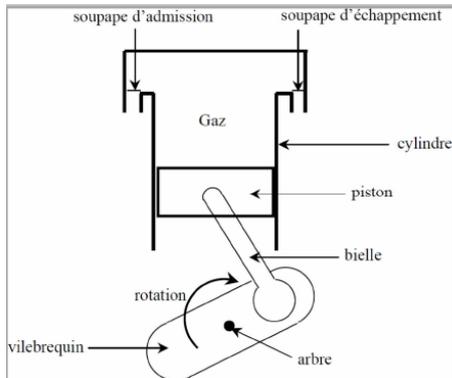


Devoir surveillé : Thermodynamique

1 Moteurs à combustion interne (23,5 points)



Les moteurs à combustion interne, qui comprennent essentiellement les moteurs à allumage commandé (cycle Beau de Rochas) et les moteurs Diésel, sont d'une grande importance pratique. Ils constituent notamment la quasi-totalité des moteurs des automobiles. Ce problème étudie le fonctionnement théorique de ces moteurs. Dans ces moteurs, l'énergie dégagée par une réaction de combustion est partiellement transformée en travail. Dans tout le problème, les gaz seront supposés parfaits.

Pour récupérer, en partie, cette énergie chimique, le principe est le suivant : on comprime un gaz (de l'air mélangé éventuellement à du carburant) dans un cylindre à l'aide d'un piston, lui-même actionné par un système bielle-vilebrequin.

Le mélange a été préalablement admis dans le cylindre par une soupape d'admission (fermée ultérieurement). En fin de compression a lieu la réaction de combustion (s'il n'y était pas déjà, le combustible est donc injecté dans le cylindre à ce stade). Une partie de l'énergie dégagée est récupérée sous forme de travail car les gaz résultants de cette réaction repoussent le piston. Les gaz subissent alors une détente (augmentation de volume tandis que le piston est repoussé vers le bas). La rotation de l'arbre conduit, par l'intermédiaire du système bielle-vilebrequin, à la remontée du piston. La soupape d'échappement s'ouvre, ce qui permet l'évacuation des gaz vers l'extérieur. La rotation de l'arbre se poursuivant, le piston redescend. La soupape d'échappement se ferme et celle d'admission s'ouvre et on revient à la phase d'admission.

Pendant un cycle complet, le vilebrequin a donc accompli deux tours et le piston deux allers et retours : le piston descend pendant l'admission, remonte pendant la compression, redescend pendant la détente (après réaction) et remonte pendant l'échappement. Le moteur étudié est donc à quatre temps.

Le but du système bielle-vilebrequin est de transformer les mouvements de translation du piston en mouvement de rotation de l'arbre qui sera transmis aux roues.

On idéalise le fonctionnement du moteur en considérant que le système fermé constitué de n moles de gaz parfait parcourt le cycle réversible suivant :

- Compression adiabatique de A à B;
- La combustion démarre en B et il s'ensuit une première phase de B à C isochore;
- La combustion se poursuit dans une phase isobare de C à D;
- Détente adiabatique de D à E ;
- Phase isochore de E à A.

La combustion est prise en compte de façon abstraite : on ne se préoccupe pas des modifications dans la composition du système dues à la réaction chimique ; on considère que la combustion est équivalente à un apport de chaleur au gaz effectuant le cycle, durant les phases B-C et C-D .

Notations : $\alpha = \frac{V_A}{V_B}$; $\lambda = \frac{P_C}{P_B}$; $\epsilon = \frac{V_D}{V_C}$

On notera C_m la capacité thermique molaire à volume constant de l'air, et C_{pm} la capacité thermique molaire à pression constante avec $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_m}$.

De même, on notera T_i la température au point i .

1. Reproduire le cycle dans un diagramme de Watt (P,V) en justifiant la forme de chaque courbe.(5)

2. Écrire les relations entre P_A , P_B , V_A et V_B . (1)
3. Exprimer la chaleur Q_{AB} et le travail W_{AB} reçus par le gaz pendant la transformation A-B, en fonction P_A , P_B , V_A , V_B et tout autre paramètre nécessaire. (2)
4. Exprimer la chaleur Q_{BC} et le travail W_{BC} reçus par le gaz pendant la transformation B-C . On exprimera le résultat en fonction de n , C_m , T_B et T_C . (2)
5. Exprimer la chaleur Q_{CD} reçue par le gaz pendant la transformation C-D en fonction des températures de chacun des points.(2)
6. Exprimer les chaleurs Q_{DE} et Q_{EA} reçues par le gaz pendant les transformations D-E et E-A . Exprimer le résultat en fonction des températures des points extrêmes de la transformation étudiée. (2)
7. Que vaut la variation d'énergie interne ΔU sur un cycle complet (ABCDEA) ? (0.5)
8. En déduire le travail total W reçu par le gaz au cours d'un cycle en fonction des transferts thermiques reçues définies dans les questions précédentes.(2)
9. Exprimer le rendement η du cycle uniquement en fonction des transferts thermiques reçues définies dans les questions précédentes. (1)
10. Exprimer T_B en fonction de T_A , γ et α . (1)
11. Exprimer T_C en fonction de T_A , γ , α et λ . (1)
12. Exprimer T_D en fonction de T_A , γ , α , ϵ et λ . (1)
13. Exprimer T_E en fonction de T_A , γ , ϵ et λ . (1)
14. Montrer que le rendement s'écrit (2) :

$$\eta = 1 - \frac{\lambda\epsilon^\gamma - 1}{\alpha^{\gamma-1}(\lambda - 1 + \gamma\lambda(\epsilon - 1))}$$

Correction :

- 1.
2. On utilise la loi de Laplace $P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$
3. AB adiabatique : $Q_{AB} = 0$.
Premier principe : $\Delta U_{AB} = W_{AB} + Q_{AB}$ avec $dU = C_V dT$.

On a donc $W_{AB} = C_V(T_B - T_A)$ avec $C_V = \frac{nR}{\gamma-1}$.

Équation d'état des gaz parfaits :

$P_A V_A = nRT_A$ et $P_B V_B = nRT_B$ soit

$$W_{AB} = \frac{P_B V_B - P_A V_A}{\gamma - 1}$$

4. BC isochore : $W_{BC} = 0$. Premier principe :
 $Q_{BC} = \Delta U_{BC}$ avec $dU = C_V dT$ et $C_V = nC_{vm}$ soit $Q_{BC} = nC_{vm}(T_C - T_B)$.
5. CD isobare :
 $Q_{CD} = \Delta H_{CD}$ avec $dH = C_p dT$ et $C_p = nC_{pm}$ donc $Q_{CD} = nC_{pm}(T_D - T_C)$.
6. DE adiabatique : $Q_{DE} = 0$.
EA isochore : $Q_{EA} = nC_{vm}(T_A - T_E)$.
7. L'énergie interne est une fonction d'état : $\Delta U = 0$.
8. $\Delta U = W + Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{DE} + Q_{EA}$ avec $Q_{AB} = Q_{DE} = 0$.
On a donc $W = -Q_{BC} - Q_{CD} - Q_{EA}$.

9.

$$\eta = -\frac{W}{Q_{BC} + Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{EA}}{Q_{BC} + Q_{CD}}$$

10. AB adiabatique réversible. La loi de Laplace donne : $T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$.
on obtient $T_B = T_A \alpha^{\gamma-1}$.

11. Équation d'état des gaz parfaits : $P_B V_B = nRT_B$ et $P_C V_B = nRT_C$. Donc

$$\frac{T_C}{T_B} = \frac{P_C}{P_B} = \lambda \Rightarrow T_C = \lambda T_A \alpha^{\gamma-1}$$

12. $P_C V_C = nRT_C$ et $P_C V_D = nRT_D$ donc $\frac{T_D}{T_B} = \frac{V_D}{V_B} = \epsilon$ soit $T_D = \epsilon \lambda T_A \alpha^{\gamma-1}$

13. DE adiabatique réversible : $T_D V_D^{\gamma-1} = T_E V_E^{\gamma-1}$.
Soit $T_E = \lambda \epsilon^{\gamma} T_A$.

14. Bilan : On a : $Q_{BC} = nC_{vm}(T_C - T_B)$, $Q_{CD} = nC_{pm}(T_D - T_C)$ et $Q_{EA} = nC_{vm}(T_A - T_E)$.
On utilise les expressions des températures et le fait que :

$$\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}}$$

2 Canon à neige (Oral PT, 14 points)

La neige artificielle est obtenue en pulvérisant de fines gouttes d'eau liquide à $T_0 = 10^\circ\text{C}$ dans l'air ambiant à $T_a = -15^\circ\text{C}$. Le déplacement dans l'air soumet chaque goutte à une perte thermique que l'on modélise à travers la loi de Newton, $\phi = h(T - T_a)S$, où ϕ est le flux thermique cédé par la goutte d'eau par unité de temps ($\delta Q = \phi dt$), T sa température, h un coefficient constant et S la surface à travers à lieu l'échange.

La transformation se fait à pression atmosphérique P_0 .

1. En supposant la goutte indéformable de rayon R et à l'équilibre mécanique, établir la relation

$$\mu c R \frac{dT}{dt} = -3h(T - T_a)$$

(3)

2. En déduire que

$$\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = e^{-t/\tau}$$

en exprimant τ en fonction de μ , R , c et h . En déduire l'instant t_1 au bout duquel la goutte d'eau atteint une température $T_1 = -5,0^\circ\text{C}$. (4)

3. Lorsque la goutte atteint T_1 , le phénomène de surfusion cesse : la goutte se solidifie partiellement. Calculer la fraction massique x de liquide restant à solidifier en supposant la transformation très rapide et adiabatique. (3)

4. Au bout de combien de temps la goutte est-elle totalement solidifiée ?(4)

Données :

- rayon de la goutte d'eau $R = 0,20$ mm,
- surface d'une sphère $4\pi R^2$
- coefficient convectif $h = 65 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$,
- masse volumique de l'eau liquide $\mu = 1,010^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- capacité thermique massique de l'eau liquide $c = 4,210^3 \text{ J/kg}$,
- chaleur latente de fusion de la glace $\ell_{fus} = 330 \text{ kJ/kg}$

Correction :

1. La goutte d'eau est un système fermé, en transformation monobare avec équilibre mécanique, qui n'échange d'énergie que par transfert thermique. Bilan d'enthalpie entre t et $t + dt$:

$$dH = m_0 c dT \underbrace{=}_{1er\ pcpe} -\phi dt = -h(T - T_a) S dt$$

Le signe $-$ apparaît car la puissance est cédée. La goutte étant sphérique de rayon R constant, on en déduit $\frac{4}{3}\pi R^3 \mu C dT = -h(T - T_a) 4\pi R^2 dt$. Et finalement,

$$\mu c R \frac{dT}{dt} = -3h(T - T_a)$$

Barème : 3 points, 1 pour le 1er principe (0,5 pour le signe), 2 pour l'ED

2. Cette relation se réécrit

$$\frac{dT}{dt} + \frac{3h}{\mu c R} T = \frac{3h}{\mu c R} T_a$$

où on identifie le temps caractéristique $\tau = \frac{\mu c R}{3h}$. Les solutions s'écrivent $T = T_a + Ae^{-t/\tau}$. La condition initiale donne $T(0) = T_0 = T_a + A$ donc $A = T_0 - T_a$. Finalement, $T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-t/\tau}$ ce qui se met bien sous la forme cherchée, $\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = e^{-t/\tau}$.

À l'instant t_1 ,

$$e^{-t_1/\tau} = \frac{T_1 - T_a}{T_0 - T_a} \implies t_1 = -\tau \ln \frac{T_1 - T_a}{T_0 - T_a} = 4,0 \text{ s}$$

Barème : 4 points (1 pour la forme canonique, 2 pour la solution, 1 pour t_1)

3. La transformation est cette fois supposée instantanée et implique des changements macroscopiques. Elle est supposée sans travail, adiabatique et monobare donc d'après le premier principe $\Delta H = 0$. L'eau est partiellement solidifiée, on en déduit donc que la température finale est égale à la température de co-existence $T_{fus} = 0^\circ\text{C}$. Il y a donc simultanément solidification et échauffement de l'eau. On raisonne donc sur la transformation auxiliaire, fictive, suivante, dans laquelle les deux phénomènes ont lieu successivement :

dans une première étape, toute l'eau passe de T_1 à T_{fus} ; dans une deuxième étape, une masse $(1 - x)m$ se solidifie, ce qui laisse bien une fraction massique x de liquide.

Le bilan enthalpique s'écrit :

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = mc(T_{fus} - T_1) + (1 - x)m(-\ell_{fus}) = 0$$

L'enthalpie de fusion est l'opposée de l'enthalpie de solidification. On trouve donc

$$x = 1 - \frac{c(T_{fus} - T_1)}{\ell_{fus}} = 0,94$$

Barème : 3 points

4. Procédons au bilan enthalpique d'une transformation infinitésimale de durée dt au cours de laquelle une masse dm solidifie à température $T = T_{fus}$ constante. Le bilan enthalpique devient

$$dH = -dm\ell_{fus} \underbrace{=}_{1er\ pcpe} = -h(T_{fus} - T_a) 4\pi R^2 dt.$$

ce que l'on peut réécrire

$$dm = \frac{h(T_{fus} - T_a) 4\pi R^2}{\ell_{fus}} dt$$

On intègre

$$\int_{(1-x)m}^m dm = \frac{h(T_{fus} - T_a) 4\pi R^2}{\ell_{fus}} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Soit

$$m - (1 - x)m = \frac{h(T_{fus} - T_a)4\pi R^2}{\ell_{fus}}(t_2 - t_1)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{xR\ell_{fus}\mu}{3h(T_{fus} - T_a)} = 21s$$

Barème : 4 points

On peut bien sûr intégrer « comme d'habitude », avec une constante d'intégration que l'on détermine à l'aide des conditions initiales ... mais attention, les conditions initiales de cette deuxième phase ne sont pas en $t = 0$ mais en $t = t_1$. Dans un tel cas, raisonner par séparation des variables est moins risqué sur la prise en compte des conditions initiales.

3 Pluie acide

L'eau de pluie est naturellement acide : en effet, dans l'eau, le CO_2 dissout se présente sous la forme d'un diacide (CO_2, H_2O) ou $CO_2(aq)$ équivalent à H_2CO_3 , et donne lieu à des équilibres acido-basiques. La teneur en CO_2 de l'air, naturellement de 0,035%, varie avec la température, la pression et le milieu (agglomération, industries, ...) et peut atteindre 0,10%.

Données : Constante d'acidité : $K_a H_2CO_3/HCO_3^-$: $pK_a = 6,4$
 HCO_3^-/CO_3^{2-} $pK_a = 10,3$

3.1 Calcul du pH d'une eau de pluie. (9 points)

On considère de l'eau de pluie en équilibre avec le $CO_2(g)$ de l'atmosphère, à 298 K, la pression totale étant de 1 bar et la teneur en $CO_2(g)$ de 0,035%.

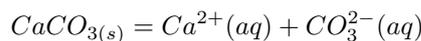
5. Quelle est la pression partielle de $CO_2(g)$ à l'équilibre ? (1)
6. L'équilibre $CO_2(g) = CO_2(aq)$ a pour constante d'équilibre à 298 K, $K^0 = 3,37 \cdot 10^{-2}$. Calculer à 298 K, la concentration en $CO_2(aq)$ dans l'eau de pluie, à l'équilibre. (1)
7. Écrire la réaction entre le $CO_2(aq)$ et l'eau. Pour simplifier, on pourra écrire H_2CO_3 à la place de $CO_2(aq)$. (1)
8. Calculer sa constante d'équilibre. (2)
9. A partir de la concentration en $CO_2(aq)$ (ou H_2CO_3) à l'équilibre calculé au 2) et d'un tableau d'avancement, déterminer la concentration en ion oxonium H_3O^+ à l'équilibre. En déduire le pH de l'eau de pluie. (2)
10. Dans le calcul précédent, on n'envisage que la première acidité du dioxyde de carbone dissout. Vérifier sans calcul que l'espèce CO_3^{2-} est effectivement négligeable à ce pH. (1)
11. Comment évolue qualitativement ce pH lorsque la teneur en $CO_2(g)$ de l'atmosphère atteint 0,10%. (1)

3.2 Problèmes causés par les pluies acides (2 points)

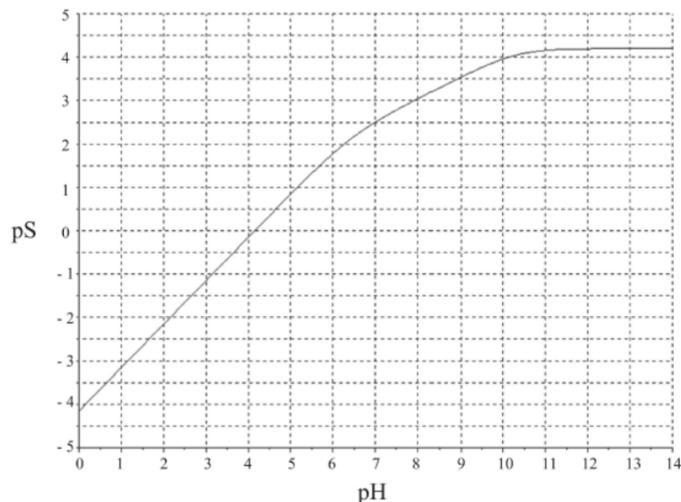
Les pluies constituées d'une eau ainsi acidifiée peuvent être néfastes sur la faune et la flore, mais aussi sur les bâtiments et édifices élaborés par les hommes. Ces pluies peuvent notamment accélérer l'érosion des sols calcaires, pouvant provoquer des éboulements. Le randonneur prudent évite, autant que faire se peut, les escapades par grosse pluie.

12. Outre les problèmes d'éboulement, les rejets de dioxyde de carbone liés à l'activité humaine entraînent une acidification des océans qui pourrait avoir de lourds impacts sur la survie des organismes marins calcaires. Actuellement, l'eau de mer a un pH compris entre 8,1 et 8,3 mais les scientifiques s'attendent à une diminution du pH de 0,3 dans cent ans.
 - a) Sous quelle forme prédomine le $CO_2(aq)$ dissous dans l'océan ? (0.5)
 - b) Justifier que la dissolution du dioxyde de carbone dans l'océan conduit à une diminution du pH. (0.5)

c) La réaction de dissolution du carbonate de calcium (calcaire) $CaCO_3(s)$ dans l'eau est :



On note S la solubilité molaire du carbonate de calcium et $pS = -\log(S)$. On ci-après donne le graphe représentant pS en fonction du pH pour la solubilité du carbonate de calcium.



Déduire de ce graphe l'effet d'une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone sur les organismes calcaires de l'océan. (1)

3.3 Le rôle du CO_2 dans la dégradation des ouvrages en béton armé (5 points)

En montagne ou au bord de la mer, de nombreux ouvrages de protection (pare-avalanche, digues...) sont faits de béton armé. Un taux de CO_2 accru dans l'atmosphère provoque la dégradation accélérée des ouvrages en béton armé via la carbonatation qu'il induit.

La prise du ciment pour fabriquer du béton s'effectue lorsque l'on verse de l'eau sur un mélange composé de poudre de ciment et de charge (sable et granulat). Elle consiste en un durcissement conduisant, à partir du silicate tricalcique (Ca_3SiO_5) du ciment, à la formation de deux espèces chimiques : le silicate tricalcique hydraté ($Ca_3Si_2O_7, 3H_2O$) et l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2(s)$.

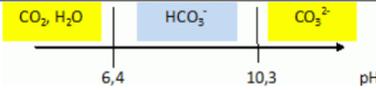
C'est l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2(s)$ qui confère au béton son caractère basique. L'ordre de grandeur du pH dans le béton est donné par le pH d'une solution aqueuse saturée en $Ca(OH)_2$.

Produits de solubilité Ks : $Ca(OH)_2(s)$: $pK_s = 5,2$.

13.
 - a) Écrire la réaction de dissolution de $Ca(OH)_2(s)$ dans l'eau pure. (1)
 - b) Calculer la solubilité de $Ca(OH)_2(s)$. (1.5)
 - c) En déduire le pH d'une solution saturée en $Ca(OH)_2(s)$. (1.5)
14. La carbonatation du béton : Dans certains cas, le pH du béton descend en dessous de 8 suite à sa carbonatation. La pollution urbaine liée à l'humidité entraîne la dissolution du CO_2 atmosphérique dans l'eau à l'intérieur du béton et conduit à une réaction avec l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2(s)$. Le produit qui en résulte est le carbonate de calcium ($CaCO_3(s)$). Écrire l'équation-bilan de la réaction de carbonatation. (1)
La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé.

Notez que ce phénomène est d'autant plus marqué sur les roches calcaires qui finissent par s'effriter.

Correction :

1. <u>Pression partielle</u> : $P_{CO_2} = x_{CO_2} P_{tot} = \frac{0,035}{100} 1 = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$															
2. <u>Concentration en $CO_{2(aq)}$</u> : $K^0 = \frac{[CO_{2(aq)}]}{P_{CO_2}}$ donc $[CO_{2(aq)}] = K^0 P_{CO_2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$															
3. $CO_{2(aq)} + 2 H_2O = HCO_3^- + H_3O^+$ ou $H_2CO_3 + H_2O = HCO_3^- + H_3O^+$															
4. $K^0 = \frac{[HCO_3^-][H_3O^+]}{[H_2CO_3]} = K_{a1} = 10^{-pK_{a1}} = 10^{-6,4}$															
5. <u>Tableau d'avancement</u> : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>$CO_{2(aq)}$</th> <th>$2 H_2O$</th> <th>HCO_3^-</th> <th>H_3O^+</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EI</td> <td>C</td> <td>excès</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Equilibre</td> <td>$C - x = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$</td> <td>excès</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> </tbody> </table> <p>A l'équilibre $K^0 = \frac{x^2}{C-x} = 10^{-6,4}$ donc $x = \sqrt{(C-x)K^0} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ Donc $[H_3O^+] = x = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$. Soit $pH = -\log[H_3O^+] = 5,7$</p>		$CO_{2(aq)}$	$2 H_2O$	HCO_3^-	H_3O^+	EI	C	excès	0	0	Equilibre	$C - x = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$	excès	x	x
	$CO_{2(aq)}$	$2 H_2O$	HCO_3^-	H_3O^+											
EI	C	excès	0	0											
Equilibre	$C - x = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$	excès	x	x											
6.  A $pH = 5,7$ CO_3^{2-} est bien négligeable.															
7. Si la teneur en CO_2 augmente alors sa pression partielle augmente. Donc la concentration à l'équilibre de $CO_{2(aq)}$ augmente et la concentration en H_3O^+ aussi. Donc le pH diminue (mais très peu).															
8.a. Dans l'eau de mer, on a un pH autour de 8 donc, d'après le diagramme de prédominance de la question 6, le dioxyde de carbone est sous la forme HCO_3^- .															
8.b. Réaction de dissolution : $CO_2, H_2O + H_2O = HCO_3^- + H_3O^+$ La réaction libère des ions H_3O^+ donc leur concentration augmente donc le pH diminue.															
8.c. Si on augmente la concentration en dioxyde de carbone, le pH diminue. D'après le graphe cela veut dire que pS diminue donc la solubilité du calcaire augmente. Donc il y aura moins d'espèces calcaires dans l'océan.															
9.a. <u>Dissolution</u> : $Ca(OH)_{2(s)} = Ca^{2+}_{(aq)} + 2 OH^-_{(aq)}$															
9.b. <u>Tableau d'avancement</u> : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>$Ca(OH)_{2(s)}$</th> <th>$Ca^{2+}_{(aq)}$</th> <th>$2 OH^-_{(aq)}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EI</td> <td>$n \gg s$</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Equilibre</td> <td>$n - s$</td> <td>s</td> <td>$2s$</td> </tr> </tbody> </table> <p>A l'équilibre (saturation) : $K_s = [Ca^{2+}][OH^-]^2 = s \times 4s^2 = 4s^3$ Donc $s = \sqrt[3]{\frac{K_s}{4}} = \sqrt[3]{\frac{10^{-5,2}}{4}} = 0,012 \text{ mol.L}^{-1}$</p>		$Ca(OH)_{2(s)}$	$Ca^{2+}_{(aq)}$	$2 OH^-_{(aq)}$	EI	$n \gg s$	0	0	Equilibre	$n - s$	s	$2s$			
	$Ca(OH)_{2(s)}$	$Ca^{2+}_{(aq)}$	$2 OH^-_{(aq)}$												
EI	$n \gg s$	0	0												
Equilibre	$n - s$	s	$2s$												
9.c. pH : $K_e = [OH^-][H_3O^+]$ donc $[H_3O^+] = \frac{K_e}{[OH^-]} = \frac{K_e}{2s} = \frac{10^{-14}}{0,024} = 4,3 \cdot 10^{-13} \text{ mol.L}^{-1}$ Donc $pH = -\log[H_3O^+] = 12,4$															
10. Carbonatation : $Ca(OH)_{2(s)} + CO_2, H_2O_{(aq)} = CaCO_{3(s)} + 2 H_2O$															