TDEM3 – Dipôles électrostatique et magnétostatique

0 Exercices classiques vus en cours :

A.2.a : Potentiel électrostatique créé par un dipôle
A.2.b : Champ électrostatique créé par un dipôle
A.3.a : Résultante, moment et énergie potentielle des actions subies par un dipôle placé dans un champ extérieur uniforme
B.1.b : ODG de moment magnétique à l'échelle microscopique : magnéton de Bohr

Capacités exigibles	Ch EM3	Ex 1	Ex 2,3	Ex 4	Ex 5	Ex 6	Ex 7	Ex 8
Notion de dipôle électrostatique, moment dipolaire. Exprimer le moment dipolaire d'un doublet de charges. Évaluer des ordres de grandeur dans le domaine microscopique.	●	●	●					
Champ et potentiel créés par un dipôle électrostatique. Expliciter l'approximation dipolaire. Représenter l'allure des lignes de champ et des surfaces équipotentielles d'un dipôle électrostatique. Établir et exploiter les expressions du champ et du potentiel créés par un doublet de charges dans l'approximation dipolaire.	●		●					
Dipôle électrostatique placé dans un champ électrostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction. Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur. Établir et exploiter les expressions des actions mécaniques subies par un doublet de charges dans un champ électrostatique extérieur uniforme. Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur non uniforme. Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.	●	●	●					
Notion de dipôle magnétique. Moment magnétique. Exprimer le moment magnétique d'une boucle de courant plane. Évaluer des ordres de grandeur dans les domaines macroscopique et microscopique.	●			●	●		●	●
Champ créé par un dipôle magnétique. Expliciter l'approximation dipolaire. Représenter l'allure des lignes de champ d'un dipôle magnétique. Exploiter l'expression fournie du champ créé par un dipôle magnétique.	●			●				●
Dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction. Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle passif placé dans un champ B extérieur. Exploiter les expressions fournies des actions mécaniques subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur uniforme. Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur non uniforme. Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.	●				●	●		●

<u>Données</u> pour l'ensemble des exercices :

$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} H.m^{-1}$ et $\varepsilon_0 \approx 8{,}84.10^{-12} F.m^{-1}$

En coordonnées cylindriques : $\overrightarrow{grad} f = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,z}.\vec{e}_r + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,z}.\vec{e}_\theta + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)_{r,\theta}.\vec{e}_z$

En coordonnées sphériques : $\overrightarrow{grad} f = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,\varphi}.\vec{e}_r + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,\varphi}.\vec{e}_\theta + \frac{1}{r sin\theta}\left(\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right)_{r,\theta}.\vec{e}_\varphi$

Résultante des actions subies par un dipôle dans un champ électrostatique extérieur $\vec{E}_{ext}(M)$:

$$\vec{F} = \overrightarrow{grad}(\vec{p}.\vec{E}_{ext})$$

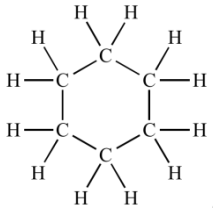
Expression du champ électrique / magnétique créé par un dipôle électrique / magnétique placé en O :

$$\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 OM^5}\left(3(\vec{p}.\overrightarrow{OM})\overrightarrow{OM} - OM^2.\vec{p}\right) \qquad ou \qquad \vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi OM^5}\left(3(\overrightarrow{\mathfrak{M}}.\overrightarrow{OM})\overrightarrow{OM} - OM^2.\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right)$$

1 Mise en évidence du caractère polaire d'un solvant

Quand on approche une tige chargée d'un filet d'eau qui coule, celui-ci est dévié vers la tige, alors qu'avec un filet de cyclohexane, il n'y a pas de déviation.

➲ Expliquer ce phénomène.



Formule développée du cyclohexane

2 Interaction ion-dipôle

Une molécule d'eau est assimilable à un dipôle électrique de moment dipolaire de norme p.

On considère une molécule d'eau placée en M à proximité d'un ion assimilé à un point portant une charge +e, placé en O.

1) Montrer que le dipôle s'oriente radialement par rapport à l'ion.

2) Dans cette configuration, déterminer l'expression de la force exercée par l'ion sur la molécule d'eau.

3) Dans cette configuration, déterminer l'expression de la force exercée par la molécule d'eau sur l'ion. Commenter.

3 Interaction de Van der Waals de type Keesom : dipôle permanent - dipôle permanent

Une molécule d'eau est assimilable à un dipôle électrique de moment dipolaire de norme p.

Considérons deux dipôles représentatifs de deux molécules d'eau.

a) Deux dipôles identiques sont placés de façon coaxiale à une distance x l'un de l'autre sur un axe (O,x) (figure 1). Ils sont astreints à se déplacer en translation sur cet axe. Donner l'expression de la force exercée par le dipôle 1, supposé fixe, sur le dipôle 2.

b) Deux dipôles identiques sont placés avec des moments dipolaires anticolinéaires, à une distance x l'un de l'autre sur un axe (O,x) (figure 2). Ils sont astreints à se déplacer en translation sur cet axe. Donner l'expression de la force exercée par le dipôle 1, supposé fixe, sur le dipôle 2.

c) Quelle est la force d'interaction entre deux dipôles dont les centres sont placés en $O_1(0,0,0)$ et en $O_2(x,0,0)$, de moments dipolaires respectifs $\vec{P}_1 = P\vec{u}_y$ et $\vec{P}_2 = P\vec{u}_z$?

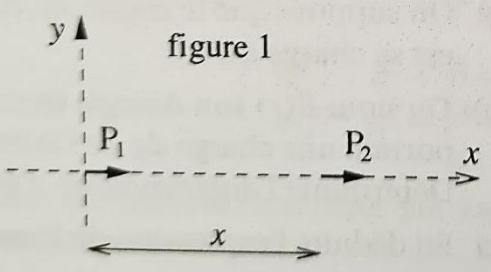


figure 1

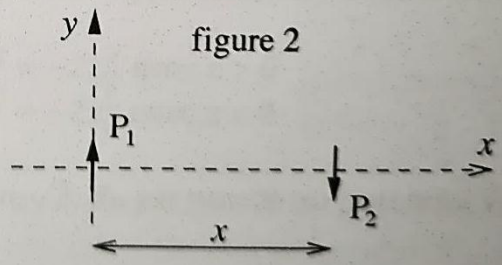


figure 2

4 Modèle dipolaire du géomagnétisme

La Terre est assimilée à une sphère de centre O et de rayon R = 6370 km. En un lieu M de latitude λ, on confond la direction OM avec la verticale. A Paris, situé à la latitude λ = 48,9°, des mesures effectuées sur le champ magnétique terrestre donnent :

- l'intensité de la composante horizontale $\overrightarrow{B_H}$ du champ est $B_H = 2{,}05.10^{-5}$ T.
- l'inclinaison de $\vec{B}$ par rapport au plan horizontal est α = 64° (vers le bas).

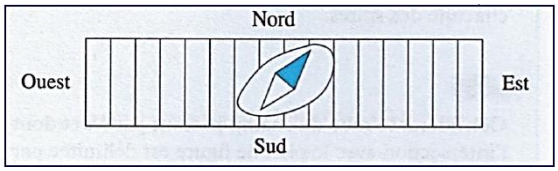
On tente de représenter le champ magnétique terrestre par celui d'un dipôle magnétique qui serait placé en O et dirigé parallèlement à l'axe des pôles.

1. Préciser le sens du moment dipolaire magnétique.
2. Calculer l'inclinaison α prévue par ce modèle. Comparer à la valeur expérimentale de α.
3. Déterminer un ordre de grandeur du moment magnétique terrestre.

Pour mesurer la composante horizontale B_H, on utilise le dispositif expérimental suivant :

On dispose d'un solénoïde comportant $n = \frac{N}{L} = 100 spires\ par\ m$, parcouru par un courant d'intensité I=100mA. On place ce solénoïde sur une table horizontale et on oriente son axe dans la direction Est-Ouest. On introduit, à l'intérieur, une aiguille aimantée mobile en rotation autour d'un axe vertical. Cette aiguille s'oriente parallèlement à la composante horizontale du champ magnétique existant à l'endroit où elle se trouve.

4. Sachant que l'aiguille aimantée fait un angle de 58,5° avec l'axe du solénoïde, retrouver la valeur expérimentale de la composante horizontale B_H du champ magnétique terrestre.



5 Principe de l'ampèremètre à cadre mobile

Une spire forme un cadre rectangulaire $(EFGH)$, de centre O, et est en rotation autour de l'axe (Oz) passant par I milieu de $[FG]$ et J milieu de $[HE]$.

Sa rotation est mesurée par l'angle θ entre $\overrightarrow{u_x}$ et le vecteur $\overrightarrow{u_r}$ normal au plan de la spire.

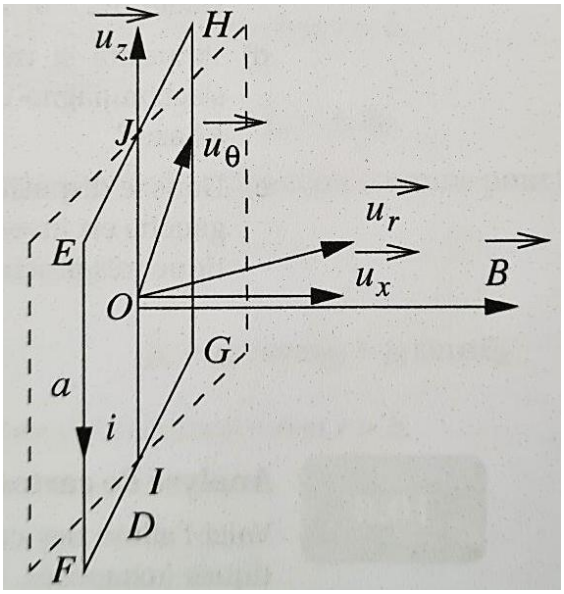
La spire est parcourue par un courant d'intensité i.

Elle est plongée dans un champ magnétique $\vec{B} = B\overrightarrow{u_x}$ uniforme et constant.

Par ailleurs, le cadre est soumis à l'action d'un couple de rappel de torsion élastique dont le moment par rapport à l'axe (Oz) est $\Gamma_r = -C(\theta_0 - \theta)$.

On mesure l'angle θ à l'équilibre mécanique, que l'on note θ_e.

➲ Déterminer l'expression de i.



On note $L = EF = GH$, $D = FG = HE$.

6 Oscillations harmoniques d'une boussole

Une boussole est assimilée à une tige orientée dans le sens sud, nord (le vecteur unitaire dans cette direction et ce sens est noté $\vec{u}$) en rotation autour d'un axe Δ vertical. Son moment d'inertie est noté J_Δ, son moment dipolaire $\vec{m} = m\vec{u}$. On place la boussole dans un champ magnétique extérieur horizontal uniforme $\vec{B} = B\vec{u}_x$. On pose $\theta = (\vec{u}_x, \vec{u})$. Établir l'équation différentielle vérifiée par $\theta(t)$. En déduire la période des petites oscillations autour de la position d'équilibre stable.

7 ODG d'un moment magnétique…

1) … à l'échelle microscopique – Magnéton de Bohr

Rappeler l'ordre de grandeur du magnéton de Bohr μ_B qui donne l'ordre de grandeur du moment magnétique d'un atome.

2) … à l'échelle macroscopique

Pour un aimant, on peut considérer que son moment magnétique est dû à la présence de moments magnétiques atomiques, tous de l'ordre de grandeur du magnéton de Bohr. Le moment magnétique maximal de l'aimant sera obtenu quand tous les petits moments atomiques seront parallèles.

On note n la densité volumique d'atomes. Pour un matériau donné, on introduit l'aimantation A qui correspond à un moment magnétique par unité de volume.

a) On considère que les atomes constitutifs de l'aimant sont disposés régulièrement à une distance a les uns des autres. Donner un ODG pour a puis pour n. En déduire, la valeur maximale de l'aimantation A. Comparer aux valeurs tabulées ci-dessous.

b) Considérons un aimant en forme de cylindre plat d'épaisseur e = 1,0 mm et de rayon r = 5,0 mm.

> Calculer l'ordre de grandeur du moment dipolaire d'un tel aimant en NdFeB (Néodyme-Fer-Bore).
>
> Combien de spires de rayon r parcourues par une intensité $0,1$ A faudrait-il bobiner pour obtenir le même moment dipolaire ?

Données : Valeurs d'aimantation

AlNiCo 200	$600\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
Ferrite 1000	$1700\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
NdFeB	$2000\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$ à $4000\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
SlCo5	$2000\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$ à $3000\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
SmCo17	$3500\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$ à $5000\ \text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$

8 Principe de fonctionnement d'un alternateur (d'après CCS TSI 2012)

La rotation de la turbine étudiée dans la partie précédente entraine un alternateur dont le principe simplifié de fonctionnement est étudié dans cette partie.

On donne l'expression en coordonnées polaires, en un point M quelconque, du champ créé par un dipôle magnétique $\vec{M}$ situé en O :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3}\left(2\cos\theta\,\vec{u}_r + \sin\theta\,\vec{u}_\theta\right)$$

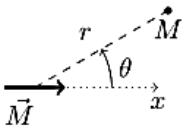


Figure 5

On considère un aimant permanent de dipôle magnétique $\vec{M}$ situé en O, animé d'un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω. Le dipôle fait à chaque instant l'angle $\alpha = \omega t$ avec l'axe des x. En un point A de l'axe (Ox) et tel que $OA = d$, est placée une bobine plate d'axe (Ox), de rayon a et comportant N spires. On négligera l'épaisseur de la bobine devant d. On supposera également que le rayon a est suffisamment faible pour pouvoir considérer que le champ créé par le moment dipolaire à travers la bobine est uniforme (voir **figure 6**).

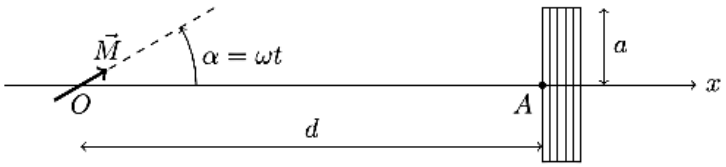


Figure 6

La bobine a une inductance propre L et une résistance négligeable devant le reste du réseau qu'on assimilera à une résistance « utilisateur » R_u. On négligera les frottements mécaniques au niveau de l'axe de rotation du rotor.

IV.A – Aspect électrique

IV.A.1) Exprimer le champ magnétique créé par le moment dipolaire au travers de la bobine en fonction des données de l'énoncé.

IV.A.2) En déduire l'expression du flux magnétique créé par l'aimant à travers la bobine.

IV.A.3) Établir l'équation différentielle vérifiée par $i(t)$ dans le circuit utilisateur.

IV.A.4) Résoudre cette équation en supposant le régime permanent établi (on pourra utiliser la notation complexe) et donner l'expression de $i(t)$ sous la forme $i(t) = i_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

IV.A.5) Exprimer alors la puissance moyenne dissipée par effet Joule P_J dans la résistance utilisateur.

IV.B – Aspect mécanique

IV.B.1) Donner, en fonction de $i(t)$, l'expression du champ magnétique créé par la bobine en O (on rappelle qu'une spire circulaire parcourue par un courant I, vue sous un angle β depuis un point de son axe, crée en ce point un champ magnétique $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2a}\sin^3\beta\,\vec{e}_x$). Simplifier cette expression sachant que $d \gg a$.

IV.B.2) Calculer le moment du couple Γ que doit fournir la turbine pour maintenir l'aimant en rotation à une vitesse constante et donner sa valeur moyenne en fonction de μ_0, N, M, a, d, i_0 et φ.

IV.B.3) En déduire la puissance moyenne P_m ainsi consommée et la comparer à P_J. Commenter.

Révisions 1e année :
Relations entre la structure des entités chimiques et les propriétés physiques macroscopiques

A. Rappels des méthodes

→ Edifices polyatomiques

 ***Etablir un schéma de Lewis pour une entité***	① Calculer N_v le **nombre total d'électrons de valence** : $$N_v = \sum_{atome\ i} n_{valence,i} - charge\ de\ l'édifice$$ Avec $n_{valence,i}$ le nombre d'électrons de valence de l'atome i. ② Calculer N_d le **nombre de doublets** : si N_v pair : $N_d = N_v/2$ doublets liants ou non liants ; si N_v impair : $N_d = (N_v - 1)/2$ doublets liants ou non liants et 1 électron célibataire. ③ Si l'enchaînement des atomes au sein de l'édifice n'est pas donné, les disposer ainsi : l'atome le moins électronégatif (excepté H) est souvent l'atome central, les H sont forcément périphériques puisqu'ils ne peuvent former qu'une liaison. Construire alors le **squelette σ « sigma »** i.e. répartir les doublets liants de façon à réaliser des liaisons simples entre les atomes. ④ S'il reste des électrons de valence, placer des doublets de façon à respecter la **règle de l'octet** (ou du duet) pour les atomes périphériques (les plus électronégatifs en général). ⑤ Placer les doublets non utilisés ou un électron célibataire sur l'atome central. ⑥ Placer les éventuelles **charges formelles** sur les différents atomes. ⑦ Retoucher éventuellement la structure pour écrire la **forme la plus stable** i.e. celle qui respecte la règle de l'octet, qui possède le moins de charges formelles et telle que le signe des charges formelles respectent les électronégativités relatives des atomes.

 ***Une molécule est-elle polaire ou apolaire ?***	① Etablir le **schéma de Lewis** le plus probable de la molécule. ② En déduire le **type VSEPR** (AX_nE_p). ③ En déduire la **géométrie** de la molécule et **représenter la molécule en 3D** (représentation de Cram). ④ Pour **chaque liaison** covalente, **représenter** le **moment dipolaire** (sens déduit de la **différence d'électronégativité** des deux atomes liés). ⑤ En tenant compte de la géométrie, représenter $\vec{p} = \sum_i \vec{p_i}$. ⑥ Si $\vec{p} = \vec{0}$ la molécule est **apolaire** et **sinon** la molécule est **polaire**.

Données pour l'ensemble des exercices - Théorie VSEPR :

AX_2E_0 Linéaire	AX_3E_0 Triangulaire	AX_4E_0 Tétraédrique	AX_5E_0 Bipyramidal à base triangulaire	AX_6E_0 Octaédrique
	AX_2E_1 Coudé	AX_3E_1 Pyramidal à base triangulaire		
		AX_2E_2 Coudé		

→ Forces intermoléculaires et solvants

Exercices classiques :

① Interpréter l'évolution des **températures de changement d'état**.

② Interpréter des **différences de solubilité** espèces (A,A') dans les solvants (S,S') ou la (non) **miscibilité** de 2 solvants (S,S').

Raisonnement à tenir :

♦ Identification de la **nature des interactions intermoléculaires** :

・Entités **(a)polaires** ?

→ interaction de **Van der Waals** de type … ?

Molécules polaire-polaire	Molécules apolaire-apolaire
Keesom + Debye + London	London

・Atomes constitutifs susceptibles de former des **liaisons H** ?

Exercice classique ①

♦ Comparaison de **l'intensité des interactions** d'une espèce à l'autre :

・

Interaction de Van der Waals de type :	Keesom	Debye	London
Intensité augmente avec	**moment dipolaire**	**moment dipolaire & polarisabilité**	**polarisabilité**

・**Liaison H plus intense que liaison de Van der Waals**.

♦ Conclusion

Les **températures de changement d'état sont d'autant plus élevées que les interactions intermoléculaires sont intenses**.

Exercice classique ②

♦ **Comparaison de la nature des interactions d'une espèce à l'autre** :

Interactions [A/A] et [S/S] de même nature ?

Ou Interactions [S/S] et [S'/S'] de même nature ?

♦ Conclusions

Si les interactions [A/A] et [S/S] sont de même nature alors la solubilité de A dans S est élevée : **les semblables dissolvent les semblables**.

Ou Si les interactions [S/S] et [S'/S'] sont de même nature alors les solvants S et S' sont miscibles : **deux solvants semblables sont miscibles**.

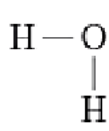
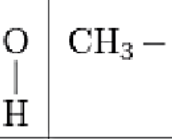
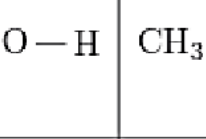
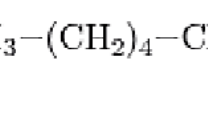
B. Exercices

9 Caractère polaire – Solubilité - Caractéristiques et miscibilité des solvants

1. Parmi les molécules suivantes, déterminer celles qui sont polaires : H_2O, CO_2, SO_2, NH_3, BF_3.

2. Justifier alors l'observation expérimentale : le dioxyde de soufre SO_2 est plus soluble que le dioxyde de carbone CO_2 dans l'eau.

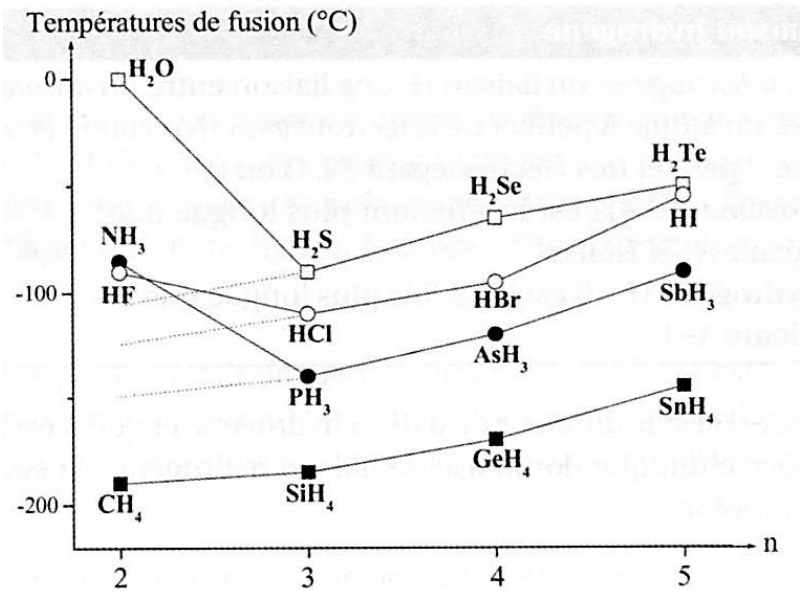
On s'intéresse aux solvants suivants, dont on donne les moments dipolaires en debye :

Eau	Méthanol	Hexane	Acétonitrile
			
1,8 D	1,65 D	0 D	3,9 D

3. Qualifier ces solvants : polaires, apolaires, protiques, aprotiques.

4. Tous ces solvants sont miscibles à l'exception de l'hexane qui n'est miscible avec aucun des autres. Expliquer.

10 Evolution des températures de fusion



1) Commenter l'évolution globale des températures de fusion et apporter une explication.

2) Repérer les anomalies et apporter une explication.

11 Molécule d'eau (d'après CCINP MP 2020)

Données

- La constante du gaz parfait : $R = 8{,}31\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.
- L'unité de moment dipolaire appelé le Debye (D) : $3{,}30\cdot10^{-30}\ \text{C}\cdot\text{m}$.
- La charge élémentaire : $e = 1{,}6\cdot10^{-19}\ \text{C}$.
- Les masses atomiques molaires en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ valent 1 pour l'hydrogène et 16 pour l'oxygène.
- Dans l'échelle de Pauling, l'électronégativité de l'hydrogène H vaut 2,2 et celle de l'oxygène O vaut 3,44.

Q21. a) Donner les structures électroniques de l'hydrogène H (Z = 1) et de l'oxygène O (Z = 8).
b) Donner la formule de Lewis de la molécule d'eau.
c) Pourquoi la liaison OH est-elle polarisée ?

Q22. L'étude expérimentale permet de constater que la molécule d'eau est plane, coudée, (représentation **figure 4**) faisant un angle de 104,45° avec une distance entre oxygène et hydrogène qui vaut 95,84 pm.
a) Comment interpréter le fait que l'angle ne soit pas celui qui existe dans un tétraèdre régulier (109,5°) autour de son centre vers deux sommets ?
b) La molécule possède un moment dipolaire égal à 1,8 Debye. Préciser sa direction et le sens de ce moment à l'aide d'un schéma.
c) Déterminer la charge partielle portée par l'hydrogène.
d) Quel type de solvant est l'eau ? Citer des conséquences de cette propriété.

Q23. a) Indiquer ce qu'on appelle les forces de Van der Waals.
b) De quelle nature sont les interactions dites liaisons hydrogène ?
c) Pouvez-vous donner un ordre de grandeur de l'énergie de la liaison hydrogène et la comparer aux autres liaisons chimiques que vous connaissez ?

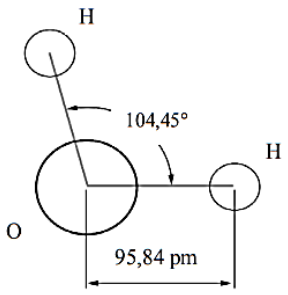


Figure 4 - Molécule d'eau

Tableau périodique des éléments

scienceamusante.net
wiki+forum
chimie physique biologie

Numéro atomique — 80 Hg — Symbole de l'élément (en gris : aucun isotope stable)
Nom de l'élément
Masse atomique, basée sur ^{12}C
[ ] : nombre de masse de l'isotope le plus stable *
Énergie de première ionisation (eV)
Électronégativité (échelle de Pauling)
Configuration électronique (en rouge : exception à la règle de Klechkowski)
Principaux nombres d'oxydation (le plus fréquent en gras)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogène 1,008 13,59 2,1 $1s^1$ −1 +1																	2 He Hélium 4,00 24,58 — $1s^2$ 0
3 Li Lithium 6,94 5,391 1,0 $1s^2 2s^1$ +1	4 Be Béryllium 9,01 9,322 1,5 $1s^2 2s^2$ +2											5 B Bore 10,81 8,298 2,0 $1s^2 2s^2 2p^1$ +3	6 C Carbone 12,01 11,26 2,5 $1s^2 2s^2 2p^2$ −4 +2 +4	7 N Azote 14,01 14,53 3,0 $1s^2 2s^2 2p^3$ −3 +1 +2 +3 +4 +5	8 O Oxygène 16,00 13,61 3,5 $1s^2 2s^2 2p^4$ −2 −1 +2	9 F Fluor 19,00 17,42 4,0 $1s^2 2s^2 2p^5$ −1	10 Ne Néon 20,18 21,56 — $1s^2 2s^2 2p^6$ 0
11 Na Sodium 22,99 5,139 0,9 [Ne] $3s^1$ +1	12 Mg Magnésium 24,31 7,646 1,2 [Ne] $3s^2$ +2											13 Al Aluminium 26,98 5,985 1,5 [Ne] $3s^2 3p^1$ +3	14 Si Silicium 28,09 8,151 1,8 [Ne] $3s^2 3p^2$ −4 +4	15 P Phosphore 30,97 10,48 2,1 [Ne] $3s^2 3p^3$ −3 +3 +4 +5	16 S Soufre 32,07 10,36 2,5 [Ne] $3s^2 3p^4$ −2 +2 +4 +6	17 Cl Chlore 35,45 12,96 3,0 [Ne] $3s^2 3p^5$ −1 +1 +3 +5 +7	18 Ar Argon 39,95 15,75 — [Ne] $3s^2 3p^6$ 0
19 K Potassium 39,10 4,340 0,8 [Ar] $4s^1$ +1	20 Ca Calcium 40,08 6,113 1,0 [Ar] $4s^2$ +2	21 Sc Scandium 44,96 6,561 1,3 [Ar] $4s^2 3d^1$ +3	22 Ti Titane 47,87 6,828 1,5 [Ar] $4s^2 3d^2$ +2 +3 +4	23 V Vanadium 50,94 6,746 1,6 [Ar] $4s^2 3d^3$ +2 +3 +4 +5	24 Cr Chrome 52,00 6,766 1,6 [Ar] $4s^1 3d^5$ +2 +3 +6	25 Mn Manganèse 54,94 7,434 1,5 [Ar] $4s^2 3d^5$ +2 +3 +4 +6 +7	26 Fe Fer 55,85 7,902 1,8 [Ar] $4s^2 3d^6$ +2 +3	27 Co Cobalt 58,93 7,881 1,8 [Ar] $4s^2 3d^7$ +2 +3	28 Ni Nickel 58,69 7,639 1,8 [Ar] $4s^2 3d^8$ +2 +3	29 Cu Cuivre 63,55 7,726 1,9 [Ar] $4s^1 3d^{10}$ +1 +2	30 Zn Zinc 65,38 9,394 1,6 [Ar] $4s^2 3d^{10}$ +2	31 Ga Gallium 69,72 5,999 1,6 [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^1$ +1 +2 +3	32 Ge Germanium 72,64 7,899 1,8 [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^2$ +2 +4	33 As Arsenic 74,92 9,788 2,0 [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^3$ −3 +3 +5	34 Se Sélénium 78,96 9,752 2,4 [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^4$ −2 +2 +4 +6	35 Br Brome 79,90 11,81 2,8 [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^5$ −1 +1 +5 +7	36 Kr Krypton 83,80 13,99 3,0 [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^6$ 0
37 Rb Rubidium 85,47 4,177 0,8 [Kr] $5s^1$ +1	38 Sr Strontium 87,62 5,694 1,0 [Kr] $5s^2$ +2	39 Y Yttrium 88,91 6,217 1,2 [Kr] $5s^2 4d^1$ +2 +3	40 Zr Zirconium 91,22 6,633 1,4 [Kr] $5s^2 4d^2$ +4	41 Nb Niobium 92,91 6,758 1,6 [Kr] $5s^1 4d^4$ +3 +5	42 Mo Molybdène 95,96 7,092 1,8 [Kr] $5s^1 4d^5$ +2 +3 +4 +5 +6	43 Tc Technétium [98] 7,28 1,9 [Kr] $5s^2 4d^5$ +7	44 Ru Ruthénium 101,07 7,360 2,2 [Kr] $5s^1 4d^7$ +2 +3 +4 +6 +8	45 Rh Rhodium 102,91 7,456 2,2 [Kr] $5s^1 4d^8$ +2 +3 +4	46 Pd Palladium 106,42 8,336 2,2 [Kr] $5s^0 4d^{10}$ +2 +4	47 Ag Argent 107,87 7,576 1,9 [Kr] $5s^1 4d^{10}$ +1	48 Cd Cadmium 112,41 8,993 1,7 [Kr] $5s^2 4d^{10}$ +2	49 In Indium 114,82 5,786 1,7 [Kr] $5s^2 4d^{10} 5p^1$ +1 +2 +3	50 Sn Etain 118,71 7,343 1,8 [Kr] $5s^2 4d^{10} 5p^2$ +2 +4	51 Sb Antimoine 121,76 8,608 1,9 [Kr] $5s^2 4d^{10} 5p^3$ −3 +3 +5	52 Te Tellure 127,60 9,009 2,1 [Kr] $5s^2 4d^{10} 5p^4$ −2 +2 +4 +6	53 I Iode 126,90 10,45 2,5 [Kr] $5s^2 4d^{10} 5p^5$ −1 +1 +3 +5 +7	54 Xe Xénon 131,29 12,12 2,6 [Kr] $5s^2 4d^{10} 5p^6$ 0
55 Cs Césium 132,91 3,893 0,7 [Xe] $6s^1$ +1	56 Ba Baryum 137,33 5,211 0,9 [Xe] $6s^2$ +2	57 à 71	72 Hf Hafnium 178,49 6,825 1,3 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^2$ +4	73 Ta Tantale 180,95 7,549 1,5 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^3$ +5	74 W Tungstène 183,84 7,864 1,7 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^4$ +2 +3 +4 +5 +6	75 Re Rhénium 186,21 7,833 1,9 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^5$ +2 +3 +4 +6 +7	76 Os Osmium 190,23 8,438 2,2 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^6$ +2 +3 +4 +6 +8	77 Ir Iridium 192,22 8,967 2,2 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^7$ +2 +3 +4 +6	78 Pt Platine 195,08 8,958 2,2 [Xe] $6s^1 4f^{14} 5d^9$ +2 +4	79 Au Or 196,97 9,225 2,4 [Xe] $6s^1 4f^{14} 5d^{10}$ +1 +3	80 Hg Mercure 200,59 10,43 1,9 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10}$ +1 +2	81 Tl Thallium 204,38 6,108 1,8 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^1$ +1 +3	82 Pb Plomb 207,2 7,416 1,9 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^2$ +2 +4	83 Bi Bismuth 208,98 7,285 1,9 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^3$ +3 +5	84 Po Polonium [209] 8,416 2,0 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^4$ +2 +4	85 At Astate [210] 9,537 2,2 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^5$ −1 +1 +3 +5 +7	86 Rn Radon [222] 10,74 — [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$ 0
87 Fr Francium [223] 4,072 0,7 [Rn] $7s^1$ +1	88 Ra Radium [226] 5,278 0,9 [Rn] $7s^2$ +2	89 à 103	104 Rf Rutherfordium [267] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^2$ +4	105 Db Dubnium [268] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^3$ +5	106 Sg Seaborgium [271] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^4$ +6	107 Bh Bohrium [272] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^5$ +7	108 Hs Hassium [277] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^6$ —	109 Mt Meitnerium [276] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^7$ —	110 Ds Darmstadtium [281] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^8$ —	111 Rg Roentgenium [280] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^9$ —	112 Uub Ununbium [285] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10}$ —	113 Uut Ununtrium [284] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^1$ —	114 Uuq Ununquadium [289] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^2$ —	115 Uup Ununpentium [288] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^3$ —	116 Uuh Ununhexium [293] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^4$ —	117 Uus Ununseptium *Non découvert* — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^5$ —	118 Uuo Ununoctium [294] — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^6$ 0

		57 La Lanthane 138,91 5,577 1,1 [Xe] $6s^2 5d^1$ +3	58 Ce Cérium 140,12 5,538 1,1 [Xe] $6s^2 4f^1 5d^1$ +3 +4	59 Pr Praséodyme 140,91 5,464 1,1 [Xe] $6s^2 4f^3$ +3 +4	60 Nd Néodyme 144,24 5,525 1,1 [Xe] $6s^2 4f^4$ +3	61 Pm Prométhéum [145] 5,58 1,2 [Xe] $6s^2 4f^5$ +3	62 Sm Samarium 150,36 5,643 1,2 [Xe] $6s^2 4f^6$ +2 +3	63 Eu Europium 151,96 5,670 1,1 [Xe] $6s^2 4f^7$ +2 +3	64 Gd Gadolinium 157,25 6,150 1,2 [Xe] $6s^2 4f^7 5d^1$ +3	65 Tb Terbium 158,93 5,863 1,2 [Xe] $6s^2 4f^9$ +3 +4	66 Dy Dysprosium 162,50 5,938 1,2 [Xe] $6s^2 4f^{10}$ +3	67 Ho Holmium 164,93 6,021 1,2 [Xe] $6s^2 4f^{11}$ +3	68 Er Erbium 167,26 6,107 1,2 [Xe] $6s^2 4f^{12}$ +3	69 Tm Thulium 168,93 6,184 1,2 [Xe] $6s^2 4f^{13}$ +2 +3	70 Yb Ytterbium 173,05 6,254 1,2 [Xe] $6s^2 4f^{14}$ +2 +3	71 Lu Lutétium 174,97 5,425 1,3 [Xe] $6s^2 4f^{14} 5d^1$ +3
Lanthanides	6																
Actinides	7	89 Ac Actinium [227] 5,17 1,1 [Rn] $7s^2 6d^1$ +3	90 Th Thorium 232,04 6,306 1,3 [Rn] $7s^2 6d^2$ +4	91 Pa Protactinium 231,04 5,89 1,5 [Rn] $7s^2 5f^2 6d^1$ +4 +5	92 U Uranium 238,03 6,194 1,7 [Rn] $7s^2 5f^3 6d^1$ +3 +4 +5 +6	93 Np Neptunium [237] 6,265 1,3 [Rn] $7s^2 5f^5$ +3 +4 +5 +6	94 Pu Plutonium [244] 6,026 1,3 [Rn] $7s^2 5f^6$ +3 +4 +5 +6	95 Am Américium [243] 5,973 1,3 [Rn] $7s^2 5f^7$ +3 +4 +5 +6	96 Cm Curium [247] 6,02 1,3 [Rn] $7s^2 5f^7 6d^1$ +3	97 Bk Berkélium [247] 6,23 1,3 [Rn] $7s^2 5f^9$ +3 +4	98 Cf Californium [251] 6,30 1,3 [Rn] $7s^2 5f^{10}$ +3	99 Es Einsteinium [252] 6,42 1,3 [Rn] $7s^2 5f^{11}$ +3	100 Fm Fermium [257] 6,50 1,3 [Rn] $7s^2 5f^{12}$ +3	101 Md Mendélévium [258] 6,58 1,3 [Rn] $7s^2 5f^{13}$ +3	102 No Nobélium [259] 6,65 1,5 [Rn] $7s^2 5f^{14}$ +3	103 Lr Lawrencium [262] — — [Rn] $7s^2 5f^{14} 6d^1$ +3

* *Pure Appl. Chem.*, Vol. 78, No. 11, pp. 2051–2066, 2006. Actualisé en 2008 selon recommandations de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée.

© 2008, Clovis DARRIGAN - Anima-Science / www.darrigan.net - www.anima-science.fr