

Épreuve de physique-chimie (partie chimie)

Durée de la partie chimique : 2h

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

L'usage de calculatrices est interdit.

Le sujet est composé de quatre parties indépendantes, elles-mêmes composées de sous-parties largement indépendantes.

AVERTISSEMENT

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à **encadrer les résultats de leurs calculs**.

CONSIGNES :

- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à bille à encre foncée : bleue ou noire.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est interdit.
- Remplir sur chaque copie en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom.
- Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.

Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance

Autour des dérivés halogénés

Des matières plastiques (PVC) aux produits phytosanitaires, des solvants (dichlorométhane CH_2Cl_2 , chloroforme CHCl_3) à l'eau de Javel, les halogènes entrent dans la composition de nombreuses espèces chimiques. Ils apparaissent dans des corps simples sous forme d'ions halogénure (ions chlorure Cl^- dans le sel de table, ions fluorure F^- dans le dentifrice) ou de dihalogènes.

Partie 1 : quelques aspects de la chimie des halogènes

Le brome Br est situé dans la 4^{ème} période de la classification périodique des éléments, dans la 17^{ème} colonne, au-dessous du chlore Cl et au-dessus de l'iode I (voir le tableau périodique ci-dessous).

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr

- Expliquer comment varie l'électronégativité des éléments dans le tableau périodique. Classer alors les dihalogènes Cl_2 , Br_2 et I_2 par ordre croissant de pouvoir oxydant.
- Indiquer le nombre d'électrons de valence de l'iode et de l'oxygène.
- À l'aide du tableau ci-dessous, élaborer un protocole permettant de montrer qualitativement l'évolution du caractère oxydant des dihalogènes.

	$\text{Cl}_2(\text{aq})$	$\text{Br}_2(\text{aq})$	$\text{I}_2(\text{aq})$ (sous forme d'ions I_3^- en présence d'ions iodure I^-)	$(\text{K}^+ + \text{Cl}^-)_{\text{aq}}$	$(\text{K}^+ + \text{Br}^-)_{\text{aq}}$	$(\text{K}^+ + \text{I}^-)_{\text{aq}}$
Couleur	Jaune pâle	Orange	Brun	Incolore	Incolore	Incolore

- Proposer un schéma de Lewis pour chacune des espèces suivantes : Cl_2 ClOH I_3^-
- À 298 K, le dichlore est un gaz, le dibrome est un liquide et le diiode est un solide. Interpréter ces propriétés physiques par l'analyse des forces intermoléculaires.

Partie 2 : Cinétique de la décoloration de l'érythrosine B

L'érythrosine B (E127) est un colorant azoïque apparenté à l'éosine et utilisé pour colorer les aliments ou pour teinter les préparations microscopiques et les médicaments. L'ensemble des manipulations est réalisé à 298 K.

Données à 298 K :

$$E^\circ(\text{ClO}^-(\text{aq})/\text{Cl}^-(\text{aq})) = 0,89 \text{ V} \quad E^\circ(\text{S}_4\text{O}_6^{2-}(\text{aq})/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq})) = 0,08 \text{ V} \quad E^\circ(\text{I}_2(\text{aq})/\text{I}^-(\text{aq})) = 0,54 \text{ V}$$

2.1 - Dosage de la solution d'hypochlorite de sodium commerciale

Après avoir introduit un volume $V_0 = 2 \text{ mL}$ de la solution d'hypochlorite de sodium commerciale ($\text{Na}^+ + \text{ClO}^-$)(aq) dans la fiole jaugée de volume $V_F = 100 \text{ mL}$, on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. À un volume $V_E = 10 \text{ mL}$ de cette solution fille, on ajoute environ 10 mL d'une solution d'iodure de potassium ($\text{K}^+ + \text{I}^-$)(aq) à 15% en masse et 5 mL d'acide éthanóique $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})$ à 3 mol. L^{-1} . L'échantillon obtenu est titré par une solution de thiosulfate de sodium ($2 \text{Na}^+ + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)(aq) de concentration $C = 2 \cdot 10^{-2} \text{ mol. L}^{-1}$. Le volume équivalent est égal à $V' = 16 \text{ mL}$.

- Proposer une équation pour la réaction entre les ions hypochlorite $\text{ClO}^-(\text{aq})$ et les ions iodure $\text{I}^-(\text{aq})$.

Prévoir qualitativement le caractère favorisé ou défavorisé de la réaction.

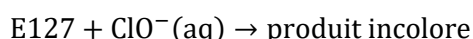
7. Proposer une équation pour la réaction de titrage du diiode $I_2(aq)$ par les ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}(aq)$.
Prévoir qualitativement le caractère favorisé ou défavorisé de la réaction.
8. Sachant que les ions iodure et l'acide éthanoïque sont introduits en excès, déterminer la concentration en ions hypochlorite dans la solution commerciale.

2.2 - Suivi cinétique de la décoloration de l'érythrosine B

On prépare dans quatre béchers les solutions suivantes :

Solution n°	1	2	3	4
Solution d'hypochlorite de sodium commerciale	3 mL	6 mL	9 mL	12 mL
Eau distillée	17 mL	14 mL	11 mL	8 mL

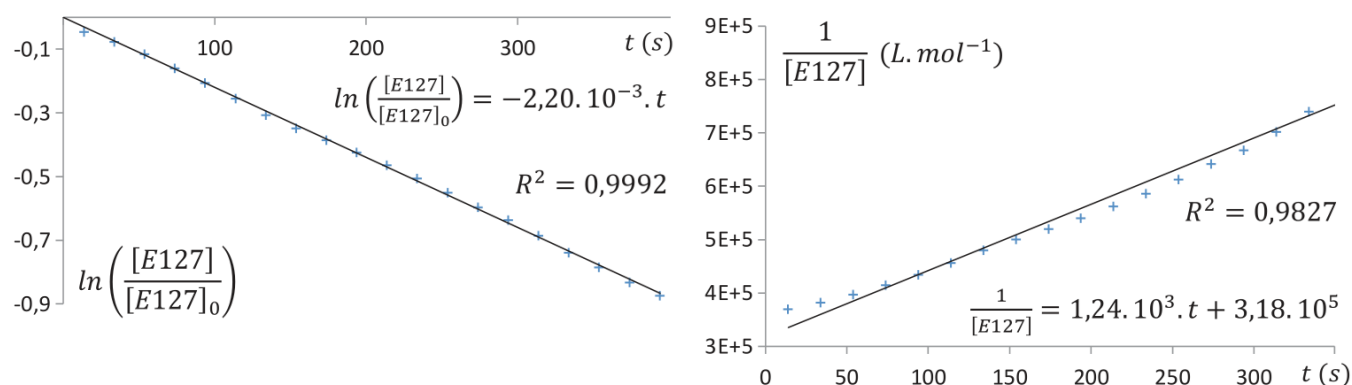
À chacune des quatre solutions précédentes, on ajoute à un instant pris comme origine des temps 10 mL d'une solution aqueuse d'érythrosine B (E127) de concentration $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ (la concentration initiale en érythrosine B après mélange vaut donc $[E127]_0 = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$). On suit alors l'évolution temporelle de l'absorbance à 530 nm, longueur d'onde pour laquelle on considère que seul le colorant azoïque absorbe. La décoloration de la solution est due à la réaction supposée totale d'équation :



Connaissant le coefficient d'absorption molaire ϵ de l'érythrosine B à cette longueur d'onde ($\epsilon = 8,2 \cdot 10^4 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), on détermine l'évolution temporelle de la concentration en érythrosine B.

On suppose que la loi de vitesse s'écrit sous la forme : $v = k[E127]^\alpha [ClO^-]^\beta$

9. En comparant les concentrations initiales de réactifs, proposer une expression simplifiée de la loi de vitesse. On note k_{app} la constante de vitesse apparente.
10. Dans l'hypothèse où α est égal à 1, écrire l'équation différentielle régissant l'évolution temporelle de la concentration en érythrosine B et donner sa solution.
11. Dans l'hypothèse où α est égal à 2, écrire l'équation différentielle régissant l'évolution temporelle de la concentration en érythrosine B et donner sa solution.



12. À partir des deux courbes précédentes obtenues à partir de la solution (1), déterminer la valeur probable de α .
En déduire la valeur de la constante de vitesse apparente $k_{app}^{(1)}$ à 298 K, en précisant l'unité choisie.

On exploite de même les résultats des manipulations (1), (2), (3) et (4).

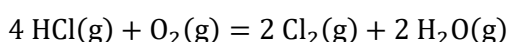
Solution	(1)	(2)	(3)	(4)
$[\text{ClO}^-]_0$ (mol. L ⁻¹)	0,08	0,16	0,240	0,32
k_{app} (unité S. I.)	?	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$

Pour une manipulation analogue correspondant à une concentration initiale en ions hypochlorite $[\text{ClO}^-]_0$ égale à 0,1 mol. L⁻¹, la constante de vitesse apparente k_{app} serait égale à $2,75 \cdot 10^{-3}$ unités S. I.

13. Déterminer la valeur de l'ordre partiel β et la valeur de la constante de vitesse k à 298 K, en précisant l'unité choisie.

Partie 3 : Étude du procédé Deacon

En présence d'un catalyseur à base de sulfate ou de chlorure de cuivre déposé sur de la pierre ponce, le dichlore peut être préparé vers 800 K par oxydation du chlorure d'hydrogène selon l'équilibre de Deacon :



On néglige l'influence de la température sur les enthalpies standard de formation :

	HCl(g)	H ₂ O(g)
Enthalpies standard de formation vers 900 K, $\Delta_f H^\circ$ (kJ. mol ⁻¹)	-92	-242

3.1 - Influence de la température sur l'équilibre

Soit un système contenant initialement exclusivement un mélange stœchiométrique de chlorure d'hydrogène HCl(g) ($n_{\text{HCl}}^i = 4$ mol) et de dioxygène O₂(g) ($n_{\text{O}_2}^i = 1$ mol).

14. Indiquer les valeurs des enthalpies standard de formation $\Delta_f H^\circ$ pour le dioxygène O₂(g) pour le dichlore Cl₂(g). Justifier la réponse.
15. Calculer l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ$. Indiquer en justifiant l'influence d'une élévation de la température sur la constante d'équilibre.
16. Expliquer pourquoi choisir, lors de la synthèse industrielle, une température comprise entre 700 K et 900 K plutôt qu'une température proche de 300 K.

3.2 - Choix de la température d'équilibre

Dans le système précédent, la pression $P = 1$ bar est maintenue constante. L'équilibre de Deacon étant renversable, on cherche à connaître la température finale T_f au-dessus de laquelle le taux d'avancement final τ est inférieur à 0,50.

17. Déterminer la composition du système à l'équilibre thermodynamique dans le cas où $\tau = 0,50$.
18. En déduire la valeur de la constante d'équilibre $K^0(T_f)$ à la température T_f . Le résultat pourra être présenté sous forme d'une fraction irréductible.
On obtient $K^0(T_f) \approx 0,56$.

À la température $T' = 450$ K, la constante d'équilibre $K^0(T)$ est égale à $3,2 \cdot 10^6$. On note R la constante des gaz parfaits égale à 8,3 J. mol⁻¹. K⁻¹.

19. Rappeler la relation de Van't Hoff. Après intégration, exprimer T_f en fonction de $K^0(T_f)$, $K^0(T')$, $\Delta_r H^\circ$, R et T' .
On obtient $T_f = 900$ K.

3.3 - Choix de la température initiale

On cherche à déterminer quelle doit être la température initiale T_i pour que le système précédent – siège d'une transformation chimique supposée isobare et réalisée dans un réacteur calorifugé – atteigne la température T_f une fois l'équilibre thermodynamique établi.

20. Montrer que la variation d'enthalpie entre l'état initial et l'état d'équilibre thermodynamique s'annule.

On donne les capacités calorifiques molaires standard isobares (pour lesquelles on néglige l'influence de la température) :

	HCl(g)	H ₂ O(g)
$C_{P,m}^0$ (J. K ⁻¹ . mol ⁻¹)	29	29

21. En détaillant la réponse, exprimer T_i en fonction de T_f , $\Delta_r H^0$, $C_{P,m}^0(\text{HCl(g)})$, $C_{P,m}^0(\text{O}_2(\text{g}))$ et τ .
Déterminer la valeur numérique de T_i (aide au calcul : $116/29 = 4$).

3.4 - Optimisation du procédé chimique

On désigne par n_{tot} la quantité de matière totale.

22. Exprimer le quotient de réaction Q en fonction de n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_{tot} , P et P^0 .
23. Indiquer à quoi est égal le quotient de réaction si l'équilibre thermodynamique est initialement établi.

On fait subir au système initialement à l'équilibre thermodynamique une élévation de la pression, à température et composition constantes.

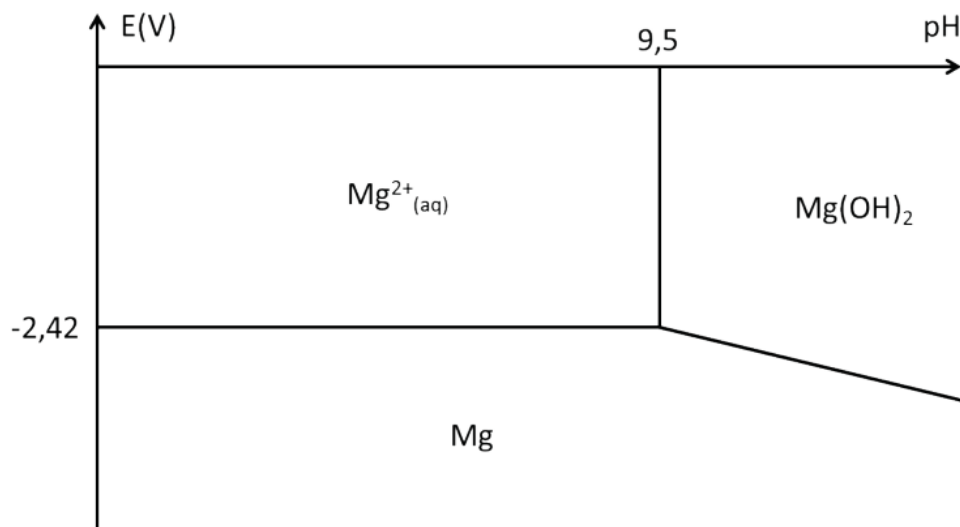
24. Prévoir comment varie le quotient de réaction. En déduire dans quel sens est déplacé l'équilibre de Deacon.
25. Expliquer pourquoi, lors de la synthèse industrielle, la pression est malgré tout choisie égale à 1 bar.

On introduit dans le système initialement à l'équilibre thermodynamique du diazote (gaz inerte) à température et pression constantes.

26. Prévoir comment varie le quotient de réaction. En déduire dans quel sens est déplacé l'équilibre de Deacon.
27. Justifier, lors de la synthèse industrielle, l'emploi d'air plutôt que de dioxygène pur (obtenu par distillation de l'air liquide). Quelle(s) autre(s) manières reste-t-il pour favoriser le sens direct ?

Partie 4 : Questions indépendantes sur la chimie du magnésium en solution

Nous allons nous intéresser à la chimie du magnésium en solution aqueuse. Le diagramme potentiel-pH du magnésium est tracé ci-dessous pour une concentration de travail $c_{\text{tr}} = 10^{-2}$ mol. L⁻¹ à 25°C.



28. Rappeler ce qu'est la « concentration de travail » dans un diagramme potentiel-pH.
29. Déterminer le potentiel standard du couple Mg^{2+}/Mg d'après le diagramme potentiel-pH.
30. Calculer le produit de solubilité K_s de l'hydroxyde de magnésium Mg(OH)_2 .
31. Écrire la relation de Nernst appliquée au couple Mg^{2+}/Mg , puis celle appliquée au couple $\text{Mg(OH)}_2/\text{Mg}$.
32. Déterminer par le calcul la pente séparant les domaines Mg et Mg(OH)_2 .

Épreuve de physique-chimie (partie physique)

Durée de la partie physique : 2h

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

L'usage de calculatrices est interdit.

Le sujet est composé de trois parties indépendantes, elles-mêmes composées de sous-parties largement indépendantes.

AVERTISSEMENT

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à **encadrer les résultats de leurs calculs**.

CONSIGNES :

- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à bille à encre foncée : bleue ou noire.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est interdit.
- Remplir sur chaque copie en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom.
- Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.
- Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance

Étude de géothermie domestique

Les calculs numériques seront effectués à un ou deux chiffres significatifs à l'appréciation des candidats. Les trois parties sont indépendantes. On donne les aides au calcul suivantes :

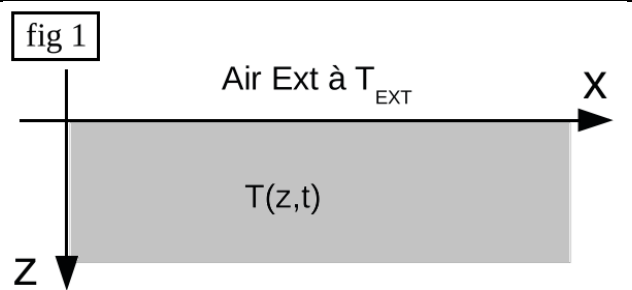
$$\ln(5) \approx 1,6 \quad \sqrt{1/0,3} \approx 1,8 \quad \ln(0,03) \approx -3,5$$

Partie 1 : Études Préliminaires sur les ondes thermiques

On considère la configuration représentée ci-contre.

Quelques données pour le sol :

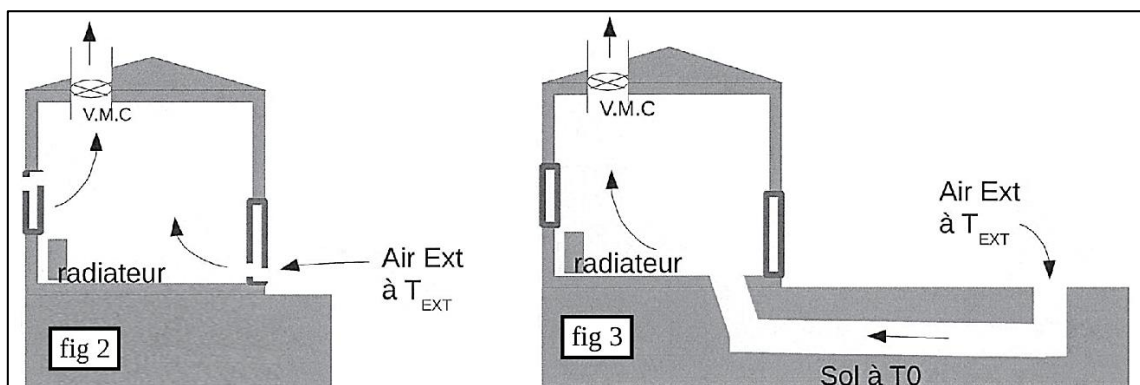
- Conductivité thermique du sol : $\lambda \approx 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Masse volumique du sol : $\rho \approx 1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Capacité thermique du sol : $c = 1000 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$



1. En faisant un bilan sur une tranche, démontrer l'équation de diffusion thermique dans le sol ($z > 0$) vérifiée par la température $T(z, t)$ pour un flux thermique vertical : $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ (fig. 1)
2. La température du sol est excitée par des variations périodiques de la température de l'air extérieur. On modélise la température au niveau de la surface par $T(0, t) = T_0 + a \cos(\omega t + \varphi)$. Le coefficient a représente l'amplitude de la variation de température à la surface du sol. On pourrait prendre les pulsations $\omega_A = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{an}} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ rad/s}$ et $\omega_J = 2\pi \text{ rad/jour} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$.
À quels phénomènes correspondent-elles ?
3. La variation de température se transmet de proche en proche. On prend une solution de la forme $T(z, t) = T_0 + \alpha e^{-z/\delta} \cos(\omega t + \varphi - z/\delta)$. Montrer que $\delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\rho c \omega}}$.
4. Que représente physiquement δ ? Calculer δ pour ω_J et ω_A .
5. Donner en fonction de δ la profondeur pour que l'amplitude de la variation soit divisée par un facteur 5. Faire l'application numérique pour une pulsation de $\omega_A = 2 \cdot 10^{-7} \text{ rad/s}$.

Partie 2 : Dimensionnement d'un puits canadien

On veut rénover un logement en y installant un puits canadien. Le logement fait une surface de 100 m^2 sous une hauteur moyenne de 2 m. Dans le logement à rénover, la ventilation se fait par l'apport d'air extérieur grâce aux ouvertures en haut des fenêtres et par l'expulsion de l'air intérieur par une ventilation mécanique contrôlée (VMC) (fig. 2). On bouche les ouvertures pour les remplacer par un dispositif de puits canadien : l'air extérieur aspiré circule dans le sol avant d'entrer dans le logement (fig. 3). On considère que le débit volumique D_V dans la V.M.C et le puits sont constants et identiques (pas de perte de charge), les rayons R des sections sont également identiques.



6. Expliquer ce qu'est une « perte de charge ». À quelle caractéristique du fluide est-elle liée ?

On peut fixer les grandeurs R , L (la longueur du puits) et D_V indépendamment les unes des autres en dimensionnant l'installation lors de la conception. On évitera alors d'utiliser « v », la vitesse de l'air pulsé, que l'on peut exprimer en fonction de ces grandeurs. L'objectif est de trouver la longueur, la profondeur et la section que doit avoir le puits.

Les lois physiques utilisées dans cette partie font intervenir des différences de températures : toutes les températures notées T ou θ sont exprimées en degré Celsius.

Le coefficient h modélise le transfert thermique de surface conducto-convectif entre le sol de température T_0 et l'air de température T en écoulement par la loi de Newton qui donne au signe près le flux surfacique d'échange $\varphi = h(T - T_0)$ en $W.m^{-2}$.

On modélise h par l'expression : $h = 1,18 \cdot D_V^{0,8} / R^{1,8}$ u. s. i. (« u. s. i. » signifie « unité du système international »).

Données numériques	Débit volumique : $D_V = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Température du sol : $T_0 = 12^\circ\text{C}$
	Rayon des sections : $R = 50 \text{ mm}$	Température de l'air extérieur : $T_{\text{ext}} = -4^\circ\text{C}$
	Masse volumique de l'air : $\rho = 1,275 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Température du logement : $T_L = 19^\circ\text{C}$
	Capacité thermique massique de l'air à pression constante : $c_P = 1000 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	

7. Pourquoi doit-on renouveler l'air du logement ? Quel en est l'inconvénient ? Quelle est la durée nécessaire pour que l'air se renouvelle entièrement dans le logement ? À quoi sert le puits canadien ?

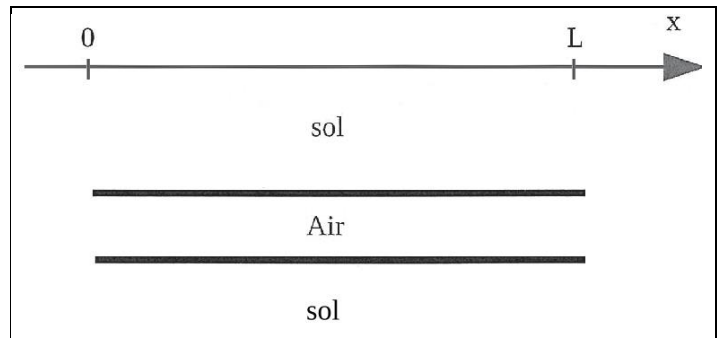
8. On veut maintenant dimensionner la longueur et le rayon du tuyau nécessaires au puits. Quelle température maximale peut-on espérer à la sortie du puits s'il est suffisamment long ? Estimer alors la puissance gagnée P par rapport à un apport direct d'air extérieur dans la maison. Commenter.

Le tuyau, représenté ci-dessous, est orienté par un axe x dans le sens de l'écoulement.

La température le long du tuyau souterrain est notée $T(x)$. On pose $\theta(x) = T(x) - T_0$.

On prend un modèle simplifié pour la circulation de l'air dans le sol :

- Le régime est permanent ;
- Pas de perte de charge, la pression P est constante ;
- La masse volumique de l'air est également supposée constante et uniforme.



9. En considérant une tranche d'air entre x et $x + dx$, établir l'équation différentielle en θ et montrer que :

$$\theta(x) = \theta_i e^{-Kx} \quad \text{avec} \quad K = \frac{2\pi h R}{\rho D_V c_P}$$

10. Pour dimensionner la longueur, on veut atteindre une température de sortie T_{finale} au moins égale à 96 % de la température Celsius maximale. On donne $K = 0,15$ u. s. i. Calculer cette longueur L .

11. Que peut-on dire de l'effet du débit sur la longueur nécessaire à l'augmentation maximale de température ? On justifiera avec soin à l'aide des différents processus physiques mis en jeu.

12. Que peut-on dire de l'effet du diamètre du tuyau sur la longueur nécessaire à l'augmentation maximale de température ? On justifiera avec soin à l'aide des différents processus physiques mis en jeu.

On choisit finalement un diamètre qui évite une perte de charge et on ne dimensionne donc pas totalement la section de la conduite en fonction de la contrainte thermique.

Partie 3 : Remplacement d'un chauffage électrique par un chauffage géothermique horizontal

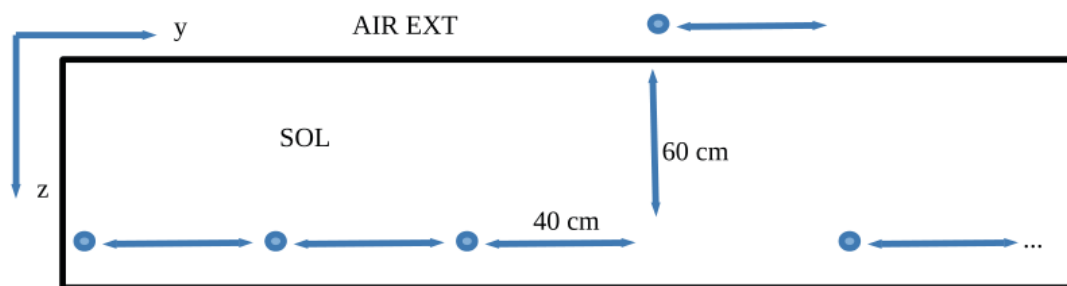
Dans cette étude on prendra un logement de surface 100 m^2 habitable assez bien isolée qui consomme une énergie annuelle de 7000 kWh en chauffage électrique. Le coût du kWh aujourd'hui est de $0,15/\text{kWh}$. Ce coût bas a favorisé

une stratégie investissement en chauffage tout électrique dans beaucoup de logements des années 80. On suppose que le coût du kWh augmentera : le coût prend par exemple l'approvisionnement en uranium mais celui-ci ne prend pas en compte le coût du démantèlement des centrales nucléaires et encore mal le coût du stockage des déchets. Les coûts réels de production ne sont pas aujourd'hui connus car les chiffrages des coûts de postproduction (démantèlement, stockage des déchets) et des installations nécessaires sont eux-mêmes inconnus dans une large mesure.^a

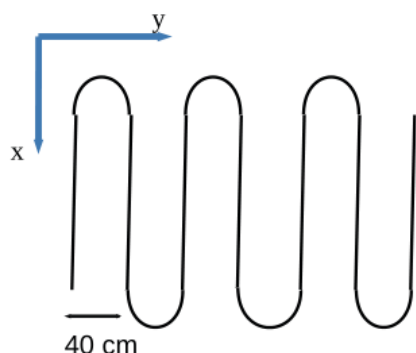
L'objectif de cette partie est donc de calculer le gain d'énergie en remplaçant un système de chauffage électrique par un chauffage géothermique. On souhaite utiliser un système dit pompe à chaleur P.A.C « eau/eau » :

- eau avec glycol dans un circuit souterrain horizontal dit « circuit capteur » qui prend de l'énergie au sous-sol ;
- eau du circuit de chauffage.

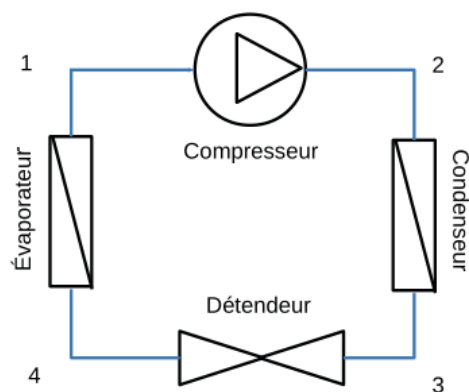
Le fluide utilisé dans la PAC est le R407C. Le circuit « capteur » alimente 4 circuits enterrés, de 100 m de longueur chacun, situés à 60 cm de profondeur, les allers-retours de tuyaux sont espacés de 40 cm.



Coupe longitudinale dans le sol



Vue de dessus d'une partie du circuit capteur



Circuit du fluide réfrigérant R-407c

Description du cycle : Les températures pour les mélanges diphasés du fluide dans les échangeurs isobares sont de 5°C pour l'un et 60°C pour l'autre. Dans l'état (1) le fluide est sous forme de vapeur saturante à 6 bar puis est compressé de manière adiabatique dans le compresseur pour atteindre une pression de 27 bar à une température de 70°C dans l'état (2). Le fluide est condensé de manière isobare et se retrouve sous forme de liquide saturant en (3). Le fluide se détend de manière isenthalpique jusqu'à une pression de 6 bar dans l'état diphasé (4) . Il passe ensuite de manière isobare dans l'évaporateur pour se retrouver dans l'état (1).

Données sur les caractéristiques du fluide R407C :

Le fluide employé dans la PAC est un mélange de fluides frigorigènes appelé R407C.

Température d'ébullition : - 43,8°C (à 0,1013 MPa)

Température et pression critique : $T_c = 86,1^\circ\text{C}$ $P_c = 4,63 \text{ MPa}$

^a Note de la rédaction : le concepteur de l'énoncé possède une connaissance très rudimentaire du sujet qu'il se permet d'aborder... La plupart de ce qu'il considère « inconnu » est en réalité tout à fait connu ; et si le prix du kWh a augmenté entre 2015 et aujourd'hui, c'est principalement à cause d'accords commerciaux questionnables et d'une gestion politique calamiteuse du secteur énergétique.

Données thermodynamiques pour le R407C (avec h l'enthalpie massique) :	T	P	h_{liq}	h_{vap}
	5°C	6 bar	210 kJ. kg ⁻¹	410 kJ. kg ⁻¹
	60°C	27 bar	295 kJ. kg ⁻¹	425 kJ. kg ⁻¹
	70°C	27 bar		435 kJ. kg ⁻¹

Données sur le système	Autres données
Puissance thermique maximale : 7000W	$S_{habitation} = 100 \text{ m}^2$
Contenance de la PAC en R407C : 2 kg	$E_{chauffage} = 7000 \text{ kWh (annuel)}$
Débit du circuit de chauffage $D_V = 0,20 \text{ L. s}^{-1}$	Prix du kWh : 0,15 €
Débit total du circuit capteur $D_f = 0,50 \text{ L. s}^{-1}$	
Température du circuit capteur $T_f = 5^\circ\text{C}$	
Masse volumique de l'eau glycolée assimilée à celle de l'eau : $\rho = 1 \text{ kg. L}^{-1}$	
Capacité thermique massique identique pour l'eau et le mélange eau glycol : $4 \text{ kJ. kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Les quatre tuyaux capteurs ont une longueur de 100 m	

13. Rappeler le principe d'une pompe à chaleur. On fera un schéma avec les sources en expliquant les transferts d'énergie.
14. À quel élément du circuit du liquide réfrigérant le circuit capteur doit-il être en contact ? Justifier.
15. En supposant un chauffage constant sur 6 mois (nuit et jour) quelle puissance moyenne faut-il produire sur six mois ? On fera un calcul estimatif.
16. On dimensionne la puissance thermique maximale que doit fournir la PAC à l'eau de chauffage à 7000 W. Commenter.
17. a. Faire l'allure du diagramme de Clapeyron du R407C avec trois isothermes 5°C, 60°C et 70°C.
b. Calculer le titre massique en vapeur à l'état (4).
c. Tracer l'allure du cycle de la PAC, on fera figurer les 4 états et le sens du cycle.
18. Dans le diagramme entropique fourni en annexe (à rendre avec la copie), représenter les points (1), (2), (3) et (4), ainsi que les transformations thermodynamiques liant ces points. On considèrera, dans cette question uniquement, que le compresseur impose une compression non-isentropique.
19. Calculer le transfert thermique massique entre le fluide et la source chaude et calculer le travail indiqué massique échangé avec le compresseur. En déduire le transfert thermique massique entre le fluide et la source froide.
20. a. Calculer l'efficacité de la P.A.C et donner la formule littérale pour l'efficacité de Carnot qui est égale à 6,1. Comparer les efficacités et commenter.
b. Calculer la puissance électrique nécessaire au compresseur de rendement électromécanique de 75 % pour fournir une puissance maximale de 7000 W au circuit de chauffage. (conditions nominales)
c. Calculer alors la nouvelle consommation électrique annuelle en kWh en supposant un rendement électromécanique et une efficacité constants dans les autres conditions de chauffage.
d. Calculer alors le gain annuel en euro. Commenter.

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

Diagramme entropique du R407C :

