

SESSION 2023

AGREGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE D'UN SYSTÈME PLURITECHNOLOGIQUE

Durée : 6 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

Ce sujet comporte :

- le sujet et le travail demandé (pages 1 à 28) ;
- les documents techniques DT1 à DT5 (pages 29 à 35) ;
- le document réponse DR1 (page 36).

La Philharmonie de Paris

Présentation

Ce sujet porte sur le bâtiment de la Philharmonie de Paris. Son édification a débuté en septembre 2009 et s'est achevée en 2015 dans le parc de la Villette à Paris. Le projet a été confié aux Ateliers Jean Nouvel en avril 2007 à l'issue du concours de maîtrise d'œuvre. Bâtiment minéral aux allures de butte intégré au parc de la Villette, la Philharmonie offre des formes novatrices (voir **figure 1**).



Figure 1 : la Philharmonie de Paris dans le parc de la Villette, vue façade extérieure © W. Beaucardet, 2016.

La Philharmonie ne se contente pas d'être une grande salle de concert, elle répond aux enjeux de notre époque, offrant aux orchestres résidents ou invités les conditions de travail optimales, et propose de nombreux espaces, dont :

- la **Grande salle Pierre Boulez**, véritable innovation architecturale, scénographique et acoustique, elle propose 2400 places assises en configuration symphonique et jusqu'à 3600 places en configuration parterre debout (salle modulable) ;
- le **Studio**, doté de 208 places, permet au public d'assister aux répétitions publiques des orchestres dans des conditions acoustiques optimales. Il peut également accueillir des avant-concerts, des conférences ou encore des concerts de musique de chambre ;
- l'**Espace d'exposition** permet d'accueillir des expositions temporaires, permanentes et une multitude d'événements artistiques ;
- la **Philharmonie des enfants** est un grand espace éducatif accueillant des actions pédagogiques destinées à ouvrir les portes de la musique au plus grand nombre.

La **Philharmonie des enfants** et la **Grande salle Pierre Boulez** sont deux espaces d'intérêt dans ce sujet et sont présentés succinctement dans ce qui suit.

L'espace éducatif en journée : la Philharmonie des enfants

La Philharmonie de Paris, dont la dimension pédagogique constitue un axe fort, comprend de nombreuses salles destinées à l'initiation à la musique ou au perfectionnement. 1800 mètres carrés sont réservés au pôle pédagogique, dont un

espace récent dédié aux enfants de 4 à 10 ans, pour jouer, explorer, écouter, vivre et sentir la musique. Un parcours constitué de cinq univers thématiques, jalonné d'une trentaine d'installations manipulables et d'un studio immersif. À titre d'exemple, l'une des activités de cet espace pédagogique est *Maestra, Maestro !* (voir **figure 2**) à travers laquelle les jeunes musiciens sont invités à se mettre dans la peau d'un chef d'orchestre.



Figure 2 : l'orchestre symphonique de la salle *Maestra, Maestro !*

© Constance Guisset Studio.

L'espace de spectacle en soirée : la Grande salle Pierre Boulez

La Grande salle Pierre Boulez invente un nouveau modèle, celui d'une salle enveloppante et modulable. Une innovation à la fois architecturale, scénographique et acoustique. L'une des spécificités de la Grande salle Pierre Boulez réside dans sa modularité : elle est en mesure de s'adapter à différents genres musicaux tout en offrant à chaque fois le meilleur confort visuel et auditif (configuration symphonique et configuration parterre debout, voir **figure 3**).



Figure 3 : deux configurations symphonique (à gauche © J. Mignot, 2017) **et parterre debout** (à droite © M. Guthfreund, 2018).

Dans la Grande salle, la réponse acoustique combine haute clarté sonore et ample réverbération. Un système audacieux de balcons en porte-à-faux crée un espace intime et un volume composé de nuages acoustiques flottants allonge la réverbération (voir **figure 4**).

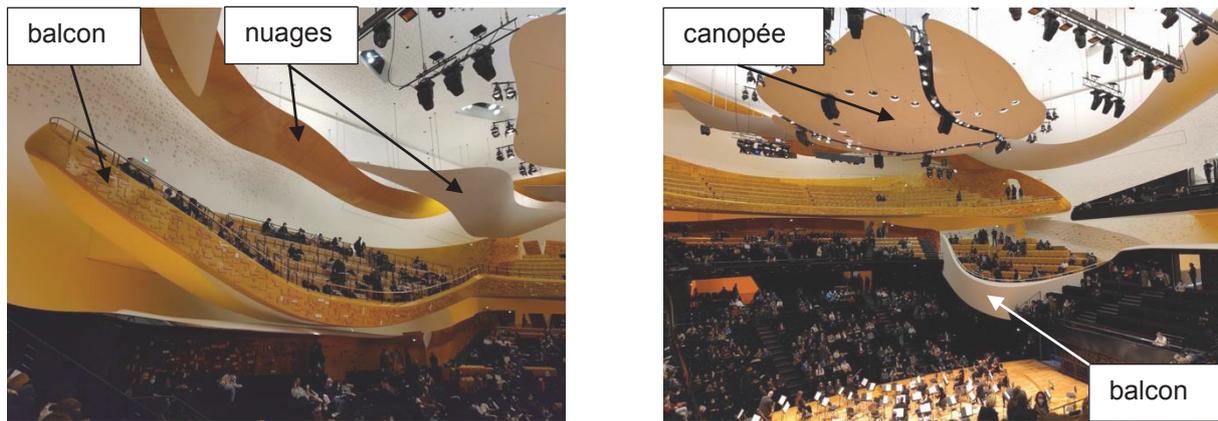


Figure 4 : nuages flottants, balcons en porte-à-faux et canopée motorisée.

La canopée (voir **figure 4**) est l'élément clé du principe des nuages acoustiques de l'architecte Jean Nouvel. Cette structure optimise la réponse acoustique de la salle en fonction des formations musicales. Surplombant la scène, sa position verticale est motorisée et c'est aussi l'endroit idéal pour suspendre les microphones et les spots lumineux.

Objectifs de l'étude

Le sujet se focalise sur les études suivantes :

1. le fonctionnement de l'activité pédagogique *Maestra, Maestro !* de la Philharmonie des enfants ;
2. les caractéristiques acoustiques de la Grande salle Pierre Boulez ;
3. le dimensionnement de la structure et de la motorisation de la canopée ;
4. les caractéristiques du réseau d'alimentation du sous-ensemble scénique de la Philharmonie.

Le cahier des charges partiel de la Philharmonie est présenté sous forme de diagramme partiel des exigences initiales dans le document technique **DT1**. Trois sous-diagrammes des exigences techniques sont donnés sur les documents techniques **DT2 A**, **DT2 B** et **DT2 C**. Les différentes parties de ce sujet proposent de vérifier plusieurs exigences du cahier des charges :

- les exigences liées à l'attraction *Maestra, Maestro !* de la Philharmonie des enfants (Id 1.1.1 et Id 1.1.2 du document technique **DT2 A**) ;
- les exigences liées à la canopée (Id 2.1.1, 2.1.3, 2.1.4 du document technique **DT2 B**) ;
- les exigences liées à l'alimentation électrique de la ligne scénique (Id 3.1.2.1, Id 3.1.2.2 et Id 3.1.3.1 du document technique **DT2 C**).

Bien que les différentes parties soient indépendantes, il est conseillé de traiter ce sujet dans l'ordre. Une synthèse générale de cette étude est demandée en fin de sujet.

PARTIE 1 – Activité *Maestra, Maestro !* à la Philharmonie des enfants

L'objectif de cette partie est de valider les exigences Id 1.1.1 et Id 1.1.2 (document technique **DT2 A**) de l'installation *Maestra, Maestro !* de la Philharmonie des enfants.

La Philharmonie des enfants est un espace permanent entièrement conçu pour les enfants. Ce lieu de 1000 m² offre aux élèves de la moyenne section de maternelle jusqu'au CM2 une expérience sensorielle et poétique : jouer, explorer, écouter, vivre et sentir la musique.

L'une de ces installations est *Maestra, Maestro !* où l'enfant se met dans la peau d'un chef d'orchestre (voir **figure 2**). Dans cette pièce inspirée de l'esthétique des salles de concert symphonique, l'enfant est invité à diriger un orchestre représenté par des silhouettes d'instruments animées par une création lumière. Depuis le pupitre et grâce à un tutoriel, il peut appréhender les gestes à reproduire pour assurer la direction de l'orchestre. L'installation se concentre sur deux aspects primordiaux (mais non exhaustifs) de la direction d'orchestre :

- la vitesse des gestes pour indiquer le tempo ;
- l'amplitude des gestes pour indiquer l'intensité.

Grâce à un logiciel de l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique (IRCAM) spécifiquement développé pour l'installation, les gestes de l'enfant sont détectés en temps réel par une caméra infra-rouge (IR) située sur le pupitre et influent directement sur l'exécution de l'œuvre musicale choisie.

L'activité qui dure quelques minutes est enregistrée grâce à une caméra 4K placée au-dessus de la scène et du pupitre. La caméra produit une vidéo HD couleur qui retranscrit le jeune chef d'orchestre dirigeant l'orchestre symphonique avec le son et les lumières. Cette vidéo est ensuite envoyée via courriel pour que le participant puisse la visionner plus tard chez lui. Cet envoi est possible par l'intermédiaire d'un bracelet à technologie RFID (Radio Frequency Identification) que porte l'enfant et qu'il badge sur le lecteur du pupitre au début de l'activité.

Un ordinateur placé sous la scène permet l'enregistrement de la vidéo HD et l'interprétation de la vidéo IR des mouvements du participant en morceau musical grâce au logiciel IRCAM. L'installation de l'activité est présentée sur la **figure 5**.

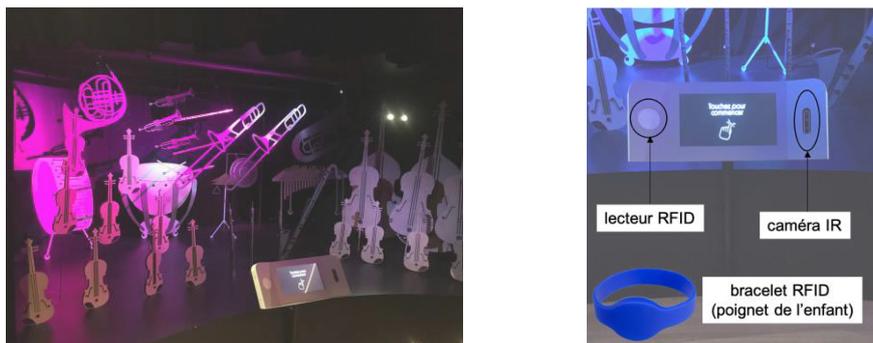


Figure 5 : installation. Scène (instruments, lumières, haut-parleurs) et interface (pupitre, écran, caméra, lecteur et bracelet RFID).

Le diagramme partiel des exigences de l'activité est donné sur le document technique **DT2 A**.

1.1 Transmission d'information du bracelet RFID

L'objectif de cette sous-partie est d'analyser l'information transmise par le bracelet RFID situé sur le poignet de l'enfant au décodeur, ce qui déclenchera ensuite l'envoi de la vidéo HD (enregistrement de l'activité) sur l'adresse courriel de l'enfant une fois l'activité terminée (validation de l'exigence Id 1.1.1).

Pendant l'activité, la caméra 4K produit des images à une fréquence de 25 Hz, chacune de taille de 3840×2160 pixels. Chaque pixel est représenté par une couleur codée sur 3 octets (RGB). On ne prendra pas en compte l'octet correspondant à la transparence du pixel.

Question 1 : indiquer la taille en Mo d'une vidéo de 2 minutes émise par la caméra 4K après compression et qui sera envoyée sur l'adresse courriel de l'enfant.

Afin d'acquérir l'information sur l'identité du participant (et son adresse e-mail), un bracelet RFID est fourni au jeune visiteur. L'information est un identifiant (numéro) relié à un compte client de la base de données de la Philharmonie dans laquelle est renseignée l'adresse e-mail. Au début de l'activité, le jeune participant badge son bracelet sur le lecteur RFID (voir **figure 5**).

Le bracelet est équipé d'une puce NTAG203 passive 13,56 MHz (voir le schéma de principe de la **figure 6**). Le lecteur RFID (ou décodeur) est un lecteur série 13,56 MHz dont la fiche constructeur est donnée sur le document technique **DT3**.

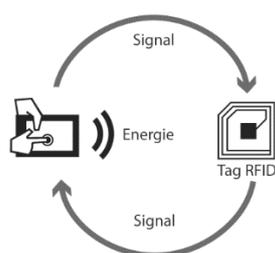


Figure 6 : Schéma de principe de la technologie RFID.

La communication entre le lecteur et le bracelet est de type RTF (Reader Talk First). Après l'envoi du signal radio par le lecteur, le bracelet renvoie le signal modifié sur 12 octets (10 octets pour le numéro du bracelet et 2 octets du résultat de l'opération *checksum*). Une liaison série asynchrone (voir document technique **DT3**) permet de transmettre le signal modifié reçu par le lecteur au microcontrôleur.

Un relevé de mesures transmises par le bracelet à proximité du lecteur a été effectué par oscilloscope ainsi que le décodage des deux premiers octets (voir **figure 7**). Les données du bracelet vers le lecteur sont transmises sous forme sérielle (bit après bit). D'après la documentation constructeur, la transmission d'un octet entre le bracelet et le lecteur s'effectue :

- avec un bit de START (niveau bas) et deux bits de STOP (niveau haut) ;
- en envoyant le LSB (Least Significant Bit) en premier ;
- en absence de communication, les signaux sont au niveau haut.

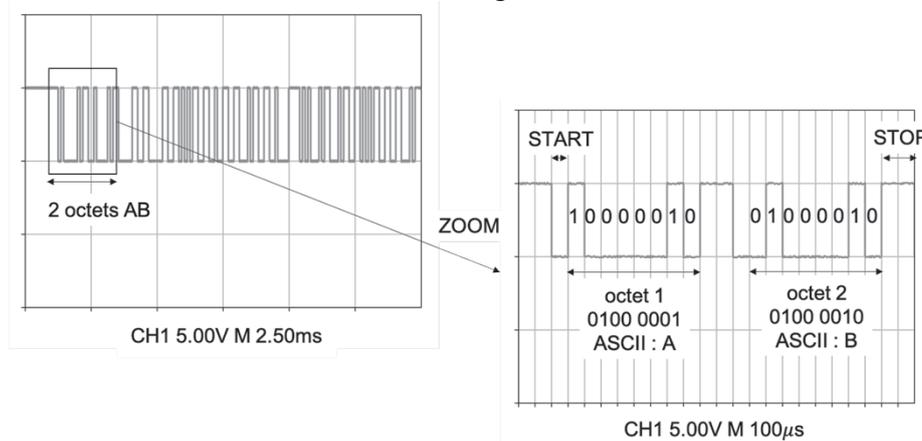


Figure 7 : relevé à l'oscilloscope de la mesure du numéro du bracelet avec décodage de la trame AB 00 52 42 E4 XX (XX correspond aux 2 octets *checksum* à déterminer à la question 4).

Question 2 : à l'aide de la **figure 7**, **déterminer** le débit de transmission de la trame en bits/s. **Calculer** la durée totale de la transmission de la trame complète en n'omettant pas le bit de START et les deux bits de STOP entre chaque octet.

Question 3 : **indiquer** les deux caractères ASCII *checksum* **XX** définis par l'opération *ou exclusive* des octets **AB 00 52 42 E4** en écriture binaire (voir document technique **DT3**).

Un zoom sur le relevé à l'oscilloscope des 2 octets *checksum* est donné sur la **figure 8**.

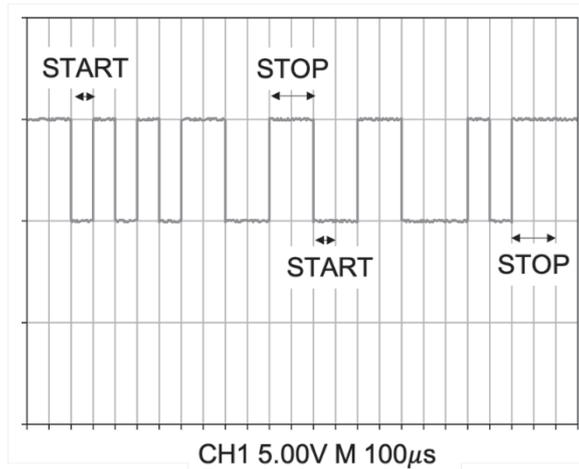


Figure 8 : zoom sur la transmission du *checksum* XX.

Question 4 : vérifier le résultat de la question 3 en décodant la trame de la figure 8. On pourra utiliser le tableau 1 ci-après.

HEX	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
ASCII symbol	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	@	A	B	C	D	E
HEX	46	47	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	4F	50	51	52	53	54	55
ASCII symbol	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U

Tableau 1 : table partielle des symboles ASCII et leur correspondance en écriture hexadécimale.

Question 5 : expliquer succinctement l'intérêt d'un *checksum* lors de la lecture de la trame RFID.

Question 6 : conclure quant au respect de l'ensemble des critères de l'exigence Id 1.1.1 du document technique DT2 A.

1.2 Interprétation des gestes de l'enfant filmés par la vidéo IR

L'objectif de cette sous-partie est de proposer une partie de l'algorithme (très simplifié) en langage Python permettant d'interpréter les gestes de l'enfant sur un enregistrement vidéo par le diagnostic en temps réel de la vitesse et de l'amplitude du mouvement de l'enfant et de valider l'exigence 1.2.1.

La caméra IR produit des images à une fréquence de 11 Hz et de taille de 562×1000 pixels (voir figure 9). À l'instant t , l'image est stockée dans un tableau $J(i,j,t)$ (type array) à deux dimensions en niveau de gris, la première dimension correspond à la coordonnée suivant y de l'image (numéro de ligne i du tableau) et la seconde dimension correspond à la coordonnée suivant x (numéro j de colonne). La dimension du tableau est donc $N \times M$ ou $N = 562$ et $M = 1000$.

La valeur associée à chaque pixel est un réel codé sur 32 bits (type float32) compris entre 0 et 1, indiquant le pourcentage de gris du pixel (0 codant le blanc et 1 le noir).

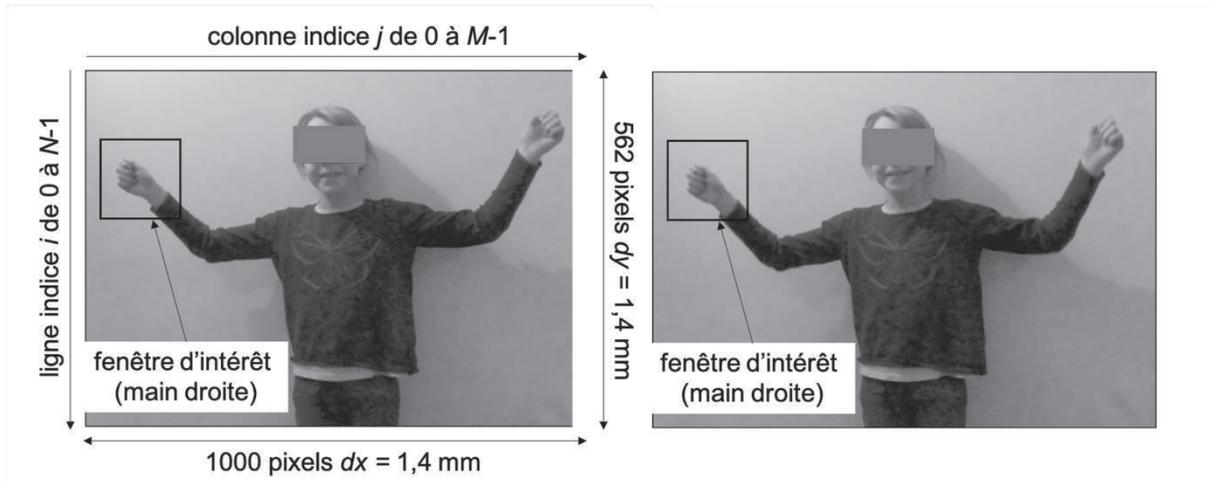


Figure 9 : exemple de deux images $J(i,j,t)$ et $J(i,j,t+\delta t)$ produite par la caméra IR aux deux instants t et $t+\delta t$. La fenêtre d'intérêt permet de suivre le faible mouvement de la main droite.

1.2.1 Estimation de l'amplitude du geste

La **figure 10** représente deux fenêtres d'intérêt (main droite de l'enfant) définies sur la **figure 9** aux instants t et $t+\delta t$. La sélection de la fenêtre d'intérêt I dans l'image J (suivi de la main droite) n'est pas explicitée dans ce sujet.

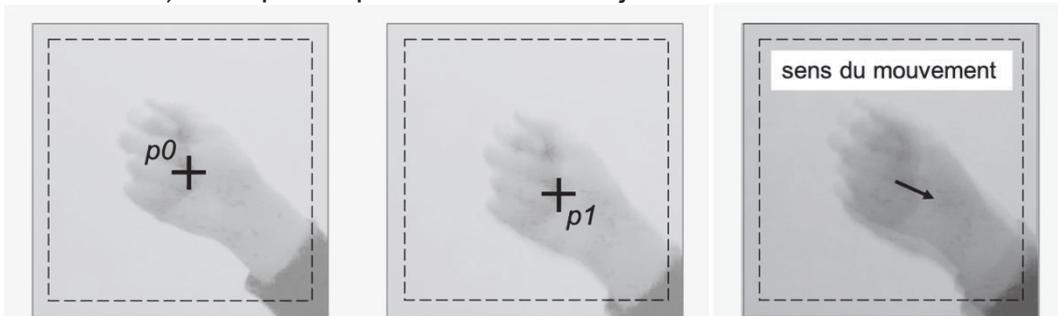


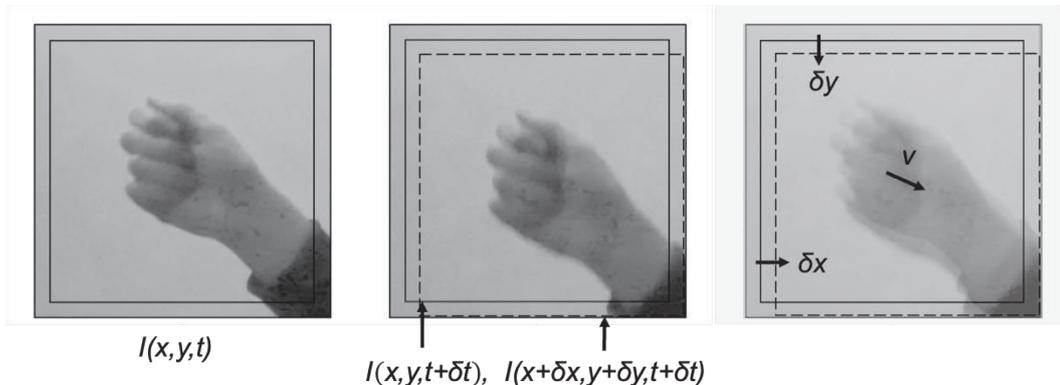
Figure 10 : fenêtre d'intérêt I (en traits pointillés) à deux instants t et $t+\delta t$ (main droite) et superposition des deux fenêtres.

Les coordonnées du centre de la main sont données par les deux listes à deux éléments (numéro de ligne et numéro de colonne, type int) $p0$ à l'instant t et $p1$ à l'instant $t+\delta t$. On note également la longueur d'un pixel des images de la **figure 10** $dx = dy$.

Question 7 : exprimer dans le langage Python, la ligne permettant d'estimer l'amplitude du mouvement (distance entre les deux points $p0$ et $p1$) entre les deux instants t et $t+\delta t$. On notera l'amplitude par la variable *distance*.

1.2.2 Estimation de la vitesse du geste

On note $I(x,y,t)$ et $I(x,y,t+\delta t)$ les deux images de dimension n^2 correspondant aux fenêtres d'intérêt présentées sur les **figures 10 et 11**.



**Figure 11 : images I à deux instants consécutifs $I(x,y,t)$ et $I(x,y,t+\delta t)$.
On a $I(x,y,t) \approx I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t)$.**

La méthode de Lucas-Kanade permet d'estimer le vecteur vitesse $v = (v_x, v_y)^T$ du déplacement de la main droite entre les instants t et $t+\delta t$ (voir **figure 11**). Elle suppose que le déplacement d'un pixel de l'image $I(x,y,t)$ entre deux instants consécutifs est petit et que le champ de vitesse est approximativement constant pour tous les pixels de l'image $I(x,y,t)$. Elle suppose donc, pour δx , δy et δt suffisamment petits, que :

$$I(x,y,t) \approx I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t) \text{ (voir figure 11).}$$

Question 8 : en utilisant la formule de Taylor à l'ordre 1, **proposer** une approximation de $I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t)$ en fonction de $I(x,y,t)$, de ses dérivées partielles $\frac{\partial I}{\partial x}$, $\frac{\partial I}{\partial y}$, $\frac{\partial I}{\partial t}$ et des petites variations δx , δy , δt .

On obtient ainsi l'équation de contrainte du mouvement apparent :

$$\frac{\partial I}{\partial x} v_x + \frac{\partial I}{\partial y} v_y = -\frac{\partial I}{\partial t}$$

On cherche les composantes du vecteur vitesse $v = (v_x, v_y)^T$, solution au sens des moindres carrés du système linéaire (sur-contraint) suivant :

$$\begin{aligned} I_x(p_0)v_x + I_y(p_0)v_y &= -I_t(p_0) \\ I_x(p_1)v_x + I_y(p_1)v_y &= -I_t(p_1) \\ &\dots \\ I_x(p_{n^2-1})v_x + I_y(p_{n^2-1})v_y &= -I_t(p_{n^2-1}), \end{aligned}$$

avec p_i les pixels à l'intérieur de l'image $I(x,y,t)$, et I_x , I_y , I_t sont les dérivées partielles de l'image $I(x,y,t)$ selon les variables d'espace x , y et de temps t évaluées au point p_i et au temps courant t . Ces équations peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$A \cdot v = P.$$

Question 9 : expliciter les expressions des matrices A et P en fonction des $I_x(p_i)$, $I_y(p_i)$ et $I_t(p_i)$.

On peut montrer que la solution de cette équation matricielle au sens des moindres carrés s'écrit :

$$v = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P.$$

On se propose dans la suite d'écrire les fonctions permettant de calculer la matrice P (voir document technique **DT4**). On note les deux images $I(x,y,t)$ et $I(x,y,t+\delta t)$ respectivement $I1$ et $I2$ dans le programme Python. Les deux matrices $I1$ et $I2$ ont pour dimension n^2 .

Question 10 : compléter le document réponse **DR1** pour définir la fonction `derive_temp(I1, I2, dt)` qui permet de calculer la dérivée partielle $\frac{\partial I}{\partial t}$ par la méthode d'Euler : I_t à l'instant courant t .

Pour construire la matrice P , il faut réécrire la matrice I_t sous la forme de listes (le parcours des pixels se fait de haut en bas puis de la gauche vers la droite de l'image).

Question 11 : compléter le document réponse **DR1** pour définir la fonction `liste(mat)` prenant en argument un tableau (par exemple I_t) et qui renvoie la liste correspondante.

La fonction `Lucas_Kanade` permettant de calculer le vecteur vitesse $v = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P$ est définie dans l'encadré de la **figure 12**. Les variables I_x et I_y sont respectivement les dérivées spatiales $\frac{\partial I}{\partial x}$ et $\frac{\partial I}{\partial y}$ de l'image $I(x,y,t)$, supposées déterminées.

```
def Lucas_Kanade(Ix,Iy,It) :
    ptsIx = liste(Ix)
    ptsIy = liste(Iy)
    ptsIt = liste(It)
    # calcul de Vx Vy : A V = P
    A = zeros((len(ptsIx),2))
    P = zeros((len(ptsIx),1))
    for i in range(len(ptsIx)) :
        A[i,0] = ptsIx[i]
        A[i,1] = ptsIy[i]
        P[i] = - ptsIt[i]
    At = transposee(A)
    C = produit(At,A)
    C = inverse(C)
    C = produit(C,At)
    V = produit(C,P)
    return V
```

```
V = Lucas_Kanade(Ix,Iy,It)
```

Figure 12 : définition de la fonction `Lucas_Kanade` en langage Python.

Question 12 : en utilisant les complexités des fonctions données sur le document technique **DT4**, **estimer** la complexité de la fonction *Lucas_Kanade* définie dans l'encadré de la **figure 12** en fonction de n .

Question 13 : **comparer** l'efficacité de la méthode différentielle de *Lucas-Kanade* par rapport à une méthode fréquentielle qui aurait une complexité $O(n^4)$ (par algorithme naïf). **Conclure** sur le respect de l'exigence Id 1.2.1 du document technique **DT2 A** et **préciser** un autre critère à vérifier pour que la méthode différentielle (de Lucas-Kanade) reste suffisamment rapide et/ou pertinente.

PARTIE 2 – Étude acoustique de la Grande salle Pierre Boulez

L'objectif est de mettre en évidence les qualités acoustiques de la Grande salle et valider l'exigence Id 2.1 (document technique **DT2 B**).

L'acoustique de la grande salle de concert répond aux normes internationales les plus exigeantes. Le modèle adopté pour cette salle mixe deux configurations classiques de salles de concert :

- « en vignobles » privilégiant l'intimité, les musiciens étant entourés par les spectateurs ;
- « boîte à chaussures » permettant de réduire la largeur de la salle et de multiplier les réflexions acoustiques précoces.

2.1 Isolement acoustique de la grande salle

La grande salle est isolée vis-à-vis de l'extérieur. L'isolement acoustique prend en compte les sources sonores du site représentées sur la **figure 13**. Par exemple, le toit terrasse, accessible aux piétons génère des vibrations qui peuvent nuire à l'acoustique de la grande salle de concert. Une structure du type « boîte dans la boîte » a été adoptée et la toiture a été montée sur plots anti-vibratiles afin de couper les transmissions.

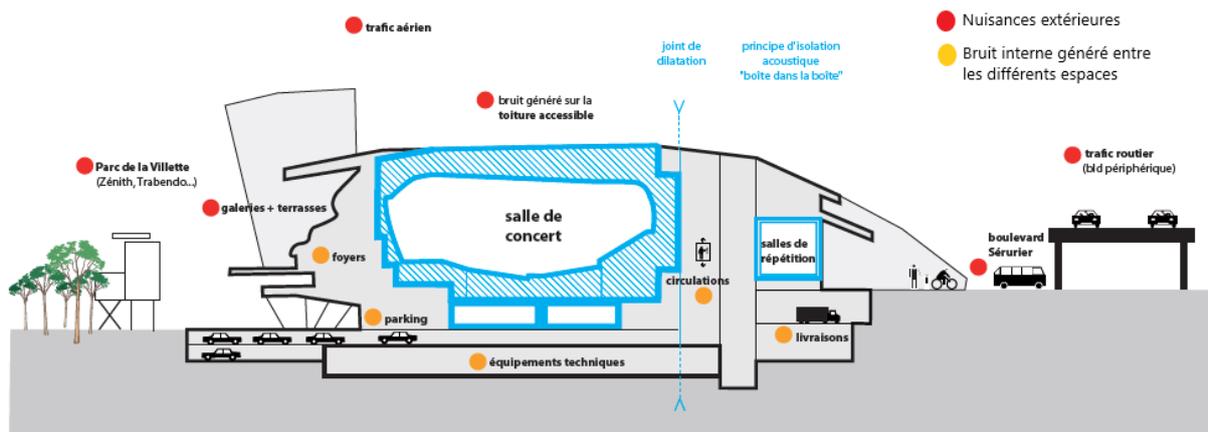


Figure 13 : isolement de la grande salle de l'environnement extérieur.

Question 14 : représenter sur un schéma, le principe d'isolement de la grande salle de concert du toit terrasse par des plots anti-vibratiles.

2.2 Performances acoustiques de la grande salle

La qualité acoustique de la grande salle est le résultat d'un équilibre entre le son direct perçu par l'auditeur, les sons réfléchis sur les différentes parois et surfaces de la salle et les sons réverbérés. Sur ce dernier point, le temps de réverbération moyen d'un son dans la grande salle doit être de l'ordre de 2,3 secondes dans le cas d'un concert en configuration symphonique.

Pour simplifier, la salle est considérée comme un parallélépipède dont les dimensions sont les suivantes : largeur $l = 46$ m ; longueur $L = 58$ m ; hauteur $h = 22$ m.

Le volume total de la salle, incluant la scène sera noté V en m^3 . La salle comporte des balcons situés sur deux niveaux qui seront supposés horizontaux et leurs volumes seront négligés. L'ensemble des surfaces des balcons sera noté $S_B = 3400$ m^2 .

Le temps de réverbération T_r de la salle est défini comme étant le temps nécessaire pour que le niveau de pression acoustique diminue de 60 dB après l'arrêt de la source sonore. Dans l'hypothèse d'un champ sonore diffus et homogène, le temps de réverbération peut être calculé à l'aide de la formule de Sabine qui le relie au volume V de la salle et à l'aire d'absorption équivalente A_0 selon l'équation : $T_r = 0,16 \frac{V}{A_0}$.

L'aire d'absorption équivalente A_0 est donnée par la relation : $A_0 = \sum_i \alpha_i S_i$ où les α_i sont les coefficients d'absorption des surfaces absorbantes S_i constituant la salle.

Question 15 : sachant que la mesure du temps de réverbération dans la salle vide donne $T_{r0} = 3$ s, **calculer** la valeur de l'aire d'absorption équivalente A_0 et celle du coefficient d'absorption acoustique moyen de la salle α_0 .

Question 16 : la salle est prévue pour accueillir 2400 spectateurs. On considère que l'aire moyenne occupée par un spectateur est de $0,5 \text{ m}^2$ et que son coefficient d'absorption moyen est $\alpha_{sp} = 0,8$. **Calculer** l'aire d'absorption équivalente de la salle comble A_c et le temps de réverbération T_{rc} .

Question 17 : la canopée (voir **figure 4**), située au-dessus de la scène, peut être réglée en hauteur entre 9 m et 18 m. Sur le plan acoustique, **expliquer** l'intérêt de pouvoir régler en hauteur la canopée en fonction du type de formations musicales présentes sur la scène (orchestre symphonique, petites formations musicales ou solistes).

Dans le cas de concerts de musique dite « amplifiée » (rock, musique électronique), la configuration de la salle peut être modifiée. Il est possible d'aplanir le parterre et la scène de manière à former un vaste plateau capable d'accueillir des spectateurs debout. Dans ce cas, une fois les gradins situés à l'arrière de la scène repliés, les musiciens prennent place en fond de salle. Des rideaux absorbants en velours d'une surface de 450 m^2 sont alors déployés entre la face arrière des balcons et la paroi de la scène.

Question 18 : **expliquer** l'influence des rideaux absorbants sur les caractéristiques acoustiques de la salle dans cette configuration.

Les acousticiens de la grande salle de concert ont conduit des études sur des maquettes informatiques et des maquettes physiques (**figures 14 et 15**).

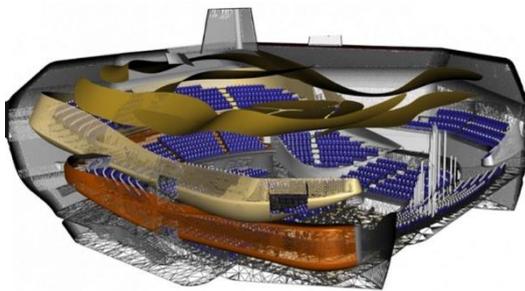


Figure 14 : maquette numérique.



Figure 15 : maquette au 1/10^{ème}.

Question 19 : le processus Building Information Modeling (BIM) consiste à concevoir un avatar numérique de la construction, avant sa réalisation. **Expliquer** comment les études acoustiques peuvent s'intégrer dans le processus BIM appliqué à la conception de la grande salle de concert et ainsi participer à la validation de l'exigence Id 2.1 du document technique **DT2 B**.

PARTIE 3 - Étude de la canopée

L'objectif de cette partie est de vérifier que les solutions envisagées pour la conception de la structure de la Canopée et de sa motorisation permettent de satisfaire les exigences Id 2.1.1 – Structure, Id 2.1.3 – Sécurité, et Id 2.1.4.2 – Vitesse (document technique **DT2 B**).

3.1 Dimensionnement d'un fer rayonnant de la canopée

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier que l'exigence de contrainte est respectée.

La canopée est suspendue au centre de la grande salle de concert. Les exigences liées à la conception de la canopée sont précisées dans le diagramme d'exigences sur le document technique **DT2 B**.

L'ensemble de la canopée, décrit sur les **figures 16 et 17**, comprend :

- une structure primaire hexagonale en IPE de 300 ;
- un support platelage en IPE de 120 ;
- une structure secondaire de fers rayonnants en IPE de 200 accrochée à la structure primaire hexagonale ;
- un habillage servant de réflecteur acoustique accroché sur la structure de fers rayonnants ;
- des accessoires (projecteurs, caméra, ...) accrochés sur un mât télescopique à l'extrémité de certains fers rayonnants.

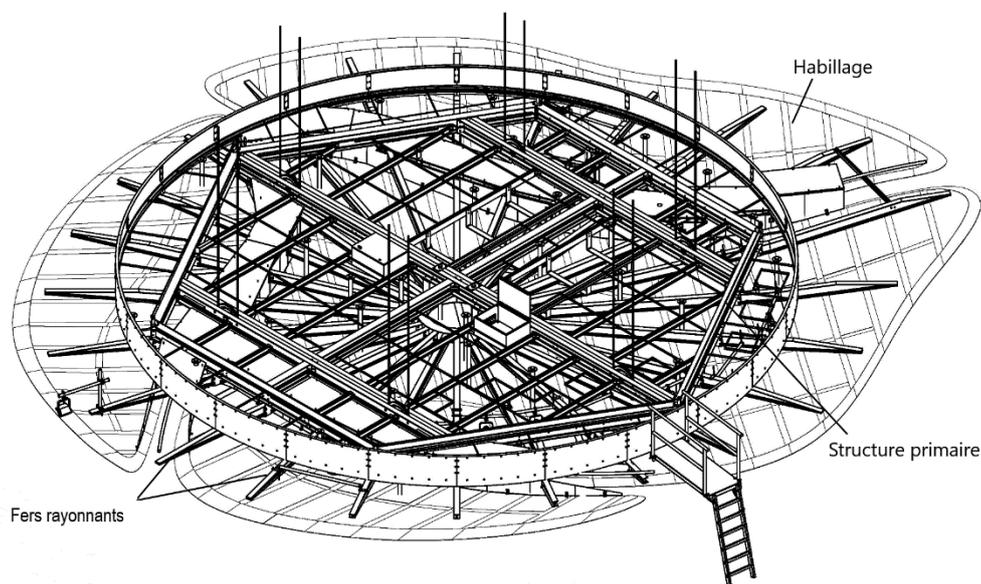


Figure 16 : structure de la canopée avec l'habillage.

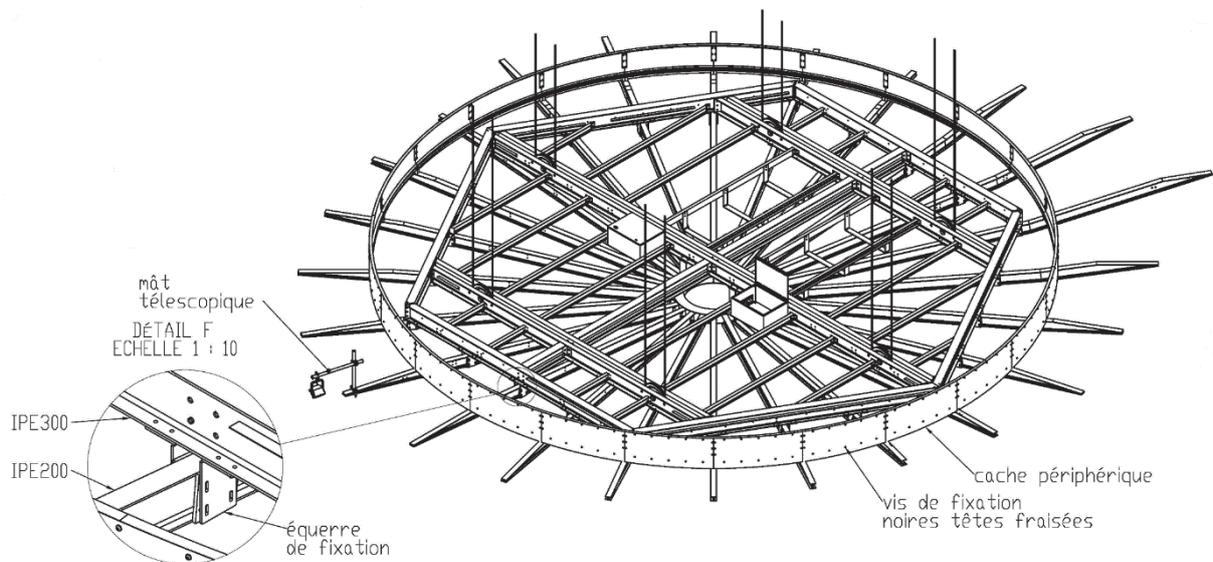


Figure 17 : structure primaire et secondaire de la canopée (sans l'habillage).

L'étude porte sur les 24 fers rayonnants. Compte tenu de l'implantation d'un fer et du chargement qui lui est appliqué, le modèle retenu, par l'architecte, pour l'étude en résistance des matériaux du fer le plus long est le suivant :

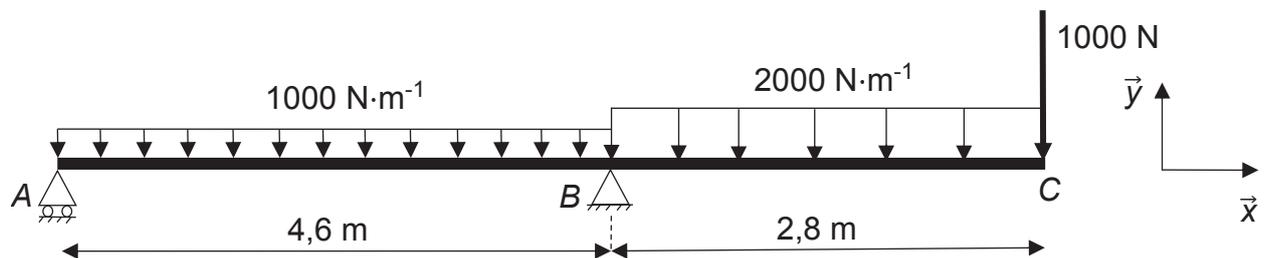


Figure 18 : modélisation d'un fer rayonnant.

Hypothèses du modèle de la figure 18 :

- Longueur maximale de certains fers rayonnants en IPE 200 : 7,4 m
- Matériau : Acier S235
- Module d'Young : $E = 210\,000 \text{ MPa (N}\cdot\text{mm}^{-2}\text{)}$
- Module de Coulomb : $G = 80\,000 \text{ MPa}$
- Limite d'élasticité : $R_e = 235 \text{ MPa}$

La **figure 19** indique :

- la définition générale du moment quadratique I_{Gz} d'une section droite ;
- la valeur du moment quadratique $I_{Gz} = bh^3/12$ d'une section rectangulaire de « base » b et de « hauteur » h ;
- la forme et les dimensions en mm de la section droite d'un IPE 200.

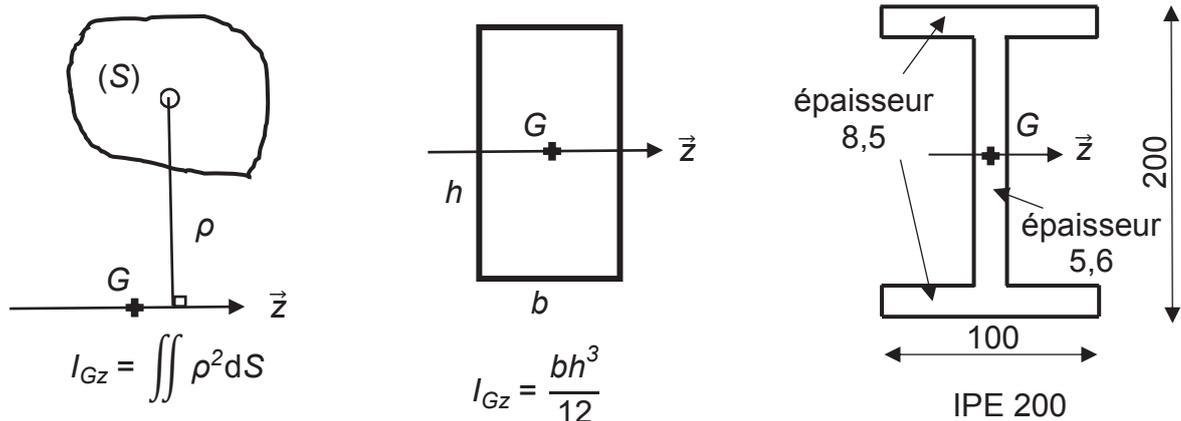


Figure 19 : moment quadratique d'un IPE 200.

Question 20 : afin de conduire l'étude de résistance des matériaux, il est nécessaire d'évaluer le moment quadratique de la section droite d'un IPE 200, noté I_{Gz} . **Déterminer** la valeur numérique du moment quadratique I_{Gz} de l'IPE 200.

Question 21 : **déterminer** les actions mécaniques en A et B.

Pour les questions suivantes, on utilisera la valeur $I_{Gz} = 20\,000\,000\text{ mm}^4$ et on négligera les effets de l'effort tranchant par rapport à ceux du moment fléchissant.

Question 22 : **calculer** la valeur du moment fléchissant en B.

Question 23 : **préciser** la nature de la contrainte dans la section en B. **Calculer** la valeur de la contrainte maximale dans la section en B.

Question 24 : que peut-on **conclure** sur le choix du matériau retenu pour fabriquer les fers rayonnants ?

3.2 Étude des câbles de suspension de la canopée

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier l'exigence de tension maximale des câbles 2.1.3.3.

La structure primaire hexagonale, décrite dans la partie précédente, est suspendue au plafond par 6 câbles mouflés, actionnés chacun par un treuil fixé au plafond (**figure 20**). Deux ensembles de motorisation identiques assurent, de manière synchronisée, l'élévation de la plateforme. Chacun de ces ensembles est constitué de (**figure 21**) :

- un motoréducteur asynchrone triphasé, de rapport de réduction $r_1 = 1/7,28$, de moment d'inertie ramené à l'arbre moteur de $J_m = 280 \cdot 10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Les autres caractéristiques sont données sur le document technique **DT5** ;
- trois renvois d'angle, à simple ou double sortie, ainsi que des arbres de transmission à doubles joints de cardan ;
- trois treuils, constitués chacun d'un réducteur, de rapport de réduction $r_2 = 1/122,48$, et d'un tambour de rayon $R = 282\text{ mm}$ sur lequel s'enroule un brin de câble. L'autre brin est fixé au plafond.

Ces deux ensembles sont synchronisés entre eux par un arbre de synchronisation semi-rigide. La canopée étant située au-dessus du public, ces six câbles et deux motoréducteurs assurent ainsi une redondance sur le maintien de la structure, afin de satisfaire les exigences de sécurité.

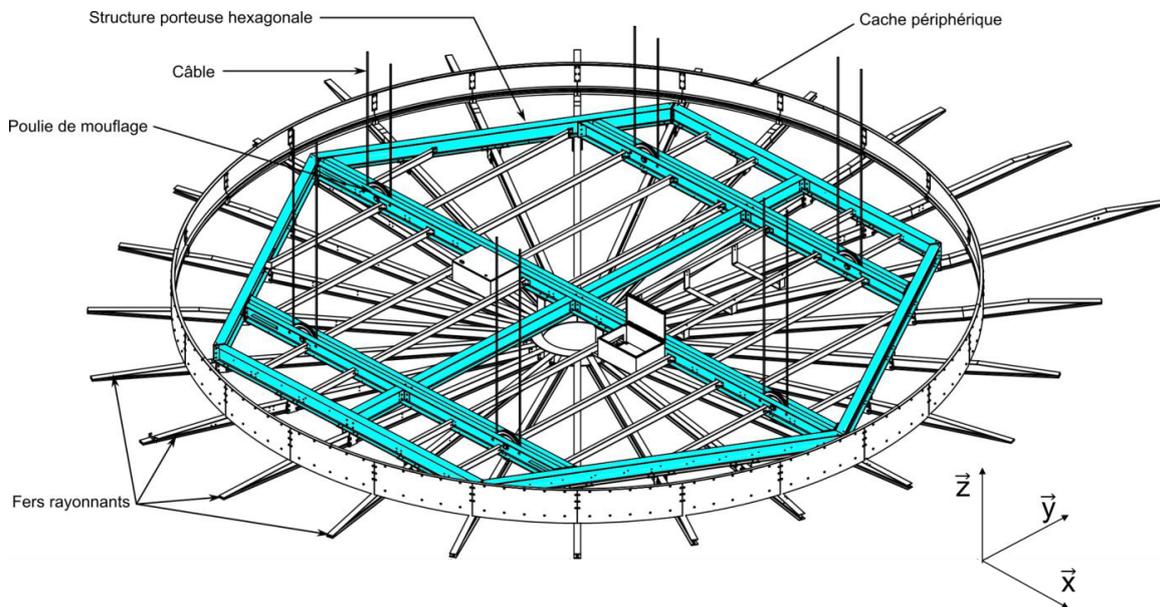


Figure 20 : structure de la canopée (habillage non représenté). La structure primaire hexagonale est représentée en bleu.

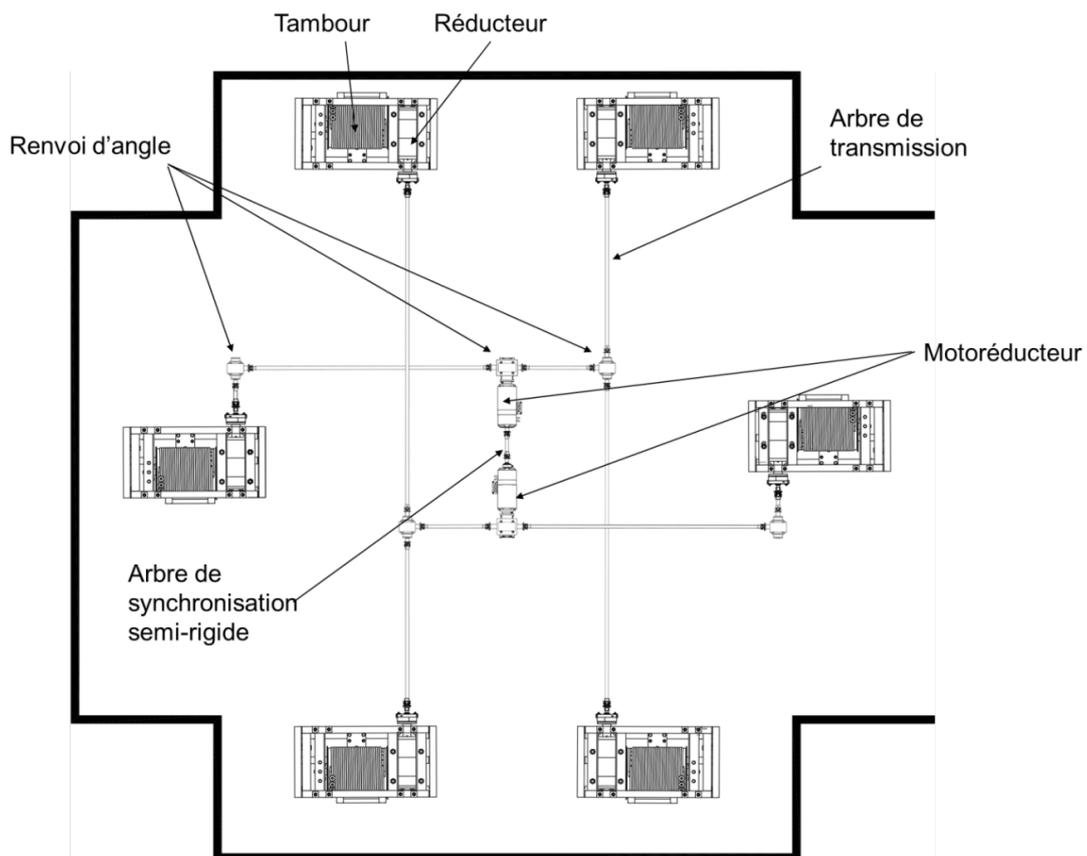


Figure 21 : schéma de l'ensemble de la motorisation de la canopée (vue de dessus).

Les vibrations verticales de la Canopée, associées aux oscillations en torsion des arbres de transmission sont susceptibles de créer des surtensions dans les câbles lors de son élévation. Pour vérifier l'exigence 2.1.3.3, on propose un modèle acausal, utilisant des raideurs que l'on va déterminer partiellement. Ce modèle est représenté sur la **figure 22**, où l'on note :

- C_{m1} et C_{m2} les couples moteurs exercés sur les deux rotors ;
- $k = 4070 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ la raideur en torsion de l'arbre de synchronisation ;
- k_c la raideur d'un câble ;
- $M = 39\cdot 10^3 \text{ kg}$ la masse totale de la canopée.

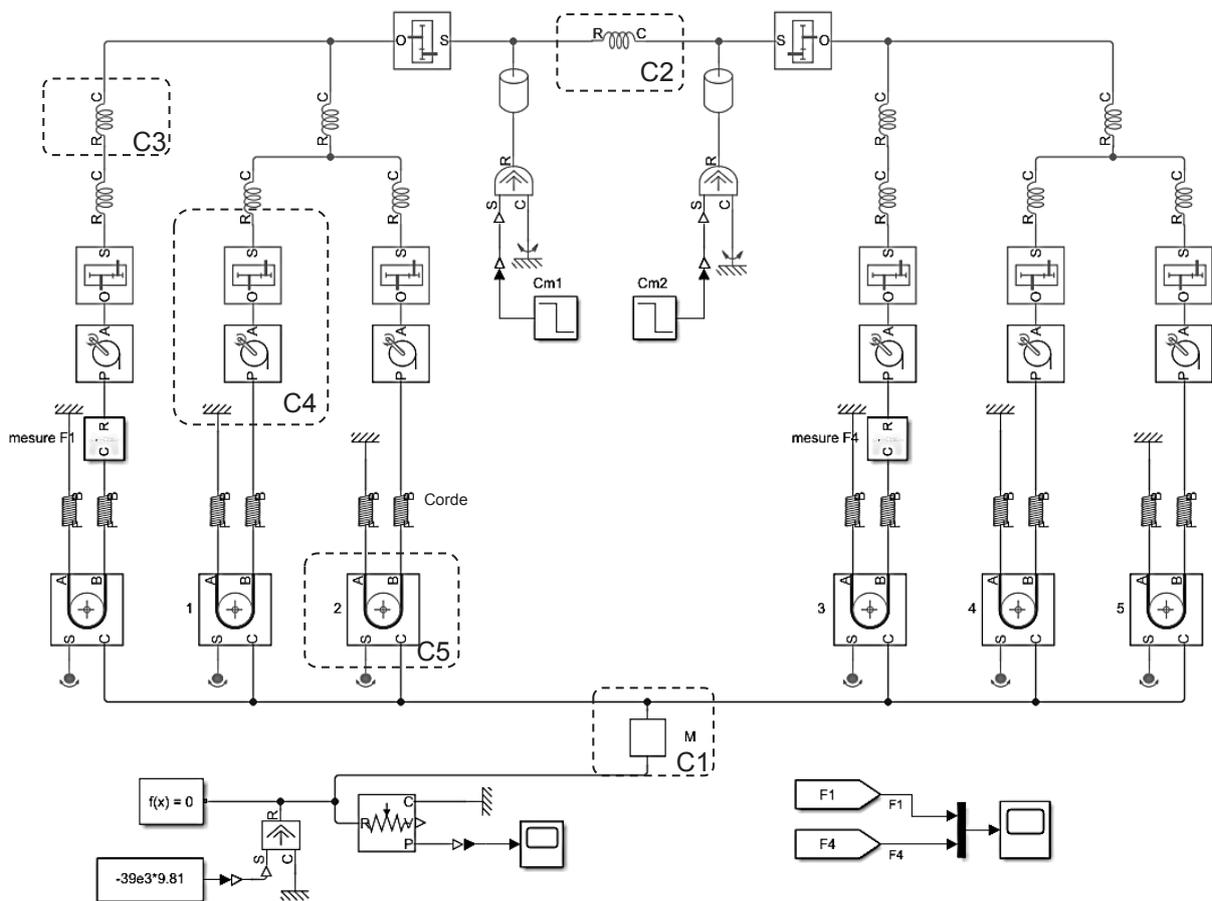


Figure 22 : modèle acausal de la transmission de la canopée.

Question 25 : nommer les composants technologiques modélisés dans les cadres C1 à C5.

La **figure 23** décrit la réponse en effort d'un bloc « corde » du modèle acausal à une sollicitation de vitesse imposée de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pour une raideur renseignée de $100 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$.

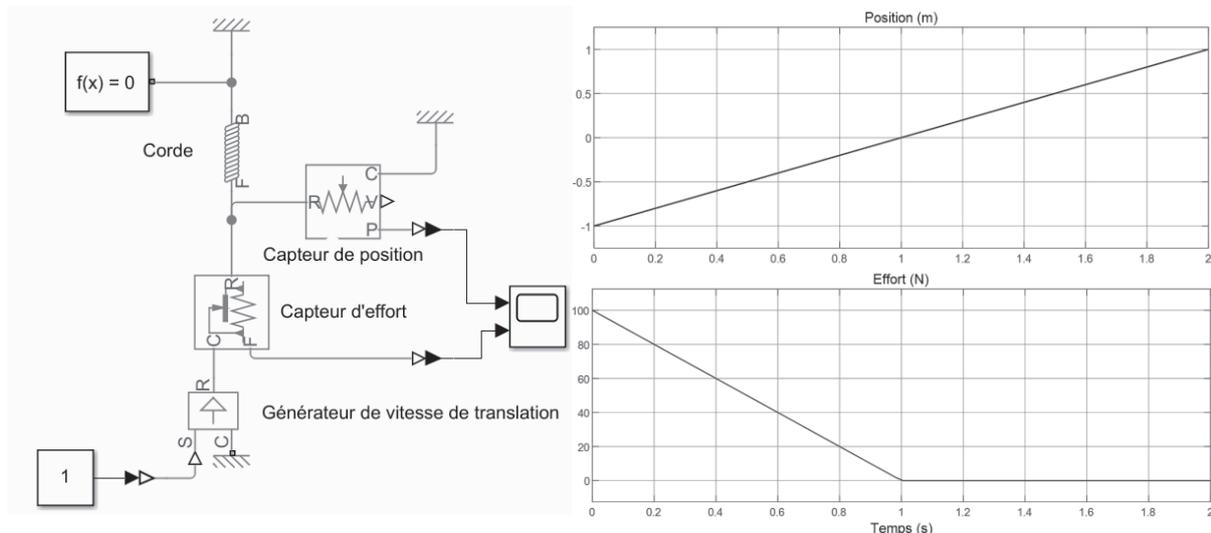


Figure 23 : réponse d'un bloc « corde » en effort à un déplacement imposé et modèle acausal associé.

Question 26 : expliquer la différence de comportement entre ce bloc « corde » et un bloc de type ressort. Justifier l'emploi de ce type de bloc pour modéliser un câble.

Afin de déterminer la raideur de torsion d'un arbre, on considère un cylindre creux comme décrit sur la **figure 24**, soumis à un moment de torsion \vec{M}_t à ses deux extrémités.

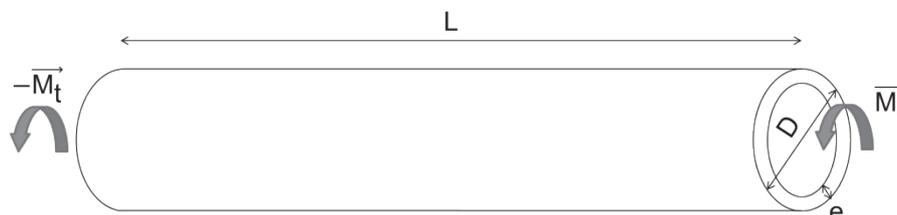


Figure 24 : modèle de calcul de la raideur en torsion d'un arbre.

On note k_t la raideur de l'arbre en torsion telle que $M_t = k_t \cdot \Delta\theta$ où $\Delta\theta$ est l'angle de rotation relatif entre les deux sections extrêmes.

On rappelle que le moment quadratique d'une section circulaire par rapport à son centre vaut $I_0 = \frac{\pi D^4}{32}$. On note G le module d'élasticité transversal.

Question 27 : déterminer l'expression de la raideur de l'arbre k_t , en fonction de G , L , D et e . Faire l'application numérique pour $G = 81000$ MPa, $L = 4$ m, $D = 50$ mm et $e = 3$ mm.

Les câbles supportant la canopée sont en acier galvanisé de module d'Young égal à $210 \cdot 10^3$ MPa, de section 216 mm², de charge maximale admissible 348 kN. On se place dans le cas le plus défavorable, lorsque la canopée est en position de maintenance. Leur longueur déroulée est alors de 18 m.

Question 28 : proposer et justifier une valeur pour la raideur k_c d'un câble.

On peut enfin compléter le modèle acausal avec les différentes raideurs des lignes d'arbres, en supposant infiniment rigides les réducteurs et renvois d'angle. Les résultats de simulation pour le cas le plus défavorable au regard de la tension dans les câbles (où seul un moteur est fonctionnel) sont présentés **figure 25**, avec et sans arbre de synchronisation.

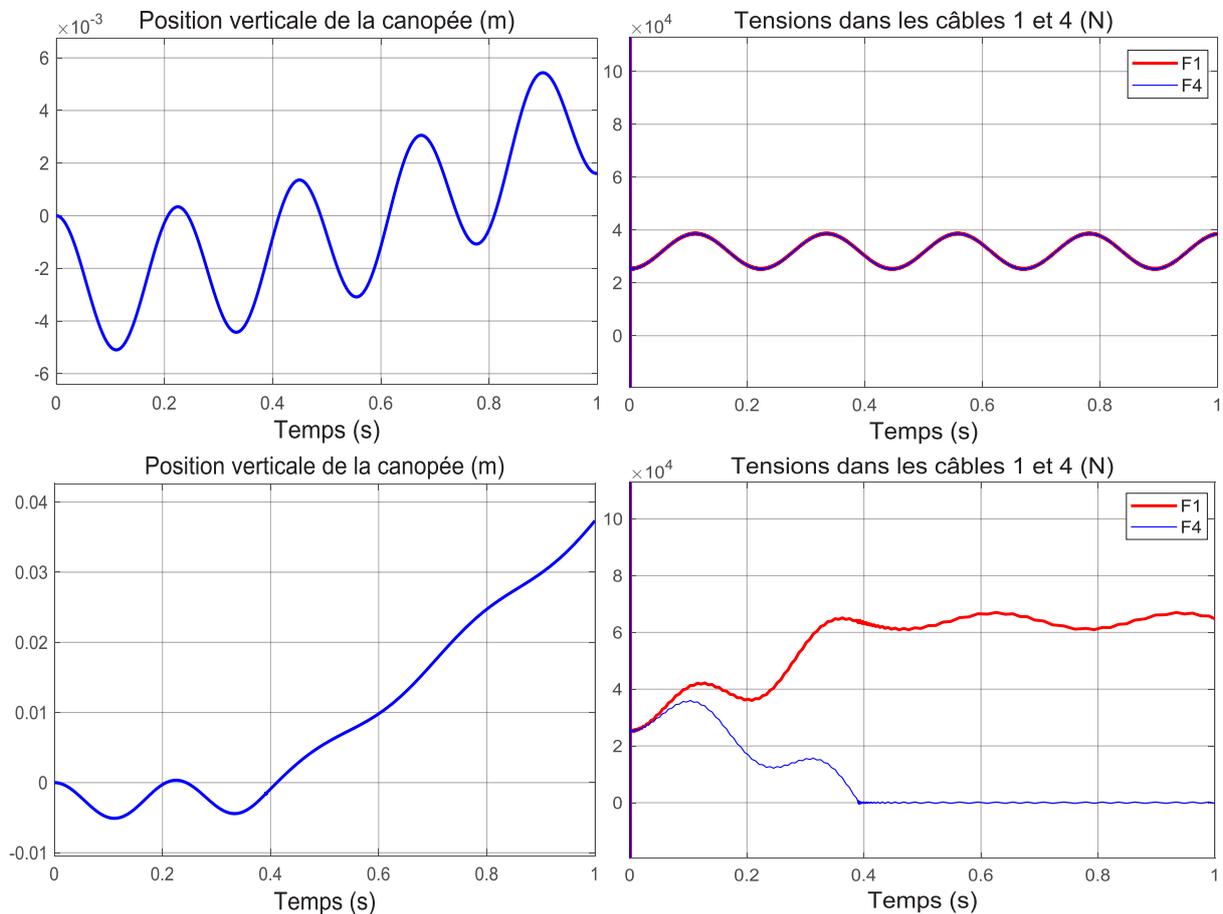


Figure 25 : résultats de simulation pour des couples moteurs imposés de 65 N·m et 0 N·m, avec (en haut) et sans (en bas) arbre de synchronisation.

Question 29 : justifier la présence de l'arbre de synchronisation. Conclure quant au respect de l'exigence Id 2.1.3.3.

Question 30 : mesurer la période d'oscillation. Sachant que les joints de cardan créent des à-coups de couple à une fréquence deux fois plus élevée que la fréquence de rotation des arbres, et en supposant que les moteurs tournent à leur vitesse nominale, déterminer s'il y a un risque de mise en résonance verticale de la canopée. Proposer, le cas échéant, une solution.

3.3 Validation de la motorisation de la canopée

L'objectif de cette partie est de vérifier que la motorisation choisie permet bien de satisfaire les exigences de vitesse Id 2.1.4.2 et de sécurité Id 2.1.3.2.

La chaîne de transmission de la canopée est décrite en partie précédente. On rappelle que les caractéristiques des moteurs sont données sur le document technique **DT5**. On note ω_m la vitesse angulaire du rotor du moteur, et v la vitesse d'élévation de la canopée.

Question 31 : déterminer le rapport de transmission global $r_g = \frac{v}{\omega_m}$ et conclure quant à la validation de l'exigence Id 2.1.4.2 de vitesse maximale.

On note $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ le repère fixé à la salle, dont l'origine O se trouve au centre de la structure porteuse hexagonale de la canopée. On note A_i le centre des poulies. Les câbles enroulés sur les poulies de centre $A_1, A_3,$ et A_5 sont reliés au premier motoréducteur, ceux enroulés sur les poulies de centre $A_2, A_4,$ et A_6 sont reliés au second motoréducteur (voir **figures 20** et **26**).

Les points A_i sont dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y}) et sont supposés positionnés à une même distance $a = 4,125$ m du centre O . On note α_i l'angle tel que $\alpha_i = (\vec{x}, \overrightarrow{OA_i}) = (i-1) \cdot \frac{\pi}{3}$.

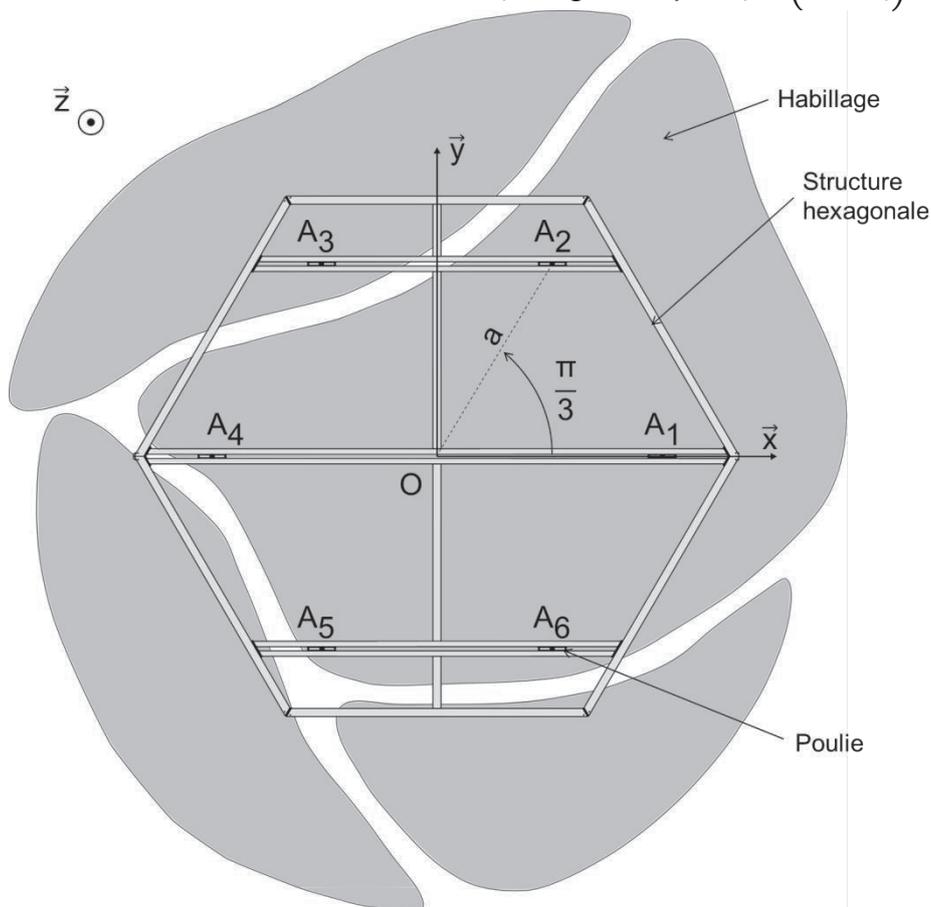


Figure 26 : paramétrage de la canopée. Les fers rayonnants ne sont pas représentés.

On pose les **hypothèses** suivantes :

- l'équipement audiovisuel, de masse totale $15 \cdot 10^3$ kg, est supposé uniformément réparti sur la structure hexagonale ;
- la masse propre de la structure hexagonale (profilés métalliques et caillebotis) est égale à $7 \cdot 10^3$ kg, supposée uniformément répartie ;
- l'ensemble des fers rayonnants a une masse totale $3,4 \cdot 10^3$ kg. Le centre de gravité de cet ensemble, noté G_f est tel que $\overrightarrow{OG_f} = x_f \cdot \vec{x} + y_f \cdot \vec{y} + z_f \cdot \vec{z}$ avec $x_f = 0,075$ m ; $y_f = 0,14$ m ; $z_f = -0,39$ m ;
- l'habillage, dont la forme surfacique est donnée **figure 26**, a une masse surfacique estimée à $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Le centre G_h de cette surface totale est tel que $\overrightarrow{OG_h} = x_h \cdot \vec{x} + y_h \cdot \vec{y} + z_h \cdot \vec{z}$ avec $x_h = 0,073$ m ; $y_h = 0,37$ m ; $z_h = -0,41$ m. La surface a une superficie de 175 m^2 ;
- les câbles ont une masse linéique de $1,85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$. La longueur d'un seul brin varie de 9 m en position « jazz » à 18 m en position « maintenance » ;
- les poulies sont en liaisons pivot parfaites d'axe (A_i, \vec{y}) avec la structure hexagonale. Les efforts exercés par les poulies sur la structure sont exercés aux points A_i , et notés $\vec{F}_i = F_i \cdot \vec{z}$.

On note M la masse totale de la canopée, G son centre de gravité défini par $\overrightarrow{OG} = x_G \cdot \vec{x} + y_G \cdot \vec{y} + z_G \cdot \vec{z}$.

Question 32 : **montrer** que la masse des câbles est négligeable par rapport à la masse totale de la canopée.

Question 33 : **déterminer** les coordonnées x_G , y_G et z_G , dans le repère R , du centre de gravité de l'ensemble de la canopée. En **déduire** quel est le câble le plus sollicité, dans le cas où un seul motoréducteur est fonctionnel et l'arbre de synchronisation est absent.

Pour se placer dans le cas le plus défavorable, on suppose que seul le deuxième ensemble de motorisation est actif et que l'arbre de synchronisation est absent, donc seules les poulies situées aux points A_2 , A_4 et A_6 exercent un effort sur la structure.

Question 34 : **déterminer** l'effort F_2 exercé par la poulie située en A_2 sur la structure hexagonale. En **déduire**, en justifiant, la tension dans le câble correspondant.

Pour se placer dans le cas le plus défavorable pour le maintien en statique, les différents frottements de la chaîne de transmission sont supposés négligés.

Question 35 : **justifier** cette hypothèse.

Question 36 : en supposant que les trois câbles sont soumis à une même tension de $7 \cdot 10^4$ N, et en précisant les autres hypothèses nécessaires, **déterminer** le couple moteur à fournir pour assurer le maintien statique de la canopée. **Conclure** quant au choix du moteur pour la validation de l'exigence Id 2.1.3.2.

Question 37 : en supposant une accélération constante et en tenant compte des rendements des moteurs, **déterminer** l'expression de la puissance motrice à fournir

pour l'élévation de la canopée. **Conclure** quant au choix des moteurs pour la validation de l'exigence Id 2.1.4.2. si la vitesse nominale est atteinte en 1 s.

PARTIE 4 – Dimensionnement du réseau d'alimentation du sous-ensemble scénique

L'objectif de cette partie est de valider le choix du transformateur de la ligne d'alimentation du poste d'exploitation scénique permettant de satisfaire aux exigences Id 3.1.2.1, Id 3.1.2.2 et Id 3.1.3.1 (document technique **DT2 C**).

La structure de l'architecture du réseau haute tension/basse tension de la Philharmonie se présente en trois parties distinctes. L'énergie électrique délivrée par le réseau EDF traverse les cellules de comptage pour ensuite se répartir sur les postes suivants :

- le poste d'exploitation parking ;
- le poste d'exploitation Philharmonie ;
- le poste d'exploitation scénique.

Le régime électrique triphasé est supposé équilibré. La tension entre phases du fournisseur est de 20 kV. Chacun des postes transforme l'énergie électrique afin d'obtenir une tension entre phases de 400 V, tension adaptée aux différents équipements présents sur le site.

Afin de valider le choix du constructeur, les différentes sous parties ont pour objectif de caractériser les grandeurs électriques à la sortie du transformateur et de valider son dimensionnement. La **figure 27** est une représentation simplifiée de l'alimentation électrique des charges présentes sur la ligne du module scénique.

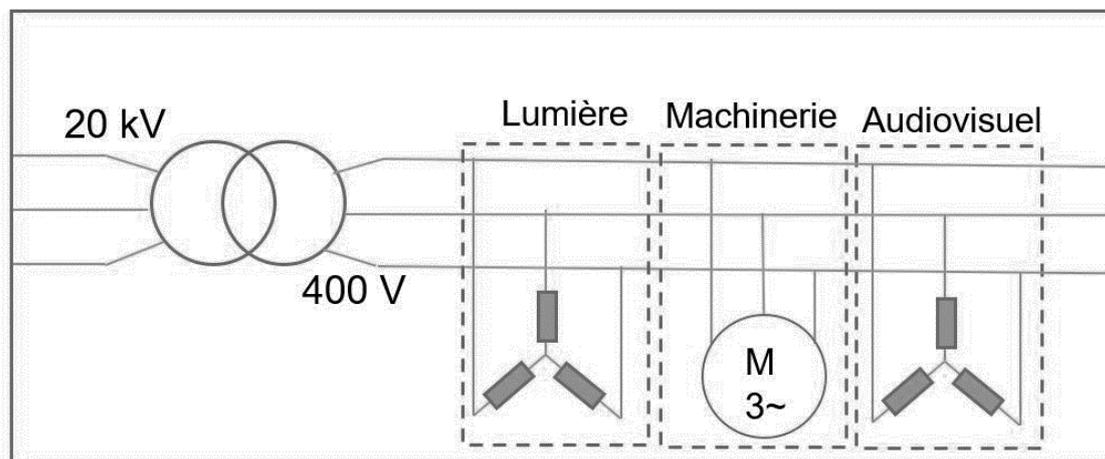


Figure 27 : représentation simplifiée de la ligne d'alimentation des charges.

Le poste d'exploitation scénique regroupe donc trois modules essentiels (Audiovisuel, éclairage : Lumière et partie opérative : Machinerie) présents dans la grande salle ainsi que dans certaines salles annexes de la Philharmonie :

- le module Audiovisuel est caractérisé par une puissance apparente de 200 kVA avec un facteur de puissance de 0,8 ;
- le module Lumière est développé dans la sous partie 4.1 ;

- le module Machinerie comprend une chaîne opérative pilotant deux moteurs asynchrones pour déplacer la canopée (document technique **DT5**) et une chaîne opérative associée à la configuration des gradins dont la puissance active associée est de 510 kW et la puissance réactive de 138 kVAr.

Dans toute l'étude, les pertes dans les éléments de couplage du réseau sont négligées.

4.1 Caractérisation des charges de la ligne d'alimentation du module Lumière

L'objectif de cette sous-partie est de caractériser la consommation énergétique du module Lumière permettant de satisfaire l'exigence Id 3.1.3.1.1.

L'ensemble des composants du module Lumière peut se résumer à une charge triphasée couplée en étoile sur le réseau modélisable par une résistance R_L et une réactance X_L représentant l'inductance magnétisante L_L montées en série.

Question 38 : représenter un schéma de câblage de la distribution Lumière partant du secondaire du transformateur et allant jusqu'aux charges (les éléments de protection ne sont pas à représenter).

Dans la suite de l'étude, le système triphasé étant équilibré, le modèle électrique peut être représenté par un modèle monophasé, le schéma correspondant est présenté **figure 28**.

On se place dans le cas des systèmes linéaires. On notera la représentation complexe \underline{X} d'un signal $x(t)$. L'énergie électrique sera transportée jusqu'aux éléments de diffusion lumineuse par des câbles d'une longueur totale de $l_c = 230$ m.

Le comportement électrique du câble est supposé uniquement résistif. Son âme est en cuivre de résistivité $\rho_c = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ à $\theta_{ref} = 20$ °C. On note S_c la section d'un câble.

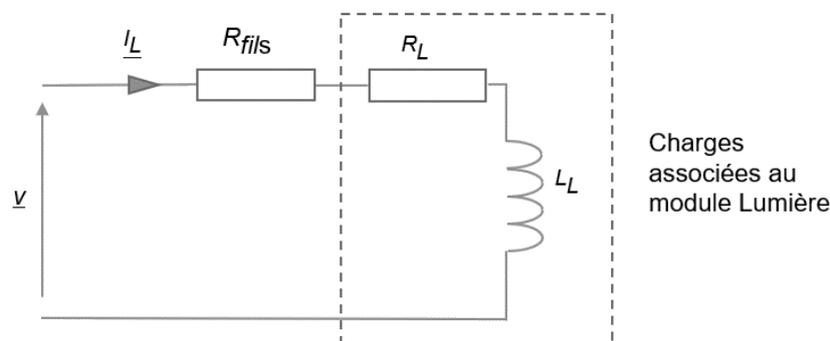


Figure 28 : schéma électrique équivalent avec $R_L = 1,6 \Omega$, $X_L = 0,9 \Omega$ et $I_L = 300$ A.

Question 39 : déterminer la section du câble pour une chute de tension de 2% maximum sur la ligne d'alimentation. Quelle est dans ce cas la puissance consommée par les câbles ?

Question 40 : déterminer les puissances active et réactive consommées par le module Lumière.

4.2 Caractérisation des charges totales dans le circuit secondaire du transformateur

L'objectif de cette sous-partie est de déterminer le rendement énergétique de l'alimentation des modules du poste d'exploitation scénique dans sa globalité (exigence Id 3.1.3.1).

Les informations relatives aux actionneurs sont données sur le document technique **DT5**.

Question 41 : déterminer les puissances active et réactive consommées par les modules Audiovisuel et Machinerie.

Question 42 : en déduire les puissances actives et réactives consommées par l'ensemble des charges présentes sur le poste d'exploitation scénique. **Déterminer** le rendement énergétique de la ligne de distribution, respecte-t-il l'exigence demandée ?

4.3 Amélioration du facteur de puissance de l'installation.

L'objectif de cette sous-partie est de caractériser la batterie de condensateurs qui permet de diminuer les chutes de tension, et donc de limiter les surcoûts de l'installation en aval du transformateur (exigence Id 3.1.2.1).

La plupart des charges présentes sur le réseau sont de nature inductive et ont un faible facteur de puissance ce qui est hautement indésirable. Cela provoque une augmentation du courant, ce qui entraîne des pertes supplémentaires de puissance active dans tous les éléments du système d'alimentation ainsi qu'un surdimensionnement du transformateur. Afin d'assurer les conditions les plus favorables pour un système d'approvisionnement du point de vue technique et économique, il est important d'avoir un facteur de puissance aussi proche que possible de l'unité, la valeur conventionnelle retenue est $\cos \varphi = 0,93$.

La solution retenue est une batterie de condensateurs raccordée en tête d'installation afin d'assurer une compensation pour l'ensemble des charges. Le schéma électrique de raccordement est donné **figure 29**.

Pour la suite de l'étude, les puissances active et réactive présentes dans le circuit secondaire du transformateur avant compensation sont les suivantes :

- puissance active en A : $P_{totale} = 1164 \text{ kW}$;
- puissance réactive en A : $Q_{totale} = 550 \text{ kVAr}$.

Ces valeurs tiennent compte des pertes en lignes dues à d'autres consommateurs négligés jusqu'à présent.

La chute de tension engendrée par les 230 mètres de câble est négligée.

Question 43 : calculer l'intensité du courant I_A ainsi que le facteur de puissance associé, avant compensation.

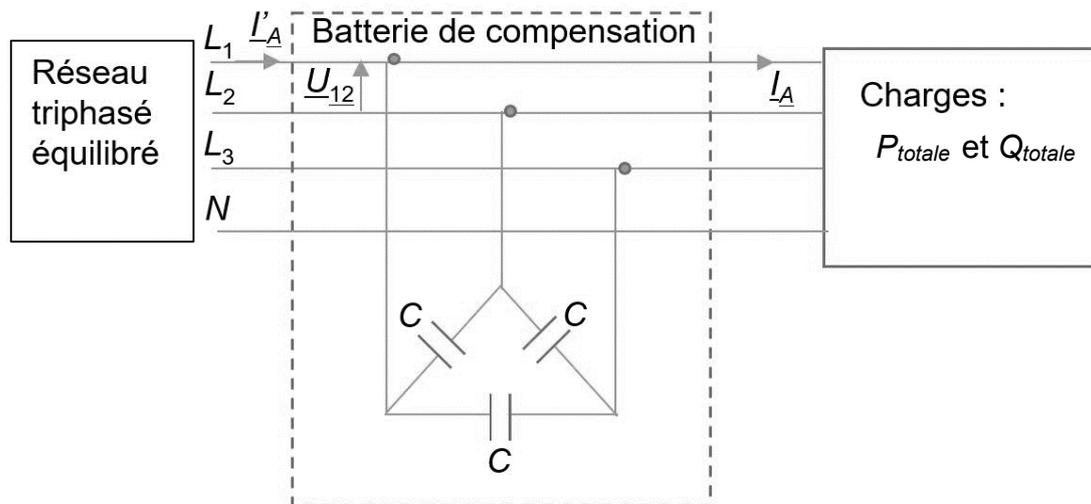


Figure 29 : Compensation globale.

Question 44 : estimer une valeur approchée par construction graphique des vecteurs de Fresnel la puissance réactive Q_c à compenser permettant d'obtenir le facteur de puissance égal à 0,93. **Dimensionner** le banc de condensateurs connecté au réseau. L'échelle du tracé suggérée est la suivante : 100 kVAr (ou kW) pour 1 cm.

Question 45 : en déduire l'intensité du courant I'_A et la puissance apparente dans la ligne une fois la compensation effectuée.

4.4 Validation du choix du transformateur.

L'objectif de cette sous-partie est de valider le choix du transformateur à partir des charges sur la ligne d'alimentation ainsi que des pertes en ligne afin de satisfaire les exigences Id 3.1.2.2 et Id 3.1.3.1.

L'énergie électrique fournie par le réseau ENEDIS est distribuée sur les sites de la Philharmonie puis adaptée par des transformateurs abaisseurs de tension. On considèrera pour la suite que le transformateur est branché en triangle au primaire et en étoile au secondaire de la ligne d'alimentation du module scénique. Les impédances de chaque ligne sont supposées identiques, on raisonnera sur système monophasé.

Le modèle équivalent du transformateur monophasé est décrit **figure 30**.

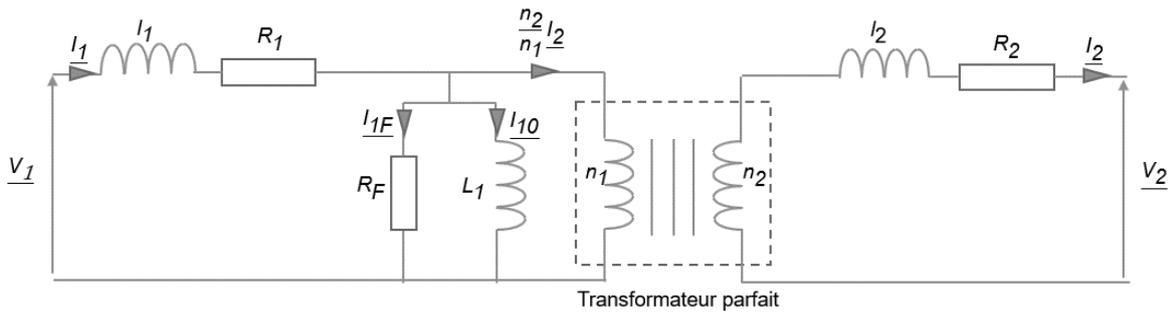


Figure 30 : modèle équivalent du transformateur monophasé.

Les caractéristiques du poste de transformation sont indiquées dans le **tableau 1**.

Valeurs nominales	$S_n = 1250 \text{ kVA}$ $U_{1n} = 20 \text{ kV}$	$V_{2n} = 230 \text{ V}$ $I_{2n} = 1800 \text{ A}$
Essai à vide	Tension secondaire à vide : $V_{20} = 237 \text{ V}$	Courant primaire à vide : $I_{10} = 2\% \cdot I_{1n}$ Pertes à vide : 2800 W
Essai en court-circuit	Pertes mesurées : $P_{cc} = 11400 \text{ W}$	Tension de court-circuit à I_{2n} : $V_{cc} = 6\% \cdot V_{2n}$

Tableau 2 : récapitulatifs des essais.

Question 46 : justifier qu'il est possible de négliger R_F et L_1 à partir des caractéristiques du transformateur données **tableau 2**.

Dans la suite de l'étude, la résistance R_F ainsi que la réactance magnétisante L_1 sont négligées. Le modèle du transformateur peut alors se ramener à un schéma monophasé indiqué **figure 31**, avec R_S et X_S représentant respectivement la résistance et la réactance de fuite totale ramenées au secondaire.

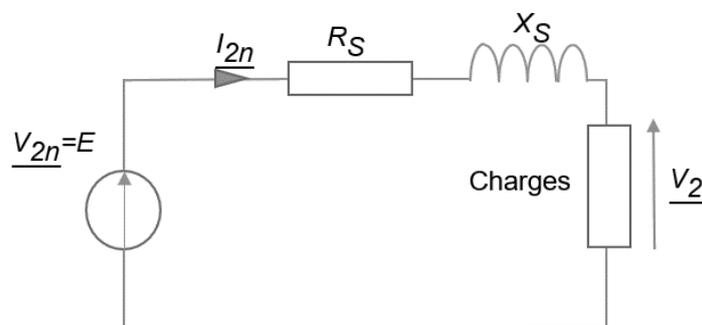


Figure 31 : modèle équivalent du transformateur idéal monophasé.

À partir des hypothèses ci-dessus, la puissance apparente en court-circuit permet de définir l'impédance du transformateur vue du secondaire Z_S en fonction de la tension de court-circuit selon la relation suivante :

$$Z_S = \left(\frac{V_{cc} \times V_{2n}}{I_{2n}} \right).$$

Question 47 : justifier l'intérêt de raccorder le transformateur en étoile. **Déterminer** les paramètres du modèle retenu à partir des essais réalisés ainsi que son rapport de transformation m .

Question 48 : exprimer la variation de valeur efficace ΔV_2 en fonction des grandeurs R_2, X_2, I_{2n} et φ à partir du diagramme de Fresnel correspondant et dans l'hypothèse où le déphasage entre la tension E et la tension V_2 est faible. **Valider** le choix du transformateur au regard des exigences spécifiées.

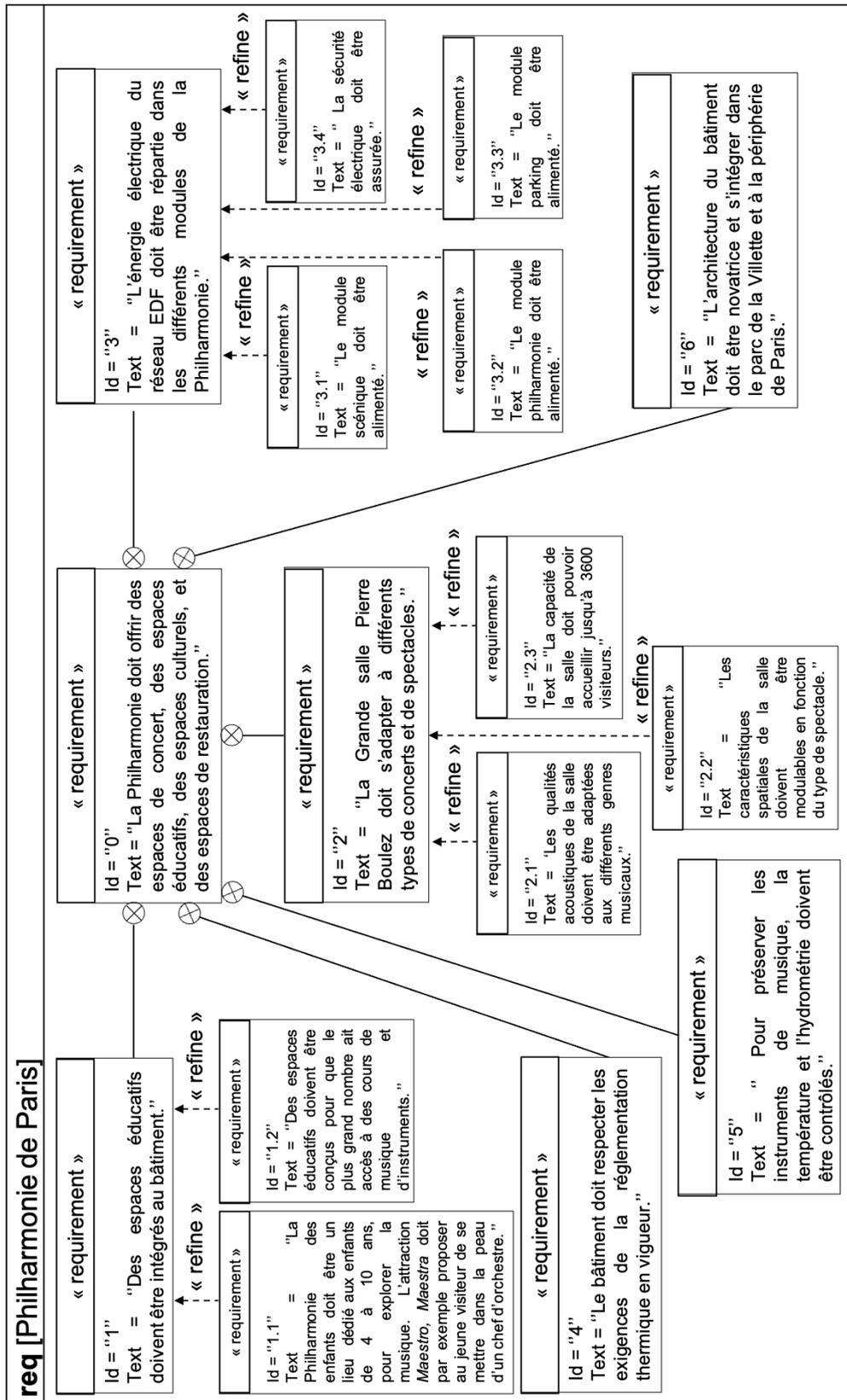
PARTIE 5 – Synthèse

Question 49 : citer les exigences initiales données sur le document technique **DT1** qui ont été validées dans les différentes études réalisées. **Préciser** pour chacune d'elles la démarche mise en œuvre.

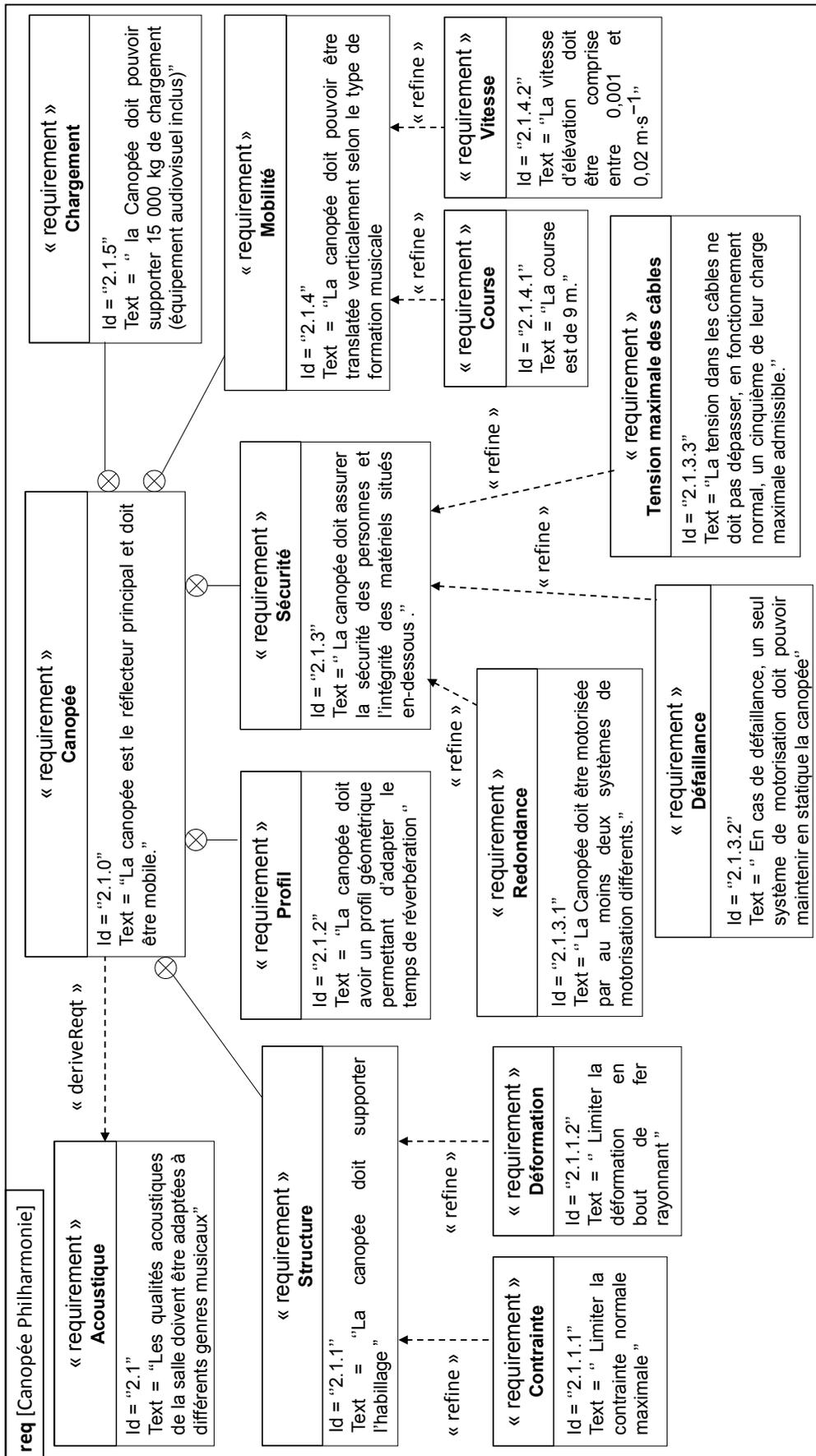
Question 50 : proposer en quelques lignes des démarches scientifiques supplémentaires qui permettraient de valider deux exigences du document technique **DT1** non abordées dans ce sujet.

*** FIN du sujet ***

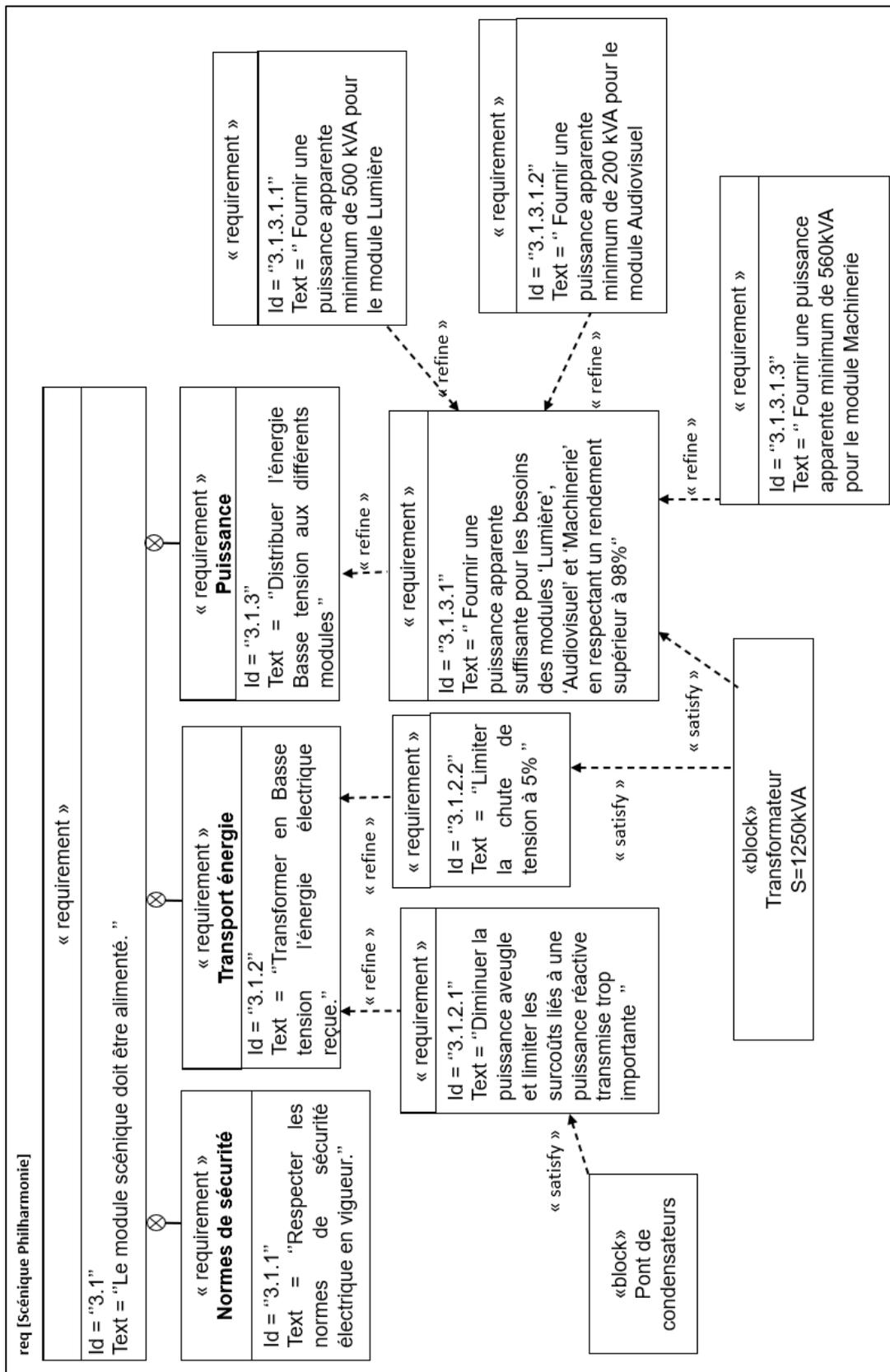
Document technique DT1 : diagramme partiel des exigences initiales de la Philharmonie de Paris



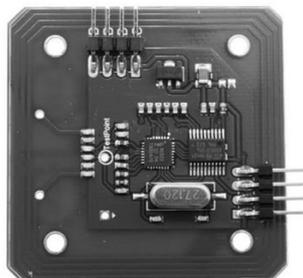
Document technique DT2 B : diagramme partiel des exigences techniques de la canopée



Document technique DT2 C : diagramme partiel des exigences techniques d'alimentation électrique de la ligne scénique



Document technique DT3 : fiche constructeur du lecteur RFID série 13,56 MHz, interface UART TTL pour Arduino et Rasperry Pi, MFRC522 (liaison série)



Fréquence	13,56 MHz
Protocole	ISO14443A
Tags supportés	MIFARE Ultralight®, NTAG203, MIFARE Mini, MIFARE Classic® 1K, MIFARE Classic® 4K, FM11RF08
Dimension	45 × 45 mm
Antenne intégrée	Yes
Lecteur/Encodeur	Yes
Interface	I2C
Tension d'alimentation	4,4 – 7,0 VDC

Format de lecture de l'identifiant du bracelet renvoyé par le lecteur RFID

07 00 95 2F 22	9F (<i>checksum</i>)
10 octets 10 caractères ASCII	2 octets 2 caractères ASCII

Les 12 caractères ASCII 07 00 95 2F 22 9F correspondent à 12 octets de données transmis du badge au lecteur RFID.

1. Numéro du bracelet correspondant

Les 8 caractères ASCII 00 95 2F 22 doivent être lus comme les 4 octets $(00952F22)_{16}$ codé au format hexadécimal. Ils correspondent au numéro du bracelet.

2. Vérification du *checksum*

Le *checksum* 9F est transmis par le lecteur. La vérification du *checksum* est donnée par l'opération *ou exclusive* (\oplus) entre les 5 octets $(07)_{16}$, $(00)_{16}$, $(95)_{16}$, $(2F)_{16}$ et $(22)_{16}$ au format hexadécimal :

$$\begin{aligned}
 & (07)_{16} \oplus (00)_{16} \oplus (95)_{16} \oplus (2F)_{16} \oplus (22)_{16} = \\
 & (0000\ 0111)_2 \oplus (0000\ 0000)_2 \oplus (1001\ 0101)_2 \oplus (0010\ 1111)_2 \oplus (0010\ 0010)_2 \\
 & = (1001\ 1111)_2 = (9F)_{16}.
 \end{aligned}$$

Ce qui correspond bien au *checksum* 9F.

Document technique DT4 : quelques fonctions et syntaxes en langage Python

Tableau à une dimension	L = [1,9,0,4] (liste) V = array([1,9,0,4]) (vecteur)
Accéder à un élément	V[0] renvoie 1 et V[-1] renvoie 4
Ajouter un élément à une liste	L.append(5) Dans ce cas, L = [1,9,0,4,5]
Tableau à deux dimensions (matrice 3 × 3)	mat = array([[8,7,6],[6,5,2],[0,1,0]])
Accéder à un élément d'un tableau	mat[1,2] ou mat[1][2] renvoie 2.
Tableau de 0	zeros((2,3)) renvoie $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Dimension d'un tableau mat de taille (i,j)	shape(mat) renvoie (i,j)
Taille d'une liste	len(L) renvoie 5 si L = [1,9,0,4,5]
Opérations matricielles (transposée, produit, inverse) par algorithmes naïfs	At = transposee(A) C = produit(A,B) D = inverse(C)
Boucle for	for i in range(10) : print(i)
Définir une fonction, deux arguments, un résultat	def fonction(x,y) : return x**2+y**2

Complexité (algorithmes naïfs)

Soit les matrices A de taille $n \times m$, B de taille $m \times p$ et C matrice carré de taille n^2 .

fonctions	complexité
Transposée de A : A^T	$O(n \cdot m)$
Produit entre A et B : $A \cdot B$	$O(n \cdot m \cdot p)$
Inverse de C : C^{-1}	$O(n^3)$

Document technique DT5 : fiche technique du moteur



Vitesse nominale du moteur	[1/min]	1445
Vitesse de sortie	[1/min]	198
Rapport de réduction global		1/7,28
Couple de sortie	[Nm]	430
Facteur d'utilisation		1,15
Arbre de sortie	[mm]	40x80
Charge radiale admissible de sortie pour n=1400	[N]	11000
Puissance moteur	[kW]	7,5
Rendement	[%]	90
Tension moteur	[V]	400/690
Fréquence	[Hz]	50
Courant nominal	[A]	14,4/8,3
Cos phi		0,85
Poids net	[Kg]	100,5
Tension de freinage	[V]	110
Couple de freinage	[Nm]	400

Remarque : le couple maximal de maintien en statique correspond au produit du couple de sortie nominal et du facteur d'utilisation.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR1 : algorithme partiel de Lucas-Kanade en langage Python

```
# from numpy import *
# paramètres
dt = 0.09 # seconde

# on calcule la dérivée temporelle
def derive_temp(I1, I2, dt) :
    (n,n) = shape(I1)
    It = zeros((n,n), dtype = float32)
    # à compléter question 10

    return It

It = derive_temp(I1, I2, dt)
Ix, Iy = derive_spat(I1, dx) # dérivées spatiales

# il faut en faire des listes (vecteurs)
def liste(mat) :
    pts = [] # On initialise la liste des points
    (n,n) = shape(mat)
    # à compléter question 11

    return pts
```

