

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR MÉTIERES DES SERVICES À L'ENVIRONNEMENT

ÉPREUVE E2 : ÉTUDE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

SOUS-ÉPREUVE U22 (sciences physiques et sciences et technologies des systèmes)

SESSION 2023

Durée : 2 heures 30 minutes
Coefficient : 2,5

Matériel autorisé :

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue » est autorisé.
Tout autre matériel est interdit.

Les documents réponses DR1, DR2, DR3 et DR4 sont à rendre avec la copie.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet se compose de 18 pages, numérotées de 1/18 à 18/18 :

Présentation du système	pages 2 et 3
Partie A – analyse fonctionnelle	page 4
Partie B – étude du nettoyage de deux faces	pages 4 et 5
Partie C – étude de l'écoulement du liquide de nettoyage	pages 6 et 7
Partie D – étude de la fonction « appliquer l'outil de lavage »	page 8
Partie E – étude de la fonction « adhérer à la paroi »	pages 9 et 10
Partie F – maintenance du système	page 11
Documents techniques DT1 à DT4	pages 12 à 14
Documents réponses DR1 à DR4	pages 15 à 18

Les 6 parties du sujet sont indépendantes et peuvent être traitées dans n'importe quel ordre.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 1/18

PRÉSENTATION DU ROBOT NETTOYEUR DE LA PYRAMIDE DU LOUVRE

CONTEXTE

La pyramide du Louvre, avec ses 21 mètres de haut, ses 35 mètres de côté et ses 673 losanges et triangles de verre, est autant l'entrée principale que l'emblème du musée. À l'origine, son nettoyage était confié à une société spécialisée dans les travaux extrêmes dont les employés étaient des alpinistes. Mais la forte déclivité des faces de la pyramide et ses surfaces glissantes rendaient cette intervention difficile et périlleuse.

Depuis 2003 cette tâche est effectuée par le robot « Robuglass » développé par la société Robosoft. Il fonctionne sur le principe des machines utilisées pour le lavage des sols avec une brosse tournante, des raclettes et un tuyau souple pour son alimentation en eau.

La figure 1 présente le robot en pleine action vu depuis l'extérieur de la pyramide, la partie de la surface vitrée à droite du robot étant sale et celle à gauche nettoyée. La figure 2 montre le même robot depuis l'intérieur de la pyramide. Le document technique DT1, page 12, présente de même deux vues en perspective d'un modèle du robot.



Figure 1 : robot nettoyeur Robuglass vu de l'extérieur

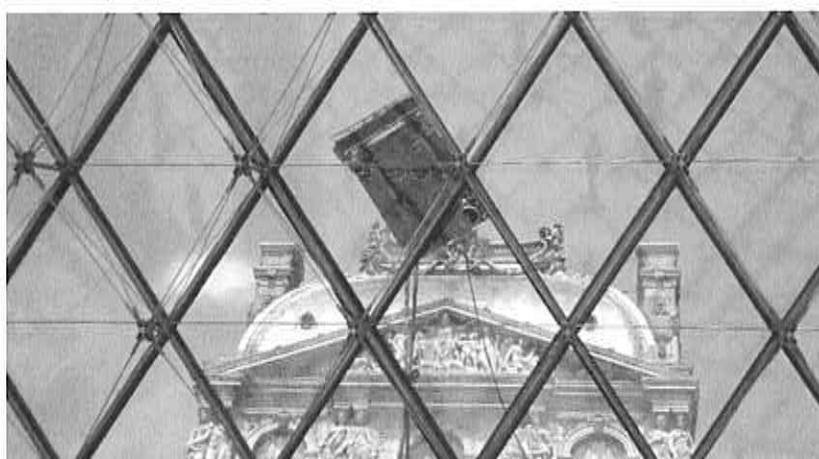


Figure 2 : robot vu de l'intérieur de la pyramide de verre

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 2/18

Le robot est alimenté en énergie et en liquide de lavage grâce à un véhicule atelier et un chariot ombilical stationnés au pied de la pyramide. Ils sont visibles à la figure 3.



Figure 3 : véhicule atelier et chariot ombilical devant la pyramide

PRÉSENTATION DE L'ARCHITECTURE DU SYSTÈME

Le robot est composé d'un porteur, qui permet notamment son adhérence à la surface et son déplacement, ainsi que d'un outil de lavage à son extrémité. Il est relié au chariot ombilical et au véhicule atelier par des câbles qui transmettent les énergies et liquides nécessaires. Ceci est synthétisé sur la figure 4 ci-dessous.

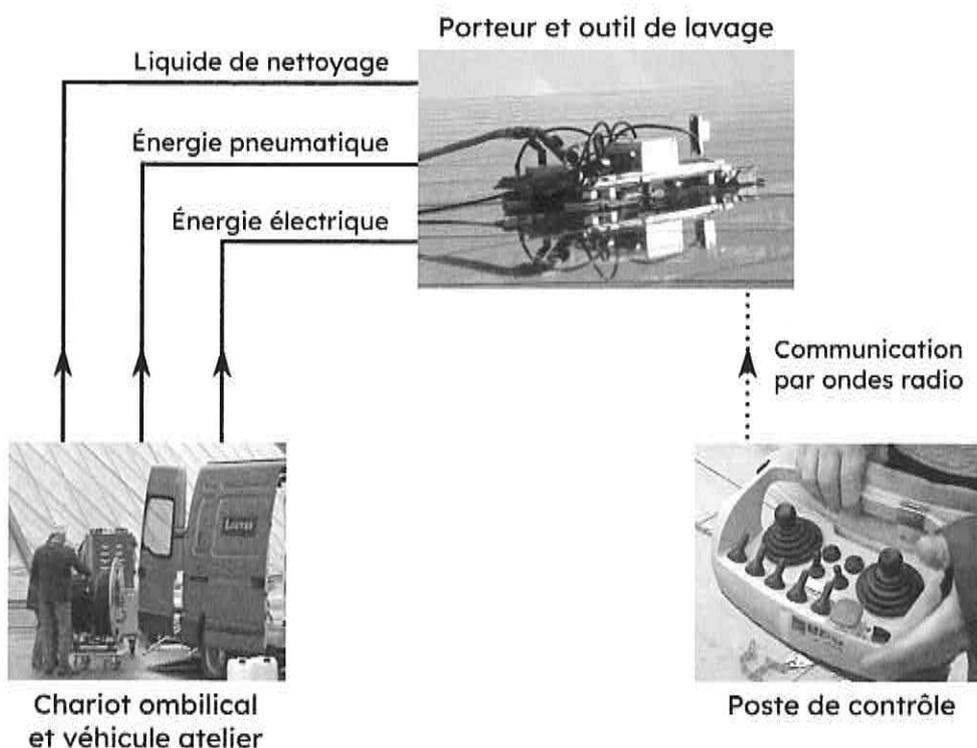


Figure 4 : schéma présentant le principe de fonctionnement du robot

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 3/18

PARTIE A – ANALYSE FONCTIONNELLE

QA.1. Dans cette question, le système isolé est le robot, constitué uniquement du porteur et de son outil de lavage. **Compléter** le graphe des interacteurs du document réponse DR1, en renseignant les numéros des fonctions aux emplacements prévus.

QA.2. Dans cette question, le système étudié se compose du robot et du poste de contrôle. **Compléter** le diagramme SADT A0 du document réponse DR2, avec les propositions suivantes :

Flexible	Maintenir le robot sur la vitre
Déplacer le robot	Commander le robot à distance
Brosse et raclettes	Appliquer le produit sur la brosse

PARTIE B – ÉTUDE DE L'EXIGENCE DU NETTOYAGE DE DEUX FACES

Dans un but d'économies d'échelle, l'entreprise souhaite déterminer s'il est possible de nettoyer deux faces de la pyramide en une seule journée, soit en une durée inférieure à 8 heures.

Le parcours du robot pour nettoyer une seule face est présenté à la figure 5. Ainsi, le robot alterne les phases de montée et de descente :

- en phase de montée, le robot se déplace jusqu'au sommet de sa travée sans laver la surface vitrée,
- en phase de descente, le robot descend en ligne droite, tandis que l'outil de nettoyage est plaqué contre la vitre et le liquide de nettoyage appliqué de manière constante sur la brosse.

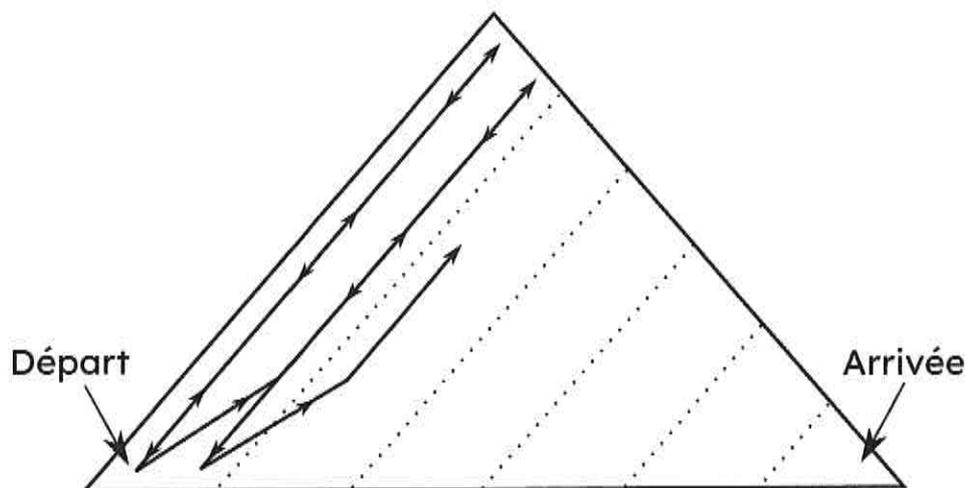


Figure 5 : parcours du robot pendant le nettoyage d'une face de la pyramide

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 4/18

On suppose que :

- la distance totale parcourue par le robot sur une face de la pyramide (représentée à la figure 5) vaut $d_{\text{face}} = 1200 \text{ m}$,
- la vitesse nominale du robot vaut $v_R = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

QB.1. En supposant que la vitesse v_R est constante pendant tout le nettoyage, **calculer** la durée du nettoyage, en heures et en minutes, pour nettoyer une face de la pyramide.

QB.2. Compte-tenu du trajet présenté à la figure 5 et de l'hypothèse faite précédemment, **indiquer** si la durée totale de nettoyage sera plus courte ou plus longue que le résultat de la question B.1. **Justifier** votre réponse.

QB.3. **Conclure** sur la possibilité de laver deux faces de la pyramide en une journée.

Le liquide de nettoyage est injecté pendant les phases de descentes du robot depuis le véhicule atelier au sol. Pour nettoyer les deux faces de la pyramide la durée durant laquelle le liquide est injecté est de 3 heures et 20 minutes. L'entreprise souhaite que, lors des phases de lavage, le débit de liquide de nettoyage délivré par le robot soit constant, égal à $Q = 0,02 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

QB.4. **Calculer** le volume en litre, noté V_L , de liquide de nettoyage devant être stocké dans le camion pour le lavage de deux faces de la pyramide.

QB.5. À partir du tableau du document technique DT3, page 14, **choisir** le numéro d'article de la cuve la plus compacte tout en permettant de laver en un seul chargement deux faces de la pyramide.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 5/18

PARTIE C – ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DU LIQUIDE DE NETTOYAGE

Un liquide de nettoyage est injecté au robot depuis le véhicule atelier au sol. Celui-ci circule dans un flexible d'un diamètre de 20 mm, avant d'être appliqué à la brosse rotative grâce à des buses de sortie.

La problématique est de connaître la puissance maximale que doit fournir la pompe du véhicule atelier pour que le débit du liquide de nettoyage au niveau des buses de sortie soit égal à $Q = 0,02 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

Le schéma de principe de l'écoulement du liquide de lavage est donné à la figure 6. Le robot y est représenté à ses positions extrêmes : sa position la plus haute (buses au point S) et sa position la plus basse (buses au point B).

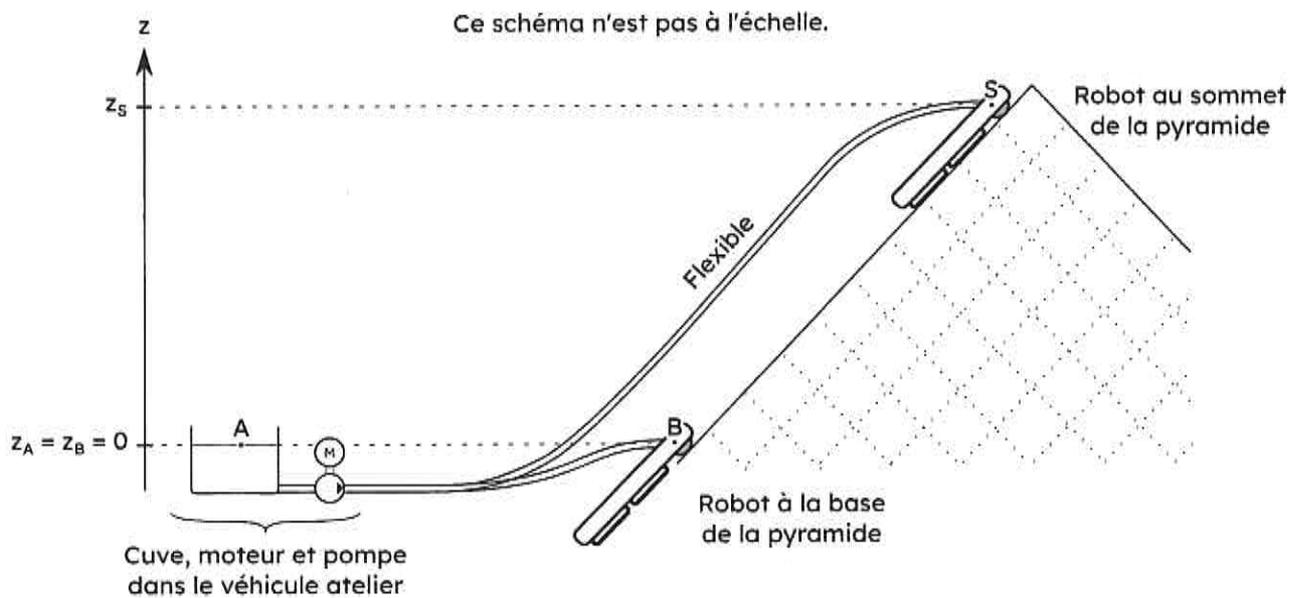


Figure 6 : écoulement du liquide de nettoyage pour deux positions extrêmes du robot

On donne :

- le diamètre du flexible : $D = 20 \text{ mm}$,
- le débit imposé : $Q = 2 \text{ cL}\cdot\text{s}^{-1}$.

QC.1. Déterminer la valeur en cm^2 de la section du flexible.

QC.2. Exprimer la valeur du débit Q en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. **En déduire** la valeur de la vitesse de l'écoulement du liquide dans le flexible, à $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ près.

QC.3. Justifier qualitativement que la valeur de la puissance de la pompe est maximale lorsque le robot est au sommet de la pyramide (buses au point S indiqué sur la figure 6).

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 6/18

On rappelle l'équation de Bernoulli, pour un fluide circulant d'un point 1 vers un point 2 :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{mt} - J_{12} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

où H_{mt} est la hauteur manométrique totale de la pompe, en mètres, et J_{12} les pertes de charges entre le point 1 et le point 2, en mètres également.

Données :

- altitude des points A et B : $z_A = z_B = 0$ m,
- altitude du sommet de la pyramide : $z_S = 21,6$ m,
- valeur de la vitesse du liquide au sommet : $v_S = 6,4 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- pression au sommet : $p_S = p_{atm} = 1,01 \cdot 10^5$ Pa,
- masse volumique du liquide de nettoyage : $\rho = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- la valeur de la vitesse v_A du liquide en A est négligeable devant celles des vitesses v_S et v_B ,
- compte tenu de la valeur de la vitesse du liquide dans le flexible, on suppose que les pertes de charges sont négligeables vis à vis des autres grandeurs.

QC.4. En utilisant l'équation de Bernoulli le long de la ligne d'écoulement de A vers S et en tenant compte des hypothèses précédentes, **calculer** la hauteur manométrique de la pompe lorsque le robot est au sommet de la pyramide.

On rappelle que la puissance hydraulique P_H de la pompe en watt s'exprime par :

$$P_H = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_{mt}$$

QC.5. Vérifier que la valeur de la puissance théorique que doit fournir la pompe pour amener le liquide au point S à la pression atmosphérique est de 4 W.

En réalité, le système de lavage comporte une buse et la puissance installée de la pompe est de 50 W.

QC.6. Expliquer ce dimensionnement.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 7/18

PARTIE D – ÉTUDE DE LA FONCTION « APPLIQUER L'OUTIL DE LAVAGE »

Dans toute cette partie, on considère que la brosse n'est pas en rotation par rapport à son support. Un système mécanique piloté par un vérin électrique permet d'appliquer la brosse sur la vitre de la pyramide (voir DT1 et figure 7).

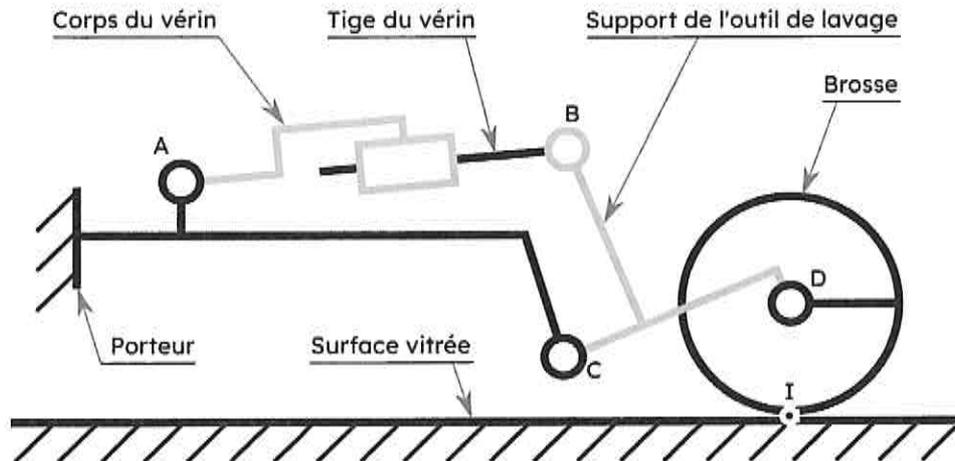


Figure 7 : schéma cinématique du mécanisme d'application de l'outil sur la surface

Données :

- I est le point de contact entre la brosse et la surface vitrée,
- $BC = 136 \text{ mm}$, $CI = 150 \text{ mm}$,
- la vitesse de sortie de la tige du vérin est de $v_B = 4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Afin de préserver la surface vitrée et de ne pas perturber l'équilibre du robot, il est nécessaire de limiter la vitesse de l'outil lorsque celui-ci impacte la vitre au point I. Celle-ci doit rester inférieure à $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Grâce à l'énergie électrique venant du véhicule atelier, la tige du vérin est mise en translation par rapport à son corps. Le corps du vérin et le support de l'outil, ont respectivement un mouvement de rotation de centres A et C par rapport au porteur.

QD.1. Compléter la chaîne d'énergie du document réponse DR1, en indiquant pour chaque flux s'il s'agit d'une énergie mécanique de translation ou de rotation, ou d'une énergie électrique.

QD.2. Donner le nom de la liaison entre le corps du vérin et la tige du vérin.

QD.3. Donner le nom de la liaison entre le support de l'outil de lavage et le porteur. **Préciser** le centre de rotation du support de l'outil de lavage par rapport au porteur.

QD.4. À l'aide du formulaire de mécanique du DT2, **calculer** la vitesse angulaire du support de l'outil, notée ω_{support} .

QD.5. Calculer la vitesse linéaire de l'extrémité de l'outil au point I, notée v_I , en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. **Conclure** sur le respect de l'exigence du cahier des charges fixant la vitesse maximale de l'outil au contact de la surface.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 8/18

PARTIE E – ÉTUDE DE LA FONCTION « ADHÉRER A LA PAROI »

On donne à la figure 8 ci-dessous le schéma pneumatique qui permet de créer une dépression au niveau des ventouses. Dans ce schéma simplifié, seules une centrale à vide (sur deux) et deux ventouses (sur huit) sont représentées. Les capteurs de vide, repérés OS1, 1S1 et 1S2, sont réglés pour délivrer un signal électrique s'ils détectent une dépression. Ainsi, huit signaux lumineux permettent de vérifier le bon fonctionnement des ventouses.

Une étude préliminaire a permis d'évaluer à 10 000 Newtons la force nécessaire minimale exercée par la surface sur le robot pour assurer son maintien pendant le nettoyage.

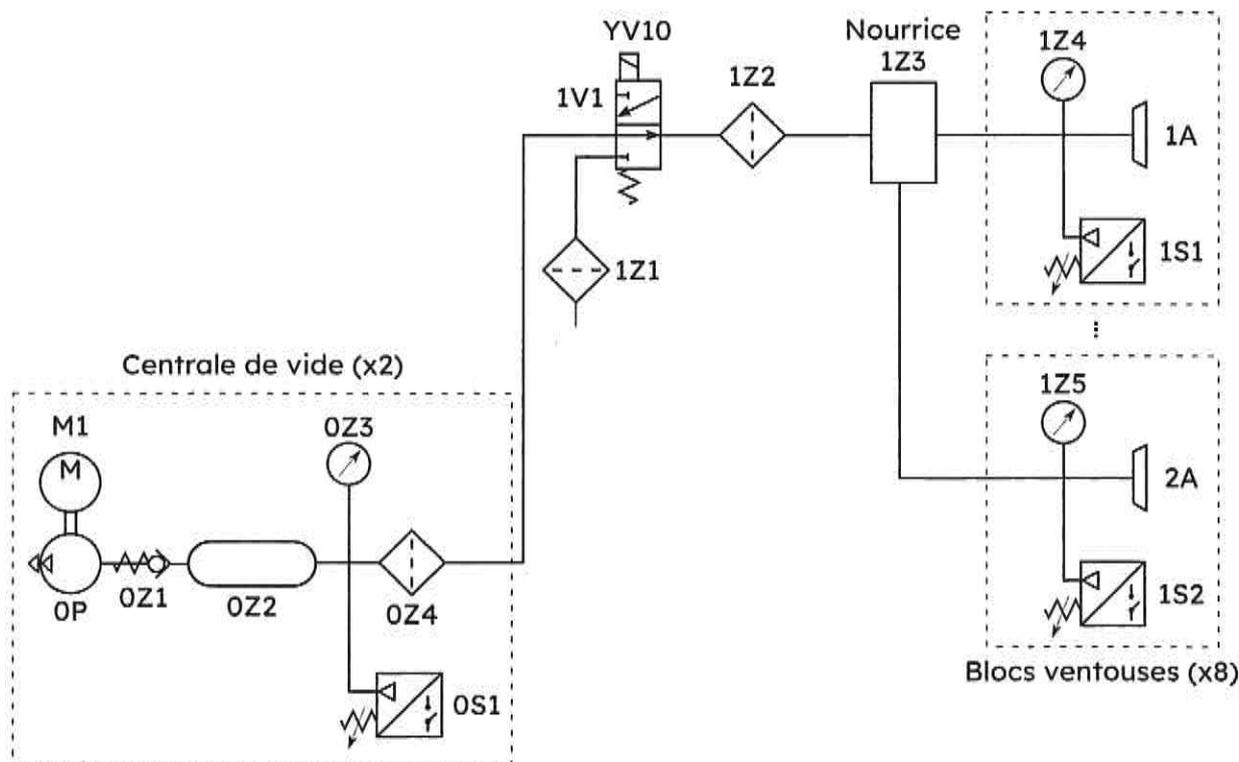


Figure 8 : schéma pneumatique simplifié

QE.1. Donner les noms ainsi que les fonctions des éléments repérés OZ3, OZ4 et 1V1.

On suppose que la centrale à vide produit une dépression de 1 bar dans le circuit. Les huit ventouses sont toutes en fonctionnement, en contact avec la surface vitrée, et font chacune 150 mm de diamètre.

QE.2. À l'aide du formulaire de géométrie du DT2 page 13, **calculer** la surface de contact totale entre les huit ventouses et la surface vitrée.

QE.3. À l'aide du formulaire de géométrie du DT2 page 13, **calculer** la force exercée par les huit ventouses sur la surface vitrée, et **conclure**.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 9/18

Les deux centrales de vide sont alimentées par un réseau triphasé. Le circuit électrique est partiellement représenté à la figure 9 ci-dessous.

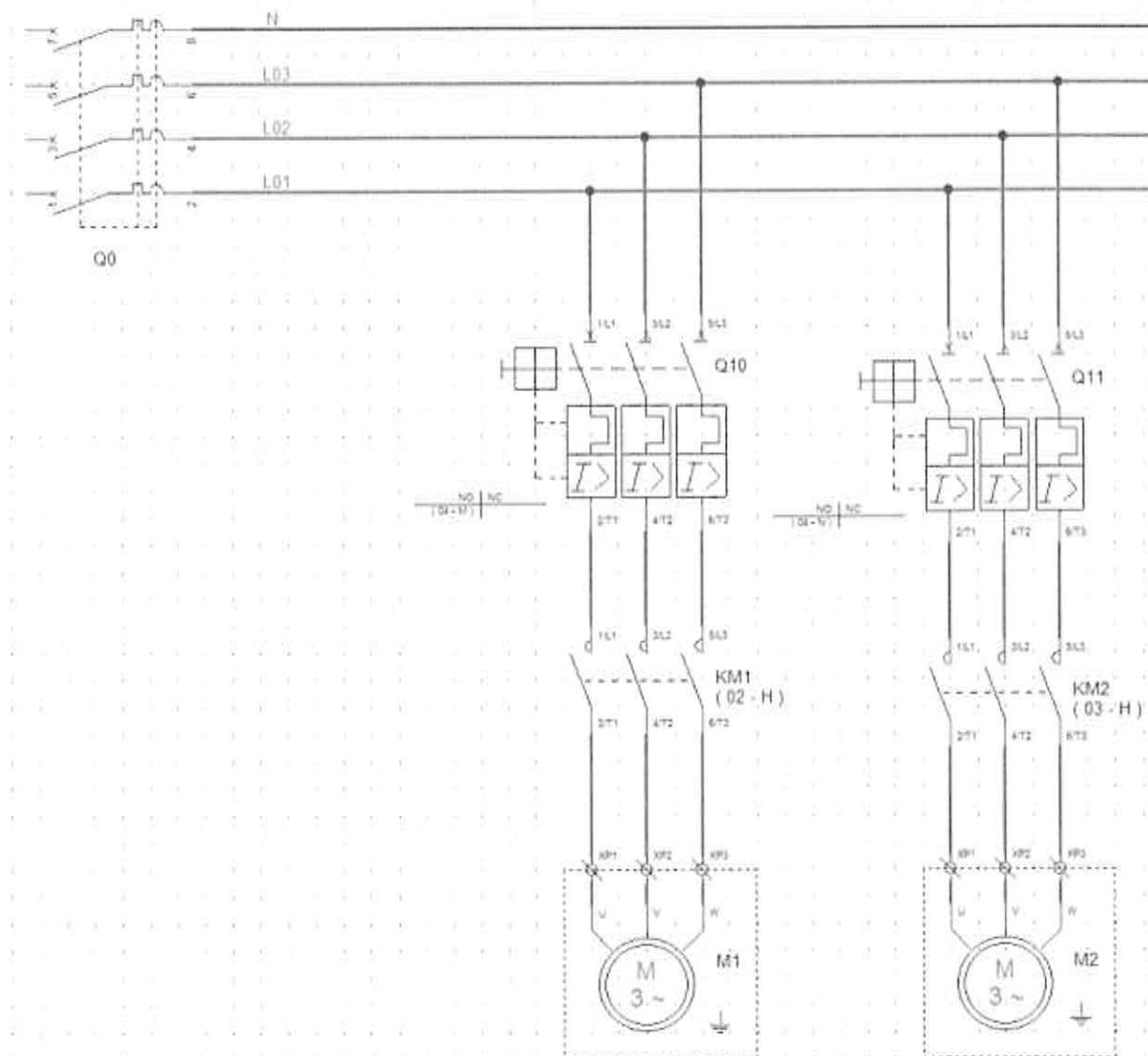


Figure 9 : schéma électrique partiel

QE.4. Donner le nom et les fonctions du composant repéré Q10.

QE.5. Donner la couleur normalisée du fil de neutre, repéré N.

Le constructeur des pompes à vide précise différents schémas de branchements des moteurs, qui sont visibles dans le document technique 4.

QE.6. Sachant que les moteurs M1 et M2 doivent être branchés en triangle, et à l'aide du DT4, **indiquer** quel est leur schéma de branchement adéquat.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 10/18

F – MAINTENANCE DU SYSTÈME

Un historique des 16 pannes survenues au cours des 3 dernières années est donné dans le tableau suivant.

Élément du robot	Nombre de pannes constatées
Flexible	3
Contrôleur	1
Capteurs	2
Vérin	9
Pompe	1

QF.1. Compléter le tableau du document réponse DR3 page 17, en classant les éléments du plus grand au plus faible nombre de pannes.

QF.2. Construire le diagramme de Pareto et **conclure** sur l'analyse effectuée.

Pour se faire, sur le document réponse DR3 :

a. Placer sur l'axe horizontal les éléments classés du plus au moins pénalisant, de gauche à droite.

b. Tracer le diagramme en bâtons représentant le nombre de pannes de chaque élément, en utilisant comme échelle verticale l'axe des ordonnées de gauche.

c. Tracer la courbe des fréquences cumulées croissantes des pannes, en utilisant comme échelle verticale l'axe des ordonnées de droite (en %).

d. Conclure.

On s'intéresse maintenant à l'élément du robot le plus pénalisant : le vérin.

Le relevé des temps de bon fonctionnement a été réalisé durant les 3 dernières années. Sur le document réponse DR4, la droite D est la représentation de la défaillance en fonction du temps de fonctionnement sur le papier de Weibull.

QF.3. Compléter le tableau dans le document réponse DR4, en renseignant les valeurs des paramètres η , β et γ trouvées graphiquement.

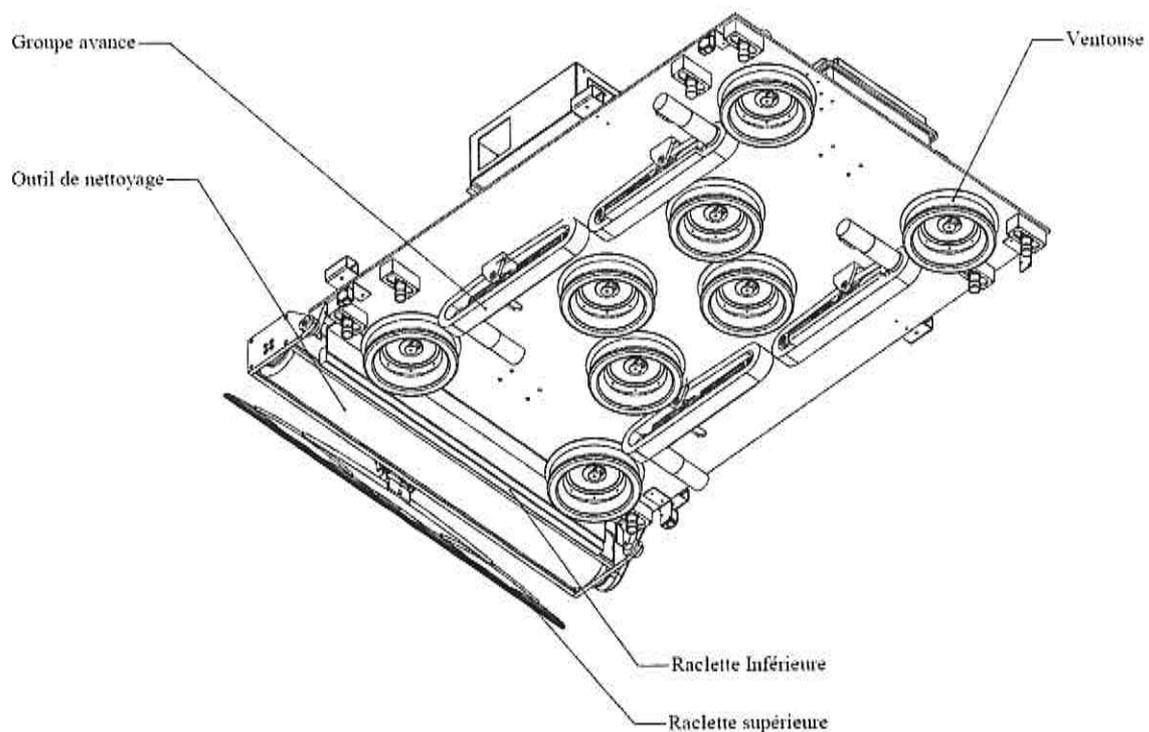
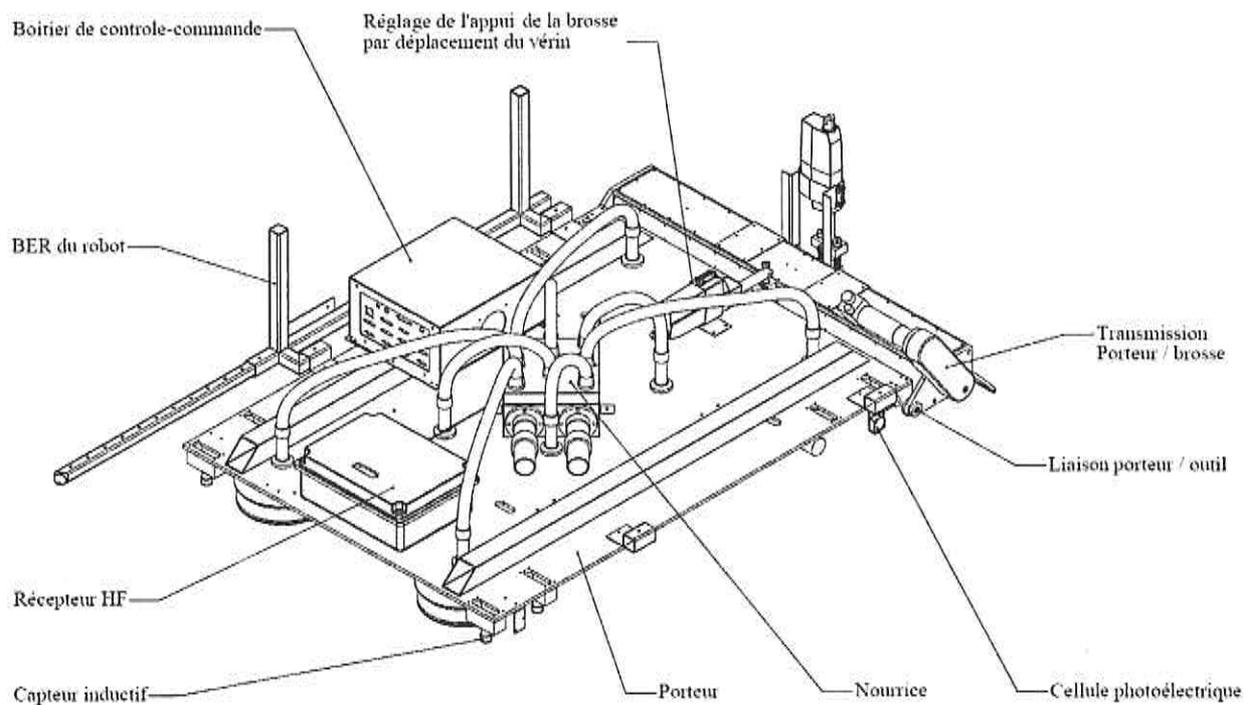
QF.4. En fonction de la valeur de β , **indiquer** la phase de vie dans laquelle le système se situe. **En déduire** l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps.

QF.5. À partir du document technique DT2, **calculer** le temps moyen de bon fonctionnement, noté MTBF (pour « mean time between failures »).

QF.6. On souhaite une fiabilité du système étudié à 95%. **Déterminer** graphiquement le temps de périodicité de la maintenance du système. Laisser les traits de construction visibles sur le document réponse DR4.

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 11/18

DOCUMENT TECHNIQUE DT1 : VUES EN PERSPECTIVE DU ROBOT



BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 12/18

DOCUMENT TECHNIQUE DT2 : FORMULAIRES

FORMULAIRE DE GÉOMETRIE

Aire d'un disque :	$A_{\text{disque}} = \pi \cdot \text{Rayon}^2$
--------------------	--

FORMULAIRE DE MÉCANIQUE

Relation entre vitesse angulaire et vitesse linéaire :	$V = \text{Rayon} \times \text{Vitesse angulaire} = R \cdot \omega$
Relation entre pression et force	$p = \frac{F}{S}$

FORMULAIRE DE MAINTENANCE

Espérance de la loi de Weibull (moyenne) :	$MTBF = A \eta + \gamma$
Écart type de la loi de Weibull :	$\sigma = B \eta$

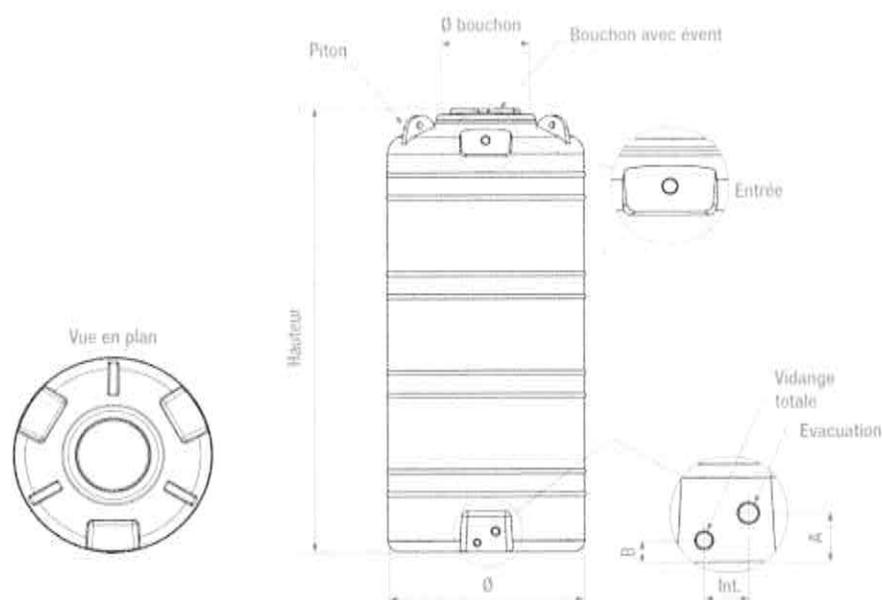
β	A	B
0,20	120	1901
0,25	24	199
0,30	9,2605	50,08
0,35	5,0291	19,98
0,40	3,3234	10,44
0,45	2,4786	6,46
0,50	2	4,47
0,55	1,7024	3,35
0,60	1,5046	2,65
0,65	1,3663	2,18
0,70	1,2638	1,85
0,75	1,1906	1,61
0,80	1,1330	1,43
0,85	1,0880	1,29
0,90	1,0522	1,17
0,95	1,0234	1,08
1	1	1
1,05	0,9803	0,934
1,10	0,9649	0,878
1,15	0,9517	0,830
1,20	0,9407	0,787
1,25	0,9314	0,750
1,30	0,9236	0,716
1,35	0,9170	0,687
1,40	0,9114	0,660
1,45	0,9067	0,635

β	A	B
1,50	0,9027	0,613
1,55	0,8994	0,593
1,60	0,8986	0,574
1,65	0,8942	0,556
1,70	0,8922	0,540
1,75	0,8906	0,525
1,80	0,8893	0,511
1,85	0,8882	0,498
1,90	0,8874	0,486
1,95	0,8867	0,474
2	0,8862	0,463
2,1	0,8857	0,443
2,2	0,8856	0,425
2,3	0,8859	0,409
2,4	0,8865	0,393
2,5	0,8873	0,380
2,6	0,8882	0,367
2,7	0,8893	0,355
2,8	0,8905	0,344
2,9	0,8917	0,334
3	0,8930	0,325
3,1	0,8943	0,316
3,2	0,8957	0,307
3,3	0,8970	0,299
3,4	0,8984	0,292
3,5	0,8997	0,285
3,6	0,9011	0,278
3,7	0,9025	0,272
3,8	0,9038	0,266
3,9	0,9051	0,260

β	A	B
4	0,9064	0,254
4,1	0,9077	0,249
4,2	0,9089	0,244
4,3	0,9102	0,239
4,4	0,9114	0,235
4,5	0,9126	0,230
4,6	0,9137	0,226
4,7	0,9149	0,222
4,8	0,9160	0,218
4,9	0,9171	0,214
5	0,9182	0,210
5,1	0,9192	0,207
5,2	0,9202	0,203
5,3	0,9213	0,200
5,4	0,9222	0,197
5,5	0,9232	0,194
5,6	0,9241	0,191
5,7	0,9251	0,186
5,8	0,9260	0,185
5,9	0,9269	0,183
6	0,9277	0,180
6,1	0,9286	0,177
6,2	0,9294	0,175
6,3	0,9302	0,172
6,4	0,9310	0,170
6,5	0,9318	0,168
6,6	0,9325	0,166
6,7	0,9333	0,163
6,8	0,9340	0,161
6,9	0,9347	0,160

DOCUMENT TECHNIQUE DT3 : CUVES

Article	Volume lt.	Ø cm	Hauteur cm	Ø bouchon cm	Entrée	Evacuation	Vidange totale	Piton	Dimensions pièces filetées cm.		
									A	B	Int.
V 50	50	43	43	21	-	-	¼"	-	4,5	-	-
V150	150	60	70	21	¼"	-	¼"	-	4	-	-
V 300	300	63	110	21	¼"	-	¼"	-	4	-	-
V 500	500	68	152	30	¼"	1"	¼"	-	9	4	6
V 1000	1000	85	193	30	1"	1"	¼"	3	9	4	8
V 2000	2000	115	210	40	1"	1"	¼"	3	10	5	9
V 3000	3000	135	230	40	1"	1"	¼"	3	11	6	10
V 10000	10000	246	246	52	-	-	-	4	-	-	-



DOCUMENT TECHNIQUE DT4 : SCHEMAS DE BRANCHEMENT MOTEUR

Schéma A

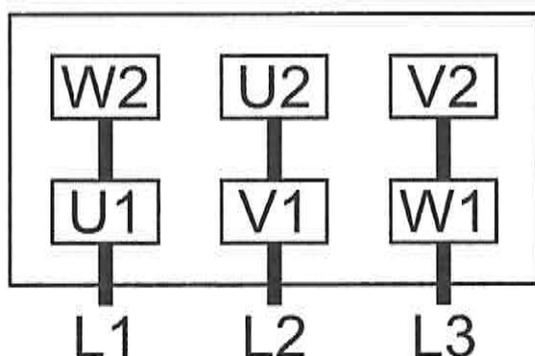
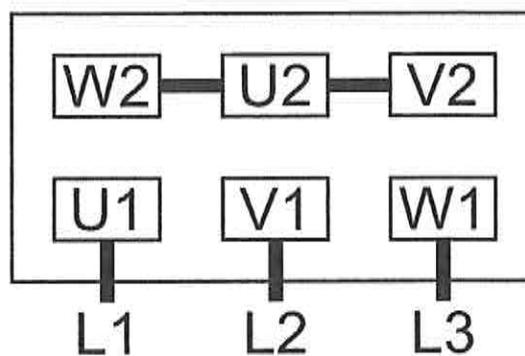


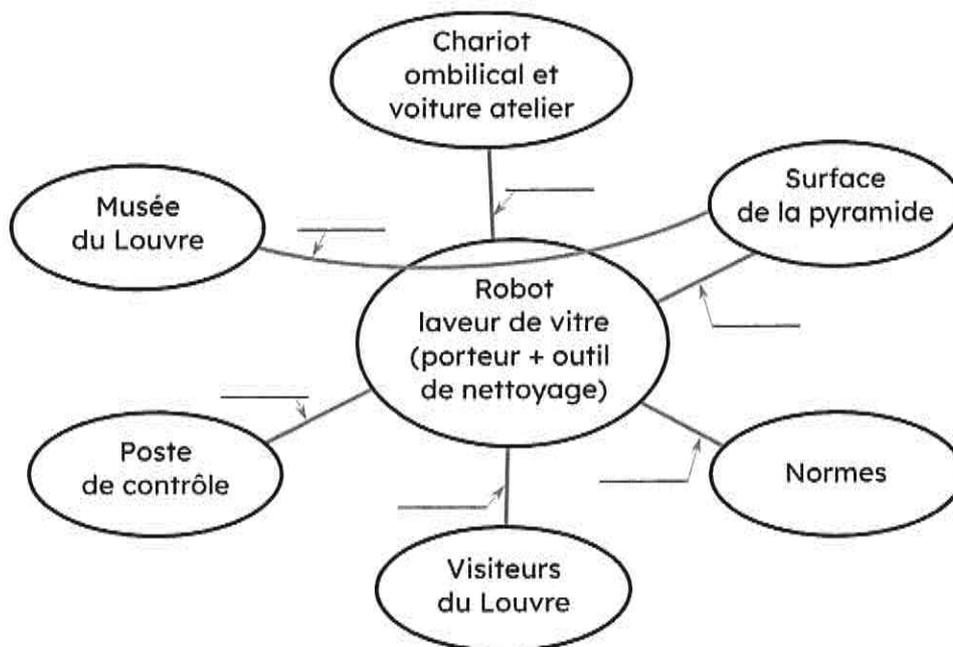
Schéma B



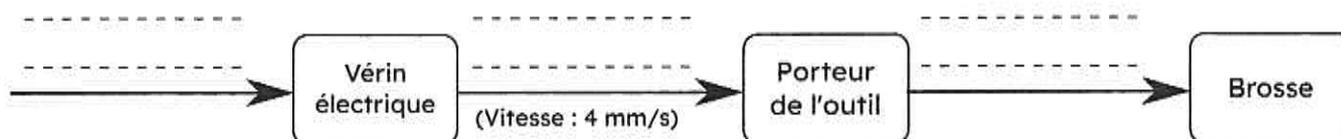
DOCUMENT RÉPONSE DR1 : À RENDRE AVEC LA COPIE

Question A.1 : analyse fonctionnelle externe

Numéro	Fonction
FP1	Nettoyer la surface vitrée de la pyramide
Fc1	Être commandé et communiquer à distance
Fc2	Être relié au chariot pour recevoir de l'énergie
Fc3	Respecter la surface de la pyramide
Fc4	Ne pas gêner les visiteurs du Louvre
Fc5	Respecter les normes



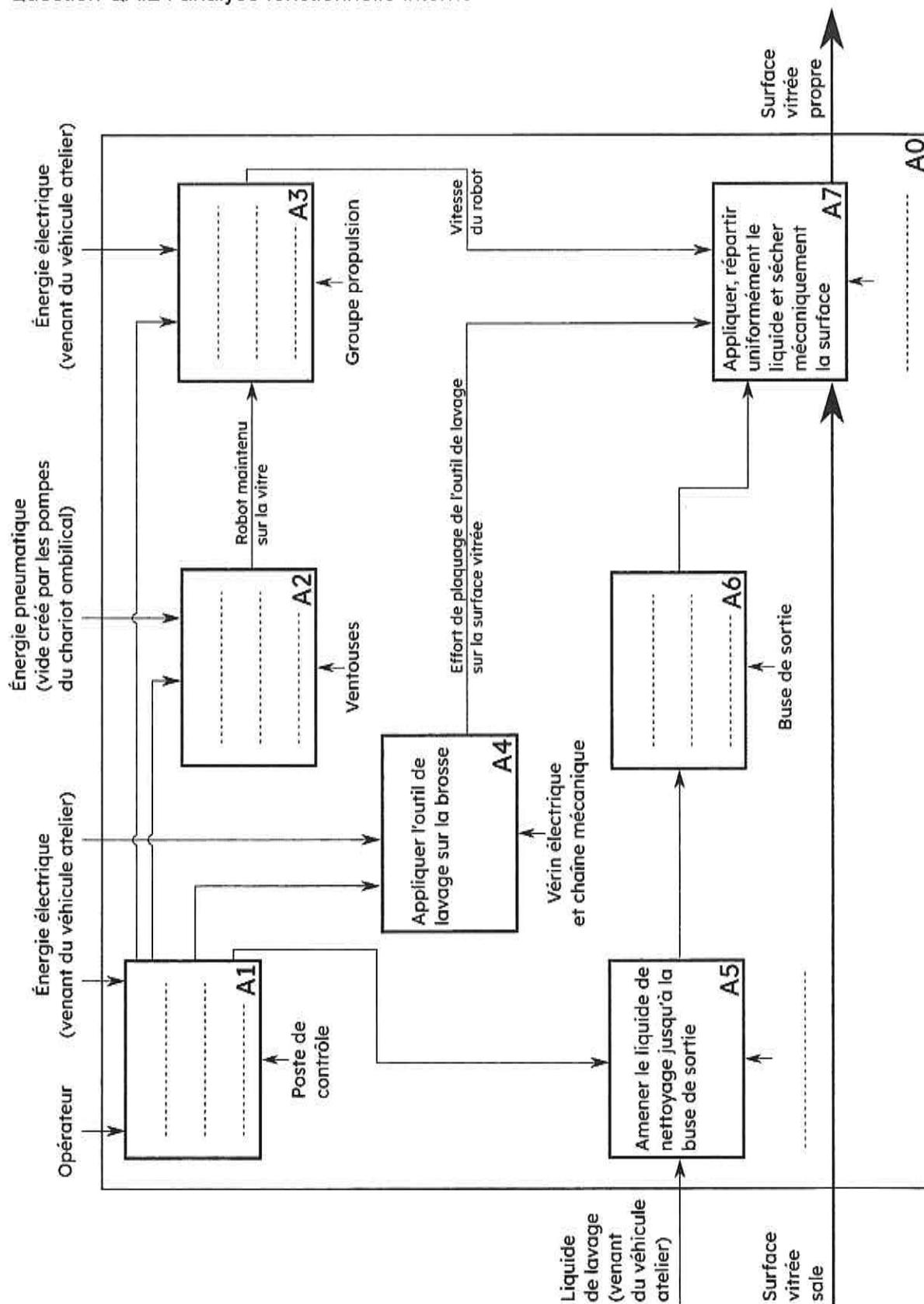
Question QD.1 : chaîne d'énergie



BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 15/18

DOCUMENT RÉPONSE DR2 : À RENDRE AVEC LA COPIE

Question QA.2 : analyse fonctionnelle interne

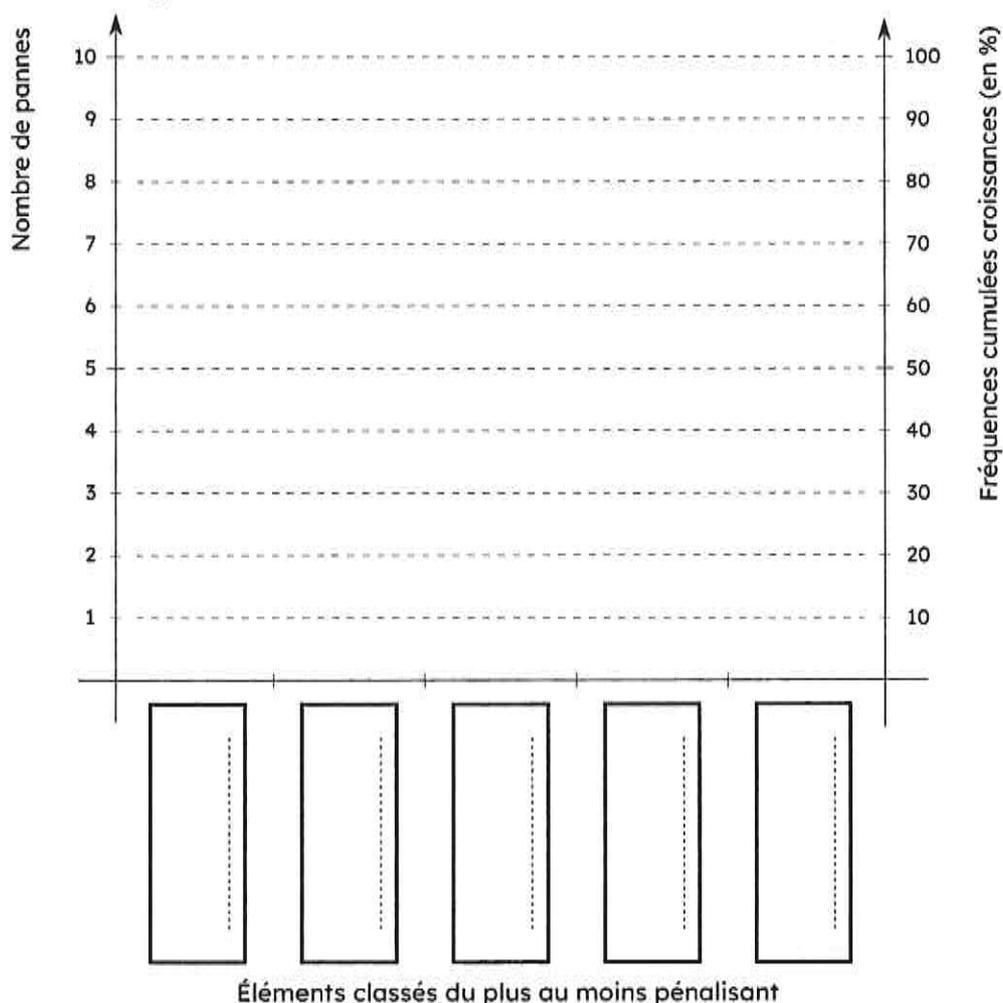


DOCUMENT RÉPONSE DR3 : À RENDRE AVEC LA COPIE

Question QF.1 : classement des éléments et FCC

Éléments, classés du plus au moins pénalisant	Nombres de pannes	Nombres de pannes cumulées	Fréquences cumulées croissantes, en %

Question QF.2 : diagramme de Pareto



Conclusion :

BTS Métiers des Services à l'Environnement		Session 2023
Sous-épreuve U22 : sciences physiques et sciences et technologies des systèmes	Code : 23MSESP	Page 17/18

DOCUMENT RÉPONSE DR4 : À RENDRE AVEC LA COPIE

Questions F.3 et F.6 : modèle de Weibull

