

## Préambule

Ce document est une proposition de correction d'épreuve du CAPES externe de physique-chimie. Il ne doit pas être considéré comme un modèle de copie à rendre mais plutôt comme une aide à la correction.

Il est possible que quelques erreurs se soient glissées dans cette version. Si vous pensez en avoir trouvé une, merci de me contacter via l'adresse [phy-chim@laposte.net](mailto:phy-chim@laposte.net) ou en flashant le QR-code suivant ;



Si vous appréciez la qualité de ce document vous pouvez me soutenir en effectuant un don en cliquant [ICI](#) ou en flashant le QR-code ci-dessous :



Ce document est mis à disposition gratuitement selon les termes de la Licence Creative Commons : Attribution – Pas d'utilisation commerciale – Partage dans les mêmes conditions 4.0 International.



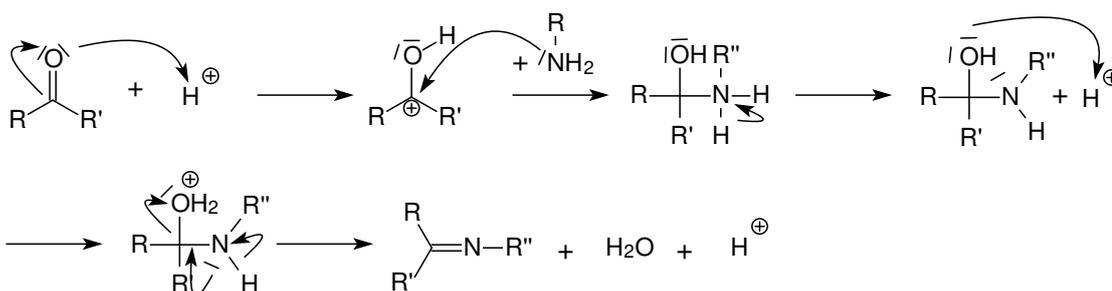
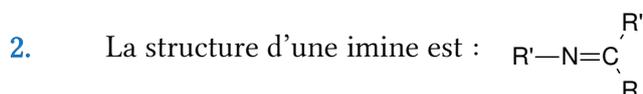
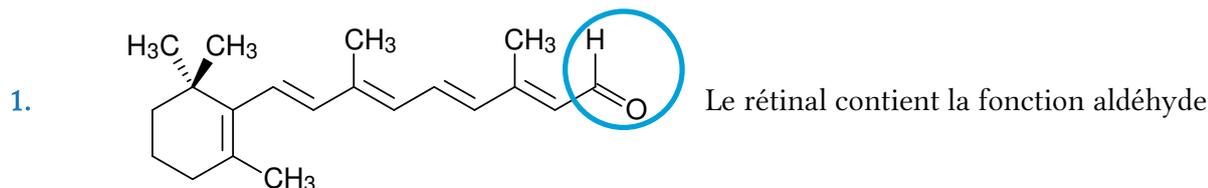
# Table des matières

## 2015 – EXPLOITATION D'UN DOSSIER DOCUMENTAIRE : ART ET SCIENCES PHYSIQUES

Partie I : La couleur.....	1
1.1. Perception de la couleur (Annexes 3.1 et 3.2)	
1.2. Synthèse additive et synthèse soustractive des couleurs	
Partie II : Chimie et art.....	3
2.1. Analyse documentaire sur la synthèse de la laurionite (khôl égyptien)	
2.2. Quelques aspects de la photographie argentique	
2.3. Quand la chimie rime avec poésie : le chant du styrène	
Partie III : Analyse d'œuvres d'art.....	11
3.1. La méthode PIXE (annexe 3.6)	
3.2. À propos du synchrotron SOLEIL (annexe 3.7)	

Partie I : La couleur

1.1. Perception de la couleur (Annexes 3.1 et 3.2)



L'opsine doit donc contenir un groupe amine.

3. Le rétinal et le néorétinal sont des diastéréoisomères. Ces deux molécules sont bien différentes car la rotation autour de la double liaison C=C est impossible et pour passer de l'une à l'autre il faut casser des liaisons.
4. Après avoir défini la notion de « système de liaisons conjuguées » les élèves auront à réfléchir à la question suivante : « Pourquoi le rétinal est-il une molécule colorée ? Entoure la partie de cette molécule qui permet de justifier ta réponse. »

1.2. Synthèse additive et synthèse soustractive des couleurs

5. Proposition d'explication : la lumière blanche est composée de lumières colorées. La synthèse soustractive permet d'obtenir de nouvelles couleurs en absorbant certaines de ces couleurs à

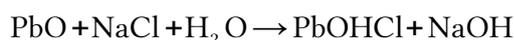
l'aide de pigments ou de colorants. La synthèse additive consiste à former de nouvelles couleurs en superposant plusieurs de ces couleurs en utilisant des sources de lumière colorée.

6. En observant le tableau de loin, les lumières diffusées par ces points voisins se superposent au niveau de la rétine et par synthèse additive forment de nouvelles couleurs. La couleur perçue est alors la somme de toutes les couleurs primaires de la synthèse additives qui n'ont pas été absorbées par les pigments.
7. Les questions 1 et 2 ne semblent pas présenter de difficultés aux élèves.
  - *Question 3* : Les élèves ont des difficultés pour identifier les procédés de séparation liquide-liquide et solide-liquide. Le mot homogène semble mal compris.
  - *Question 4* : Les élèves font la confusion entre les couleurs primaires de la synthèse additive et celle de la synthèse soustractive.
  - *Question 5* : Le mécanisme d'absorption-diffusion (synthèse soustractive) à l'œuvre lorsque la lumière initiale atteint la tenture est mal compris.
8. Proposition de remédiation :
  - Faire des exercices sur les méthodes de séparation, pour chaque méthode de séparation, associer un schéma avec le texte explicatif qui correspond.
  - Construction d'un tableau bilan par les élèves, organisés en groupes de 4, sur les synthèses additives et soustractives (schématisation, couleurs primaires, exemples d'utilisation).
9. Deux explications possibles :
  - Si on se fit au cercle chromatique, le jaune et le bleu ne sont pas des couleurs complémentaires. Leur addition ne donne pas du blanc mais du vert.
  - Les longueurs d'onde des radiations absorbées ne correspondent pas exactement au violet et l'orange et les intensités lumineuses des deux couleurs transmises (le jaune et le bleu) ne sont pas nécessairement égales. L'addition de ces deux couleurs transmises ne conduit pas nécessairement à du blanc.
10. Le cercle chromatique permet de trouver la couleur issue d'une synthèse additive ou soustractive. Dans les deux cas, la couleur résultant de la synthèse de deux couleurs A et B non contigus correspond à la couleur C qui les sépare. Si les deux couleurs A et B sont opposées sur le cercle alors elles sont complémentaires et leur addition/soustraction donne du blanc/noir.

### 2.1. Analyse documentaire sur la synthèse de la laurionite (khôl égyptien)

11.  $Z(\text{Pb}) = 82$ . La structure électronique correspondante est obtenue grâce à la règle de Klechkowski :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$   
 Les 2+2 électrons des couches 6s et 6p peuvent être facilement arrachés. Les deux états d'oxydation courants du plomb sont le plomb II  $\text{Pb}^{2+}$  et le plomb IV  $\text{Pb}^{4+}$ .

12. L'équation de la réaction décrite par Dioscoride est :



13. 
$$n(\text{PbO}) = \frac{m(\text{PbO})}{M(\text{PbO})} = \frac{324}{207+16} = 1,45 \text{ mol}$$

$$n(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})} = \frac{5 \times 3,41 \times 3 \times 30}{58,5} = 26,23 \text{ mol}$$

L'élimination de l'eau permet d'extraire la soude qui y est dissoute et ainsi de déplacer l'équilibre de la réaction de la question 12 vers la production de la laurionite d'après le principe de Le Châtelier qui stipule que « lorsqu'un système chimique en équilibre subit une perturbation alors celui-ci évolue vers un nouvel état d'équilibre, l'évolution s'opposant à la perturbation ».

14. Il faut étudier les équilibres entre :

- la laurionite  $\text{PbOHCl}$  et les ions  $\text{Pb}^{2+} \rightarrow$  droite n°1
- les ions  $\text{Pb}^{2+}$  et la blixite  $\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4 \rightarrow$  droite n°2
- la blixite  $\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4$  et la laurionite  $\text{PbOHCl} \rightarrow$  droite n°3

Droite n°1 :

$$K_1^0 = \frac{[\text{H}^+][\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}]}{[\text{Pb}^{2+}][\text{Cl}^-]} \text{ ie } \text{p}K_1^0 = -\log(K_1^0) = \text{pH} + \log[\text{Pb}^{2+}] + \log[\text{Cl}^-] - \log[\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}]$$

$$\begin{aligned} \log[\text{Cl}^-] &= \text{p}K_1 - \log[\text{Pb}^{2+}] + \log[\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}] - \text{pH} \\ &= 3,2 - (-2) + (-2) - \text{pH} \\ &= 3,2 - \text{pH} \end{aligned}$$

Droite n°2 :

$$K_2^0 = \frac{[\text{H}^+]^4 [\text{Cl}^-]^4 [\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4]}{[\text{PbOHCl}]^8}$$

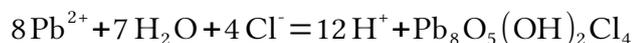
$$\text{D'où } \text{p}K_2^0 = 4 \text{pH} - 4 \log[\text{Cl}^-] - \log[\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4] + 8 \log[\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}]$$

$$\begin{aligned}\log[\text{Cl}^-] &= -\text{p}K_2^0/4 + \text{pH} - \log[\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4]/4 + 2\log[\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}] \\ &= -16/4 - (-2/4) + 2 \times (-2) + \text{pH} \\ &= -7,5 + \text{pH}\end{aligned}$$

Droite n°3 :

Il faut établir l'équation de la réaction qui régit l'équilibre entre la blixite et la laurionite.

En combinant les équations (1) et (2) de l'énoncé, on obtient :



La constante de réaction associée vaut :  $K_3^0 = \frac{[\text{Pb}^{2+}]^8 [\text{Cl}^-]^4}{[\text{H}^+]^{12} [\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4]} = (K_1^0)^8 \times K_2^0$

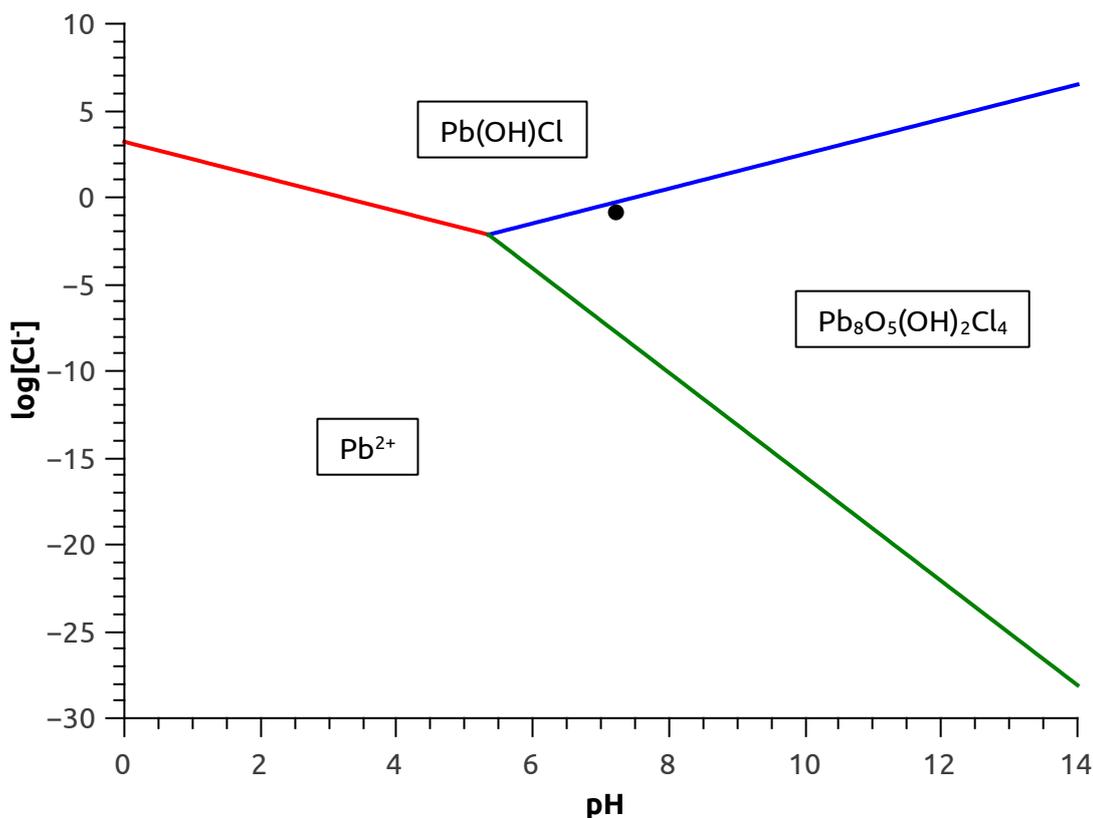
D'où :  $\text{p}K_3^0 = -8\log[\text{Pb}^{2+}] - 4\log[\text{Cl}^-] - 12\text{pH} + \log[\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4]$

$$\begin{aligned}\log[\text{Cl}^-] &= -\text{p}K_3^0/4 - 2\log[\text{Pb}^{2+}] + \log[\text{Pb}_8\text{O}_5(\text{OH})_2\text{Cl}_4]/4 - 3\text{pH} \\ &= (3,2 \times 8 + 16)/4 - 2 \times (-2) + (-2)/4 - 3\text{pH} \\ &= 13,9 - 3\text{pH}\end{aligned}$$

L'intersection des 3 droites se fait pour un pH tel que :

$$3,2 - \text{pH} = -7,5 + \text{pH} = 13,9 - 3\text{pH}$$

Soit pour  $\text{pH} = 5,35$  ce qui correspond à  $\log[\text{Cl}^-] = -2,15$ .



15. La masse de chlorure de sodium contenue dans un litre de sérum physiologique est :

$$m(\text{NaCl}) = \rho \times d \times \%m = 1000 \times 1,00 \times 0,009 = 9 \text{ g}$$

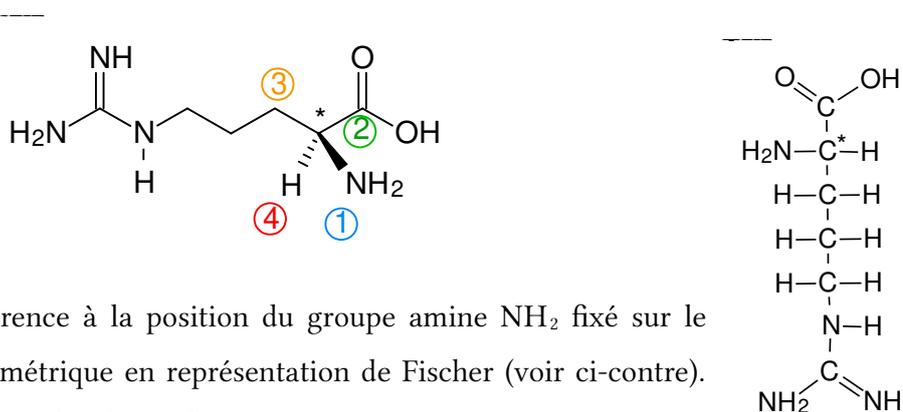
$$\text{Soit } n(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})} = \frac{9}{23+35,5} = 0,154 \text{ mol et } [\text{Cl}^-] = 0,154 \text{ mol.L}^{-1}.$$

Le point correspondant au sérum physiologique aura pour coordonnées :

$$(\log[\text{Cl}^-]; \text{pH}) = (-0,81; 7,2) \text{ (point noir sur le graphique)}$$

La laurionite n'est pas stable dans la liquide lacrymale (elle se transforme en blixite). À la fin de la « recette », l'élimination de l'eau (et de la soude qu'elle contient) permet d'abaisser le pH de la préparation et ainsi d'assurer la stabilité de la laurionite.

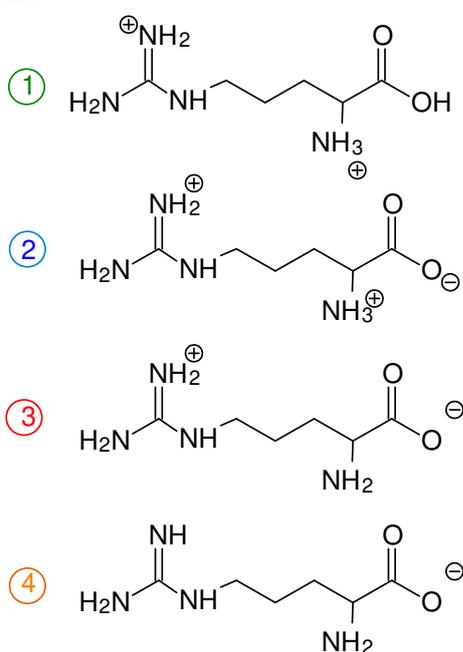
16. L'ordre de chaque fragment fixé sur le carbone asymétrique (marqué par une \*) est défini par les règles de Cahn-Ingold-Prelog (CIP). La configuration absolue de ce carbone est S.



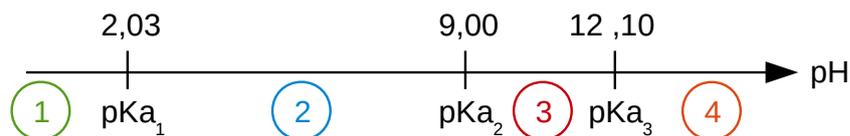
La lettre L fait référence à la position du groupe amine NH<sub>2</sub> fixé sur le dernier carbone asymétrique en représentation de Fischer (voir ci-contre).

Ici, il est à gauche, la molécule est dite L.

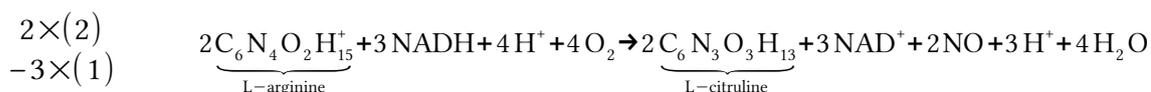
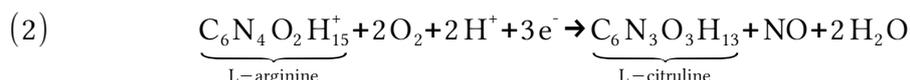
17. Les 4 formes possibles de la L-arginine sont :



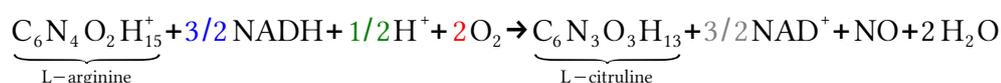
Le diagramme de prédominance correspondant est :



Le pH intracellulaire est de l'ordre de 7 la forme de la L-arginine qui prédomine est bien la forme n°2 qui est représentée sur l'énoncé.



En simplifiant par  $3\text{H}^+$  et en divisant les nombres stœchiométriques par 2 on obtient :



Soit :  $a=3/2$     $b=1/2$     $c=2$     $d=3/2$

18. Difficultés potentielles pour un élève de seconde :

- pour compter les atomes de part et d'autre de l'équation de réaction.
- pour compter correctement les charges des entités chimiques
- pour choisir quel est le nombre stœchiométrique à ajuster en premier.

19. Les ions  $\text{Pb}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  possèdent la même charge électrique et des rayons ioniques proches.

## 2.2. Quelques aspects de la photographie argentique



21. L'hydroquinone possède deux fonctions hydroxyle dont le caractère acide est renforcé par la stabilisation par résonance de sa dibase conjuguée.

Les équations de réactions chimiques utiles par la suite sont :

Équation de réaction	Constante de réaction
$\text{H}_2\text{Q} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HQ}^- + \text{H}_3\text{O}^+$	$k_{a1} = [\text{H}^+][\text{HQ}^-]/[\text{H}_2\text{Q}]$
$\text{HQ}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Q}^{2-} + \text{H}_3\text{O}^+$	$k_{a2} = [\text{H}^+][\text{Q}^{2-}]/[\text{HQ}^-]$
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$k_e = [\text{OH}^-][\text{H}^+]$

• État initial :

$$\circ \quad n_1(\text{OH}^-) = c(\text{NaOH}) \times V = 1,0 \times 100 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ mol}$$

$$\circ n_i(\text{H}_2\text{Q}) = \frac{m(\text{H}_2\text{Q})}{M(\text{H}_2\text{Q})} = \frac{2,5}{6 \times 12 + 6 + 2 + 16} = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$$

- 1<sup>ère</sup> réaction : réaction entre les ions hydroxyde  $\text{OH}^-$  et l'hydroquinone  $\text{H}_2\text{Q}$



La constante de cette réaction est très supérieure à 1, elle est totale.

- 2<sup>ème</sup> réaction : réaction entre les ions hydroxyde  $\text{OH}^-$  et les ions  $\text{HQ}^-$



La constante de cette réaction est très supérieure à 1, elle est totale.

- État final :

- $n_f(\text{OH}^-) = 0,1 - 2 \times 2,3 \cdot 10^{-2} = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$
- $n_f(\text{H}_2\text{Q}) = 0 \text{ mol}$
- $n_f(\text{HQ}^-) = 0 \text{ mol}$
- $n_f(\text{Q}^{2-}) = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$

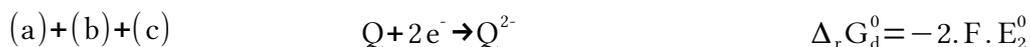
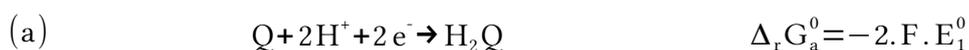
Dans l'état final, la concentration en ions hydroxyde vaut :

$$[\text{OH}^-] = \frac{n_f(\text{OH}^-)}{V_{\text{tot}}} = \frac{5,4 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-3}} = 0,27 \text{ mol.L}^{-1}$$

On en déduit :  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = \text{p}k_e + \log[\text{OH}^-] = 14 + \log(0,27) = 13,4$

À ce pH, c'est bien la forme  $\text{Q}^{2-}$  de l'hydroquinone prédomine.

22. La véritable demi-équation électronique est :  $\text{Q} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Q}^{2-}$



D'après la loi de Hess :  $\Delta_r G_d^0 = \Delta_r G_a^0 + \Delta_r G_b^0 + \Delta_r G_c^0$ .

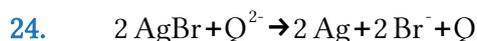
On en déduit :  $E_2^0 = E_1^0 - \frac{RT \cdot \ln(10)}{2 \cdot F} (\text{p}k_{a_1} + \text{p}k_{a_2}) = 0,055 \text{ V}$

23. La demi-équation électronique étudiée est :  $\text{AgBr} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Br}^-$



De plus  $\Delta_r G_c^0 = \Delta_r G_a^0 + \Delta_r G_b^0$

On en déduit :  $E_4^0 = E_3^0 - \frac{RT \cdot \ln(10)}{F} pK_s = 0,080 \text{ V}$



25. • Données :

Temps de réaction	$t_1 = 3 \text{ min}$	$t_2 = 8 \text{ min}$	$t_3 = ?$
Température de réaction	$T_1 = 298 \text{ K}$	$T_2 = 290 \text{ K}$	$T_3 = 288 \text{ K (15°C)}$

• Hypothèses :

- La vitesse de la réaction de révélation est proportionnelle à une constante notée  $k$ .
- Cette constante  $k$  vérifie la loi empirique d'Arrhénius :  $k = A \times e^{-E_a/(RT)}$
- L'énergie d'activation  $E_a$  ne dépend pas de la température  $T$
- Le temps de réaction  $t$  est inversement proportionnel à la constante de réaction  $k$ .

• 1<sup>ère</sup> étape : calcul de l'énergie d'activation

En utilisant la loi d'Arrhénius :  $\frac{k_2}{k_1} = e^{\frac{E_a}{R} \times (1/T_1 - 1/T_2)}$

Comme  $t$  est inversement proportionnel à  $k$  :  $\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_a}{R} \times (1/T_1 - 1/T_2)}$

Soit  $E_a = R \times \frac{\ln(t_1/t_2)}{1/T_1 - 1/T_2} = 8,31 \times \frac{\ln(3/8)}{1/298 - 1/290} = 8,8 \cdot 10^4 \text{ J}$

• 2<sup>ème</sup> étape : calcul du temps de réaction à 15°C

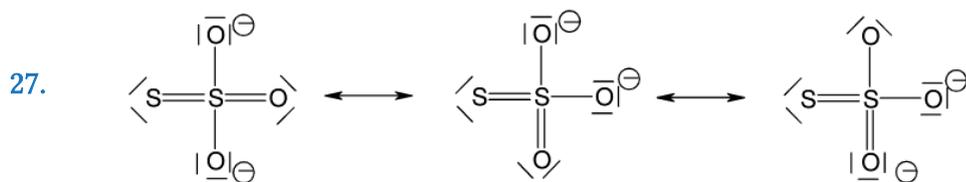
En utilisant un raisonnement analogue au précédent :  $\frac{t_3}{t_2} = e^{\frac{E_a}{R} \times (1/T_3 - 1/T_2)}$

Soit  $t_3 = t_2 \times e^{\frac{E_a}{R} \times (1/T_3 - 1/T_2)} = 8 \times e^{\frac{8,8 \cdot 10^4}{8,31} \times (1/288 - 1/290)} = 10,3 \text{ min}$

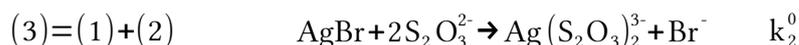
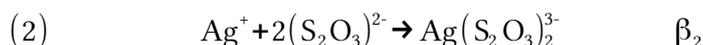
A 15°C le temps de révélation sera de 10 min et 19 s.

26. L'opération de révélation doit être limitée dans le temps pour éviter d'obtenir une image trop contrastée.

Le bain d'arrêt est un liquide acide (pH~4) qui transforme la totalité de l'hydroquinone basique ( $\text{Q}^{2-}$ ) en hydroquinone acide ( $\text{H}_2\text{Q}$ ). Ainsi le potentiel oxydoréduction du nouveau couple en jeu ( $\text{Q}/\text{H}_2\text{Q}$ ) est plus élevé et la réduction des ions  $\text{Ag}^+$  par l'hydroquinone ne se fait plus.



La molécule de thiosulfate ( $S_2O_3^{2-}$ ) est de type  $AX_4$  elle a donc une géométrie tétraédrique.



On obtient :  $k_2^0 = k_s \times \beta_2 = 10^{-12} \times 10^{13.5} = 31 \gg 1$

29.  $m_{tot}(AgBr) = 2000 \times 120 \cdot 10^{-3} = 240 \text{ g}$

$$n_{tot}(AgBr) = \frac{m_{tot}(AgBr)}{M(AgBr)} = \frac{240}{108 + 80} = 1,28 \text{ mol}$$

La quantité de thiosulfate à utiliser est :  $n(Na_2S_2O_3) = 2 \times n(AgBr) = 2,56 \text{ mol}$

Ce qui correspond à une masse :

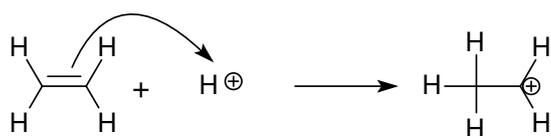
$$\begin{aligned} m(Na_2S_2O_3) &= n(Na_2S_2O_3) \times M(Na_2S_2O_3) \\ &= 2,56 \times (2 \times 23 + 2 \times 32 + 3 \times 16) \\ &= 404,48 \text{ g} \end{aligned}$$

30. Proposition d'activité : Prise d'une photographie argentique et traitement.

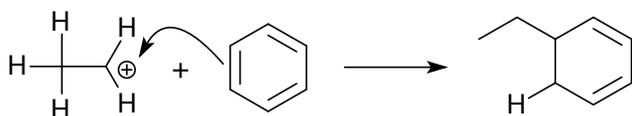
Les élèves ont à leur disposition différents produits (hydroquinone, acide acétique, thiosulfate de sodium). En travaillant par groupes de 4, ils doivent proposer et mettre en œuvre un protocole pour préparer les solutions qui seront utilisées lors du développement de la photographie. Une fois ces solutions prêtes, chaque élève photographie une scène de son choix puis la développe en chambre noire (en respectant les conditions de sécurité).

Pour aller plus loin, on peut leur demander d'écrire les équations des réactions qui correspondent à chaque étape du traitement (révélation, arrêt, fixation).

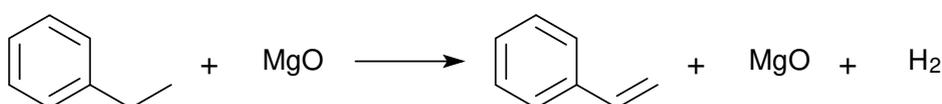
### 2.3. Quand la chimie rime avec poésie : le chant du styrène



31.



32.



Pour un élève de terminale S, il s'agit d'une réaction d'élimination (avec catalyse hétérogène).

33. L'enthalpie libre standard de réaction est donnée par :

$$\begin{aligned}\Delta_r G^\circ(T) &= \Delta_r H^\circ(T) - T \Delta_r S^\circ(T) \\ &= -R \cdot T \cdot \ln K^\circ(T)\end{aligned}$$

Dans l'approximation d'Ellingham l'enthalpie standard de réaction et l'entropie standard de réaction sont indépendants de la température T et on a :

$$\frac{d \ln K^\circ}{dT} = \frac{\Delta_r H^\circ}{R \cdot T^2} \quad (\text{relation de Van't Hoff}) \quad \text{et} \quad \frac{d(T \cdot \ln K^\circ)}{dT} = \frac{\Delta_r S^\circ}{R}$$

$$\Delta_r H^\circ = \frac{R \times \ln(K_{600}^\circ / K_{750}^\circ)}{1/T_{750} - 1/T_{600}}$$

De la première relation on déduit :

$$\begin{aligned}&= \frac{8,31 \times \ln(1,24 \cdot 10^{-4} / 1,92 \cdot 10^{-2})}{1/750 - 1/600} \\ &= 126 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

$$\Delta_r S^\circ = R \times \frac{T_{750} \times \ln K_{750}^\circ - T_{600} \times \ln K_{600}^\circ}{T_{750} - T_{600}}$$

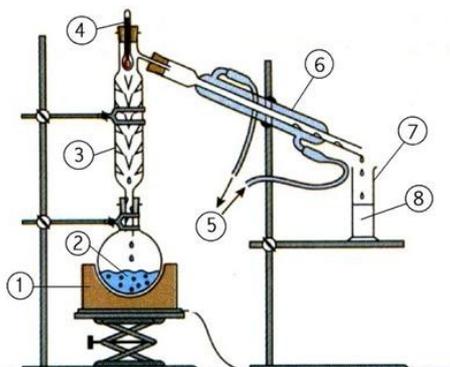
De la seconde on en déduit :

$$\begin{aligned}&= 8,31 \times \frac{750 \times \ln(1,92 \cdot 10^{-2}) - 600 \times \ln(1,24 \cdot 10^{-4})}{750 - 600} \\ &= 135 \text{ J/K/mol}\end{aligned}$$

L'enthalpie standard de réaction est positive, la réaction est endothermique, elle est favorisée par une augmentation de la température en vertu des lois de modération de Le Chatelier.

L'entropie standard de réaction est positive, la réaction produit de la matière gazeuse, elle est favorisée par une diminution de la pression en vertu des lois de modération de Le Chatelier.

34.



1. Chauffe-ballon
2. Résine de styrax + solvant
3. Colonne vigreux
4. Thermomètre
5. Circulation d'eau
6. Réfrigérant à eau
7. Éprouvette graduée
8. Distillat (styrène)

35. Le styrène est obtenu par polymérisation de molécules de styrène. La polymérisation consiste à former des liaisons entre de petites molécules appelées monomères (le styrène) pour obtenir une grosse molécule appelée polymère (le polystyrène). Cette dernière, composée de nombreux atomes, a une masse molaire élevée.

36. Pour un solvant donné, un pigment est une espèce colorée non soluble dans ce solvant. À l'inverse, un colorant y sera soluble.

37. Pistes de questionnement :

- Dans le poème, identifie les deux méthodes qui permettent d'obtenir du styrène.
- À partir de la phrase suivante, propose une définition pour le terme matériau artificiel. « Le styrène est un matériau qui peut-être de synthèse ou d'origine naturelle. En revanche, le polystyrène est un matériau artificiel. »

## Partie III : Analyse d'œuvres d'art

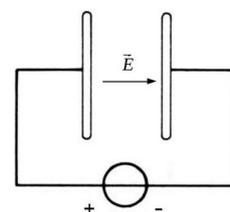
### 3.1. La méthode PIXE (annexe 3.6)

38. Proton : 1 proton + 0 neutron → charge +e

Deutéron : 1 proton + 1 neutron → charge +e

Alpha : 2 protons + 2 neutrons → charge +2e

39. Les ions subissent une force  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$  avec  $q > 0C$ . Ils se déplacent donc vers la droite.



40. Lion formé à l'issue de l'étape n°1 n'est pas dans son état fondamental, car il contient une couche électronique interne, de basse énergie, incomplète, il est donc instable.

41. La désexcitation d'un électron au sein d'un atome va émettre un photon. L'énergie de ce photon est quantifiée et sera égale à la différence d'énergie entre le niveau électronique de départ et celui d'arrivée. L'énergie de chacun de ces niveaux est caractéristique d'un atome.

42. Problématique :

- Le manuscrit analysé est-il réellement un manuscrit copte ?

Données :

- un document sur les encres métallo-gallique
- un document sur la méthode PIXE
- le diagramme d'énergie de l'élément fer (gradué en keV)
- le spectre X du manuscrit obtenu par la méthode PIXE (l'axe des abscisses sera modifié pour faire apparaître les fréquences)
- la formule  $\Delta E = h \times \nu$

Difficultés possibles :

- pour calculer les énergies de chacune des transitions électroniques du fer à l'aide du diagramme d'énergie.
- pour utiliser la formule  $\Delta E = h \times \nu$  notamment au niveau des unités.

Compétences mises en jeu :

- Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière
- Utiliser la relation  $\Delta E = h \times \nu$  pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie

### 3.2. À propos du synchrotron SOLEIL (annexe 3.7)

43. L'électron n'est soumis qu'à la seule force magnétique :  $\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$  avec  $q = -e$ .

Le travail de cette force est :  $W(\vec{F}_m) = (q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot (\vec{v} \cdot dt) = 0$  J

D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_m) = 0 \text{ J soit } E_c = \text{Constante}$$

44. Dans le repère de Frenet, la vitesse vaut :  $\vec{v} = v \cdot \vec{u}_T$ .

L'accélération vaut :  $\vec{a} = a_T \vec{u}_T + a_N \vec{u}_N$  avec  $a_T = dv/dt$  et  $a_N = v^2/\rho$ .

La force magnétique vaut :  $\vec{F}_m = -e \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} = e \cdot v_T \cdot B_0 \cdot \vec{u}_N$

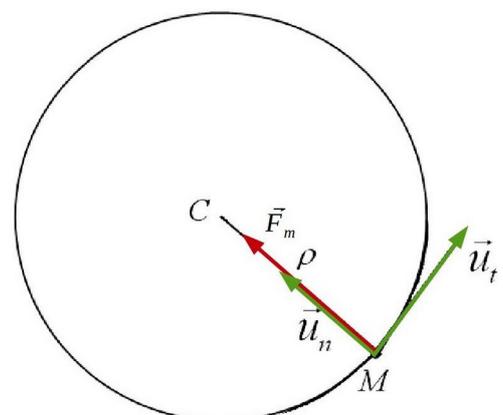
La deuxième loi de Newton appliquée à l'électron donne :  $m_e \cdot \vec{a} = \vec{F}_m$

En projection sur  $\vec{u}_N$  et sur  $\vec{u}_T$  on obtient :

$$m_e \cdot dv/dt = 0 \quad (A)$$

$$m_e \cdot v^2/\rho = +e \cdot v \cdot B_0 \quad (B)$$

$$a_z = 0 \quad (C)$$



D'après (C), le mouvement est contenu dans le plan Oxy. D'après (A) on sait que  $v = \text{constante} = v_0$ . Donc dans (B), le rayon de courbure  $\rho$  est nécessairement constant, c'est le rayon du cercle décrit par l'électron et il vaut :

$$\rho = \frac{m_e \cdot v_0}{e \cdot B_0}$$

45. D'après le texte, les électrons entrent dans l'anneau de stockage avec une énergie de 2 750 MeV. Pour calculer la valeur de  $\gamma$  on utilise la relation de l'énoncé :

$$\gamma = \frac{E}{m \cdot c^2} = \frac{2750 \cdot 10^6}{511 \cdot 10^3} = 5,38 \cdot 10^3 \gg 1$$

L'étude précédente, classique, ne peut s'appliquer pour ces électrons relativistes.

En revanche l'étude reste similaire, il suffit de faire la modification suivante :  $m_e \rightarrow \gamma \cdot m_e$  et  $v_0 \rightarrow c$  (car  $\gamma \gg 1$ ).

On obtient alors : 
$$\rho = \frac{\gamma \cdot m_e \cdot v_0}{e \cdot B_0} = \frac{5,38 \cdot 10^3 \times 9,1 \cdot 10^{-31} \times 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \times 1,71} = 5,4 \text{ m}$$

46. Non, l'émission d'un rayonnement électromagnétique doit se traduire par une perte d'énergie cinétique.

47. Estimons la vitesse  $v$  des électrons :

À l'entrée dans le booster : 
$$\gamma = \frac{E}{m \cdot c^2} = \frac{100 \cdot 10^6}{511 \cdot 10^3} = 196 \gg 1 \text{ donc } v_i \approx c$$

À la sortie du booster : 
$$\gamma = \frac{E}{m \cdot c^2} = \frac{2750 \cdot 10^6}{511 \cdot 10^3} = 5,38 \cdot 10^3 \gg 1 \text{ donc } v_f \approx c$$

Lorsque les électrons sont dans le booster, les électrons se déplacent à une vitesse très proche de celle de la lumière.

D'après le schéma du synchrotron SOLEIL, le rayon du booster est égal à environ la moitié de celui de l'anneau de stockage.

$$P_{\text{booster}} = 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{booster}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \times R_{\text{anneau}} = \frac{1}{2} \times P_{\text{anneau}} = \frac{1}{2} \times 354 = 177 \text{ m}$$

Le nombre de tours de booster parcourus par l'électron vaut :

$$N = \frac{c \times t}{P_{\text{booster}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \times 0,2}{160} = 339 \text{ 000 tours}$$

48. Coups de pouce :

- Pour calculer la distance parcourue par un électron il faut calculer sa vitesse.
- La vitesse d'un électron peut-être calculée à partir du coefficient  $\gamma$ .
- Le facteur  $\gamma$  peut-être calculé à partir de l'énergie de l'électron.

- La vitesse d'un électron varie-t-elle sensiblement entre l'instant où il rentre dans le booster et l'instant où il le quitte ?
- Le schéma du synchrotron pourrait être utile pour déterminer le périmètre du booster.

49. Dans le cadre de la relativité restreinte, la mesure des longueurs et des durées dépend du référentiel (galiléen) d'étude. Toute cette théorie découle d'un postulat initial « la vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel d'étude ».

50. Il faut donner l'unité de la permittivité diélectrique du vide  $\epsilon_0$  aux élèves ( $C^2 \cdot s^2 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}$ ). Ils peuvent aussi rencontrer des difficultés pour déterminer l'unité de la puissance P. Dans ce cas il faut rappeler les relations  $P = E / \Delta t$  et  $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ , deux formules en lien avec le programme de Terminale S.

51. La cartographie d'un tableau pour un élément chimique consiste à détecter, par radiographie X ou par une autre méthode, la présence de cet élément dans chacune des zones du tableau. Sa présence permettra d'attester de l'utilisation d'au moins un pigment qui contient cet élément. En croisant la cartographie de plusieurs éléments, on peut identifier les pigments utilisés, en déduire la couleur des zones cartographiées et ainsi reconstruire une image cachée.