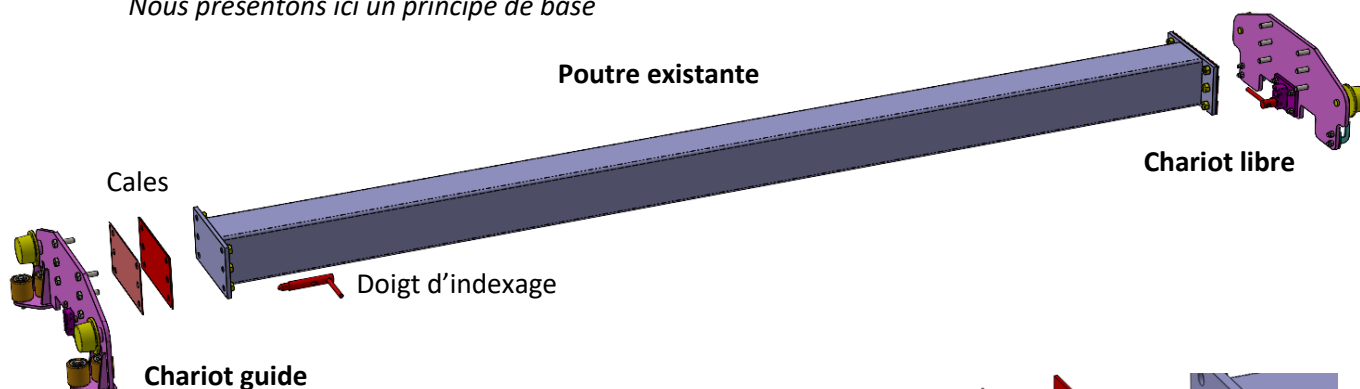


1.2.6 Principe de conception des chariots

Dans cette solution, les chariots actuels sont réformés (excepté la récupération éventuelle des galets dont les roulements à billes auront été contrôlés et remplacés si nécessaire).

La conception des nouveaux chariots suit une logique simple de plats découpés recevant les différents composants de guidage et de verrouillage en position.

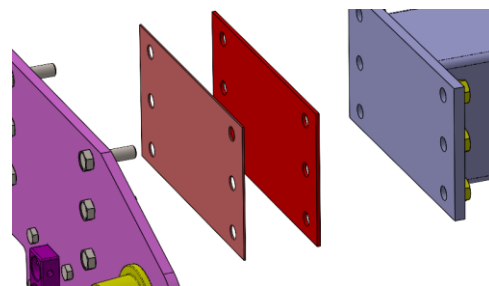
Nous présentons ici un principe de base



Poutres existantes

Pas d'intervention sur les poutres.

Il est nécessaire de prévoir un calage de l'ordre de 6 à 8 mm de part et d'autre afin d'ajuster les longueurs de poutres aux écarts moyens des rails.

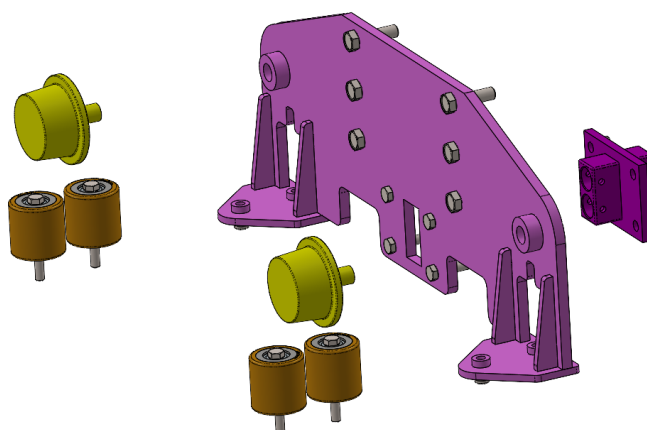
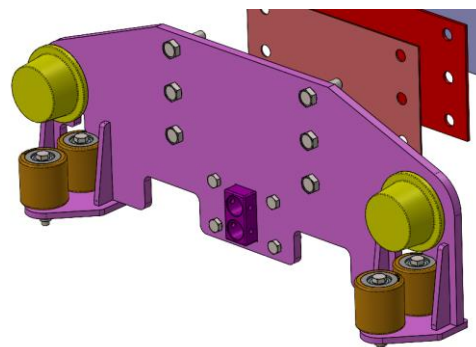


Chariot guide

Ensemble comportant :

- **un bâti en tôles** découpées soudées
- **les galets coniques** de reprise de charge
- **les galets verticaux** de guidage.
(Le plan présente des galets Ø60 et largeur 60 mm)
- **le fourreau du doigt d'indexage**

C'est une pièce usinée en acier, matérialisant un centrage long du doigt d'indexage. Elle est boulonnée sur le bâti afin de faciliter son remplacement si nécessaire



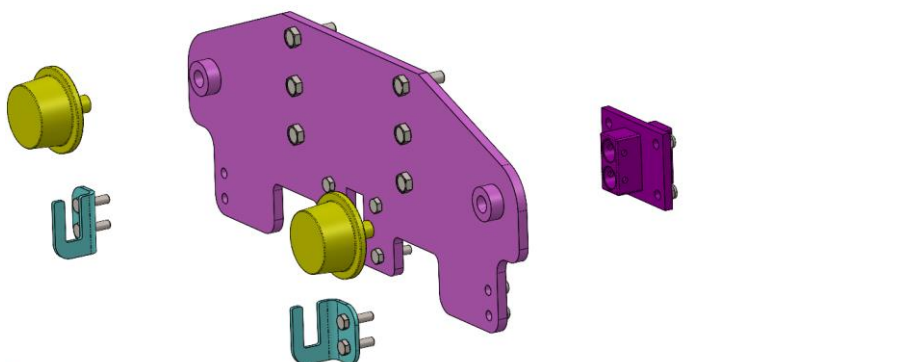
Chariot libre

Ensemble comportant :

- **un bâti en tôles** découpées laser et soudées
- **les galets coniques** de reprise de charge
- **les fourchettes anti-dégorgement**

Malgré la qualité du guidage latéral, nous préconisons de mettre en place ces éléments afin de garantir l'anti-dégorgement de la poutre et de minimiser le risque de chute. Un jeu suffisant est donné pour que la fourchette ne touche pas le plat guide dans le cas le plus défavorable.

- **le fourreau du doigt d'indexage** (idem chariot guidé)

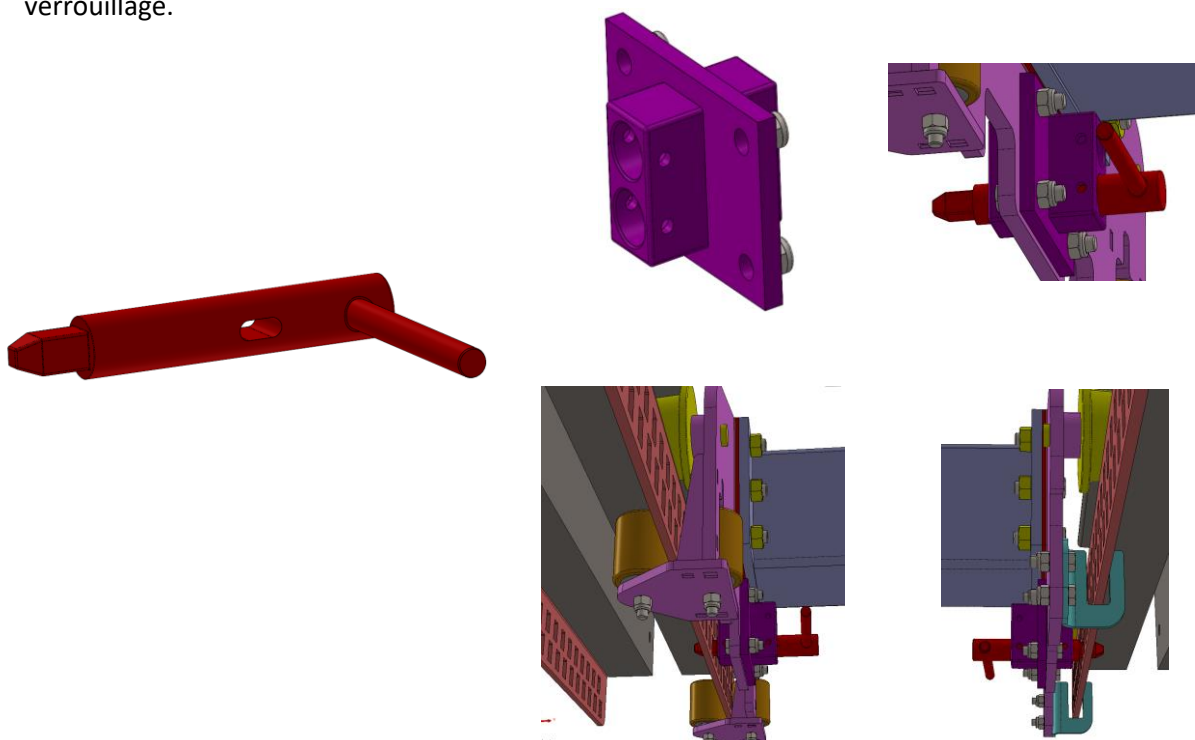


Doigt d'indexage

Le doigt d'indexage est en acier

Il est de section carrée 15x15 mm ou, comme présenté, de section ronde ($\varnothing 25$ mm) avec une extrémité usinée.

Il comporte une poignée de manutention ainsi qu'un orifice de goupillage assurant son verrouillage.

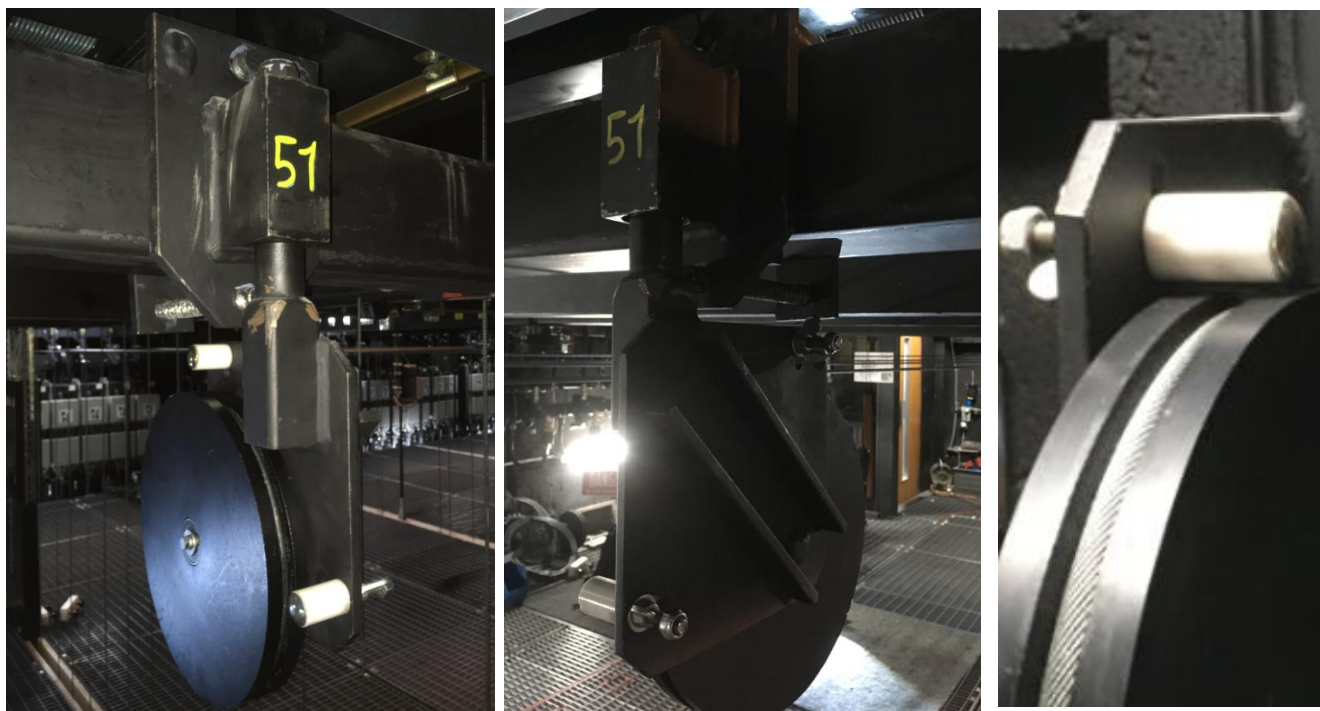


1.3 Poulies de renvoi verticales

1.3.1 Descriptif général

Les poulies de renvois verticales sont des ensembles mécanosoudés constitués d'une platine acier sur pivot à roulements et d'un réas plastique en porte à faux.

Deux ensembles vis + écrous standards ou à ailettes, équipés dans des trous oblongs, assurent le réglage des cylindres anti-dégorgement.



Un ensemble de poulies est installé à demeure en sortie de treuils. Il est complété par des poulies indépendantes, équipées suivant les besoins sur les poutres mobiles.



Notre expertise analyse le principe de montage des poulies et l'ensemble de leurs éléments mécaniques.

Rappel : chaque treuil ponctuel a une CMU de 250 kg.

1.3.2 Observation des assemblages vis/écrou

Dans le cas des assemblages Vis/Écrou, il est régulièrement recommandé un léger dépassement de la vis par rapport à l'écrou afin de s'assurer que le serrage porte bien sur la totalité des filets. Ceci limite aussi les risques de perte rapide de l'écrou en cas de léger desserrage.

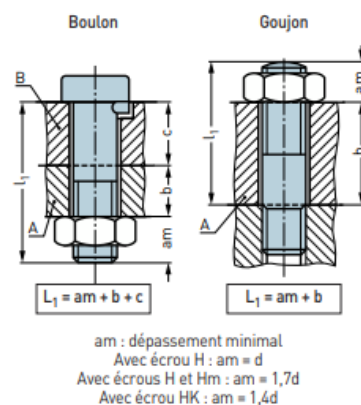
- Il est d'usage de respecter une règle de dépassement de 2 à 3 filets par rapport à un écrou hexagonal (régulièrement préconisé dans la documentation technique des fournisseurs ou par des bureaux de contrôle en France)

De notre point de vue, c'est une bonne pratique, simple et favorable à la sécurité. Elle est totalement intégrée aux 'Spécifications Techniques Générales' de l'Opéra de Paris par exemple.

Nous constatons que ce principe n'a pas été appliqué au niveau des assemblages des poulies verticales permanentes en sortie de treuil ponctuels.

Dans ce cas précis, il s'agit d'écrous freins type Nylstop. On peut raisonnablement se poser la question de la totale efficacité de la rondelle plastique en bout de vis.

Ce montage laisse une place au défaut de verrouillage, alors que le respect de la règle de dépassement le proscrit systématiquement.



Source : MAURIN FIXATION
 Mémento technique de la Fixation

Il est impossible d'améliorer cet assemblage, les tiges filetées étant soudées sur les supports.

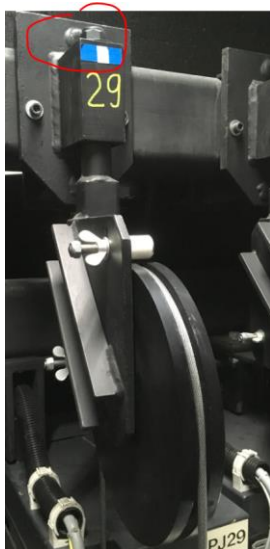
Nous ne constatons, par ailleurs, aucun phénomène de desserrage sur les quelques poulies examinées (par sondage).

Toutefois, si le perçage dans le plat crapaud est inférieur ou égal au diamètre intérieur de la rondelle, il peut être envisagé de supprimer les rondelles pour gagner en longueur de dépassement.



Le même défaut de conception des assemblages est observé au niveau des têtes d'axe pivot de poulies. L'usinage de l'axe présente un filetage de longueur inutilement limitée.

Dans ce cas, l'axe étant pivot (l'ensemble axe + écrou est rotatif par rapport au bâti), sa tenue n'est garantie que par le nylon de l'écrou. On observe que le Nylon porte à raz de la vis.



La longueur de filetage de l'axe est de 22,5 mm pour un diamètre M20.

Les reprises en usinage des composants afin de gagner en longueur de filetage ne sont pas simple à mettre en oeuvre.



Conclusion

Sans modifications de l'installation actuelle, il est nécessaire de contrôler périodiquement, à minima une fois par an, l'ensemble de ces assemblages.

1.3.3 Analyse mécanique des poulies

Les Réas

Les réas sont en plastique (probablement du POM), de \varnothing_{ext} 300 mm, d'épaisseur 40 mm, avec une gorge calibrée pour un câble acier \varnothing 8 mm.

Leur axe est de \varnothing 20 mm avec deux roulements à une rangée de billes de \varnothing_{ext} 47mm, \varnothing_{int} 20mm, et épaisseur 14 mm (*Référence 6204-2RS*)

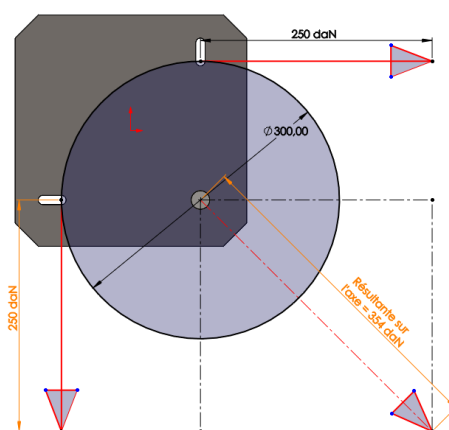
Les données de charge de ce type de roulement sont les suivantes (source SKF)

Données de calcul			
Charge dynamique de base	C	13.5	kN
Charge statique de base	C_0	6.55	kN
Limite de fatigue	P_u	0.28	kN
Vitesse limite		10000	r/min
Coefficient de calcul	k_f	0.025	
Coefficient de calcul	f_0	13	

Soit une charge dynamique de base de 1350 daN/roulement donc **2700 daN** pour un ensemble de deux roulements équipant un réa.

Les poulies renvoient les câbles des treuils ponctuels (CMU 250daN). Dans ce cas, la résultante maxi non pondérée sur l'axe est de **354 daN**

Une comparaison de cette valeur à la documentation SKF présente un coef de 7,6 par rapport à la charge dynamique de base des roulements.

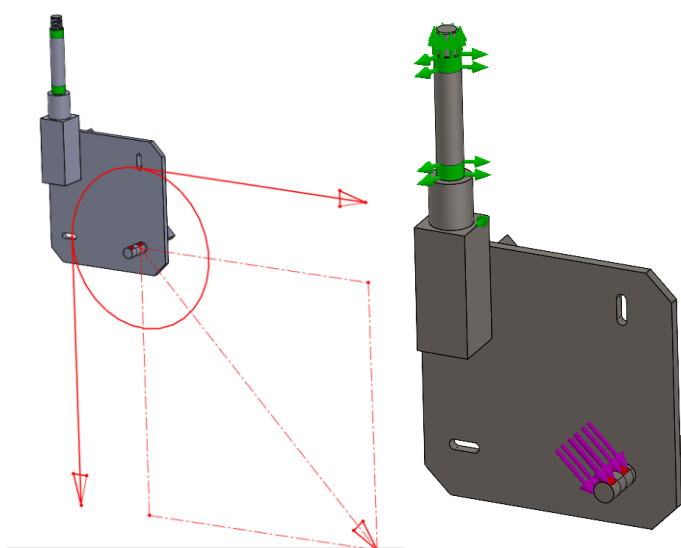


Les supports

Le support du réa est modélisé en 3D suivant le relevé effectué sur place, pour une vérification de principe aux éléments finis.

Hypothèses retenues :

- ➔ Liaison pivot au niveau des paliers + un appui plan au niveau de l'écrou
- ➔ La rotation est arrêtée en 1 point
- ➔ Ensemble soumis à une charge non pondérée de 354 daN à 45° au niveau des appuis de roulement du réa sur l'axe.



Observation :

Nous ne connaissons pas les nuances de matières utilisées pour les différents composants (platines, axes etc...). Cependant, la contrainte maxi dans le système ne dépend pas du matériau et constitue une approche.

Résultat :

Nous constatons une contrainte maxi de 173 N/mm².

Les aciers les plus fréquemment utilisés pour la construction métallique sont :

- **S235** voire le S355 pour les tôles et profilés
- **C35E (XC38) ou C45E (XC48)** pour les pièces mécaniques du type axes

Les limites élastiques de ces matériaux sont les suivantes :

- Pour le S235 : **Re=235 N/mm²**
- Pour le S355 : **Re=355 N/mm²**
- Pour le C35E (normalisé, sans traitement thermique) : **Re=270 N/mm²**
- Pour le C45E (normalisé, sans traitement thermique) : **Re=305 N/mm²**

Si l'ensemble du support était en S235, le coefficient de sécurité mini serait de 1,4 au niveau de l'axe pivot et de l'ordre de 2,2 au niveau de l'axe du réas.

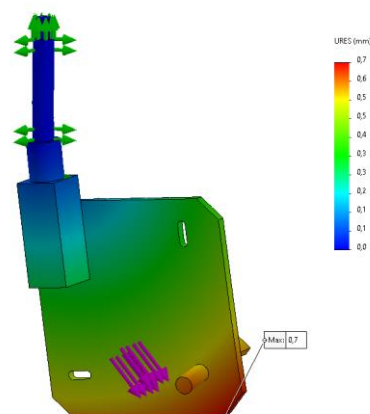
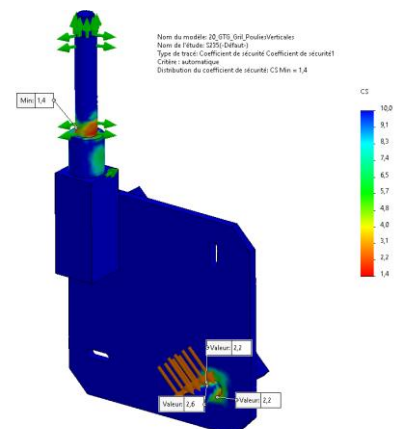
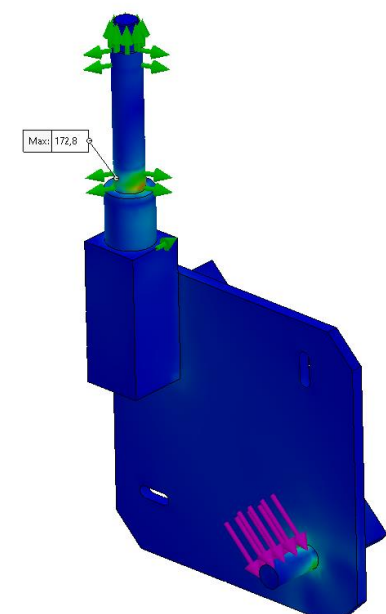
Ce coefficient est trop faible. Il est probable, et ce serait préférable, que l'axe pivot soit dans une nuance d'acier plus résistante. Comme il est soudé à la platine et que les C35E et C45E sont d'une soudabilité médiocre, nous faisons l'hypothèse d'éléments en S355.

Dans ce cas, le coefficient de sécurité minimal est de **2,1** suivant notre modèle de principe.

Par ailleurs, le déplacement maxi théorique sous charge non pondérée est de 0,7 mm.

Compte-tenu de l'encastrement de l'axe pivot, la rotation s'opère au niveau du roulement à rouleaux coniques inférieur. Or, ces roulements ne sont pas adaptés à ce type de sollicitation rotulée.

Les équipes de maintenant observent effectivement une détérioration de ces composants.



1.3.4 Conclusion

Plusieurs éléments d'analyse vont dans le sens **d'un remplacement complet** des poulies de renvoi.

Ces équipements cumulent plusieurs défauts de conception :

- ↳ **longueur limitées de filetages**
- ↳ **coefficient de sécurité par rapport à la limite élastique possiblement trop faible pour l'usage**
- ↳ **roulements à rouleaux coniques inadaptés aux efforts transmis suivant cette géométrie de support**
- ↳ **organes anti-dégorgement ne présentant pas une fiabilité suffisante pour garantir le maintien du câble dans la poulie**

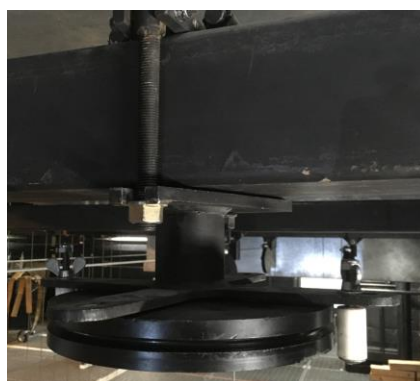
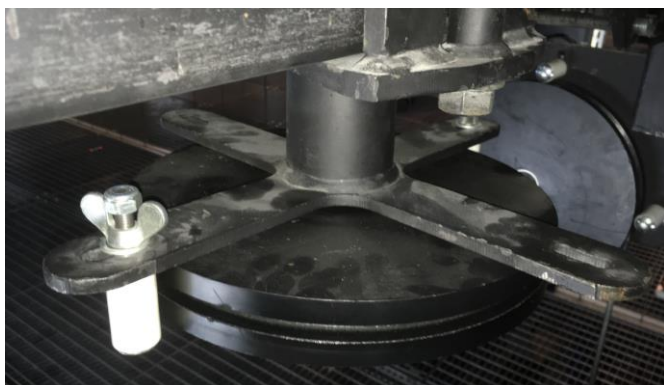
Par contre, il peut être envisagé de recycler les réas qui ne présentant pas de signe de détérioration ou d'usure.

1.4 Poulies de renvoi horizontales

1.4.1 Descriptif général

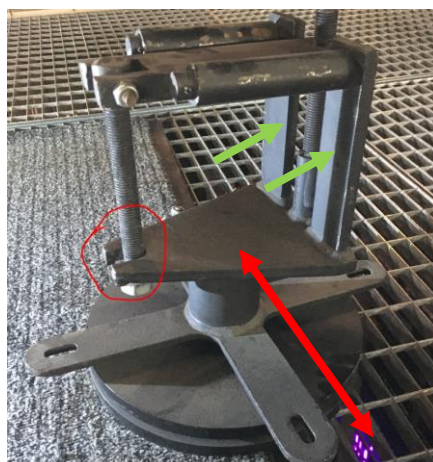
Les poulies de renvoi horizontales sont équipées des mêmes réas et systèmes anti-dégorgement que les verticales.

Elles se crapautent sur les poutres mobiles en fonction des besoins.



Notons que :

- compte tenu de la présence d'une fourchette au niveau de la tige fileté de serrage, le sens de renvoi des efforts (donc de montage de la poulie) doit toujours privilégier une mise en **appui** sur les montants verticaux. Dans le sens opposé, le crapaud risque de s'ouvrir.
Aucune indication sur le support ne mentionne à l'utilisateur cette contrainte de montage.
- Il n'y a aucun dispositif **anti-glissement** de la poulie le long de la poutre mobile en cas de défaut de serrage. Ceci impose un protocole de serrage strict.



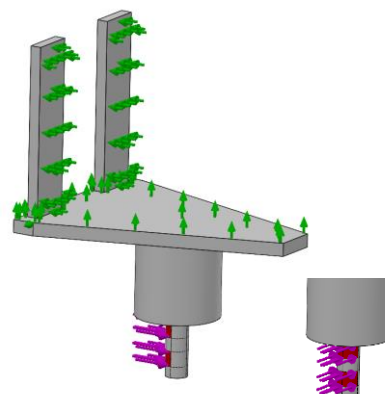
1.4.2 Analyse mécanique des poulies

Les supports

Le support du réa est modélisé en 3D suivant le relevé effectué sur place, pour une vérification aux éléments finis.

Hypothèses retenues :

- Liaison en appui plan sur la poutre
- Le glissement sur la poutre est arrêté sur un plan
- Ensemble soumis à une charge de 354 daN au niveau des appuis de roulement du réa sur l'axe. Deux cas de charge sont étudiés suivant deux directions du plan horizontal.

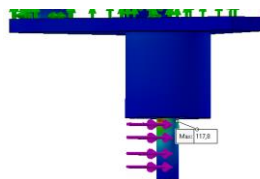
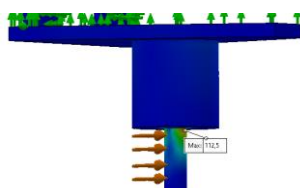


Observation :

Nous ne connaissons pas les nuances de matières utilisées pour les différents composants (platines, axes etc...). Cependant, la contrainte maxi dans le système ne dépend pas du matériau et constitue une approche.

Résultats :

Nous constatons une contrainte maxi de 113 N/mm² dans un cas et 118 N/mm² dans l'autre



Si l'ensemble du support était en S235, le coefficient de sécurité mini serait de 2 au niveau de l'axe du réa.

Les dispositifs anti-dégorgement

Le système en place est encore moins fiable s'agissant des poulies horizontales. En effet, tout défaut de serrage d'un cylindre anti-dégorgement, ou un glissement sous charge (frottement du câble) peut conduire au déplacement du dispositif et à la chute du câble. Cet incident s'est déjà produit et peut avoir des conséquences très importantes sur la sécurité.



1.4.3 Conclusion

Comme pour les poulies verticales, nous préconisons un remplacement complet de ces systèmes par une nouvelle solution correctement dimensionnée et plus fiable.

1.5 Procédures de contrôle périodique

L'ensemble des éléments des chaînes de levage doit faire l'objet d'un contrôle périodique suivant la législation en vigueur et les données fabricant.

Tout contrôle, même réalisé en interne par des personnels formés à ces opérations et habilités par l'employeur, doit suivre un protocole précis et être documenté.

2 Dorsale

2.1 Descriptif

La 'Dorsale' est un pont situé au lointain du plateau permettant la modularité de ce dernier. Elle est constituée d'une structure en poutres acier reconstituée d'une portée de 17 m.

Cette zone de plateau est souple. La flèche sous charge crée des décallages avec le plancher de scène, problématiques en exploitation.

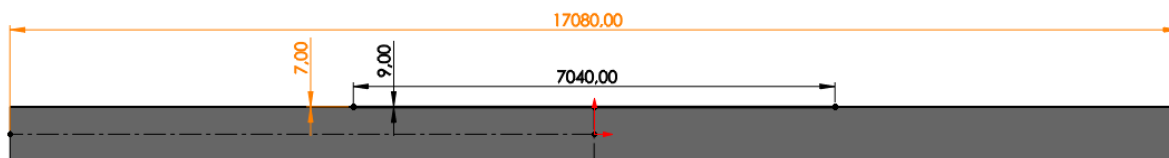
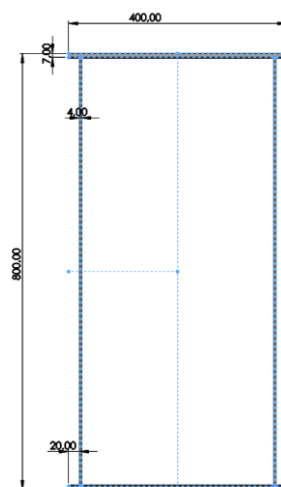
Deux poutres d'entraxe 2,40 m supportent cette zone de plancher.



Chaque poutre est un profilé rectangulaire reconstitué de section 400x800 mm.

Les peaux verticales sont en tôles acier de 4 ou 5 mm d'épaisseur.

Les peaux horizontales sont en tôle acier de 9 mm sur un tronçon central de 7,04 m et 7 mm de part et d'autre (suivant relevé sur place)



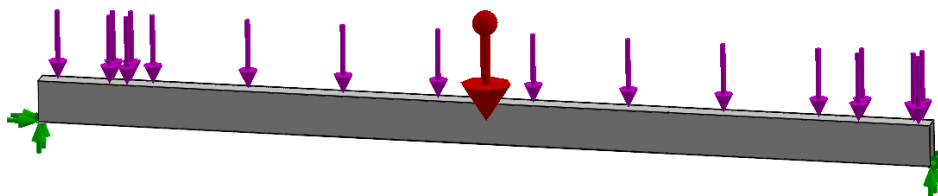
2.2 Analyse de comportement

L'objectif de cette approche, très simplifiée, (elle ne prend pas en compte toutes les caractéristiques de l'ouvrage) est de se donner des ordres de grandeur de contrainte maxi et de déformée sous charge afin d'illustrer le comportement d'une poutre de la Dorsale.

Cette dernière est assimilée à un tube sur deux appuis isostatiques, soumis à son poids propre + le poids propre du plateau + charge d'exploitation normale du plateau, soit 500 daN/m².

2.2.1 Hypothèses

- Poutre modélisée suivant sa géométrie relevée
- Matériau assimilé à de l'acier S235
- Entraxe des poutres : 2,40 m
- Surface de plancher supporté : 2,5 m x 17 m soit 42,5 m²
- Poids propre du plancher et de sa structure porteuse (estimation) : 50 daN/m²
- Charge d'exploitation max. plateau définie à : 500 kg/m²
- Poutre en appuis isostatique à ses extrémités



Données de chargement :

- ➔ Poids propre théorique de la poutre : 1700 daN x 1,1 (marge d'erreur) = **1870 daN**
- ➔ Poids propre, plancher et solives, reporté sur une poutre : $50 \times 42,5 / 2 = 1062.5 \text{ daN}$
- ➔ Charge d'exploitation plateau : $500 \times 42,5 / 2 = 10625 \text{ daN}$

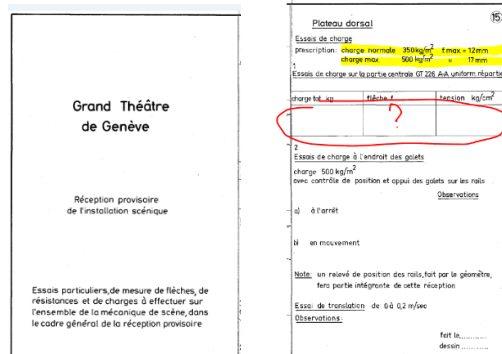
Observation :

Les éléments d'archive font notamment état de documents de soumission de 1963.

Ces derniers indiquent les hypothèses de chargement et données théoriques suivantes :

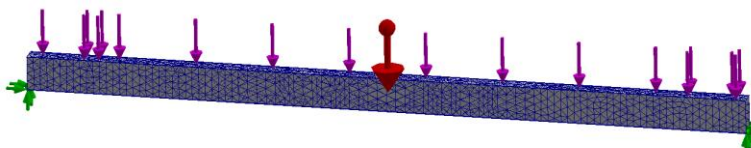
- Charge normale 350 kg/m² (soit 14.875 t par travée) – flèche maxi admissible 12 mm
- Charge normale 500 kg/m² (soit 14.875 t par travée) – flèche maxi admissible 17 mm

Le rapport d'essais en charge du plateau, établi à l'époque, ne présente pas de résultat concernant la Dorsale.



2.2.2 Maillage

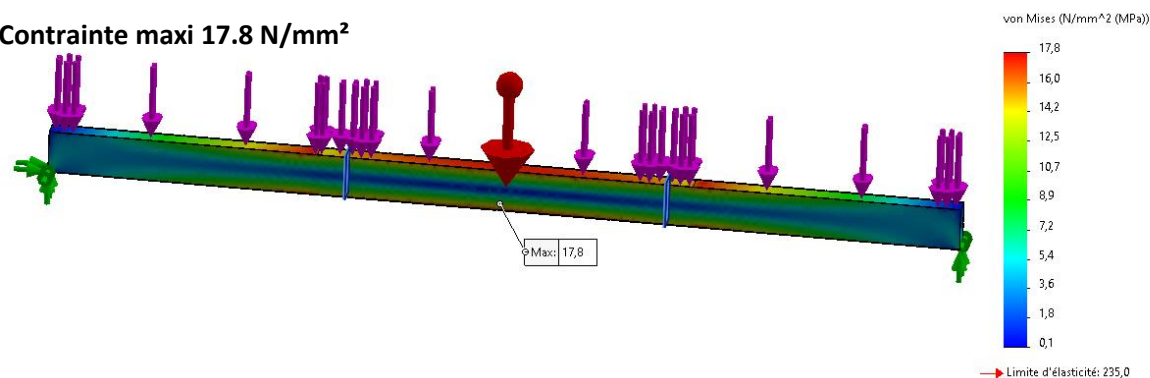
La poutre est maillée en volumique aux éléments finis



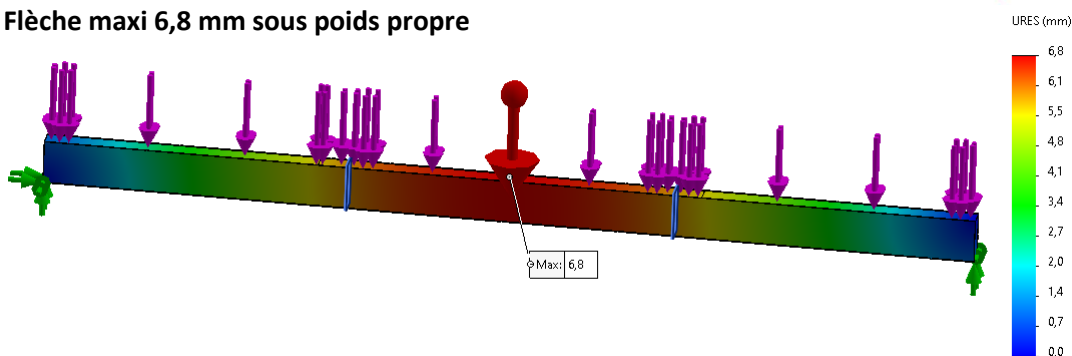
2.2.3 Résultats

CAS 1 : Calcul sous poids propre (poutre, solives et plancher)

Contrainte maxi 17,8 N/mm²

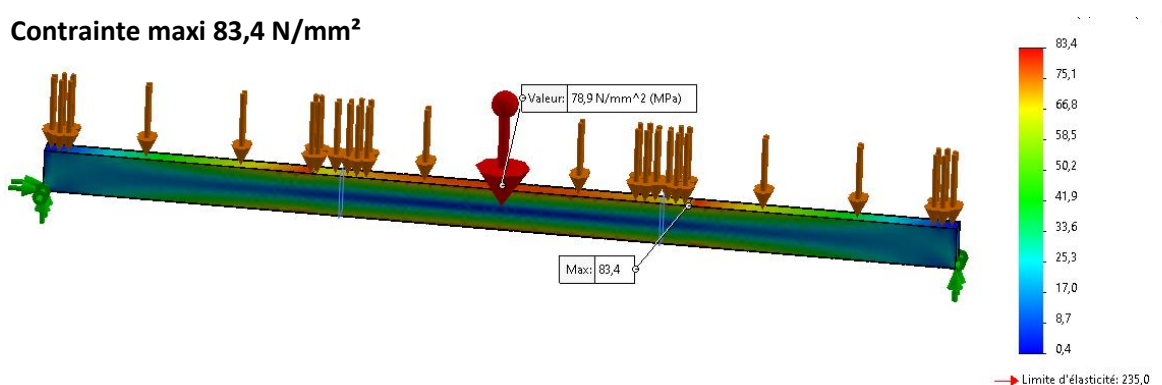


Flèche maxi 6,8 mm sous poids propre



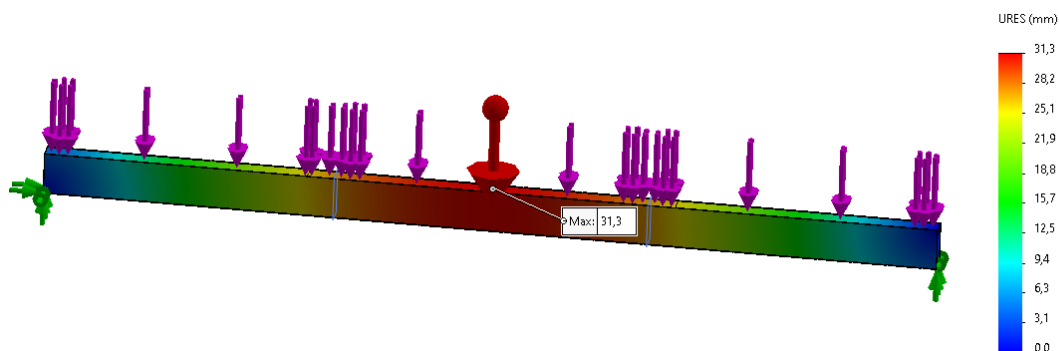
CAS 2 : Calcul sous poids propre estimé (poutre, solives et plancher) + Charge d'exploitation

Contrainte maxi 83,4 N/mm²



Flèche maxi 31,3 mm

Soit 1/540^{ème} de la portée ce qui est correct d'un point de vue mécanique, si on ne tient pas compte du défaut de planéité par rapport à un plancher environnant (une flèche < 1/400^{ème} des portées témoigne d'une bonne rigidité d'une poutre).



2.3 Conclusion

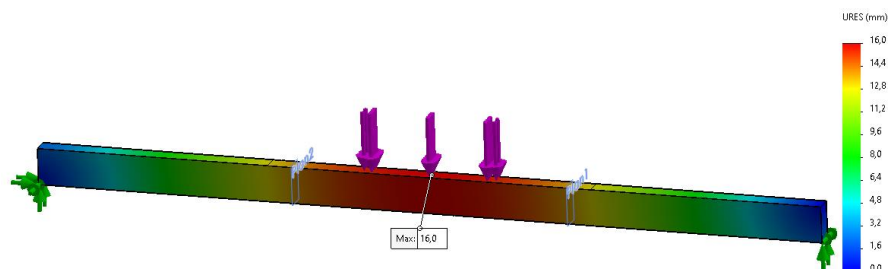
Cette approche, certes très simplifiée, montre que la grandeur dimensionnante et à prendre en compte est la **rigidité (flèche)** et non la solidité. Les poutres de la Dorsale, telles quelles sont conçues, répondent certainement aux critères de la norme mais ne peuvent pas satisfaire l'usage.

En effet, la déformée est à l'origine d'un désaffleurement au niveau du plancher de scène, totalement rédhibitoire, voire dangereux en exploitation.

Même sous poids propre, la flèche théorique naturelle de la poutre calculée, de l'ordre de 7 mm, est un problème. Elle a probablement été compensée à l'origine par une contre-flèche pour affleurer le plancher. Mais tout chargement sur la dorsale est, inévitablement, à l'origine d'une déformation non négligeable.

Prenons, par exemple, le cas d'un décor de 5 tonnes de 6 m de long à stocker sur le plancher de la Dorsale, soit 2,5 tonnes par poutre en charge répartie sur 6 m.

*On obtient une flèche relative (flèche calculée - la flèche sous poids propre) de **8,7 mm...***



Afin de compenser ce phénomène, le personnel du théâtre a connaissance de la présence de câbles de précontrainte à l'intérieur des poutres au niveau de la peau inférieure (tendue). Lors de notre visite, nous n'avons pas pu confirmer la présence de ce dispositif, mais il est tout à fait possible qu'il ait été mis en place. La mise en compression de la poutre peut permettre de limiter la flèche comme nous l'illustrons page suivante.

Mais ce principe ne permet pas de stabiliser la géométrie de la poutre. En effet, une forte précontrainte pour compenser la flèche sous charge induit forcément une contre flèche tout aussi problématique à vide.

Pour répondre aux contraintes d'exploitation, Il faut réaliser une poutre hyper rigide. Nous pensons que le dispositif actuel, trop ancien et inadapté mécaniquement, ne peut pas satisfaire le besoin.

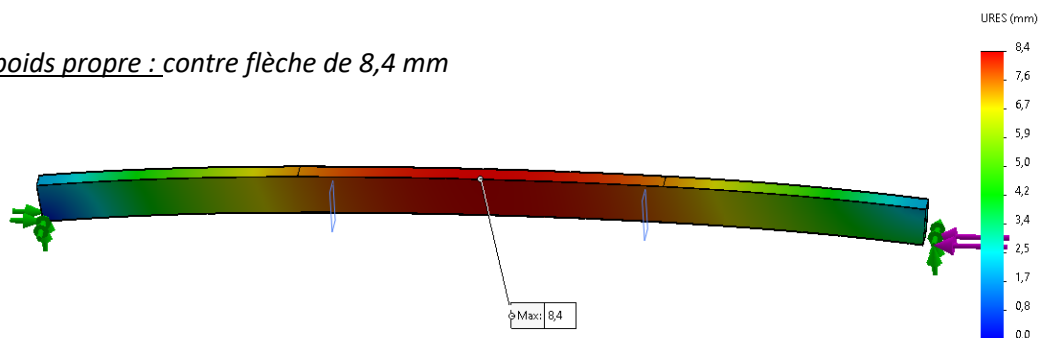
Il est nécessaire de mener une étude approfondie afin de concevoir une nouvelle structure, probablement sous la forme de poutres treillis, afin de répondre aux contraintes d'exploitation du plateau.

Illustration d'un système avec câbles de précontrainte

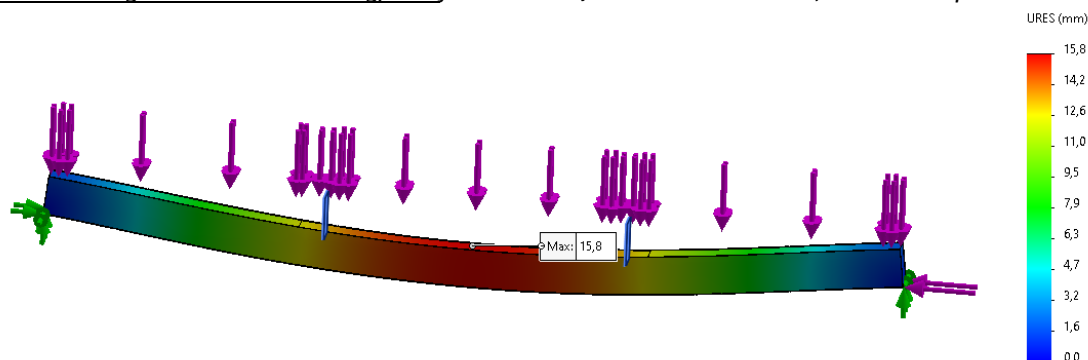
Une simulation simplifiée, en comprimant la peau inférieure de la poutre, donne les résultats suivants :

Compression de **30 tonnes** dans la poutre dans le plan de la peau inférieure.

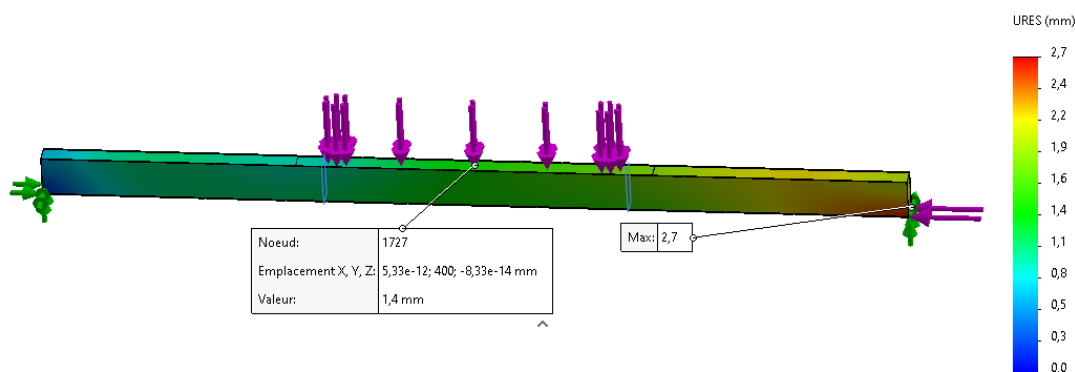
Sous poids propre : contre flèche de 8,4 mm



Sous une charge extrême de 500 kg/m²: flèche de 15,8 mm au lieu de 37,1 sans compression



Sous la charge du décor de 2,5 tonnes sur 6 m : flèche de 1,4 mm au lieu de 16 sans compression



Ce sont des résultats intéressants, mais il n'est pas anodin de comprimer fortement la Dorsale, ni simple de trouver un compromis de précontrainte satisfaisant pour ne pas mettre en œuvre de système complexe qui s'ajusterait en fonction de la charge pour compenser la flèche...

3 Porteuse d'avant-scène

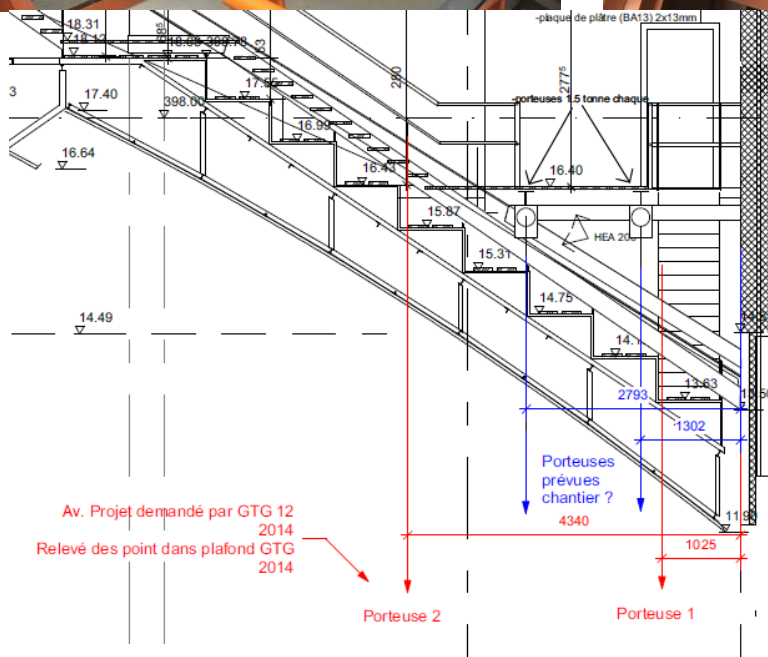
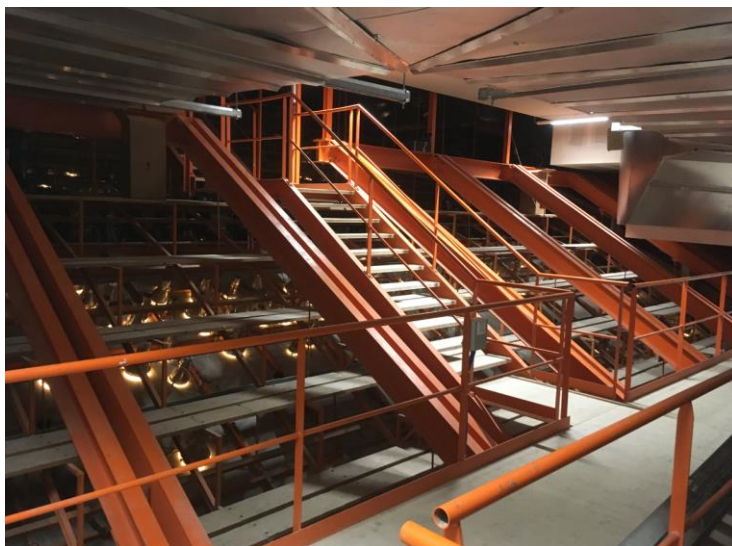
3.1 Rappel du contexte

Les demandes récurrentes d'équipements à l'avant-scène coté salle, notamment pour les concerts, nécessitent des accroches fréquentes au-dessus de la fosse d'orchestre.

L'enjeu est de parvenir à l'implantation de deux porteuses motorisées démontables dans le plafond de salle, dans cette zone.

Des investigations à ce sujet ont déjà été menées par les équipes du Grand Théâtre depuis 2017. Cf. Doc PDF *GTG_Gril Av Scène_Av Projet 2019*, plans DWG et courriel de synthèse d'A.Forissier destiné à Mme Feiss daté du 2 avril 2019.

- La CMU des porteuses demandée est de 1 tonne répartie sur 3 points traversant le plafond.
- Les traversées sont imposées par l'architecture du lieu
- La capacité de surcharge de la charpente (neuve dans cette zone) n'est pas connue du théâtre



3.2 Analyse de la structure

D'un point de vue de la faisabilité, rien ne semble s'opposer à l'intégration de ces équipements dans la zone :

- la charpente est neuve
- à priori, deux porteuses 1,5t (à des aplombs un peu différents que ceux souhaités) étaient prévues à l'origine
- la charpente comprend de larges passerelles et 'planchers' accessibles pour la maintenance des éclairages. Ces surfaces, très peu sollicitées, ont été probablement prises en compte dans le dimensionnement de la charpente via une charge surfacique.

Nous ne disposons pas de la note de calcul détaillée de cette structure métallique, mais il est possible qu'il y ait des réserves de chargement disponibles et suffisantes pour absorber les efforts dus à l'ajout de ces deux porteuses.

3.3 Solutions techniques pour les porteuses

Comme cela est souligné dans les documents de pré-étude du GTG, la mise en œuvre de la machinerie des porteuses n'est pas une difficulté en soit.

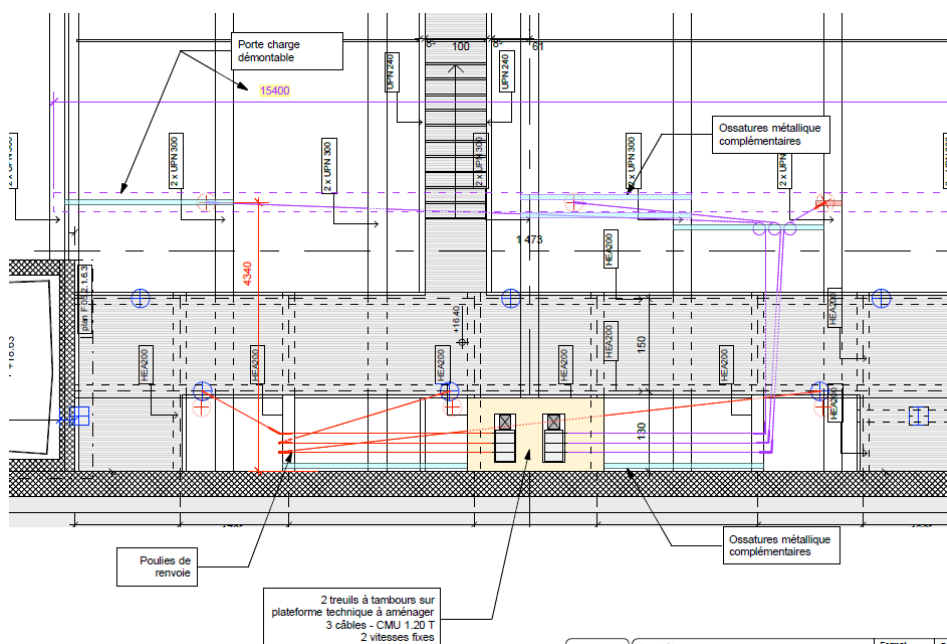
Il existe de nombreuses solutions et autant d'entreprises spécialisées dans ce type d'ouvrage pour y répondre.

3 pistes techniques sont envisageables :

- **Implantation de moteurs contre le mur et l'équipement des suspentes de porteuses par renvoi de poulies**

Solution technique proposée dans le plan DWG de pré-étude réalisé par les équipes du GTG.

Ce principe est très classique. Il induit néanmoins des circulations de charges horizontales dans la charpente, via les renvois de poulies. Ces charges nécessiteront une justification au niveau de la charpente, ou l'ajout de structures complémentaires de compression permettant d'équilibrer les efforts horizontaux.



- **Mise en place d'un châssis support à l'aplomb de chaque porteuse avec 1 moteur unique + des renvois de poulies intégré.**

- ↳ L'ensemble peut être préparé et testé en atelier puis installé sur place.
- ↳ L'aplomb de chaque fil porteur est totalement libre
- ↳ Les efforts horizontaux sont absorbés dans le châssis qui, posé sur la charpente peut aussi avoir un effet de répartition de charges.
- ↳ Système simple à concevoir, réaliser et poser

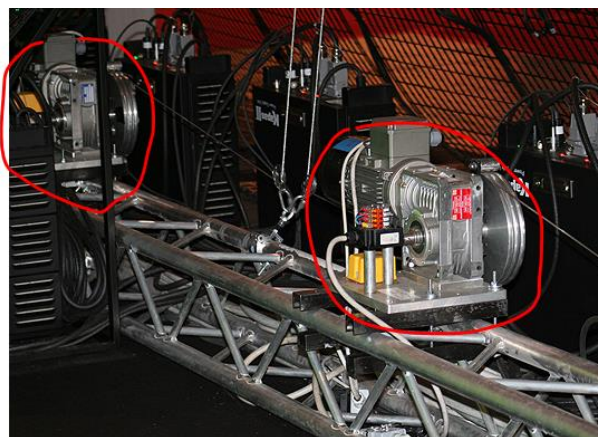


Source photo : site internet atelier 2.44

- **Mise en place d'un châssis support avec 1 treuil à l'aplomb de chaque suspente**

- ↳ L'ensemble peut être préparé et testé en atelier puis installé sur place.
- ↳ L'aplomb de chaque fil porteur est totalement libre
- ↳ Il n'y a pas d'efforts horizontaux, uniquement des charges verticales
- ↳ On peut imaginer d'utiliser les treuils indépendamment les uns des autres, comme des ponctuels

Ce système nécessite une bonne synchronisation des treuils. Ce qui n'est pas compliqué à mettre en œuvre.



Source photo : site internet Peroni

3.4 Conclusion

Nous préconisons la réalisation de ce projet en deux étapes :

1. L'analyse de la note de calcul de la charpente afin de justifier de la faisabilité du projet sur la base des données existantes, ou au contraire de la nécessité de refaire une passe de calcul. Ce travail doit être effectué préalablement à toute recherche de solution technique pour réaliser la porteuse. L'entreprise ayant réalisé l'ouvrage à l'ensemble des données.
2. Une fois le principe de surcharge de la charpente acquis, envoi d'un cahier des charges de consultation aux entreprises fournisseurs de ce type d'équipements.