

DS 4 (CCinP, E3A) (4 heures)
Transferts thermiques, Thermochimie

La calculatrice est **autorisée**

La plus grande importance sera apportée au soin de la copie ainsi qu'à la clarté des raisonnements. Toute réponse, même qualitative, se doit d'être justifiée. Les affirmations, même justes, mais non justifiées ne seront pas prises en compte. Les résultats doivent être **encadrés**.

En cas de non respect de ces consignes, un malus sera attribué à la copie comme indiqué dans les tableaux suivants qui stipulent les critères et les effets sur la note le cas échéant :

| Critère | Indicateur |
|--|--|
| Lisibilité de l'écriture | L'écriture ne ralentit pas la lecture. |
| Respect de la langue | La copie ne comporte pas de fautes d'orthographe ni de grammaire. |
| Clarté de l'expression | La pensée du candidat est compréhensible à la première lecture. |
| Propreté de la copie | La copie comporte peu de ratures, réalisées avec soin et les parties qui ne doivent pas être prises en compte par le correcteur sont clairement et proprement barrees. |
| Identification des questions et pagination | Les différentes parties du sujet sont bien identifiées et les réponses sont numérotées avec le numéro de la question. La pagination est correctement effectuée. |
| Mise en évidence des résultats | Les résultats littéraux et numériques sont clairement mis en évidence. |

| Nombre de critères non respectés | Palier de Malus | Effet sur la note |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| 0 | 0 | aucun |
| 1-2 | 1 | -3.3% |
| 3-4 | 2 | -6.7% |
| 5-6 | 3 | -10% |

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 est amené à prendre.

Exercice 1 : S'il vous plaît... Dessine-moi un mouton !

Le sujet s'intéresse à un mammifère très particulier, le mouton, un des tous premiers domestiqués par l'homme, entre le 11^e et le 9^e siècle avant J.-C. en Mésopotamie. C'est un animal clé dans l'histoire de l'agriculture. On appelle bélier le mâle adulte, brebis la femelle adulte, agneau le jeune mâle et agnelle la jeune femelle.

Comme tous les ruminants, leur système digestif complexe leur permet de transformer la cellulose de leur alimentation en acides gras volatils et en glucides simples. À la belle saison, ils se nourrissent dans les pâturages d'herbe broutée au ras du sol et on leur donne du foin en hiver.

(Pour le bien-être de l'animal et de l'éleveur)

D'après vigifermes.org, consulté en 2018.

Exposition à de basses températures

Les moutons sont naturellement adaptés pour supporter de très basses températures mais leur résistance au froid dépend de plusieurs facteurs : la race, l'âge, l'état du pelage... Un mouton qui a une épaisse toison et qui est protégé de l'humidité pourra supporter des températures qui descendent en dessous de -15°C , mais un mouton tondu doit être protégé du froid. Lorsque le temps est humide, que les températures sont basses et qu'il y a du vent, la situation est critique pour les moutons. Le plus important est qu'ils ne soient pas mouillés jusqu'à la peau. La laine de certaines races, lorsqu'elle est épaisse, peut repousser l'humidité plusieurs jours. C'est le cas des races de montagne mais pour d'autres, à la laine très fine, le pelage est moins protecteur. Les moutons qui ont froid se serrent alors les uns contre les autres.

Les agneaux nouveau-nés sont très sensibles aux basses températures, au vent et à l'humidité. Leur fine couche de laine et de graisse ne les protège que très peu. Les brebis prêtes à mettre bas doivent être isolées en bergerie et y rester au moins deux semaines après la naissance. Le taux de mortalité des agneaux qui viennent de naître atteint plus de 25% dans certains élevages. Ils succombent le plus souvent dans les heures qui suivent leur naissance par hypothermie plutôt que par maladie.

Exposition à de hautes températures

Les moutons supportent mieux le froid que les températures élevées. Ils peuvent mourir d'un coup de chaleur. Ce risque est beaucoup plus élevé chez les moutons qui ne sont pas tondu, car la laine empêche la sueur de s'évaporer. C'est une des raisons pour laquelle il faut tondre les moutons au printemps.

| | Confort sans adaptation ou adaptation facile | Adaptation difficile | Adaptation très difficile | Adaptation impossible |
|------------------------|--|---|--|--|
| Température extérieure | de -8°C à 25°C | de 25°C à 35°C et de -15°C à -8°C | de 35°C à 40°C et de -30°C à -15°C | en dessous de -30°C et au dessus de 40°C |

TABLE 1 – Condition d'élevage, cas des brebis non tondues.

La température d'un mouton en bonne santé se situe entre $38,5^{\circ}\text{C}$ et $39,5^{\circ}\text{C}$. Sa longueur moyenne va de 1 m à 1,50 m. La tonte a lieu 1 à 2 fois par an produisant 2 à 8 kg de laine par an.

Nous allons essayer de construire un modèle thermodynamique pour expliquer comment la brebis maintient sa température de consigne $\Theta_{eq} = 39^{\circ}\text{C}$ et mieux comprendre les éléments du document ci-dessus.

I – Propriétés de la toison de laine

La laine, matière première renouvelable, est une fibre aux propriétés uniques : flexible, légère, élastique, solide protégeant du chaud comme du froid, difficilement inflammable (s'enflamme à $600\text{ }^\circ\text{C}$), isolant phonique, absorbeur d'humidité, facile à teindre et 100% biodégradable. La fibre de laine est à croissance continue avec de grandes écailles qui en font le tour. Les écailles se recouvrent peu et sont très saillantes. La section est circulaire. Sa substance est de la kératine, matière complexe association d'une vingtaine d'acides aminés. La laine a des affinités différentes avec l'eau qui font que la fibre s'enroule en frisures. Ces dernières enferment une grande quantité d'air, ce qui limite la conduction. De plus, la kératine est hydrophile pour la vapeur d'eau mais hydrophobe pour l'eau liquide. L'adsorption d'eau (désorption d'eau) s'accompagne d'une production (dégagement) de chaleur par la fibre. Les fils de laine ont un diamètre qui varie de $20\text{ }\mu\text{m}$ pour les moutons Mérinos à $40\text{ }\mu\text{m}$ pour les races écossaises.

Une toison de laine va être caractérisée par une valeur de conductivité thermique $\lambda_{laine} = 0,040\text{ SI}$ supposée homogène et une valeur de capacité thermique massique c_{laine} .

Q.1 Rappeler la loi de Fourier pour la conduction thermique. En quelle unité s'exprime la conductivité thermique ?

On considère un parallélépipède, de longueur L , de hauteur H et d'épaisseur e petite ($e \ll \min(L, H)$), constitué d'un matériau homogène de conductivité λ , de masse volumique μ et de capacité thermique massique c (FIGURE 1). Le problème est supposé unidimensionnel, la température ne dépend que de la variable z et du temps t . Les températures, sauf avis contraire, sont en $^\circ\text{C}$.

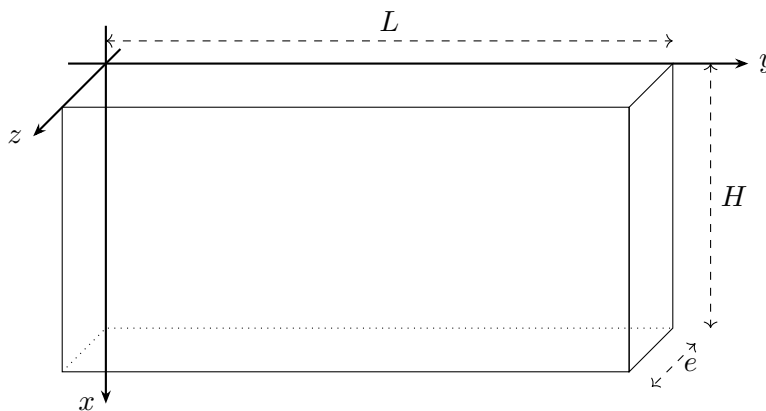


FIGURE 1 – Géométrie de conducteur thermique

- Q.2** Sur quelle direction est le vecteur densité \vec{j}_Q de courant thermique ? De quelles variables dépend-il ?
- Q.3** Faire un bilan énergétique sur la tranche de matériau comprise entre z et $z + dz$ et en déduire l'équation différentielle à laquelle obéit la température $T(z, t)$.
- Q.4** Que devient-elle en régime stationnaire ? Le vecteur \vec{j}_Q dépend-il de z ?
- Q.5** On suppose que le matériau est en présence de thermostats qui imposent à tout moment une température T_e en $z = 0$ et T_s en $z = e$. Que vaut la puissance thermique Φ qui traverse le matériau en fonction de e , λ , H , L , T_e et T_s ?
- Q.6** Définir puis exprimer la résistance thermique du matériau en fonction de ses caractéristiques géométriques et de sa conductivité. Que signifie, du point de vue thermique, mettre des résistances en parallèle et mettre des résistances en série ?

On peut mesurer expérimentalement la conductivité thermique de la laine à partir d'un échantillon de celle-ci par la méthode de la *plaque chaude gardée* (FIGURE 2). L'échantillon est formé de deux *plaques* de laine identiques d'épaisseur e et de surface S séparées par une plaque chaude. Un même flux thermique ϕ engendré par effet Joule dans un conducteur électrique inséré dans la plaque chaude, traverse les échantillons. Les plaques d'échantillon sont encadrées chacune par une plaque froide. Les températures T_c et T_f des plaques chaude et froide sont mesurées en régime permanent par des thermocouples.

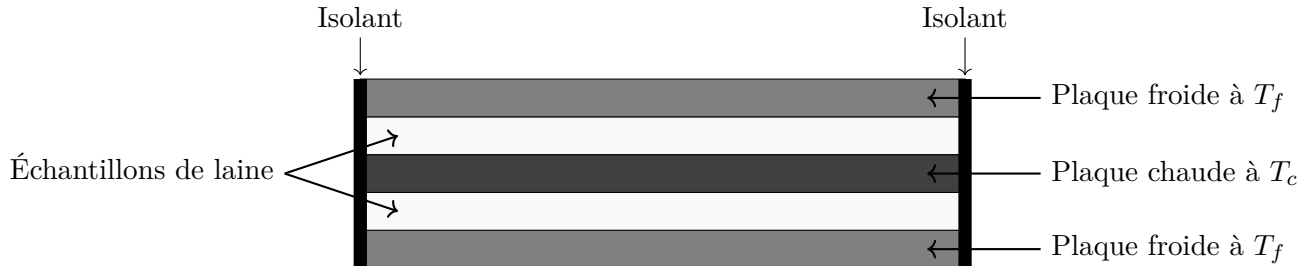


FIGURE 2 – Principe de la plaque chaude gardée

Q.7 Exprimer la conductivité λ_{laine} de la laine en fonction de ϕ , e , S , T_c et T_f .

II – Équilibre thermique d'une brebis (situation de confort)

On modélise la brebis debout par un parallélépipède plein, de température uniforme $\Theta_{eq} = 39^\circ\text{C}$, de longueur $L = 100\text{ cm}$ et de section carrée de côté $H = 30\text{ cm}$. Le corps de la brebis est entouré d'une épaisseur e qui peut varier de $e_M = 10\text{ cm}$ de laine avant la tonte à $e_m = 5\text{ mm}$ après la tonte. La situation est représentée en FIGURE 3.

Q.8 Exprimer la résistance R_{laine} de cette carapace de laine en négligeant les effets de bords, en fonction de L , H , e et λ_{laine} . Évaluer son ordre de grandeur pour les deux épaisseurs limites.

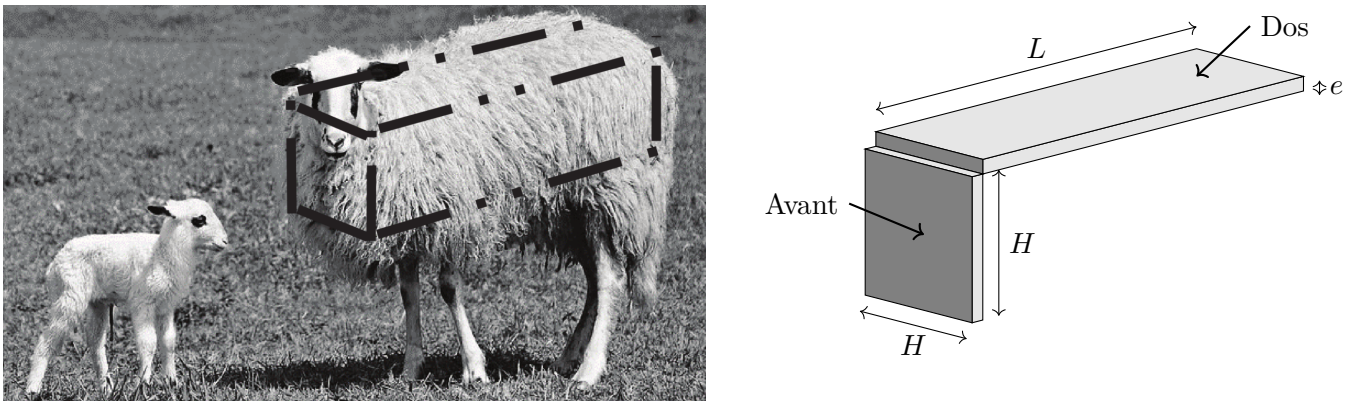


FIGURE 3 – Modélisation d'une brebis. Sur la figure de droite, seules les parties lainières du dos et de l'avant ont été schématisées.

On doit tenir compte de deux autres phénomènes d'échanges thermiques : la conducto-convection (d'autant plus importante que le vent est fort) et le rayonnement thermique toujours présent.

La loi de Newton, relative au phénomène de conducto-convection, correspond à un vecteur de densité thermique reçu par la brebis égal à $\vec{j}_Q = -h(T_e - T_a)\vec{n}$ avec T_e la température de la surface extérieure de la brebis en contact avec l'air de température T_a et le vecteur unitaire normal \vec{n} orienté de la brebis vers l'extérieur. On prendra un coefficient de Newton laine/air égal à $h = 4,0\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Q.9 En déduire en fonction de h , L et H , la résistance de conducto-convection R_{cc} à introduire dans notre modèle de brebis. Évaluer son ordre de grandeur.

Le phénomène de rayonnement introduit une résistance supplémentaire R_r . Comme la température de l'air est assez proche de celle de l'animal, la puissance P_r due au rayonnement thermique sortant de la surface extérieure de la brebis s'exprime sous la forme $P_r = KA(T_e - T_a)$ avec A l'aire de la surface extérieure de la brebis, T_e la température de cette surface en contact avec l'air de température T_a . On prendra $K = 5,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Q.10 Exprimer la résistance thermique de rayonnement R_r en fonction de K , L et H .

Q.11 Faire un schéma du montage de ces trois résistances placées entre la température interne de la brebis $\Theta_{eq} = 39^\circ\text{C}$ et la température de l'air T_a . Évaluer numériquement les deux valeurs R_1 et R_2 des résistances équivalentes de la brebis non tondue et de la brebis tondue.

La brebis non tondue est dans un confort climatique pour la température de l'air égale à $T_0 = 5^\circ\text{C}$. En plus des phénomènes de diffusion, conducto-convection et rayonnement, il y a évaporation d'eau par sudation. La brebis émet de la vapeur d'eau par les voies respiratoires en toute situation avec un débit massique :

$$\dot{m} = 5,8 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$$

et elle en émet deux fois plus par sa surface cutanée quand elle vient d'être tondue et que la température extérieure est supérieure à $5,1^\circ\text{C}$:

$$\dot{m}' = 2\dot{m}$$

L'enthalpie massique standard de vaporisation de l'eau, supposée indépendante de la température, vaut $\Delta_{vap}H^\circ = 2500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Q.12 En déduire la puissance p_{m0} apportée à la brebis par son métabolisme dans une situation de confort juste avant la tonte. On l'exprimera en fonction de \dot{m} , L , R_1 , Θ_{eq} et T_a , puis on en fera l'évaluation numérique pour $T_a = T_0 = 5^\circ\text{C}$.

Q.13 Déterminer, de même, la puissance p'_{m0} dégagée par le métabolisme de la brebis juste après la tonte pour la température de confort $T_0 = 5^\circ\text{C}$.

III – Déséquilibre thermique d'une brebis (situations de stress et de danger)

La thermorégulation est due à des productions internes de chaleur (thermogenèse liée au métabolisme et à l'activité physique) et à des déperditions de chaleur au niveau de la respiration et de la peau (thermolyse).

Dans une situation où l'air environnemental est en dehors de la zone de confort, la brebis va se réchauffer ou se refroidir et éventuellement transpirer. On négligera la capacité thermique de la toison devant celle du corps de la brebis. On assimile la brebis à un volume d'eau de masse volumique $\mu = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et de capacité thermique massique $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. On admet que les variations de température sont suffisamment lentes pour utiliser les notions de résistances. On note p_m la puissance apportée par le métabolisme.

Q.14 a) En appliquant le premier principe de la thermodynamique à la brebis non tondue dans une situation (1) où la température T_a de l'environnement est différente de $T_0 = 5^\circ\text{C}$, montrer que l'équation différentielle relative à la température $T(t)$ de la brebis s'écrit :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau_1}(T(t) - T_a) = \frac{1}{\tau_1}(T_1 - T_a)$$

où on exprimera τ_1 en fonction de μ , c , L , H ainsi que de R_1 et $(T_1 - T_a)$ en fonction de Θ_{eq} , T_0 , R_1 et $(p_m - p_{m0})$.

- b) Exprimer la température $T(t)$ au cours du temps en fonction de T_1 , τ_1 et Θ_{eq} en supposant que la température initiale de la brebis est Θ_{eq} .
- c) Calculer τ_1 puis T_1 en $^{\circ}\text{C}$ pour $p_m = p_{m0}$ avec une température extérieure égale à $T_a = 17^{\circ}\text{C}$.

Q.15 D'après les données du document au début d'énoncé, la brebis non tondue reste dans sa zone d'adaptation pour une température extérieure variant de -8°C à 15°C . En déduire entre quelles limites peut varier la puissance apportée par le métabolisme de l'animal dans cette situation (1) sans qu'il y ait danger pour lui (on suppose donc que la brebis reste à sa température d'équilibre $\Theta_{eq} = 39^{\circ}\text{C}$ dans ces conditions).

Q.16 En appliquant le premier principe à la brebis tondue dans une situation (2) où la température T_a de l'environnement est supérieure à $T_0 = 5^{\circ}\text{C}$, montrer que l'équation différentielle relative à la température $T(t)$ de la brebis peut se mettre sous la forme :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau_2}(T(t) - T_a) = \frac{1}{\tau_2}(T_2 - T_a)$$

dans laquelle les grandeurs T_2 et τ_2 sont des constantes à exprimer. Exprimer τ_2/τ_1 et commenter. En supposant que la possibilité de variation de la puissance métabolique soit celle obtenue à la question précédente, jusqu'à quelle température extérieure la brebis tondue peut-elle s'adapter à la chaleur ?

- Q.17**
- Faire un schéma de montage électrique équivalent aux situations (1) et (2) en indiquant les valeurs des éléments du montage en fonction de T_1 , T_2 , τ_1 et τ_2 , R_1 et R_2 .
 - Tracer l'allure de $T(t)$ dans une situation de type (1) (brebis non tondue) à partir d'une température initiale $T(t=0) = \Theta_{eq} = 39^{\circ}\text{C}$ avec $p_m = p_{m0}$ et une température de l'air $T_a = 17^{\circ}\text{C}$.
 - Tracer l'allure de $T(t)$ pour la situation (2) (brebis tondue) à partir d'une température initiale $T(t=0) = \Theta_{eq} = 39^{\circ}\text{C}$ et une température de l'air $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ sachant que $T_2 - T_a = 2,6^{\circ}\text{C}$.

Pour assurer leur survie, il leur faut une alimentation suffisante en sources de glucides. Ce sont les réactions chimiques issues du glucose qui fournissent l'énergie du métabolisme. Les réactions d'oxydation du glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ par le dioxygène respiré formant de l'eau et du dioxyde de carbone sont les sources d'énergie thermique.

- Q.18**
- Écrire le bilan chimique pour une mole de glucose. Sachant que cette réaction est caractérisée par une enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^{\circ} = -2800 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, quelle est l'énergie thermique apportée par litre de dioxygène respiré (pris à 5°C à la pression de 1 bar) ?
 - En utilisant les résultats de la **Q.12**, quelle quantité d'oxygène la brebis doit-elle respirer par minute en situation de confort ?

IV – Réponse d'un groupe de brebis

Les brebis se serrent les unes contre les autres en situation de stress thermique dû au froid extérieur. Supposons que le berger ait un troupeau de 6 brebis non tondues. Plusieurs regroupements sont possibles comme indiqué en FIGURE 4.

Q.19 Évaluer la diminution de surface en contact avec l'air par rapport aux brebis isolées dans les cas 1, 1', 2 et 2' en fonction de H et $X = L/H = 3,3$. On rappelle que la longueur est notée L et que la section est carrée de côté H , telles que définies dans la FIGURE 3. Quel sera le cas de plus faible conductance thermique ? Dans quelle configuration les brebis ont-elles intérêt à se regrouper ? Quelle sera la diminution relative moyenne de métabolisme nécessaire au maintien de la température interne induite par le regroupement ? Certaines ont-elles intérêt à changer de place de temps en temps ?

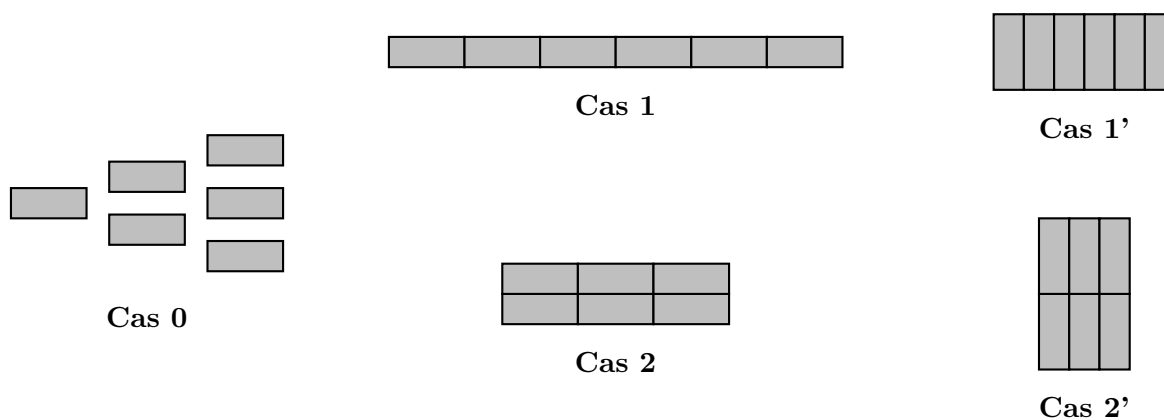


FIGURE 4 – Regroupements possibles de 6 brebis

Exercice 2 : Autour du protoxyde d'azote

Le protoxyde d'azote de formule brute N_2O est aussi connu sous le nom de gaz hilarant. C'est un gaz aux nombreux usages : il est utilisé dans les cartouches pour siphon à chantilly, dans certains aérosols, dans les kits *NOS* qui augmentent la puissance des moteurs à combustion interne, ou encore en chirurgie comme agent antalgique et anesthésique. Mais détourné de ces usages courants, il est parfois inhalé comme produit euphorisant, ce qui lui vaut une surveillance accrue par l'observatoire français des drogues et des toxicomanies. Cette pratique dangereuse et addictive, touchant souvent un public jeune et insouciant, est à proscrire absolument.

I – Le protoxyde d'azote : un gaz prétendument *fun* ?

Cette partie traite de quelques aspects de la chimie de cette molécule.

I.A La molécule N_2O

- Q.1** a) Donner la structure de Lewis des trois formes mésomères de la molécule N_2O (l'atome central est un atome d'azote). Indiquer celle qui met en défaut la règle de l'octet.
 b) Justifier par un argument simple si les deux autres formes sont équiprobables. Expliquer si on peut conclure à l'existence d'un moment dipolaire pour la molécule N_2O .

I.B Obtention du protoxyde d'azote

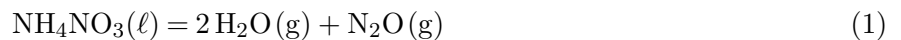
Les tableaux ci-dessous regroupent quelques données numériques utiles (à 298 K) :

| | $NH_4NO_3(s)$ | $H_2O(l)$ | $N_2O(g)$ | $N_2(g)$ | $O_2(g)$ |
|--|---------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Enthalpie standard de formation $\Delta_f H^\circ$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) | -365,6 | -285,1 | 82,1 | - | - |
| Entropie molaire standard S_m° ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) | 151,1 | 69,9 | 219,9 | 191,3 | 204,8 |

| | NH ₄ NO ₃ | H ₂ O |
|---|---------------------------------|------------------|
| Enthalpie standard de fusion $\Delta_{fus}H^\circ$ (kJ · mol ⁻¹) | 5,86 | – |
| Température de fusion T_{fus} (K) | 443 | – |
| Enthalpie standard de vaporisation $\Delta_{vap}H^\circ$ (kJ · mol ⁻¹) | – | 40,8 |
| Température de vaporisation T_{vap} (K) | – | 373 |

On donne également la constante des gaz parfait $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$. On suppose les grandeurs $\Delta_f H^\circ$ et S_m° indépendantes de la température dans tout domaine délimité par deux changements d'états successifs.

Q.2 Le protoxyde d'azote est préparé par décomposition du nitrate d'ammonium fondu à 520 K selon la réaction bilan suivante :



- Calculer l'enthalpie standard $\Delta_r H_1^\circ$ de la réaction (1) (on fera attention aux phases des constituants réactionnels). Cette réaction est-elle thermodynamiquement favorisée à basse ou à haute température ? Justifier votre réponse.
- Calculer les entropies molaires standards de NH₄NO₃(l) et de H₂O(g).
- En déduire l'entropie standard $\Delta_r S_1^\circ$ de la réaction (1). Justifier son signe.
- Exprimer l'enthalpie libre standard de réaction $\Delta_r G_1^\circ(T)$.
- Calculer la constante d'équilibre de la réaction (1) à 520 K. Commenter.

Q.3 Dans cette question, on considère un domaine de température tel que les états des espèces sont effectivement ceux de la réaction (1). Quelle est alors l'influence sur cet équilibre : (on justifiera les réponses à l'aide de la notion de quotient réactionnel)

- de l'ajout de vapeur d'eau à température et volume constants ?
- de l'ajout d'un gaz inerte à température et pression constantes ?

I.C Aspect cinétique de sa décomposition

Soit la réaction de décomposition de N₂O suivante, supposée totale dans le domaine de température T considéré :



À l'instant initial $t = 0$, on introduit dans un réacteur thermostaté à la température T , de volume constant V , préalablement vidé, une quantité n_i de protoxyde d'azote à la pression initiale P_i . Soit $n(t)$ la quantité de matière en protoxyde d'azote à une date ultérieure t quelconque. On suit l'évolution de la réaction en mesurant la pression totale $P(t)$ en fonction du temps. Les résultats obtenus à $T = 873 \text{ K}$ sont reportés dans le tableau ci-dessous :

| t (s) | 0 | 25 | 45 | 90 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| $P(t)/P_i$ | 1,000 | 1,120 | 1,196 | 1,314 |

Q.4 Établir l'expression de $P(t) - \frac{3}{2}P_i$ en fonction de $n(t)$, R , T et V .

Q.5 En déduire l'expression de la vitesse volumique de la réaction $v = -\frac{1}{V} \frac{dn}{dt}$ en fonction de R , T et $\frac{dP}{dt}$. La réaction est d'ordre 1 par rapport à N₂O avec k la constante de vitesse à la température T .

Q.6 Établir l'équation différentielle vérifiée par $P(t)$. On la mettra sous la forme :

$$\frac{dP}{dt} + kP = \frac{3}{2}kP_i$$

Q.7 Donner l'expression de $P(t)$ et l'allure du graphe correspondant.

La FIGURE 5 est la représentation graphique de $\ln\left(3 - 2\frac{P}{P_i}\right)$ en fonction du temps, tracée à l'aide des données du tableau ci-dessus.

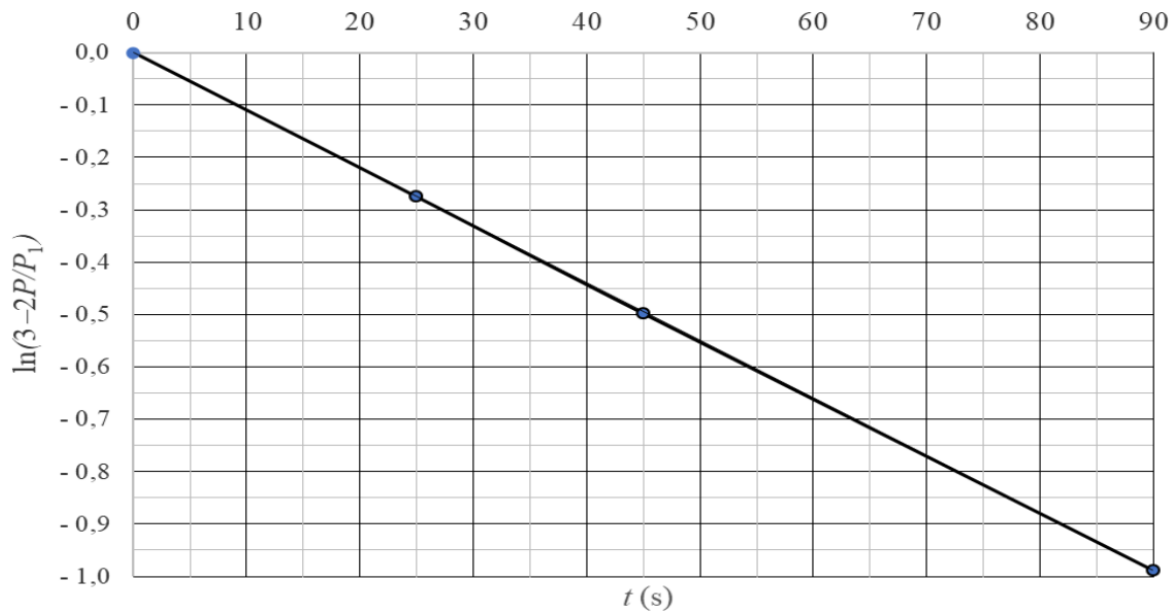


FIGURE 5 – Tracé des résultats expérimentaux au cours du temps.

Q.8 À l'aide de la FIGURE 5, déterminer la valeur de k .

Q.9 On rappelle que le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est défini comme la durée au bout de laquelle l'avancement est égal à la moitié de l'avancement final (c'est-à-dire quand $t \rightarrow \infty$) et qu'il vaut $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$ pour une réaction d'ordre 1. Calculer $t_{1/2}$ pour la réaction (2) dans les conditions de l'expérience.

Q.10 Rappeler la loi d'Arrhenius. L'énergie d'activation de la réaction est $E_a = 280 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Calculer le temps de demi-réaction à la température $T' = 1200 \text{ K}$.

II – Des moteurs "dopés" au protoxyde d'azote

On s'intéresse dans cette partie au principe d'un moteur suralimenté. Il s'agit d'expliquer par quels procédés il est possible d'augmenter la puissance d'un moteur thermique de cylindrée donnée. On rappelle que le cheval-vapeur (symbole ch) est une unité de puissance : $1 \text{ ch} = 736 \text{ W}$.

Le bloc moteur correspond à un ensemble de 4 cylindres munis de 4 pistons. Le mouvement de chaque piston se décompose selon les 4 étapes ou "temps-moteur" (FIGURE 6), de durée totale τ , chaque "temps-moteur" ayant pour durée $\tau/4$:

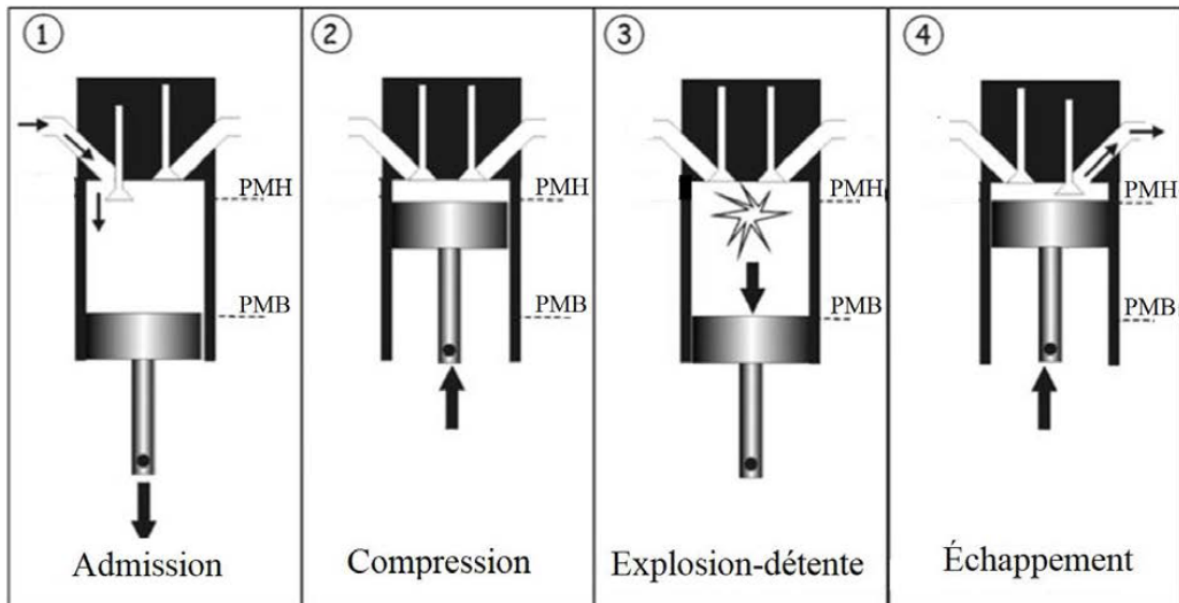


FIGURE 6 – Les quatre "temps-moteur".

Le piston évolue entre deux positions extrémales : le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB), le volume du cylindre valant alors V_{min} quand le piston se trouve au PMH et V_{max} quand il est au PMB . La cylindrée unitaire est définie par $C_1 = V_{max} - V_{min}$ et $C = 4C_1$ est la cylindrée du moteur.

Les quatre pistons sont montés sur un vilebrequin, ou arbre à cames, transformant le mouvement de va-et-vient des pistons en mouvement de rotation (FIGURE 7). La fréquence de rotation du vilebrequin est notée f_v .

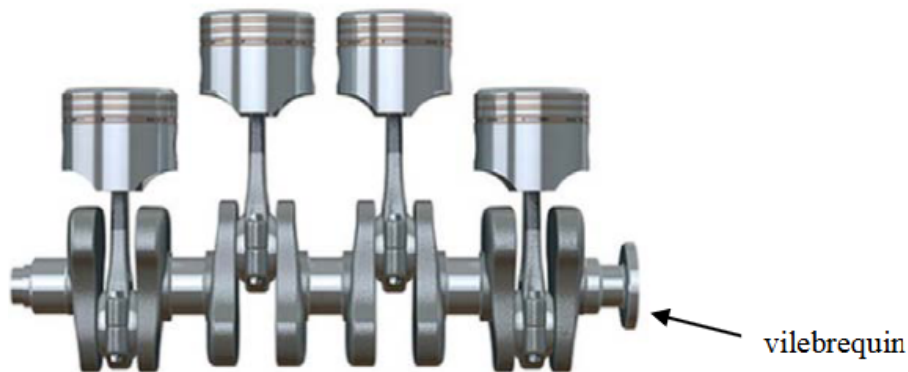


FIGURE 7 – Quatre pistons montés sur vilebrequin.

Q.11 Quel est le nombre de tours effectués par le vilebrequin au bout des quatre "temps-moteur" ? En déduire τ en fonction de f_v . Calculer τ pour $f_v = 2400$ tr/min.

Q.12 Dans un moteur automobile à combustion interne, la durée de l'étape de compression est typiquement de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes et la température atteinte en fin de compression est de l'ordre de 1200 K. En vous servant des résultats de la **Q.10**, conclure quant à l'utilisation du protoxyde d'azote dans les kits "nitro" pour moteur automobile.

Dans toute la suite, on s'intéresse au fonctionnement du moteur sur des temps longs devant τ , ce qui amène à traiter le bloc moteur comme un système ouvert traversé par un flux moyenné permanent de gaz.

Le mélange air-carburant (noté G) est assimilé à un gaz parfait de composition chimique inchangée malgré la combustion. Sa masse molaire M , ses capacités thermiques massiques à pression et à volume constants c_p et c_v , et son coefficient de Laplace $\gamma = c_p/c_v$ sont supposés indépendants des conditions de température et de pression.

II.A Combustion, débits et puissances

Considérons l'ensemble collecteur d'admission, bloc moteur représenté schématiquement sur la FIGURE 8 :

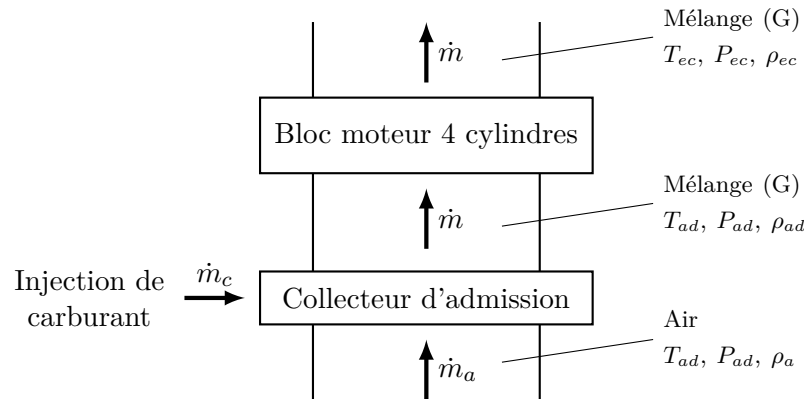
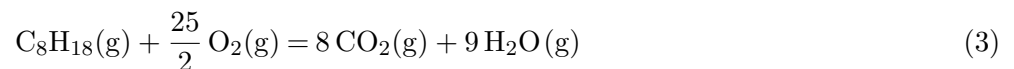


FIGURE 8 – Schéma fonctionnel de l'ensemble {collecteur d'admission, bloc moteur}.

L'air et le carburant sont mélangés dans le collecteur d'admission. Leurs débits massiques moyennés sont respectivement \dot{m}_a et \dot{m}_c . Le mélange gazeux (G) ainsi obtenu traverse le bloc moteur avec un débit massique moyenné \dot{m} .

Q.13 Quelle relation lie \dot{m}_a , \dot{m}_c et \dot{m} ?

On assimile le carburant à de l'octane C_8H_{18} , de masse molaire M_c . La réaction de combustion complète de l'octane avec le dioxygène de l'air (appelé comburant) est donnée ci-dessous :



L'air, de masse molaire M_a , est supposé constitué uniquement de dioxygène et de diazote avec pour proportions molaires : 20% en dioxygène et 80% en diazote. Le pouvoir comburivore du carburant en air, $(pco)_{air}$ est défini par le rapport des masses d'air et de carburant nécessaires pour une combustion complète dans les conditions stœchiométriques :

$$(pco)_{air} = \left. \frac{m_a}{m_c} \right|_{\text{stœchio}}$$

- Q.14** a) Établir l'expression de $(pco)_{air}$ sous la forme $(pco)_{air} = \beta \frac{M_a}{M_c}$ dans laquelle on explicitera le facteur numérique β . Calculer $(pco)_{air}$ pour $M_a = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $M_c = 114 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
 b) En déduire l'expression de \dot{m} en fonction de \dot{m}_a et de $(pco)_{air}$ pour que (G) soit un mélange stœchiométrique.

Compte-tenu de la valeur de $(pco)_{air}$, on admettra dans toute la suite que : $M = M_a$ et $\dot{m} = \dot{m}_a$.

On définit aussi le pci (pouvoir calorifique inférieur) d'un carburant comme la chaleur dégagée par kilogramme de carburant brûlé dans sa réaction de combustion complète produisant exclusivement du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.

Q.15 Soit $\Delta_r H^\circ$ l'enthalpie de réaction standard de la réaction (3). Donner la relation entre pci , M_c et $\Delta_r H^\circ$. Application numérique : calculer pci sachant que $\Delta_r H^\circ = -5000 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Q.16 Rappeler, sans la démontrer, l'expression générale du premier principe pour un fluide en écoulement permanent à travers une surface de contrôle Σ . On utilisera les notations suivantes :

- \dot{m} pour le débit massique ;
- h pour l'enthalpie massique ;
- e_c et e_p pour les énergies cinétique et potentielle macroscopiques massiques ;
- \mathcal{P}_{th} pour la puissance thermique reçue ;
- \mathcal{P}_u pour la puissance utile reçue.

On notera respectivement avec les indices e et s les grandeurs d'entrée et de sortie. On rappelle que la puissance utile reçue est la puissance mécanique transférée au fluide par toutes les surfaces mobiles en contact avec lui.

Dans toute la suite, nous conviendrons de négliger tous les termes d'énergies cinétique et potentielle macroscopiques.

Q.17 Considérons (G) à la traversée du bloc moteur. Sa température est T_{ad} à l'admission et T_{ec} à l'échappement. En appliquant, d'une part, le premier principe à (G) et en supposant, d'autre part, que la chaleur dégagée par la réaction de combustion est entièrement récupérée par (G), obtenir deux relations faisant intervenir la puissance utile \mathcal{P}_u et la puissance thermique \mathcal{P}_{th} en fonction de \dot{m} , \dot{m}_c , c_p , pci , T_{ad} et T_{ec} .

Q.18 Soit $\mathcal{P}_m = -\mathcal{P}_u$ la puissance motrice. Donner et justifier sans calcul le signe de \mathcal{P}_m .

Q.19 Montrer que \mathcal{P}_m peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\mathcal{P}_m = \dot{m} \left[\frac{pci}{(pco)_{air}} - c_p(T_{ec} - T_{ad}) \right]$$

Le bloc moteur joue le rôle d'une pompe. La fréquence du vilebrequin f_v , la cylindrée C et la masse volumique de (G) à l'admission ρ_{ad} , déterminent alors le débit massique \dot{m} .

Q.20 Établir l'expression de \dot{m} en fonction de ρ_{ad} , C et f_v .

II.B Cas du moteur atmosphérique : simple mais moyennement puissant

Dans le cas d'un moteur atmosphérique, l'air frais atmosphérique, de pression P_0 et de température T_0 , est directement admis dans le collecteur d'admission où il est mélangé au carburant de manière isotherme, isobare et stoechiométrique. Alors, la température d'admission vaut $T_{ad} = T_0 = 290 \text{ K}$ et la pression d'admission vaut $P_{ad} = P_0 = 1 \text{ bar}$.

Q.21 a) En écrivant la loi des gaz parfaits, exprimer puis calculer ρ_{ad} .
 b) Pour $C = 2 \text{ L}$, calculer \dot{m} , puis le débit molaire en air \dot{n}_a .
 c) Donner la valeur de la puissance motrice pour ce moteur, $\mathcal{P}_m^{\text{atmo}}$ en kilowatt puis en cheval-vapeur, avec les valeurs numériques suivantes : $c_p = 1,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, $pci = 44 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(pco)_{air} = 16$, $T_{ad} = 290 \text{ K}$ et $T_{ec} = 1200 \text{ K}$.

II.C Cas du moteur turbocompressé avec kit "nitro"

Les amateurs de tuning automobile savent qu'il est possible d'augmenter ponctuellement la puissance d'un moteur par l'installation d'un kit "nitro" ou *NOS* (Nitrous Oxide System). Le principe consiste à introduire dans le collecteur d'admission une masse gazeuse de protoxyde d'azote N_2O en parallèle de l'admission d'air du système d'origine. Au moment de la compression, le protoxyde d'azote se décompose en libérant du diazote et du dioxygène selon la réaction (2). Il y a alors un surplus de dioxygène disponible, ce qui permet d'augmenter la quantité de carburant à injecter et ainsi d'obtenir plus de puissance.

Q.22 Calculer le pourcentage molaire de dioxygène dans le gaz de décomposition de N_2O . Comparer au pourcentage molaire de dioxygène dans l'air. Commenter.

Considérons d'abord la situation théorique où l'air d'admission serait remplacé en totalité par N_2O .

Q.23 Le carburant utilisé est inchangé (il s'agit toujours d'octane). Calculer son pouvoir comburivore en N_2O , noté $(pci)_{N_2O}$ défini comme le rapport des masses de N_2O et de carburant nécessaires à assurer la stœchiométrie de la réaction de combustion (3). On donne la masse molaire de N_2O : $M_{N_2O} = 44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

La capacité thermique massique du gaz de décomposition de N_2O est $c'_p = 1,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. En notant \dot{n}_{N_2O} le débit molaire du protoxyde d'azote, la formule de la puissance motrice devient :

$$\mathcal{P}_m^{\text{full nitro}} = \dot{n}_{N_2O} M_{N_2O} \left[\frac{pci}{(pci)_{N_2O}} - c'_p (T_{ec} - T_{ad}) \right]$$

On donne pour ce moteur muni de son kit *NOS* : $T_{ad} = 330 \text{ K}$, $T_{ec} = 630 \text{ K}$ et $\dot{n}_{N_2O} = 3,7 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$.

Q.24 Calculer la puissance $\mathcal{P}_m^{\text{full nitro}}$ qui pourrait être obtenue dans ce cas théorique et la comparer à la valeur $\mathcal{P}_m^{\text{atmo}}$.

En pratique, pour éviter que le moteur ne s'endommage, on s'autorise une multiplication par quatre de la puissance $\mathcal{P}_m^{\text{atmo}}$. L'admission de N_2O vient alors en complément de l'admission d'air. Les débits molaires en air et en N_2O sont alors $\dot{n}_a = 3,2 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\dot{n}_{N_2O} = 0,5 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$.

Q.25 Le kit *NOS* monté est constitué de deux bouteilles de contenance 7300 g de N_2O chacune. Calculer la durée maximale du "boost" réalisable avec ce kit.

● ● ● FIN ● ● ●