

CB de Physique-Chimie 2025 PSI - Lycée du Parc des Loges

Durée 4H

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Calculatrices autorisées

Le sujet comporte 3 parties indépendantes

Partie I – Ondes acoustiques

On considère la propagation d'une onde sonore dans l'air à la vitesse c , selon la direction $(X'X)$. On note μ la masse volumique de l'air, P la pression et $\vec{v}$ la vitesse de déplacement d'une particule élémentaire de fluide. Les grandeurs au repos sont μ_0 et P_0 , tandis que les perturbations apportées par l'onde sonore, supposées au premier ordre, sont μ_1 , P_1 et $\vec{v}_1 = \vec{v}$. Soit ξ_m l'amplitude de déplacement des particules de fluide et λ la longueur d'onde sonore.

Q22. Préciser ce que l'on appelle l'approximation acoustique.

Q23. On néglige l'effet du champ de pesanteur sur la propagation de l'air. Démontrer, dans le cadre de l'approximation acoustique, la relation :

$$\mu_0 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} \right) = - \left(\frac{\partial P_1}{\partial x} \right)$$

Q24. Toujours dans le cadre de l'approximation acoustique, établir la relation :

$$\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial t} \right) = -\mu_0 \left(\frac{\partial v_1}{\partial x} \right)$$

L'onde sonore met en mouvement les particules de fluide selon une transformation isentropique. On introduit donc le coefficient de compressibilité isentropique $\chi_S = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \right)_S$.

Q25. Réécrire le coefficient χ_S dans l'approximation acoustique en fonction de μ_0 , μ_1 et P_1 .

Q26. Dédurre des questions précédentes l'équation de propagation relative à la surpression P_1 . En déduire l'expression de la vitesse de propagation c .

Faire l'application numérique pour c dans l'air, de masse volumique $\mu_0 = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et de compressibilité isentropique $\chi_S = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$.

E - Effet de l'onde sonore sur le haut-parleur

On considère que la membrane du haut-parleur se déplace selon l'axe des x de la distance $\xi(0, t) = \xi_m \cos(\omega t + \varphi)$. La membrane est supposée de surface S perpendiculaire à l'axe $(X'X)$ et de masse m . L'onde sonore engendrée est plane et progressive. Elle se déplace à la vitesse c selon le sens des x croissants.

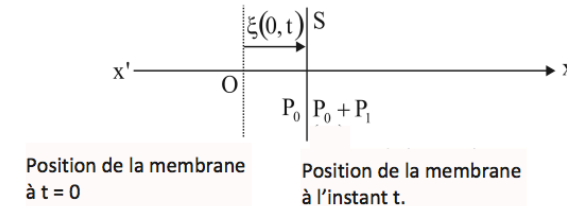


Figure 8 - Schéma des positions

Q27. Écrire l'expression de $\xi(x, t)$, déplacement de l'onde sonore à l'abscisse x .

Q28. On définit l'impédance acoustique pour une onde plane progressive par la relation $Z = \frac{P_1(M, t)}{v_1(M, t)}$. Montrer que l'on a $Z = \mu_0 c$ pour l'onde plane progressive dans le sens des x croissants. On pourra raisonner en utilisant les notations complexes. Faire l'application numérique pour Z dans l'air, de masse volumique $\mu_0 = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et de compressibilité isentropique $\chi_S = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$.

Q29. Calculer la puissance de la force de surpression s'exerçant sur la membrane en fonction de μ_0 , c , S et v_1 . En déduire que la force que le fluide exerce sur la membrane est de la forme $\vec{F}_f = -\alpha \vec{v}$, où l'on identifiera le coefficient α en fonction de c , S et μ_0 . Il s'agit de la force « de frottement fluide » de la partie A.

F - Intensité acoustique et densité volumique d'énergie sonore

Le vecteur de Poynting acoustique noté $\vec{I}$ est défini par la relation $d^2 E = \vec{I} \cdot d\vec{S} dt$ où $d^2 E$ est l'énergie sonore transmise à la surface orientée $d\vec{S}$ pendant la durée dt . On considère que la vitesse des particules de fluide est $\vec{v}_1$ et que p_1 est la surpression acoustique.

Q30. Qu'appelle-t-on intensité acoustique (ou sonore) ? On la note I dans la suite.

Q31. Pourquoi définit-on l'intensité acoustique en décibels par la relation $I_{dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)$ (avec $I_{ref} = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) ?

Q32. On considère une onde plane progressive harmonique, d'intensité acoustique $I_{dB} = 120$ dB et de fréquence $f_0 = 1,0$ kHz. On rappelle l'expression du vecteur de Poynting acoustique :

$$\vec{P} = P_1 \vec{v}_1.$$

- Calculer la valeur moyenne du vecteur de Poynting acoustique.
- En déduire les amplitudes P_m et v_m de la surpression p_I et de la vitesse des particules v_I (on considérera que vitesse et surpression, sinusoidales, sont en phase et on prendra la valeur numérique de Z trouvée à la question 28).
- Vérifier la validité de l'approximation acoustique.
- Déterminer l'amplitude x_m du déplacement des particules de fluide. Commenter.

Q33. Démontrer que $\text{div}(\vec{P}_1) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \chi_S P_1^2 + \frac{1}{2} \mu_0 v_1^2 \right).$

On fera la démonstration en raisonnant à une seule dimension spatiale, c'est-à-dire en prenant $\vec{v}_1 = v_1(x, t) \vec{e}_x$ et $P_1 = P_1(x, t).$

Q34. Sachant que l'équation locale de conservation de l'énergie s'écrit $\text{div} \vec{P}_1 + \frac{\partial e}{\partial t} = 0$, où e est l'énergie volumique du système, donner une interprétation physique des termes $\frac{1}{2} \chi_S P_1^2$ et $\frac{1}{2} \mu_0 v_1^2.$

Partie II – Transmission à travers un plasma

Nous sommes loin du temps où le « cursus publicus », le service de poste de l'Empire Romain parcourait 250 km par jour, 24 heures sur 24, ce qui était déjà une prouesse technique. Depuis, Charles Wheatstone a effectué la première transmission télégraphique entre Londres et Birmingham en 1838, et en 1964, le premier satellite de télécommunications SYCOM 3 est lancé par les Etats-Unis.

Ce satellite a permis de développer de façon significative les télécommunications longue-distance, transatlantiques notamment, puisqu'auparavant, il fallait se contenter de câbles transatlantiques (en 1956, le câble transatlantique TAT-1 peut transporter 35 communications téléphoniques), ou d'ondes radio hyperfréquence qui se réfléchissent sur l'ionosphère, tributaires de ce fait des orages magnétiques et des tempêtes solaires. En effet, il existe autour de la Terre une couche nommée ionosphère, constituée d'un plasma très peu dense.

Nous allons dans cette partie étudier la propagation des ondes dans un plasma : d'abord des ondes harmoniques, puis des ondes décrivant mieux la réalité.

G. Mise en équation pour des ondes harmoniques

On considère l'ionosphère comme un gaz ionisé contenant

- des électrons de masse $m_e = 9,1.10^{-31}$ kg et de charge $-e = -1,6.10^{-19}$ C ;
- des ions de masse m_i et de charge $+e.$

Les densités volumiques de ces deux types de particules sont identiques et sont notées $n.$ Le plasma est suffisamment dilué pour qu'on puisse considérer que les électrons et ions n'interagissent pas entre eux.

On considérera dans toute cette sous-partie des évolutions harmoniques à la pulsation $\omega.$

G1. Dans cette question, on va déterminer les relations qui permettront d'adapter les équations de Maxwell au plasma.

G1a. Montrer que la charge volumique est nulle au sein du plasma.

G1b. Lors du passage d'une onde électromagnétique dans le plasma, à quelle condition peut-on négliger l'effet du champ magnétique $\vec{B}$ devant celui du champ électrique $\vec{E}$ pour le mouvement des charges ?

À quelle condition peut-on négliger le mouvement des ions devant le mouvement des électrons ?

G1c. Montrer qu'on peut négliger les effets de la pesanteur.

On supposera qu'on peut faire par la suite les trois approximations ci-dessus : négliger le champ magnétique, négliger le mouvement des ions et négliger la pesanteur.

G1d. On considère le champ électrique complexe noté $\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 \exp[j(\omega t - \varphi_M)]$ au point M du plasma. On note $\vec{j}_e$ le vecteur densité volumique de courant électrique complexe.

En étudiant le mouvement d'un électron, établir la relation $\vec{j}_e = \gamma \vec{E}.$

Donner le nom et l'expression de γ en fonction notamment des paramètres du plasma.

G2. Écrire les équations de Maxwell adaptées au plasma.

G3. En déduire l'équation d'onde vérifiée par le champ électrique complexe pour une onde harmonique et montrer que son expression générale dans le cas d'une onde

quelconque s'écrit
$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \omega_p^2 \vec{E} \right)$$

On rappelle la formule du double rotationnel : $\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E}) = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div} \vec{E}) - \Delta \vec{E}$.

Comment s'appelle ω_p ? Donner son expression en fonction notamment des caractéristiques du plasma.

On s'intéresse désormais à des ondes planes progressives (OPP) qui se propagent vers les x croissants dans un plasma semi-infini compris entre $x = 0$ et $x \rightarrow +\infty$.

H. Propagation d'une OPPH

On s'intéresse dans cette sous-partie à des ondes planes progressives harmoniques (OPPH) de champ électrique $\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 \exp[j(\omega t - kx)]$.

H1. Établir la relation de dispersion et en déduire l'existence de deux domaines de pulsations : le domaine de transparence et le domaine réactif. Identifier chacun des deux.

H2. Dans le domaine réactif, déterminer complètement l'expression du vecteur d'onde k et du champ électrique $\vec{E}$ en notation complexe dans le plasma.
Que devient une OPPH dans le domaine réactif qui arrive sur le plasma ? Citez une application.

H3. Dans le domaine de transparence, déterminer l'expression de la vitesse de phase v_p et de la vitesse de groupe v_g de l'onde de champ électrique, après avoir donné leur définition en fonction du vecteur d'onde k et de la pulsation ω . On les exprimera en fonction de ω et c notamment.
Que devient une OPPH dans le domaine de transparence qui arrive sur le plasma ? Citez une application.

I. Application : communication entre un vaisseau et la Terre

Charge de l'électron : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Permittivité du vide : $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Susceptibilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

La communication entre Baïkonour, les pilotes, les caméras embarquées et les appareils télécommandés se font par le support d'ondes électromagnétiques qui doivent traverser l'ionosphère. À partir de 80 km d'altitude, l'atmosphère peut être modélisée par un plasma homogène et peu dense, caractérisé par une population de particules chargées globalement neutre. L'ionisation crée, comme seules charges négatives, des électrons de densité volumique n et des ions positifs de masse beaucoup plus grande.

I.1. Expliquer pourquoi le plasma se comporte comme un filtre passe-haut dont on établira la pulsation de coupure.

I.2. La communication entre le centre de tir au sol et les cosmonautes se fait par une modulation d'amplitude avec porteuse à la fréquence du signal électromagnétique, et modulation par un signal acoustique (information utile). Représenter l'allure du spectre émis. Quelle est la fréquence centrale du paquet d'onde correspondant ? Vous pourrez utiliser la figure 5 pour les informations sur la fréquence.

L'orbite basse d'un satellite étant d'environ 2000 km, estimer la durée de communication d'une information, pour $n = 10^{11} \text{ m}^{-3}$.

I.3. Application numérique : sachant que la densité d'électrons varie entre $n_M = 10^{12} \text{ m}^{-3}$ le jour et $n_M = 2 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$ la nuit, calculer les fréquences de coupure correspondantes. Vérifier que la fréquence indiquée sur la **figure 5** permet bien de communiquer. Indiquer les longueurs d'onde qui vont se réfléchir le jour et celles qui vont se réfléchir la nuit faute de pouvoir se propager. Cette fréquence vous paraît-elle un bon choix ?
Lors du freinage du vaisseau par l'atmosphère, la communication n'est plus possible avec la base. Expliquer pourquoi, sachant que sous l'effet de l'énorme échauffement, l'atmosphère se transforme en plasma plus dense avec une densité électronique de $n_p \geq 1 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$.

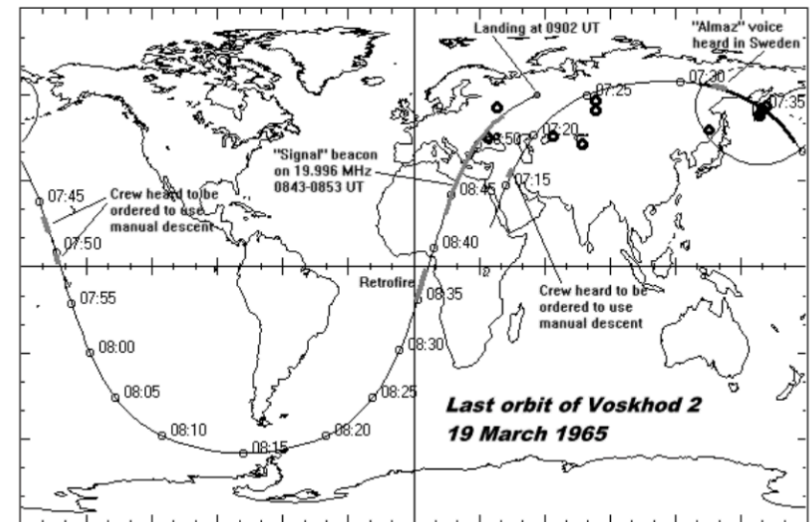


Figure extraite de Space history notes de Seven Grahn, www.sseven.grahn.pp.se

Figure 5 - Relevés des positions de la dernière orbite

Partie III – Autour d’une boisson énergisante

Pour se désaltérer, les danseurs ont la possibilité de consommer en discothèque certaines boissons énergisantes, parmi lesquelles Red Bull Energy Drink®. Cette boisson contient en particulier de la caféine, de multiples vitamines et des glucides en quantités importantes, à l’origine de nombreuses controverses lors de sa commercialisation en France en 2008.

Document 6. *L’abus de boissons énergisantes présente-t-il un risque ?*, La Presse Médicale, 2015 :
Composition d’une canette de 250 mL de Red Bull® :

- Taurine : 1000 mg
- Glucuronolactone : 600 mg
- Caféine : 80 mg
- Saccharose : 21,5 g
- Glucose : 5,25 g
- Inosite : 50 mg
- Niacine : 20 mg
- Vitamine B6 : 5 mg
- Acide pantothénique : 5 mg
- Vitamine B12 : 0,005 mg
- Adjuvants et additifs :
 - acide citrique (E 330)
 - arômes naturels et artificiels
 - colorants (caramel et riboflavine)



H3. L’empilement d’atomes étant supposé compact, déterminer une relation géométrique entre a et r .

H4. Exprimer la masse volumique ρ_{Al} de l’aluminium, notamment en fonction de sa masse molaire M_{Al} et de a . Calculer numériquement ρ_{Al} .

D’autres boissons énergisantes sont conditionnées en canettes de fer-blanc (acier recouvert d’étain), mais dont le couvercle est en aluminium, pour éviter le risque de corrosion.

H5. Donner l’ordre de grandeur de la masse volumique d’un acier ; à volume égal, quelle canette est la plus légère ?

REFROIDISSEMENT EFFICACE D’UNE CANETTE

Les canettes de Red Bull® sont en aluminium. Celles-ci pèsent 60 % de moins qu’il y a quelques années et sont recyclables à 100 %, ce qui fait économiser beaucoup d’énergie et de ressources.

H / Le métal aluminium

Le numéro atomique de l’aluminium est $Z = 13$.

H1. Déterminer la configuration électronique de l’aluminium à l’état fondamental, en citant les règles utilisées.

L’aluminium métallique cristallise selon un réseau cubique à faces centrées, de paramètre de maille a . On donne le rayon métallique de l’aluminium : $r = 143$ pm.

H2. Représenter la maille conventionnelle du réseau. En déduire la population de la maille, ainsi que la coordonnée d’un atome d’aluminium dans la structure.

DOSAGE DU GLUCOSE DANS LE *RED BULL*®

Dans cette partie, on s'intéresse à un protocole permettant de déterminer la quantité de glucose dans une canette de *Red Bull*®. Cette méthode, dite indirecte, consiste à faire réagir le glucose avec une solution aqueuse de diiode en excès (de concentration connue), puis à doser le diiode restant avec une solution de thiosulfate de sodium.

J / L'iode en solution aqueuse

On analyse dans un premier temps le diagramme potentiel-pH de l'élément iode représenté sur la figure 12. On se limite dans cette étude aux espèces suivantes : diiode $I_{2(aq)}$, ions iodate $IO_{3(aq)}^-$ et ions iodure $I_{(aq)}^-$. La concentration de chacune des espèces iodées est égale à $c_I = 0,10 \text{ mol.L}^{-1}$ sur les frontières.

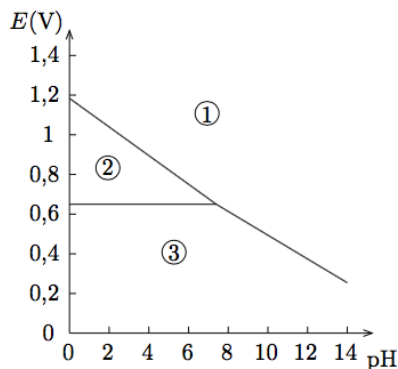


FIGURE 12 – Diagramme potentiel-pH de l'iode.

En notant T la température, on pourra utiliser l'approximation suivante dans les calculs :

$$\frac{RT}{F} \ln x \simeq 0,06 \log x \quad (\text{en V})$$

- J1.** Calculer le nombre d'oxydation de l'élément iode dans les trois espèces citées. En déduire l'espèce prédominante dans chacun des domaines (①, ②, ③) du diagramme.
- J2.** En utilisant la relation de Nernst et la convention de tracé du diagramme, établir l'équation $E_{2-3} = f(\text{pH})$ de la frontière séparant les domaines ② et ③.
- J3.** De la même manière, établir l'équation $E_{1-2} = f(\text{pH})$ de la frontière séparant les domaines ① et ②.
- J4.** Déterminer par le calcul les coordonnées du point d'intersection des frontières, et vérifier les valeurs obtenues à l'aide du diagramme.

K / Principe du dosage

On détaille ci-dessous le protocole expérimental du dosage :

- Étape 1 : on introduit dans un erlenmeyer un volume $V_1 = 20 \text{ mL}$ d'une solution de diiode de concentration $c_1 = 0,05 \text{ mol.L}^{-1}$.
- Étape 2 : on ajoute dans l'erlenmeyer 5 mL d'une solution d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}_{(aq)}^+ + \text{HO}_{(aq)}^-$) à $2,5 \text{ mol.L}^{-1}$. La solution se décolore.
- Étape 3 : on ajoute au mélange précédent un volume $V_0 = 2 \text{ mL}$ de *Red Bull*® de concentration en glucose c_0 inconnue. On bouche l'erlenmeyer, on l'agite et on laisse agir 30 minutes à l'obscurité.
- Étape 4 : après cette attente, on ajoute dans l'erlenmeyer 10 mL d'acide chlorhydrique ($\text{H}_{(aq)}^+ + \text{Cl}_{(aq)}^-$) à 2 mol.L^{-1} . La coloration brune réapparaît.
- Étape 5 : on remplit une burette d'une solution de thiosulfate de sodium ($2 \text{ Na}_{(aq)}^+ + \text{S}_2\text{O}_{3(aq)}^{2-}$) de concentration $c_2 = 0,10 \text{ mol.L}^{-1}$ et on titre le contenu de l'erlenmeyer en présence d'empois d'amidon. On observe une décoloration complète de la solution pour un volume versé de thiosulfate de sodium noté V_2 .

On indique que $I_{2(aq)}$ a une coloration brune en solution ; les ions $IO_{3(aq)}^-$ et $I_{(aq)}^-$ sont incolores en solution.

- K1.** À la lumière du diagramme E -pH de l'iode (voir figure 12), quelle réaction s'est produite lors de l'étape 2 ? Écrire l'équation de cette réaction.
- K2.** Comment se nomme ce type de réaction ? En donner une définition précise.
- K3.** Lors de l'étape 3, le glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_{6(aq)}$ est oxydé en ions gluconate $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7^-(aq)$ par les ions iodate $IO_{3(aq)}^-$ en milieu basique. Écrire les demi-équations d'oxydo-réduction des couples concernés, puis la réaction bilan qui se produit pendant cette étape.
- K4.** À la lumière du diagramme E -pH, quelle réaction s'est produite au cours de l'étape 4 ? Écrire l'équation de cette réaction, puis nommer ce type de réaction.
- K5.** Lors du dosage (étape 5), le diiode $I_{2(aq)}$ restant est réduit en ions iodure $I_{(aq)}^-$ par les ions thiosulfate $\text{S}_2\text{O}_{3(aq)}^{2-}$; il se forme au cours de cette réaction des ions tétrathionate $\text{S}_4\text{O}_{6(aq)}^{2-}$. Écrire l'équation bilan du titrage.
- K6.** En exploitant les potentiels standard des couples en présence, déterminer, littéralement puis numériquement, la constante d'équilibre K^0 de la réaction de titrage. Cette dernière peut-elle être considérée comme totale ?

L / Exploitation des résultats expérimentaux

Après avoir répété ce protocole trois fois, l'expérimentateur mesure un volume moyen $V_2 = 15,4$ mL. On cherche à en déduire la concentration en glucose c_0 dans le volume V_0 de *Red Bull*®.

- L1.** Exprimer littéralement, en fonction de c_1 et V_1 , la quantité de diiode n_1 initiale (étape 1).
- L2.** Exprimer littéralement, en fonction de c_2 et V_2 , la quantité de diiode n_2 présente dans l'erenmeyer avant le titrage (étape 5).
- L3.** Exprimer littéralement, en fonction de n_1 et n_2 , la quantité d'ions iodate n_3 ayant réagi avec le glucose (étape 3). En supposant cette réaction totale, et en considérant que le glucose est le réactif limitant de cette réaction, en déduire la quantité de glucose n_0 ayant réagi.
- L4.** En déduire enfin la concentration c_0 en fonction de c_1 , V_1 , c_2 , V_2 et V_0 . Calculer numériquement c_0 .
- L5.** Déduire de la question précédente la masse m de glucose présente dans une canette de *Red Bull*® de volume $V = 250$ mL. Confronter cette valeur expérimentale à celle donnée dans le document 6.

DONNÉES

- Intensité du champ de pesanteur : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
- Permittivité diélectrique du vide : $\varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.
- Perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$.
- Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- Masse électronique : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.
- Nombre d'Avogadro : $\mathcal{N}_A = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
- Constante de Faraday : $\mathcal{F} = \mathcal{N}_A e = 9,6 \cdot 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$.
- Constante des gaz parfaits : $R = 8,3 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.
- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_\ell = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- Capacité thermique massique de la glace (eau) : $c_g = 2,1 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- Chaleur latente de fusion de la glace (eau) : $\ell_{\text{fus}} = 3,3 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$.
- Potentiels standard à pH=0 :

Couple	$\text{I}_{2(\text{aq})}/\text{I}_{(\text{aq})}^-$	$\text{IO}_{3(\text{aq})}^-/\text{I}_{2(\text{aq})}$	$\text{S}_4\text{O}_{6(\text{aq})}^{2-}/\text{S}_2\text{O}_{3(\text{aq})}^{2-}$
$E^0(\text{V})$	0,62	1,19	0,09

- Masses molaires :

Atome	H	C	O	Na	Al	Cl
$M(\text{g.mol}^{-1})$	1,0	12,0	16,0	23,0	27,0	35,5

- Pour tout champ vectoriel $\vec{A}$,

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div} \vec{A}) - \vec{\Delta} \vec{A}$$