BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

ÉPREUVE D'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

SESSION 2022

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

JOUR 1

Durée de l'épreuve : **4 heures**

Partie sciences de l'ingénieur : durée indicative de **3 h** - Coefficient : **12**

Partie sciences physiques : durée indicative de **1 h** - Coefficient : **4**

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.

L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collège », est autorisé.

Chacune des parties est traitée sur des copies séparées.

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.

Ce sujet comporte 27 pages numérotées de 1/27 à 27/27.

Le candidat traite les 2 parties en suivant les consignes contenues dans le sujet.

Partie 1 - Sciences de l'ingénieur	20 points
Partie 2 - Sciences Physiques	20 points

Partie 1 : les documents réponses DR1 à DR2 (pages 18 et 19) sont à rendre avec la copie.

Partie 2 : si les exercices traités comportent des annexes, elles sont à rendre avec la copie.

Partie 1 : Sciences de l'ingénieur

Respirateur Artificiel

Constitution du sujet

- Sujet .....pages 3 à 17
- Documents réponses .....pages 18 à 19

Le candidat devra traiter obligatoirement la sous-partie 1.

Puis, il devra choisir et traiter l'une des deux sous-parties suivantes :

- la sous-partie 2 (choix 1), question 8 à question 15
- la sous-partie 3 (choix 2), question 16 à question 23

Les documents réponses DR1 et DR2 (pages 18 et 19) seront à rendre agrafés aux copies.

Mise en situation

Présentation du produit

MakAir est un respirateur artificiel adapté à la ventilation des patients présentant une détresse respiratoire aiguë. C'est un dispositif médical temporaire, peu onéreux au regard d'un respirateur conventionnel, de conception simple, visant à répondre à une pénurie, engendrée par une crise sanitaire (figure 1).

Figure 1 : respirateur MakAir

Le diagramme des cas d'utilisation est présenté en figure 2.

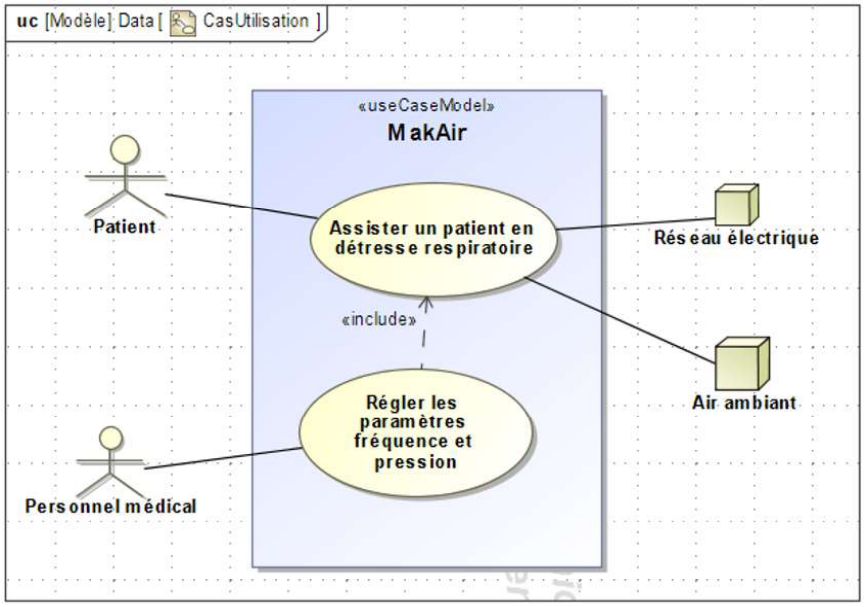


Figure 2 : diagramme des cas d'utilisation

Principe de fonctionnement et cycle respiratoire

L'assistance respiratoire consiste à insuffler de l'air dans les poumons du patient et à l'extraire à intervalles réguliers. Pour répondre à cette problématique, le MakAir est conçu selon le schéma de principe de la figure 3. Une turbine, en fonctionnement permanent, débite de l'air. Cet air pressurisé est insufflé au patient par l'ouverture de l'électrovanne d'inspiration. L'ouverture de l'électrovanne d'expiration permet d'évacuer l'air des poumons avant de recommencer un nouveau cycle.

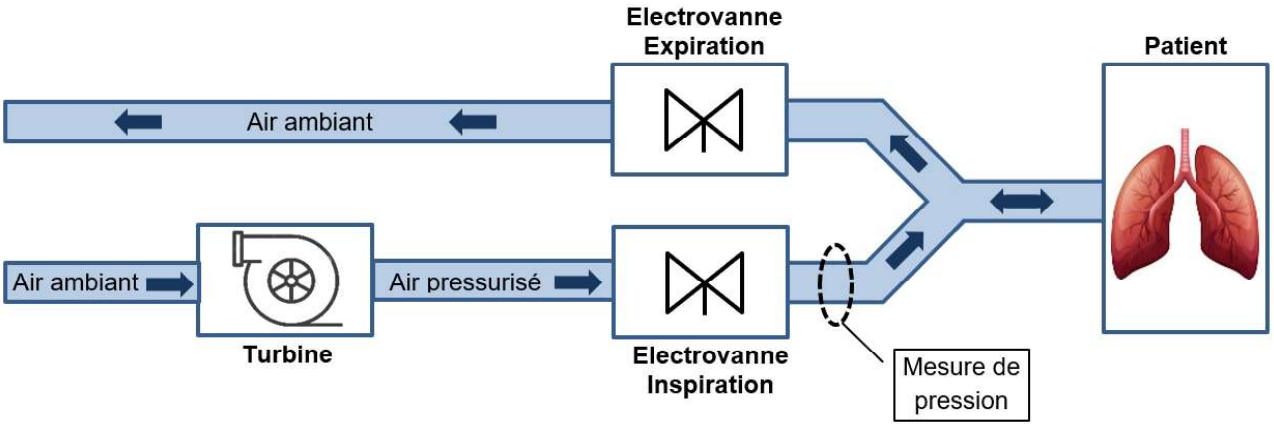


Figure 3 : schéma de principe

L'inspiration et l'expiration de l'air doivent respecter certaines pressions caractéristiques représentées en figure 4. La pression de plateau favorise l'échange gazeux dans les poumons, la pression d'expiration positive (PEP) permet de garder les alvéoles pulmonaires ouvertes. Ces pressions sont contrôlées grâce à une mesure de pression, réalisée en aval de l'électrovanne d'inspiration, comme indiqué (figure 3), et corrigé en cas de dérive.

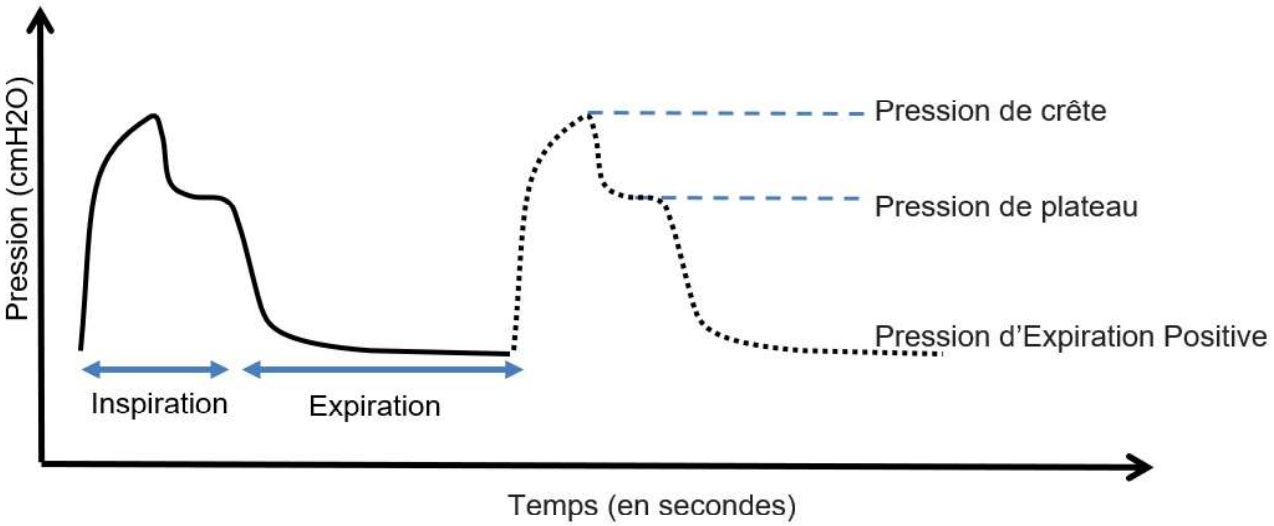


Figure 4 : cycle respiratoire et pressions caractéristiques

Les diagrammes des exigences et des blocs internes sont donnés en figure 5 et figure 6.

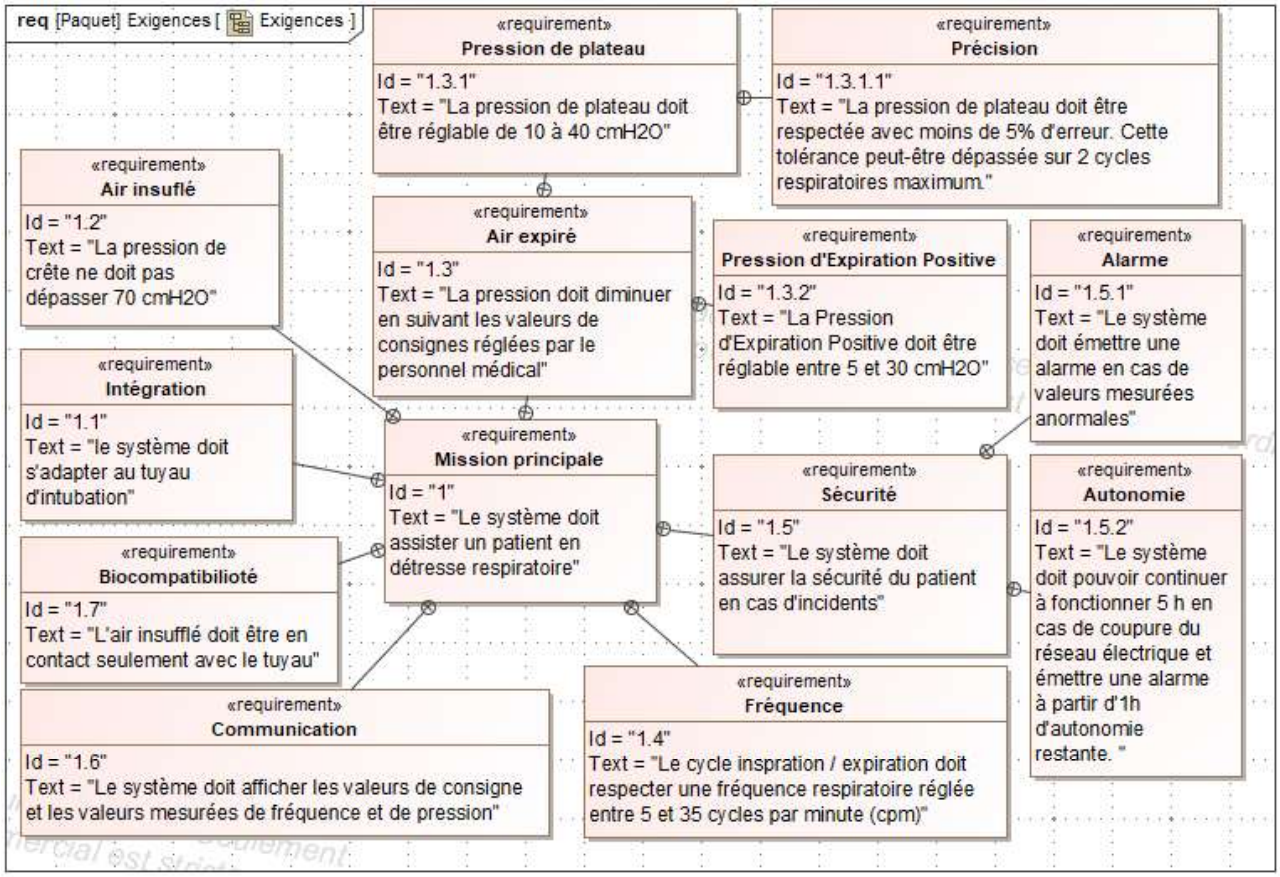


Figure 5 : diagramme partiel d'exigences du MakAir

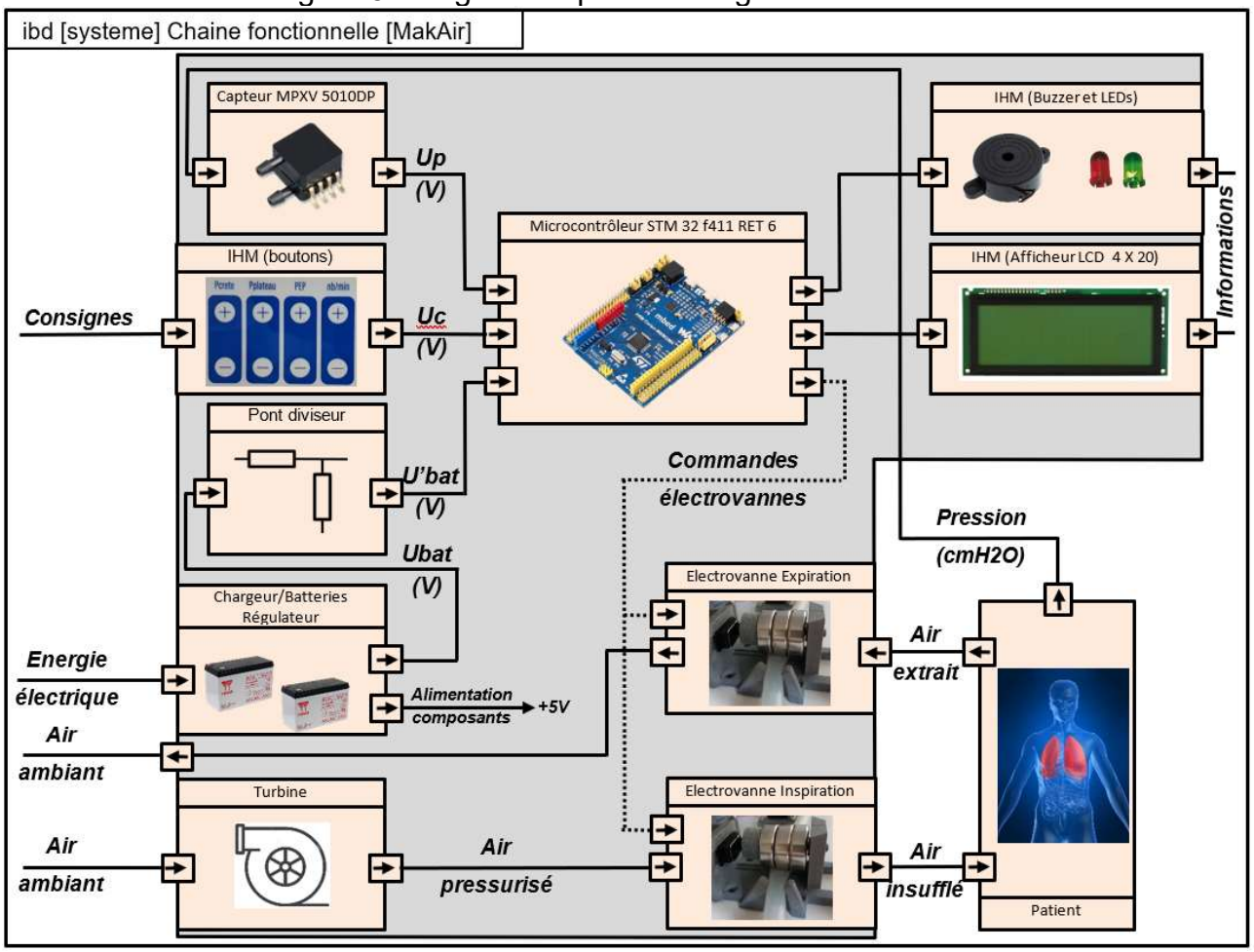


Figure 6 : diagramme des blocs internes

L'objectif de l'étude est de vérifier que le système permet :

- d'assurer une ventilation en pression contrôlée ;
- d'assurer la sécurité du patient en présence d'un défaut d'alimentation ;
- de contrôler la fréquence respiratoire.

Sous-partie 1 – obligatoire

Comment assurer une ventilation en pression contrôlée ?

L'objectif de cette sous-partie est d'analyser la chaîne d'acquisition de la pression, de valider le choix du capteur, la résolution du convertisseur analogique numérique et le contrôle de la pression par un asservissement.

Question 1.	Indiquer quels sont les blocs du diagramme de la figure 6, appartenant à la chaîne de puissance, qui permettent de satisfaire les exigences 1.2 et 1.3 de la figure 5.

L'acquisition de la pression, figure 7, est réalisée par un capteur analogique ayant une plage de mesure qui s'étend de 0 à 10 kPa et une sensibilité S = 450 mV·kPa^{-1}.

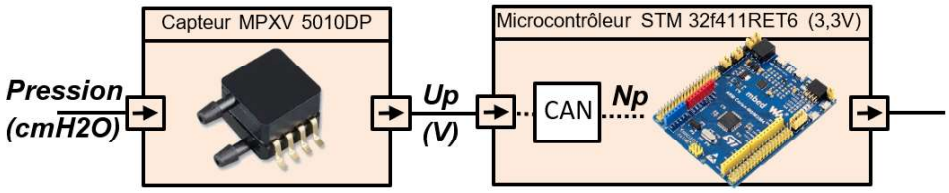


Figure 7 : chaîne d'acquisition de la pression

Question 2.	Relever, dans le diagramme des exigences de la figure 5 les valeurs des pressions caractéristiques de la figure 4 et montrer que ce capteur est adapté à toutes les valeurs de pressions indiquées par les données médicales et que sa loi d'entrée/sortie peut s'écrire $Up = 0{,}044 \times Pression$ avec U_p exprimé en V et Pression en cmH_2O. Rappels : 1 bar = 1·10^5 Pa et 1 cmH_2O = 9,80638·10^{-4} bar

Le réglage des différentes pressions caractéristiques se fait avec une précision de 1 cmH_2O, mais à la mise sous tension du respirateur, celui-ci lance une phase de tests où il réalise une mesure de pression d'offset avec une précision inférieure à 0,1 cmH_2O.

La loi d'entrée/sortie du convertisseur analogique numérique (CAN) est donnée par la relation : $Np = Up \times \frac{2^n - 1}{3{,}3}$ où Np est la valeur numérique correspondant à la valeur analogique de Up.

Question 3.	Montrer qu'une résolution du convertisseur de 10 bits permet d'obtenir la précision nécessaire lors de la phase de tests.

L'étude de l'asservissement étudié concerne la pression de plateau dont le maintien favorise les échanges gazeux. Il importe donc que cette pression suive de manière fidèle la pression de plateau choisie par le personnel médical. Pour anticiper le comportement du MakAir, deux modèles multi-physiques sont élaborés.

Le premier modèle, en boucle ouverte, figure 8, où la pression mesurée par le capteur est directement affichée sur l'IHM.

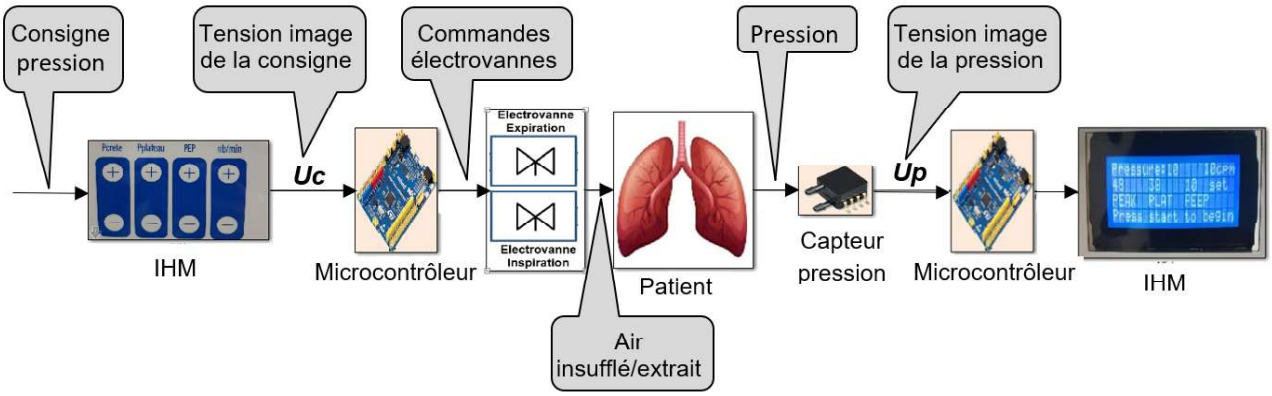


Figure 8 : modèle multi-physique en boucle ouverte

Une simulation est réalisée avec une pression de plateau consignée à 38 cmH_2O.

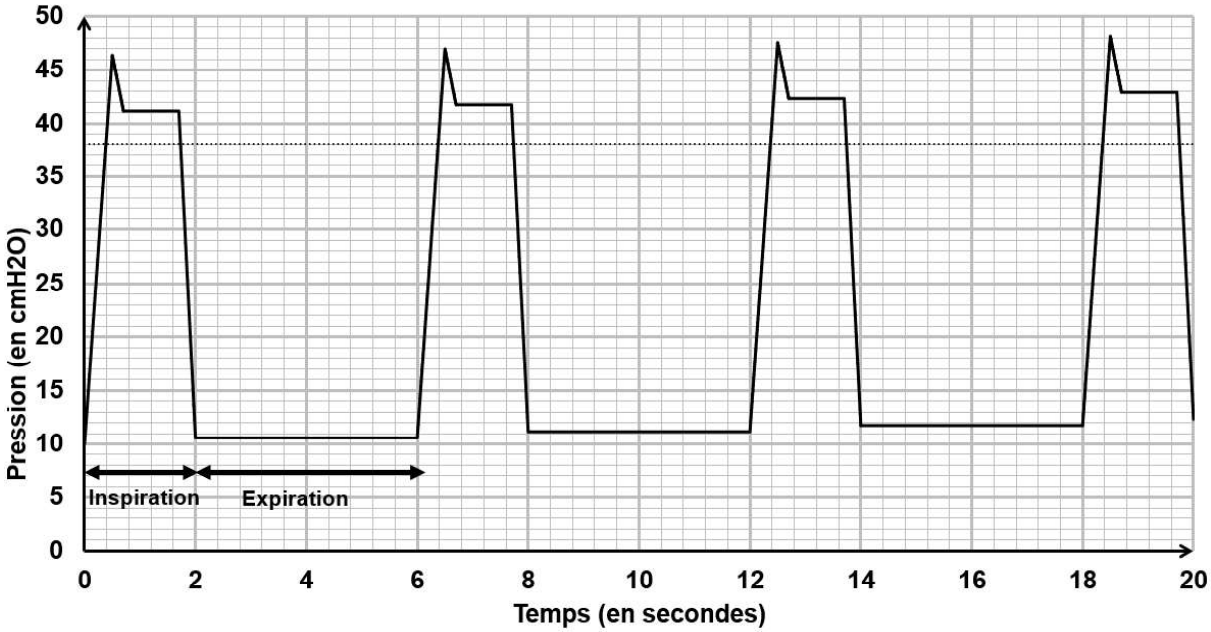


Figure 9 : courbe de la pression résultant du modèle multi-physique en boucle ouverte

Question 4.	Montrer que les résultats obtenus par simulation en figure 9 ne satisfont pas l'exigence 1.3.1.1.

Le deuxième modèle, en boucle fermée, figure 10, permet une comparaison entre la pression de consigne et la pression mesurée.

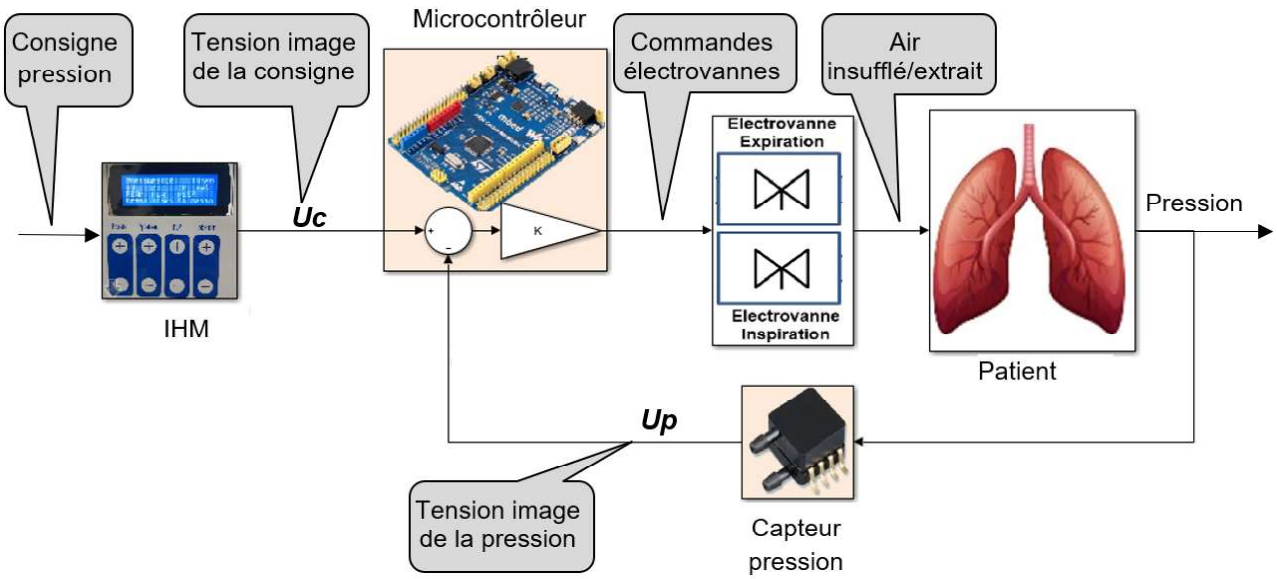


Figure 10 : modèle multi-physique en boucle fermée

Question 5.	Préciser le principe de fonctionnement du modèle en boucle fermée et l'intérêt des éléments ajoutés dans le bloc microcontrôleur présenté en figure 10.

Des simulations avec différentes valeurs du coefficient *K* du correcteur programmé dans le microcontrôleur, ont permis d'obtenir les résultats représentés figure 11 à figure 13, pour une pression de plateau consignée à 38 cmH_2O.

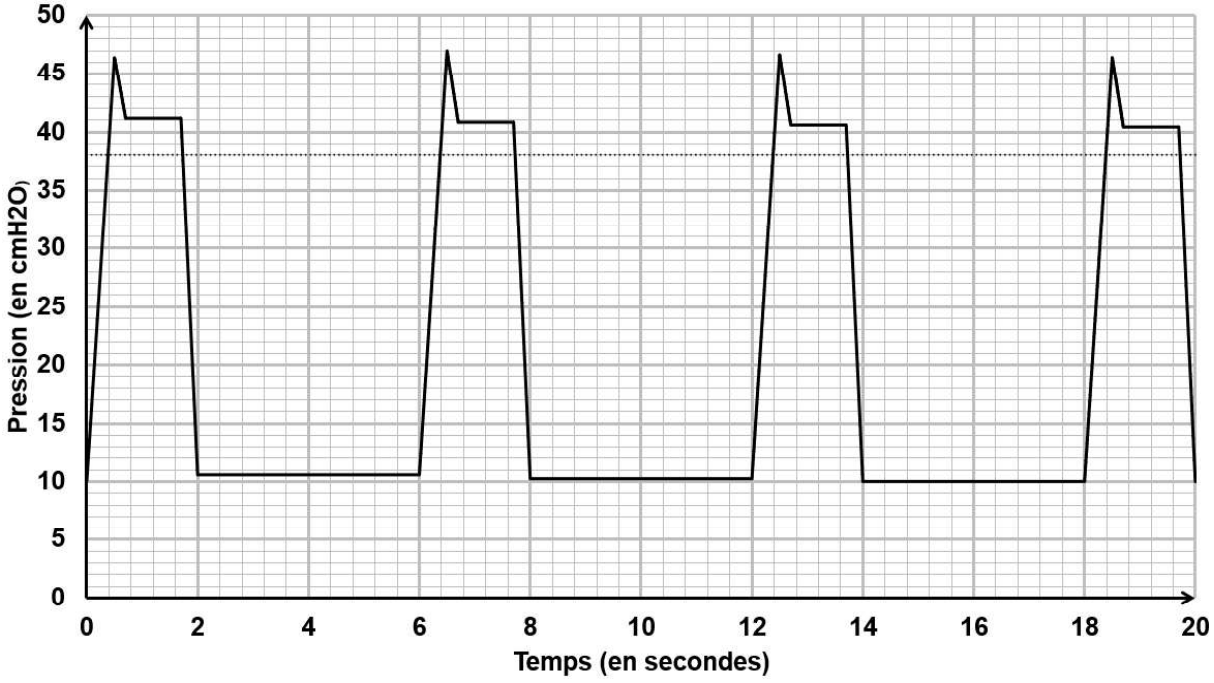


Figure 11 : K = 0,5

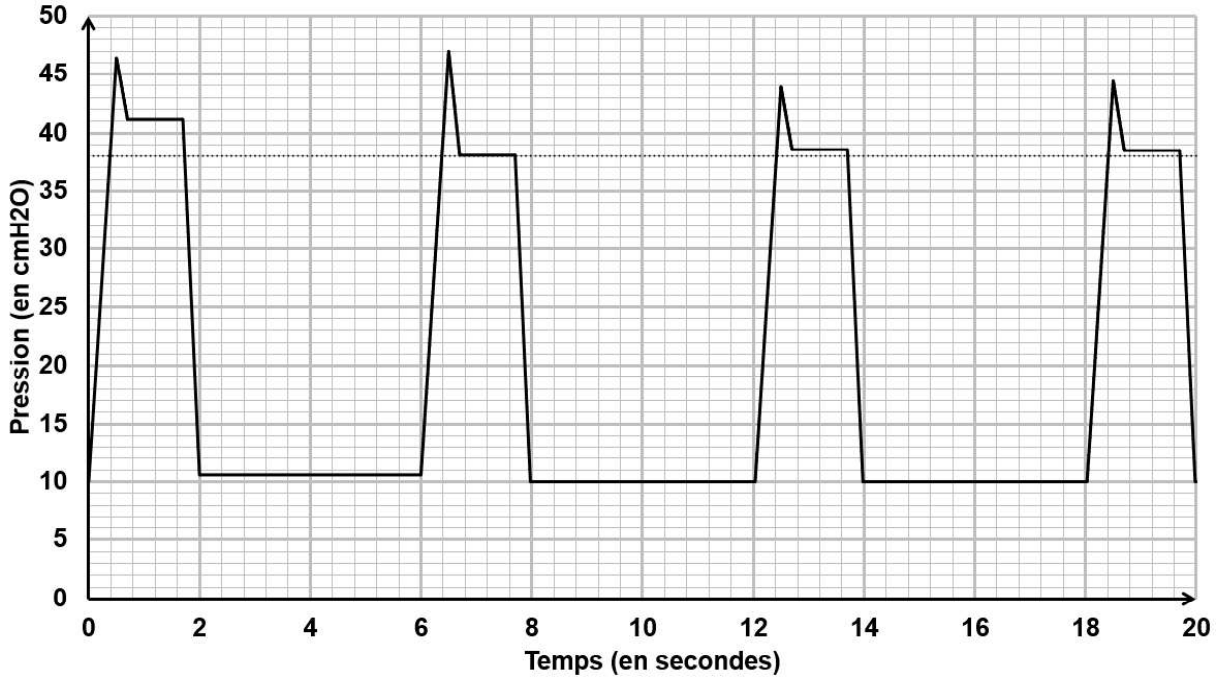


Figure 12 : K = 2

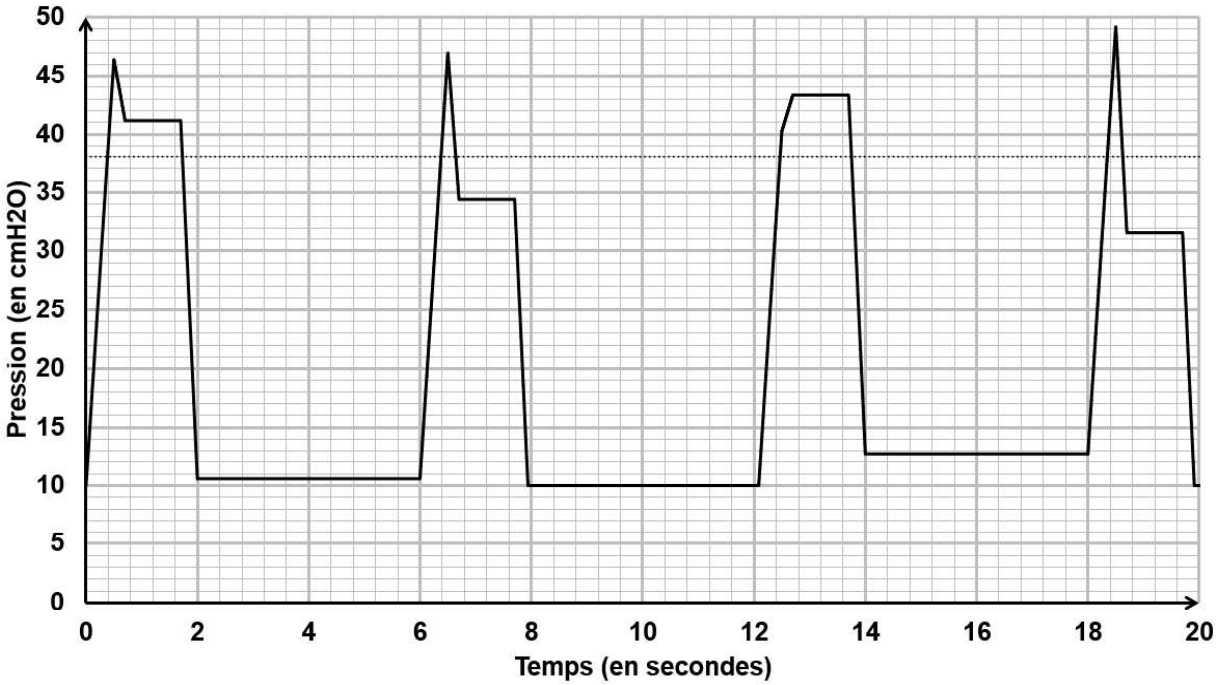


Figure 13 : K = 4

Question 6.	Proposer et justifier le choix de la valeur du coefficient *K* parmi les trois valeurs proposées du correcteur retenue pour la réalisation du prototype de MakAir afin de satisfaire l'exigence 1.3.1.1.

Question 7.	Le réglage choisi question précédente, permet-il aussi de satisfaire l'exigence 1.2 ?

Sous-partie 2 – choix 1

1. Comment assurer la sécurité du patient en présence d'un défaut d'alimentation ?

L'objectif de cette sous-partie est de s'assurer que l'autonomie restante est suffisante après le déclenchement de l'alarme en cas de coupure secteur.

Afin d'assurer la sécurité du patient en cas de coupure secteur, le respirateur MakAir est équipé de deux batteries montées en série, chacune composée de 6 accumulateurs au plomb branchés en série.

Les caractéristiques des accumulateurs sont :

- tension nominale 2 V ;
- tension de décharge 1,8 V ;
- capacité 7 Ah.

La figure 14 présente l'évolution de l'intensité délivrée par les batteries lors d'une coupure secteur. Durant cette coupure secteur les réglages du respirateur sont les suivants :

- pression crête 40 cmH_2O ;
- pression plateau 30 cmH_2O ;
- pression expiration positive 10 cmH_2O ;
- fréquence respiratoire 20 cpm (cycles par minute).

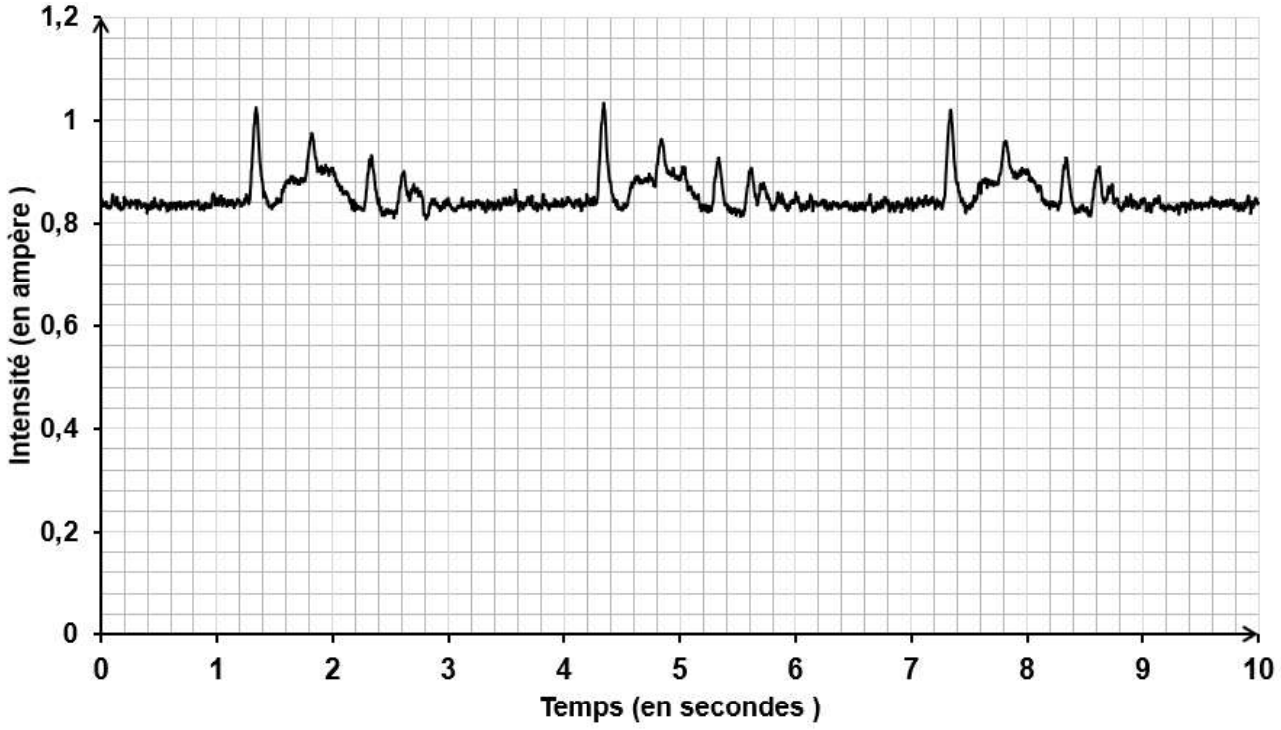


Figure 14 : intensité délivrée par les batteries lors d'une coupure secteur

Question 8.	Estimer la valeur moyenne de l'intensité délivrée par les batteries. En faisant l'hypothèse que l'intensité de décharge des batteries est constante pendant la durée de la décharge, déduire l'autonomie du respirateur au format heures/minutes et la comparer aux données du diagramme des exigences

Question 9.	Déterminer à l'aide de la figure 14 la fréquence respiratoire (en cycle par minute). Comparer cette fréquence avec celle réglée lors de la mesure.

Question 10.	En faisant l'hypothèse que les pointes de courant dues au démarrage des électrovannes ne dépassent pas 1 A, déterminer si une fréquence respiratoire plus élevée a une incidence significative sur l'autonomie du respirateur.

Une mesure de la tension aux bornes des batteries a permis de tracer la courbe présentée en figure 15.

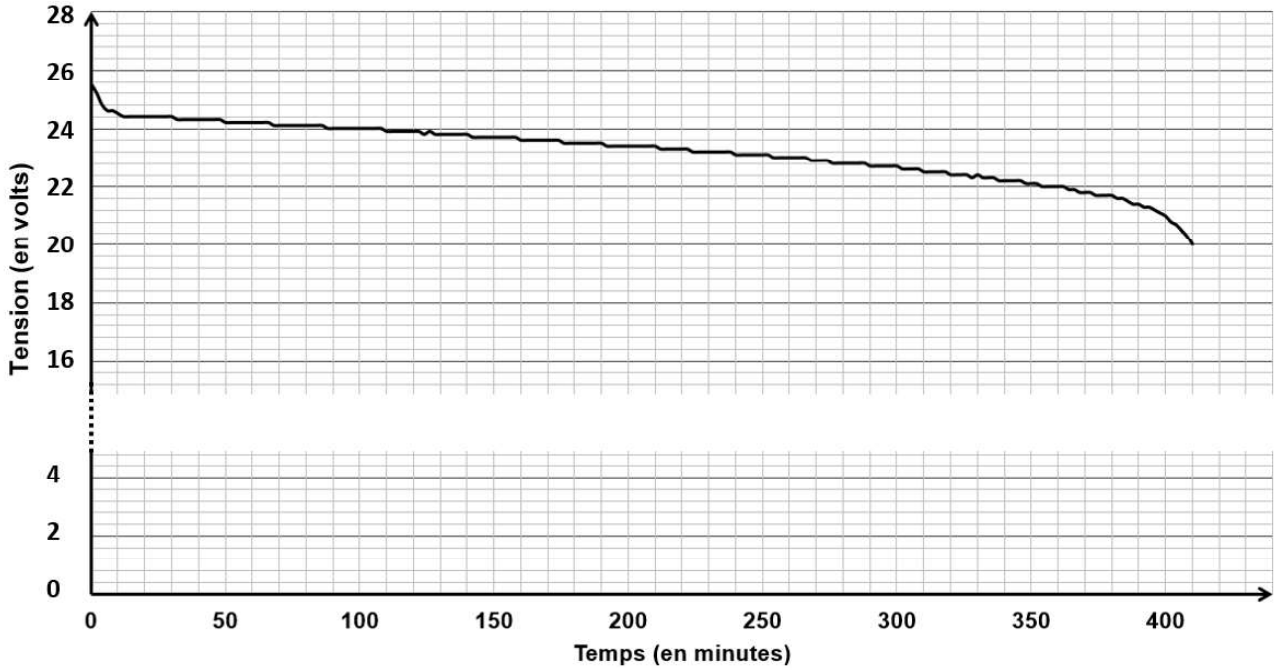


Figure 15 : décharge expérimentale des batteries

Question 11.	Déterminer à l'aide de la figure 15 l'autonomie du respirateur, sans compromettre l'intégrité des batteries.

Question 12.	Comparer cette autonomie expérimentale avec celle calculée précédemment. Argumenter un éventuel écart.

La tension aux bornes des batteries est représentative de la capacité disponible. L'acquisition de la tension *Ubat*, (figure 16), permet, après traitement, de signaler par une alarme, une décharge excessive.

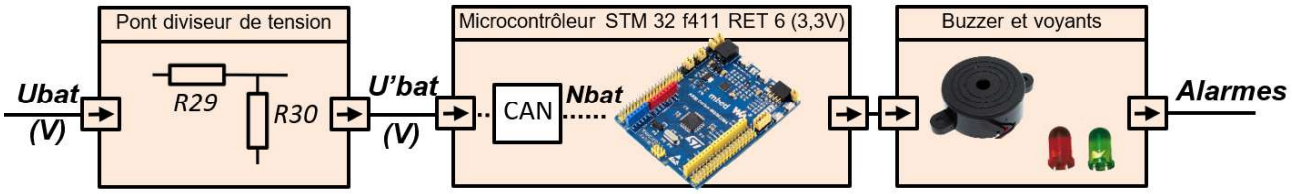


Figure 16 : chaîne d'acquisition de la tension batterie

avec $U'bat = \frac{R30}{R29+R30} \times Ubat$ $\quad Nbat = 310 \times U'bat$

et *R30* = 1 kΩ et *R29* = 8,2 kΩ

L'algorithme de commande de l'alarme est représenté en figure 17.

…

Si *Nbat* < 760 **alors**
    Activer l'alarme sonore
    Faire clignoter voyant rouge

Sinon
    Faire clignoter voyant vert

…

Figure 17 : algorithme alarme

Question 13.	Justifier la présence du pont diviseur de tension dans la chaîne d'information.

Question 14.	Déterminer la valeur de la tension de batterie *Ubat* qui déclenche l'alarme. En déduire le temps restant avant un arrêt du respirateur en utilisant la figure 15.

Question 15.	Conclure sur le respect de l'exigence 1.5 vis-à-vis de la sécurité du patient.

Sous-partie 3 – choix 2

2. Comment contrôler la fréquence respiratoire ?

Les objectifs de cette sous-partie sont de valider les solutions logicielle et matérielle qui permettent le contrôle de la fréquence respiratoire.

Dans un premier temps, l'étude porte sur la solution logicielle.

La fréquence respiratoire (nombre de cycles inspiration/expiration) est exprimée en cycles par minute (cpm). L'ouverture et la fermeture des vannes fixent cette fréquence dont la plage de réglage est indiquée par le diagramme des exigences. Le réglage de cette fréquence est réalisé par le biais d'une interface homme machine (IHM) composée, d'une part, par un bouton **+** et un bouton **-** pour augmenter ou diminuer la fréquence, et d'autre part, par un afficheur LCD de 4 lignes et 20 colonnes permettant de communiquer, entre autres, la valeur de la consigne durant le réglage.

La fonction Python ***Afficher fréquence***, permet, lors du réglage de la fréquence respiratoire, d'afficher les indications présentées en figure 18 où *XX* représente la valeur de la fréquence respiratoire contenue dans la variable *Fréquence*.

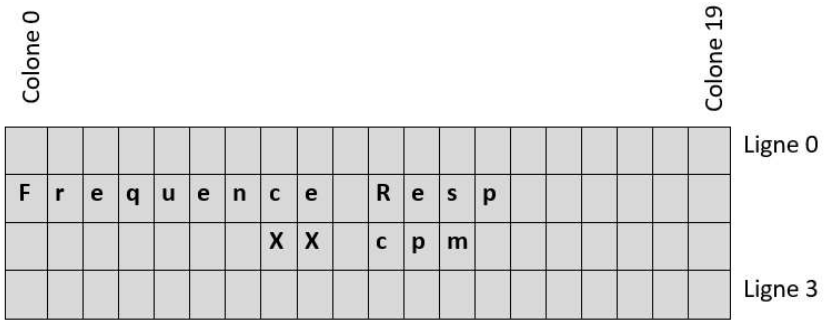


Figure 18 : écran LCD lors du réglage de la fréquence respiratoire

Question 16. DR1	Compléter, sur le *document réponses DR1*, le script de la fonction *Afficher fréquence* pour communiquer les indications souhaitées.

Le réglage et l'affichage de la consigne de fréquence sont décrits par l'algorigramme de la figure 19 .

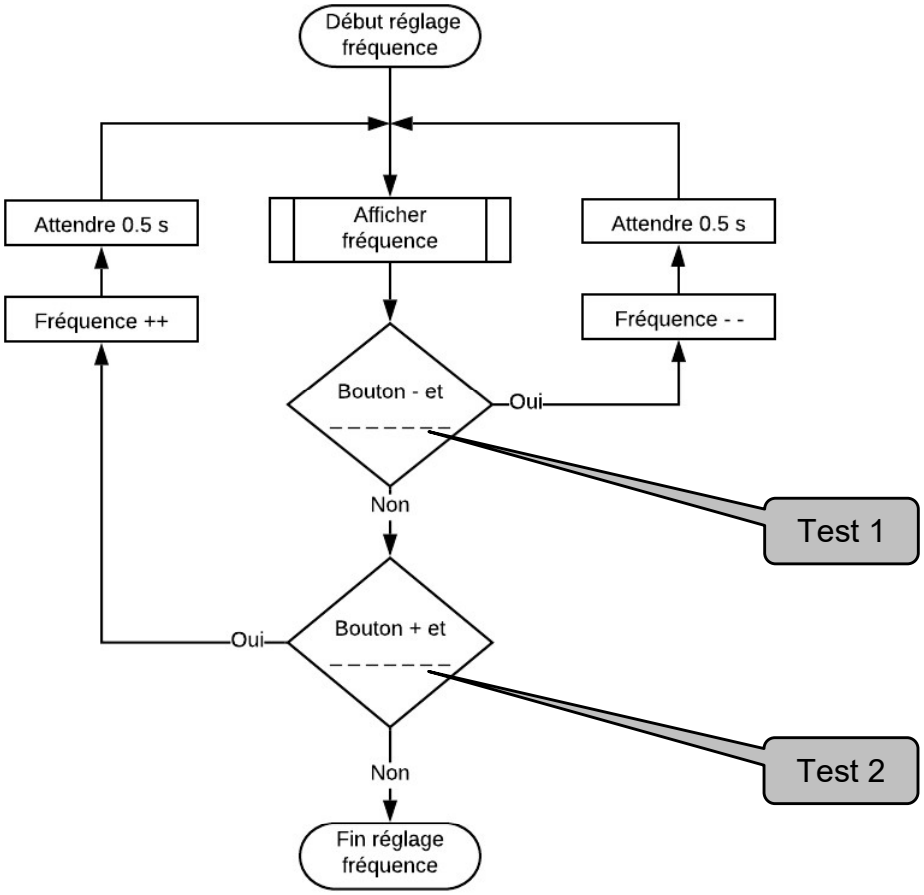


Figure 19 : algorigramme de réglage de la fréquence respiratoire

Question 17.	Indiquer le contenu des tests 1 et 2 de l'algorigramme représenté figure 19 pour satisfaire le réglage de la fréquence respiratoire du diagramme d'exigences. Déterminer la valeur du pas de réglage possible.

Les fonctions Python décrivant l'algorigramme de la figure 19 sont partiellement représentées sur le document réponses DR1.

Opérateurs arithmétiques		Opérateurs comparatifs		Opérateurs logiques	
`x + y`	*Addition*	`x < y`	*Inférieur*	`x and y`	*Intersection*
`x - y`	*Soustraction*	`x <= y`	*Inférieur ou égal*	`x or y`	*Union*
`x * y`	*Multiplication*	`x > y`	*Supérieur*	`not y`	*Négation*
`x / y`	*Division*	`x >= y`	*Supérieur ou égal*		
`x // y`	*Division entière*	`x == y`	*Égal*		
`x % y`	*Modulo (reste)*	`x != y`	*Différent*		
`-x`	*Opposé*	`x <> y`	*Différent*		
`abs(x)`	*Valeur absolue*	`x is y`	*Identité*		
`x ** y`	*Puissance*	`x is not y`	*Non identité*		

Question 18. DR1	Compléter, sur le *document réponses DR1*, le script de la fonction *Réglage fréquence* en utilisant, si besoin, les symboles des différents opérateurs arithmétiques, comparatifs, logiques.

Dans un second temps, l'étude porte sur la solution matérielle.

Pour des raisons sanitaires (dépôts d'huile, de métal, …), l'air insufflé au patient ne doit pas être en contact avec des éléments mécaniques. Pour satisfaire cette exigence, les électrovannes d'inspiration et d'expiration sont des vannes à pincement, (figure 20). Un galet excentrique, actionné par un servomoteur tourne d'un angle θ autour de l'axe $(0, \vec{x}_0) = (A, \vec{x}_0)$, il écrase plus ou moins un tuyau souple pour laisser passer plus ou moins d'air. ''Excentrique'' signifie que le galet tourne autour d'un axe de rotation qui n'est pas l'axe de révolution du cylindre.

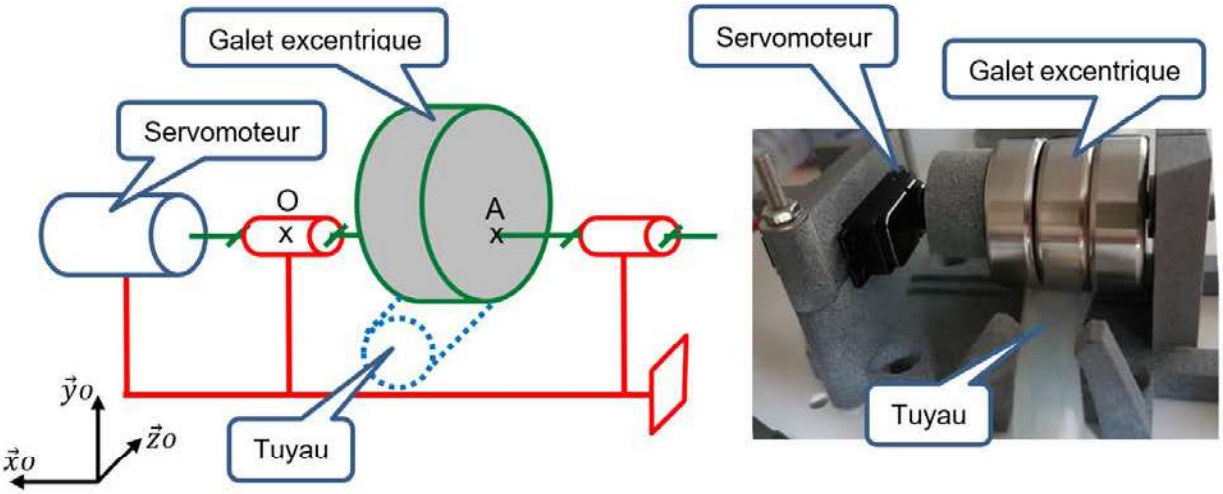


Figure 20 : électrovanne à pincement

La figure 21 montre que plus la valeur de l'angle de rotation θ augmente plus le tuyau est écrasé, donc plus la vanne est fermée.

$(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, repère lié au bâti
$(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$, repère lié au galet

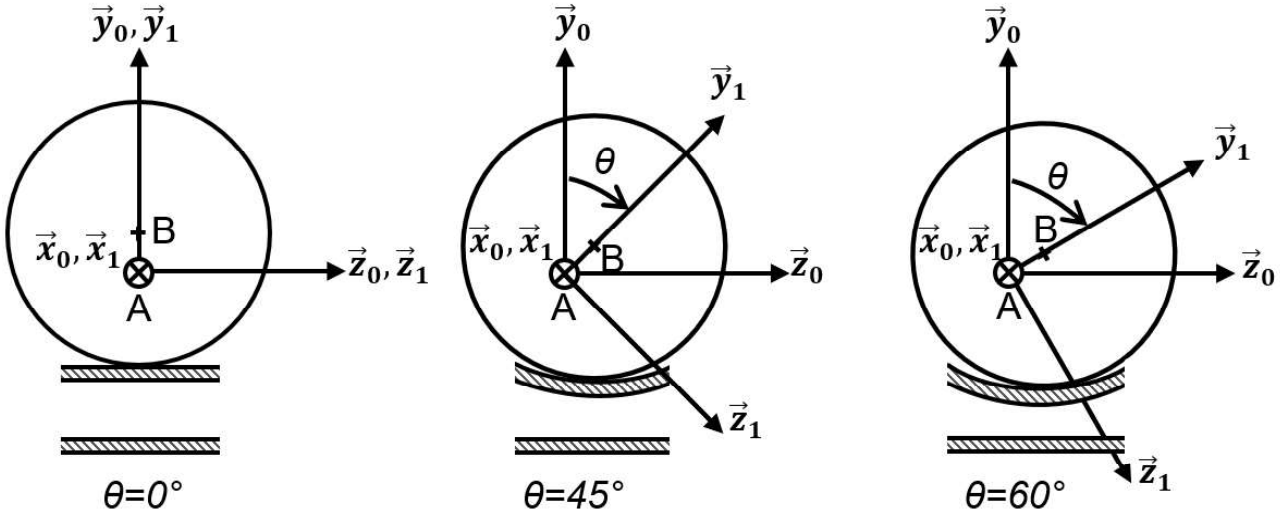


Figure 21 : galet excentrique pour différentes positions de l'angle θ

Pour fermer la vanne, le centre *B* du galet doit se déplacer verticalement de la distance *di* correspondant au diamètre intérieur du tuyau. L'épaisseur *e* de la matière qui compose le tuyau est supposée rester constante pendant la déformation du tuyau.

Question 19.	Déterminer par construction graphique, sur le document réponses DR2, l'angle θ que doit parcourir le galet pour que la vanne soit totalement fermée. Conclure sur sa capacité à obstruer le tuyau.
DR2	

Le servomoteur est un système électromécanique asservi en position. Il actionne la vanne en répondant à une commande de type modulation à largeur d'impulsion (MLI) transmise par le microcontrôleur. C'est la valeur du rapport cyclique α qui détermine la position angulaire de l'axe de sortie. La plage angulaire du servomoteur varie de 0° à 180°.

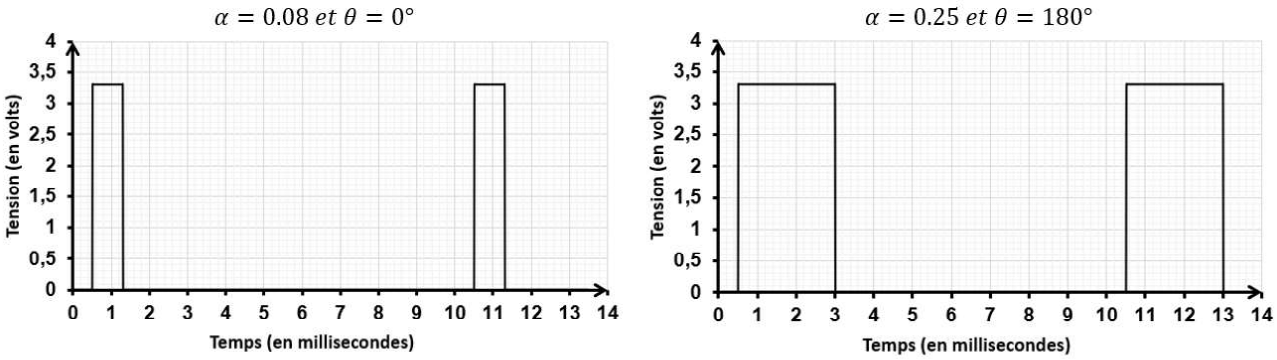


Figure 22 : signal de commande MLI du servomoteur

Question 20.	Établir l'équation de la fonction affine, $\alpha = f(\theta)$, où α représente le rapport cyclique du signal de commande MLI et θ la position angulaire de l'axe de sortie du servomoteur. Déduire la valeur du rapport cyclique α du signal de commande MLI permettant de fermer la vanne.

Un relevé du signal de commande MLI, lorsque la vanne d'inspiration est fermée, a permis d'obtenir le signal de la figure *23*.

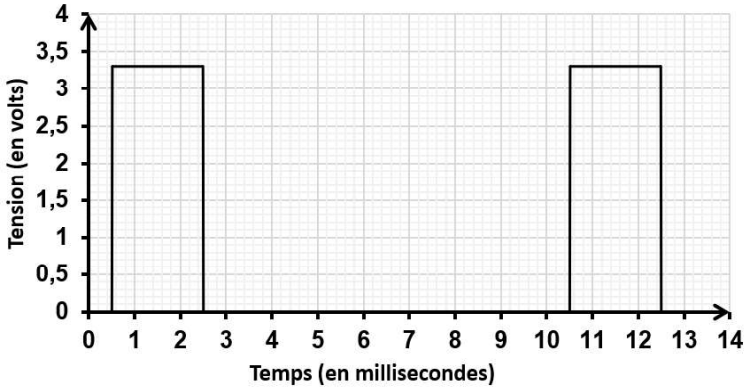


Figure 23 : signal de commande MLI, vanne fermée

Question 21.	Déterminer, la position angulaire du galet, correspondant au signal de la figure 23. Comparer cette position avec celle obtenue par construction graphique sur le document DR2. Quantifier et justifier l'écart.

La force $\overrightarrow{F_{(Galet \rightarrow Tuyau)}}$ nécessaire pour écraser le tuyau est de 50 N. Le galet tourne autour de l'axe $(A, \vec{x}_0)$.

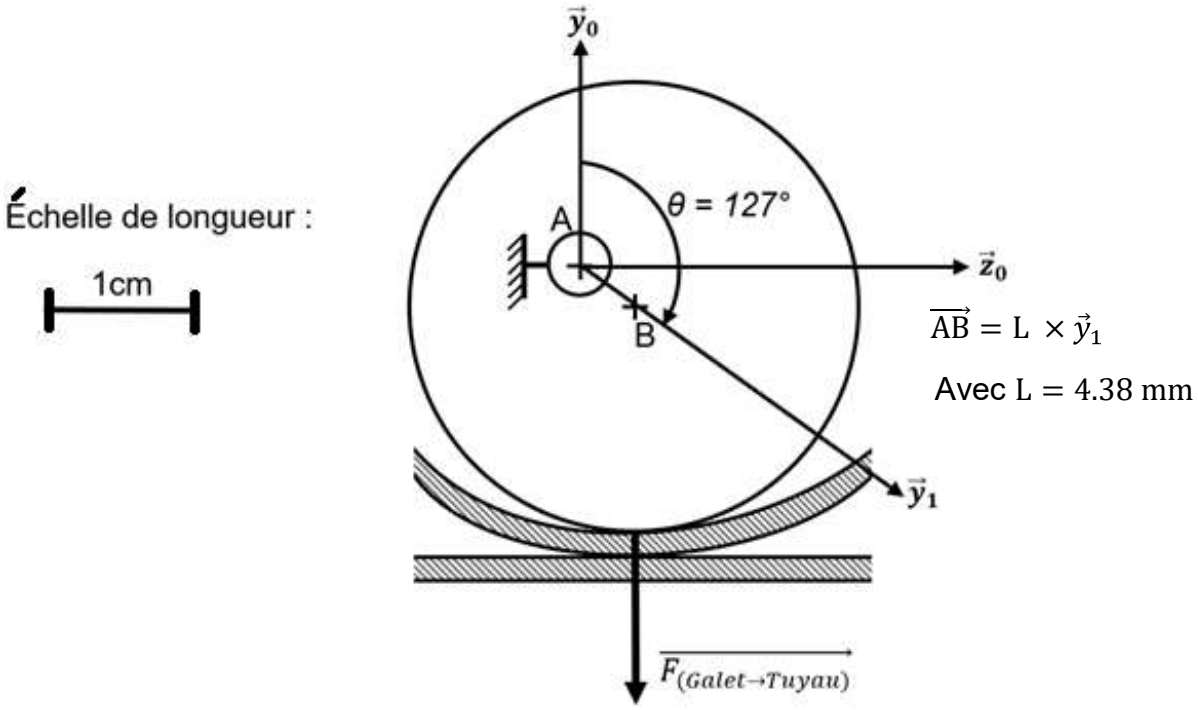


Figure 24 : force d'écrasement du tuyau par le galet

La documentation partielle du servomoteur est donnée figure 25.

Servomoteur économique disposant d'un couple élevé.

- Alimentation: 4,8 à 6 Vcc
- Course: 180°
- Couple:
  - 3 kg.cm à 4,8 Vcc
  - 3,2 kg.cm à 6 Vcc
- Vitesse:
  - 0,18 sec / 60° à 4,8 Vcc
  - 0,16 sec / 60° à 6 Vcc
- Dimensions: 41 x 20 x 38 mm
- Poids: 36 g

Figure 25 : caractéristiques servomoteur

Question 22.	Vérifier que le servomoteur délivre un couple *Cm* suffisant pour que le galet écrase le tuyau.

Question 23.	Les solutions logicielles et matérielles ainsi étudiées permettent-elles d'insuffler de l'air au patient en respectant les exigences 1.4 et 1.6 ?

Document réponses DR1

Question 16-choix 2

Script fonction Afficher_fréquence

```
def Afficher_fréquence(Fréquence):
    lcd.clear()
    lcd.setCursor(0,1)
    lcd.write("Frequence Resp")

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

    lcd.color(0, 255, 0)
    sleep(0.5)
```

Question 18 – choix 2

Script fonction Réglage_fréquence

```
def Réglage_fréquence():
 _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _
   if (Bouton_moins.value()_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ ):

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _
       sleep(0.5)

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _
```

Modèle CCYC : ©DNE

NOM DE FAMILLE (naissance) :
(en majuscules)

PRENOM :
(en majuscules)

N° candidat :

N° d'inscription :

(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

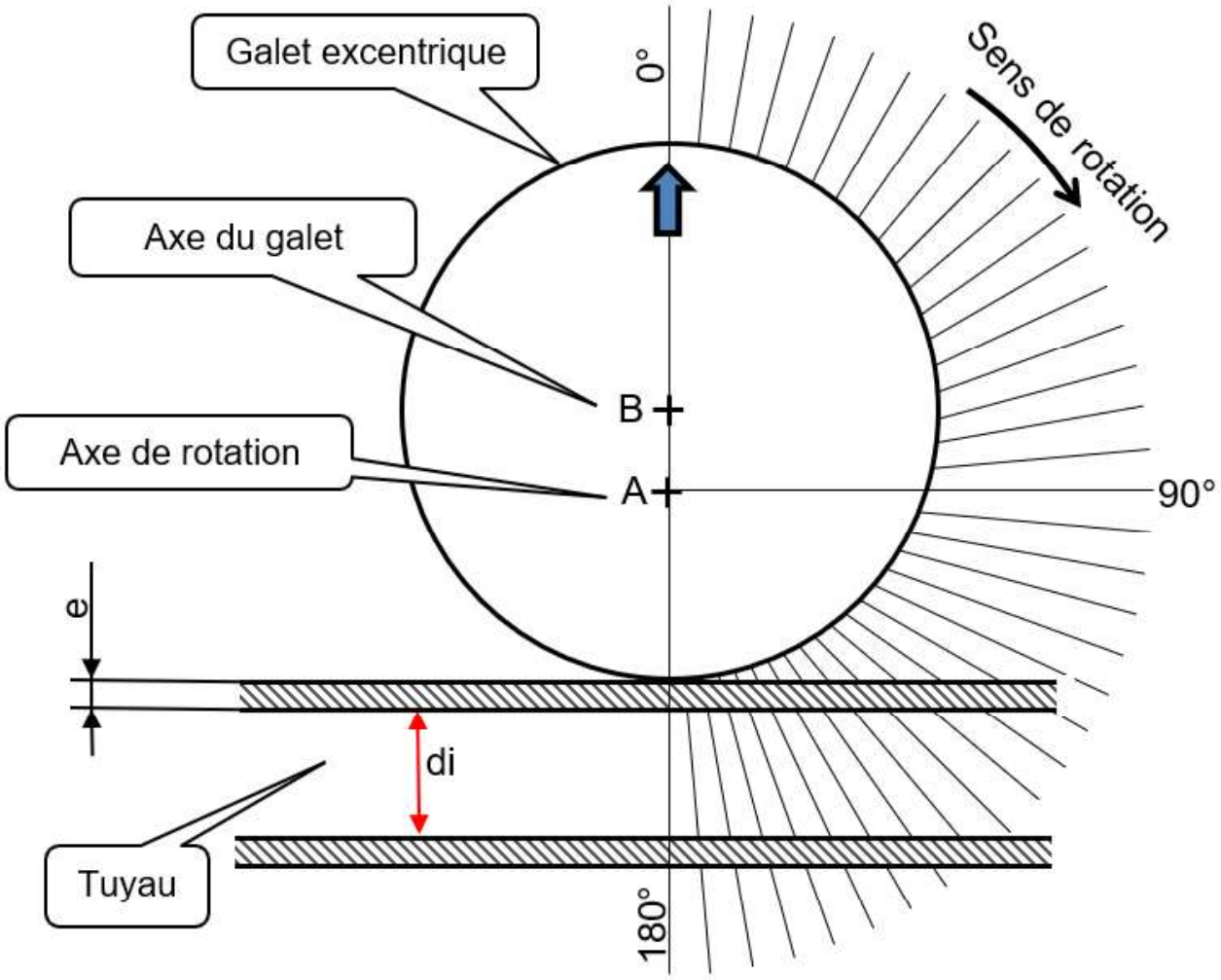
Né(e) le : ☐☐ / ☐☐ / ☐☐☐☐

1.2

Document réponses DR2

Question 19 – choix 2

Galet excentrique en position vanne ouverte représenté à l'échelle 2,5



Modèle CCYC : ©DNE

NOM DE FAMILLE (naissance) :
(en majuscules)

PRENOM :
(en majuscules)

N° candidat :

N° d'inscription :

(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Né(e) le : ☐☐ / ☐☐ / ☐☐☐☐

1.2

Partie 2 – Sciences physiques

Les trois exercices proposés sont indépendants ; le candidat doit en traiter seulement deux. Chacun des exercices est noté sur 10.
Le candidat indiquera au début de sa copie les numéros des 2 exercices choisis.
Les mots clés présents en en-tête de chaque exercice, peuvent l'aider à effectuer son choix.
Les numéros des exercices traités doivent apparaitre clairement sur la copie.

EXERCICE I - DISPOSITIF DE CHAUFFAGE PAR ROTO MOULAGE SOLAIRE

Mots clés : bilans énergétiques, premier principe de la thermodynamique, transfert thermique

Le procédé de roto moulage est un procédé de mise en forme des matières plastiques qui permet de fabriquer des objets en plastiques creux (figure 1) d'assez grandes dimensions (cuves de récupération d'eau, containers, kayaks…) à partir de poudre de polyéthylène chauffée jusqu'à 200 °C.

Figure 1. Cuve de récupération d'eau.

Le système de chauffage nécessaire à la fabrication utilise la lumière solaire captée par un parc d'héliostats ; ceux-ci réfléchissent les rayons lumineux vers la chambre de chauffage où se trouve le moule en rotation (figure 2).

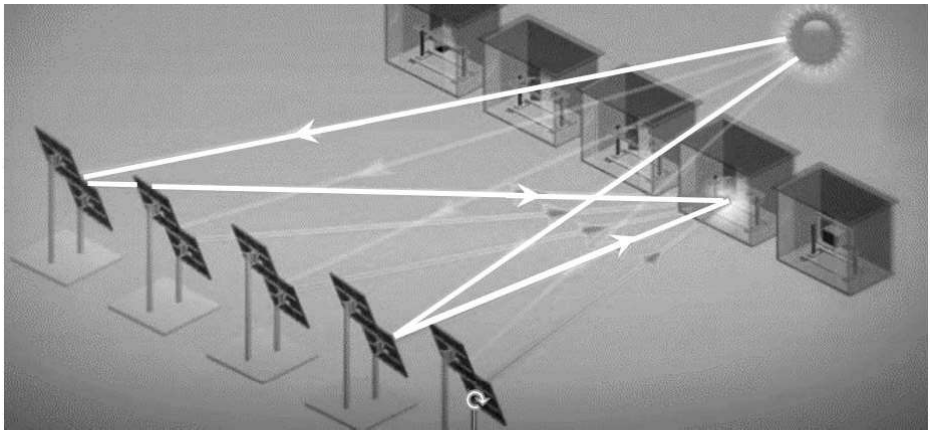


Figure 2. Schéma du dispositif utilisant le roto moulage solaire (d'après le site lightmanufacturing.com).

Cette technique repose sur plusieurs étapes (figure 3) :

- étape 1 : la matière première plastique est introduite sous forme de poudre dans un moule métallique ;
- étape 2 : le moule est ensuite mis en rotation et chauffé grâce à un ensemble d'héliostats qui concentre le flux d'énergie solaire sur le moule. La matière recouvre alors toute la surface interne du moule.
- étape 3 : le chauffage s'arrête, le moule est refroidi à température ambiante avant démoulage lorsque le polyéthylène s'est totalement solidifié.

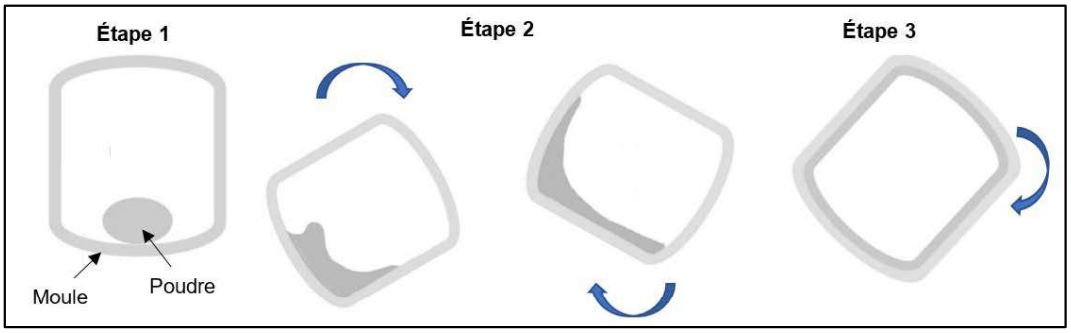


Figure 3. Schématisation du cycle de fabrication

Extrait d'une notice technique du système présentant la durée du cycle de chauffage en fonction de la masse de matière plastique contenue dans l'objet :

Masse de matière plastique de l'objet	Durée du cycle de chauffage
De 1 à 3 kg	15 min
De 8 kg	25 min
De 25 kg	45 min

On fabrique des cuves de récupération d'eau (figure 1). Pendant toute la durée nécessaire au cycle de fabrication de la pièce en plastique, on suppose que la puissance solaire réfléchie par l'ensemble des héliostats reste constante et vaut P_S = 24 kW.
On négligera tous les transferts thermiques du système {moule et polyéthylène}, supposé incompressible, avec l'air intérieur et avec l'extérieur.

Données :

- masse de poudre de polyéthylène (PE) utilisée pour le moulage: m_{PE} = 25 kg ;
- température de fusion du polyéthylène : θ_f = 140 °C ;
- capacités thermiques massiques :
  - du moule métallique : c = 502 J·kg^{-1}·K^{-1} ;
  - du polyéthylène : c_{PE} = 1 830 J·kg^{-1}·K^{-1} (on considèrera que cette valeur est la même pour le polyéthylène à l'état solide et à l'état liquide) ;
- masse du moule m = 125 kg ;
- à température constante, la variation d'énergie interne ΔU d'une masse m de polyéthylène lors de sa fusion a pour expression :
  $\Delta U = m \times L_f$ avec L_f = 290 kJ·kg^{-1}, l'énergie massique de fusion du polyéthylène.

1. Indiquer le principal mode de transfert d'énergie au cours du chauffage qui se produit entre :
- les héliostats et le moule métallique,
- le moule métallique et le polyéthylène.

2. Expliquer, à l'échelle microscopique, les origines de la variation de l'énergie interne du polyéthylène lorsque la température passe de 20 °C à 200 °C.

3. Rappeler le premier principe de la thermodynamique appliqué au système étudié ici. En déduire la valeur du transfert thermique Q_1 à apporter au système pour atteindre la température de fusion du polyéthylène à partir de la température ambiante θ_i prise égale à θ_i = 20 °C.

4. Calculer le transfert thermique Q_2 nécessaire à la fusion, à 140°C, de la totalité de la poudre de polyéthylène.

5. Montrer par le calcul que la durée totale Δt_{Total} du cycle de chauffage pour une température finale atteinte de 200 °C vaut près de 19 min.
Le candidat est invité à prendre des initiatives, notamment sur les valeurs numériques éventuellement manquantes, et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

6. Commenter cette durée totale Δt_{Total} en discutant de l'origine possible des écarts avec celle fournie par la notice technique du système.

EXERCICE II - IMPRESSION 3D D'OBJETS MÉTALLIQUES

Mots clés : deuxième loi de Newton, mouvement dans un champ uniforme, théorème de l'énergie cinétique

L'impression 3D de métaux est très utilisée dans l'industrie. Ce procédé permet de fabriquer des objets métalliques à la fois complexes et extrêmement résistants dans des domaines tels que l'aéronautique ou le médical.
Les objets métalliques sont conçus couche par couche à partir de poudres métalliques qui subissent un phénomène de fusion grâce à l'énergie apportée par un faisceau d'électrons (figure 1). Les électrons sont émis au sommet de l'appareil par un filament chauffé dans le canon à électrons. Ils sont alors accélérés par une différence de potentiel électrique entre les deux plaques métalliques d'un condensateur plan.
Les électrons traversent ensuite l'enceinte de fabrication dans laquelle est maintenue une pression très faible pour arriver sur la couche de poudre (au point P), ce qui crée un échauffement local par effet Joule et provoque la fusion du métal.
La qualité du matériau ainsi fabriqué dépend notamment de l'intensité I du faisceau d'électrons. Pour obtenir un objet de bonne qualité, l'intensité du courant doit être comprise 10 et 20 mA.

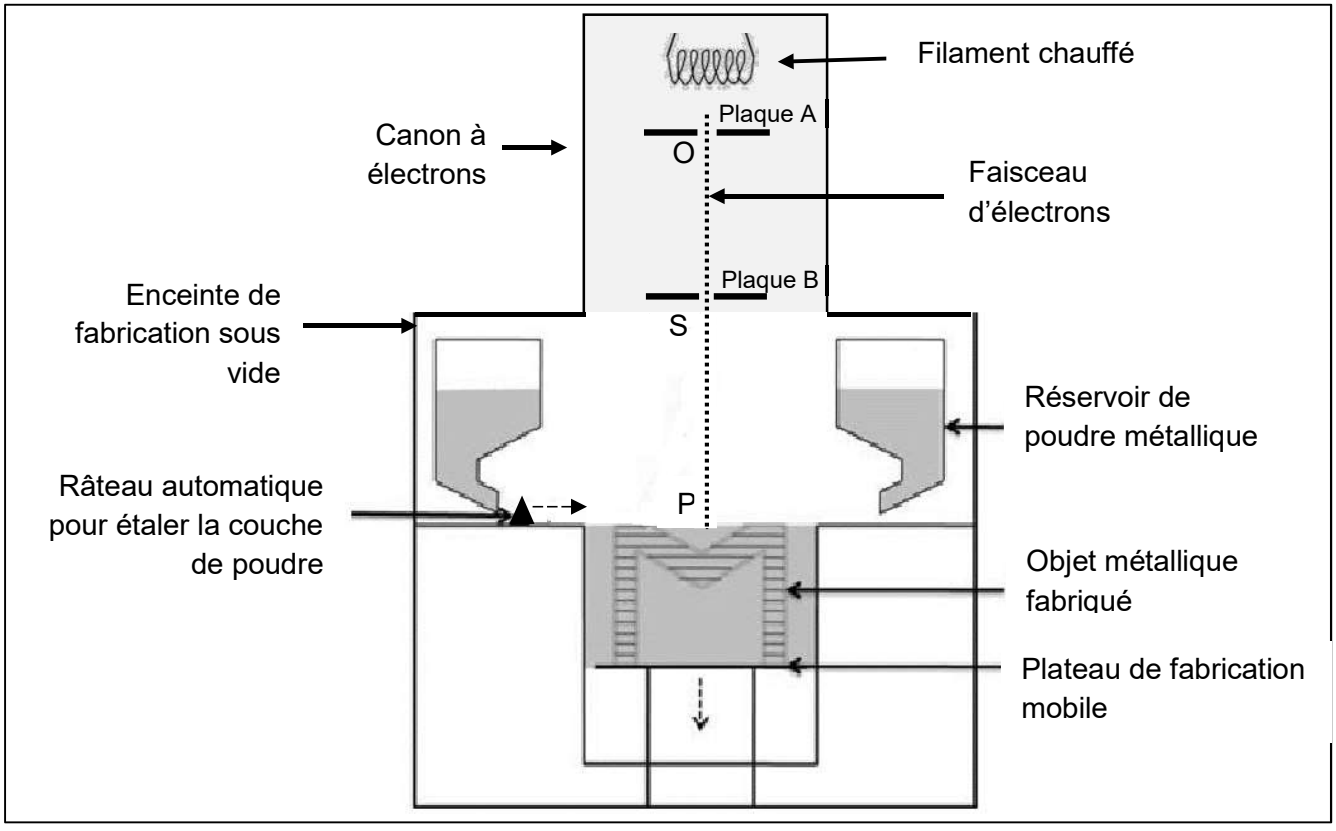


Figure 1. Schéma simplifié de la machine utilisée dans le procédé d'impression 3D métallique.

On s'intéresse au canon à électrons qui permet d'accélérer les électrons constituant le faisceau.
Le système technique d'accélération est modélisé par un condensateur plan formé de deux plaques A et B entre lesquelles règne un champ électrique $\vec{E}$.

Un électron, de masse *m*, émis par le filament chauffé, pénètre au point O dans l'espace où règne le champ électrique uniforme $\vec{E}$ (voir schéma en **ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**). Ce champ est créé par une tension électrique *U* = 65 kV appliquée entre les plaques du condensateur plan.

À l'instant *t* = 0, l'électron arrive au point O avec une vitesse négligeable. Son mouvement sera étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen et son poids est négligé devant la force électrique $\overrightarrow{F_e}$.

Données :

- charge électrique élémentaire : e = 1,60 × 10^{-19} C ;
- masse de l'électron : m_e = 9,11 × 10^{-31} kg ;
- pour un condensateur plan, la valeur E du champ électrique est reliée à la tension U et à la distance d qui sépare les plaques par la relation : $E = \frac{U}{d}$;
- l'intensité I (exprimée en ampères) du faisceau correspond au débit de charge électrique, c'est-à-dire la charge électrique Q qui traverse une surface perpendiculaire au faisceau par unité de temps. Son expression en fonction de la charge électrique Q (exprimée en coulombs) et la durée Δt (en secondes) est : $I = \frac{Q}{\Delta t}$;
- distance SP : 30,0 cm ;
- intensité du champ de pesanteur terrestre : g = 9,81 m·s^{-2}.

1. Représenter sur le schéma du canon à électrons (document de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**), sans souci d'échelle et en justifiant :
- la force $\overrightarrow{F_e}$ électrique exercée sur l'électron déjà représenté,
- le champ électrique $\vec{E}$ en un point de la zone où il règne.

Préciser sur le schéma, et en expliquant, la polarité de chacune des deux plaques.

Entre O et S, on considère que le travail du poids de l'électron est négligeable par rapport aux travaux des autres forces, compte tenu de la masse très faible de l'électron.

2. Montrer en utilisant le théorème de l'énergie cinétique, que l'expression de l'énergie cinétique de l'électron qui atteint le point S est : $\mathscr{E}_C = e \times U$
Calculer alors la valeur de l'énergie cinétique d'un électron situé au point S.

3. Montrer, par un calcul, que le travail du poids de l'électron entre les positions S et P est, en effet, négligeable devant son énergie cinétique.
En déduire que l'énergie cinétique de l'électron se conserve entre les deux points.

4. Pour fabriquer une pièce métallique, le faisceau délivre une énergie de 1,0 kJ par seconde. Calculer la valeur de l'intensité du courant d'électrons délivré par le faisceau. Commenter le résultat obtenu.
Le candidat est invité à prendre des initiatives, notamment sur les valeurs numériques éventuellement manquantes, et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

EXERCICE III - DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES POUR RÉSISTER À LA GRÊLE

Mots clés : deuxième loi de Newton.

Les panneaux photovoltaïques sont recouverts d'une plaque de verre trempé pour résister aux impacts tels que ceux provoqués par la grêle.

Pour répondre aux normes fixées par la Commission Électrotechnique Internationale, les panneaux photovoltaïques sont soumis, selon la *norme internationale CEI 61215 pour modules photovoltaïques au silicium cristallin,* à des tests durant lesquels ils sont bombardés par des billes de glace de 25 mm de diamètre, de masse 7,53 g et de vitesse 83 km·h^{-1}.

La grêle se forme dans les cumulonimbus situés entre 1 000 m et 10 000 m d'altitude où la température peut descendre en dessous de 0 °C. Un grêlon tombe lorsqu'il n'est plus maintenu par les mouvements de l'air au sein du nuage. Certains d'entre eux peuvent atteindre des vitesses avoisinant 100 km·h^{-1} lorsqu'ils arrivent au sol.

On étudie la chute d'un grêlon de masse m = 7,53 g qui tombe d'un point O d'altitude h = 1 500 m sans vitesse initiale. Le point O sera pris comme origine d'un axe (Oz) orienté positivement vers le bas. La masse du grêlon est supposée constante au cours de la chute.

Les parties A et B sont indépendantes.

Donnée :

- intensité du champ de pesanteur terrestre : g = 9,81 m·s^{-2}.

Partie A - Chute libre

1. En appliquant la deuxième loi de Newton, déterminer les coordonnées cartésiennes des vecteurs accélération, vitesse et position du centre de masse G du grêlon, si l'on considère qu'il tombe en chute libre.

2. Calculer, en expliquant la démarche, la valeur de la vitesse du grêlon lorsqu'il atteint le sol. Indiquer si le résultat obtenu est vraisemblable et discuter les hypothèses du modèle retenu.

Partie B - Vitesse limite

Données :

- masse volumique de l'air à 0 °C : ρ_{air} = 1,29 kg·m^{-3} ;
- volume d'une sphère de rayon R : $V = \frac{4}{3} \times \pi \times R^3$;
- coefficient de frottement de l'air : K = 1,40 × 10^{-4} kg·m^{-1} ;

En réalité, le grêlon de masse m = 7,53 g, assimilé à une sphère de rayon R = 12,5 mm, est soumis à deux autres forces, la force de frottement de l'air, opposée au vecteur vitesse du grêlon, et la poussée d'Archimède.

On modélise la valeur F de la force de frottement exercée par l'air sur le grêlon par l'expression : $F = K \times v^2$, où K sera appelé coefficient de frottement de l'air et v la vitesse du centre de masse du grêlon. La poussée d'Archimède exercée par l'air sur le grêlon est une force verticale, orientée vers le haut, dont la valeur a pour expression : $F_A = \rho_{air} \times V \times g$ où V est le volume du grêlon et ρ_{air} la masse volumique de l'air.

À cause des frottements de l'air, la vitesse du grêlon cesse d'augmenter après quelques secondes et devient constante. On dit que le grêlon atteint sa vitesse limite.

3. Calculer la valeur de la poussée d'Archimède exercée par l'air sur le grêlon et la comparer à la valeur du poids du grêlon. Conclure.

4. En tenant compte de la conclusion précédente, déterminer par le calcul la valeur de la vitesse limite du centre de masse du grêlon. Vérifier si ce résultat est cohérent avec la vitesse des billes de glace utilisées pour tester la résistance des panneaux.
Le candidat est invité à prendre des initiatives, notamment sur les valeurs numériques éventuellement manquantes, et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

5. Les évolutions temporelles de la vitesse et de la position du centre de masse G du grêlon étant données (figures 1 et 2), déterminer à quelle hauteur se trouve le grêlon lorsque sa vitesse atteint 95 % de sa vitesse limite.

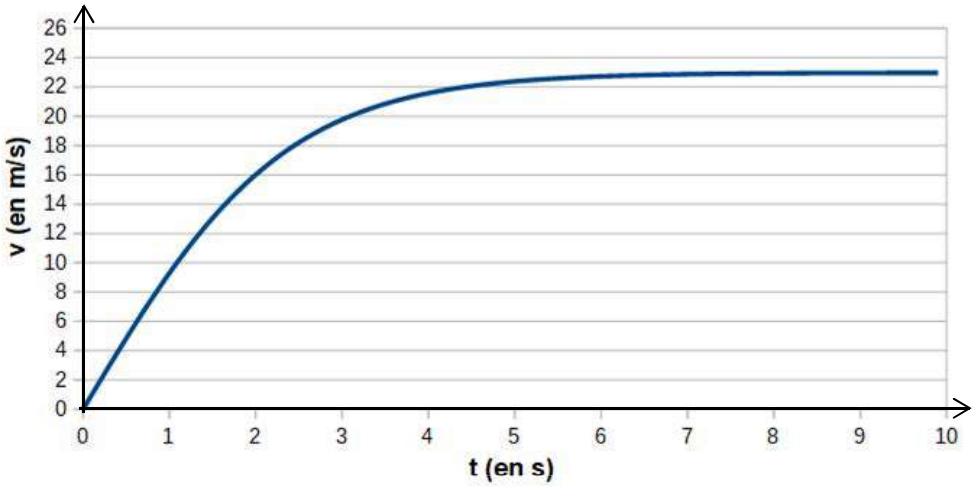


Figure 1. Évolution de la vitesse du centre de masse du grêlon en fonction du temps

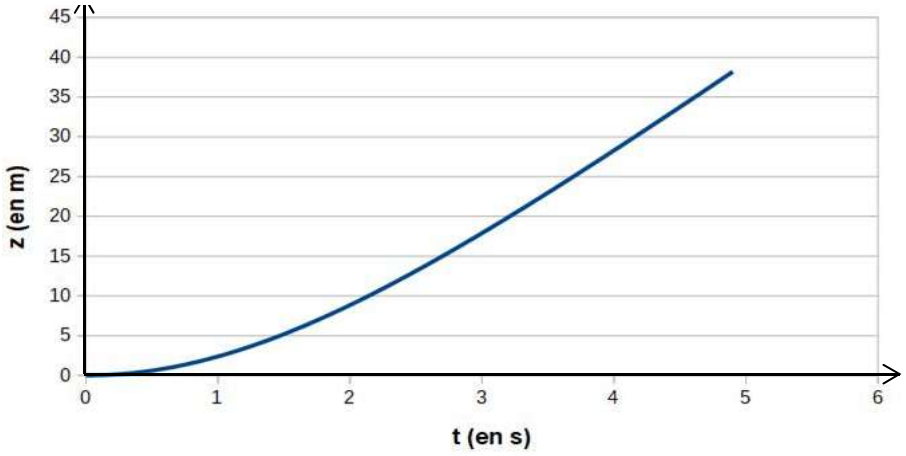


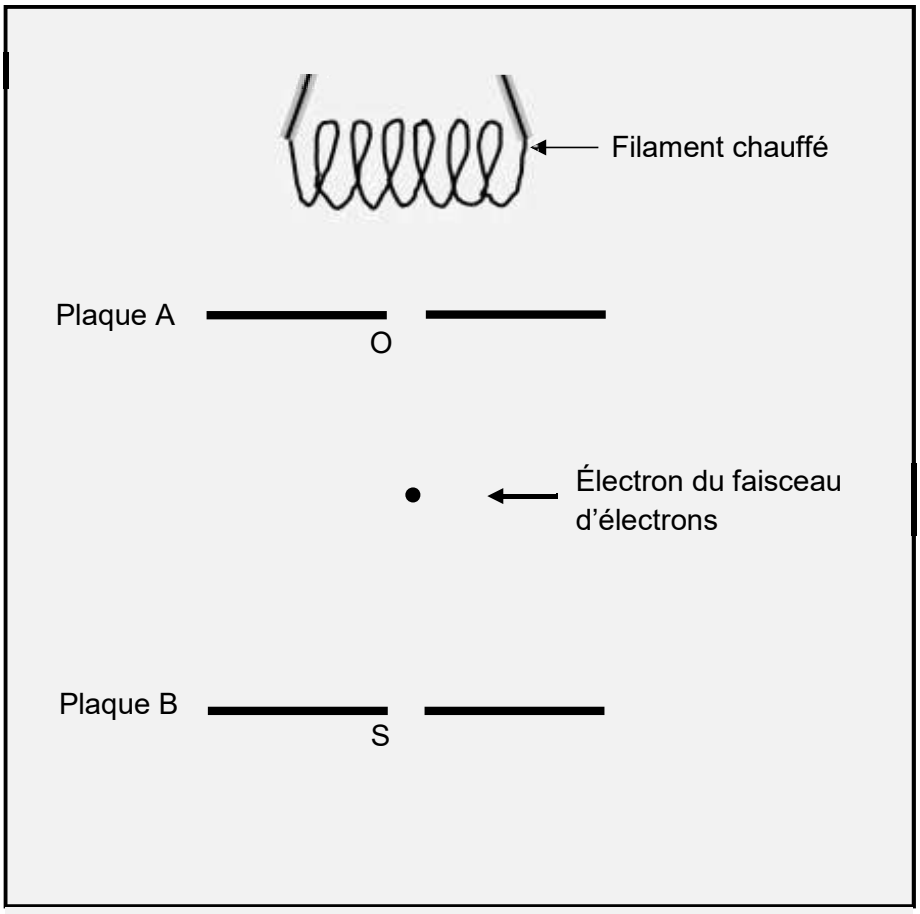
Figure 2. Évolution de la position du centre de masse du grêlon en fonction du temps

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

EXERCICE II - IMPRESSION 3D D'OBJETS MÉTALLIQUES

Question 1.

Schéma du canon à électrons



Modèle CCYC : ©DNE

NOM DE FAMILLE (naissance) :
(en majuscules)

PRENOM :
(en majuscules)

N° candidat :

N° d'inscription :

(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Né(e) le : ☐☐ / ☐☐ / ☐☐☐☐

1.2