

I. Mécanisme de la fusion de l'hydrogène dans une étoile

- On se propose de commenter un extrait d'article du dossier hors série de la revue « Pour la science » de janvier 2001.
« ...La phase de **fusion** (ou combustion) de l'hydrogène est la plus longue de la vie des étoiles. Si la masse stellaire est comparable ou inférieure à celle du Soleil, la température centrale est inférieure à une **vingtaine de millions de degrés**. Dans ces conditions, la fusion de **deux noyaux d'hydrogène** (ou protons) produit un **noyau de Deutérium** qui capture un autre proton et forme un **noyau d'Hélium 3** ... Finalement, **deux noyaux d'Hélium 3** fusionnent en un **noyau d'Hélium 4** ...L'ensemble de ces réactions constitue la première des chaînes proton - proton ou chaîne p-p, la plus importante dans le cas du Soleil ...».
- NB : les 3 parties de l'exercice sont indépendantes et peuvent donc être traitées indépendamment les unes des autres.**
- Les valeurs numériques ont été volontairement simplifiées, afin de permettre la réalisation des calculs sans faire usage de la calculatrice.

1. Quelques considérations de vocabulaire

- Donner les définitions des expressions « fusion nucléaire » et « fission nucléaire ».
- En considérant les charges des noyaux en cause dans le mécanisme de fusion, expliquer pourquoi ces réactions ne peuvent se produire qu'à très haute température ($\approx 2.10^7$ °C). On parle alors de fusion thermonucléaire...

2. Etude de la chaîne de réactions

- Notations utilisées pour les noyaux concernés :

Hydrogène (ou proton) : ${}^1_1\text{H}$ (ou ${}^1_1\text{p}$) ; Deutérium : ${}^2_1\text{H}$; Hélium 3 : ${}^3_2\text{He}$; Hélium 4 : ${}^4_2\text{He}$

- Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hydrogène en un noyau de deutérium et une particule que l'on notera sous la forme ${}^A_Z\text{X}$. Comment s'appelle cette particule ?
- Écrire la réaction de fusion d'un noyau de deutérium et d'un proton en un noyau d'hélium 3. Cette fusion s'accompagne de l'émission d'un photon γ (rayonnement γ). Comment peut-on interpréter cette émission ?
- Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hélium 3 en un noyau d'hélium 4. Cette fusion s'accompagne de l'émission de deux autres noyaux identiques. Lesquels ?

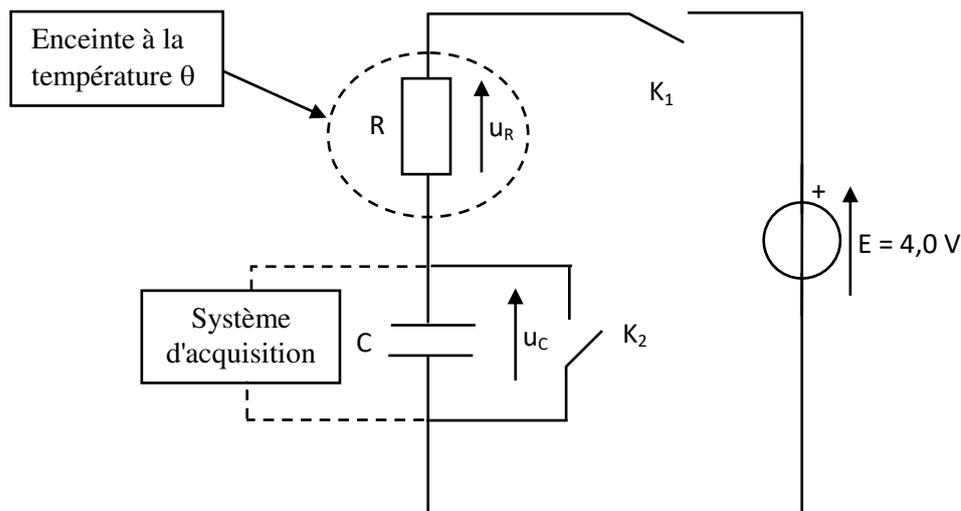
3. Considérations énergétiques. Le soleil « maigrir-il » ?

- On considère désormais la réaction suivante : $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^0_1\text{e}$
- On donne les masses des noyaux, en unité de masse atomique :
 ${}^1_1\text{H}$: 1,0073 u ; ${}^4_2\text{He}$: 4,0026 u ; ${}^0_1\text{e}$: 0,0006 u ; 1 u correspond à une énergie d'environ 1000 MeV

- Calculer, en unité de masse atomique, la perte de masse correspondant à cette fusion.
- En déduire une estimation, en MeV/nucléon, de la valeur de l'énergie libérée par nucléon lors de cette fusion. On choisira, parmi les estimations suivantes, la réponse correcte :
0,6 MeV/nucléon ; 6 MeV/nucléon ; 60 MeV/nucléon
- Le soleil transforme, chaque seconde, 720 millions de tonnes d'hydrogène en hélium 4. Estimer la perte de masse subie, chaque seconde, par le soleil. On choisira, parmi les estimations suivantes, la réponse correcte :
4 500 tonnes ; 45 000 tonnes ; 450 000 tonnes ; 4 500 000 tonnes ; 45 000 000 tonnes
NB : On pourra remarquer que le rapport 0,0254/4,0292 est très peu différent de 1/160.

II. Sonde thermique

- On peut constituer une sonde thermique à l'aide d'un dipôle (R,C) série. On réalise le circuit suivant :



- Le condensateur a une capacité $C = 1,0 \mu\text{F}$
- Le conducteur ohmique est une thermistance : la valeur R de sa résistance dépend de la température. On le place dans une enceinte dont la température interne est notée θ .
- Un système d'acquisition permet d'enregistrer l'évolution au cours du temps de la tension u_C aux bornes du condensateur.

➤ Aide mathématique :

$0,63 \times 4,0 = 2,5$	$0,37 \times 4,0 = 1,5$	$e^0 = 1$	$\lim_{x \rightarrow -\infty} (e^x) = 0$
-------------------------	-------------------------	-----------	--

1. Étalonnage de la sonde

➤ Protocole expérimental

- On souhaite tracer la courbe de l'évolution de la valeur de la résistance de la thermistance en fonction de la température. On réalise le protocole suivant :
- Le condensateur est initialement déchargé et les interrupteurs K_1 et K_2 sont ouverts. À $t = 0$, on ferme K_1 et on enregistre l'évolution de la tension u_C jusqu'à la fin de la charge du condensateur. Ensuite, on ouvre K_1 et on ferme K_2 : le condensateur se décharge complètement. On ouvre enfin K_2 .
- On modifie la température de l'enceinte et on recommence le protocole précédent. On opère pour plusieurs valeurs de température et on obtient le graphique de **la feuille réponse** :
- A l'aide des résultats expérimentaux, **étudions la charge du condensateur**.

1.1. Établir la relation entre la tension E aux bornes du générateur, la tension u_R aux bornes du conducteur ohmique et la tension u_C aux bornes du condensateur.

1.2. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C pendant la phase de charge.

1.3. La solution analytique de cette équation est de la forme : $u_C = A + B e^{-t/(RC)}$

1.3.1 En tenant compte des conditions finales de la charge, déterminer A .

1.3.2 En tenant compte des conditions initiales de la charge, déterminer B .

1.3.3 Dédire l'expression de u_C .

1.4. On donne l'expression de la constante de temps du dipôle (R, C) : $\tau = RC$.

1.4.1 Vérifier par analyse dimensionnelle l'homogénéité de cette formule.

1.4.2 Déterminer la valeur τ_1 de la constante de temps, relative à la température $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$, à partir du graphique de **la feuille réponse**. Expliquer la méthode employée.

1.4.3 En déduire la valeur R_1 de la résistance correspondante.

1.4.4 Procéder de la même manière pour les autres températures et compléter le tableau de **la feuille réponse** à rendre avec la copie.

III. Étude d'une transformation chimique

- Au cours d'une séance de travaux pratiques, un professeur propose à ses élèves de déterminer la valeur du taux d'avancement final d'une transformation en effectuant une mesure pH-métrique.

1. Solution de départ

- Une solution commerciale, notée S_0 , d'un acide AH porte les indications suivantes :



Acide AH

$C_0 > 5 \text{ mol.L}^{-1}$

- Pour la suite, et tant qu'il n'aura pas été identifié, l'acide contenu dans la bouteille sera noté AH et sa base conjuguée A^- .

1.1. Donner la définition d'une espèce acide au sens de Brönsted.

1.2. Quelles précautions doit-on prendre pour manipuler ce produit ?

2. Accès à la valeur du taux d'avancement final par une mesure pH-métrique

- Dans une fiole jaugée de volume $V = 200,0 \text{ mL}$, partiellement remplie d'eau distillée, le professeur verse avec précaution $1,00 \text{ mL}$ de la solution S_0 d'acide AH, puis il complète jusqu'au trait de jauge. La solution obtenue est notée S_1 et a pour concentration $C_1 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$.

2.1. Déterminer la valeur de C_0 , concentration molaire en soluté apporté de la solution commerciale S_0 .

2.2. Pourquoi le professeur remplit-il partiellement d'eau distillée la fiole jaugée avant de verser l'acide ?

2.3. Compléter la ligne **1** du tableau d'avancement donné sur la feuille réponse en écrivant l'équation de la réaction acido-basique entre l'acide AH et l'eau.

2.4. On note x l'avancement de la réaction. Compléter les lignes **2, 3, 4** et **5** du tableau d'avancement donné sur la feuille réponse en fonction de C_1 , V , x , x_{max} ou x_F .

2.5. Déterminer la valeur de l'avancement maximal de la réaction noté x_{max} en considérant la transformation comme totale.

- Les élèves, après avoir étalonné un pH-mètre, mesurent le pH de la solution S_1 : ils obtiennent $\text{pH} = 3,0$.

2.6. Quelle est la valeur de la concentration finale en ions oxonium $[\text{H}_3\text{O}^+]_F$? En déduire la valeur de l'avancement final de la réaction noté x_F .

2.7. La transformation associée à la réaction de l'acide AH sur l'eau est-elle totale ou limitée ? Justifier.

2.8. Donner la définition du taux d'avancement final d'une transformation chimique.

2.9. Calculer la valeur du taux d'avancement final τ_1 , de la transformation associée à la réaction de l'acide AH sur l'eau.

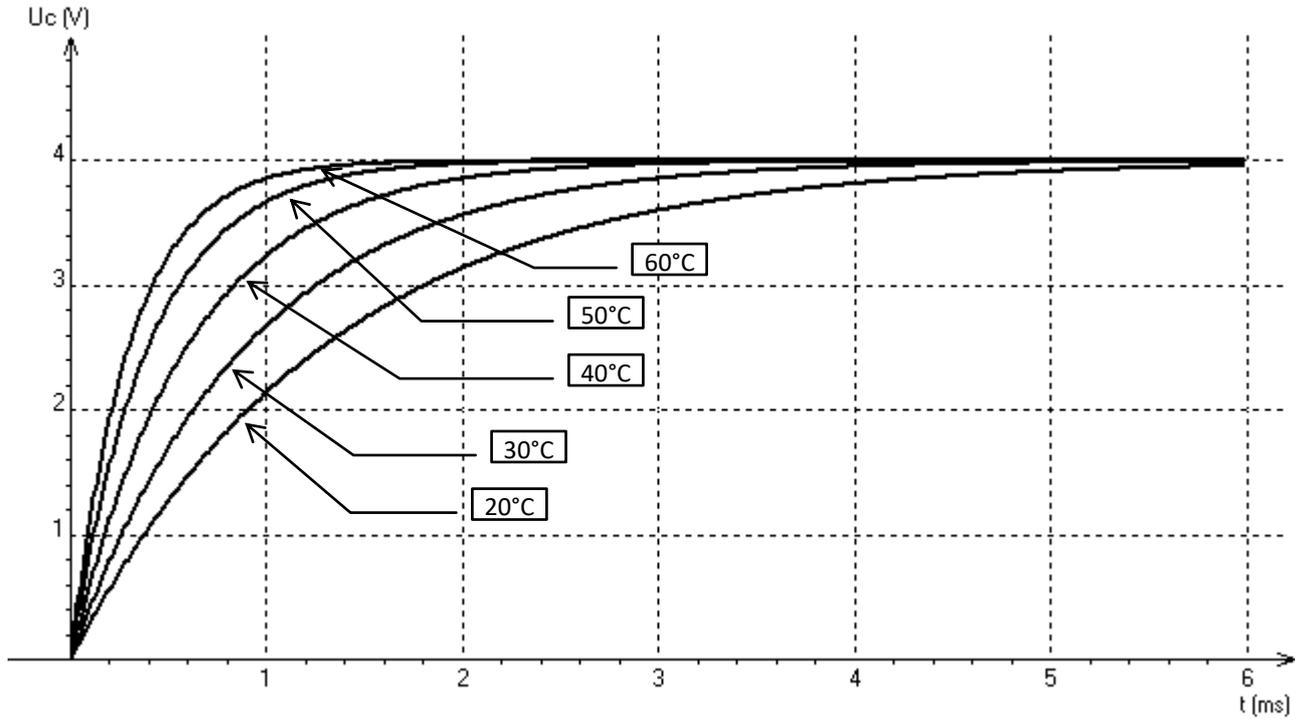
- Sur leur énoncé de TP, les élèves ont à leur disposition quelques valeurs du taux d'avancement final de la réaction d'un acide sur l'eau pour des solutions de même concentration C_1 .

Acide contenu dans la solution	Valeur du taux d'avancement final
Acide méthanoïque HCOOH	7,2 %
Acide éthanoïque CH_3COOH	2,3 %
Acide propanoïque $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$	1,8 %

2.10. Peut-on identifier l'acide contenu dans la solution S_0 ? Justifier votre réponse.

FEUILLE ANNEXE

II. Sonde thermique



Température θ (°C)	$\theta_1 = 20$	30	40	50	60
Constante de temps τ (ms)	$\tau_1 =$				
Résistance R (k Ω)	$R_1 =$				

III. Étude d'une transformation chimique

1	équation-bilan		
2	Etat initial	$x = 0$	
3	en cours	x	
4	Etat final	$x = x_f$	
5	Etat maximal	$x = x_{\max}$	

Correction

Mécanisme de la fusion de l'hydrogène dans une étoile

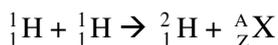
Quelques considérations de vocabulaire

Lors d'une réaction de fusion nucléaire, deux petits noyaux s'associent pour former un noyau plus gros et plus stable. Cette réaction nucléaire s'accompagne d'un dégagement d'énergie.

Lors d'une fission, un gros noyau instable, sous l'effet d'un neutron lent, se casse en deux noyaux plus petits. Cette réaction nucléaire provoquée s'accompagne d'un dégagement d'énergie et de neutrons.

Le noyau contient des protons qui portent des charges positives. Deux noyaux ont tendance à se repousser sous l'effet de la répulsion coulombienne. La réaction de fusion devient possible à haute température, lorsque les noyaux se déplacent très rapidement. Ils possèdent alors assez d'énergie cinétique pour vaincre la répulsion coulombienne.

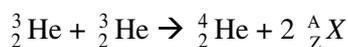
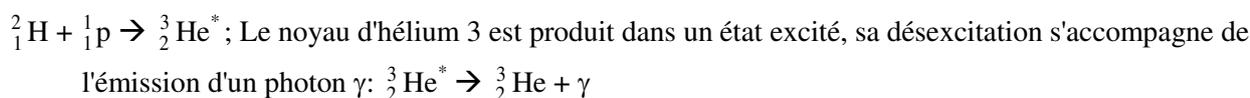
Etude de la chaîne de réactions



D'après la loi de conservation de la charge électrique : $1 + 1 = 1 + Z$ donc $Z = 1$

D'après la loi de conservation des nucléons : $1 + 1 = 2 + A$ donc $A = 0$.

La particule formée est notée ${}_1^0e$, c'est un positon



Loi de conservation de la charge : $2 + 2 = 2 + 2Z$ soit $Z = 1$

Loi de conservation du nombre de nucléons : $3 + 3 = 4 + 2A$ soit $A = 1$

L'équation est donc ${}_2^3\text{He} + {}_2^3\text{He} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2{}_1^1\text{H}$, les deux noyaux identiques sont des noyaux d'hydrogène.

Considérations énergétiques. Le soleil « maigrir-il » ?

perte de masse = masse des produits – masse des réactifs = $m({}_2^4\text{He}) + 2m({}_1^0e) - 4m({}_1^1\text{H})$

perte de masse = $4,0026 + 2 \times 0,0006 - 4 \times 1,0073 = 4,0026 + 0,0012 - 4,0292 = -0,0254 \text{ u}$

Pour la fusion de 4 nucléons (ici 4 protons), il y a une perte de masse de $-0,0254 \text{ u}$.

L'énoncé indique "1 u correspond à une énergie d'environ 1000 MeV

Les 4 nucléons perdent une énergie $E = -0,0254 \times 1000 \approx -25 \text{ MeV}$.

On peut dire que chaque nucléon perd une énergie de $-25/4 \approx -6 \text{ MeV}$.

Le milieu extérieur reçoit environ 6 MeV par nucléon.

Masse d'hydrogène consommée lors de la fusion de 4 ${}_1^1\text{H}$ $4 \times m({}_1^1\text{H}) = 4 \times 1,0073 = 4,0292 \text{ u}$

perte de masse lors de cette réaction : **0,0254 u** (calculée en 3.1.)

Masse d'hydrogène consommée chaque s dans le Soleil **720 millions de tonnes**

perte de masse chaque seconde dans le Soleil **M millions de tonnes**

Par proportionnalité : $M \times 4,0292 = 720 \times 0,0254$

$$M = \frac{720 \times 0,0254}{4,0292} = 720 \times \frac{1}{160} = \frac{72}{16} = 4,5 \text{ millions de tonnes} = 4\,500\,000 \text{ tonnes}$$

Sonde thermique

Étalonnage de la sonde

D'après la loi d'additivité des tensions, on a : $E = u_R + u_C$

Loi d'Ohm : $u_R = R \times i$ or $i = \frac{dq}{dt}$ et $q = C \times u_C$. On a donc $i = C \times \frac{du_C}{dt}$ Soit $u_R = R \times C \times \frac{du_C}{dt}$

en remplaçant dans l'équation de la question 1.1. on obtient : $E = R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C$

Soit l'équation différentielle : $\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{RC} u_C = \frac{E}{RC}$

La solution analytique de cette équation est de la forme : $u_C = A + B e^{-t/(RC)}$

Le condensateur est complètement chargé quand t tend vers l'infini, on a alors $u_C = E$.

le terme en exponentielle tend alors vers zéro, il vient $A = E$.

A l'instant $t = 0$, le condensateur est déchargé, $u_C = 0$; $0 = E + B e^{-0/(RC)} = E + B$.

Donc $B = -E$

$$u_C = E - E e^{-t/(RC)} = E \times (1 - e^{-t/(RC)})$$

On donne l'expression de la constante de temps du dipôle (R, C) : $\tau = RC$.

Dans l'équation différentielle $\frac{du_C}{dt}$ est en V/s, le terme $\frac{1}{RC} u_C$ est lui aussi en V/s

ou u_C est en V donc RC est en s. RC est bien homogène à un temps.

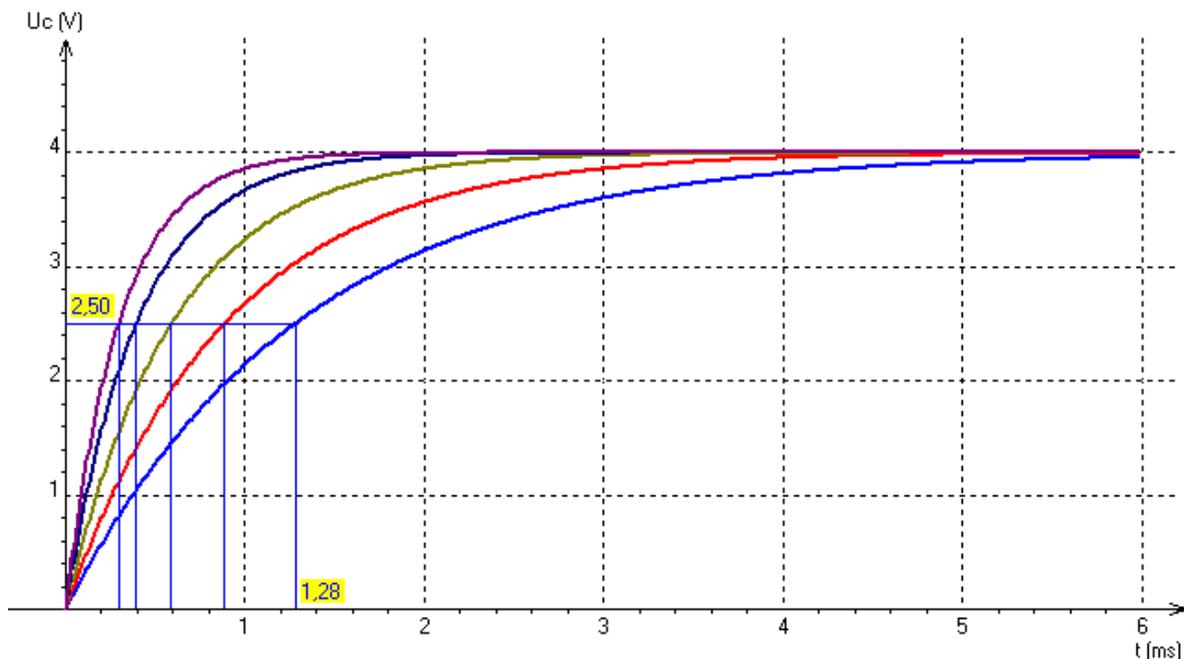
$E = 4,0 \text{ V}$ Or τ_1 correspond à l'abscisse du point d'ordonnée $0,63 \times E = 2,5 \text{ V}$ d'où $\tau_1 = 1,3 \text{ ms}$

On peut tracer la tangente à la courbe représentative de $u_C = f(t)$ à la date $t = 0 \text{ s}$. Elle coupe l'asymptote horizontale d'équation $u_C = E = 4,0$ à la date $t = \tau_1$.

Cette méthode est cependant peu précise car le tracé de la tangente n'est jamais aisé.

$$R = \frac{\tau}{C} ; R_1 = \frac{1,3 \times 10^{-3}}{1,0 \times 10^{-6}} = 1300 \Omega = 1,3 \text{ k}\Omega$$

Température θ (°C)	$\theta_1 = 20$	30	40	50	60
Constante de temps τ (ms)	$\tau_1 = 1,3$	0,9	0,6	0,4	0,3
Résistance R (k Ω) = τ / C	$R_1 = 1,3$	0,9	0,6	0,4	0,3



Étude d'une transformation chimique

Solution de départ

Un acide, selon Brønsted, est une espèce chimique capable de céder un proton H^+ .

L'acide étant irritant pour la peau, il faut porter des **gants**. Il est également irritant pour les yeux, il faut porter des **lunettes de protection**. Enfin, il est irritant pour les voies respiratoires, on travaille **sous hotte**.

Accès à la valeur du taux d'avancement final par une mesure pH-métrique

Lors de la dilution, $n_0 = C_0 V_0 = C_1 V$ soit $C_0 = \frac{C_1 V}{V_0}$; $C_0 = \frac{5,0 \times 10^{-2} \times 200}{1,00} = 10 \text{ mol.L}^{-1}$

Avec un acide très concentré, lors de l'ajout d'acide dans l'eau, il se produit un fort dégagement de chaleur lors de la dilution de cet acide. Il faut remplir partiellement remplie d'eau distillée la fiole jaugée pour limiter cet effet.

Voir le tableau d'avancement.

1	équation-bilan		AH _(aq)	+	H ₂ O	=	A ⁻ _(aq)	+	H ₃ O ⁺
2	Etat initial	x = 0	C ₁ V		solvant		0		0
3	en cours	x	C ₁ V - x		solvant		x		x
4	Etat final	x = x _F	C ₁ V - x _F		solvant		x _F		x _F
5	Etat maximal	x = x _{max}	C ₁ V - x _{max}		solvant		x _{max}		x _{max}

Voir le tableau d'avancement.

Si la transformation est totale, l'acide est totalement consommé, soit $C_1V - x_{\max} = 0$ d'où $x_{\max} = C_1V$

$$x_{\max} = 5,0 \times 10^{-2} \times 0,200 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_F = 10^{-\text{pH}} = 10^{-3,0} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$$

$$x_F = [\text{H}_3\text{O}^+]_F \times V = 1,0 \times 10^{-3} \times 0,200 = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

La réaction de l'acide AH sur l'eau est limitée car $x_F \ll x_{\max}$

$$\tau = \frac{x_F}{x_{\max}}$$

$$\tau = \frac{2,0 \times 10^{-4}}{1,0 \times 10^{-2}} = 2,0 \times 10^{-2} = 2,0 \%$$

L'acide contenu dans la solution S₀ ne peut être identifié car l'erreur réalisée sur la mesure du pH engendre une grande erreur sur la valeur de x_F.