

SESSION 2025

**AGREGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : PHYSIQUE - CHIMIE

**COMPOSITION SUR LA CHIMIE ET LE TRAITEMENT
AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1500C	102	0386

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1500C	102	0386

Pigments et colorants

Dans ce problème, on s'intéresse à divers aspects analytiques et synthétiques liés à des colorants et des pigments. Ces espèces, ayant pour propriété commune d'influencer la couleur perçue, sont utilisées depuis la préhistoire par l'être humain dans des rôles esthétiques ou artistiques, ainsi qu'à des fins de communication.

Leurs natures chimiques sont très variées : des espèces organiques ou minérales, et presque tous les éléments de la classification périodique peuvent être impliqués dans les pigments ou les colorants.

Ce problème, composé de quatre parties indépendantes, illustre la variété des différentes missions du chimiste dans le cadre de l'étude des pigments et des colorants à savoir l'analyse (partie I) et la synthèse (partie II) de pigments, l'étude de l'influence des conditions opératoires sur la couleur perçue (partie III) et, pour conclure, un exemple de fraude archéologique dévoilée par l'analyse chimique (partie IV).

Les questions sont posées à l'aide d'un ou plusieurs verbes d'action en **gras**. L'évaluation tient compte du respect de chacune des consignes ainsi formulées.

Des questions pédagogiques et didactiques reliées aux concepts abordés dans les différentes parties sont insérées dans le corps du texte. Elles sont signalées par l'indication **QP** et représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

Certaines questions sont repérées par une barre noire dans la marge gauche. Leur résolution demande une prise d'initiative de la part du candidat ou de la candidate.

L'évaluation des réponses par le jury porte tout particulièrement sur l'analyse physique des situations étudiées, l'intelligibilité et la clarté de la rédaction et la mise en place d'une démarche raisonnée de résolution.

Contenu du sujet

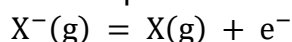
Données numériques.....	2
I. Analyser un pigment : la céruse.....	4
II. Synthétiser un pigment : le rouge para.....	6
III. Modifier une couleur perçue par l'environnement chimique.....	8
IV. Authentifier des œuvres d'art.....	13
Annexe 1.....	17
Annexe 2.....	22
Annexe 3.....	24
Annexe 4.....	25
DOCUMENT RÉPONSE A RENDRE AVEC LA COPIE.....	26

Données numériques

- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Constante de Faraday : $F = 96\,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Constante de Planck : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- Charge élémentaire : $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Célérité de la lumière : $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- Affinité électronique

Définition : l'affinité électronique est l'enthalpie de réaction associée à la transformation :



Quelques valeurs à 25°C :

$$AE_{\text{F}} = 328 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$AE_{\text{Cl}} = 349 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$AE_{\text{Br}} = 325 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$AE_{\text{I}} = 295 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

- Z-score

Le Z-score permet de comparer deux valeurs. Dans le cas où les deux valeurs, x_1 et x_2 , sont chacune affectées d'une incertitude, respectivement u_1 et u_2 , le Z-score se calcule selon la relation :

$$z = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}}$$

- pKa à 25 °C

$$\text{pKa}(\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-}) = 10,3$$

$$\text{pKa}(\text{H}_2\text{CO}_3 / \text{HCO}_3^-) = 6,4$$

$$\text{pKa}(\text{HF} / \text{F}^-) = 3,2$$

$$\text{pKa}(\text{HCl} / \text{Cl}^-) = -7$$

$$\text{pKa}(\text{HBr} / \text{Br}^-) = -9$$

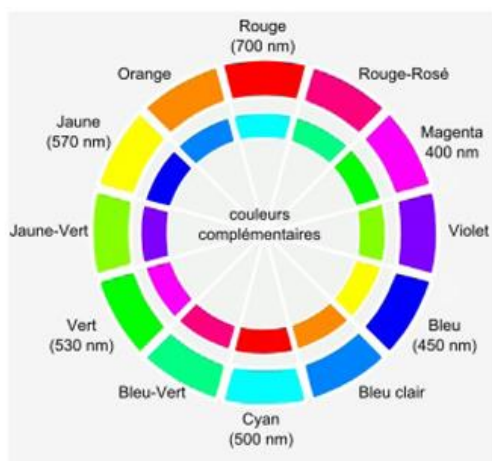
$$\text{pKa}(\text{HI} / \text{I}^-) = -10$$

- Conductivités molaires ioniques à dilution infinie à 25 °C

$$\lambda_0(\text{Pb}^{2+}) = 14,2 \text{ mS} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$$

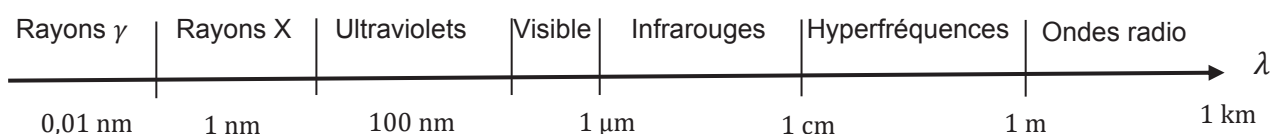
$$\lambda_0(\text{I}^-) = 7,7 \text{ mS} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$$

- Cercle chromatique



D'après eduscol.education.fr

- Domaines du spectre électromagnétique



- Potentiels standard d'oxydoréduction à 25 °C

oxydant	réducteur	Potentiel standard (V)
F ₂ (g)	F ⁻ (aq)	2,87
S ₂ O ₈ ²⁻ (aq)	SO ₄ ²⁻ (aq)	2,01
H ₂ O ₂ (s)	H ₂ O (l)	1,77
PbO ₂ (s)	PbSO ₄ (s)	1,69
MnO ₄ ⁻ (aq)	Mn ²⁺ (aq)	1,51
PbO ₂ (s)	Pb ²⁺ (aq)	1,45
Cl ₂ (g)	Cl ⁻ (aq)	1,36
Cr ₂ O ₇ ²⁻ (aq)	Cr ³⁺ (aq)	1,33
MnO ₂ (s)	Mn ²⁺ (aq)	1,23
O ₂ (g)	H ₂ O (l)	1,23
Br ₂ (l)	Br ⁻ (aq)	1,08
NO ₃ ⁻ (aq)	NO (g)	0,96
Hg ²⁺ (aq)	Hg (l)	0,85
NO ₃ ⁻ (aq)	NO ₂ ⁻ (aq)	0,84
Ag ⁺ (aq)	Ag (s)	0,80
Fe ³⁺ (aq)	Fe ²⁺ (aq)	0,77
O ₂ (g)	H ₂ O ₂ (l)	0,68
I ₂ (s)	I ⁻ (aq)	0,62

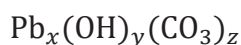
oxydant	réducteur	Potentiel standard (V)
Cu ²⁺ (aq)	Cu (s)	0,34
SO ₄ ²⁻ (aq)	SO ₂ (g)	0,17
S ₄ O ₆ ²⁻ (aq)	S ₂ O ₃ ²⁻ (aq)	0,08
H ⁺ (aq)	H ₂ (g)	0,00
Pb ²⁺ (aq)	Pb (s)	-0,13
Sn ²⁺ (aq)	Sn (s)	-0,14
Ni ²⁺ (aq)	Ni (s)	-0,23
Co ²⁺ (aq)	Co (s)	-0,29
PbSO ₄ (s)	Pb (s)	-0,36
Cd ²⁺ (aq)	Cd (s)	-0,40
Fe ²⁺ (aq)	Fe (s)	-0,44
Zn ²⁺ (aq)	Zn (s)	-0,76
Al ³⁺ (aq)	Al (s)	-1,66
Mg ²⁺ (aq)	Mg (s)	-2,37
Na ⁺ (aq)	Na (s)	-2,71
K ⁺ (aq)	K (s)	-2,92
Cs ⁺ (aq)	Cs (s)	-3,02

- Bandes de vibration de certains groupes caractéristiques en spectroscopie infrarouge

Groupe fonctionnel	Nombre d'onde σ (cm ⁻¹)
O - H	3200-3600
C - H	2850-3100
C \equiv N	2200-2300
C \equiv C	2050-2300
C = O	1650-1820
C = C	1500-1650
C - O	1100-1300

I. Analyser un pigment : la céruse

L'hydrocérusite est un carbonate de plomb dont la version synthétique, appelée céruse, a longtemps été utilisée comme pigment avant que sa toxicité ne pose problème. Sa structure générale est :



avec x , y et z des nombres entiers. On admet que le plomb est à l'état d'oxydation +II et on rappelle que le numéro atomique du plomb est 82. Les contre-ions hydroxyde et carbonate, permettent d'assurer la neutralité de ce composé solide.

L'objectif de cette partie est de déterminer les valeurs des indices x , y et z .

Q1. **Indiquer** la différence entre un pigment et un colorant.

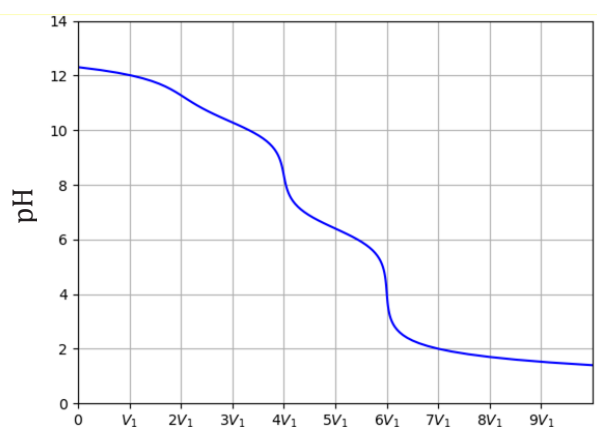
Q2. **Donner** la plage de longueurs d'onde du spectre électromagnétique qui est majoritairement affectée par un pigment ou un colorant et **préciser** l'origine microscopique de cet effet.

Q3. **Représenter** une structure de Lewis pour chacun des contre-ions hydroxyde et carbonate.

Q4. **Établir** la structure électronique de l'ion Pb^{2+} en détaillant les règles ou méthodes utilisées. **Préciser**, sur cette base, pourquoi les états d'oxydation privilégiés du plomb sont +II et +IV.

Q5. **Établir** une première relation entre les indices x , y et z .

Pour déterminer la formule brute de l'hydrocérusite, on s'intéresse maintenant au dosage d'une solution d'hydrocérusite de concentration c par une solution d'acide sulfurique, un diacide considéré comme fort, de même concentration c . La courbe obtenue par simulation numérique est représentée sur la figure 1. On négligera tout phénomène de précipitation éventuel qui pourrait être rencontré lors du dosage.



Volume de solution d'acide sulfurique ajouté

FIGURE 1 - Courbe représentative du dosage d'une solution d'hydrocérusite par une solution d'acide sulfurique de concentration c .

Le volume de référence noté V_1 est le même que sur la figure 2.

Q6. **Donner** les équations de réactions décrivant les transformations acido-basiques sur chacun des domaines de la courbe et **justifier** le nombre de sauts de pH observés et exploitables sur la courbe.

Q7. **En déduire** une relation impliquant les indices y , z et certains volumes repérés sur la courbe de dosage, puis une relation directe entre y et z .

Q8. **En déduire** une formule complète de l'hydrocérusite compatible avec les résultats précédents en donnant les plus petites valeurs entières acceptables pour x , y et z .

Afin de confirmer ce résultat, on effectue un dosage conductimétrique de la même solution d'hydrocérusite, donc toujours de concentration c , par une solution d'iodure de potassium de concentration $4c$. Un solide jaune PbI_2 est formé lors de la transformation. La courbe obtenue lors de ce dosage, représentant l'évolution de la conductivité de la solution σ en fonction du volume de solution d'iodure de potassium ajouté, est représentée sur la figure 2.

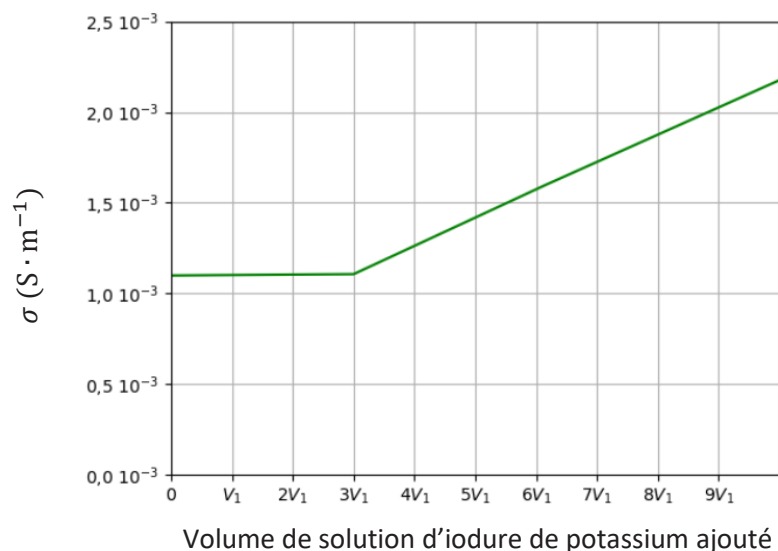


FIGURE 2 - Courbe représentative du dosage d'une solution d'hydrocérusite par une solution d'iodure de potassium de concentration $4c$.

Le volume de référence noté V_1 est le même que sur la figure 1.

Q9. **Représenter** schématiquement le montage permettant d'effectuer ce dosage.

Q10. **Représenter** de manière détaillée la (ou les) électrode(s) utilisée(s) lors de ce suivi en précisant les caractéristiques importantes de chaque élément.

Q11. Sur la base de la partie de la courbe située entre 0 et $3V_1$, **estimer** la valeur de $\lambda_0(K^+)$, la conductivité molaire ionique de l'ion potassium K^+ , et **commenter** la valeur obtenue.

Q12. **Commenter** l'allure générale de la courbe décrivant l'évolution de la conductivité.

Q13. **Établir** l'expression de x en fonction du (des) volume(s) repéré(s) sur la courbe de dosage et en **déduire** une relation entre x et z à partir des données du dosage précédent.

Q14. **Vérifier** que cette relation entre x et z conduit bien à la même formule de l'hydrocérusite que celle trouvée à la question Q8.

On aurait pu également envisager un dosage des ions plomb Pb^{2+} en utilisant ses propriétés oxydantes.

Q15. **Justifier** pourquoi il est difficile de doser directement les ions plomb Pb^{2+} .

Q16. **Proposer** le principe d'un dosage indirect d'une solution d'ions Pb^{2+} faisant intervenir de l'aluminium solide et une solution de dichromate de sodium ($2 Na^+ (aq) ; Cr_2O_7^{2-} (aq)$). Les équations de réaction décrivant les différentes étapes seront explicitées avec, le cas échéant, les constantes d'équilibre et les demi-équations électroniques associées.

II. Synthétiser un pigment : le rouge para

Dans cette partie, on s'intéresse à la synthèse d'un colorant organique, le rouge para. Il s'agit d'un colorant azoïque, ce qui signifie qu'il contient une double liaison $N = N$. On étudie ici certaines étapes de la synthèse à partir du nitrobenzène. Les premières étapes sont décrites sur la figure 3.

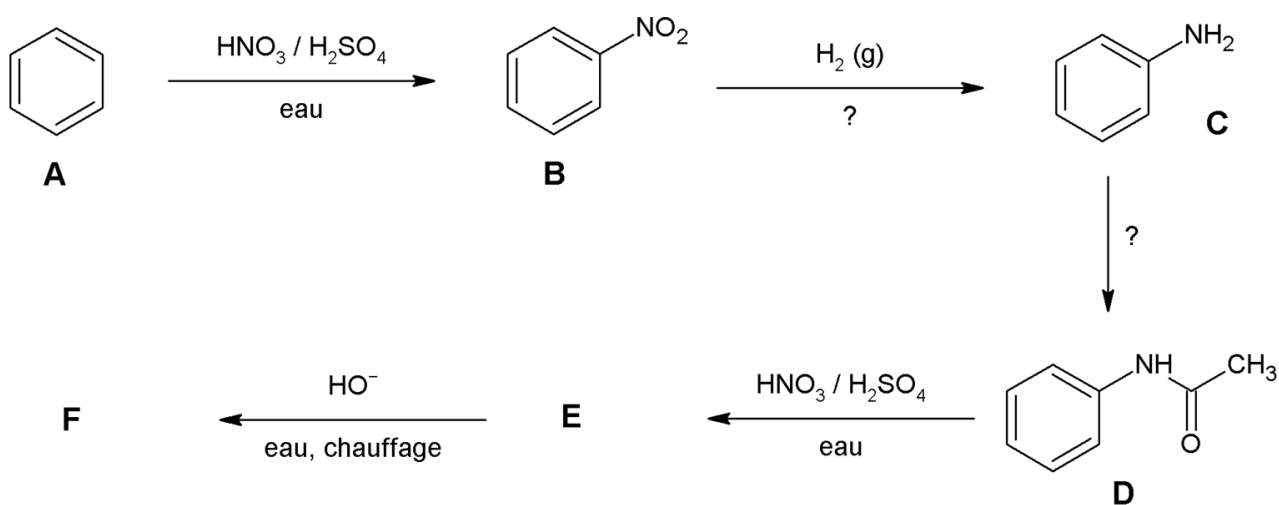


FIGURE 3 - Premières étapes de la synthèse du rouge para.

La première et la quatrième étape font toutes deux intervenir comme espèce clé l'ion nitronium NO_2^+ .

Q17. **Préciser** le type de réactivité attendu pour le composé **A** lors de sa conversion en **B**.

Q18. **Préciser** la nature de la transformation aboutissant, à partir du composé **B**, à la formation du produit **C** et **donner** une équation de réaction rendant compte de cette transformation. **Préciser** les conditions expérimentales permettant de procéder à cette transformation.

Q19. **Proposer** des réactifs permettant de réaliser la transformation **C** → **D** et **préciser** le mécanisme de la transformation impliquée.

Q20. **Décrire** la géométrie autour de l'atome d'azote de la molécule **D**.

Q21. En exploitant la figure 3, **donner** la formule brute du composé **E** et **montrer que** plusieurs produits sont envisageables.

Un de ces produits se forme majoritairement lors de la transformation, mais les autres peuvent se former de manière minoritaire.

Q22. **Proposer** une technique expérimentale permettant d'isoler le produit majoritaire et **expliquer** son principe en utilisant un schéma.

Q23. **Donner** le bilan de la transformation **E** → **F**.

La synthèse se poursuit ensuite par deux étapes à partir du composé **F** pour obtenir le rouge para **H**. Ces étapes sont représentées sur la figure 4.

*La connaissance de la structure du composé **F** n'est pas nécessaire pour la poursuite de la synthèse.*

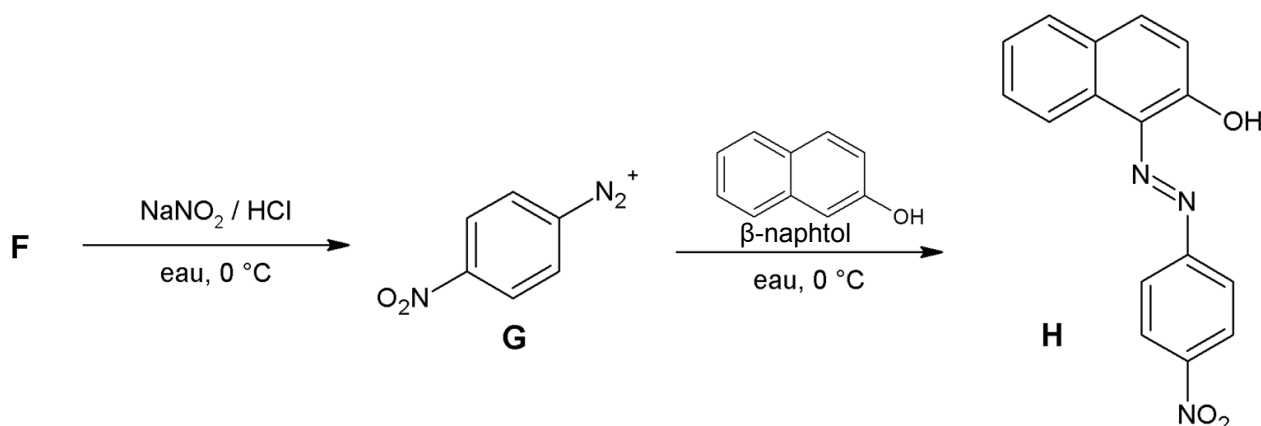


FIGURE 4 - Dernières étapes de la synthèse du rouge para.

Q24. Sans entrer dans le détail du mécanisme ou de la stéréochimie, **indiquer** les rôles respectifs du réactif **G** et du β -naphtol lors de l'étape **G** → **H**.

Q25. **Dénombrer** le nombre de stéréoisomères que l'on peut à priori envisager pour le composé **H** et **donner** la structure d'au moins l'un d'entre eux.

Le spectre infrarouge du rouge para présente, entre autres, des bandes caractéristiques mesurées à 3390 (large), 3100 (fine), 1600 (fine) cm^{-1} .

Q26. **Attribuer** les différentes bandes mesurées aux groupes fonctionnels du rouge para.

Le spectre UV-visible d'une solution de rouge para a également été enregistré. Il présente une bande d'absorption intense à 490 nm, les autres bandes étant dans l'ultra-violet.

Q27. **Commenter** la valeur mesurée sur le spectre UV-visible.

La caractérisation aurait également pu être complétée par l'enregistrement d'un spectre de RMN ^1H du rouge para dissous dans CDCl_3 . Dans ce solvant, les protons du benzène résonnent à 7,26 ppm.

Q28. **Déterminer** le nombre de systèmes de spin indépendants dans le rouge para.

III. Modifier une couleur perçue par l'environnement chimique

L'alizarine (1,2-dihydroxy-9,10-antracenedione) est un colorant rouge-orange dont la structure est représentée sur la figure 5. Elle est extraite de la garance et son utilisation remonte à l'Antiquité. L'un de ses intérêts est de présenter un groupement catéchol (1,2-benzènediol), ce qui lui confère des propriétés intéressantes sur le plan acido-basique autant que sur le plan des propriétés de complexation.

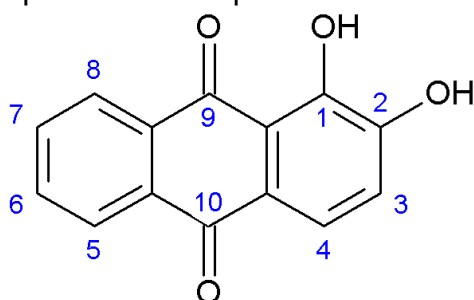


FIGURE 5 - Structure moléculaire de l'alizarine et numérotation des atomes qui sera utilisée dans cette partie.

En particulier, cette molécule est impliquée dans deux couples acido-basiques de pK_a de valeur $pK_{a1} = 6,8$ et $pK_{a2} = 12,9$.

Q29. **Comparer**, en justifiant, la valeur du pK_a du couple phénol/phénolate, $pK_a(\text{phénol/phénolate}) = 10,0$, à celle du couple butanol/butanolate, $pK_a(\text{butanol/butanolate}) = 16,1$.

Q30. **Justifier** la valeur du $pK_{a1} = 6,8$ de l'alizarine en s'appuyant sur la structure de la base conjuguée du couple concerné.

Le spectre UV-visible d'une solution d'alizarine dans le méthanol est représenté sur la courbe reportée sur la figure 6.

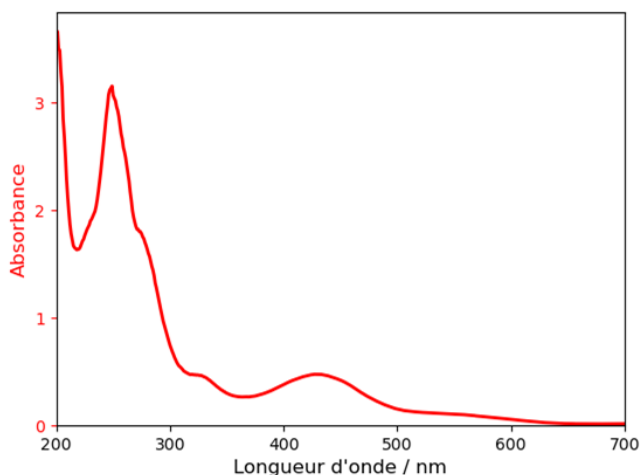


FIGURE 6 - Spectre UV-visible d'une solution d'alizarine dans le méthanol.

Ce spectre présente en particulier une bande principale mesurée à 429 nm qui correspond à la forme représentée sur la figure 5, dite forme normale, que l'on notera **N**. Néanmoins, une petite bande est observée entre 500 et 600 nm. Cette bande est attribuée à une autre espèce, dite tautomère, que l'on notera **T**, dans laquelle le proton normalement porté par l'oxygène porté par le carbone 1 est déplacé sur l'oxygène porté par le carbone 9. Cet équilibre est représenté sur la figure 7.

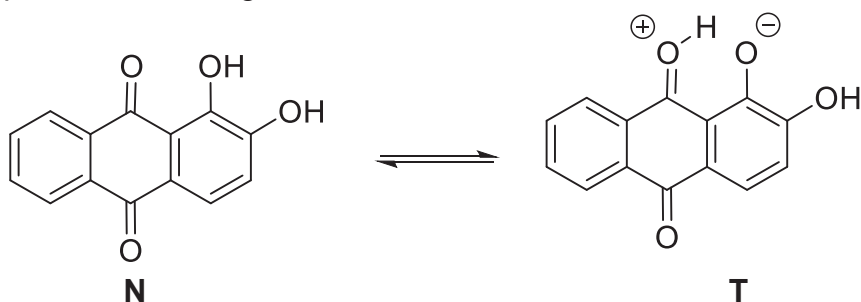


FIGURE 7 - Représentation de la forme normale de l'alizarine (gauche) et de sa forme tautomère (droite).

Afin de quantifier l'équilibre entre les deux formes, on mesure le spectre UV-visible de l'alizarine à plusieurs températures. Les résultats sont reportés sur la figure 8. Les spectres mesurés à différentes températures sont superposés sur la figure 8a et les flèches indiquent le sens de variation de l'intensité du signal mesuré lorsque la température augmente. La figure 8b représente une fonction de l'absorbance de la bande

à 429 nm (notée A_A) et de celle à 560 nm (notée A_B) en fonction de l'inverse de la température.

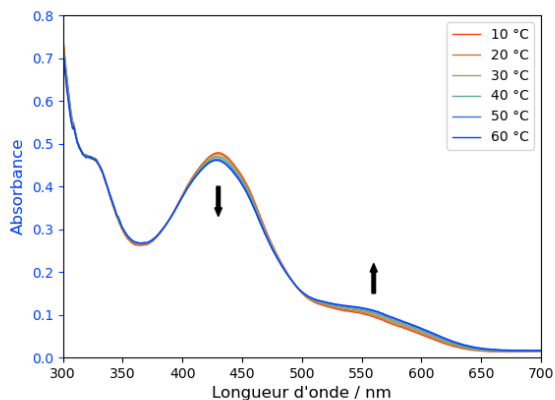


FIGURE 8a - Évolution du spectre d'absorption de l'alizarine en fonction de la température.

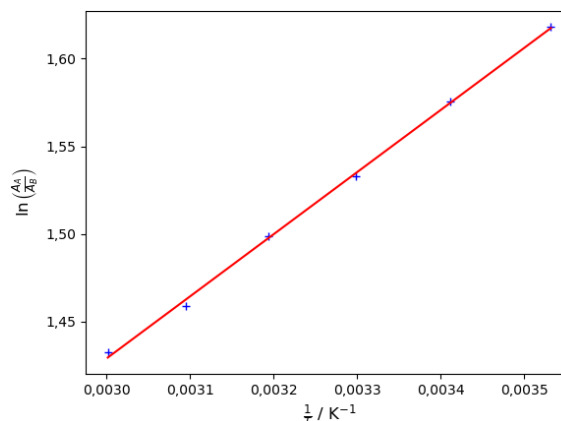


FIGURE 8b - Ajustement linéaire du logarithme de A_A/A_B

L'ajustement des données de la figure 8b est décrit, dans les unités du système international, par la relation :

$$\ln\left(\frac{A_A}{A_B}\right) = \frac{355}{T} + 0,365$$

Q31. **Donner** l'expression littérale de l'absorbance d'une solution contenant les deux composés **N** et **T** en fonction des paramètres pertinents.

Q32. **Commenter**, en lien avec l'équilibre étudié, l'évolution des deux bandes principales de ces spectres.

Q33. **Expliquer** l'intérêt du tracé de la figure 8b et, à partir de l'équation d'ajustement, **déterminer** l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^\circ$ et **commenter** la valeur obtenue.

Lorsque l'alizarine est placée en présence d'un sel métallique, elle est susceptible de former des complexes avec le cation. Dans le cas des ions aluminium Al^{3+} , le complexe formé, noté **C**, est représenté sur la figure 9 ci-dessous. L'étude de cette interaction est intéressante dans le contexte de l'opération de mordantage dans le traitement des textiles : l'ajout d'ions aluminium sur un textile permet de former un « pont » entre la fibre textile et le colorant, favorisant ainsi sa rétention.

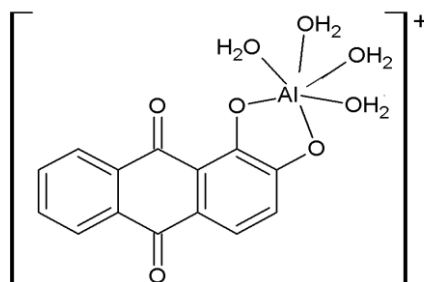


FIGURE 9 - Structure moléculaire du complexe **C**.

Cette structure a été obtenue par des études faisant intervenir de la spectroscopie électronique et des calculs de chimie quantique. Seule la première étape du raisonnement sera étudiée ici ; elle consiste à effectuer le dosage d'une solution d'alizarine par une solution de sels d'aluminium. Initialement, le pH des solutions est neutre. Le spectre est enregistré après des ajouts régulièrement espacés de la solution titrante, et tous les spectres mesurés sont superposés sur la figure 10. Les flèches indiquent le sens de variation de l'absorbance des bandes observées lors de l'ajout de la solution d'ions aluminium Al^{3+} .

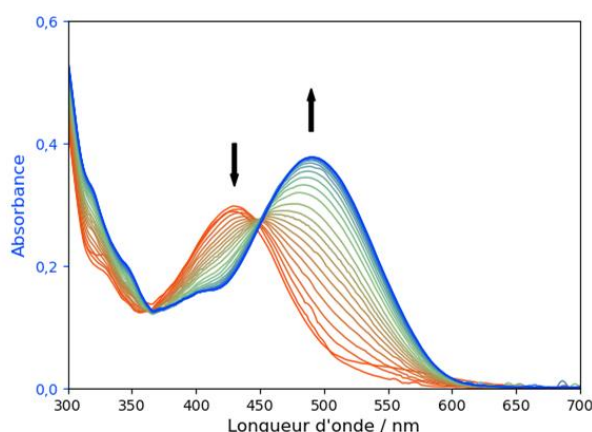


FIGURE 10 - Évolution du spectre UV-visible mesuré lors de l'ajout de la solution d'ions aluminium Al^{3+} .

Q34. **Décrire** l'évolution des deux bandes décrivant une absorption au-delà de 350 nm, en particulier en les associant à certaines espèces étudiées.

Q35. **Justifier** que les deux protons initialement présents dans la forme **N** de l'alizarine ne sont plus présents dans le complexe **C** malgré les valeurs des pK_a de l'alizarine.

Q36. **Établir** une équation ajustée de la transformation intervenant lors de la complexation étudiée.

Q37. **Déduire** des questions précédentes les évolutions en termes de pH et de couleur qui seront observées lors de la transformation.

Le complexe **C** fait intervenir deux liaisons Al – O. Sans utilisation de calculs de chimie quantique, il aurait été possible de proposer d'autres structures pour ce complexe.

Q38. **Proposer** une autre structure concevable comprenant deux liaisons Al – O et faisant intervenir deux molécules d'alizarine. **Justifier**, à l'aide d'un argument thermodynamique, pourquoi l'obtention de cette forme est moins probable.

Enfin, la question de la présence de plusieurs complexes différents pourrait se poser. On observe un point particulier (vers 450 nm) sur ce faisceau où tous les spectres se croisent.

Ce point est appelé point isosbestique et la présence d'au moins un point de ce type est caractéristique de l'existence d'un équilibre unique entre deux espèces absorbantes. On considère une transformation selon l'équation :



Lors de cette transformation, seul **R** est initialement présent, la quantité $[R] + [P]$ est donc fixée.

Q39. **Montrer que** dans ce cas, un point isosbestique apparaît pour les longueurs d'onde pour lesquelles un paramètre, à préciser, est le même pour les deux composés.

Q40. **Justifier** qualitativement à l'aide d'un schéma pourquoi un point de ce type existe en général dès que les composés **R** et **P** n'ont pas la même longueur d'onde d'absorption maximale.

Q41. En adaptant le schéma de la question Q40, **montrer que** la justification évoquée ne se généralise pas à trois espèces absorbantes quelconques. **En déduire** que la présence d'au moins un tel point est caractéristique d'un équilibre unique.

Q42. **Conclure** dans le cas de la complexation étudiée en donnant l'équilibre impliqué.

La formation des élèves à la démarche de modélisation est au cœur des objectifs des programmes de physique-chimie. La première colonne du tableau donné dans le **document réponse à rendre avec la copie** en décrit quelques caractéristiques tirées de la littérature¹.

QP43. **Compléter** la colonne 2 du tableau du **document réponse à rendre avec la copie**, en reliant les éléments constitutifs de la démarche de modélisation décrits dans le préambule du programme de seconde générale et technologique (2^{nde} GT) donné en annexe 1, aux caractéristiques générales d'un modèle données dans la colonne 1 du **document réponse**, lorsque c'est pertinent.

QP44. **Identifier** les caractéristiques d'un modèle qui ne sont pas encore abordées dans le programme de seconde.

QP45. **En choisir une et donner** en quelques mots un exemple d'activité réalisable dans le cadre général du programme de 2^{nde} GT et permettant de l'aborder néanmoins avec les élèves.

¹Rémi Bouard, Sophie Canac et Isabelle Kermen, « Modélisation des transformations chimiques : mise en regard d'un programme et de pratiques enseignantes », *RDST*, 25 | 2022, mis en ligne le 30 mai 2022, consulté le 25 novembre 2023. DOI : <https://doi.org/10.4000/rdst.4165>

QP46. **Compléter** les 4 cases non-grisées de la colonne 3 du **document réponse** en illustrant les différentes caractéristiques générales d'un modèle par celles du modèle de la réaction chimique tel qu'il est abordé en 2nde GT.

QP47. **Compléter** les 4 cases non-grisées de la colonne 4 du **document réponse** en illustrant chaque caractéristique générale d'un modèle par une activité réalisable en classe de 2nde GT dans le contexte du traitement de la partie 2. B) du programme. Chaque activité sera décrite brièvement par une courte phrase.

IV. Authentifier des œuvres d'art

En 1923, le musée du Louvre (Paris) a acquis une statue en verre bleu représentant une tête du pharaon Toutankhamon dont il était présumé qu'elle datait de la 18^{ème} dynastie (14^{ème} siècle avant notre ère). L'authenticité de cette statue a toujours été discutée par les historiens de l'art en raison d'incohérences avec les connaissances sur l'art égyptien (en particulier la forme de la perruque et la teinte exacte de bleu utilisée). Il a fallu néanmoins attendre la fin des années 1990 pour qu'il soit mis en évidence de manière indiscutable qu'il s'agissait bien d'un faux, datant au plus tôt du 18^{ème} siècle de notre ère, grâce à des analyses poussées effectuées sur l'accélérateur de particules AGLAÉ (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire).

La méthode utilisée consiste en la détection des éléments traces présents dans divers composants de la statue et en la comparaison des résultats avec ce qui est obtenu pour des objets certifiés de la 18^{ème} dynastie.

L'accélérateur de particules sert à focaliser un faisceau de protons sur une cible à analyser. Les protons accélérés ont une énergie cinétique de l'ordre de grandeur du MeV. Les protons ont un pouvoir pénétrant relativement faible et vont ainsi interagir avec les différents éléments présents à la surface de cette cible qui peuvent alors interagir avec les protons selon plusieurs mécanismes, dont l'ionisation des couches internes qui produit des rayons X (méthode PIXE) et l'induction de réactions nucléaires qui produit des rayons gamma (méthode PIGME). Les rayonnements émis sont ensuite analysés de manière à obtenir un spectre caractéristique du matériau étudié.

Q48. **Justifier** que l'utilisation d'un faisceau de proton est appropriée à l'étude d'œuvres d'art.

Q49. **Préciser** en quoi le principe de ces méthodes spectroscopiques diffère de celui des méthodes plus classiquement employées (UV-visible, infra-rouge) et **nommer**, en la justifiant, une méthode couramment utilisée fonctionnant sur le même principe.

Q50. En considérant que l'énergie d'ionisation des éléments légers est de l'ordre d'une dizaine d'eV, **calculer** l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du rayonnement requis. **En déduire**, laquelle des méthodes PIGME et PIXE est la plus adaptée à leur étude.

L'activité expérimentale de l'annexe 2 a été donnée en début d'année à une classe de spécialité physique-chimie de terminale générale. L'objectif de cette activité est d'effectuer le bilan d'une transformation chimique pour vérifier si elle est totale, en utilisant le modèle de la réaction chimique.

La littérature scientifique² fournit des indicateurs qui permettent d'estimer l'efficacité des actions professionnelles possibles d'un enseignant abordant en classe la construction du bilan d'une transformation chimique. Ils sont donnés dans la liste suivante :

Indicateurs d'efficacité de la construction du bilan « transformation(s) chimique(s) »
i1. Décrire les modifications visibles sans référence aux espèces chimiques
i2. Faire rechercher expérimentalement la présence de nouvelles espèces chimiques
i3. Faire décrire une transformation chimique en termes d'espèces chimiques (sans utilisation d'un langage perceptif)
i4. Faire référence au système chimique
i5. Parler d'état initial du système chimique
i6. Parler d'état final du système chimique
i7. Faire recenser les espèces présentes à l'état initial
i8. Faire recenser les espèces présentes à l'état final
i9. Effectuer des mesures puis calculer les quantités de matière des espèces à l'état initial/final
i10. Mettre en avant une composition qualitative ou semi-quantitative différente du système entre les deux états pour définir une transformation chimique
i11. Faire repérer un candidat réactif par la diminution de la quantité de l'espèce ou sa disparition
i12. Faire repérer un candidat produit par l'augmentation de la quantité de l'espèce ou son apparition
i13. Faire repérer un candidat spectateur par la non-évolution de la quantité de l'espèce.

QP51. **Indiquer** quels sont les critères indicateurs d'efficacité mobilisés lors de l'activité expérimentale de l'annexe 2.

QP52. Les tests effectués dans les bécher n°2 et n°3 de l'activité montrent la présence d'ions Pb^{2+} et d'ions I^- dans le filtrat. **Donner** la réponse attendue à la question 4).

QP53. **Illustrer** par un schéma légendé l'évolution de la composition du système étudié dans l'activité expérimentale, à l'état initial et à l'état final de la transformation chimique.

² Rémi Bouard, Sophie Canac et Isabelle Kermen, « Modélisation des transformations chimiques : mise en regard d'un programme et de pratiques enseignantes », *RDST*, 25 | 2022, mis en ligne le 30 mai 2022, consulté le 25 novembre 2023. DOI : <https://doi.org/10.4000/rdst.4165>

QP54. **Choisir** l'un des indicateurs d'efficacité qui n'est pas mobilisé dans l'activité et **proposer** une piste d'amélioration de cette activité qui en tient compte, pour aider les élèves à mieux comprendre la transformation chimique étudiée.

Un élève doit répondre à la question 5) de l'activité de l'annexe 2 chez lui car elle n'a pas pu être traitée en classe. Pour cela, il interroge une intelligence artificielle (I.A.) génératrice de contenu. La réponse donnée est en annexe 3.

QP55. **Commenter** la réponse et **critiquer** la validité des quatre hypothèses données par l'I.A. **Donner** la réponse attendue de la part d'un élève de terminale et **proposer** une expérience simple permettant de valider la (les) hypothèse(s) proposée(s).

L'analyse élémentaire d'un échantillon consiste à l'oxyder totalement (souvent par une réaction de combustion) et à quantifier la proportion de chaque oxyde, ce qui permet de remonter à la proportion des éléments présents dans l'échantillon. C'est une méthode souvent utilisée en chimie organique mais dont l'application en chimie minérale, comme ici, peut donner de bons résultats.

Le tableau donné en annexe 4 regroupe certains résultats de l'analyse élémentaire, effectuée à l'aide de l'accélérateur AGLAÉ, de quatre objets bleus attribués avec certitude à la 18^{ème} dynastie, et de deux points mesurés sur la tête bleue étudiée, au niveau du visage et de la perruque. Dans chaque case, la première valeur est le pourcentage de l'oxyde étudié par rapport au poids total d'oxydes, la deuxième est l'écart-type de cette valeur. La dernière ligne représente le pourcentage d'autres oxydes non étudiés individuellement.

Q56. À l'aide du tableau donné en annexe 4, **montrer**, en utilisant des calculs de Z-score judicieusement choisis, que cette analyse permet d'établir que les natures des verres constituant la tête bleue sont très différentes de celles des verres de la 18^{ème} dynastie.

Le verre est souvent transparent, mais il peut être opacifié par différents composés, comme c'est le cas de la tête bleue étudiée. Au cours de l'histoire, les composés $\text{Ca}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$, $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$, SnO_2 , $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2\text{PbO}$, $3\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2\text{PbO}$, Na_2SiF_6 ont été les principaux utilisés. L'un de ces composés a été introduit par les verriers vénitiens au 17^{ème} siècle de notre ère.

Q57. Sur la base des résultats reportés dans le tableau, **proposer** une structure pour le composé opacifiant utilisé au 18^{ème} siècle.

Q58. **Préciser**, en détaillant le raisonnement, parmi les objets attestés de la 18^{ème} dynastie, le(s)quel(s) est(sont) opaque(s) et le(s)quel(s) est (sont) transparent(s).

Lors de sa fabrication, afin de rendre plus rugueuse la surface du verre pour lui donner un aspect plus authentique, la tête bleue a été traitée à l'acide fluorhydrique.

Q59. **Commenter** l'évolution de l'acidité des acides halohydriques au vu de l'évolution de l'électronégativité de l'halogène impliqué.

Q60. **Justifier** qualitativement que les affinités électroniques des halogènes sont assez proches les unes des autres et en déduire la conséquence sur l'étude des pK_a respectifs.

Q61. **Préciser** un phénomène majeur négligé dans les raisonnements précédents pour étudier la réactivité des acides halohydriques.

Q62. **Justifier**, au niveau microscopique, l'utilité de l'acide fluorhydrique pour vieillir le verre.

❖
❖ FIN DES QUESTIONS ❖
❖

Annexe 1

Extraits des programmes de collège et de lycée général dédiés aux transformations de la matière

Annexe 1.a - Extrait du programme de physique-chimie de cycle 4 (Bulletin officiel n°31 du 30 juillet 2020)

Organisation et transformations de la matière.

Attendus de fin de cycle

- Décrire la constitution et les états de la matière
- Décrire et expliquer des transformations chimiques
- Décrire l'organisation de la matière dans l'Univers

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Décrire et expliquer des transformations chimiques	
<p>Mettre en œuvre des tests caractéristiques d'espèces chimiques à partir d'une banque fournie.</p> <p>Identifier expérimentalement une transformation chimique.</p> <p>Distinguer transformation chimique et mélange, transformation chimique et transformation physique.</p> <p>Interpréter une transformation chimique comme une redistribution des atomes.</p> <p>Utiliser une équation de réaction chimique fournie pour décrire une transformation chimique observée.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Notions de molécules, atomes, ions. - Conservation de la masse lors d'une transformation chimique. <p>Associer leurs symboles aux éléments à l'aide de la classification périodique.</p> <p>Interpréter une formule chimique en termes atomiques : dioxygène, dihydrogène, diazote, eau, dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote.</p>	<p>Cette partie prendra appui sur des activités expérimentales mettant en œuvre différents types de transformations chimiques : combustions, réactions acide-base, réactions acides-métaux.</p> <p>Utilisation du tableau périodique pour retrouver, à partir du nom de l'élément, le symbole et le numéro atomique et réciproquement.</p>

Annexe 1.b - Extrait du programme de physique-chimie de 2nde générale et technologique (Bulletin officiel spécial n°1 du 22 janvier 2019)

- Préambule :

« Dans la continuité du collège, le programme de physique-chimie de la classe de seconde vise à faire pratiquer les méthodes et démarches de ces deux sciences en mettant particulièrement en avant la pratique expérimentale et l'activité de modélisation. [...] La démarche de modélisation occupe une place centrale dans l'activité des physiciens et des chimistes pour établir un lien entre le « monde » des objets, des expériences, des faits et le « monde » des modèles et des théories. Aussi, l'enseignement proposé s'attache-t-il à introduire les principaux éléments constitutifs de cette démarche, tels que : simplifier la situation initiale ; établir des relations entre grandeurs ; choisir un modèle adapté pour expliquer des faits ; effectuer des prévisions et les confronter aux faits ; recourir à une simulation pour expérimenter sur un modèle ; choisir, concevoir et mettre en œuvre un dispositif expérimental pour tester une loi. »

- Contenus :

2. Modélisation des transformations de la matière et transfert d'énergie	
<p>[...] L'étude des transformations chimiques, entamée au collège, est complétée par les notions de stœchiométrie, d'espèce spectatrice et de réactif limitant. L'analyse de l'évolution d'un système pour modéliser sa transformation chimique par une réaction illustre une démarche de modélisation au niveau macroscopique. Elle nécessite de mettre en place une démarche expérimentale rigoureuse pour passer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'une description des modifications visibles ; - aux espèces chimiques, présentes dans l'état initial et qui ont réagi ; - à celles, présentes dans l'état final et qui ont été formées ; - et enfin, à l'écriture d'une réaction rendant compte au mieux des changements observés au niveau macroscopique [...]. 	
B) Transformation chimique	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Modélisation macroscopique d'une transformation par une réaction chimique. Écriture symbolique d'une réaction chimique. Notion d'espèce spectatrice. Stœchiométrie, réactif limitant.	Modéliser, à partir de données expérimentales, une transformation par une réaction, établir l'équation de réaction associée et l'ajuster. Identifier le réactif limitant à partir des quantités de matière des réactifs et de l'équation de réaction. <i>Déterminer le réactif limitant lors d'une transformation chimique totale, à partir de l'identification des espèces chimiques présentes dans l'état final.</i>

**Annexe 1.c - Extrait du programme de spécialité physique-chimie de 1^{ère} générale
(Bulletin officiel spécial n°1 du 22 janvier 2019)**

1. Suivi de l'évolution d'un système, siège d'une transformation	
<p>Cette partie poursuit l'étude de la modélisation macroscopique de la transformation chimique d'un système.</p> <p>Les notions de masse molaire, volume molaire et concentration en quantité de matière (en mol · L⁻¹) sont introduites pour déterminer la composition d'un système chimique. Pour décrire l'évolution d'un système, siège d'une transformation chimique, des bilans de matière complets sont effectués en s'appuyant sur la notion d'avancement (en mol). La notion de transformation totale et non totale est introduite en comparant la valeur de l'avancement final à celle de l'avancement maximal, sans référence à la notion d'équilibre chimique [...].</p>	
B) Suivi et modélisation de l'évolution d'un système chimique	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<p>Évolution des quantités de matière lors d'une transformation. État initial, notion d'avancement (mol), tableau d'avancement, état final.</p> <p>Avancement final, avancement maximal. Transformations totale et non totale. Mélanges stœchiométriques.</p>	<p>Décrire qualitativement l'évolution des quantités de matière des espèces chimiques lors d'une transformation. Établir le tableau d'avancement d'une transformation chimique à partir de l'équation de la réaction et des quantités de matière initiales des espèces chimiques. Déterminer la composition du système dans l'état final en fonction de sa composition initiale pour une transformation considérée comme totale. Déterminer l'avancement final d'une réaction à partir de la description de l'état final et comparer à l'avancement maximal. <i>Déterminer la composition de l'état final d'un système et l'avancement final d'une réaction.</i></p>

Annexe 1.d - Extraits du programme de spécialité physique-chimie de terminale générale (Bulletin officiel spécial n°8 du 25 juillet 2019)

2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation	
A) Suivre et modéliser l'évolution temporelle d'un système siège d'une transformation chimique	
<p>Cette partie prolonge l'étude de la modélisation macroscopique des transformations chimiques en abordant leurs caractéristiques cinétiques : vitesse volumique de disparition d'un réactif, vitesse volumique d'apparition d'un produit et temps de demi-réaction. La vitesse volumique, dérivée temporelle de la concentration de l'espèce, est privilégiée car elle est indépendante de la taille du système. L'approche expérimentale permet d'éclairer le choix d'un outil de suivi de la transformation, de mettre en évidence les facteurs cinétiques et le rôle d'un catalyseur, de déterminer un temps de demi-réaction et de tester l'existence d'une loi de vitesse. La « vitesse de réaction », dérivée temporelle de l'avancement de réaction, n'est pas au programme.</p> <p>Les mécanismes réactionnels sont présentés comme des modèles microscopiques élaborés pour rendre compte des caractéristiques cinétiques par l'écriture d'une succession d'actes élémentaires. Les exemples de mécanismes réactionnels sont empruntés à tous les domaines de la chimie [...].</p>	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<p>Suivi temporel et modélisation macroscopique Transformations lentes et rapides. Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. Catalyse, catalyseur.</p> <p>Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit. Temps de demi-réaction.</p> <p>Loi de vitesse d'ordre 1.</p>	<p>Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système. Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques. Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur à partir de données expérimentales. <i>Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.</i> À partir de données expérimentales, déterminer une vitesse volumique de disparition d'un réactif, une vitesse volumique d'apparition d'un produit ou un temps de demi-réaction. <i>Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration et déterminer la vitesse volumique de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif.</i> Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1.</p>

<p>Modélisation microscopique Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel, formalisme de la flèche courbe. Modification du mécanisme par ajout d'un catalyseur. Interprétation microscopique de l'influence des facteurs cinétiques.</p>	<p>À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique. Représenter les flèches courbes d'un acte élémentaire, en justifiant leur sens. Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.</p>
--	--

3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

Le caractère non total des transformations, introduit en classe de première, a été attribué aux transformations pour lesquelles l'avancement final est inférieur à l'avancement maximal ; en classe terminale, il est modélisé par deux réactions opposées qui conduisent à des vitesses de disparition et d'apparition égales dans l'état final, ce qui correspond à un état d'équilibre dynamique du système. Pour ces transformations, le quotient de réaction Q_r évolue de manière spontanée jusqu'à atteindre, dans l'état final, la valeur de la constante d'équilibre $K(T)$. Dans le cas des transformations totales, la disparition d'un réactif intervient alors que la valeur du quotient de réaction Q_r n'a pas atteint $K(T)$ [...].

A) Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique

Notions et contenus	Capacités exigibles Activités expérimentales support de la formation
<p>État final d'un système siège d'une transformation non totale : état d'équilibre chimique. Modèle de l'équilibre dynamique.</p> <p>Quotient de réaction Q_r. Système à l'équilibre chimique : constante d'équilibre $K(T)$. Critère d'évolution spontanée d'un système hors équilibre chimique.</p>	<p>Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits. <i>Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système siège d'une transformation non totale, par un nouvel ajout de réactifs.</i></p> <p>Déterminer le sens d'évolution spontanée d'un système. Déterminer un taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final et le relier au caractère total ou non total de la transformation. <i>Déterminer la valeur du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, et montrer son indépendance vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée.</i></p>

Annexe 2

Activité expérimentale : à la recherche des réactifs disparus

Au cours d'une transformation chimique, des réactifs réagissent ensemble et des produits se forment. Cette transformation cesse lorsque le réactif limitant est totalement consommé. Est-ce toujours le cas ?

Doc. 1 : protocole expérimental 1

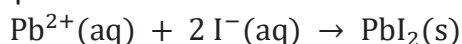
- Dans un bécher n°1, verser 10,0 mL de solution aqueuse de nitrate de plomb ($\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{NO}_3^-(\text{aq})$) de concentration $1,00 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ puis ajouter 20,0 mL de solution aqueuse d'iodure de potassium ($\text{K}^+(\text{aq}) + \text{I}^-(\text{aq})$) de même concentration.

La réaction est quasi instantanée.

- Filtrer le précipité obtenu et récupérer le filtrat incolore dans un erlenmeyer.
- Verser la moitié du filtrat dans un bécher n°2 et l'autre moitié dans un bécher n°3.
- Dans le bécher n°2, ajouter quelques mL de solution aqueuse de chromate de potassium ($2 \text{K}^+(\text{aq}) + \text{CrO}_4^{2-}(\text{aq})$) et observer.
- Dans le bécher n°3, ajouter quelques mL de solution aqueuse de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{NO}_3^-(\text{aq})$) et observer.

Doc. 2 : la transformation étudiée

Lorsque l'on mélange une solution aqueuse incolore de nitrate de plomb ($\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{NO}_3^-(\text{aq})$) et une solution aqueuse incolore d'iodure de potassium ($\text{K}^+(\text{aq}) + \text{I}^-(\text{aq})$), on observe la formation d'un précipité jaune d'iodure de plomb $\text{PbI}_2(\text{s})$. Cette transformation peut être modélisée par une réaction d'équation :



Doc. 3 : tests de reconnaissance des ions $\text{Pb}^{2+}(\text{aq})$ et iodure $\text{I}^-(\text{aq})$

Ion recherché	Réactif à ajouter	Observation
Pb^{2+}	Chromate de potassium ($2 \text{K}^+(\text{aq}) + \text{CrO}_4^{2-}(\text{aq})$)	Formation d'un précipité jaune de $\text{PbCrO}_4(\text{s})$
I^-	Nitrate d'argent ($\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{NO}_3^-(\text{aq})$)	Formation d'un précipité jaune très clair de $\text{AgI}(\text{s})$

1)

- Mettre en œuvre le protocole expérimental 1.
- Dans le bécher n°1, les réactifs de la transformation chimique sont-ils introduits dans les proportions stœchiométriques ? Sinon, quel est le réactif limitant ?
- Si l'on suppose que cette réaction est totale, déterminer la composition du filtrat obtenu.
- Comment appelle-t-on des espèces chimiques présentes dans le milieu réactionnel, mais qui n'interviennent pas dans l'équation de la réaction ? Les identifier.

- 2) D'après les observations faites dans le bécher n°2, restait-il des ions Pb^{2+} dans le filtrat ?
- 3) D'après les observations faites dans le bécher n°3, restait-il des ions I^- dans le filtrat ?
- 4) Les réponses aux questions 2 et 3 sont-elles en accord avec la réponse à la question 1) b) ? Pourquoi ? Que met-on en évidence avec cette expérience ?
- 5) Une réaction chimique est-elle toujours totale (arrêt de la réaction lorsqu'au moins un réactif est totalement consommé) ? Émettre une ou plusieurs hypothèses qui pourraient permettre de l'expliquer.

Annexe 3

Activité expérimentale : à la recherche des réactifs disparus Réponse d'une intelligence artificielle génératrice de contenu

Intelligence artificielle génératrice de contenus consultée le 17 décembre 2023

Une réaction chimique est-elle toujours totale (arrêt de la réaction lorsqu'au moins un réactif est totalement consommé) ? Émettre une ou plusieurs hypothèses qui pourraient permettre de l'expliquer.

Dans le contexte de la chimie, une réaction chimique n'est pas nécessairement toujours totale (arrêt) lorsque l'un des réactifs est totalement consommé. Cela dépend des conditions expérimentales, de la cinétique de la réaction et de la présence d'autres facteurs.

Voici quelques hypothèses qui pourraient expliquer pourquoi une réaction chimique ne s'arrête pas nécessairement lorsque l'un des réactifs est totalement consommé :

1. Excès d'un réactif : Si l'autre réactif est en excès par rapport à celui qui est totalement consommé, la réaction peut continuer à se produire avec l'excès de réactif restant.
2. Réaction réversible : Certaines réactions chimiques sont réversibles, ce qui signifie qu'une fois qu'un réactif est totalement consommé, la réaction peut se dérouler en sens inverse, régénérant ainsi le réactif initial et permettant à la réaction globale de se poursuivre.
3. Réaction en cascade : Dans certains cas, la réaction chimique peut se produire en plusieurs étapes ou dans le cadre d'une série de réactions interconnectées. Ainsi, même si l'un des réactifs est totalement consommé, il peut y avoir d'autres réactions en aval qui continuent à se produire.
4. Catalyse : La présence d'un catalyseur peut accélérer la réaction chimique et permettre à la réaction de se poursuivre même lorsque l'un des réactifs est épuisé. Le catalyseur peut régénérer ou régénérer partiellement le réactif consommé, permettant ainsi à la réaction de continuer.

Il est important de noter que ces hypothèses sont générales et qu'il peut y avoir d'autres facteurs spécifiques à chaque réaction chimique. La compréhension complète du système réactionnel spécifique est nécessaire pour déterminer si une réaction s'arrête ou non lorsque l'un des réactifs est totalement consommé.

Annexe 4

Résultats d'analyses élémentaires d'artéfacts archéologiques effectués à l'aide de l'accélérateur AGLAÉ³

Dans chaque case, la première valeur est le pourcentage de l'oxyde étudié par rapport au poids total d'oxydes, la deuxième est l'écart-type de cette valeur. La dernière ligne représente le pourcentage d'autres oxydes non étudiés individuellement.

Objet	Tesson	Perle	Collier	Figure d'applique	Visage	Perruque
Nuance de bleu	marine	marine	turquoise	turquoise	ciel	foncé
Époque	18 ^{ème} dynastie	18 ^{ème} dynastie	18 ^{ème} dynastie	18 ^{ème} dynastie	??	??
Na ₂ O	13,63 3,44	16,56 0,21	15,66 0,59	11,87 1,03	11,95 2,44	11,96 0,23
MgO	2,79 0,42	4,17 0,39	3,49 0,13	4,82 0,89	1,94 0,09	1,95 0,76
Al ₂ O ₃	3,68 0,38	1,54 0,06	0,92 0,27	1,32 0,34	1,98 0,67	2,43 0,18
SiO ₂	47,92 24,47	66,74 0,85	64,98 1,04	64,12 1,29	33,20 6,07	40,26 2,24
CaO	21,23 23,69	7,24 0,17	7,44 0,43	5,58 0,12	5,04 4,25	2,11 0,58
FeO	1,48 0,56	1,02 0,03	0,36 0,09	0,59 0,18	1,28 1,22	0,63 0,05
CoO	0,39 0,11	0,08 0,01	0,00 0,00	0,00 0,00	0,17 0,02	0,36 0,01
SnO ₂	0,01 0,01	0,01 0,01	0,02 0,01	0,10 0,01	0,00 0,00	0,00 0,01
Sb ₂ O ₃	0,75 0,25	0,01 0,01	1,12 0,16	5,66 4,39	0,17 0,03	0,27 0,03
PbO	0,13 0,06	0,02 0,00	0,02 0,02	0,11 0,04	28,55 3,42	28,22 1,32
As ₂ O ₃	0,00 0,00	0,00 0,00	0,02 0,02	0,04 0,01	6,38 0,72	4,09 0,28
Autres oxydes	7,99	2,61	5,97	4,76	9,34	7,72

³ Isabelle Biron et Geneviève Pierrat-Bonnefois, « La tête égyptienne en verre bleu du musée du Louvre, la découverte d'un faux », *l'actualité chimique* - octobre-novembre 2007 - n° 312-313

<https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/312-313-oct-nov-p.47-Biron.pdf>

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE A RENDRE AVEC LA COPIE

Les parties grisées ne sont pas à remplir. Une ligne du tableau est complétée pour illustrer ce qui est attendu.

Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 4
Caractéristiques générales d'un modèle	Éléments constitutifs de la démarche de modélisation du programme de 2^{nde} GT	Transposition au modèle de la réaction chimique en 2^{nde} GT (caractéristiques spécifiques)	Exemples de situation de classe en 2^{nde} dans le cadre du travail du thème sur la transformation chimique
Lien modèle–phénomène modélisé			
Il est le modèle d'un phénomène.			
Il laisse certains aspects du réel de côté.			
Pluralité			
Il modélise plusieurs phénomènes et possède un caractère unificateur.			
Un phénomène peut être modélisé par plusieurs modèles.			
Efficacité			
Il peut être symbolisé.	<i>Établir des relations entre grandeurs Recourir à une simulation pour expérimenter sur un modèle</i>	<i>Écriture symbolique d'une réaction chimique.</i>	<i>Écriture d'équations (formules chimiques, symboles, coefficients stœchiométriques). Passage du registre symbolique au langage naturel et inversement.</i>

Il a un caractère explicatif.			
Il a un caractère prédictif.			
Localité			
Il a un domaine de validité.		X	X