

Nom et prénom : \_\_\_\_\_

Date : Mercredi 13 décembre 2017

Local : D3-2040

Responsable : Pedro A. Segura

Heure : 9h00-12h00

Consignes :

- Seulement les résumés des notes de cours, écrits à la main, sont permis.
- L'annexe se trouve à la page 12 et 13
- Écrivez vos réponses dans les cases appropriées.

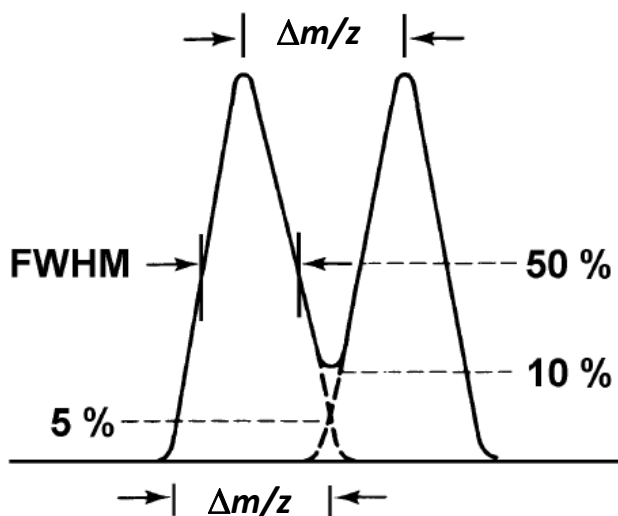
- 
1. **(25 points)** La mission spatiale Rosetta (2004-2014) de l'Agence Spatiale Européenne a eu comme objectif l'obtention de données sur la composition du noyau de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Le 12 novembre 2014, le module *Philae* de la sonde spatiale Rosetta a fait contact avec cette comète. Philae était équipé de plusieurs instruments d'analyse dont l'analyseur de gaz *Cometary Sampling and Composition* (COSAC) muni d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse de type temps de vol (GC-TOF). Grâce aux analyses faites par COSAC, l'équipe de l'Agence Spatiale Européenne a détecté 16 composés dont quatre (acétone, isocyanatométhane, propanal et acétamide) n'avaient été pas reportés auparavant dans les comètes [Goesmann *et al. Science* 2015, 349(6247) : aab06891-1].

- a. Expliquez, à l'aide d'un schéma, le fonctionnement d'un TOF avec réflectron.

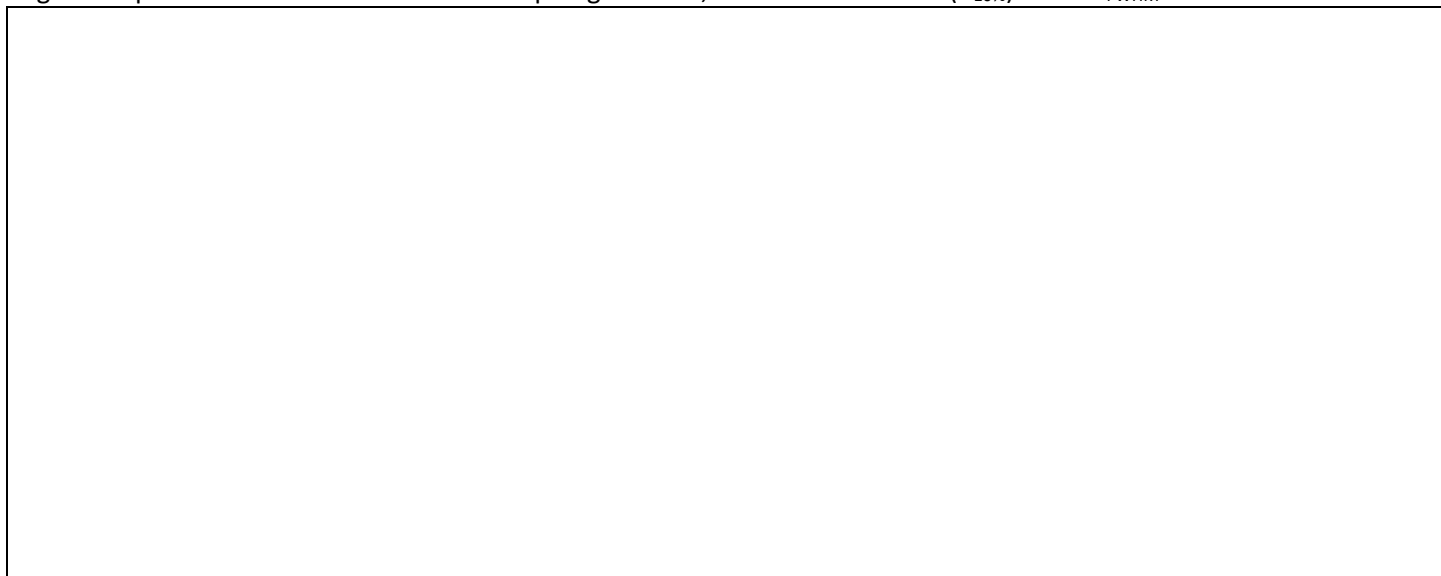
- b. COSAC était muni d'une source d'impact électronique. Expliquez à l'aide d'un schéma le fonctionnement de cette source d'ionisation.



- c. D'après l'équipe qui a conçu COSAC, la  $R_{FWHM}$  de cet instrument était  $\approx 300$  à  $m/z$  28. Pour cette raison, les auteurs affirment que « les pics correspondant aux espèces moléculaires telles que CO,  $N_2$  et  $C_2H_4$  ne peuvent pas être résolus ». Expliquez à l'aide des équations vues en classe et de la Figure 1 cette affirmation.



**Figure 1.** Pour avoir deux pics complètement séparés, il faut que la  $\Delta m/z$  entre deux pics soit égale ou supérieure à la largeur du pic à 10% de sa hauteur. Pour les pics gaussiens, la résolution à 10% ( $R_{10\%}$ )  $\approx 1.8 \times R_{FWHM}$ .



Nom et prénom : \_\_\_\_\_

- d. L'absence des espèces telle que  $\text{NH}_3$  dans les résultats obtenus par COSAC a surpris les chercheurs, puisque  $\text{NH}_3$  est une composante connue de la glace cométaire. D'après les auteurs, la détection de faibles quantités de  $\text{NH}_3$  a été difficile par la présence d'eau. Expliquez ce fait à l'aide du spectre de masse de l'eau (Figure 2).

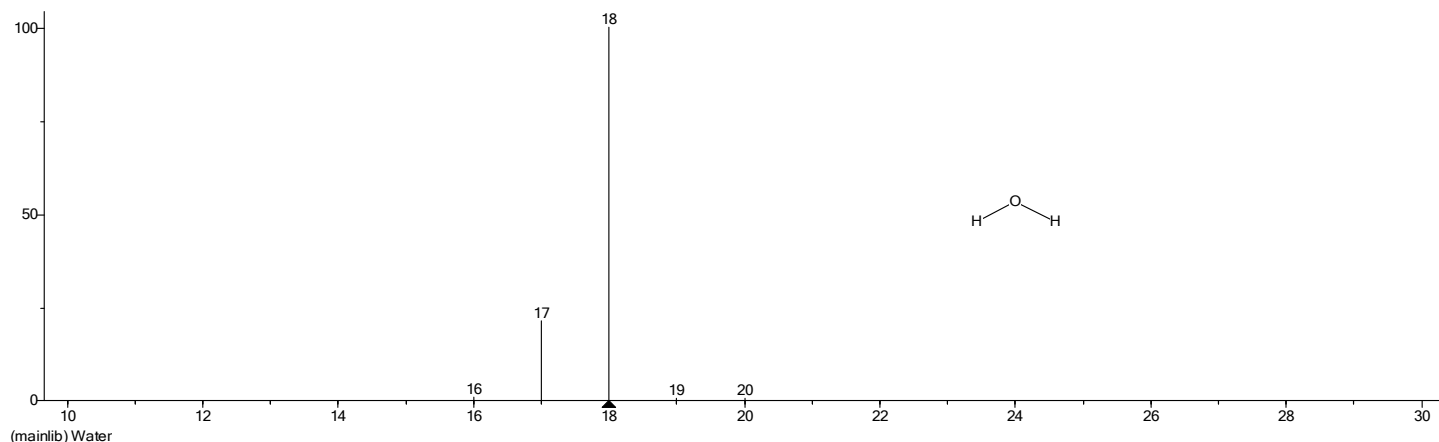


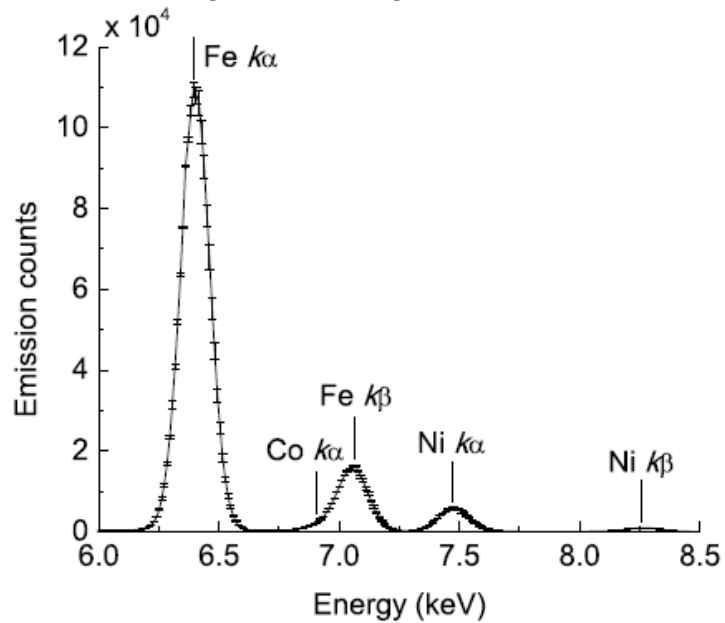
Figure 2. Spectre de masse de l'eau obtenu par EI.

2. **(20 Points)** Avant la découverte de la fusion métallurgique du fer, c.-à-d. la production du fer métallique à partir des minerais de fer, le fer météorique était la principale source de fer métallique en Égypte auparavant le VII<sup>e</sup> siècle avant J.-C. Les météorites en fer sont constituées principalement de Fe et Ni (5 à 35 % w/w) avec des quantités mineures de Co (0.4 à 0.8 % w/w). Pour cette raison, la concentration massique de ces deux métaux peut être utilisée pour dévoiler l'origine météorique des objets historiques en fer. Parmi les objets retrouvés dans la tombe du pharaon Toutânkhamon (1345-1327 avant J.-C.) en 1925, la dague en fer est probablement la plus connue (Figure 3). L'origine du fer utilisé pour la fabrication de la dague est controversée. Des analyses non publiées en 1970, basées sur le haut contenu en nickel de la dague, suggèrent l'origine météorique, mais une analyse plus récente en 1994 par fluorescence des rayons X (XRF) a dévoilé un contenu en nickel trop faible (2.8% w/w) pour être du fer météorique. En 2016, une équipe de chercheurs italiens et égyptiens a utilisé un instrument de XRF portable pour déterminer le pourcentage massique du Fe, Ni et Co de la dague. Les résultats ont indiqué un pourcentage massique de Ni de  $(10.85 \pm 0.30)\%$  w/w et de  $(0.58 \pm 0.04)\%$  w/w pour Co, confirmant ainsi l'origine météorique du fer de la dague de Toutânkhamon [Comelli *et al.* *Meteoritics & Planetary Science* 2016, 51(7) :1301].



**Figure 3.** Dague en fer découverte en 1925 dans le sarcophage du pharaon Toutânkhamon.

- a. Le spectre XRF de la lame de la dague de Toutânkhamon est montré à la Figure 4. Expliquez la formation des lignes  $K\alpha_1$  et  $K\beta_1$  du fer à l'aide d'un diagramme d'énergie.



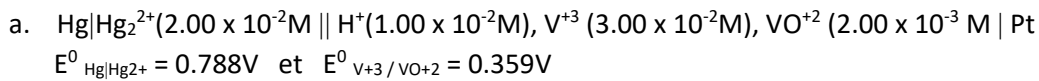
**Figure 4.** Spectre XRF de la lame de la dague de Toutânkhamon.

**Nom et prénom :** \_\_\_\_\_

- b. Les auteurs affirment que le spectromètre XRF portable utilisé pour réaliser leurs mesures a une résolution inférieure à 140 eV. Pourquoi une telle valeur de résolution est importante pour l'objectif de cette étude?

- c. L'expulsion d'un électron Auger est un mécanisme de relaxation en compétition avec l'émission d'un rayon X. Expliquez brièvement le principe de la spectroscopie Auger et indiquez pourquoi il s'agit d'une technique de caractérisation de surface contrairement à la XRF.

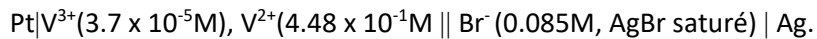
3. **(8 points)** Selon la chaîne électrochimique décrite des cellules suivantes, calculez les potentiels des cellules. Spécifiez aussi si les réactions sont spontanées comme décrite dans la chaîne ou selon la direction inverse. Écrivez chacune des demies-réactions d'oxydation et de réduction balancées :



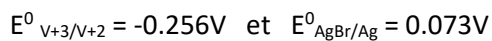
- b. Écrivez l'équation de Nernst globale des réactions en a. en fonction des activités.

- c. Quelle est la définition d'activité?

- d. Nous voulons produire un courant de 0,0750 A dans la cellule suivante :



Mais à cause la façon dont on a monté la cellule, elle a une résistance interne de 4.87 ohm ce qui a causé une chute ohmique. Calculez le potentiel initial de la cellule avant cette chute ohmique.



Nom et prénom : \_\_\_\_\_

4. (12 points) En pratique sur une électrode non-idéalement polarisée quand on passe un courant il se passe des phénomènes de polarisation.

a. Nommez différentes sources de polarisation.

b. Sur le voltampérogramme de la Figure 5, que se passe-t-il aux points B, D et K ?

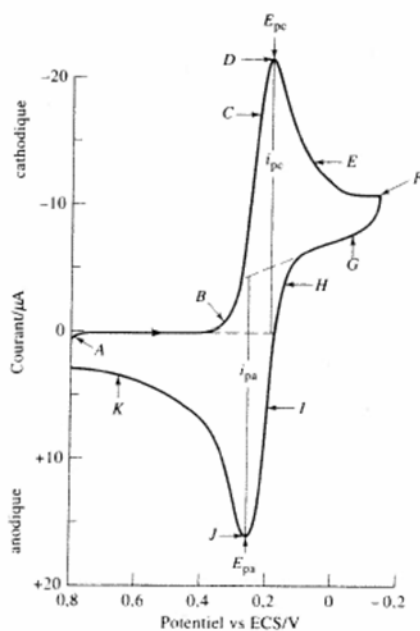
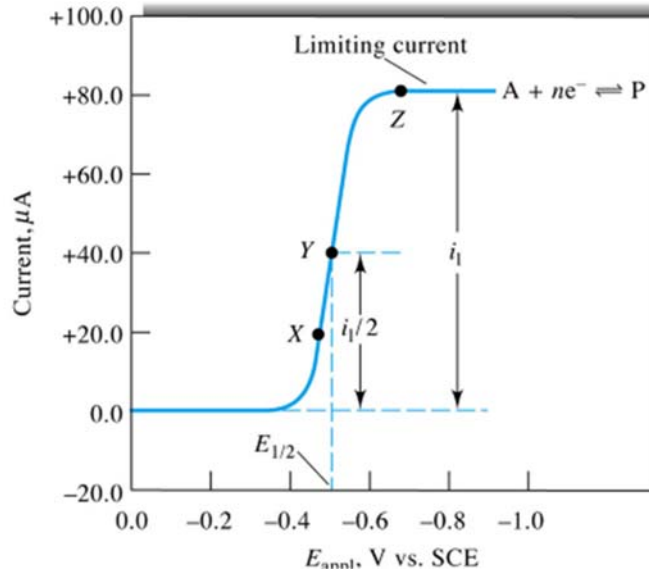


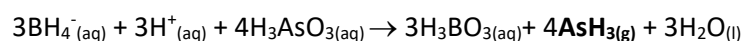
Figure 5. Voltampérogramme cyclique d'une solution de 6.0 mM en  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  et 1.0 M en  $\text{KNO}_3$ .

- c. Pour la Figure 6, différents profils de concentration peuvent être dessinés selon le potentiel appliqué pour la réaction de  $A + ne^- \leftrightarrow P$ . Tracez les profils de concentration pour les potentiels aux points X, Y et Z pour l'espèce A et pour l'espèce P.



**Figure 6.** Courbe de  $i$ - $E$  en régime stationnaire.

5. **(25 points)** L'arsenic est un métalloïde présent dans la croûte terrestre à une concentration de  $6 \text{ mg kg}^{-1}$ , et il peut se retrouver dans l'eau, l'air et le sol. Une source importante d'arsenic dans l'environnement est le drainage minier acide. En raison de la forte affinité de l'arsenic pour les minerais sulfurés, le drainage minier contient souvent de concentrations élevées d'arsenic, sous forme d'arsénite ( $\text{AsO}_3^{3-}$ ), ou d'arséniate ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ). L'analyse des drainages miniers est difficile à cause des concentrations élevées des métaux dans ce type d'eau. Parmi les multiples techniques utilisées pour déterminer l'arsenic (III) et (V) dans l'eau, la spectroscopie d'absorption atomique par génération d'hydrures (*Hydride generation-atomic absorption spectroscopy*, HG-AAS) est capable d'atteindre de limites de détection pour l'arsenic (III) de l'ordre de  $800 \text{ ng L}^{-1}$ . Le principe de cette technique est la génération sélective d'hydruure d'arsenic gazeux par l'addition d'une solution acide de tétrahydroborate de sodium à l'échantillon :



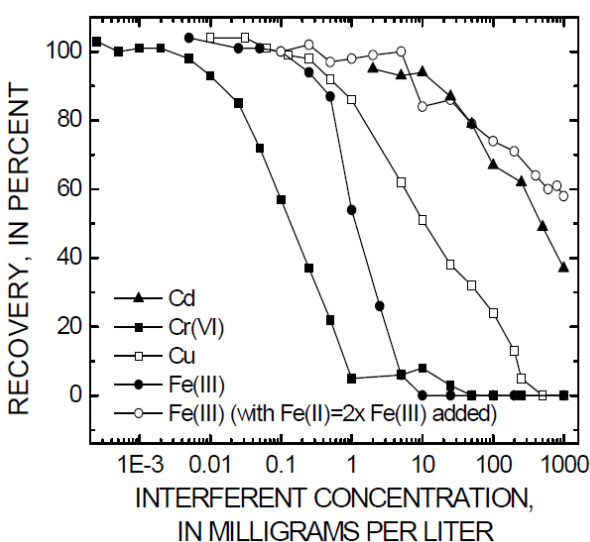
Nom et prénom :

---

- a. La mesure de l'absorbance l'arsenic à 193.7 nm par AAS se fait à l'aide d'une lampe contenant l'arsenic. Expliquez pourquoi la lumière monochromatique générée utilisant un monochromateur ne peut pas être utilisée comme source d'excitation en AAS.

- b. L'absorption de l'arsenic à 193.7 nm est affectée par la présence d'espèces moléculaires capables d'absorber à cette même longueur d'onde. De quel type d'interférence s'agit-il? Quel serait l'impact de ce type d'interférence sur la mesure de la concentration d'arsenic dans les échantillons?

- c. Une étude faite par le U.S. Geological Survey (USGS) a étudié l'effet de la présence de plusieurs métaux sur les pourcentages de récupération de l'arsenic (III) dans les échantillons d'eau (Figure 7) mesurés par HG-AAS. Quels métaux sont plus problématiques? Expliquez.



**Figure 7.** Effet de la concentration de divers métaux sur le pourcentage de récupération de l'As (III). Pour le Fe(III) deux tests ont été réalisés : ajout de Fe(III) uniquement et ajout de Fe(II) et Fe(III). La concentration de Fe(II) étant 2 fois plus élevée que celle de Fe(III).

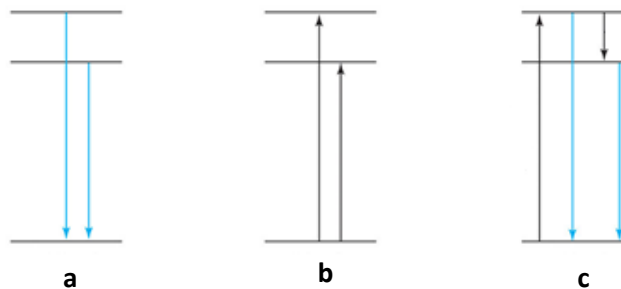
- d. Les métaux de la Figure 7, interfèrent avec l'analyse de l'As(III) parce qu'ils sont réduits par  $\text{BH}_4^-$  (aq) ou parce qu'ils oxydent l'As(III) en As(V). De quel type d'interférence s'agit-il? Proposez une approche pour réduire ou éliminer ce type d'interférence. Expliquez.

6. **(10 Points)** Répondez en encerclant la lettre correspondante à la réponse correcte.

1. Les vibrations des liens doivent causer des changements de la polarisabilité de la molécule pour être observables par ce type de spectroscopie.

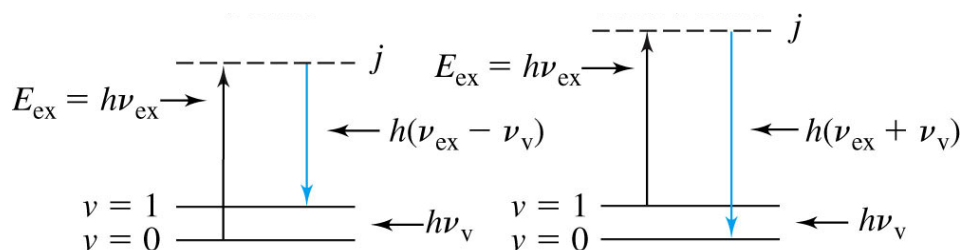
a) Raman                      b) UV-vis                      c) XRF                      d) Infrarouge

2. Lequel des diagrammes suivants illustre un phénomène d'émission atomique ?



3. À quel type de spectroscopie correspondent les diagrammes d'énergie suivantes ( $j$  représente un niveau virtuel) ?

Nom et prénom : \_\_\_\_\_

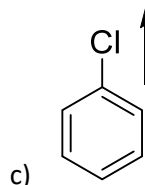
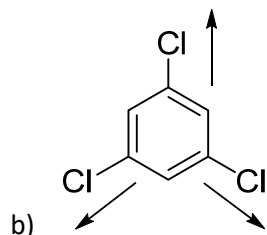
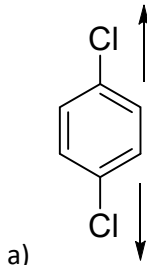


- a) Émission                      b) Fluorescence                      c) Raman                      d) Infrarouge

4. Dans le spectre IR de l'acétone, un pic correspondant à la transition fondamentale d'élongation du lien C=O est observé à  $1716\text{ cm}^{-1}$ . Un pic harmonique de cette transition fondamentale est observé à  $3432\text{ cm}^{-1}$ . Quelle transition entre les états vibrationnels décrit cet harmonique?

- a)  $v=0 \rightarrow v=1$                       b)  $v=1 \rightarrow v=0$                       c)  $v=0 \rightarrow v=2$                       d)  $v=2 \rightarrow v=1$

5. Pour les molécules suivantes, quel mode de vibration sera actif en infrarouge?



- d) Toutes ces réponses

6. Pourquoi une source laser de type argon ionisé ( $\lambda=488\text{ nm}$ ) de 50 W serait préférable à une source lasers de type grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme (Nd-YAG,  $\lambda=1064\text{ nm}$ ) de 50 W pour observer les raies Raman de faible intensité?

- a) Intensité  $\propto$  à la puissance                      b) Intensité  $\propto$  à  $\lambda^4$                       c) Intensité  $\propto$  à  $\nu^4$                       d) Intensité  $\propto$  à la polarisabilité

7. Les vibrations des liens doivent causer des changements du moment dipolaire de la molécule pour être observables par ce type de spectroscopie.

- a) Raman                      b) UV-vis                      c) XRF                      d) Infrarouge

8. Pour un lien donné, le nombre d'onde d'une bande d'absorption en infrarouge ne dépend que de la masse des atomes composant le lien et de la constante de force du lien.

- a) Vrai                      b) Faux

9. Technique de mesure de l'absorption infrarouge par contact impliquant un cristal avec un indice de réfraction élevé et excellente transmission de l'infrarouge.

- a) ATR                      b) FT-IR                      c) Raman                      d) Nujol

10. Selon le modèle de l'oscillateur harmonique classique le nombre d'onde de vibration pour un lien C=O doit être supérieur à celui d'un lien S=O.

- a) Vrai                      b) Faux

# Annexe

## Abondance des isotopes

| Atomic symbol | Name       | Atomic No. | Mass No. | Isotopic mass | Isotopic comp. | Relative atomic mass |
|---------------|------------|------------|----------|---------------|----------------|----------------------|
| H             | Hydrogen   | 1          | 1        | 1.007825      | 100            | 1.00795              |
|               |            |            | 2        | 2.014101      | 0.0115         |                      |
| He            | Helium     | 2          | 3        | 3.016029      | 0.000137       | 4.002602             |
|               |            |            | 4        | 4.002603      | 100            |                      |
| Li            | Lithium    | 3          | 6        | 6.015122      | 8.21           | 6.941                |
|               |            |            | 7        | 7.016004      | 100            |                      |
| Be            | Beryllium  | 4          | 9        | 9.012182      | 100            | 9.012182             |
| B             | Boron      | 5          | 10       | 10.012937     | 24.8           | 10.812               |
|               |            |            | 11       | 11.009306     | 100            |                      |
| C             | Carbon     | 6          | 12       | 12.000000     | 100            | 12.0108              |
|               |            |            | 13       | 13.003355     | 1.1            |                      |
| N             | Nitrogen   | 7          | 14       | 14.003074     | 100            | 14.00675             |
|               |            |            | 15       | 15.000109     | 0.369          |                      |
| O             | Oxygen     | 8          | 16       | 15.994915     | 100            | 15.9994              |
|               |            |            | 17       | 16.999132     | 0.038          |                      |
|               |            |            | 18       | 17.999116     | 0.205          |                      |
| F             | Fluorine   | 9          | 19       | 18.998403     | 100            | 18.998403            |
| Ne            | Neon       | 10         | 20       | 19.992402     | 100            | 20.1798              |
|               |            |            | 21       | 20.993847     | 0.30           |                      |
|               |            |            | 22       | 21.991386     | 10.22          |                      |
| Na            | Sodium     | 11         | 23       | 22.989769     | 100            | 22.989769            |
| Mg            | Magnesium  | 12         | 24       | 23.985042     | 100            | 24.3051              |
|               |            |            | 25       | 24.985837     | 12.66          |                      |
|               |            |            | 26       | 25.982593     | 13.94          |                      |
| Al            | Aluminium  | 13         | 27       | 26.981538     | 100            | 26.981538            |
| Si            | Silicon    | 14         | 28       | 27.976927     | 100            | 28.0855              |
|               |            |            | 29       | 28.976495     | 5.0778         |                      |
|               |            |            | 30       | 29.973770     | 3.3473         |                      |
| P             | Phosphorus | 15         | 31       | 30.973762     | 100            | 30.973762            |
| S             | Sulfur     | 16         | 32       | 31.972071     | 100            | 32.067               |
|               |            |            | 33       | 32.971459     | 0.80           |                      |
|               |            |            | 34       | 33.967867     | 4.52           |                      |
|               |            |            | 36       | 35.967081     | 0.02           |                      |
| Cl            | Chlorine   | 17         | 35       | 34.968853     | 100            | 35.4528              |
|               |            |            | 37       | 36.965903     | 31.96          |                      |
| Br            | Bromine    | 35         | 79       | 78.918338     | 100            | 79.904               |
|               |            |            | 81       | 80.916291     | 97.28          |                      |

# CAN 400 Analyse instrumentale

## Examen final

Nom et prénom :

Fronts d'absorption (*absorption edges*) et énergie en keV des raies spectrales caractéristiques des éléments sélectionnés.

| Atomic<br>number<br>and<br>element | K-series  |                   |                   |                  |                   |                  | L-series               |                                 |                                 |                                |                         |                                 |                                 |                          |                                 |                                 |                                  |                                 | M-series                        |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
|------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
|                                    | K<br>edge | KN <sub>III</sub> | KM <sub>III</sub> | KM <sub>II</sub> | KL <sub>III</sub> | KL <sub>II</sub> | L <sub>I</sub><br>edge | L <sub>I</sub> N <sub>III</sub> | L <sub>I</sub> M <sub>III</sub> | L <sub>I</sub> M <sub>II</sub> | L <sub>II</sub><br>edge | L <sub>II</sub> N <sub>IV</sub> | L <sub>II</sub> M <sub>IV</sub> | L <sub>III</sub><br>edge | L <sub>III</sub> N <sub>V</sub> | L <sub>III</sub> M <sub>V</sub> | L <sub>III</sub> M <sub>IV</sub> | L <sub>III</sub> M <sub>I</sub> | M <sub>II</sub> N <sub>IV</sub> | M <sub>III</sub><br>edge | M <sub>III</sub> N <sub>V</sub> | M <sub>IV</sub><br>edge | M <sub>IV</sub> N <sub>VI</sub> | M <sub>V</sub> N <sub>VII</sub> | M <sub>V</sub> N <sub>VI</sub> |                         |
|                                    |           | Kβ <sub>2</sub>   | Kβ <sub>1</sub>   | Kβ <sub>3</sub>  | Kα <sub>1</sub>   | Kα <sub>2</sub>  |                        | Lγ <sub>3</sub>                 | Lβ <sub>3</sub>                 | Lβ <sub>4</sub>                |                         | Lγ <sub>1</sub>                 | Lβ <sub>1</sub>                 |                          | Lβ <sub>2</sub>                 | Lα <sub>1</sub>                 | Lα <sub>2</sub>                  | L <sub>I</sub>                  |                                 |                          | Mγ                              |                         |                                 |                                 |                                | M <sub>IV</sub><br>edge |
| Intensity                          | —         | 2–5               | ~20               | ~10              | 100               | 50–53            | —                      | ~5                              | 50–35                           | 20                             | —                       | ~5                              | ~50                             | —                        | ~5                              | ~90                             | 10                               | 20–5                            |                                 | —                        |                                 | —                       |                                 | —                               |                                |                         |
| 6 C                                | 0.282     |                   |                   |                  | 0.277             |                  |                        |                                 |                                 |                                |                         |                                 |                                 | 0.005                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 7 N                                | 0.397     |                   |                   |                  | 0.393             |                  |                        |                                 |                                 |                                |                         |                                 |                                 | 0.004                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 8 O                                | 0.533     |                   |                   |                  | 0.525             |                  |                        |                                 |                                 |                                |                         |                                 |                                 | 0.008                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 13 Al                              | 1.562     |                   | 1.557             |                  | 1.487             | 1.486            | 0.087                  |                                 |                                 |                                | 0.076                   |                                 |                                 | 0.075                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 14 Si                              | 1.840     |                   | 1.836             |                  | 1.740             | 1.739            | 0.118                  |                                 |                                 |                                | 0.101                   |                                 |                                 | 0.100                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 15 P                               | 2.143     |                   | 2.139             |                  | 2.014             | 2.013            | 0.153                  |                                 |                                 |                                | 0.130                   |                                 |                                 | 0.129                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 16 S                               | 2.471     |                   | 2.464             |                  | 2.308             | 2.307            | 0.193                  |                                 |                                 |                                | 0.164                   |                                 |                                 | 0.163                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 17 Cl                              | 2.824     |                   | 2.816             |                  | 2.622             | 2.620            | 0.237                  |                                 |                                 |                                | 0.204                   |                                 |                                 | 0.202                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 19 K                               | 3.607     |                   | 3.590             |                  | 3.314             | 3.311            | 0.340                  |                                 |                                 |                                |                         | 0.296                           |                                 | 0.293                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 20 Ca                              | 4.034     |                   | 4.013             |                  | 3.692             | 3.688            | 0.403                  |                                 |                                 |                                |                         | 0.346                           |                                 | 0.342                    |                                 |                                 |                                  |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 24 Cr                              | 5.987     |                   | 5.947             |                  | 5.415             | 5.405            | 0.694                  |                                 | 0.654                           | 0.582                          |                         | 0.583                           | 0.572                           |                          |                                 | 0.573                           | 0.500                            |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 25 Mn                              | 6.537     |                   | 6.490             |                  | 5.899             | 5.888            | 0.768                  |                                 | 0.721                           | 0.649                          |                         | 0.649                           | 0.638                           |                          |                                 | 0.637                           | 0.556                            |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 26 Fe                              | 7.112     |                   | 7.058             |                  | 6.404             | 6.391            | 0.846                  |                                 | 0.792                           | 0.721                          |                         | 0.719                           | 0.708                           |                          |                                 | 0.705                           | 0.615                            |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 27 Co                              | 7.712     |                   | 7.649             |                  | 6.930             | 6.915            | 0.929                  |                                 | 0.870                           | 0.797                          |                         | 0.791                           | 0.782                           |                          |                                 | 0.776                           | 0.678                            |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 28 Ni                              | 8.339     |                   | 8.265             |                  | 7.478             | 7.461            | 1.016                  |                                 | 0.941                           | 0.878                          |                         | 0.869                           | 0.861                           |                          |                                 | 0.852                           | 0.743                            |                                 |                                 |                          |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 29 Cu                              | 8.993     |                   | 8.905             | 8.903            | 8.048             | 8.028            | 1.109                  |                                 | 1.023                           | 1.019                          | 0.965                   |                                 | 0.950                           | 0.945                    |                                 | 0.930                           | 0.811                            |                                 |                                 | 0.015                    |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 30 Zn                              | 9.673     | 9.658             | 9.572             | 9.567            | 8.639             | 8.616            | 1.208                  |                                 | 1.107                           | 1.102                          | 1.057                   |                                 | 1.035                           | 1.034                    |                                 | 1.012                           | 0.884                            |                                 |                                 | 0.022                    |                                 |                         |                                 |                                 |                                |                         |
| 80 Hg                              | 83.109    | 82.532            | 80.261            | 79.822           | 70.819            | 68.894           | 14.835                 | 14.258                          | 11.987                          | 11.548                         | 14.215                  | 13.834                          | 11.823                          | 12.290                   | 11.927                          | 9.999                           | 9.898                            | 8.722                           |                                 | 2.848                    | 2.485                           | 2.392                   | 2.285                           | 2.291                           | 2.195                          | 2.184                   |
| 82 Pb                              | 88.008    | 87.367            | 84.936            | 84.450           | 74.969            | 72.804           | 15.863                 | 15.222                          | 12.791                          | 12.305                         | 15.204                  | 14.769                          | 12.618                          | 13.039                   | 12.625                          | 10.555                          | 10.453                           | 9.185                           | 3.125                           | 3.072                    | 2.658                           | 2.586                   | 2.442                           | 2.484                           | 2.345                          | 2.340                   |

Source : National Physical Laboratory (2016) X-ray absorption edges, characteristic X-ray lines and fluorescence yields in Absorption of photons. Available at :

[http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic\\_and\\_nuclear\\_physics/4\\_2/4\\_2\\_1.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_2/4_2_1.html) (Access date 2016-11-07).