

Nom et prénom : _____

Date : Mercredi 11 décembre 2019

Local : D3-2029

Responsable : Pedro A. Segura

Heure : 13h30 à 16h30

Consignes :

- Seulement les résumés des notes de cours, **écrits à la main**, sont permis.
- Tous les types de calculatrices sont acceptés.
- L'annexe se trouve aux pages 12 à 15. **Réviser l'information qu'y se trouve avant de commencer l'examen.**

1. (30 points) L'évaluation de la santé des tissus avant une chirurgie chez les patients atteints de tumeurs malignes est essentielle pour enlever un maximum de tissu cancéreux et préserver le tissu sain. L'analyse moléculaire des tissus cancéreux utilise des biomarqueurs du cancer, c.-à-d. des composés spécifiques au cancer, afin d'améliorer la détection et la diagnose de cette maladie. En 2017, Zhang et al. (*Sci. Transl. Med.* 9, eaan3968) ont publié un article décrivant le développement et application d'un nouvel instrument pour l'échantillonnage et diagnose moléculaire non-destructive des tissus en temps réel. Cet instrument a été appelé le « MasSpec Pen » et consiste en une sonde portable branchée à un spectromètre de masse de haute résolution (Figure 1, A). La sonde (Figure 1, B) est conçue avec un embout en polydiméthylsiloxane et trois conduits en polytétrafluoroéthylène, qui permettent l'entrée et sortie de l'eau et du gaz nécessaires à l'échantillonnage de tissus. La pointe du MasSpec Pen entre en contact avec le tissu pour analyse (Figure 1, C). L'encadré de la Figure 1C montre les trois conduits (#1 à #3) et le réservoir de solvant (#4) dans la pointe du MasSpec Pen. Lorsque le système est déclenché ($t = 0$ s) à l'aide de la pédale, une pompe fournit un volume contrôlé d'eau au réservoir par le conduit # 1. La goutte d'eau interagit avec le tissu et extrait des molécules en contact avec celui-ci ($t = 2$ s). Après 3 s d'extraction, les conduits # 2 (entrée de gaz) et #3 (sortie de l'eau et du gaz) sont simultanément ouverts pour transporter la gouttelette portant les molécules extraites de la sonde au spectromètre de masse à travers le système de tubulure pour analyse moléculaire. Les auteurs ont réalisé des analyses en mode MS et MS/MS à une résolution $R_{FWHM}=140000$ pour identifier les composés échantillonnés.

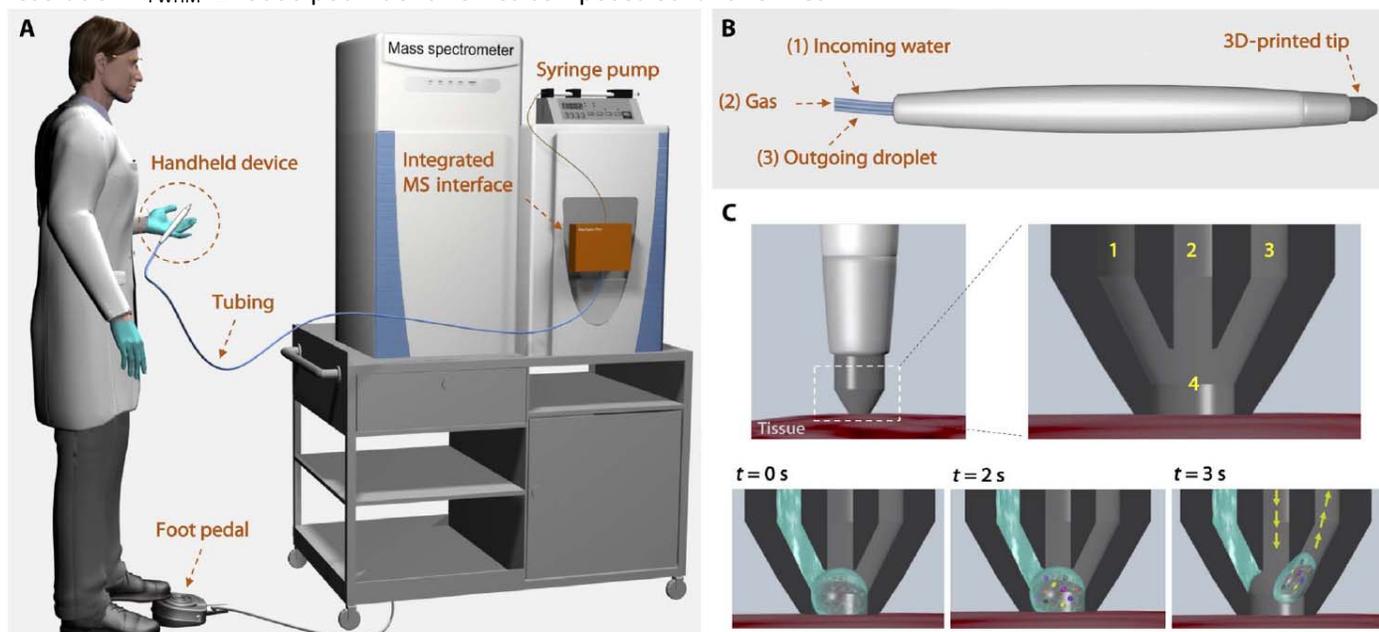


Figure 1. Schéma montrant la sonde MasSpec Pen et le spectromètre de masse. **A** : opérateur avec la sonde MasSpec Pen dans sa main. **B** : composants (conduits et réservoir) de la sonde. **C** : processus d'échantillonnage de molécules dans les tissus par l'eau. Les molécules extraites des tissus solubilisées dans l'eau sont ensuite introduites dans le spectromètre de masse par l'action du gaz.

- a. Les auteurs ont fait les analyses avec spectromètre de masse hybride de type quadripôle-orbitrap dans le mode MS^1 (c.-à-d. le quadripôle sert de guide ionique uniquement, permettant la transmission de tous les ions formés à partir des molécules extraites à l'analyseur de masse orbitrap). Expliquez à l'aide du diagramme de stabilité, comment un quadripôle peut servir de guide ionique.

- b. Expliquez, à l'aide d'un schéma, comment le rapport m/z des ions est mesuré dans un analyseur de masse de type orbitrap.

Nom et prénom :

- c. Dans leur article, les auteurs ont indiqué qu'une source d'ions n'avait pas été utilisée puisque les molécules échantillonnées par la sonde MasSpec Pen sont transformées en ions dans la phase gazeuse par des processus de désolvatation et d'ionisation (p. ex. équilibre acide base, association de cation ou anion) à l'entrée du spectromètre de masse. Dans le mode négatif, principalement des molécules déprotonées ont été observées (Figure 2A). Dans le mode positif, les ions observés ont été des adduits de sodium et de potassium (Figure 2B). S'agit-il d'un processus d'ionisation douce ou dure? Expliquez les différences entre l'ionisation douce et dure et donnez des exemples des sources d'ions de ces types.

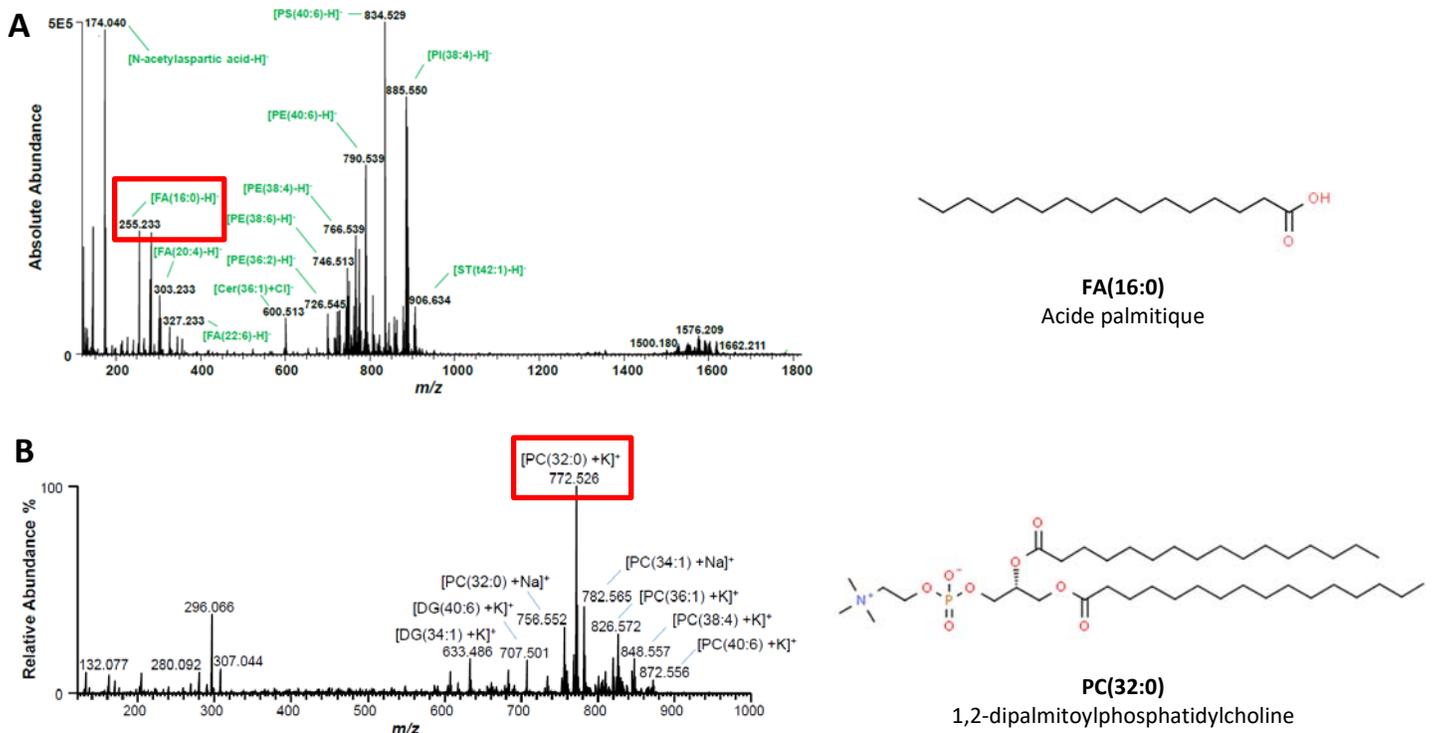
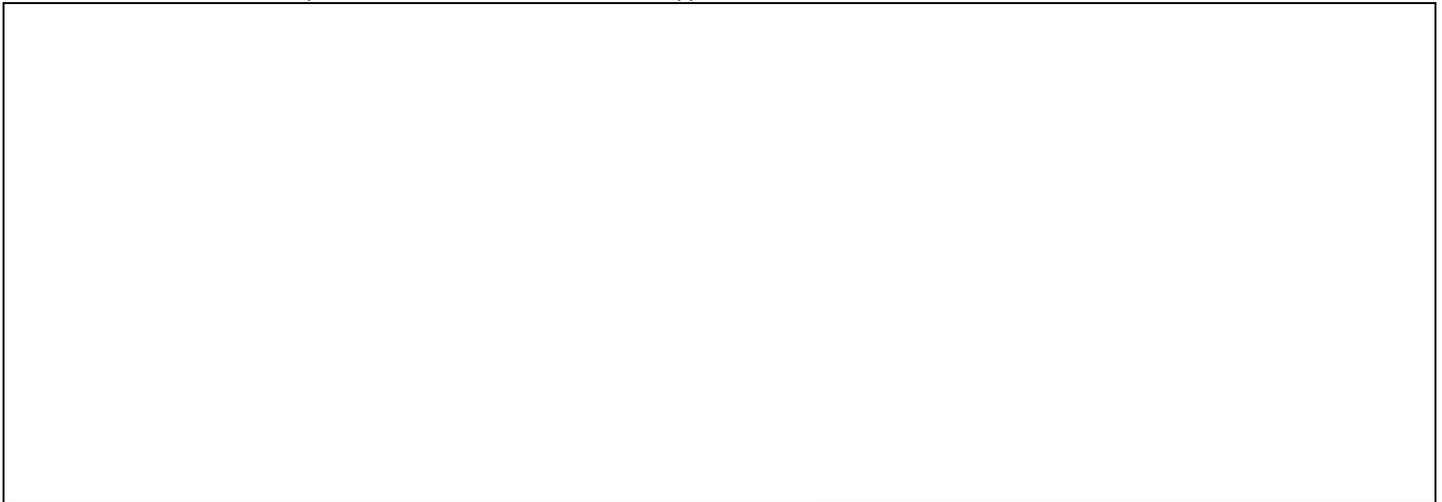


Figure 2. Spectres MS¹ d'une section du cerveau de souris obtenus par le quadripôle-orbitrap. **A** : Dans le mode négatif des acides gras (p.ex. acide palmitique) et d'autres lipides polaires ont été observés. **B** : Dans le mode positif, des phospholipides (1,2-dipalmitoylphosphatidylcholine) et d'autres lipides polaires ont été observés.

- d. Calculez l'exactitude sur la masse des ions de la 1,2-dipalmitoylphosphatidylcholine en mDa et de l'acide palmitique en ppm.

- e. Si la distance entre les tiges du quadripôle utilisé dans le spectromètre de masse est de 50 mm et l'amplitude du voltage alternatif est de 725 V avec une fréquence linéaire de 2.5 MHz, calculez la limite inférieure de m/z qui peut être transmise par le quadripôle en sachant que la valeur maximale de q pour qu'un ion puisse avoir une trajectoire stable en x et y est 0.908.

- f. Expliquez pourquoi l'instrument quadripôle-orbitrap est un excellent choix pour identifier des biomarqueurs du cancer dans les tissus échantillonnés par la sonde MasSpec Pen. Écrivez votre réponse en vous basant sur les propriétés et caractéristiques de cet analyseur de masse hybride et les contraintes de l'analyse directe (sans séparation chromatographique) faite par les auteurs.

Nom et prénom : _____

2. (20 points) Le projet international « Venice Time Machine » vise à numériser les archives de la ville de Venise, une vaste collection des documents décrivant tous les aspects de la vie dans cette ville sur une période de 1000 ans. Afin d'accélérer le processus de numérisation et éviter d'endommager ces documents historiques, une équipe internationale a étudié l'utilisation de la spectrométrie des rayons X (Albertin *et al.* (2015) *X-Ray Spectrom.*, 44, 93-98). Dans leur étude, les auteurs ont utilisé un spectromètre portable à fluorescence des rayons X. Cet instrument était équipé d'une source au molybdène et d'un détecteur au silicium ayant une résolution, mesurée par la largeur à mi-hauteur de la raie K_{α} du manganèse (5.89 keV), de 150 eV. Un flux d'hélium a aussi été utilisé pour améliorer la détection. La distance entre le détecteur et les documents était de 1 cm. Les auteurs ont observé la présence de Ca et de Fe dans plusieurs documents du XVI et XVII siècles (Figure 3). Ceci a été expliqué par l'utilisation répandue de l'encre au gallo-tannate de fer en Europe entre le XII et XIX siècles. Cette encre était faite généralement à partir de l'acide tannique (un polyphénol de formule $C_{76}H_{52}O_{46}$), de sulfate ferreux ($FeSO_4$), de l'eau de pluie, le vin blanc ou de vinaigre. En plus, cette encre contenait la gomme arabique, un composé naturel utilisé comme liant et qui contient du calcium.

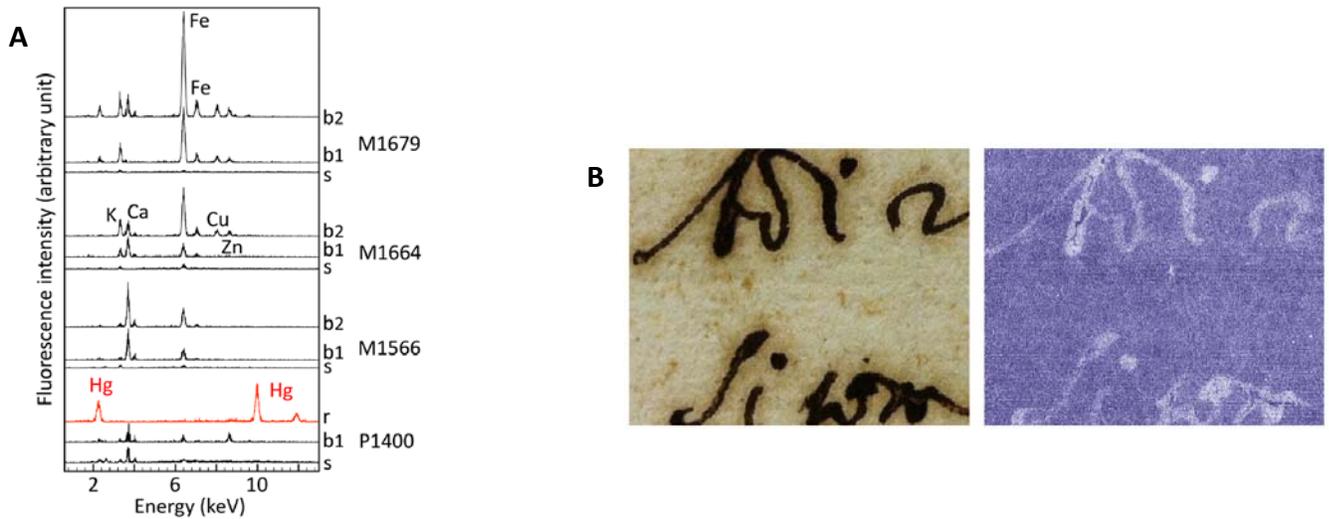
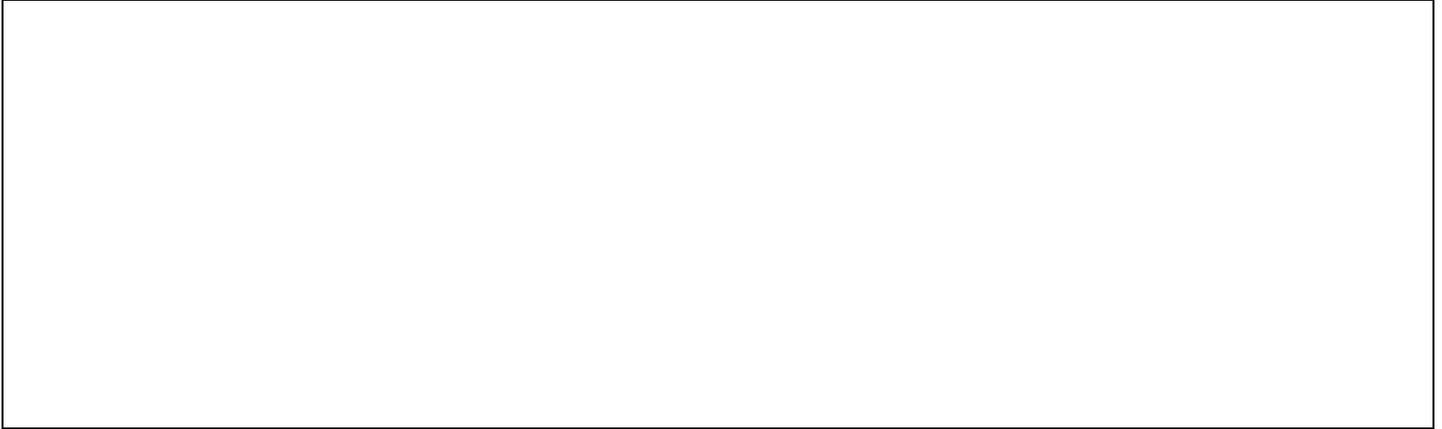


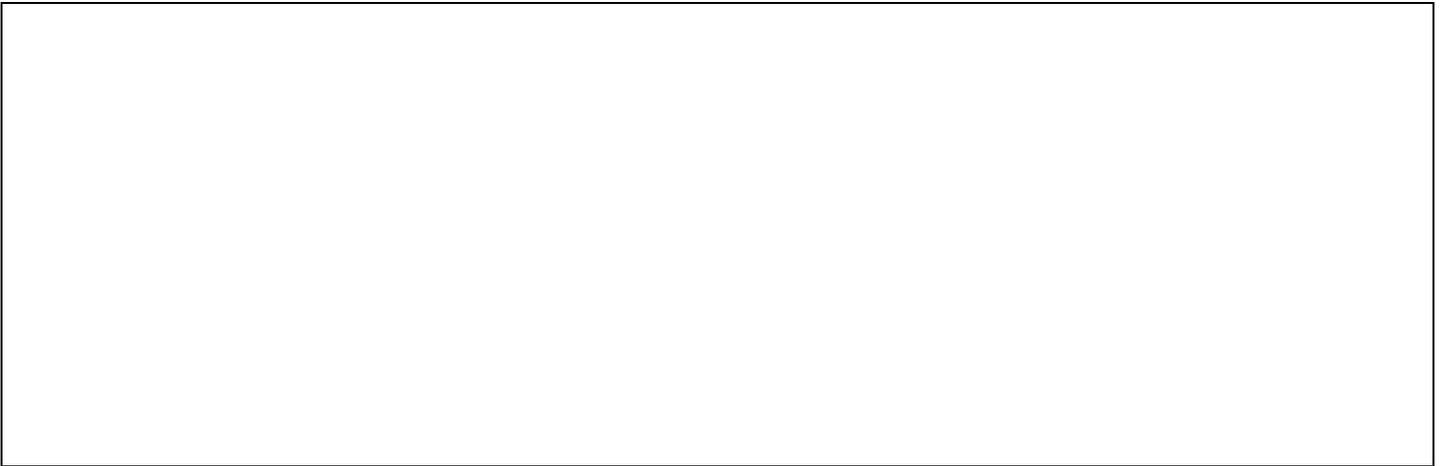
Figure 3. A : spectres XFR de quatre documents historiques identifiés comme M1679, M1664, 1566 et P1400. Pour chaque document, un spectre du substrat (s), et des zones à l'encre noire (b1, b2) ou rouge (r) ont été mesurés. **B :** photographie du document M1664 (gauche) et image obtenue par rayons X (droite).

- a. Expliquez pourquoi la présence de Fe et Ca est essentielle pour la lecture des documents par XFR. Les documents modernes utilisant des encres complètement organiques pourraient-ils aussi être numérisés aussi par XFR?

- b. Proposez un montage expérimental pour cette expérience de XFR, identifiez les composantes plus importantes et expliquez brièvement leur rôle.



- c. En utilisant un diagramme d'énergie, expliquez la formation de deux pics du Fe (≈ 6.4 et 7.0 keV) observés dans l'encre noire (b2) du document M1679 de la Figure 3A.



- d. Expliquez à l'aide d'un calcul, pourquoi la présence du flux de He est justifiée pour améliorer la détection des raies de faible énergie telle que celle du Hg à ≈ 2.2 keV. Exprimez votre résultat en fonction du nombre de photons qui se rendent au détecteur par 1000 photons émis par les documents.



Nom et prénom : _____

3. (20 points) Le contrôle de la présence de métaux traces dans les aliments est essentiel pour assurer que les consommateurs ne soient pas exposés à des quantités dépassant les seuils de toxicité de ces substances dans leur diète. Ceci est particulièrement important pour les nouveau-nés et les enfants qui vont être moins tolérants et à la présence de quantités toxiques des métaux tels que le molybdène et le sélénium dans leur nourriture. Selon les *National Institutes of Health* (NIH) des États-Unis, l'apport maximal tolérable des enfants de 1 à 3 ans pour Mo et Se est respectivement 300 et 90 $\mu\text{g jour}^{-1}$. En Corée du Sud, Khan *et al.* ont publié une étude sur le développement d'une méthode analytique capable de détecter ce deux métaux dans le lait de formule pour enfant (*Food Chem.* (2013), 141, 2366-3570). Ils ont exploré utilisation de la spectroscopie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES) et de plusieurs méthodes de digestion. Les auteurs ont utilisé un échantillon de concentration certifiée (*certified reference material*, CRM) pour évaluer la justesse de la méthode. Ils ont utilisé le CRM de lait en poudre sans gras NIST-1549 produit par le *National Institute of Standards and Technology* des États-Unis. Les valeurs de référence indiquées pour le Se et Mo étaient respectivement de 100 et 340 $\mu\text{g kg}^{-1}$.
- a. Expliquez le fonctionnement de l'ICP-AES et faites un schéma montrant les composantes principales de cet instrument en indiquant leur rôle.

- b. Les auteurs ont calculé la limite de détection (LOD) selon la méthode de l'IUPAC vue en classe. Expliquez, à l'aide des concepts vus en classe : i) pourquoi est-il important de faire au moins 10 mesures du blanc? et ii) pourquoi un facteur de 3 est-il utilisé dans l'équation suivante ?

$$LOD = \frac{3s_{bl}}{m}$$

Empty box for answer to question c.

c. Pourquoi est-il important de mesurer la justesse d'une méthode analytique? Le NIST-1549 est-il un bon CRM pour cette étude?

Empty box for answer to question d.

d. Les auteurs ont mesuré trois fois le CRM NIST-1549 et ils ont obtenu une valeur de $372 \pm 26 \mu\text{g kg}^{-1}$ pour Se et $45 \pm 16 \mu\text{g kg}^{-1}$ pour Mo. Calculez l'intervalle de confiance à 95 % pour ces concentrations.

Empty box for answer to question e.

e. Déterminez à l'aide du tableau A1 en annexe et de l'information donnée en 3d si la méthode ICP-AES a une performance adéquate en termes de justesse et précision.

Empty box for answer to question e.

Nom et prénom : _____

4. (30 points) La présence de « microplastiques », des fragments de polymères synthétiques (p. ex. polyéthylène, polypropylène, polystyrène, etc.) des tailles entre 1 μm et 5 mm (Figure 4) dans l'environnement aquatique est une problématique inquiétante pour la communauté scientifique. En effet, les microplastiques peuvent présenter un risque pour les écosystèmes aquatiques en raison de leur omniprésence documentée dans les eaux et sédiments, de leur temps de séjour prolongé et de leur propension à être ingérés par les espèces aquatiques. Pour ces raisons, il est critique de développer des méthodes rapides et efficaces de détection et d'identification des microplastiques dans l'environnement. Une étude publiée par une équipe allemande (Käppler *et al.*, *Anal. Bioanal. Chem.* (2016) 408 :8377-83191) a comparé la spectroscopie infrarouge et Raman pour identifier les microplastiques trouvés dans les sédiments des plages. Les auteurs ont utilisé un système micro-ATR-FTIR permettant la mesure des spectres infrarouges (entre 4000 et 600 cm^{-1} avec une résolution de 4 cm^{-1}) de particules de taille microscopique. Pour la mesure des spectres Raman entre 3600 et 160 cm^{-1} , les auteurs ont utilisé un système micro-Raman muni d'un laser Nd :YAG fournissant une radiation de 532 nm.

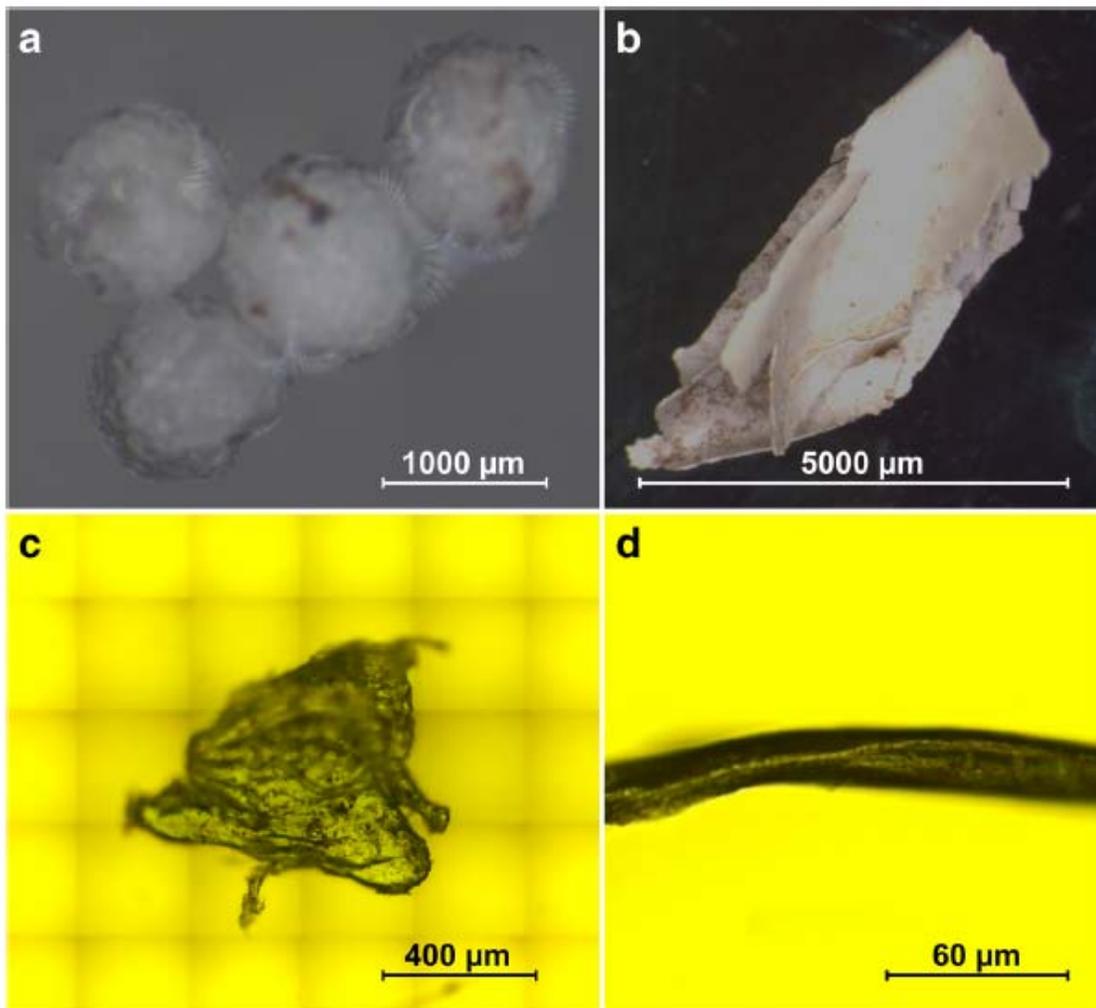


Figure 4. Photographies de microplastiques retrouvés dans l'environnement par les auteurs. **A** : sphères, **B** : fragments, **C** : particule, **D** : fibre.

- a. Expliquez le phénomène d'absorption infrarouge à l'aide du diagramme d'énergie potentielle de l'oscillateur anharmonique et indiquez quels niveaux vibrationnels sont impliqués dans une transition fondamentale.

- b. Expliquez le phénomène de diffusion Raman à l'aide d'un diagramme d'énergie.

- c. Les auteurs ont constaté que les microplastiques sphériques de la Figure 4A étaient faits de polystyrène grâce à la spectroscopie infrarouge et Raman (Figure 5A). Dans le spectre Raman, la raie observée à 1000 cm^{-1} est associée à des élongations des liens C-C de l'anneau benzénique dans molécule de polystyrène donnant lieu à une déformation du cycle. Quel changement doit provoquer cette vibration moléculaire pour qu'elle soit active en Raman? Comment peut-on expliquer son intensité élevée par rapport aux autres raies ? Expliquez votre réponse.

Nom et prénom : _____

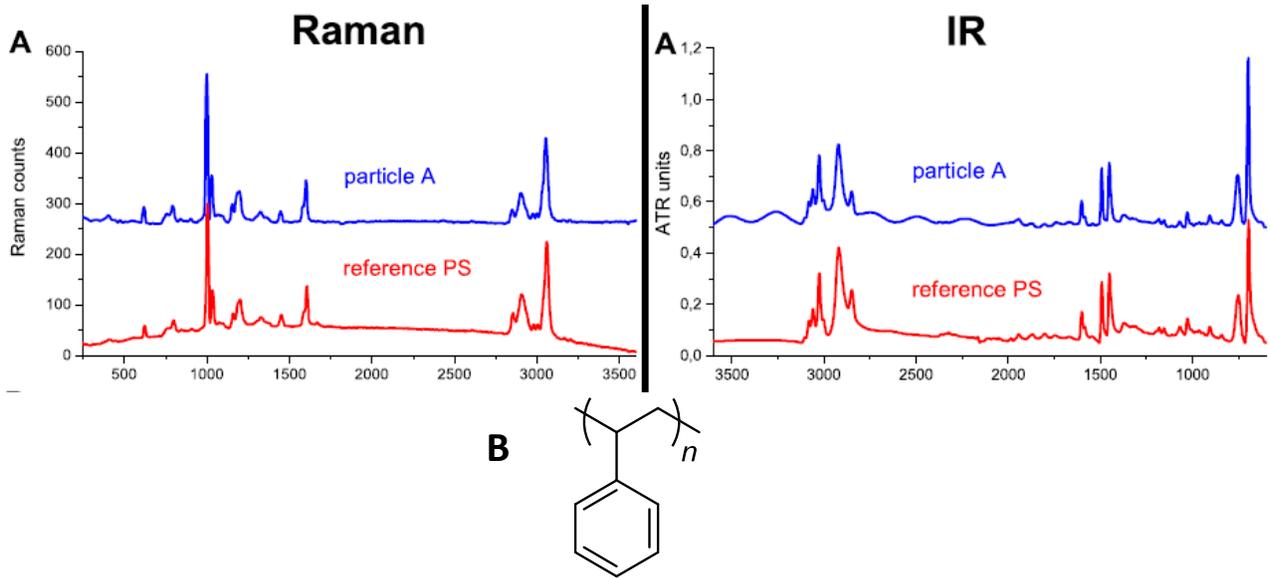


Figure 5. A : Spectres Raman et IR des particules sphériques de la figure 4A et d'une référence de polystyrène (PS). **B :** Structure moléculaire du polystyrène.

- d. Dans le spectre infrarouge de la Figure 5A, la raie observée à 2924 cm^{-1} est associée à des élongations antisymétriques liens du groupe méthylène ($-\text{CH}_2-$) dans molécule de polystyrène. Quel changement doit provoquer cette vibration moléculaire pour qu'elle soit active en infrarouge? Expliquez votre réponse.

Annexe

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$e = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$T \text{ (K)} = T \text{ (}^\circ\text{C)} + 273.15$$

$$m_e = 9.10953 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_e = 0.00055 \text{ Da}$$

$$1 \text{ Da} = 1.66055 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ (} f = \text{fréquence linéaire)}$$

$$\text{masse de } H^+ = 1.00728 \text{ Da}$$

$$\text{masse de } K^+ = 38.96316 \text{ Da}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
																	Prictogens	Chalcogens	Halogènes	
1	H Hydrogène 1,008	Atomique Sym Nom Masse																2	He Hélium 4,0026	
2	Li Lithium 6,94	Be Béryllium 9,0122	[C] Solide [Hg] Liquide [H] Gaz [Rf] Inconnu																10	Ne Néon 20,180
3	Na Sodium 22,990	Mg Magnésium 24,305	Métaux Métaux alcalins Métaux alcalino-terreux Lanthanides Actinides Métaux de transition Métaux Post-transition Métalloïdes Non-métaux Gaz rares																18	Ar Argon 39,948
4	K Potassium 39,098	Ca Calcium 40,078	21 Sc Scandium 44,956	22 Ti Titane 47,867	23 V Vanadium 50,942	24 Cr Chrome 51,996	25 Mn Manganèse 54,938	26 Fe Fer 55,845	27 Co Cobalt 58,933	28 Ni Nickel 58,693	29 Cu Cuivre 63,546	30 Zn Zinc 65,38	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,630	33 As Arsenic 74,922	34 Se Sélénium 78,971	35 Br Brome 79,904	36 Kr Krypton 83,798		
5	Rb Rubidium 85,468	Sr Strontium 87,62	39 Y Yttrium 88,906	40 Zr Zirconium 91,224	41 Nb Niobium 92,906	42 Mo Molybdène 95,95	43 Tc Technétium (98)	44 Ru Ruthénium 101,07	45 Rh Rhodium 102,91	46 Pd Palladium 106,42	47 Ag Argent 107,87	48 Cd Cadmium 112,41	49 In Indium 114,82	50 Sn Etain 118,71	51 Sb Antimoine 121,76	52 Te Tellure 127,60	53 I Iode 126,90	54 Xe Xénon 131,29		
6	Cs Césium 132,91	Ba Baryum 137,33	57-71	72 Hf Hafnium 178,49	73 Ta Tantale 180,95	74 W Tungstène 183,84	75 Re Rhénium 186,21	76 Os Osmium 190,23	77 Ir Iridium 192,22	78 Pt Platine 195,08	79 Au Or 196,97	80 Hg Mercure 200,59	81 Tl Thallium 204,38	82 Pb Plomb 207,2	83 Bi Bismuth 208,98	84 Po Polonium (209)	85 At Astate (210)	86 Rn Radon (222)		
7	Fr Francium (223)	Ra Radium (226)	89-103	104 Rf Rutherfordium (267)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (269)	107 Bh Bohrium (270)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnérium (278)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (282)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (290)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)		

Les masses atomiques entre parenthèses sont celles de l'isotope le plus stable ou le plus commun.

Tableau Périodique Copyright du design et interface © 1997 Michael Dayah. Ptable.com Dernière mise à jour 16 juin 2017

57 La Lanthane 138,91	58 Ce Cérium 140,12	59 Pr Praséodyme 140,91	60 Nd Neodyme 144,24	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Europium 151,96	64 Gd Gadolinium 157,25	65 Tb Terbium 158,93	66 Dy Dysprosium 162,50	67 Ho Holmium 164,93	68 Er Erbium 167,26	69 Tm Thulium 168,93	70 Yb Ytterbium 173,05	71 Lu Lutécium 174,97
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232,04	91 Pa Protactinium 231,04	92 U Uranium 238,03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Américium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkélium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendélévium (258)	102 No Nobélium (259)	103 Lr Lawrencium (266)

Nom et prénom :

Tableau A1

Valeurs acceptables : méthodes quantitatives

- Biais relatif

Fraction massique	Intervalle
$\leq 1 \mu\text{g/kg}$	-50 % à + 20 %
$\leq 1 \mu\text{g/kg}$ à $10 \mu\text{g/kg}$	-30 % à + 10 %
$\geq 10 \mu\text{g/kg}$	-20 % à + 10 %

- Écart-type relatif

Fraction massique	RSD%
$1 \mu\text{g/kg}$	≈ 25 à 30 % *
$10 \mu\text{g/kg}$	≈ 25 à 30 % *
$100 \mu\text{g/kg}$	23 %
$1000 \mu\text{g/kg}$	16 %

* Valeurs recommandées

Tableau A2

Valeurs critiques de la distribution t de Student (unilatéral)

Critical values of Student's t distribution with ν degrees of freedomProbability less than the critical value ($t_{1-\alpha, \nu}$)

ν	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995	0.999
1.	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.313
2.	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3.	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215
4.	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5.	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6.	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7.	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.782
8.	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.499
9.	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.296
10.	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.143
11.	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.024
12.	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.929
13.	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14.	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15.	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16.	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17.	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18.	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19.	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20.	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21.	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527

Pour un **test bilatéral**, la valeur de t correspondant au degré de confiance souhaité se trouve dans la colonne : $1-(\alpha/2)$

Tableau A3

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	1.08	
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	
Ar	Argon	18	36	35.967546	0.3379	39.948
			38	37.962776	0.0635	
			40	39.962383	100	
Br	Bromine	35	79	78.918338	100	79.904
			81	80.916291	97.28	

CAN 400 Analyse instrumentale

Examen final

Nom et prénom :

Tableau A4. Fronts d'absorption (*absorption edges*) et énergie en keV des raies spectrales caractéristiques des éléments sélectionnés.

Atomic number and element	K-series					L-series								M-series													
	K edge	KN _{III}	KM _{III}	KM _{II}	KL _{III}	KL _{II}	L _I edge	L _{IN_{III}}	L _{IM_{III}}	L _{IM_{II}}	L _{II} edge	L _{IN_{IV}}	L _{IM_{IV}}	L _{III} edge	L _{IIIN_V}	L _{IIIM_V}	L _{IIIM_{IV}}	L _{IIIM_I}	M _{II} N _{IV}	M _{III} edge	M _{IIIN_V}	M _{IV} edge	M _{IVN_{VI}}	M _V edge	M _{VN_{VII}}	M _{VN_{VI}}	
		Kβ ₂	Kβ ₁	Kβ ₃	Kα ₁	Kα ₂		Lγ ₃	Lβ ₃	Lβ ₄		Lγ ₁	Lβ ₁		Lβ ₂	Lα ₁	Lα ₂	L _I			Mγ		Mβ		Mα ₁	Mα ₂	
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 (Access date 2016-11-07).