

## Epreuve de PHYSIQUE

Durée : 2 heures

Chaque candidat est responsable de la vérification de son sujet d'épreuve : pagination et impression de chaque page. Ce contrôle doit être fait en début d'épreuve. En cas de doute, il doit alerter au plus tôt le surveillant qui vérifiera et, éventuellement, remplacera le sujet.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Ce sujet comporte 6 pages numérotées de 1 à 6 et une annexe de format A3 à rendre avec la copie.

**Le sujet est constitué de quatre parties indépendantes. L'usage de la calculatrice est autorisé.**

### Formation et utilisation du popcorn

Un popcorn désigne un grain de maïs qui, après éclatement, s'est transformé en flocon.



#### Données utiles :

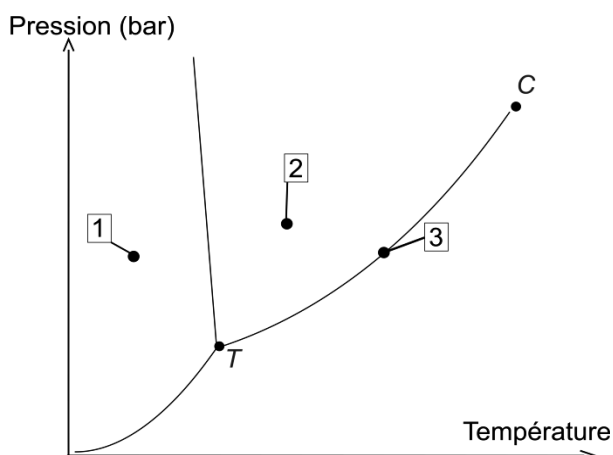
➤ Données relatives au maïs et au popcorn :

- Un grain de maïs est essentiellement constitué d'amidon et d'eau entourés d'une enveloppe capable de résister à une pression importante.
- Masse moyenne d'un grain de maïs :  $m_g = 0,17 \text{ g}$
- Masse d'eau moyenne contenue dans un grain de maïs :  $m_{eg} = 20 \text{ mg}$
- Capacité thermique massique de l'amidon :  $c_a = 1,1 \times 10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Enthalpie massique de gélatinisation de l'amidon présent dans les grains de maïs à  $180 \text{ °C}$  :  
 $l_{\text{gel}} = 15 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}$

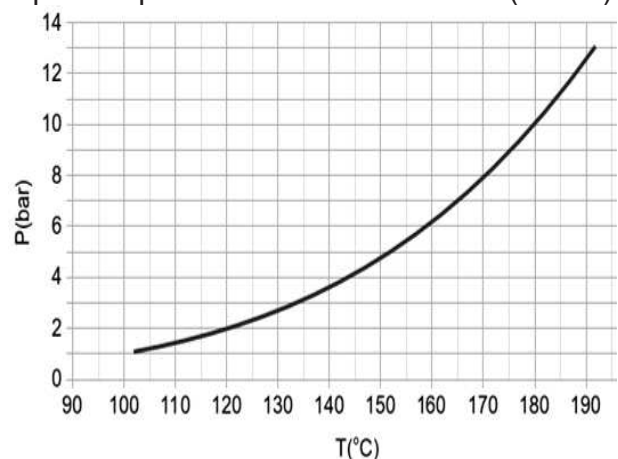
➤ Données relatives à l'eau dans la plage de températures considérées :

- Capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_e = 4,2 \times 10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Enthalpie massique de vaporisation de l'eau à  $180 \text{ °C}$  :  $l_v = 2,0 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$
- Masse molaire de l'eau  $M = 18 \text{ g.mol}^{-1}$

• Diagramme *Pression, Température* ( $P, T$ ) de l'eau :



• Diagramme ( $P, T$ ) de l'eau pour l'équilibre liquide/vapeur entre  $100 \text{ °C}$  et  $200 \text{ °C}$  (extrait) :



➤ Autres données :

- Constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ USI}$
- $0 \text{ °C}$  correspond à  $273,15 \text{ K}$
- Valeur de l'accélération de la pesanteur :  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$
- Volume d'une sphère de rayon  $r$  :  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$
- $1 \text{ bar}$  correspond à  $10^5 \text{ Pa}$

## I. Changement d'état de l'eau et formation du popcorn.

Les popcorns sont obtenus par chauffage de grains de maïs.

Lors du chauffage, il y a vaporisation partielle de l'eau qu'ils contiennent. L'augmentation de la pression intérieure du grain qui en résulte conduit à son éclatement pour former le flocon.

### 1. Changements d'états de l'eau.

1.1. Indiquer les états dans lesquels se trouve l'eau pour les points du diagramme  $(P, T)$  numérotés de 1 à 3.

1.2. Donner les noms des points  $T$  et  $C$ , ainsi que les états de l'eau en  $T$  et au-delà de  $C$ .

### 2. Formation du popcorn.

Des grains de popcorn sont placés dans un four dont la température peut varier. Des mesures ont permis d'établir le pourcentage (%) de grains de maïs transformés en popcorn («popped popcorn») en fonction de leur température. Le graphe représenté figure 1 donne le % de grains de popcorn formés en fonction de leur température.

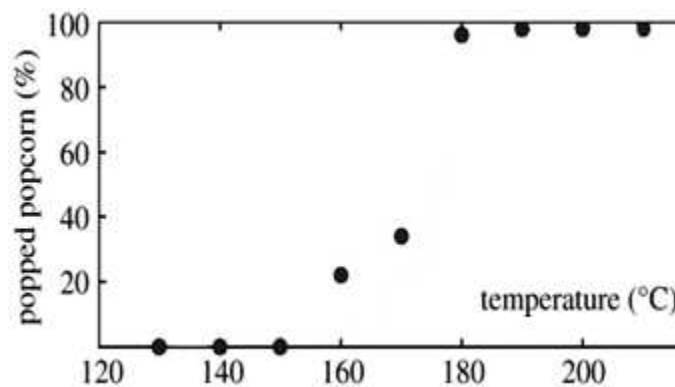


figure 1 - Source : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/>

2.1. Montrer, en utilisant le graphe de la figure 1 et le diagramme  $(P, T)$  de l'eau, que la valeur de la pression maximale supportable par l'enveloppe du grain de maïs est  $p_m = 10$  bars.

2.2. On assimile la vapeur d'eau à un gaz parfait.

2.2.1. Déterminer la dimension de la constante  $R$  des gaz parfaits en utilisant les symboles  $M, L, T, N, \theta$  pour l'analyse dimensionnelle.

2.2.2. Donner, en justifiant, l'unité de  $R$  dans le système international.

2.3. On assimile le grain de maïs à une sphère de rayon  $r_m$ . Le graphique de la figure 2 donne la répartition en % (« occurrence ») du rayon des grains de maïs avant et après éclatement (« popping »).

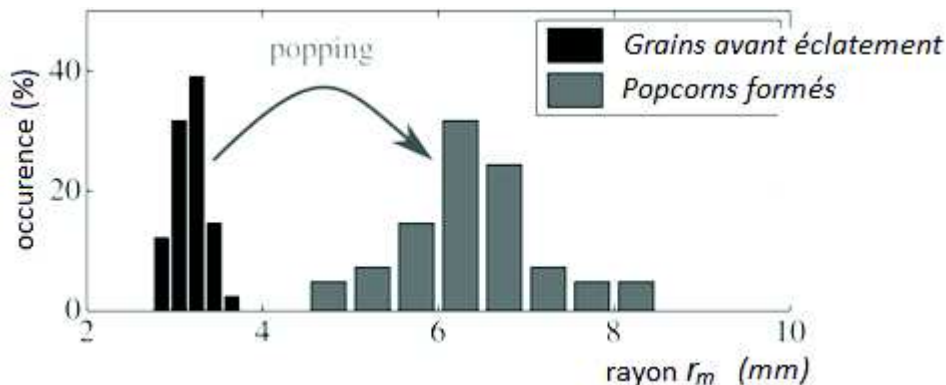


figure 2 : Répartition du rayon des grains de maïs avant et après éclatement (« popping »)

2.3.1. En modélisant le grain de maïs au moment de l'éclatement par une sphère de rayon  $r_m$  ne contenant que de l'eau à l'équilibre liquide/vapeur, déterminer la masse  $m_{vg}$  d'eau se trouvant à l'état vapeur dans ce grain au moment de l'éclatement, à 180 °C.

**Aide :** Une détermination préalable de l'ordre de grandeur de la valeur du rayon  $r_m$  est nécessaire et on négligera le volume de la phase condensée devant celui de la phase gazeuse.

2.3.2. Il a été déterminé que seul 1 mg d'eau (sur les 20 mg contenus dans un grain) est présent sous forme vapeur au moment de l'éclatement. Indiquer, en justifiant, si la valeur de  $m_{vg}$  obtenue en 2.3.1 est cohérente avec cette donnée.

## II. Transferts énergétiques et formation du popcorn.

Pour préparer du popcorn, *une recette indique de placer 90 g de maïs, pendant 2 min, au four à micro-ondes à la puissance maximale :  $P_f = 750 \text{ W}$ .*

On se propose de vérifier si ce « protocole » est pertinent.

Les étapes de formation d'un popcorn par chauffage d'un grain de maïs sont les suivantes :

- Étape 1 : Passage du grain de maïs de  $T_1 = 20 \text{ °C}$  à  $T_m = 180 \text{ °C}$
- Étape 2 : Vaporisation d'une masse  $m_{vg} = 1 \text{ mg}$  d'eau par grain de maïs.
- Étape 3 : Gélatinisation de l'amidon : l'amidon du grain de maïs se ramollit.
- Étape 4 : Éclatement du grain et formation du popcorn. On considère que l'étape 4 se fait de manière adiabatique.

Le système considéré est un ensemble de grains de maïs de masse  $m = 90 \text{ g}$ . On suppose chaque grain uniquement composé d'eau et d'amidon.

On considère que l'intérieur du four à micro-ondes reste à pression atmosphérique supposée constante. La transformation de l'état initial, au début de l'étape 1, à l'état final en fin de l'étape 4 (popcorn juste après éclatement à 180 °C), s'effectue ainsi de manière monobare.

On note  $Q$  le transfert thermique reçu par le système entre l'état initial (début de l'étape 1) et l'état final (fin de l'étape 4).

2.4. Calculer la valeur des masses  $m_e$  d'eau, et  $m_a$  d'amidon contenues dans  $m = 90 \text{ g}$  de maïs.

2.5. Quelle est la valeur de la masse  $m_v$  d'eau qui passera, à 180 °C, sous forme vapeur dans les 90 g de maïs ?

*Variations d'enthalpie :*

3. Démontrer que pour cette transformation  $\Delta H = Q$ ,  $\Delta H$  étant la variation d'enthalpie du système étudié de l'étape 1 jusqu'à l'étape 4 incluse.
4. Déterminer l'expression littérale de la variation d'enthalpie du système lors de l'étape 1 :  $\Delta H_1$  en fonction de  $m_e, c_e, m_a, c_a, T_m, T_1$ .
5. Déterminer les expressions littérales de la variation d'enthalpie du système lors :
  - 5.1. de l'étape 2 :  $\Delta H_2$
  - 5.2. de l'étape 3 :  $\Delta H_3$
  - 5.3. de l'étape 4 :  $\Delta H_4$
  - 5.4. Exprimer  $\Delta H$  en fonction de  $\Delta H_1, \Delta H_2, \Delta H_3, \Delta H_4$ .
  - 5.5. Vérifier que la valeur de  $Q$  est voisine de 24 kJ.

6. On souhaite désormais déterminer le « temps de cuisson »  $\Delta t$  nécessaire pour que le four puisse apporter le transfert thermique  $Q$  (précédemment calculé) permettant aux 90 grammes de maïs de former du pop-corn. On considère pour cela que toute la puissance  $P_f$  du four n'est pas intégralement fournie au maïs. Le rendement  $\eta$  de ce transfert de puissance est évalué à 70% :

$$\eta = \frac{\text{Puissance transférée au maïs}}{\text{Puissance fournie par le four}} = 70 \%$$

6.1. Exprimer  $\Delta t$  en fonction de  $P_f$ ,  $Q$  et  $\eta$  puis calculer sa valeur.

6.2. Proposer une explication de l'écart entre ce résultat et la valeur donnée dans la recette.

### III. Saut du popcorn

Après la fracture de l'enveloppe du grain de maïs, on observe la formation d'une « jambe » (« leg »). L'apparition de cette « jambe » permet au popcorn de « sauter » (le saut est représenté sur le **document** donné ci-dessous (figure 3)).

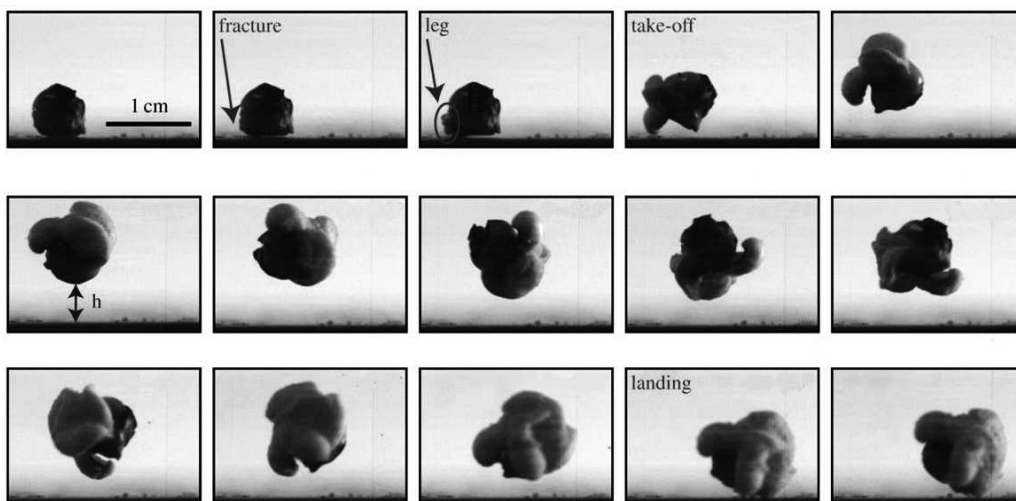


figure 3 - Fracture et saut d'un popcorn filmés à l'aide d'une caméra rapide

Le popcorn est assimilé à un point matériel  $M$ , de masse  $m$ . On fait l'hypothèse que le popcorn n'est soumis qu'à son poids. On montre alors que son mouvement est plan.

Il est étudié dans le référentiel terrestre, supposé galiléen, auquel on associe un repère cartésien  $(O, x, z)$ , tel que  $Oz$  soit la verticale ascendante,  $\vec{u}_x, \vec{u}_z$  sont les vecteurs unitaires des axes  $Ox$  et  $Oz$ .

Ses coordonnées sont notées :  $x(t), z(t)$ .

Un traitement numérique du film d'un saut a permis d'établir les courbes de  $x(t)$  et  $z(t)$ , données sur l'**annexe** (à rendre avec la copie). Le nuage des points de  $z(t)$  a été lissé par une courbe matérialisée sur le graphique par un pointillé.

Le logiciel de traitement a également permis de déterminer les valeurs des composantes horizontale (selon  $Ox$ ) et verticale (selon  $Oz$ ) de la vitesse initiale du popcorn au début du « saut », à  $t = 0$  s :  $v_{x0} = 0,12 \text{ m.s}^{-1}$  et  $v_{z0} = 0,38 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### 7. Équations du mouvement.

7.1. Établir les expressions des composantes  $v_x(t)$  et  $v_z(t)$  de la vitesse du popcorn en fonction de  $g, t$ , et des composantes de la vitesse initiale.

7.2. En s'appuyant sur les informations tirées des courbes données sur l'**annexe**, déterminer les expressions des coordonnées  $x(t)$  et  $z(t)$  du popcorn en fonction de  $g, t, v_{x0}, v_{z0}$ .

## 8. *Durée du saut.*

8.1. Établir l'expression littérale de la durée  $\tau$  du saut (du décollage à l'atterrissage) en fonction de  $v_{z0}$  et  $g$ , puis calculer sa valeur numérique.

8.2. À l'aide des informations tirées des courbes de l'**annexe**, déterminer  $\tau_{exp}$ , valeur expérimentale de la durée du saut (**les traces de construction utilisées devront être apparentes sur le graphe**).

8.3. Comparer cette valeur avec celle qui a été calculée.

## 9. *Distance horizontale parcourue par le popcorn.*

9.1. Établir l'expression littérale de la distance horizontale  $d$  parcourue pendant le saut puis calculer sa valeur numérique.

9.2. À l'aide des informations tirées des courbes de l'**annexe**, déterminer  $d_{exp}$ , valeur expérimentale de la distance horizontale parcourue (**les traces ayant permis la détermination devront être apparentes sur le graphe**).

9.3. Comparer cette valeur avec celle qui a été calculée.

## 10. *Hauteur maximale atteinte par le popcorn.*

10.1. Établir l'expression littérale de la hauteur maximale atteinte  $h$  en fonction de  $v_{z0}$  et  $g$ .

10.2. Effectuer l'application numérique et vérifier son accord avec l'expérience (**les traces de construction utilisée devront être apparentes**).

## 11. *Pertinence de l'hypothèse initiale.*

Commenter l'hypothèse initiale : « *le popcorn n'est soumis qu'à son poids* ».

## IV. Le popcorn comme emballage

« *La Poste américaine n'hésite pas à conseiller à ses clients d'utiliser, pour les colis contenant des choses fragiles, du popcorn alimentaire comme garniture d'emballage, à la place du classique polystyrène expansé* ».

Source : extrait d'un article de Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik – *Pour la Science* n° 350

*Cette partie se propose d'étudier la validité d'un tel propos à l'aide des lois de la mécanique classique, en répondant à la problématique suivante :*

On souhaite protéger un œuf des chocs subis lors des chutes à l'aide d'un emballage adapté.

12. De quelle hauteur maximale  $h_{max}$  peut-on prendre le risque de faire tomber un œuf s'il est enveloppé :

- soit d'une couche de 6 cm d'emballage en polystyrène expansé ?
- soit d'une couche de 6 cm d'emballage en matériau à base de popcorn ?

Conclure quant à la pertinence du conseil donné par la Poste américaine.

*Pour répondre à cette question, on s'appuiera sur les ressources fournies dans les encadrés ci-dessous. Un raisonnement sur les énergies mises en jeu est attendu. Toute éventuelle hypothèse que l'on sera amené à faire devra être clairement explicitée.*

*Par ailleurs, on négligera la masse de la couche d'emballage (quelle que soit sa nature) devant celle d'un œuf.*

- on fait tomber une masse  $m$  d'une hauteur  $h$  de 90 cm sur une plaque de 6 cm d'épaisseur :
- la masse rebondit à la vitesse  $v_{PE} = 1,45 \text{ m.s}^{-1}$  si la plaque est en polystyrène expansé,
  - la masse rebondit à la vitesse  $v_{PC} = 0,33 \text{ m.s}^{-1}$  si la plaque est constituée d'un matériau à base de popcorn.

**Document 1** élaboré à partir de l'article de Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

- On constate qu'un œuf de masse  $m_0$  se casse lorsqu'il tombe à partir d'une hauteur  $h_0 = 10 \text{ cm}$  sur du carrelage (matériau considéré comme non déformable). Il n'y a alors pas de rebond.

**Document 2**

- Lors du rebond d'un objet sur une surface déformable immobile, l'objet ne repart pas avec la même énergie cinétique. Une partie de son énergie mécanique initiale a été absorbée lors de la déformation de la surface.
- Cette absorption peut être caractérisée par la donnée du coefficient de restitution  $e$  défini comme étant le rapport de la vitesse juste après le rebond et de la vitesse juste avant. Il s'agit d'un nombre sans dimension compris entre 0 (cas de l'absence de rebond) et 1 (cas d'un choc élastique).
- On considèrera que  $e$  ne dépend que des caractéristiques physiques (nature, épaisseur, ...) du matériau constitutif de la surface de réception de l'objet.

**Document 3**

**Note** : L'évaluation de cette partie IV s'effectue sur la capacité des candidats à s'approprier la problématique proposée, à en analyser les questionnements qu'elle soulève, à en raisonner une stratégie de résolution, à réaliser les procédures qui en découlent et à valider (ou invalider) les conclusions auxquelles ils aboutissent. Ainsi toute démarche, même non aboutie, si elle s'avère pertinente et cohérente sera valorisée selon les critères définis ci-avant.

**FIN DU SUJET**

---