

**CONCOURS ATS  
-SESSION 2017-**

**ÉPREUVE DE  
SCIENCES  
INDUSTRIELLES**

**CALCULATRICE AUTORISÉE**

**CODE ÉPREUVE : 959**

**DURÉE DE L'ÉPREUVE : 5H**

Le sujet comporte les documents suivants :

- le texte du sujet qui comprend 21 pages numérotées de 1/21 à 21/21,
- quatre annexes sur 5 pages,
- deux documents réponses numérotés document-réponse 1 à 2 sur trois pages qui seront à joindre à la copie.

Les calculatrices sont autorisées.

Calculatrice électronique de poche – y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout matériel électronique sont interdits.

Toute documentation autre que celle fournie est interdite.

### Recommandations générales

L'épreuve se compose de parties indépendantes. Dans chaque partie, certaines sous-parties sont elles-mêmes indépendantes. Les candidats sont donc invités, d'une part, à lire attentivement l'énoncé avant de commencer à composer et d'autre part, à bien répartir leur temps de composition entre les différentes parties. Pour chaque partie, il est demandé aux candidats de rédiger dans l'ordre proposé par le sujet.

Il est rappelé aux candidats qu'ils doivent impérativement utiliser les notations indiquées dans le texte ou sur les figures, et qu'ils doivent présenter les calculs clairement, dégager et encadrer les résultats relatifs à chaque question référencée dans le sujet. Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. Les candidats traceront tous les schémas ou chronogrammes qui leur permettront d'étayer leurs raisonnements.

# Système Spiralift pour salles modulables

## Présentation générale

### *Salles modulables*

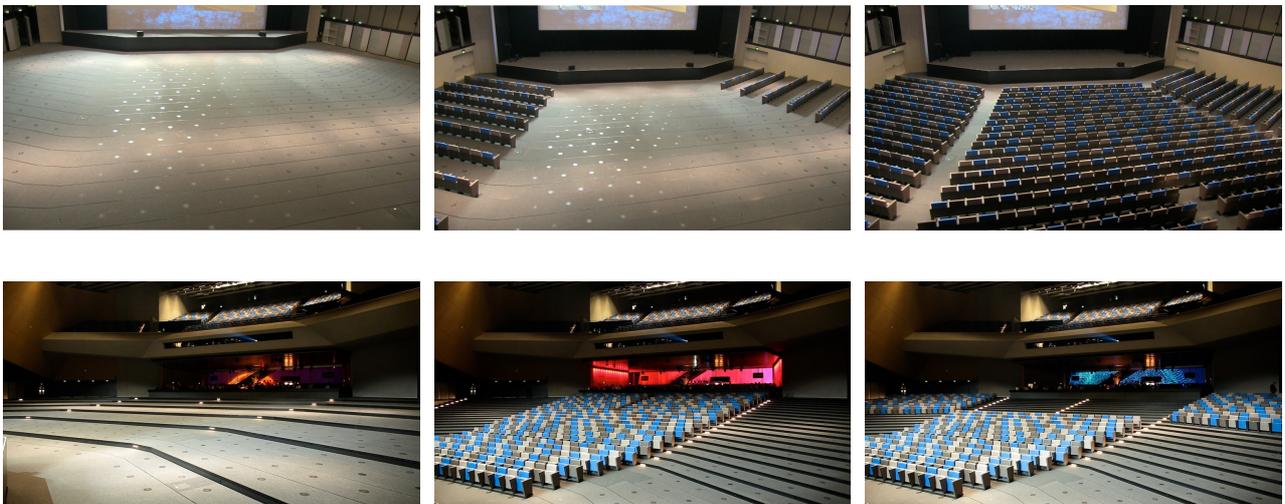
De nos jours, les organisateurs d'événements sont attachés à des prestations dont la qualité correspond au meilleur de ce que l'ingénierie peut offrir. Toutefois, les solutions architecturales et technologiques adaptées peuvent varier selon le type et l'ampleur de la manifestation : un concert de musique classique, un spectacle de danse, une conférence, un gala, ou un concert de musique amplifiée n'ont pas du tout les mêmes contraintes de sonorisation, d'acoustique, de disposition de sièges, ou même de nombre de spectateurs assis...

Finalement, le seul point commun entre toutes ces activités est la nature très lourde des investissements nécessaires à la création de lieux adaptés.

Un autre constat s'impose aux responsables des collectivités territoriales : la fréquence de chaque type de manifestation justifie difficilement l'investissement nécessaire à l'édification d'une salle dédiée.

La solution la plus en vogue actuellement repose sur le principe de modularité : créer des **salles modulables**.

Les photos de la figure 1 montrent quelques exemples de configurations possibles au Swisstech Convention Center de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.



*Figure 1 : exemples de configurations*

Pour remplir pleinement son rôle, le système de transformation d'une telle salle se doit d'être flexible, simple d'utilisation et nécessiter peu d'intervention humaine. L'objectif est de transformer une salle en quelques heures afin de permettre la succession d'un maximum de manifestations dans un temps donné : un taux d'occupation élevé permet un amortissement rapide des investissements très lourds évoqués précédemment.

Une solution très prisée repose sur l'utilisation de plates-formes mobiles permettant de modifier la

hauteur de sièges. Sur ces plates-formes, les rangées de sièges sont pivotantes. Le tout est motorisé et contrôlable par automate.

La figure 2 montre l'exemple d'une salle dans une configuration de type « banquet » (le sol est horizontal pour recevoir des tables de dîner) et une configuration de type « théâtre » où les sièges sont en gradins.

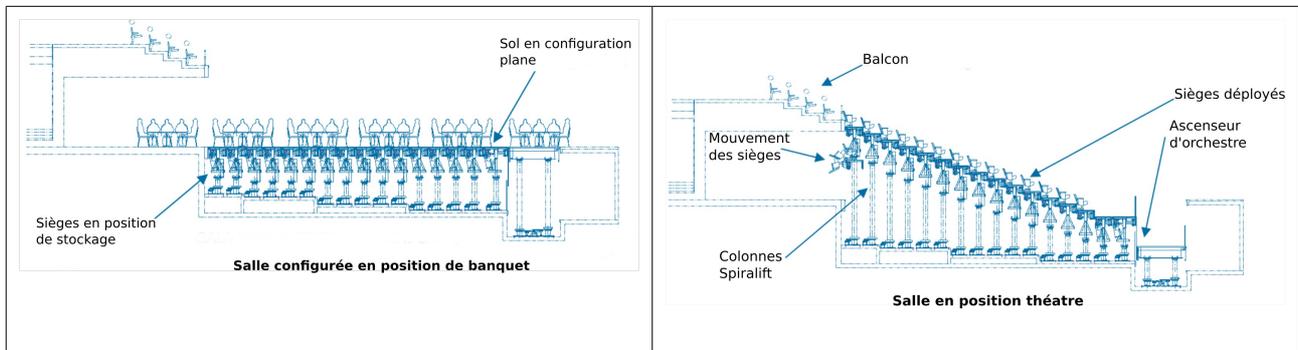


Figure 2 : représentation des configurations "banquet" et "théâtre"

La solution présentée ici et étudiée dans ce sujet repose sur l'utilisation des colonnes Spiralift de l'entreprise GALA SYSTEMES.

La figure 3 montre une coupe transversale de deux rangées de sièges : les sièges de la rangée la plus haute sont déployés alors que ceux de l'autre rangée sont en position de stockage.

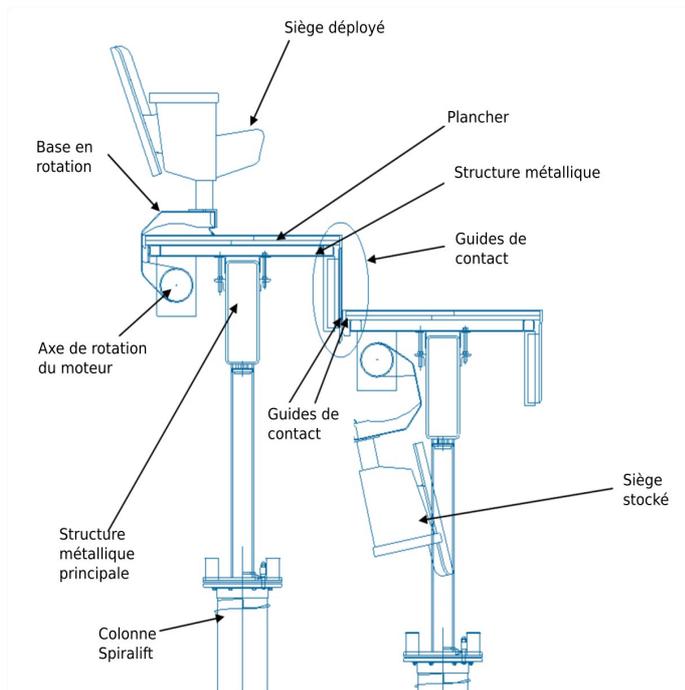


Figure 3 : système de stockage des sièges

Le déploiement des sièges se fait par rangée : l'ensemble des sièges d'une rangée est monté sur une base mobile en rotation par rapport à la structure métallique principale de cette rangée. Un arbre, encasté avec cette base mobile, en liaison pivot par rapport à la structure métallique principale est actionné par des moteurs asynchrones.

Le mouvement vertical de l'ensemble {structure métallique principale + Plancher + Rangée de sièges} est obtenu grâce à des colonnes Spiralift décrites plus loin dans le sujet.

Cette solution permet d'obtenir une configuration de salle très flexible et évolutive car on peut obtenir des hauteurs de plancher quelconques, avec ou sans rangée de sièges.

Les sièges étant montés rigidement sur la base mobile en rotation, le type de siège choisi pour la salle n'est presque pas restreint par la solution technique de déploiement. Hormis quelques contraintes d'encombrement et de poids, le décorateur peut choisir le type de siège qu'il souhaite, comme il le ferait dans une salle non-modulable.

## Motorisation des Spiralifts

Dans la plupart des applications, les Spiralifts sont actionnés par des ensembles de moteur-freins, d'arbres de transmission et de réducteurs. Pour l'application considérée dans ce sujet, le schéma typique de la motorisation des Spiralifts est représenté par la figure 4.

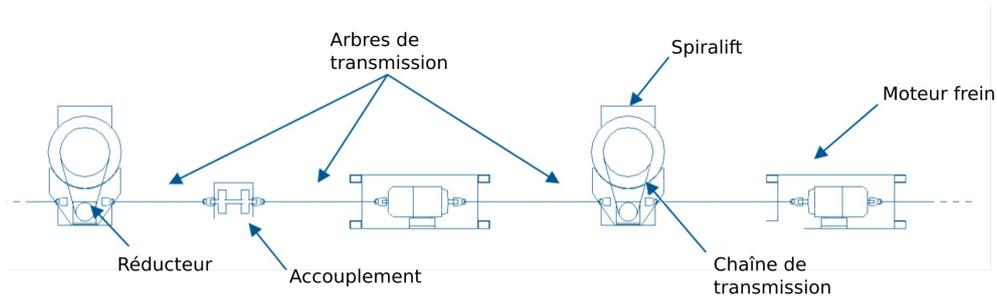


Figure 4 : structure typique d'entraînement

Pour des raisons de sécurité, comme c'est le cas de cette solution possédant deux moteurs-freins, les salles modulables sont équipées de systèmes placés en redondance (actionneurs, capteurs, éléments de transmission) pour pallier les éventuels dysfonctionnements.

Les caractéristiques de la chaîne d'action pilotant l'allée 26B (présentée en annexe 1) du Swisstech Convention Center sont données sur le diagramme de blocs internes représenté figure 5.

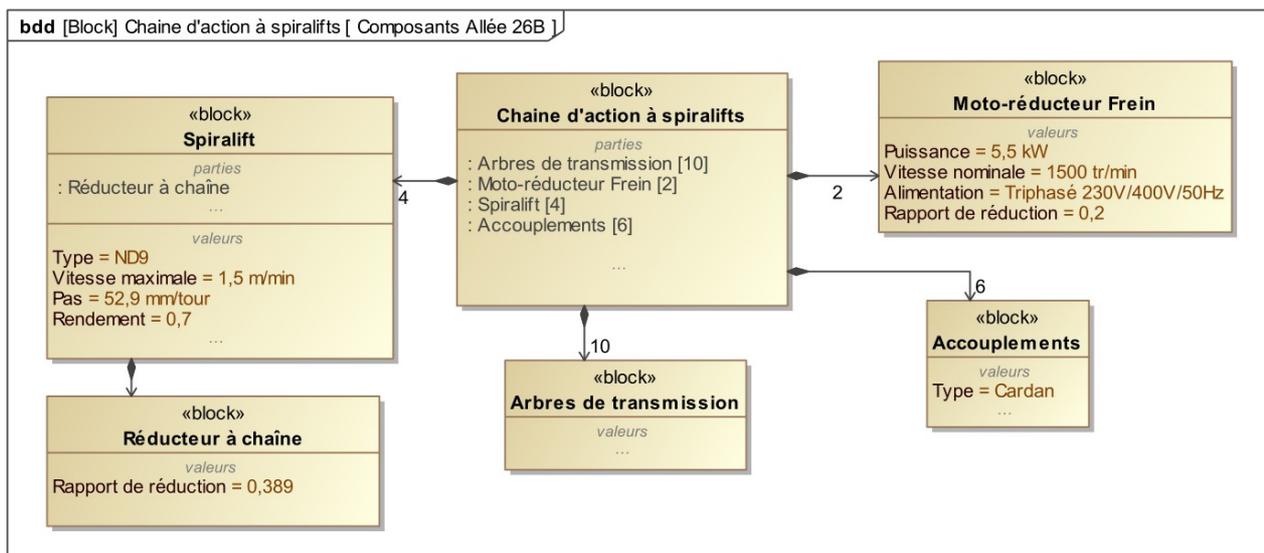


Figure 5 : diagramme de blocs internes de la chaîne d'action à Spiralifts

Les diagrammes SysML relatifs à l'installation d'une salle sont présentés sur les pages suivantes.

Le diagramme d'exigence partiel de la figure 6 présente les contraintes imposées lors de la conception de la salle.

Le diagramme de la figure 7 présente le détail des exigences liées à l'exigence Id= « 13.1.2.3 » « plates-formes mobiles ».

Le diagramme de la figure 8 présente les exigences relatives à l'asservissement de position de l'ascenseur d'orchestre.

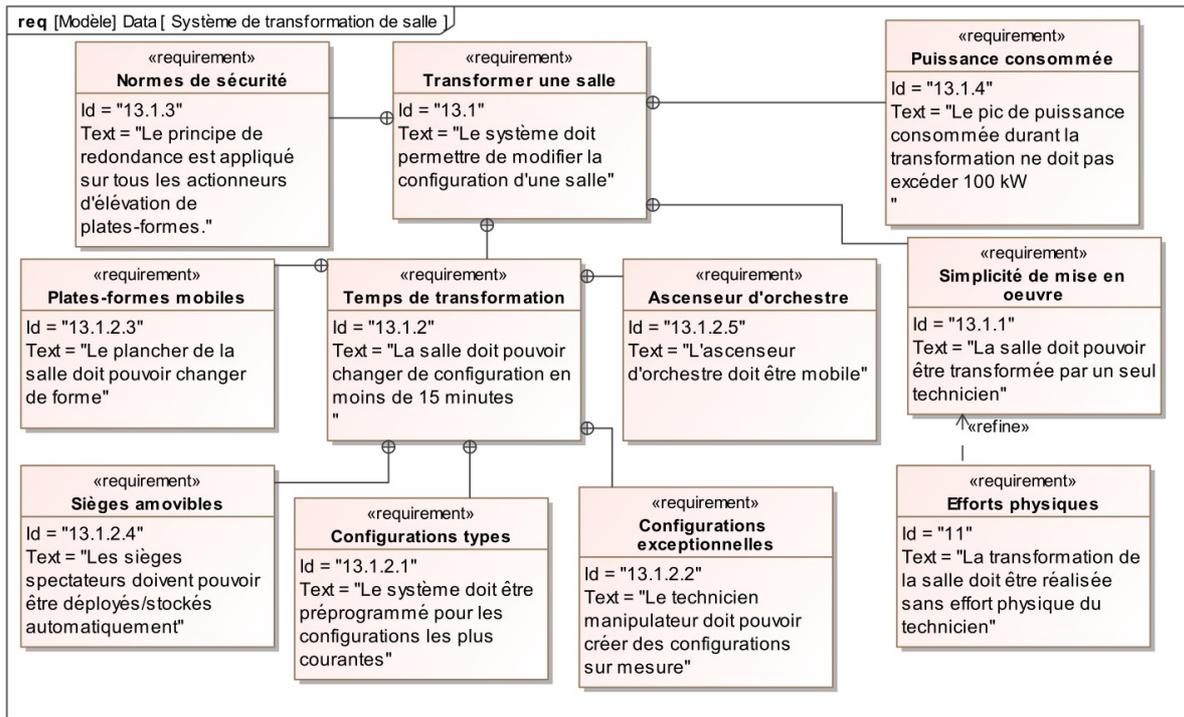


Figure 6 : diagramme d'exigences de la transformation de la salle

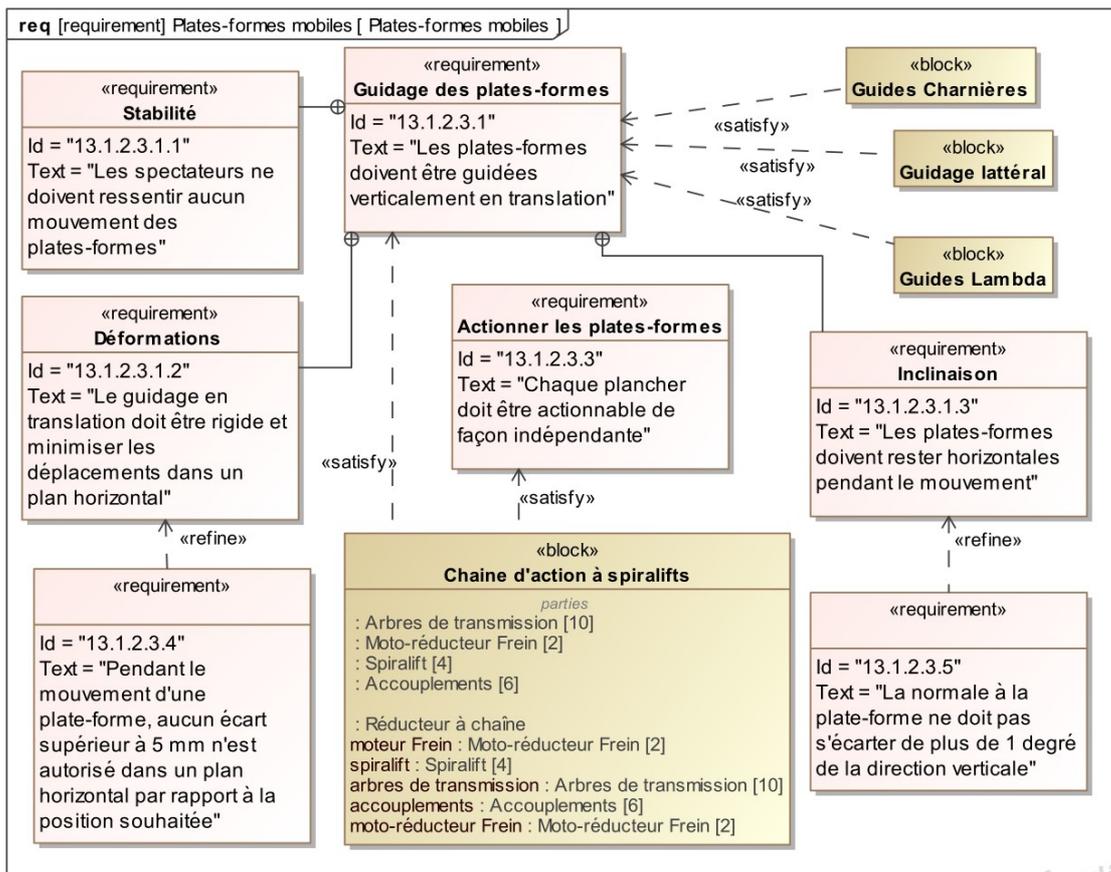


Figure 7 : diagramme d'exigences du guidage des plates-formes

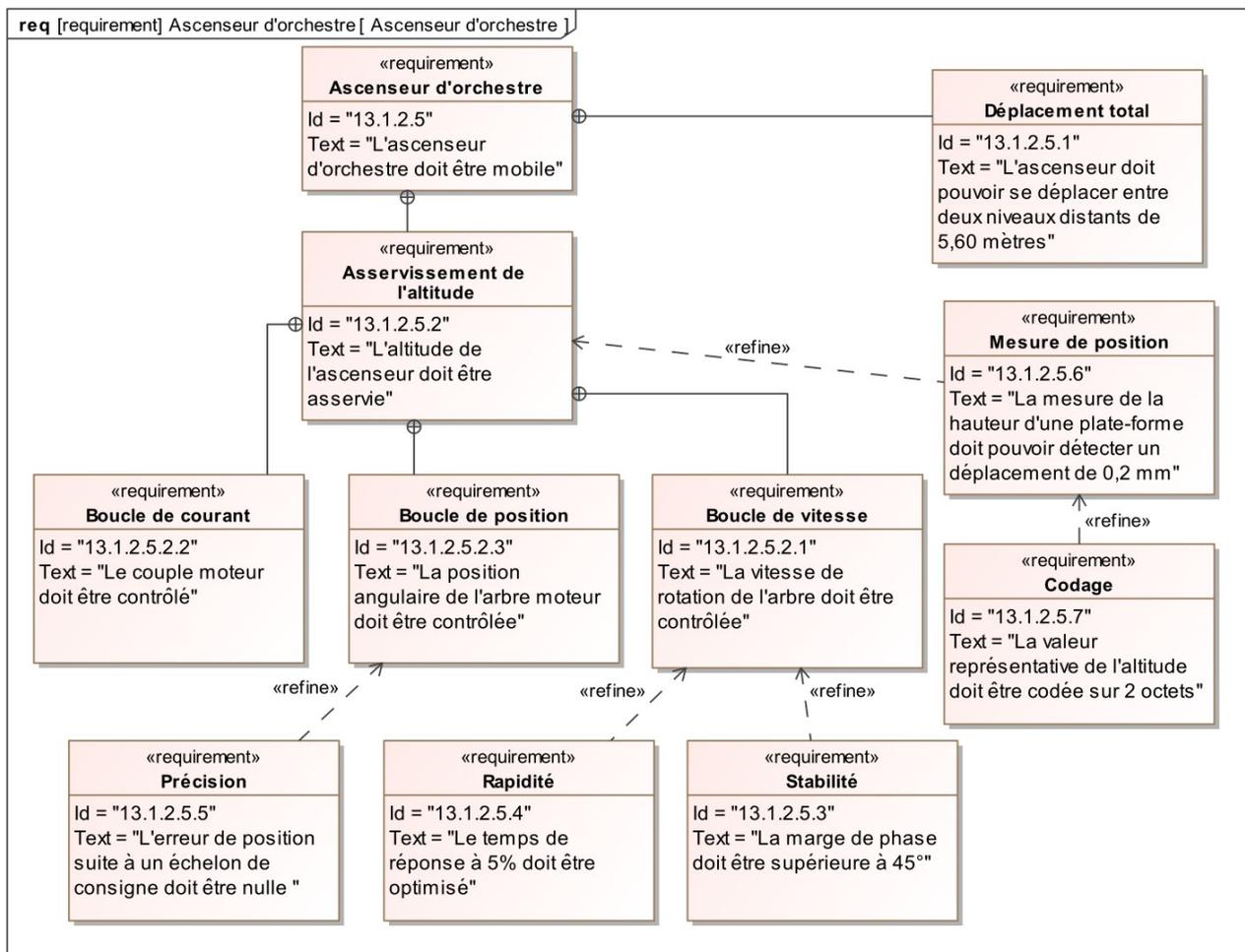


Figure 8 : diagramme d'exigences du réglage de l'altitude de l'ascenseur d'orchestre

## Objectifs

Soucieuse de faire progresser ses solutions, une entreprise ayant l'habitude de proposer des salles sur la base de Spiralifts envisage quelques modifications à ses technologies habituelles. Afin de préparer ses prochaines études, elle décide de prendre comme base de réflexion la salle existante du *Swisstech Convention Center de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*.

Cette étude est décomposée en six parties indépendantes :

- dans la partie 1, on vérifiera les exigences relatives au guidage de la plate-forme d'une rangée auto-guidée ;
- dans la partie 2, on choisira la motorisation permettant le retournement d'une rangée de sièges ;
- dans la partie 3, on validera le choix du Spiralift (modèle et quantité) pour actionner une plate-forme ;
- dans la partie 4, on réglera l'asservissement de la position de l'ascenseur d'orchestre ;
- dans la partie 5, on proposera une stratégie d'optimisation du temps de transformation d'une salle, ce temps de transformation étant un critère important pour les exploitants de la salle ;
- dans la partie 6, on réalisera un bilan global de l'étude.

## Partie 1 – Solution technique pour assurer l'exigence de stabilité des planchers mobiles

L'objectif de cette partie est de vérifier que les solutions de guidage retenues pour les plates-formes mobiles permettent de garantir l'exigence de stabilité et de sécurité mentionnée dans le diagramme d'exigence « plates-formes mobiles ».

Il existe principalement deux solutions de guidage des plates-formes mobiles :

- **guidage mural** : lorsque les plates-formes sont en contact avec un mur de la salle, il est possible de monter des rails de guidage dans les murs. On utilise alors des solutions classiques de guidages linéaires à billes ;
- **plate-forme auto-guidée** : lorsque les plates-formes sont au centre de la pièce, ou bien que la solution de guidage mural est exclue (pour des considérations esthétiques par exemple), le guidage peut être réalisé en utilisant des guides « charnière » et « lambda ».

La figure 9 montre schématiquement l'agencement typique des différents composants assurant le guidage d'une plate-forme.

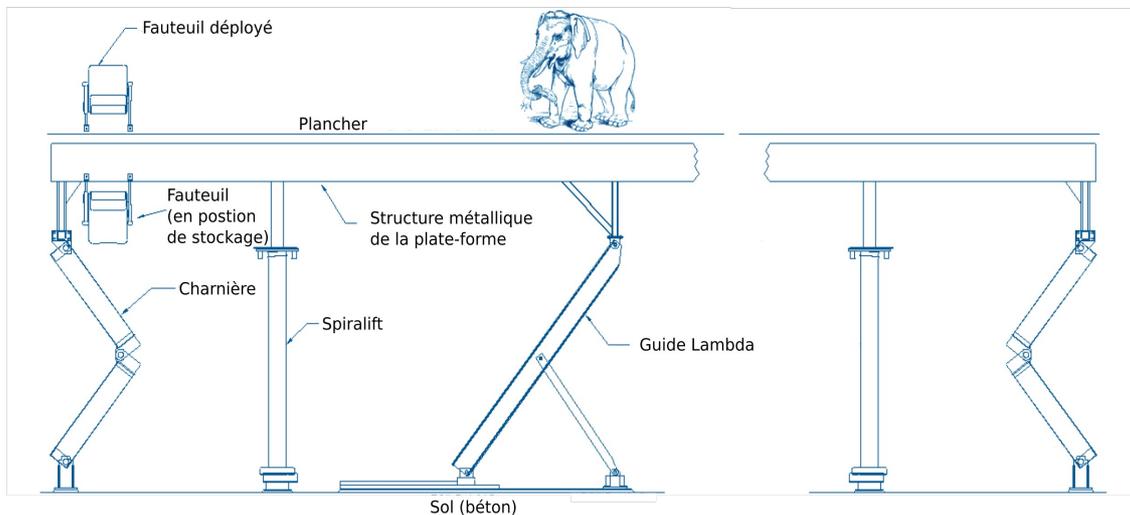


Figure 9 : agencement typique du guidage d'une plate-forme

Afin de bien se rendre compte des dimensions de ces composants, quelques vues complémentaires d'une salle existante sont disponibles sur la figure 10.



Figure 10 : éléments de guidage d'une plate-forme

Il est à noter que la plupart des modèles de Spiralift ne participent pas à la fonction de guidage, leur rôle étant seulement de transmettre un effort sur la plate-forme dans la direction verticale. La liaison entre un Spiralift et la plate-forme sera donc modélisée par une liaison ponctuelle.

On donne sur la figure 11 le schéma cinématique du mécanisme de mise en mouvement vertical d'une plate-forme mobile.

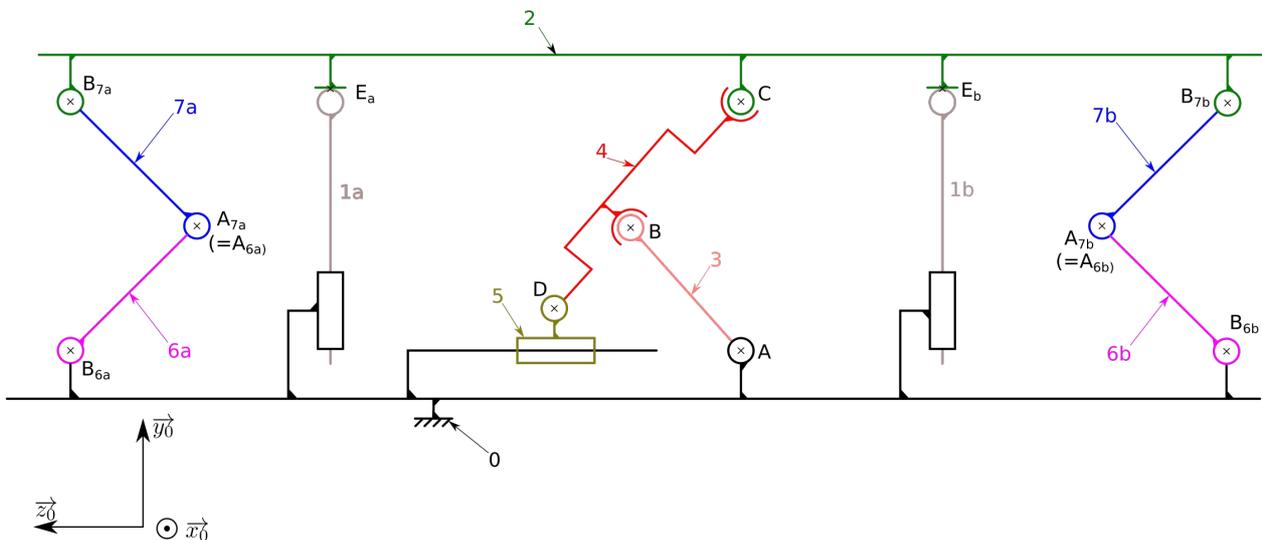


Figure 11 : schéma cinématique du guidage d'une plate-forme

Le sol est noté **0**. La plate-forme est notée **2**. Les deux guides charnières sont composés des pièces **{6a, 7a}** et **{6b, 7b}**. Le guide lambda est composé de **3, 4, et 5**.

Pour simplifier ce schéma, et puisque cette simplification n'a pas d'incidence sur l'analyse qui suit, le détail de la cinématique d'un Spiralift n'est pas représenté. Les deux Spiralifts sont donc représentés par **1a** et **1b**.

- Q1.** Sur le document réponse N°1, compléter le tableau en indiquant la désignation complète des liaisons (avec leurs caractéristiques telles que axes, centres, directions,...) .
- Q2.** En détaillant bien votre raisonnement, déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme modélisé sur le schéma cinématique.
- Q3.** Conclure sur le respect de l'exigence « déformation » (Id=13.1.2.3.1.2 de la figure 7).

Le guidage vertical d'une plate-forme par rapport au sol doit conduire à un mouvement descriptible par le tableau de mobilités suivant (par rapport au repère de la figure 11) :

Rotations	Translations
$R_x=0$	$T_x=0$
$R_y=0$	$T_y=1$
$R_z=0$	$T_z=0$

- Q4.** Dans le tableau du document réponse, indiquer par une croix la suppression d'un degré de liberté contribuant à la vérification d'une exigence « déformation » ou « inclinaison » (voir figure 7).
- Q5.** Compléter le tableau du document réponse, en indiquant d'une croix, le (ou les) composant(s) contribuant à la suppression d'un degré de liberté.

Q6. Les solutions de guidage choisies sont-elles à même de supprimer l'ensemble des degrés de liberté nécessaires à la prise en compte des exigences « déformation » et « inclinaison » ?

## Partie 2 – Vérification des exigences relatives au retournement d'une rangée de sièges

Le retournement d'une rangée de sièges s'effectue à l'aide d'une motorisation dont les caractéristiques sont résumées par la figure 12.

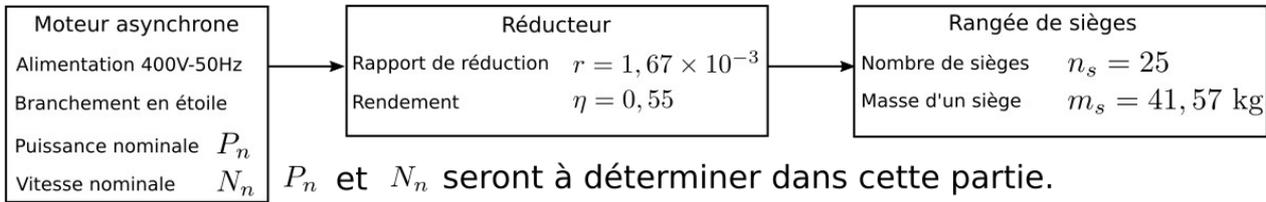


Figure 12 : caractéristiques de la chaîne d'énergie du retournement des sièges

La cinématique du retournement et le paramétrage utilisé dans cette partie sont décrits par la figure 13 ci-dessous.

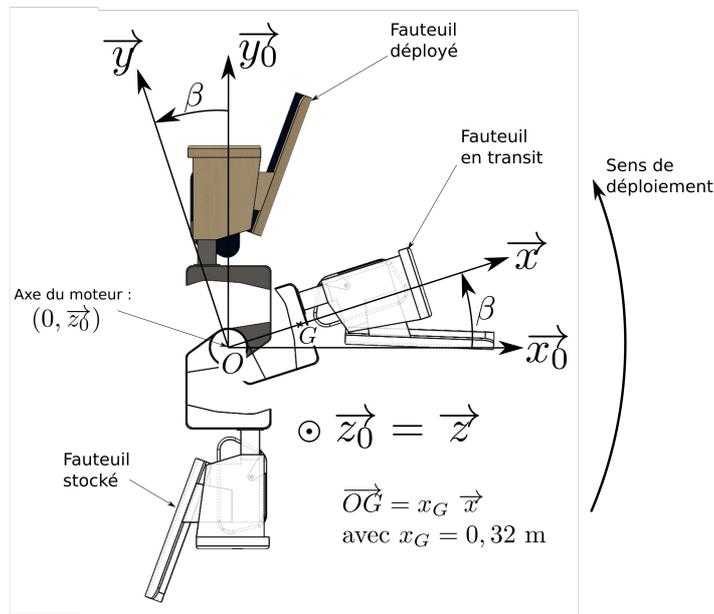


Figure 13 : paramétrage du mouvement d'une rangée de sièges

L'objectif de cette partie est de choisir un moto-réducteur à l'aide d'un extrait de catalogue constructeur. On déterminera alors le nombre maximal de rangées de sièges qu'il est possible de retourner simultanément tout en respectant l'exigence de puissance consommée (voir diagramme d'exigence de la figure 6).

Hypothèses :

- le retournement des sièges ne s'effectuant que lorsque la plate-forme est immobile, on peut considérer que le référentiel associé au repère  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est galiléen ;
- on prendra la valeur  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  pour l'accélération de la pesanteur ( $\vec{g} = -g \vec{y}_0$ );

- on supposera que toutes les liaisons autres que les liaisons internes au réducteur sont parfaites ;
- pour des raisons de symétrie le problème peut être considéré dans le plan  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$  ;
- le retournement d'une rangée de siège s'effectue sur un demi-tour à une vitesse de rotation  $N_{max} = 2,5 \text{ tr/min}$  ;
- afin de simplifier l'étude, on considère que le couple à retenir pour le choix du moteur correspond au couple maximal déterminé par une étude statique.

**Q7.** Déterminer la vitesse de rotation du moteur en tours par minute. En déduire le nombre de paires de pôles du moteur asynchrone à choisir.

**Q8.** Pour quel angle  $\beta$  le couple à appliquer sur une rangée de sièges pour la maintenir en équilibre est-il maximal ?

**Q9.** En déduire le couple maximal  $C_m$  en sortie de moteur.

**Q10.** À l'aide de la documentation fournie en annexe 2, choisir parmi les moteurs qui conviennent, celui dont la masse est la plus faible. Compléter la désignation de ce moteur sur le document réponse N°1.

**Q11.** À partir de la documentation du moteur choisi, calculer la puissance active consommée pour retourner une rangée de sièges.

**Q12.** En déduire le nombre de rangées de sièges qu'il est possible de retourner simultanément sans dépasser la puissance de 100kW imposée par le diagramme d'exigences de la figure 6.

### Partie 3 – Choix d'un modèle de Spiralift

Dans cette partie, l'objectif est de valider le choix d'un modèle Spiralift, et de vérifier s'il est possible de réduire le nombre de Spiralifts nécessaires pour actionner l'allée 26B.

Cette étude va se dérouler en deux temps.

Dans un premier temps, nous allons déterminer si les efforts engendrés par les mouvements des guides ont une incidence prépondérante sur le dimensionnement d'un Spiralift. Pour cela, il va falloir réaliser :

- une étude cinématique du mouvement des guides charnières ;
- une étude dynamique liée à ce même mouvement pour déterminer les efforts à développer pour provoquer ce mouvement.

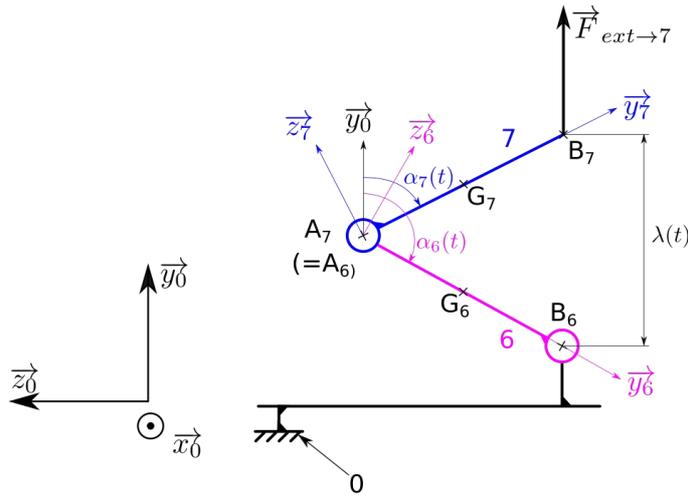
Dans un second temps, nous allons déterminer la charge sur un Spiralift.

#### Présentation détaillée de la problématique

Les guides charnières sont des pièces qui assurent la rigidité à l'ensemble d'une plate-forme mobile en mouvement. Pour cela, ce sont des pièces mécano-soudées de dimensions importantes. Les caractéristiques cinétiques des demi-charnières sont données en annexe 3.

Compte tenu des valeurs élevées de ces caractéristiques cinétiques, on peut s'interroger sur l'effort à développer pour imposer le mouvement de ces pièces.

## Paramétrage



On pose :

$$\overrightarrow{A_7 B_7} = l_7 \vec{y}_7$$

$$\overrightarrow{A_6 B_6} = l_6 \vec{y}_6$$

$$\text{avec } l_6 = l_7 = l = 1,82 \text{ m}$$

$$\|\overrightarrow{A_6 G_6}\| = \|\overrightarrow{A_7 G_7}\| = \frac{l}{2} = 0,91 \text{ m}$$

$$\alpha(t) = \alpha_7(t) = \pi - \alpha_6(t)$$

Figure 14 : paramétrage du mouvement d'une charnière

On considère l'ensemble  $E = \{6+7\}$  qui représente un guide charnière. L'annexe 3 fournit les données sur chaque demi-charnière. Pour simplifier l'étude, on considérera que 6 et 7 sont identiques.

L'objectif de cette partie est de déterminer la force  $\vec{F}_{ext \rightarrow 7} = F \vec{y}_0$  à exercer sur 7 en  $B_7$  pendant le mouvement de la plate-forme. Ce mouvement étant imposé,  $\overrightarrow{B_6 B_7} = \lambda(t) \vec{y}_0$  est supposé connu.

Pendant la montée, le mouvement de la plate-forme suit une loi de vitesse en trapèze.

### Partie 3.1 – Relation entre $\lambda(t)$ et $\alpha(t)$

Pour la suite de l'étude, nous aurons besoin de la relation mathématique liant  $\lambda(t)$  à  $\alpha(t)$  qui pourront être notées  $\lambda$  et  $\alpha$  pour simplifier les notations.

**Q13.** À l'aide d'une relation de fermeture géométrique, montrer que  $\lambda = 2l \cos(\alpha)$ .

### Partie 3.2 – Détermination des torseurs cinématiques des mouvements de 6/0 et 7/0

Dans toute la suite du problème, on fera l'hypothèse que le problème peut être traité comme un problème plan.

Notations : le torseur cinématique du mouvement d'un solide  $i$  par rapport à un solide  $j$  exprimé au

point  $K$  dans une base  $(\vec{x}_n, \vec{y}_n, \vec{z}_n)$  sera noté  $\{V_{i/j}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}(i/j) = \omega_{ij} \vec{x}_n \\ \vec{V}_{K,i/j} = v_{ij} \vec{y}_n + w_{ij} \vec{z}_n \end{array} \right\}_K$ .

**Q14.** Exprimer le torseur cinématique du mouvement de 6 par rapport à 0  $\{V_{6/0}\}$  en  $B_6$  en fonction de  $\frac{d\alpha}{dt}$ . En déduire l'expression de ce torseur en  $G_6$

**Q15.** Exprimer le torseur cinématique du mouvement de 7 par rapport à 0  $\{V_{7/0}\}$  en  $B_7$  en fonction de  $\frac{d\alpha}{dt}$ ,  $\frac{d\lambda}{dt}$  et  $l$ . En déduire l'expression de ce torseur en  $G_7$ .

### Partie 3.3 – Détermination de la force à exercer sur 7

Hypothèses :

- le référentiel associé au repère  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est supposé galiléen ;
- on prendra la valeur  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  pour l'accélération de la pesanteur ( $\vec{g} = -g \vec{y}_0$ ) ;
- on supposera que toutes les liaisons sont parfaites ;
- pour des raisons de symétrie le problème peut être considéré dans le plan  $(O, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  .

Notations : le torseur cinétique d'un solide i dans son mouvement par rapport à un repère j exprimé

au point K sera noté  $\{C_{ij}\} = \left\{ \begin{array}{l} m_i \vec{V}_{G_i, ij} \\ \vec{\sigma}_{K, ij} \end{array} \right\}_K$  .

**Q16.** Exprimer le torseur cinétique  $\{C_{6/0}\}$  en  $G_6$  en fonction de la masse  $m_6$  , du moment d'inertie  $A_6$  ,  $l$  et  $\frac{d\alpha}{dt}$  . En déduire  $T(6/0)$  l'énergie cinétique du solide 6 dans son mouvement par rapport à 0.

**Q17.** Exprimer le torseur cinétique  $\{C_{7/0}\}$  en  $G_7$ , en fonction de la masse  $m_7$  , du moment d'inertie  $A_7$  ,  $l$  ,  $\frac{d\alpha}{dt}$  et  $\frac{d\lambda}{dt}$  . En déduire  $T(7/0)$  l'énergie cinétique du solide 7 dans son mouvement par rapport à 0.

**Q18.** Déterminer alors  $T(E/0)$  l'énergie cinétique de l'ensemble  $E = \{6+7\}$  par rapport à 0.

**Q19.** Faire le bilan des actions mécaniques extérieures agissant sur l'ensemble E. En déduire  $P_{ext \rightarrow E/0}$  , la puissance des actions mécaniques extérieures agissant sur E par rapport au repère 0.

**Q20.** Que vaut  $P_{int}$  , la puissance des efforts intérieurs à l'ensemble E.

**Q21.** Formuler l'expression du théorème de l'énergie cinétique appliqué à E par rapport à 0, en utilisant  $T(E/0)$  ,  $P_{ext \rightarrow E/0}$  et  $P_{int}$  .

Après quelques simplifications de l'expression obtenue, on montre que la résolution de cette

équation conduit à  $F = F_P + F_D$  où  $F_P = m g$  et  $F_D = \frac{1}{2} \frac{d^2\lambda}{dt^2} - \frac{1}{l \sin \alpha} \left( A + m \frac{l^2}{4} \right) \frac{d^2\alpha}{dt^2}$  où

$m = m_6 = m_7$  et  $A = A_6 = A_7$  . Une résolution numérique sur ordinateur conduit à la courbe suivante pour  $F_D$  .

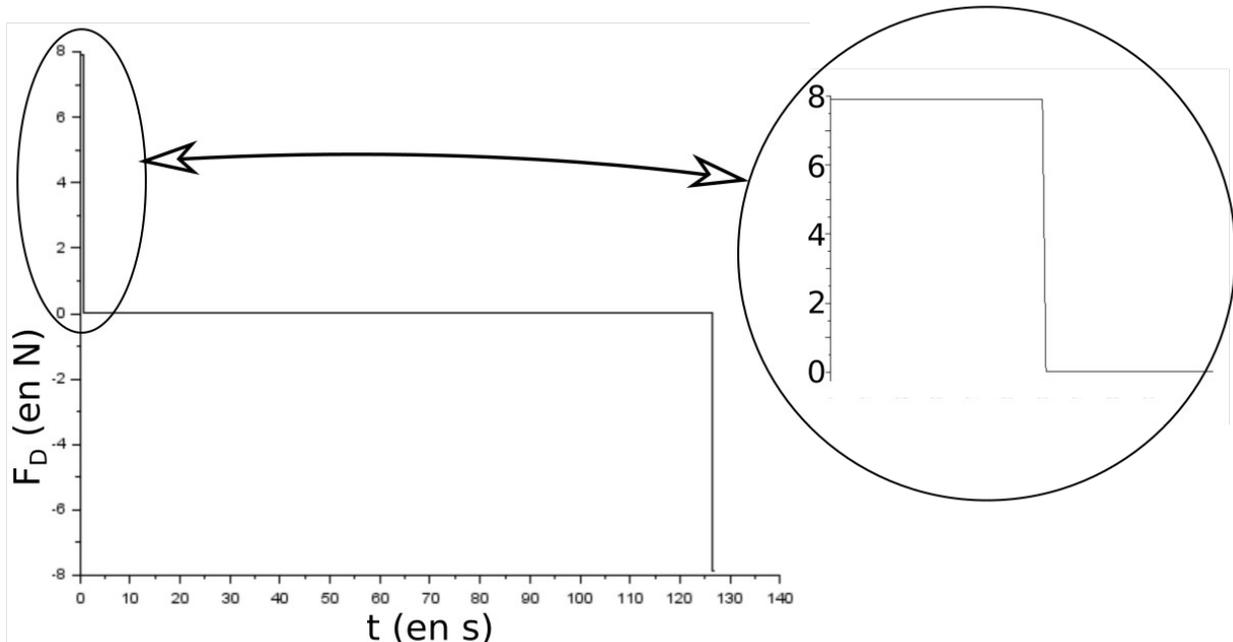


Figure 15 : évolution de la composante dynamique de la force  $F$

**Q22.** Calculer  $F_p$  et la comparer à  $F_D$ . Indiquer les hypothèses admissibles pour calculer la charge s'appliquant sur un Spiralift.

### Partie 3.4 – Détermination de la charge supportée par un Spiralift

Hypothèses :

- quels que soient les résultats trouvés aux questions précédentes, on considérera que le système est immobile ;
- on se basera sur les données de l'allée 26B de l'annexe 1
  - le système est supporté par 4 Spiralifts ;
  - le guidage est réalisé par 2 guides charnières et un guide lambda : la force créée par chaque guide charnière sur la plate-forme sera considérée égale à  $F_C = 4000\text{ N}$  et on négligera l'action du guide lambda par rapport à  $F_C$  ;
  - l'allée comporte 25 places assises ;
  - la masse d'un fauteuil et du mécanisme de mise rotation est  $m_s = 41,57\text{ kg/ fauteuil}$  ;
  - la surface de l'allée est  $S_{26B} = 19,7\text{ m}^2$  et la charge surfacique du plancher d'une allée est  $C_{sp} = 265\text{ daN/m}^2$  ;
- on supposera que la masse d'un spectateur est  $m_{sp} = 80\text{ kg}$  ;
- on supposera que la charge se répartit uniformément sur l'ensemble de la plate-forme ;
- la charge maximale admissible par un Spiralift de type ND9 est  $C_{max} = 10000\text{ daN}$  ;
- on décide de prendre un coefficient de sécurité  $s = 2$  ;
- on prendra la valeur  $g = 9,81\text{ m/s}^2$  pour l'accélération de la pesanteur ( $\vec{g} = -g\vec{y}_0$ ).

**Q23.** Déterminer la force exercée par chacun des quatre Spiralifts sur la plate-forme. Un Spiralift de type ND9 est-il capable de supporter ce chargement ? Quel est le nombre minimal de Spiralifts nécessaires pour actionner cette plate-forme du point de vue de la charge ?

Pour pallier un éventuel dysfonctionnement d'un Spiralift, le principe de redondance impose de lui associer un Spiralift supplémentaire.

**Q24.** Quel est le nombre minimal de Spiralifts nécessaire pour actionner la plate-forme en tenant compte de ce principe ?

## Partie 4 - Asservissement de l'altitude d'une plate-forme de l'ascenseur d'orchestre

Certaines salles sont équipées d'espaces de rangement situés sous la scène. Une plate-forme d'ascenseur d'orchestre peut s'abaisser au niveau du plancher de l'espace de stockage permettant ainsi à des opérateurs de faire glisser sur la plate-forme le matériel de scène, comme des décors ou des instruments de musique.

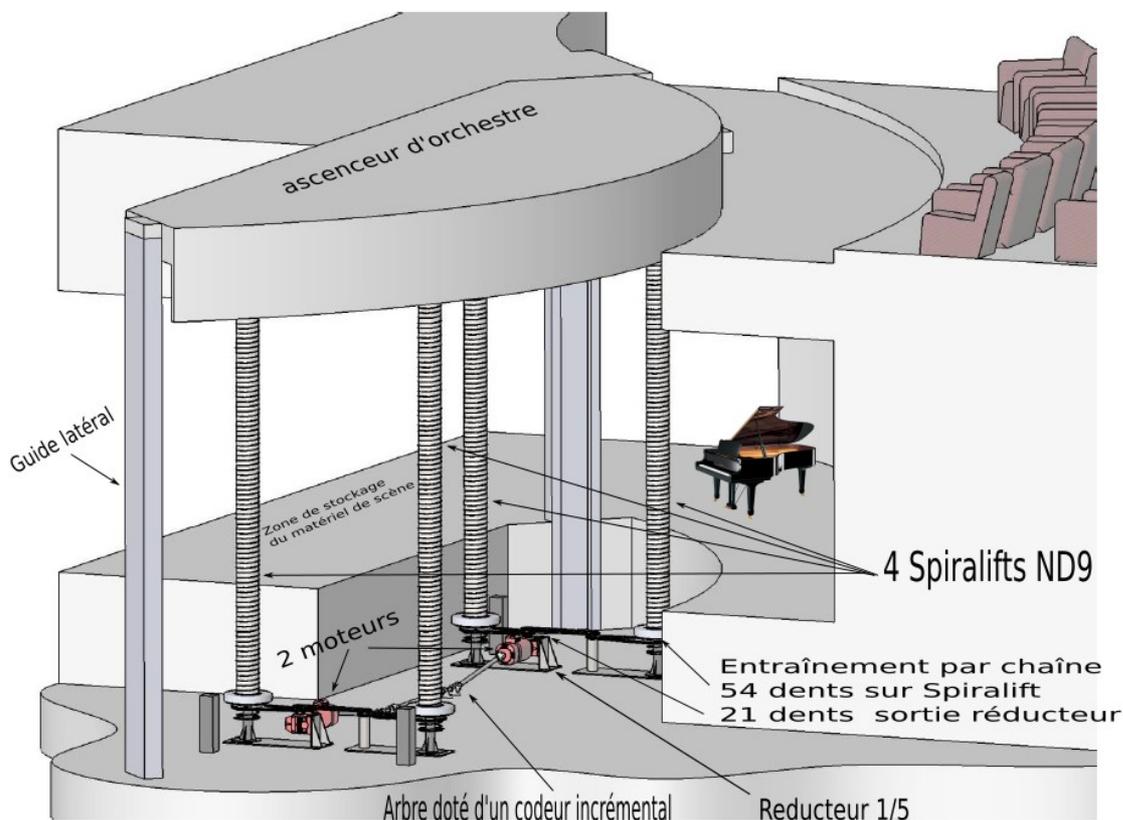


Figure 16 : description de l'ascenseur d'orchestre

Le positionnement de cette plate-forme doit être effectué avec une grande précision, afin de permettre le déploiement du matériel de scène par roulage entre l'espace de stockage et l'ascenseur d'orchestre.

L'étude qui suit se limitera à l'étude d'un seul moteur pilotant une seule colonne Spiralift.

Afin de modéliser l'asservissement de l'altitude de la plate-forme d'ascenseur d'orchestre, un schéma de cet asservissement a été développé. Ce schéma est présenté sur la figure 17 .

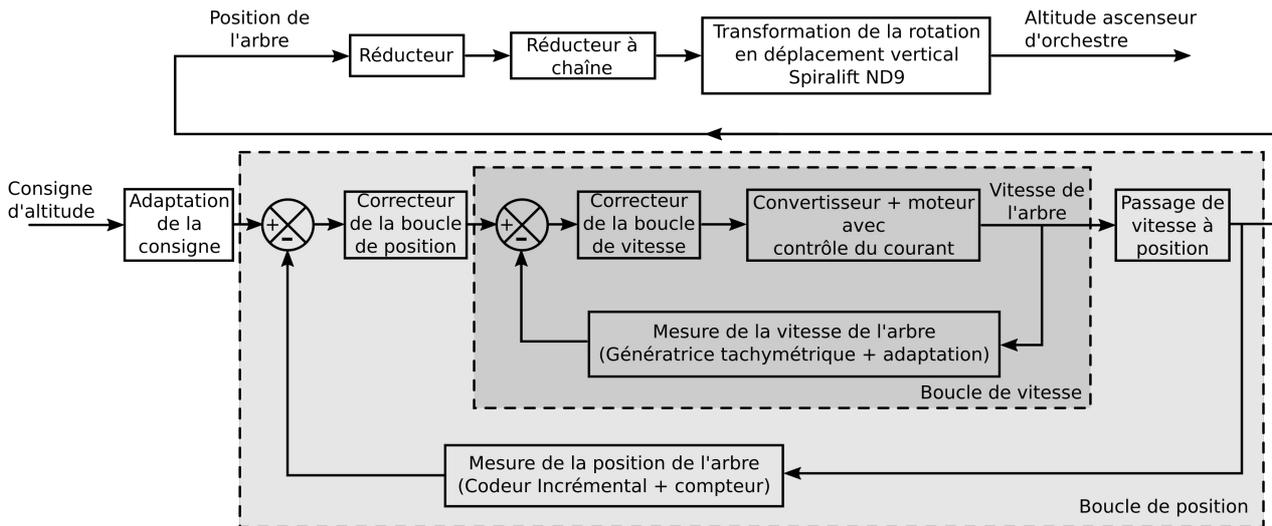


Figure 17 : modélisation de l'asservissement d'altitude de l'ascenseur d'orchestre

Dans une première partie de cette étude, l'objectif est de régler le correcteur de la boucle de vitesse, afin de satisfaire l'exigence de stabilité de cette boucle tout en optimisant son temps de réponse à 5%.

Dans une deuxième partie, l'objectif sera de vérifier que les exigences de précisions relatives à l'asservissement de l'altitude de la plate-forme sont respectées.

Dans une troisième partie l'objectif sera de vérifier que la résolution du capteur d'altitude permet de répondre aux exigences attendues en matière d'affichage de l'altitude.

### Partie 4.1 - Étude de la boucle de vitesse

Afin d'assurer le bon positionnement de la plate-forme de l'ascenseur d'orchestre, le concepteur a choisi de contrôler la vitesse de l'arbre d'entraînement du Spiralift par le biais d'une boucle de vitesse.

Les objectifs de cette étude sont :

- d'identifier les paramètres d'un modèle correspondant à la boucle de vitesse de l'arbre ;
- de régler le correcteur à action proportionnelle de cette boucle de vitesse ;
- de vérifier que les exigences de stabilité et d'optimisation du temps de réponse à 5% de cette boucle de vitesse sont satisfaites.

Le schéma simplifié de la boucle de vitesse de l'arbre est donné sur la figure 18 :

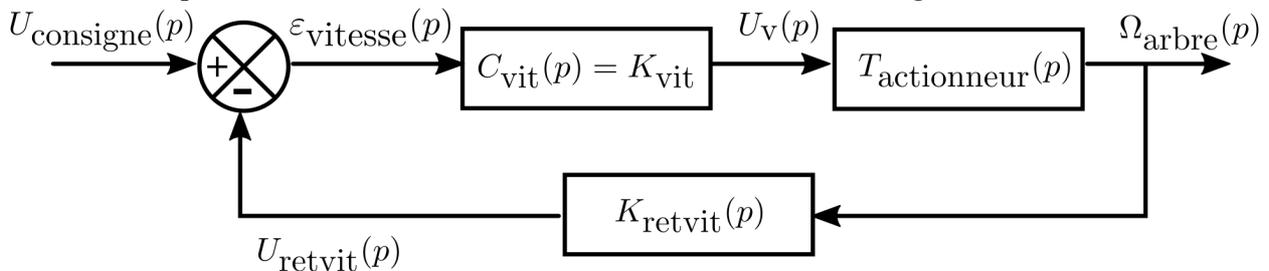


Figure 18 : schéma simplifié de la boucle de vitesse de l'arbre

Avec :  $u_{consigne}$  , tension représentative de la consigne de vitesse de l'arbre (en V) ;  
 $u_{retvit}$  , tension représentative de la vitesse mesurée de l'arbre (en V) ;  
 $u_v$  , tension de commande du convertisseur (en V) ;  
 $\omega_{arbre}$  , vitesse de rotation de l'arbre en (rad/s) ;  
 $C_{vit}(p)$  , fonction de transfert du correcteur à action proportionnelle ;  
 $T_{actionneur}(p)$  , fonction de transfert du moteur associé à son convertisseur ;  
 $k_{retvit}(p)$  , fonction de transfert associée au capteur de vitesse et son adaptation.

Remarque : par convention, les variables dans le domaine de Laplace sont notées avec des majuscules, alors qu'elles sont notées avec des minuscules dans le domaine temporel.

Un modèle obtenu à partir de l'étude fréquentielle du moteur associé à son convertisseur a permis de tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert  $T_{actionneur}(p) = \frac{\Omega_{arbre}(p)}{U_v(p)}$  . Ce diagramme de Bode est représenté sur la figure 19. Les asymptotes du diagramme de Bode sont représentées en pointillés.

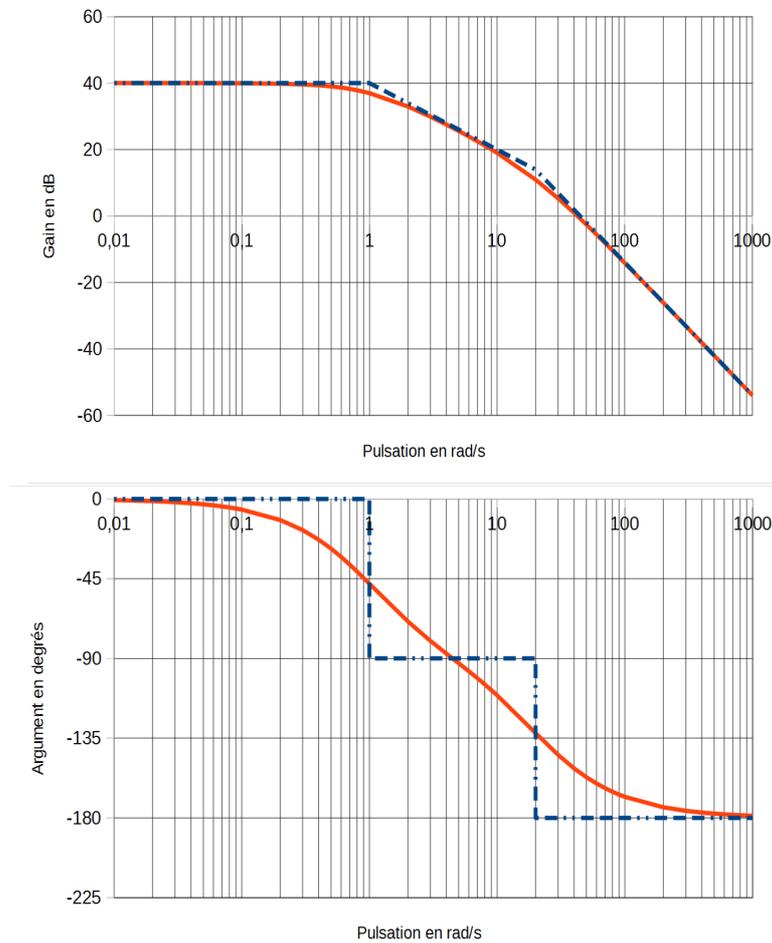


Figure 19 : diagramme de Bode de  $T_{actionneur}(p)$

**Q25.** À partir de l'étude de ces deux diagrammes, exprimer  $T_{actionneur}(p)$  sous la forme

$$T_{actionneur}(p) = \frac{K_{ac}}{\left(1 + \frac{p}{\omega_1}\right)\left(1 + \frac{p}{\omega_2}\right)} . \text{ Préciser les valeurs de } K_{ac} , \omega_1 \text{ et } \omega_2 .$$

Le capteur de vitesse délivre une tension  $u_{revit}$  proportionnelle à la vitesse de rotation de l'arbre. La caractéristique de transfert de cet ensemble est donnée figure 20 :

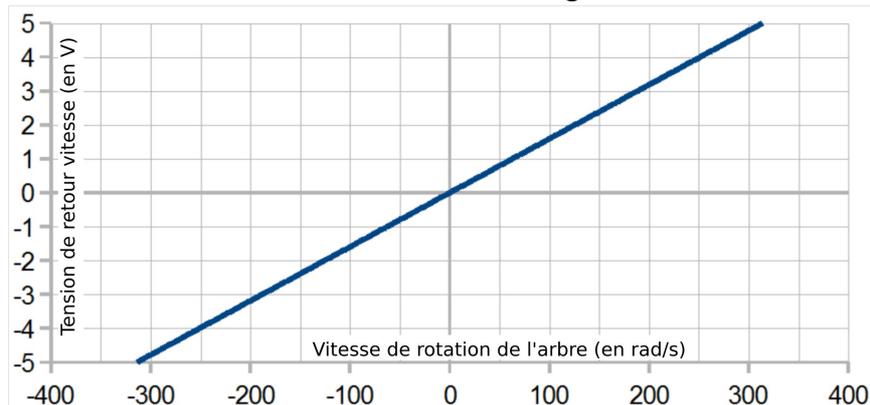


Figure 20 : caractéristique de transfert du capteur de vitesse

**Q26.** Déterminer, à partir de la caractéristique donnée sur la figure 20, le coefficient d'amplification de la fonction de transfert  $K_{revit}(p) = \frac{U_{revit}(p)}{\Omega_{arbre}(p)}$ .

**Q27.** Déterminer l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte  $FTBO_{vitesse}(p) = \frac{U_{revit}(p)}{\varepsilon_{vitesse}(p)}$  en conservant dans cette expression la grandeur  $K_{vit}$  du correcteur à action proportionnelle.

**Q28.** Tracer sur le document réponse N°2, le diagramme de Bode de cette fonction de transfert en boucle ouverte pour  $K_{vit} = 1$ .

**Q29.** On souhaite régler le correcteur à action proportionnelle pour obtenir une marge de phase de  $45^\circ$ . Quelle valeur faut-il donner à  $K_{vit}$  pour obtenir cette marge de phase ?

### Optimisation du temps de réponse à 5% :

On souhaite optimiser le temps de réponse à 5% de la boucle de vitesse. Cette optimisation risque de modifier la valeur du correcteur calculée précédemment.

L'objectif de cette partie est de calculer la valeur de  $K_{vit}$  qui optimise le temps de réponse à 5 % de la boucle de vitesse et de vérifier que cette nouvelle valeur est compatible avec l'exigence de stabilité concernant la marge de phase.

**Q30.** Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée de la boucle de vitesse,

$$FTBF_{vitesse}(p) = \frac{\Omega_{arbre}(p)}{U_{consigne}(p)} \text{ sous forme canonique } FTBF_{vitesse}(p) = \frac{A}{1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}.$$

Préciser les expressions littérales de  $A$ ,  $\omega_0$  et  $m$ .

**Q31.** À l'aide de la figure 21, déterminer la valeur à donner au coefficient d'amortissement  $m$  pour optimiser le temps de réponse à 5% de la boucle de vitesse. En déduire la valeur que l'on appellera  $K_{opt}$  à donner à  $K_{vit}$  permettant d'obtenir cette optimisation.

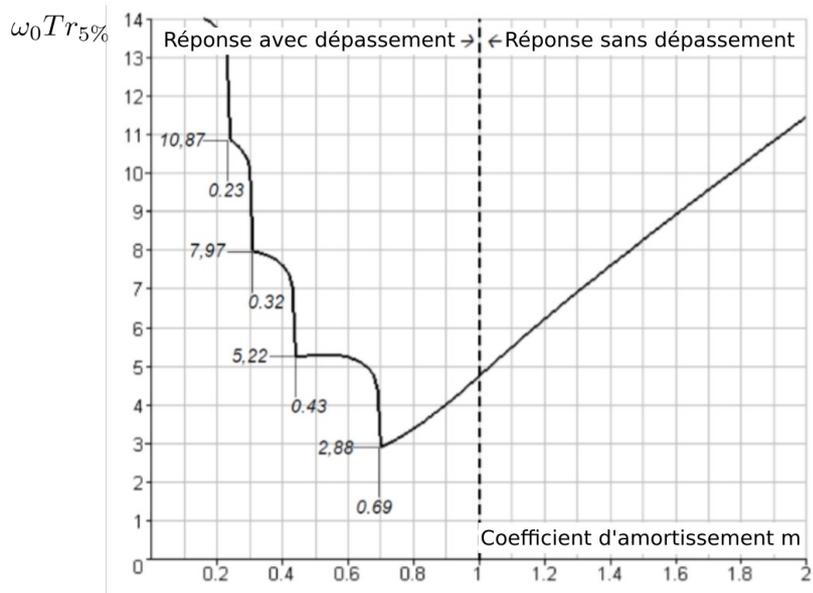


Figure 21 : abaque du temps de réponse à 5% réduit en fonction de  $m$

Q32. Quelle est la marge de phase obtenue avec ce réglage du correcteur à la valeur  $K_{opt}$  ?

Q33. Conclure au regard de l'exigence de stabilité.

### Partie 4.2 - Étude de la boucle de position

Le concepteur a choisi de contrôler indirectement l'altitude de la plate-forme d'ascenseur d'orchestre en contrôlant la position de l'arbre d'entraînement par le biais d'une boucle de position.

L'objectif de cette étude est de vérifier que l'erreur d'altitude de l'ascenseur d'orchestre sera nulle suite à un échelon appliqué à la consigne de positionnement.

Le schéma simplifié de la boucle de position de l'arbre a été remplacé par un schéma équivalent faisant apparaître une boucle de position à retour unitaire. Ce schéma équivalent est donné figure 22. L'altitude de l'ascenseur d'orchestre est reliée à la position de l'arbre par l'intermédiaire d'un réducteur à engrenages suivi d'un réducteur à chaîne, le tout entraînant la rotation de l'axe du Spiralift ND9.

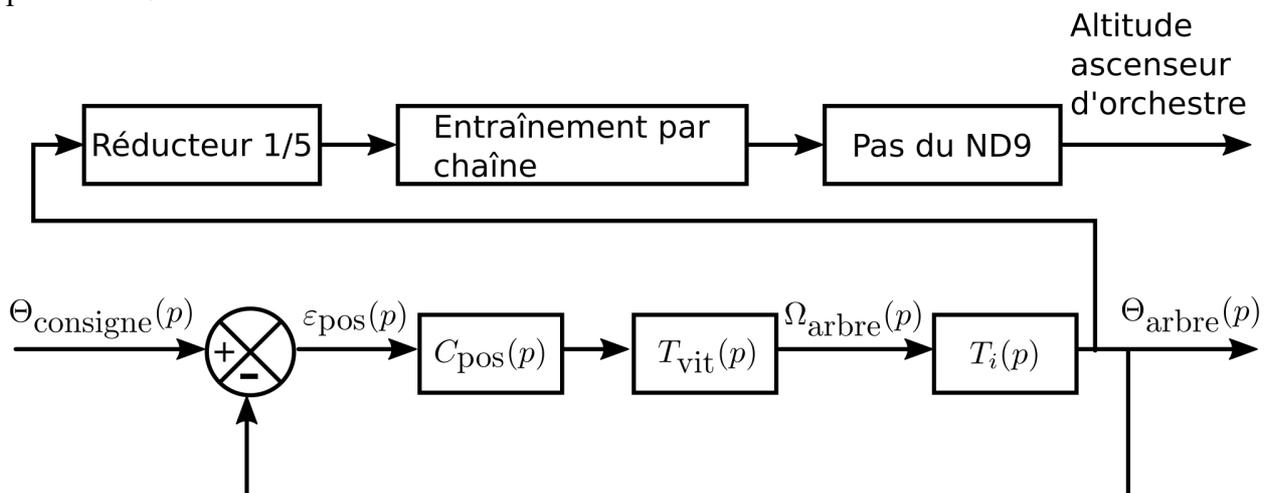


Figure 22 : schéma simplifié de la boucle de position de l'arbre

On note :

- $\theta_{consigne}$  , la grandeur représentative de la consigne de position de l'arbre ;
- $\theta_{arbre}$  , la position de l'arbre (sur plusieurs tours) (en rad) ;
- $\omega_{arbre}$  , la vitesse de rotation de l'arbre en (rad/s) ;
- $C_{pos}(p)$  , la fonction de transfert du correcteur de la boucle de position ;
- $T_{vit}(p)$  , la fonction de transfert représentative de la boucle de vitesse ;
- $T_i(p)$  , la fonction de transfert permettant de passer de la vitesse angulaire à la position angulaire de l'arbre.

**Q34.** Donner la fonction de transfert du bloc  $T_i(p) = \frac{\Theta_{arbre}(p)}{\Omega_{arbre}(p)}$  situé entre la vitesse de rotation de l'arbre et la position angulaire de l'arbre.

La fonction de transfert en boucle ouverte de la boucle de position de l'arbre est donnée et vaut :

$$FTBO_{posarbre}(p) = \frac{1}{p} \times \frac{A}{1 + \frac{1,38}{\omega_0} p + \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2} , \text{ où } A \text{ est un coefficient constant appelé coefficient}$$

d'amplification en boucle ouverte.

**Q35.** Quelle est la classe de ce système ? En déduire l'erreur de position angulaire sur l'arbre suite à un échelon de consigne de position.

**Q36.** Conclure sur la satisfaction de l'exigence relative à l'erreur de position suite à un échelon de consigne.

### **Partie 4.3 - Vérification de la conformité de la résolution du capteur d'altitude**

La mesure de l'altitude de l'ascenseur d'orchestre est déduite de la position angulaire (sur plusieurs tours) de l'arbre d'entraînement du Spiralift.

La position angulaire de cet arbre est mesurée à l'aide d'un codeur incrémental délivrant 32 impulsions par tour, associé à un compteur. Le compteur est incrémenté de un à chaque impulsion quand la plate-forme monte (décrémenté de un à chaque impulsion quand la plate-forme descend). Le niveau le plus bas de l'ascenseur d'orchestre est détecté par un capteur de fin de course placé sur le rail de guidage.

Lorsque l'ascenseur d'orchestre est à son niveau le plus bas, le compteur est mis à zéro. Ainsi, le nombre stocké au niveau du compteur est proportionnel à l'altitude de l'ascenseur d'orchestre.

Données :

- la course totale de la plate-forme d'ascenseur d'orchestre est de 5,6 m ;
- la sortie du réducteur est reliée à la couronne du Spiralift ND9 par une chaîne ;
- le pignon associé à l'axe du réducteur, comporte 21 dents ;
- le pignon associé à la couronne du Spiralift comporte 54 dents ;
- Un tour de la couronne du Spiralift ND9 provoque une variation d'altitude de l'ascenseur d'orchestre d'une hauteur de 52,9 mm.



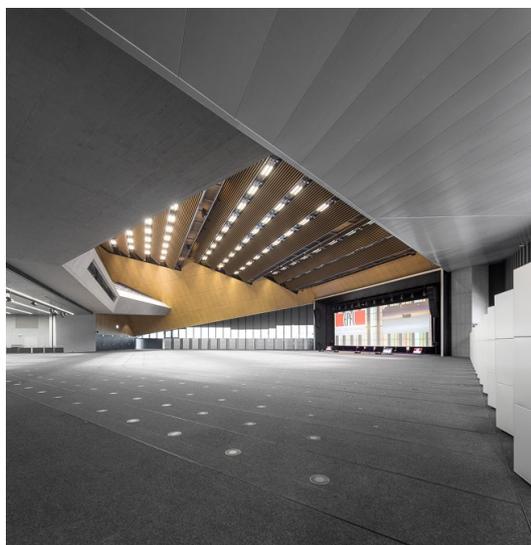
Figure 23 : transmission à la sortie du moteur

L'objectif de cette partie est de vérifier que la résolution du capteur d'altitude permet de mesurer le plus petit écart d'élévation que l'on souhaite détecter et de vérifier que le format de stockage de l'altitude est compatible avec la course de l'ascenseur d'orchestre.

- Q37.** Déterminer le plus petit écart d'altitude de l'ascenseur d'orchestre mesurable par ce dispositif et vérifier que l'exigence « mesure de position » de la figure 8 est respectée.
- Q38.** Déterminer l'altitude du plancher de la zone de stockage par rapport à la position basse de l'ascenseur d'orchestre (voir figure 16) sachant que le code hexadécimal correspondant à l'altitude de ce plancher est 0x184E.
- Q39.** Donner en binaire puis en hexadécimal le nombre codant l'altitude maximale. En déduire le nombre de bits nécessaires pour coder l'altitude de l'ascenseur d'orchestre. Ce résultat est-il conforme à l'exigence « codage » de la figure 8 ?
- Q40.** Conclure en faisant le bilan des exigences satisfaites au niveau des asservissements.

## Partie 5 - Estimation du temps de transformation d'une salle

On étudie dans cette partie le temps nécessaire pour transformer une zone de la salle constituée de 26 rangées de plates-formes pour passer d'un sol plat situé au niveau de référence, à une configuration en gradins formant des marches de 170 mm avec tous les sièges mis en place.



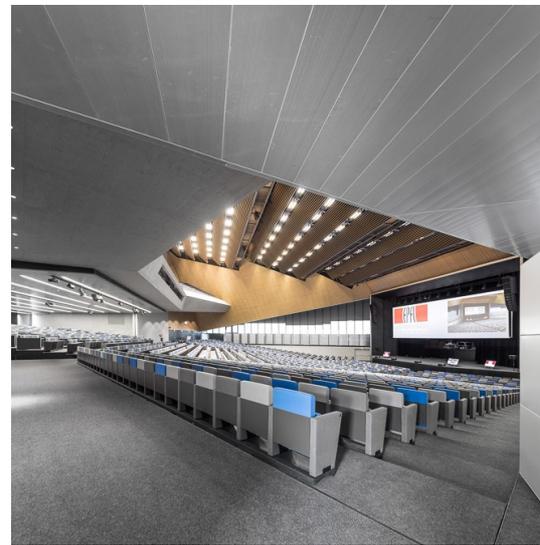
26 plates-formes au niveau de référence avec sol plat.



15 mn



100 kW  
-



26 plates-formes en gradins avec sièges en position.

Figure 24 : passage du sol plat au sol en gradins en moins de 15 minutes (100kW max)

L'objectif de cette partie est d'analyser une stratégie de transformation proposée afin de quantifier les écarts avec les exigences concernant le temps de transformation et la puissance maximale nécessaire pour effectuer cette transformation.

Cette analyse permettra de proposer une nouvelle stratégie de transformation permettant de minimiser ces écarts.

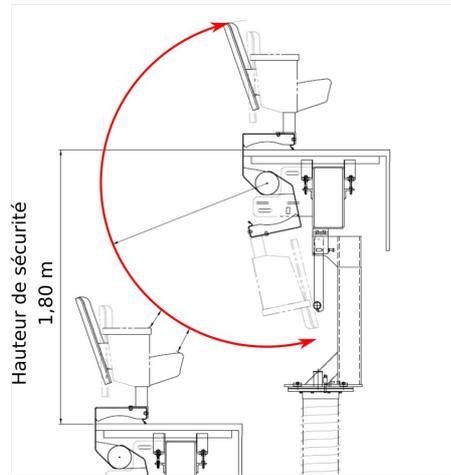


Figure 25 hauteur de sécurité pendant le retournement

La transformation de la configuration de la salle est effectuée par un seul opérateur à partir d'un pupitre de commande centralisé. La transformation ne peut commencer que lorsque les systèmes de sécurité et de contrôle, interdisant l'accès aux zones en mouvement à des personnes extérieures, sont activés. Le retournement d'une rangée de sièges est assuré par 2 moto réducteurs à frein consommant chacun une puissance de  $0,25 kW$ .

L'élévation de chaque plate-forme est assurée par 2 moto réducteurs à frein consommant chacun une puissance de  $5,5 kW$ .

Pour pouvoir procéder au pivotement d'une rangée de sièges, sans heurter la rangée adjacente, il faut prévoir une différence de hauteur de sécurité de  $1,8 m$  entre les deux plates-formes avant de faire pivoter la rangée de sièges la plus haute.

Hypothèses :

- la variation de hauteur d'une colonne, se fait à vitesse constante  $v_{élévation} = 1,5 m/min$  ;
- le temps de retournement d'une rangée de sièges est constant  $t_r = 12 s$  ;
- une opération de retournement, ne peut s'effectuer que quand toutes les opérations d'élévation sont arrêtées ;
- la puissance nécessaire au retournement d'une rangée de sièges est  $P_r = 0,5 kW$  (on suppose cette valeur identique pour toutes les rangées) ;
- la puissance nécessaire au déplacement vertical d'une plate-forme est  $P_v = 11 kW$  (on suppose cette valeur identique pour toutes les rangées) ;
- le niveau de référence est choisi à  $0 mm$ .

On souhaite créer des marches de hauteur  $170 mm$  en plaçant la rangée N°1 à  $170 mm$  au dessus du niveau de référence.

Ainsi, pour chaque rangée, la rangée N°n sera positionnée à une hauteur  $h_n = n \times 170 mm$  à la fin de l'opération de transformation de la salle.

La stratégie adoptée dans un premier temps consiste à faire dans l'ordre les opérations suivantes :

Stratégie 1, proposée pour une première approche

*#(Boucle de retournement de chaque rangée)*

*Début de retournement, pour chaque rangée, les unes après les autres, allant de 1 à 26 :*

*Monter la plate-forme à la hauteur de sécurité*

*Faire pivoter les sièges de cette rangée afin de les mettre en place*

*Redescendre la plate-forme au niveau de référence*

*Fin de retournement*

*# (À ce stade tous les sièges sont en place et toutes les plates-formes sont au niveau de référence)*

*#(Boucle de mise en place de chaque rangée)*

*Début de mise en place, pour chaque rangée, les une après les autres, allant de 1 à 26 :*

*Positionner la plate-forme au niveau souhaité*

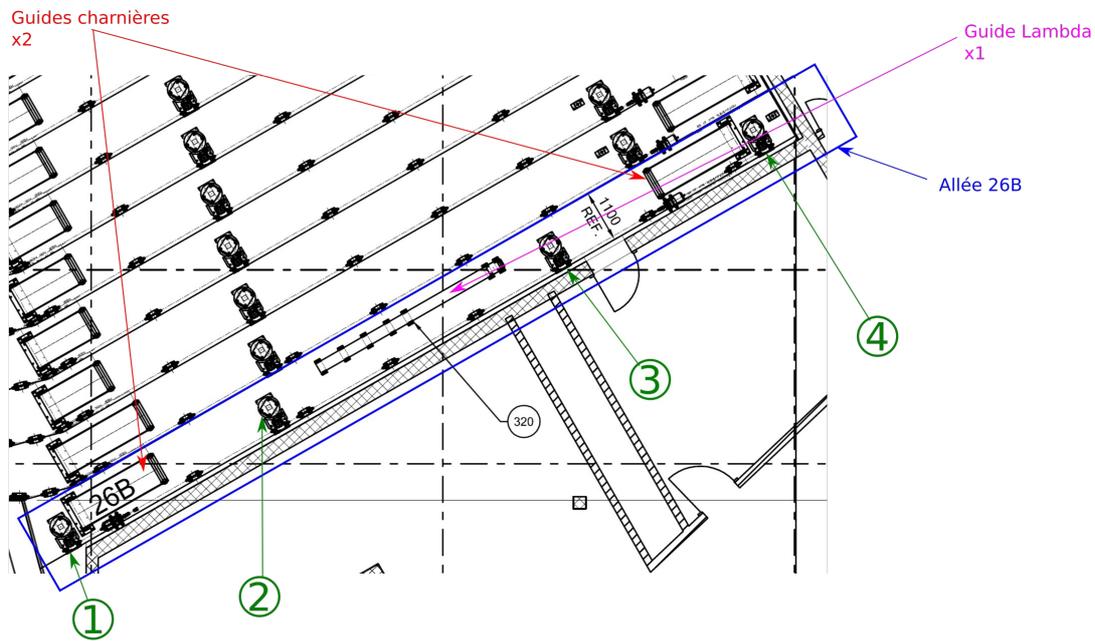
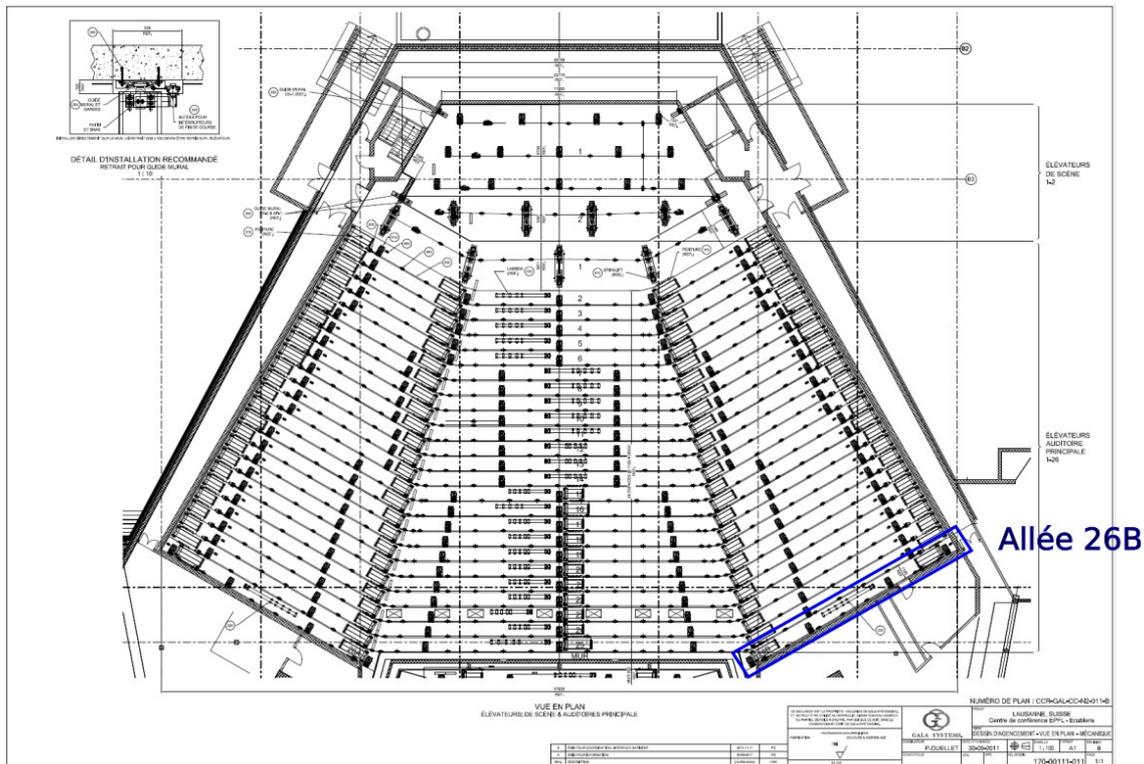
*Fin de mise en place*

- Q41.** Déterminer le temps,  $t_{\text{hauteur.sécu}}$ , nécessaire pour élever une plate-forme de 1,8 m par rapport au niveau de référence.
- Q42.** Estimer en détaillant les calculs, le temps  $t_{\text{stratégie1}}$  nécessaire à la transformation de la salle et vérifier qu'il est conforme aux exigences attendues concernant le temps de transformation ?
- Q43.** L'exigence concernant le pic de puissance consommée par la transformation est-elle respectée par cette stratégie ?
- Q44.** Proposer une nouvelle stratégie simulant la transformation de la salle permettant de réduire les écarts entre les performances attendues et les performances simulés au niveau du temps de transformation et du pic de puissance consommée. Indiquer le temps de transformation  $t_{\text{stratégie2}}$  et le pic de puissance que vous obtenez. La stratégie attendue ne doit pas obligatoirement satisfaire les deux exigences demandées tant qu'elle améliore au moins l'une d'elles.
- Q45.** Les exigences concernant le temps de transformation et le pic de puissance peuvent-elles être satisfaites simultanément ? Esquissez en quelques mots une stratégie permettant de satisfaire ces deux exigences simultanément.

## Partie 6 - Synthèse globale de l'étude

- Q46.** Compléter le tableau du document réponse N°2 en indiquant les parties de l'étude permettant de valider les exigences indiquées :
- si une exigence est vérifiée par une partie, écrire « oui » dans la case correspondante ;
  - si une exigence n'est que partiellement vérifiée, écrire « partielle » dans la case ainsi que l'« Id » de la partie non vérifiée de l'exigence ;
  - si aucune correspondance n'existe entre une partie et une exigence, ne rien écrire dans la case.

# Annexe 1 : Swisstech Convention Center – Vue en plan



① ② ③ ④  
représentent 4 Spiralifts type ND9 espacés comme indiqué ci-dessous :



La course maximale des Spiralifts pour cette rangée est de 3,16 mètres.

## Annexe 2 (page1) : choix d'une motorisation



Rendement standard NIE et hauts rendements IE2 et IE3  
Vitesse variable et vitesse fixe  
Hauteur d'axe 71 à 160  
Puissance 0,25 à 15 kW

Leroy-Somer

EMERSON  
Industrial Automation

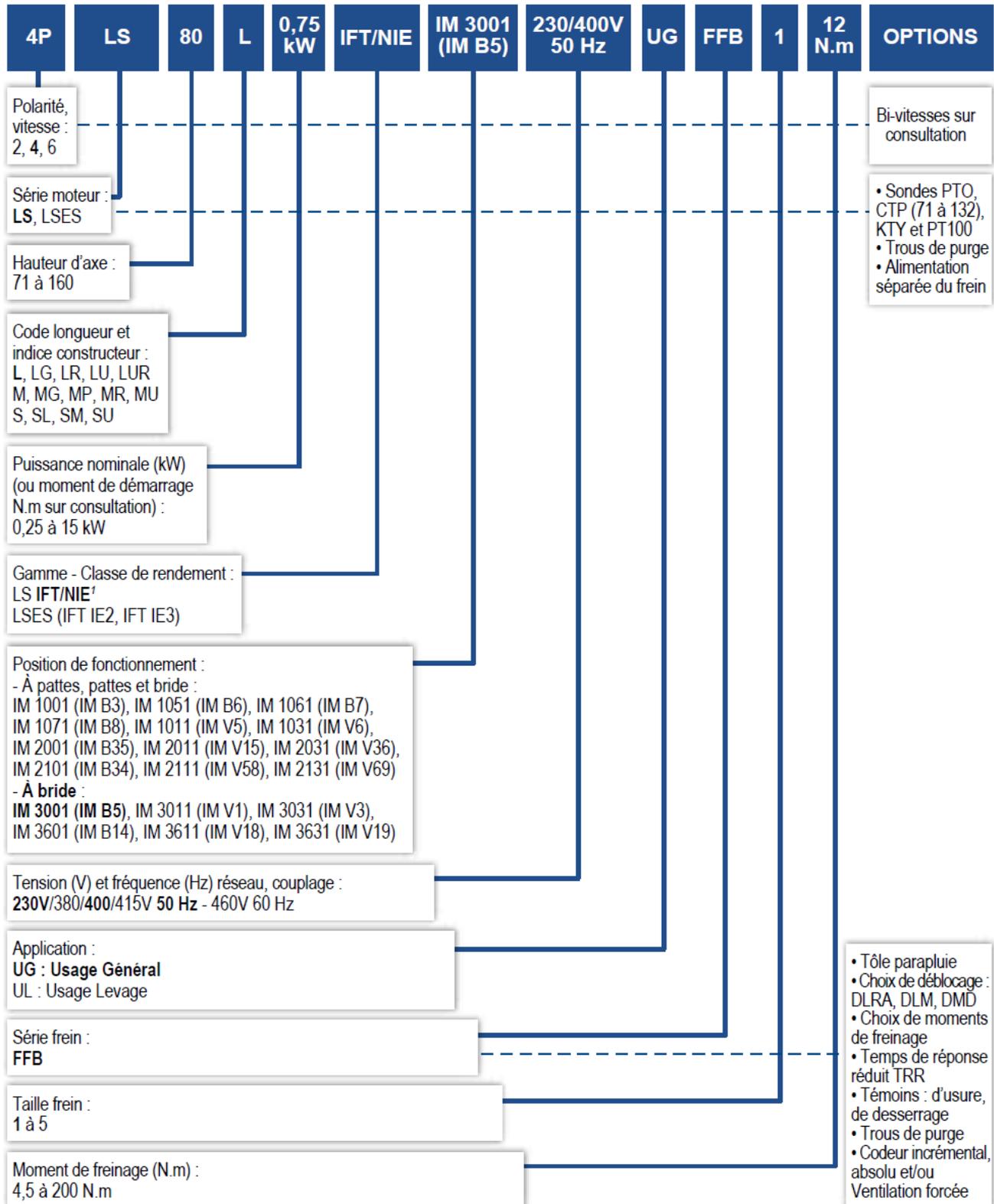
Moteurs Frein		4 Pôles		1500 tr/mn		Alimentation réseau										
LS frein Ffb		IP55		Alimentation incorporée		Moment de freinage réglé en usine		400V – 50Hz								
Type moteur	Type frein	Puissance nominale		Couple maximum		Intensité démarrage/ Intensité nominale		Moment d'inertie		Moment de freinage		Vitesse nominale	Intensité nominale	rendement CEI-60034-2-1 2007	Facteur de puissance	Masse
		Pn kW	Cm N.m	Id/In	J Kg.m <sup>2</sup>	Mf N.m	Nn tr/min	In A	η %	cosφ	kg					
LS	71M	FFB1	0,25	4,92	4,63	0,00094	4,5	1425	0,8	67	0,65	9,4				
LS	71M	FFB1	0,37	7	4,91	0,00111	4,5	1420	1,06	70	0,7	10,3				
LS	71L	FFB1	0,55	9,49	4,81	0,00136	12	1400	1,62	68	0,7	11,3				
LS	80L	FFB1	0,55	8,63	3,9	0,00154	12	1405	1,7	66,9	0,71	11,5				
LS	80L	FFB1	0,75	10,97	4,25	0,00190	12	1400	2,05	69,3	0,77	13,5				
LS	80L	FFB1	0,9	18,76	5,55	0,00266	12	1425	2,45	73	0,73	13,9				
LS	90SL	FFB2	1,1	15,8	4,5	0,00349	19	1425	2,5	76,1	0,84	18,2				
LS	90L	FFB2	1,5	24	5,25	0,00421	19	1430	3,3	79,2	0,83	20				
LS	90L	FFB2	1,8	30,6	5,6	0,00464	26	1435	3,95	79,9	0,82	21				
LS	100L	FFB2	2,2	39,42	5,7	0,00514	26	1435	4,8	80,2	0,82	24,9				
LS	100L	FFB3	3	62	6,65	0,00654	52	1435	6,35	82,2	0,83	29,1				
LS	112M	FFB3	4	81,44	5,85	0,00704	52	1430	8,95	81,4	0,79	29,6				
LS	132S	FFB3	5,5	115,52	6,95	0,01534	67	1456	11,5	85,4	0,81	44,6				
LS	132M	FFB4	7,5	148,2	5,9	0,03	110	1450	15,6	86,8	0,8	62,5				

Moteurs Frein		6 Pôles		3000 tr/mn		Alimentation réseau										
LS frein Ffb		IP55		Alimentation incorporée		Moment de freinage réglé en usine		400V – 50Hz								
Type moteur	Type frein	Puissance nominale		Couple maximum		Intensité démarrage/ Intensité nominale		Moment d'inertie		Moment de freinage		Vitesse nominale	Intensité nominale	rendement CEI-60034-2-1 2007	Facteur de puissance	Masse
		Pn kW	Cm N.m	Id/In	J Kg.m <sup>2</sup>	Mf N.m	Nn tr/min	In A	η %	cosφ	kg					
LS	71M	FFB1	0,37	3,96	5,2	0,00060	4,5	2800	0,98	50	0,6	9,4				
LS	71L	FFB1	0,55	5,47	5,98	0,00066	4,5	2800	1,32	68,4	0,8	10,3				
LS	71L	FFB1	0,75	10,11	6	0,00079	4,5	2780	1,7	75,7	0,8	12,1				
LS	80L	FFB1	0,75	6,12	5,05	0,00096	4,5	2820	1,75	73	0,85	11,2				
LS	80L	FFB1	1,1	9,62	5,3	0,00116	12	2830	2,5	75	0,84	12,7				
LS	90SL	FFB1	1,5	14,85	6,1	0,00166	12	2880	3,35	77,2	0,84	16,5				
LS	90L	FFB2	2,2	21,17	6,1	0,00294	19	2870	4,65	79,7	0,86	21,8				
LS	100L	FFB2	3	29	6	0,00304	19	2860	6,45	81,5	0,82	25,7				
LS	100L	FFB2	3,7	47,58	8,05	0,00374	26	2905	7,8	82,7	0,83	31				
LS	112M	FFB2	4	46,86	7,9	0,00374	26	2890	8,2	83,1	0,85	31				
LS	132S	FFB3	5,5	56,7	7,35	0,00874	52	2925	11	84,7	0,85	42,4				
LS	132S	FFB3	7,5	85,4	7,7	0,01044	52	2930	15,8	86,5	0,79	46				
LS	132M	FFB4	9	86,44	6,55	0,01688	96	2935	18	86,8	0,83	65,2				
LS	160MP	FFB4	11	109,19	6,65	0,01846	96	2935	22,4	87,6	0,81	76,2				

# Annexe 2 (page2) : choix d'une motorisation

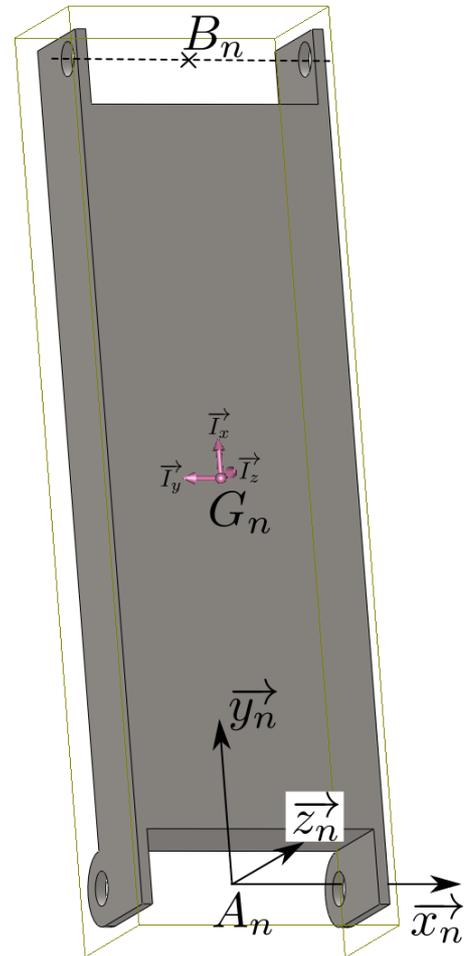
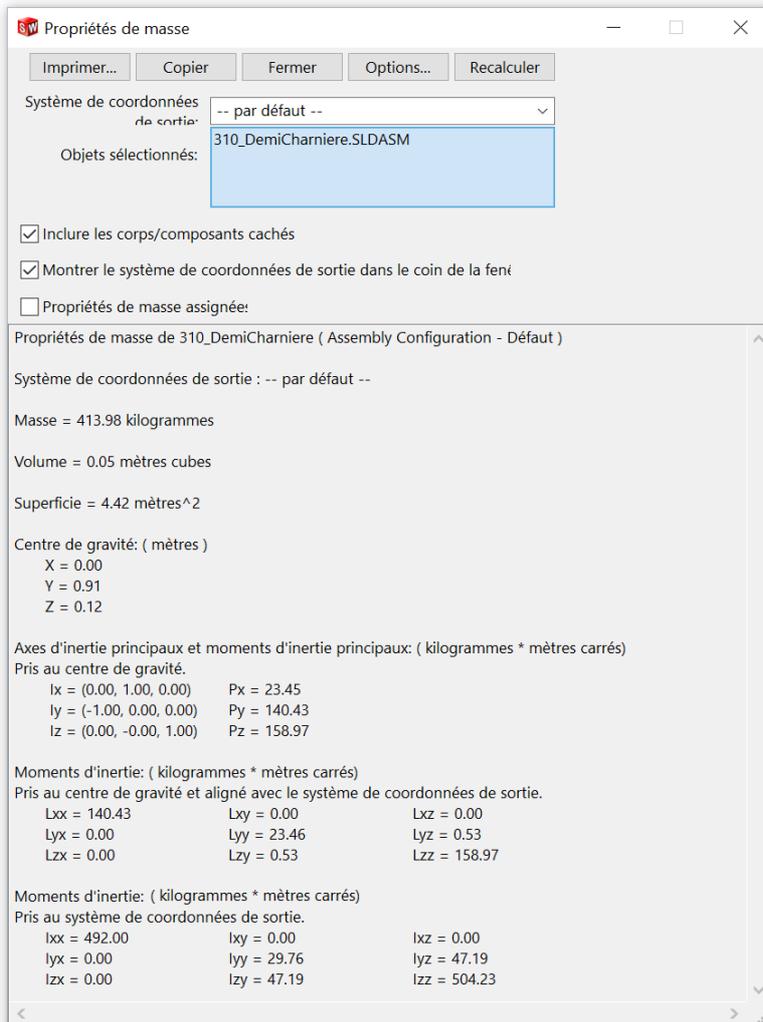
Construction

Désignation



## Annexe 3 : caractéristiques des charnières

Une demi-charnière a été modélisée sur un modèleur volumique. Pour simplifier l'étude, on considérera que les deux demi-charnières sont identiques. La figure ci-dessous présente une capture d'écran des informations fournies par ce logiciel.



Le système de coordonnées de sortie pour une demi-charnière  $n$  est  $(A_n, \vec{x}_n, \vec{y}_n, \vec{z}_n)$  où  $(A_n, \vec{x}_n)$  est l'axe de rotation d'une demi-charnière par rapport à l'autre. Le plan  $(A_n, \vec{y}_n, \vec{z}_n)$  est un plan de symétrie de la demi-charnière  $n$ .

Le centre d'inertie de la demi-charnière  $n$  est noté  $G_n$ , et la base principale d'inertie est  $(\vec{I}_x, \vec{I}_y, \vec{I}_z)$ .

On notera la longueur  $l_n = \overrightarrow{A_n B_n} \cdot \vec{y}_n = 1,82 \text{ m}$  et on considérera que le centre d'inertie se situe au milieu de la demi-charnière soit  $\overrightarrow{A_n G_n} \cdot \vec{y}_n = \frac{l_n}{2}$ .

La matrice d'inertie d'une demi-charnière  $n$  sera notée  $I(G_n, n) = \begin{bmatrix} A_n & -F_n & -E_n \\ -F_n & B_n & -D_n \\ -E_n & -D_n & C_n \end{bmatrix}_{(\vec{x}_n, \vec{y}_n, \vec{z}_n)}$

où les termes de la matrice d'inertie proviennent du modèleur volumique avec :

- $A_n = I_{xx}$  ;  $B_n = I_{yy}$  ;  $C_n = I_{zz}$  ;
- $D_n = I_{yz} = I_{zy}$  ;  $E_n = I_{xz} = I_{zx}$  ;  $F_n = I_{xy} = I_{yx}$  .

## Annexe 4 : le Spiralift

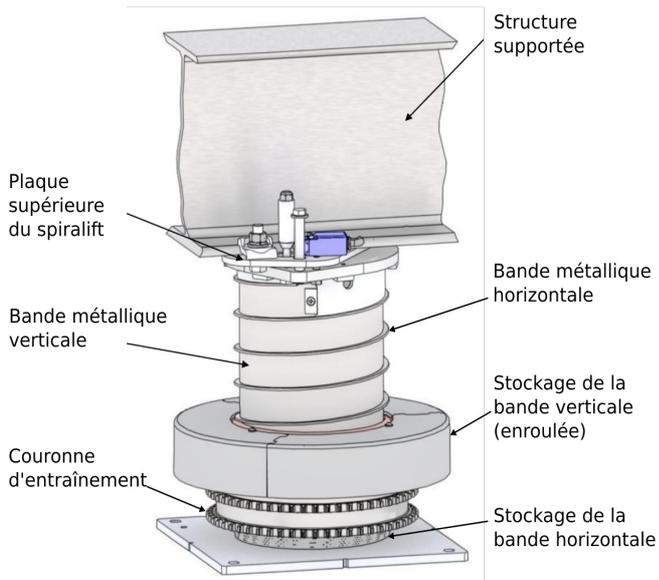


Figure a : système Spiralift

Le Spiralift, développé et commercialisé par l'entreprise québécoise GALA SYSTEMES fonctionne par l'enroulement en spirale de deux fines bandes métalliques. Une bande continue orientée verticalement donne la résistance à la colonne ainsi créée. La bande horizontale permet d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Le Spiralift a initialement été conçu pour les systèmes de montée/descente d'orchestres. Grâce au stockage par enroulement à sa base, le Spiralift peut actionner des scènes mobiles sans avoir recours à de gros travaux d'excavation (pour creuser des caissons de dégagement).

Le développement vertical de la bande est réalisé par le mécanisme interne au Spiralift présenté figures b et c.

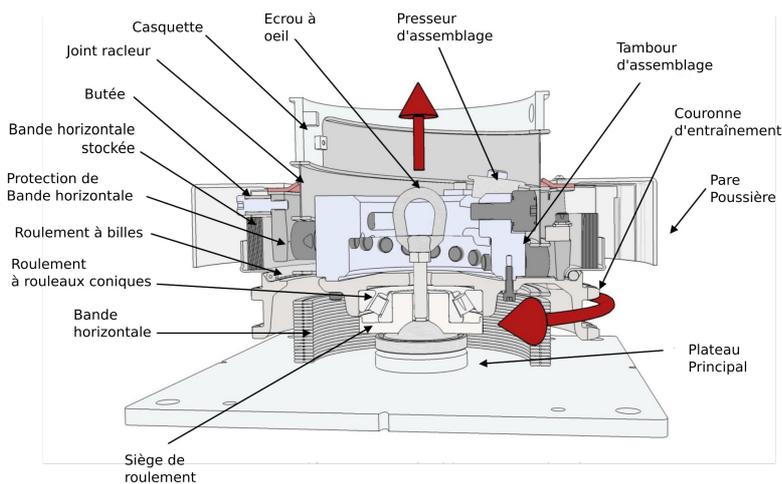


Figure b : vues intérieures du Spiralift

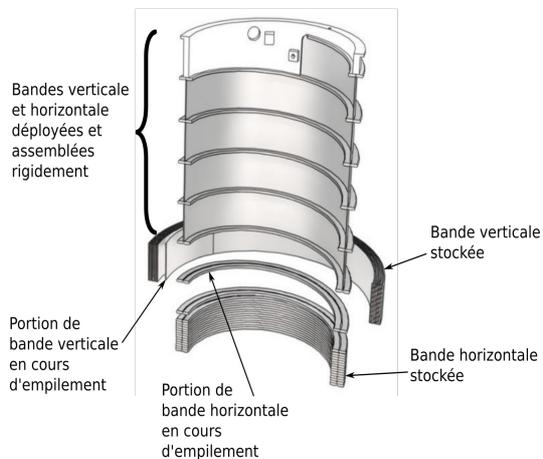
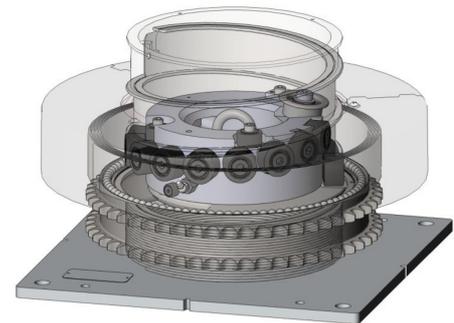


Figure c: empilement des bandes

Le tambour d'assemblage est mis en rotation par le moteur électrique. Les galets, positionnés en hélice sur le tambour, permettent de soulever la bande horizontale. Simultanément, la bande verticale est ramenée à la verticale de la bande horizontale par un poussoir (non visible sur ces figures).

L'ensemble formé par les bandes horizontale et verticale se trouve alors solidarisé à la sortie du Spiralift, et se comporte comme une poutre rigide tubulaire verticale de hauteur variable (voir figure c).