



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 206464 - 2729994 - v1.0

16/02/2022

**Appui à l'expertise de l'accident survenu dans
une installation de traitement de déchets
métalliques exploitée par la société Purfer le
28 juillet 2021 à Saint Pierre de Chandieu (69)**

BEA-RI

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Incendie, Dispersion, Explosion

Rédaction : VIGNES Alexis

Vérification : CHAUMETTE SYLVAIN; MARLAIR GUY; PAPIN ARNAUD; LEPRETTE EMMANUEL

Approbation : Document approuvé le 16/02/2022 par PIQUETTE BERNARD

Résumé

Ce rapport a pour objet de répondre à une sollicitation du BEA-RI faite à l'Ineris. Celui-ci concerne l'enquête sur un accident sur le site de traitement de déchets métalliques de la société Purfer, situé sur la commune de Saint-Pierre de Chandieu (68), survenu le 28 juillet 2021.

L'objet de ce rapport consiste à répondre aux questions posées par le BEA-RI relatives à :

- La détermination de la nature des matériaux présents après l'accident en différentes localisations ;
- La détermination de la nature des produits de combustion observés au niveau de la pelle à grappin qui a été impactée par l'accident ;
- L'analyse des différentes réactions chimiques susceptibles de mener au phénomène accidentel observé ;
- L'estimation des quantités de produits susceptibles d'avoir participé au phénomène accidentel observé.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 206464 - 2729994 - v1.0

Mots-clés :

Explosion, aluminium, déchets métalliques.

Table des matières

Table des matières	4
Glossaire	5
Table des illustrations	6
1 Introduction	7
1.1 Déontologie	7
1.2 Contexte.....	7
1.3 Documents de référence, visite et réunions d'échanges	7
2 Présentation de l'installation objet de l'événement et informations sur l'événement.....	8
2.1 Description générale du site.....	8
2.2 Description succincte de l'événement	8
2.2.1 Chronologie	8
2.2.2 Relevé des dégâts	8
3 Réponses aux questions posées par le BEA-RI	10
3.1 Analyse des matériaux et produits de combustion en différentes localisations	10
3.1.1 Question N°1 du BEA-RI :	10
3.1.2 Réponse N°1 de l'Ineris.....	10
3.1.3 Question N°2 du BEA-RI :	11
3.1.4 Réponse N°2 de l'Ineris.....	11
3.1.5 Question N°3 du BEA-RI :	13
3.1.6 Réponse N°3 de l'Ineris.....	13
3.2 Analyse des différentes réactions chimiques possibles.....	13
3.2.1 Question N°4 du BEA-RI :	13
3.2.2 Réponse N°4 de l'Ineris.....	13
3.3 Estimation des quantités de produits ayant pu réagir.....	15
3.3.1 Question N°5 du BEA-RI :	15
3.3.2 Réponse N°5 de l'Ineris.....	15
4 Conclusion	17
5 Annexes.....	18

Glossaire

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
BEA-RI	Bureau d'enquêtes et d'analyses - Risques industriels
DREAL	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DEEE	Déchet d'équipement électrique et électronique
DRX	Diffraction des rayons X
EDX	Microanalyse par énergie dispersive de rayons X
ICP	Inductively coupled plasma – torche à plasma induit
Ineris	Institut national de l'environnement industriel et des risques
MEB	Microscopie électronique à balayage

Table des illustrations

Figure 1 Développement de la boule de feu au niveau du tas d'aluminium	9
Figure 2 Tas d'aluminium brassé par les pompiers avec du sable.....	9
Figure 3 : Dégâts sur l'avant de la pelle à grappin (a) Dégâts sur le côté gauche de la cabine de la pelle à grappin (b) Grappin de la pelle	9
Figure 4 Localisation des échantillons prélevés et analysés par l'Ineris (photo reconstituée).....	10
Figure 5 Localisation des échantillons prélevés et analysés par l'Ineris	12
Figure 6 Zones bleutées observées sur l'échantillon 21AR082	12
Figure 7 Copeaux millimétriques prélevés sur le tas d'aluminium.....	13
Figure 8 Réactivité à la flamme des échantillons 21AR078 et 21AR083.....	22
Figure 9 Réactivité à la flamme des échantillons 21AR079.....	22
Figure 10 Analyse par ICP optique des échantillons 21AR078 et 21AR083	23
Figure 11 Analyse par ICP optique de l'échantillon 21AR079	23
Figure 12 Images MEB de l'échantillon 21AR078	24
Figure 13 Images MEB de l'échantillon 21AR079	24
Figure 14 Analyse par ICP optique des échantillons 21AR084 et 21AR082	26
Figure 15 Images MEB de l'échantillon 21AR082	27
Figure 16 Images MEB de l'échantillon 21AR084	27
Figure 17 Images MEB de l'échantillon 21AR085	29
Figure 18 Spectre de diffraction RX de l'échantillon 21AR085	30
Figure 19 Analyse EDX de l'échantillon 21AR078 (photo MEB N°1)	32
Figure 20 Analyse EDX de l'échantillon 21AR078 (photo MEB N°2)	34
Figure 21 Analyse EDX de l'échantillon 21AR079 (photo MEB N°1)	35
Figure 22 Analyse EDX de l'échantillon 21AR079 (photo MEB N°2)	36
Figure 23 Analyse EDX de l'échantillon 21AR082 (photo MEB N°1)	37
Figure 24 Analyse EDX de l'échantillon 21AR082 (photo MEB N°2)	38
Figure 25 Analyse EDX de l'échantillon 21AR084 (photo MEB N°1)	39
Figure 26 Analyse EDX de l'échantillon 21AR084 (photo MEB N°2)	41
Figure 27 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°1)	42
Figure 28 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°2)	43
Figure 29 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°3)	44

1 Introduction

1.1 Déontologie

L'Ineris n'a jamais réalisé d'études pour le site Purfer à Saint-Pierre de Chandieu.

1.2 Contexte

Le 28 juillet 2021, une explosion s'est produite dans la zone de stockage des déchets d'aluminium du site de Purfer (68). Ce site collecte et réalise le tri des déchets métalliques divers en vue de leur valorisation. La zone concernée par l'accident est dédiée au stockage d'aluminium et alliages d'aluminium. Il n'y a pas eu d'effets de pression et les effets thermiques ont été localisés, impactant la pelle à grappin en raison du flux radiatif (dégradation thermique au niveau de la cabine de la pelle) et blessant également son conducteur.

Suite à l'accident, le BEA-RI a missionné l'Ineris par courriel en date du 16 novembre 2021 afin de répondre à plusieurs questions. Le courriel de demande est présenté en Annexe 1 de ce rapport.

Les questions portent sur :

- La détermination des matériaux présents après l'accident sur le tas de copeaux en différentes localisations ;
- La détermination des produits de combustion observés sur la cabine de la pelle ;
- L'analyse de la composition des dépôts observés sur le grappin ;
- L'analyse des différentes réactions chimiques susceptibles de mener à un tel phénomène ;
- L'estimation des quantités de produits susceptibles d'avoir été mises en œuvre au cours du phénomène.

1.3 Documents de référence, visite et réunions d'échanges

Les éléments ayant permis de rédiger ce rapport sont listés en Annexe 2.

Pour cette analyse, l'Ineris a réalisé une visite du site de Purfer en présence du BEA-RI, des sapeurs-pompiers ainsi que de la DREAL en date du 4 août 2021. Cette visite a permis à l'Ineris de prélever des échantillons en plusieurs localisations au niveau de la zone de stockage des déchets d'aluminium.

2 Présentation de l'installation objet de l'événement et informations sur l'événement

2.1 Description générale du site

Le site de Purfer collecte, trie et transforme des déchets métalliques ferreux et non ferreux (e.g. aluminium, cuivre, et autres alliages), des déchets industriels ainsi que des biens d'équipements en fin de vie (e.g. gazinières, réfrigérateurs, machines à laver) en vue de leur valorisation. La zone de stockage impliquée dans l'accident est située à l'air libre sur un sol bétonné. Cette zone est consacrée au stockage d'aluminiums de différentes qualités (chutes de production, bordures de fenêtre, jantes de voiture, copeaux et tournures d'aluminium). Les produits gras (e.g. contaminés par des huiles de découpe), les poudres ainsi que les métaux autres que de l'aluminium ou alliages d'aluminium ne sont pas pris en charge dans cette zone. Il n'y a pas de surveillance spécifique de cette zone, qui est cachée partiellement par un bloc de béton, ce qui la rend peu visible par la caméra de surveillance présente à l'entrée du site.

2.2 Description succincte de l'événement

2.2.1 Chronologie

A 8 heures du matin, le 28 juillet 2021, l'opérateur prend son poste normalement. Il est affecté aux opérations de broyage des DEEE et plus particulièrement au broyage des machines à laver. Dans le courant de la matinée, le supérieur hiérarchique demande à l'opérateur de déplacer un broyeur depuis la zone de stockage du cuivre vers la zone de stockage d'aluminium. La batterie du tracteur du broyeur étant en panne, l'opérateur prend la pelle stationnée dans la zone « aluminium » afin de pouvoir démarrer le tracteur. Le grappin de la pelle est ouvert, posé au sol, n'est pas en contact avec le tas d'aluminium. Après démarrage du tracteur dans la zone cuivre, la pelle est stationnée dans la zone et n'est pas mise en contact avec le tas de cuivre. Le broyeur est déplacé par l'opérateur dans la zone aluminium. L'opérateur revient ensuite chercher à pied la pelle à grappin afin de la stationner dans la zone aluminium. Compte tenu de la présence du broyeur dans la zone aluminium, l'opérateur stationne la pelle près du tas d'aluminium. Lors de la dépose du grappin, le grappin est en léger mouvement et frotte le sol. Une partie des dents du grappin entre également en contact avec le tas d'aluminium (deux ou trois dents). Dans le mouvement, il ouvre également le grappin.

Lorsque le grappin touche le sol, l'opérateur observe l'apparition d'une lumière blanche très vive pendant plus d'une dizaine de secondes. Un bruit sourd a été entendu par les témoins présents qui ont vu l'apparition d'une boule de feu au niveau de la zone de stockage. La visualisation de la vidéo de surveillance montre également une pluie incandescente de brandons très chauds à 20-30 m de la zone « aluminium » accompagnée de flocons blancs apparemment assez légers.

Pendant ce laps de temps, l'opérateur tente de reculer puis décide de sauter de l'engin afin d'évacuer la zone. L'opérateur n'a pas ressenti de gêne pour respirer ni pendant ni après l'incident mais il a été brûlé par le flux radiatif de la flamme.

Vers midi, le responsable de chantier est prévenu de l'incident et les pompiers sont appelés. L'eau sur le métal en feu pouvant générer des explosions d'hydrogène, et l'utilisation de mousse étant inefficace, 60 tonnes de sable sont livrées sur le site vers 14 heures afin d'étouffer le foyer en le recouvrant et en brassant l'aluminium avec le sable. Un dispositif de surveillance par caméra thermique est mis en place jusqu'au lundi 2 août 2021.

2.2.2 Relevé des dégâts

La boule de feu formée (Cf. Figure 1) s'est développée à partir du bas du tas de copeaux d'aluminium. La température de surface résiduelle mesurée par caméra thermique par les pompiers lors de leur arrivée sur site était de 250°C tandis que la température sur la dalle de béton était de 43°C. Le reste du tas n'a pas été impacté par l'accident. Des traces de fusion sur le tas ont également été notées par les intervenants. Lors de la visite de l'Ineris sur le site, le tas avait totalement été brassé avec du sable par les pompiers (Cf. Figure 2). La reconstitution de la scène montre que l'arrière du tas est représentatif de l'aluminium le plus ancien tandis que l'avant droit est plus représentatif de l'aluminium qui a brûlé.

L'avant gauche du tas est constitué d'aluminium n'ayant pas réagi et initialement plus au centre du tas avant d'être poussé par les pompiers. On relève également sur le bloc béton à droite du tas, des dépôts compacts, présentant des traces noires.



Figure 1 Développement de la boule de feu au niveau du tas d'aluminium



Figure 2 Tas d'aluminium brassé par les pompiers avec du sable

Au niveau de la pelle à grappin (Cf. Figure 3), on note une cokéfaction du côté du siège conducteur constitué vraisemblablement d'ABS et la vitre de la pelle est couverte de globules gris et de coulures jusqu'à mi-hauteur environ. Des résidus sont également présents sous la cabine de la pelle. Au niveau du grappin de la pelle, des résidus de combustion sont présents à l'intérieur des dents. La pointe des dents ne présente pas de dommages consécutifs à l'accident.



Figure 3 : Dégâts sur l'avant de la pelle à grappin (a) Dégâts sur le côté gauche de la cabine de la pelle à grappin (b) Grappin de la pelle

3 Réponses aux questions posées par le BEA-RI

3.1 Analyse des matériaux et produits de combustion en différentes localisations

L'accident a impacté le tas d'aluminium, la pelle à grappin ainsi que le conducteur de la pelle. Durant la visite sur site, l'Ineris a prélevé plusieurs échantillons en différentes localisations afin de déterminer la nature exacte des matériaux impliqués dans l'accident. Les produits de combustion résultant de l'accident et qui se sont déposés autour du point de combustion ont été également prélevés et analysés.

3.1.1 Question N°1 du BEA-RI :

Quelle est la nature des matériaux présents après l'accident sur le tas de copeaux en différentes localisations ?

3.1.2 Réponse N°1 de l'Ineris

Trois prélèvements ont été analysés au niveau du tas d'aluminium :

- Réf. Ineris 21AR079 - Prélèvement de copeaux d'aluminium frais mis sur le côté gauche par les pompiers ;
- Réf. Ineris 21AR078- Prélèvement sur le bloc béton à droite du tas de copeaux d'aluminium - Dépôts noirs en surface ;
- Réf. Ineris 21AR083 - Prélèvement en bas à droite du tas, près du mur en béton.

La localisation des prélèvements effectués pour analyse est repérée sur la Figure 4 via les pastilles rouges.



Figure 4 Localisation des échantillons prélevés et analysés par l'Ineris (photo reconstituée)

Compte tenu de l'hétérogénéité des échantillons, la réactivité potentielle de ces derniers a été testée dans un premier temps via le passage d'une flamme à la surface des échantillons. Les échantillons ont réagi par l'émission d'un flash lumineux (21AR78), l'émission d'une étincelle (21AR083) et la génération d'une petite flamme de couleur verte (21AR079) à un endroit de l'échantillon.

Une partie de ces échantillons a également subi une attaque acide (minéralisation avec un mélange HNO₃ / HF) à partir de trois prises d'essais afin de réaliser une analyse chimique par spectrométrie à plasma induit (ICP-Optique) et déterminer la composition élémentaire moyenne des échantillons. L'analyse par ICP montre que ces échantillons sont constitués principalement d'aluminium et contiennent également en faible quantité du cuivre, du fer, du zinc ainsi que du silicium. Ces éléments se retrouvent communément dans les alliages d'aluminium. La présence de silicium peut également être due à une contamination par du sable.

Les échantillons 21AR079 et 21AR078 ont également été analysés par la microscopie électronique à balayage (MEB) associée à la microanalyse par énergie dispersive de rayons X (EDX) qui permet une analyse locale des matériaux non organiques. L'échantillon 21AR079 est composé majoritairement d'aluminium métal. Du carbone est également présent. L'échantillon 21AR078 est majoritairement composé en revanche d'oxydes de magnésium et d'aluminium. Des fibres de magnésium sont également présentes.

Compte tenu de ces éléments, on s'aperçoit que selon la localisation des échantillons, les matériaux présents diffèrent assez fortement tant du point de vue de leur composition que de leur réactivité. On peut donc conclure que :

- L'échantillon 21AR079 prélevé sur le côté gauche du tas (aluminium « frais » poussé par les pompiers) est composé d'aluminium et d'alliages d'aluminium. La flamme verte observée expérimentalement peut potentiellement s'expliquer par la présence très localisée de cuivre accompagné d'un composé organique halogéné (e.g. plastique), typique d'une réaction de test de Beilstein¹ ;
- Les échantillons 21AR078 et 21AR083 sont composés majoritairement d'aluminium. L'échantillon 21AR078 contient également des fibres de magnésium et des oxydes d'aluminium et de magnésium comme en témoignent les analyses MEB-EDX. La réactivité à la flamme des deux échantillons (flash lumineux, étincelle lumineuse) semble confirmer la présence de magnésium métallique en quantité appréciable.

Les résultats d'analyse de ces échantillons sont rassemblés dans l'Annexe 2 de ce rapport.

3.1.3 Question N°2 du BEA-RI :

Quelle est la nature des matériaux de combustion observés sur la cabine de la pelle ?

3.1.4 Réponse N°2 de l'Ineris

Deux prélèvements ont été analysés au niveau de la cabine de la pelle à grappin :

- Réf. Ineris 21AR082 - Prélèvement sur l'escabeau de la pelle à grappin ;
- Réf. Ineris 21AR084 - Prélèvement sous la cabine de la pelle à grappin.

La localisation des prélèvements effectués pour analyse est repérée sur la Figure 5 via les pastilles rouges.

Le passage à la flamme des échantillons prélevés n'a pas entraîné de phénomène réactif particulier. L'analyse de ces échantillons, préalablement dissous dans de l'acide, par ICP-optique montre qu'ils contiennent principalement comme éléments chimiques, de l'aluminium, du cuivre ainsi que du fer. Du phosphore et du silicium sont également présents dans l'échantillon 21AR082. La présence de ces deux éléments dans 21AR082 peut s'expliquer par une contamination par de la poudre d'extinction utilisée dans la cabine (e.g. phosphate d'ammonium, silicates de magnésium ou d'aluminium).

¹ F. Beilstein (1872). "Ueber den Nachweis von Chlor, Brom und Jod in organischen Substanzen". Ber. Dtsch. Chem. Ges. 5 (2): 620–621. doi:10.1002/cber.18720050209

L'analyse par MEB-EDX des échantillons montre plus particulièrement que :

- L'échantillon 21AR082 contient majoritairement des oxydes d'aluminium (Al_2O_3) ainsi que du sulfate de cuivre comme confirmé par la présence de zones bleutées sur l'échantillon (Cf. Figure 6). On observe également des particules isolées de Mg et MgO. De l'oxyde de cuivre est également détectée. A noter qu'en cas de chauffage important du sulfate de cuivre, ce dernier peut se décomposer sous la forme d'oxyde de cuivre CuO^2 .
- L'échantillon 21AR084 contient majoritairement des oxydes d'aluminium et de magnésium. Du sulfate de cuivre (CuSO_4) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) est également présent.



Figure 5 Localisation des échantillons prélevés et analysés par l'Ineris



Figure 6 Zones bleutées observées sur l'échantillon 21AR082

En résumé, les échantillons prélevés au niveau de la pelle à grappin sont composés principalement d'oxydes d'aluminium. Quelques particules isolées de Mg ou MgO sont également observées. On notera également la présence en moindre mesure de sulfate de cuivre bleu (CuSO_4) et d'oxydes de fer rouge (Fe_2O_3).

Les résultats d'analyse de ces échantillons sont rassemblés dans l'Annexe 4 de ce rapport.

² Selon la réaction $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{CuO} + \text{SO}_3$ ou encore $2 \text{CuSO}_4 \rightarrow 2\text{CuO} + 2 \text{SO}_2 + \text{O}_2$

3.1.5 Question N°3 du BEA-RI :

Quelle est la composition des dépôts observés sur le grappin ?

3.1.6 Réponse N°3 de l'Ineris

Un prélèvement a été réalisé à l'intérieur du grappin de la pelle (Réf. Ineris AR085). La quantité d'échantillon disponible pouvant être prélevée était relativement faible. L'analyse par MEB-EDX montre que l'échantillon est composé majoritairement d'oxyde de magnésium (MgO) accompagné d'aluminium métallique. On note aussi la présence d'oxyde d'aluminium ainsi que la présence d'un grain de cuivre, issu probablement d'une contamination de l'échantillon analysé par la surface de la pelle lors d'une précédente manipulation de cuivre dans la zone de tri « cuivre ». L'analyse des échantillons par DRX (diffraction des rayons X) montre que les phases cristallines identifiées sont majoritairement MgO et Mg(OH)₂ avec un peu d'aluminium métal.

Les résultats d'analyse de ces échantillons sont rassemblés dans l'Annexe 4 de ce rapport.

3.2 Analyse des différentes réactions chimiques possibles

3.2.1 Question N°4 du BEA-RI :

Quelles sont les différentes réactions chimiques susceptibles de mener à un tel phénomène ?

3.2.2 Réponse N°4 de l'Ineris

Le tas d'aluminium est composé principalement de copeaux millimétriques (Cf. Figure 7). Il n'est donc pas susceptible de former une atmosphère explosive ATEX.



Figure 7 Copeaux millimétriques prélevés sur le tas d'aluminium

En revanche, l'absence d'effets de pression, le temps de combustion relativement long (> 10 s) et la lumière très vive observée semblent indiquer un feu de copeaux d'aluminium en nuage. Toutefois, l'aluminium millimétrique en vrac ne s'enflamme que très difficilement en raison de sa couche d'oxyde protectrice. Les réactions chimiques susceptibles d'enflammer l'aluminium impliquent donc soit une réaction thermitique impliquant un oxyde métallique et de l'aluminium soit un métal plus réactif que l'aluminium.

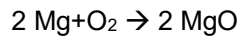
En ce qui concerne les réactions thermites potentielles, l'aluminium et le magnésium sont susceptibles de réagir fortement en présence d'oxyde de cuivre, d'oxyde de fer, de monoxyde de plomb ou encore d'oxyde de manganèse^{3,4} lorsqu'une énergie d'inflammation suffisante est apportée. Si du cuivre est bien présent dans certains échantillons, il est en revanche sous la forme majoritaire de sulfate de cuivre. L'oxyde de cuivre également détecté sur l'échantillon 21AR082 provient vraisemblablement de la décomposition du sulfate de cuivre pendant le phénomène (fort chauffage radiatif).

³ P.G. Urban, Bretherick's Handbook of Reactive Chemical Hazards, Eighth Edition, Butterworth, 2017

⁴ S. H. Fischer et al. C. Grubelich, Theoretical energy release of thermites, intermetallics and combustible metals, 24th International Pyrotechnics Seminar, Monterey, CA. July 1998

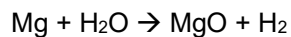
En ce qui concerne l'oxyde ferrique rouge Fe_2O_3 détectée dans l'échantillon prélevé sous la cabine de la pelle, ce dernier provient soit de la combustion de particules de fer soit de résidus de rouille (Fe_2O_3 sous forme hydratée) déjà présents sous la cabine de la pelle.

Les métaux plus réactifs que l'aluminium sont le titane, le magnésium, le sodium et le lithium. Compte tenu des analyses chimiques réalisées, seul le magnésium est à considérer ici. Les fibres de magnésium présentes dans le tas, par friction avec la pointe des dents de la pelle ou bien via une étincelle formée lors la dépose de la pelle (non observée par le témoin ce jour-là mais déjà observée par les opérateurs du site) se sont enflammées selon la réaction d'oxydation suivante :



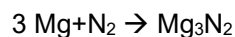
L'oxyde de magnésium formé a ainsi été retrouvé dans le grappin de la pelle (21AR085) ainsi que dans plusieurs échantillons prélevés.

En parallèle de cette réaction d'amorçage, le magnésium a pu également réagir avec l'humidité présente dans le tas selon la réaction :

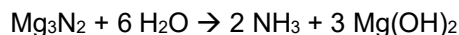


Si à température ambiante, cette réaction est très peu favorisée⁵, en revanche, la forte chaleur dégagée par la combustion de magnésium est susceptible de dissocier l'eau en oxygène et hydrogène. Le magnésium ayant une plus forte affinité avec l'oxygène que l'hydrogène, l'oxygène ainsi formé peut venir alimenter la combustion du magnésium et favoriser une température de combustion encore plus élevée. Cependant, lorsque la température du milieu diminue, à la fin du phénomène, l'eau vaporisée depuis le tas ne va plus alimenter le feu mais va venir, au contraire, accélérer la chute de température par absorption de chaleur.

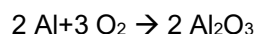
Par ailleurs, on doit noter également la présence de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dans les résidus de combustion prélevés dans la pelle à grappin. Ce composé s'est formé très vraisemblablement selon les réactions suivantes :



Le nitride de magnésium, très hygroscopique, réagit ensuite à température ambiante avec l'humidité de l'air pour former de l'ammoniac et de l'hydroxyde de magnésium selon la réaction suivante :



La formation de nitride de magnésium indique une température minimale atteinte de 3000°C ⁶ ce qui constitue une température suffisante pour enflammer de l'aluminium en vrac dont la température minimale d'inflammation rapportée est supérieure à 1600°C ^{7,8}. Dans tous les cas, la température atteinte soit par la combustion directe du magnésium soit par la formation de Mg_3N_2 est supérieure à 2700°C ce qui est très supérieur à la température de fusion de l'alumine, permettant de mettre à nu l'aluminium qui peut ensuite brûler en phase gazeuse dans l'air :



Au-delà de ces réactions, on peut noter également que la température d'inflammation d'un alliage Al-Mg est inférieure à celles de ses constituants⁹. On ne peut donc exclure que des alliages Al-Mg dans le tas aient pu également participer à l'amorçage du phénomène.

⁵ Dans tous les cas, l'hydrogène éventuellement formé va se diffuser très rapidement dans l'air et ne sera pas retenu par le tas d'aluminium. L'absence d'effet de souffle et d'effet directionnel milite également dans ce sens (absence d'explosion d'hydrogène).

⁶ Czerwinski F., Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications, Corrosion Science 86 (2014) 1–16

⁷ M.A. Trunov et al. Effect of polymorphic phase transformations in Al_2O_3 film on oxidation kinetics of aluminum powders, Combustion and Flame 140 (2005) 310–318

⁸ Werley, B. L., Barthelemy, H., Gates, R., Slusser, J. W., Wilson, K. B., and Zawierucha, R., A Critical Review of Flammability Data for Aluminum, ASTM STP 1197_ Dwight D. Janoff and Joel M. Stoltzfus, Eda., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.

⁹ Mellottée, H. (1978). Combustion des métaux, prévention et lutte. Techniques de l'Ingénieur M580 : 20.

3.3 Estimation des quantités de produits ayant pu réagir

3.3.1 Question N°5 du BEA-RI :

Quelles sont les quantités de produits susceptibles d'avoir été mises en œuvre ?

3.3.2 Réponse N°5 de l'Ineris

L'observation du phénomène par la caméra de surveillance ainsi que les résultats d'analyse semblent indiquer que le phénomène observé a impliqué principalement une combustion d'aluminium dans l'air avec fusion, projection de liquide et formation d'alumine. Ce phénomène a été amorcé par l'inflammation de magnésium qui a porté l'aluminium à sa température d'inflammation. En vue de consolider ces hypothèses, une évaluation des quantités de produits mises en œuvre a été effectuée.

- **Estimation de la quantité d'aluminium mise en œuvre :**

L'énergie de combustion de l'aluminium selon l'équation bilan $2 \text{ Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ Al}_2\text{O}_3$ est d'environ 30 MJ/kg_{aluminium}. Afin de déterminer la quantité d'aluminium mise en œuvre, il convient donc de déterminer l'énergie thermique rayonnée pendant toute la durée du phénomène ($\tau = 10 \text{ s}$) à une distance d'environ $r_g = 5 \text{ m}$ (distance approximative entre le bras de la grue et la cabine, i.e. entre le lieu d'apparition du phénomène et la cabine). Cette énergie rayonnée peut être très approximativement évaluée au moyen du modèle de la source ponctuelle :

$$E = \Phi_p \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_g^2 \cdot \tau$$

Le flux thermique Φ_p ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) peut être déterminé soit en considérant :

- Les dégradations thermiques de l'ABS de la cabine qui commence à se dégrader thermiquement (pyrolyse) vers $T_{\text{pyr}} = 700 \text{ K}$. Sous l'hypothèse d'un rayonnement thermique intense, le flux thermique peut être déterminé selon :

$$\Phi_p = \varepsilon_{\text{abs}} \cdot \sigma_{\text{botzmann}} \cdot T_{\text{pyr}}^4$$

On considèrera ici que le coefficient d'absorption ε_{abs} vaut 1 (tout le flux est absorbé par l'ABS). σ_{botzmann} est la constante de Stefan-Boltzmann et vaut $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$. Le flux thermique ainsi calculé vaut environ 14 kW/m^2 .

- La dose thermique C_L (kW/m^2)^{4/3}.s requise pour provoquer une brûlure en quelques secondes. Le flux thermique associé peut alors être déterminé selon :

$$\Phi_p = \left(\frac{C_L}{\tau} \right)^{\frac{3}{4}}$$

En considérant une dose thermique de 300 (kW/m^2)^{4/3}.s, qui peut typiquement provoquer des brûlures de second degré en quelques secondes¹⁰, le flux thermique ainsi calculé est d'environ 13 kW/m^2

On peut donc considérer un flux thermique d'environ $12\text{-}15 \text{ kW/m}^2$ comme ordre de grandeur. Par conséquent, l'énergie dégagée par la boule de feu est en ordre de grandeur de 50 MJ .

Des travaux antérieurs menés à l'Ineris ont montré qu'aux températures de combustion de l'aluminium, l'essentiel de l'énergie de combustion est rayonné si bien que E est un estimateur raisonnable de l'énergie effectivement mise en jeu. Dans ces conditions, la quantité d'aluminium ayant brûlé est de quelques kilos ce qui représenterait un volume de copeaux d'une dizaine de litres.

¹⁰ S. O'Sullivan et al., Human Vulnerability to Thermal Radiation Offshore, HSL/2004/04

- **Estimation de la quantité de magnésium mise en œuvre :**

L'énergie spécifique de combustion du magnésium selon l'équation bilan $2 \text{ Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ MgO}$ est d'environ $25 \text{ MJ/kg}_{\text{magnésium}}$. Afin de déterminer la quantité de magnésium mise en œuvre de manière conservatrice, il convient de déterminer l'énergie thermique nécessaire pour porter quelques kilos d'aluminium à une température d'inflammation T_{ign} de 1600°C . En première approximation, l'énergie nécessaire pour enflammer l'aluminium peut s'évaluer selon :

$$E = m_{Al} \cdot C_{p,Al} \cdot (T_{ign} - T_{amb})$$

Avec m_{Al} la masse d'aluminium impliquée dans le phénomène, $C_{p,Al}$ la capacité calorifique moyenne de l'aluminium sur la plage de température considérée ($\sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et T_{amb} la température ambiante. Dans ces conditions, l'énergie nécessaire pour enflammer quelques kilos d'aluminium est d'environ une dizaine de mégajoules. L'inflammation de quelques kilogrammes d'aluminium requiert donc la combustion de quelques centaines de grammes de magnésium. En ordre de grandeur, on peut donc retenir qu'un lot de copeaux d'aluminium contaminé avec 10 % de magnésium pourrait être suffisant pour générer le phénomène observé.

4 Conclusion

A la demande du BEA-RI, l'Ineris a répondu à 5 questions en appui à l'analyse de l'accident survenu sur la zone de stockage « aluminium » du site de Purfer à Saint-Pierre de Chandieu, le 28 juillet 2021.

Ces questions portaient sur :

- La composition des échantillons prélevés en différentes localisations du tas d'aluminium, sur la pelle à grappin et à l'intérieur du grappin ;
- L'analyse des réactions chimiques susceptibles de mener au phénomène accidentel observé ;
- L'évaluation des quantités de produits impliquées dans l'accident.

Il ressort de l'expertise de l'Ineris que le scénario à privilégier serait la présence d'un lot d'aluminium contaminé par du magnésium qui s'est enflammé lors de la dépose de la pelle à grappin.

Sous l'effet du fort gradient thermique, voire du mouvement de la pelle, il y a eu mise en suspension d'un volume de quelques litres d'aluminium qui s'est enflammé via l'énergie dégagée par la combustion du magnésium, ce qui a généré une boule de feu avec un fort rayonnement radiatif.

Ensuite, sous l'effet de la sédimentation, les copeaux d'aluminium mis en suspension sont retombés, la température est rapidement retombée sous la température d'inflammation de l'aluminium, mettant fin au phénomène.

5 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Sollicitation du BEA-RI en date du 16 novembre 2021 – 1 page ;
- Annexe 2 : Résultats d'analyse des échantillons prélevés au niveau du tas d'aluminium 3 pages ;
- Annexe 3 : Résultats d'analyse des échantillons prélevés au niveau de la cabine de la pelle à grappin – 2 pages ;
- Annexe 4 : Résultats d'analyse de l'échantillon prélevé au niveau du grappin de la pelle 2 pages ;
- Annexe 5 : Résultats bruts des analyses EDX réalisées sur les échantillons – 13 pages.

Annexe 1
Sollicitation du BEA-RI en date du 16 novembre 2021
1 page



Objet: Enquête BEA-RI PURFER

Bonjour,

Pour faire suite à nos échanges, voici les points sur lesquels nous sollicitons l'appui de l'Ineris :

- détermination des matériaux présents après l'accident sur le tas de copeaux en différentes localisations ;
- détermination des produits de combustion observés sur la cabine de la pelle ;
- Analyse de la composition des dépôts observés sur le grappin ;
- Analyse des différentes réactions chimiques susceptibles de mener à un tel phénomène;
- Estimation des quantités de produits susceptibles d'avoir été mises en œuvre au cours du phénomène.

Nous sommes à votre disposition pour toute question complémentaire,

Bien cordialement,



Annexe 2
Résultats d'analyse des échantillons prélevés au niveau
du tas d'aluminium
3 pages

- Réactivité à la flamme des échantillons prélevés



Figure 8 Réactivité à la flamme des échantillons 21AR078 et 21AR083



Figure 9 Réactivité à la flamme des échantillons 21AR079

- Résultats d'analyse par spectrométrie d'émission optique à plasma induit (ICP optique)

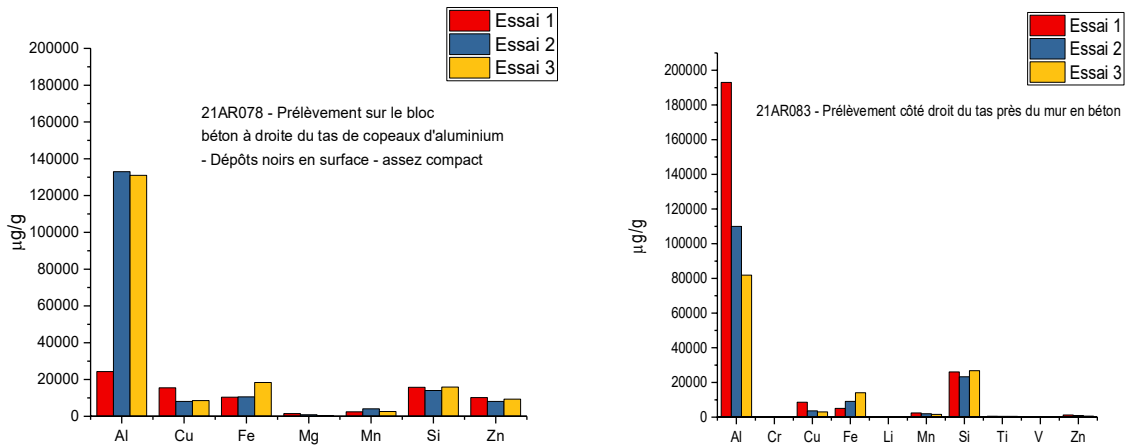


Figure 10 Analyse par ICP optique des échantillons 21AR078 et 21AR083

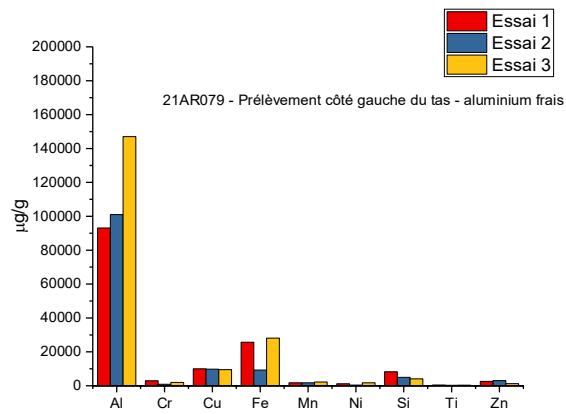


Figure 11 Analyse par ICP optique de l'échantillon 21AR079

- Résultats d'analyse par MEB (EDX)

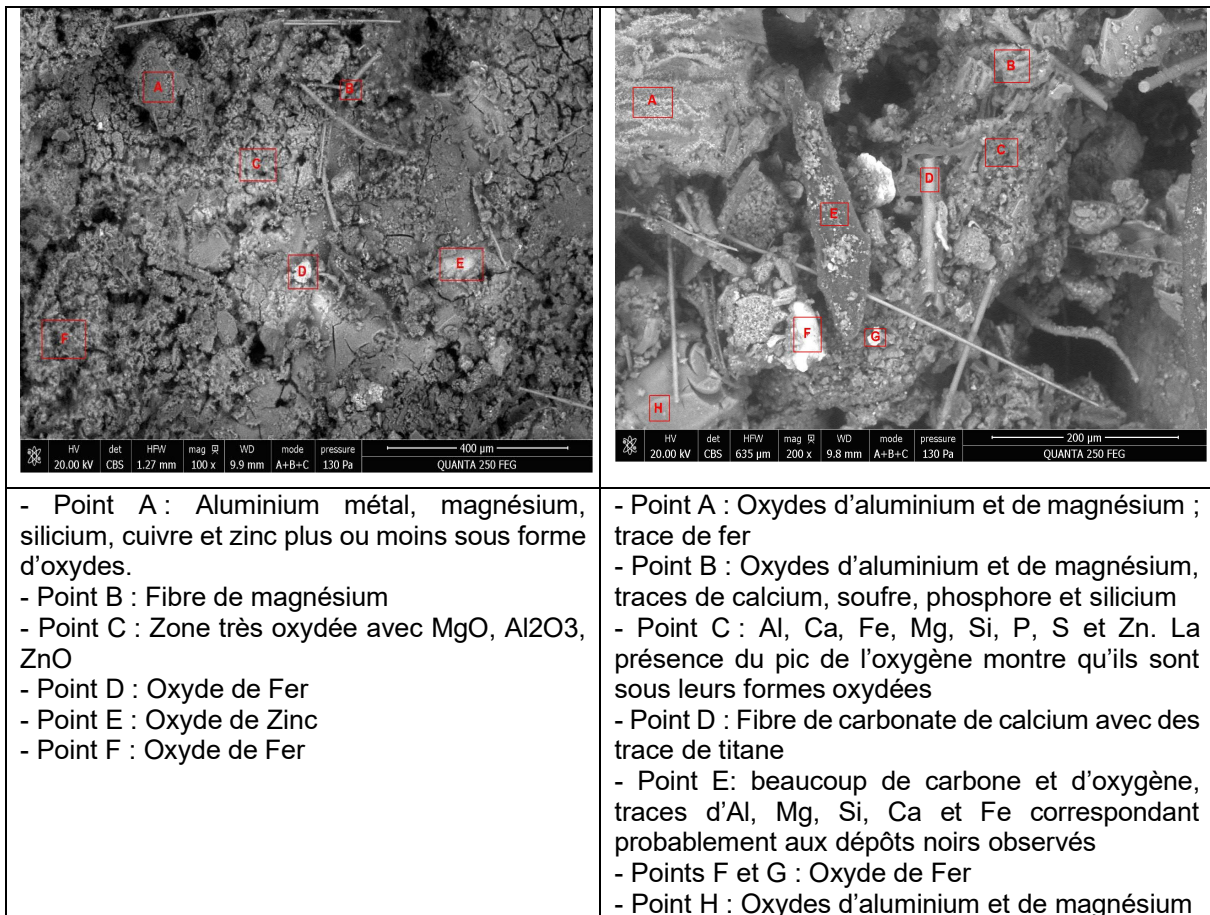


Figure 12 Images MEB de l'échantillon 21AR078

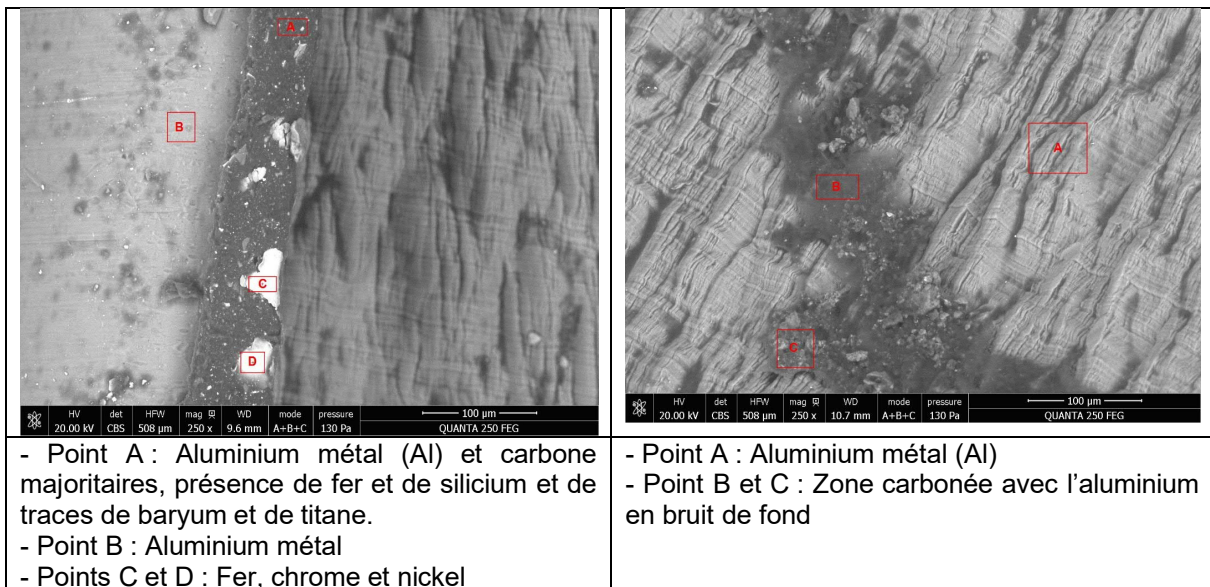


Figure 13 Images MEB de l'échantillon 21AR079

Annexe 3
Résultats d'analyse des échantillons prélevés au niveau
de la cabine
2 pages

- Résultats d'analyse par spectrométrie d'émission optique à plasma induit (ICP optique)

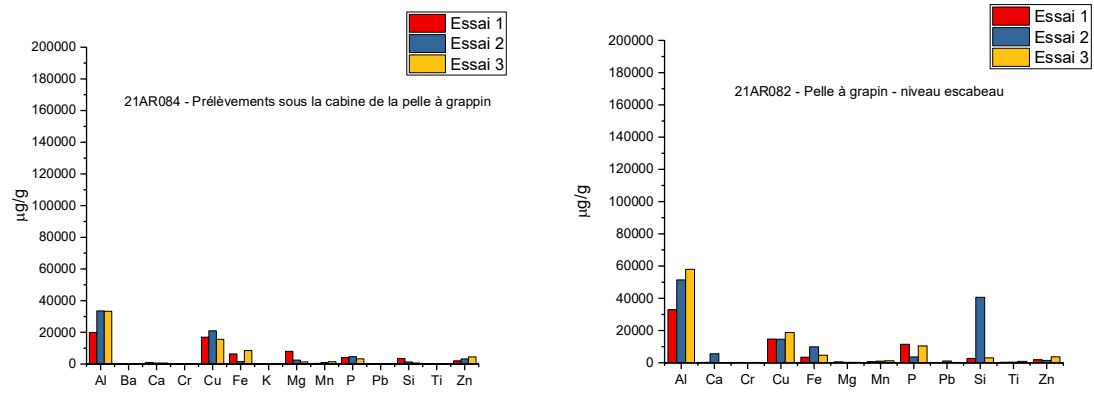


Figure 14 Analyse par ICP optique des échantillons 21AR084 et 21AR082

- Résultats d'analyse par MEB (EDX)

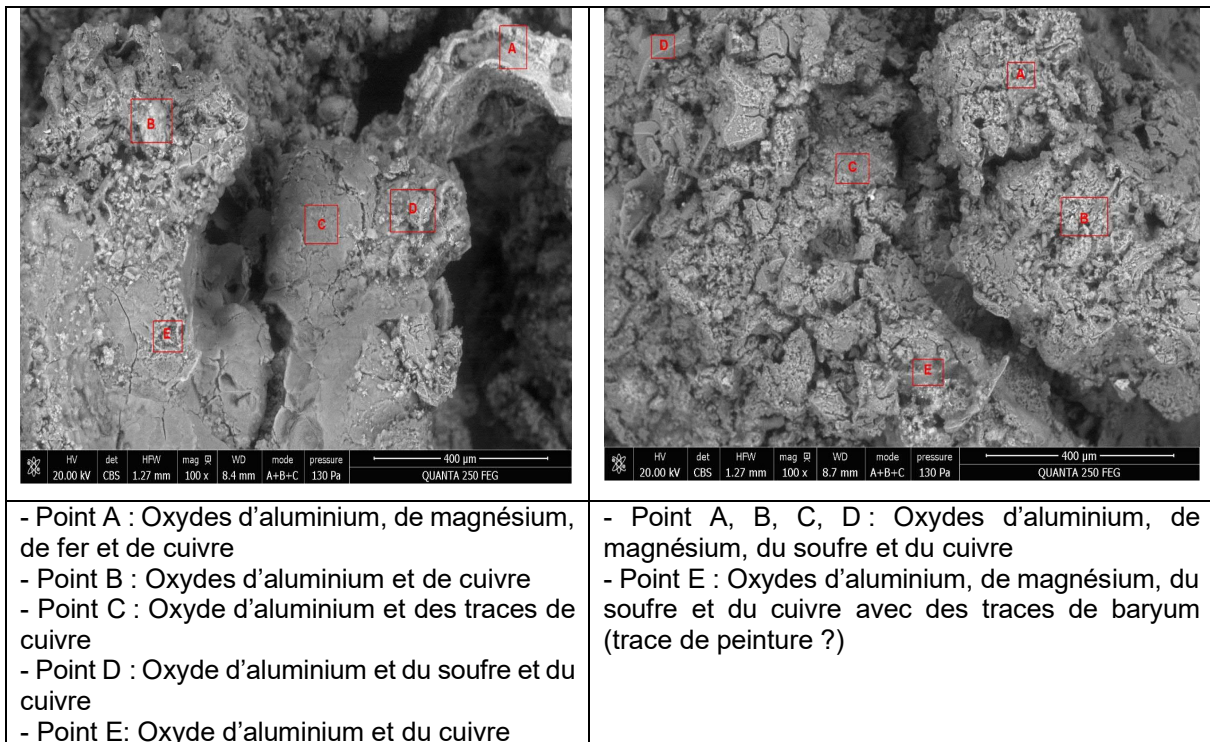


Figure 15 Images MEB de l'échantillon 21AR082

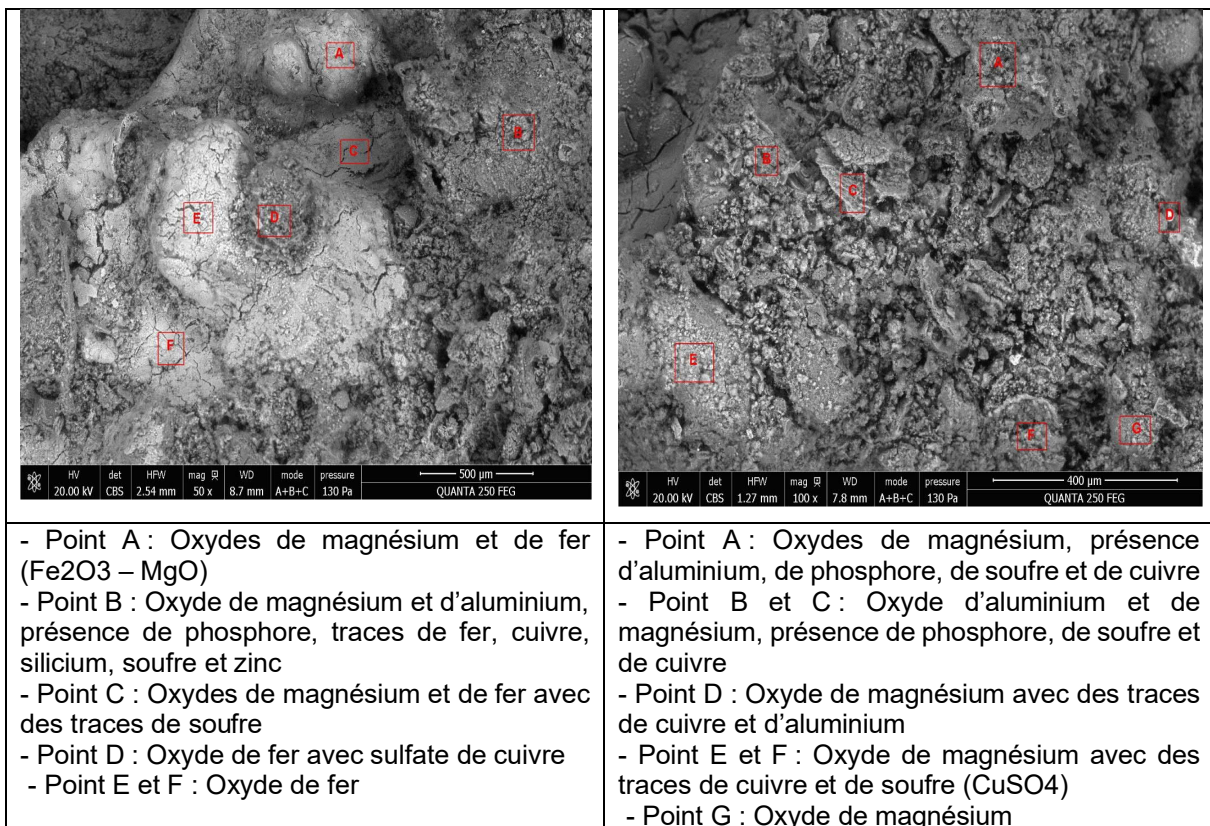


Figure 16 Images MEB de l'échantillon 21AR084

Annexe 4
Résultats d'analyse de l'échantillon prélevé au niveau du
grappin de la pelle
2 pages

- Résultats d'analyse par MEB (EDX)

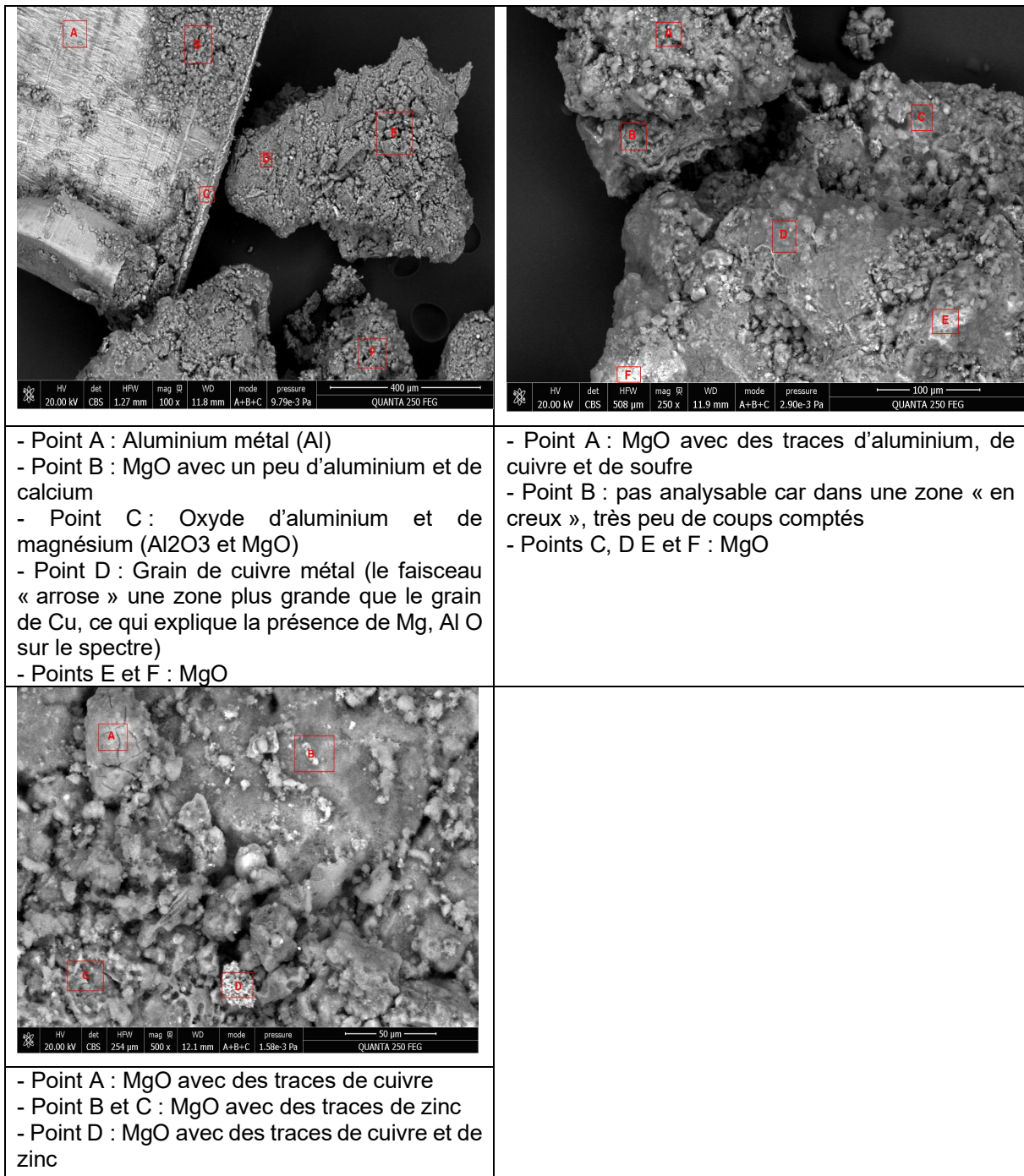


Figure 17 Images MEB de l'échantillon 21AR085

- Analyse par diffraction X

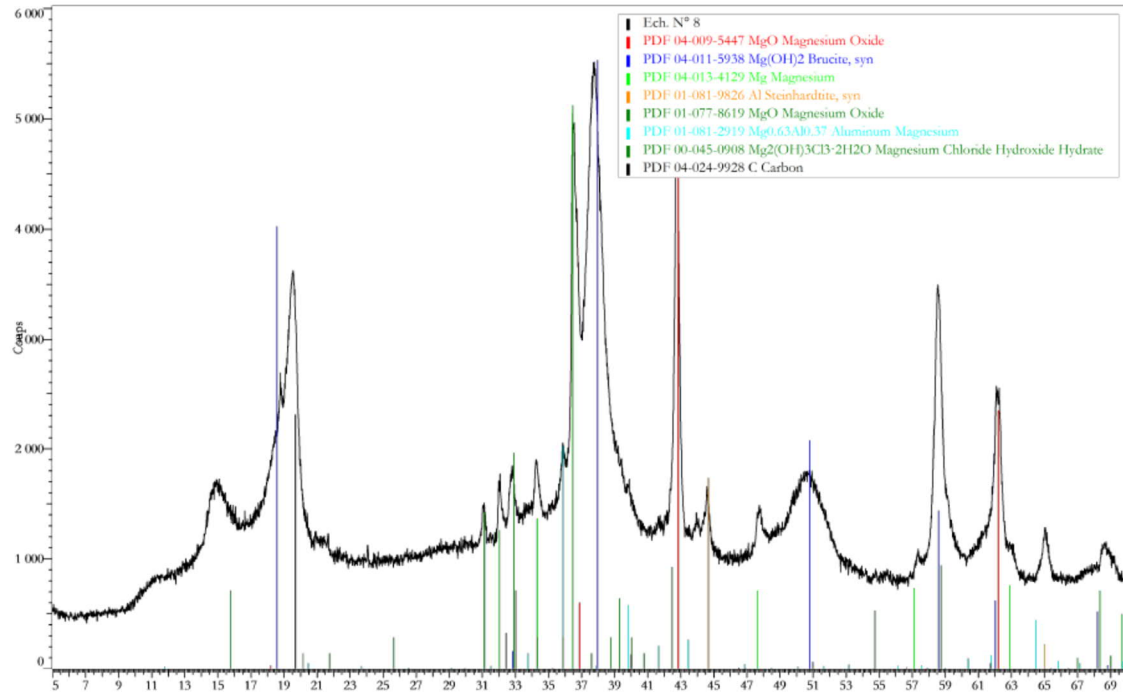


Figure 18 Spectre de diffraction RX de l'échantillon 21AR085

Les phases cristallines identifiées sont majoritairement MgO et Mg(OH)₂ avec un peu d'aluminium métal.

Annexe 5
Résultats bruts d'analyse EDX des échantillons prélevés
13 pages

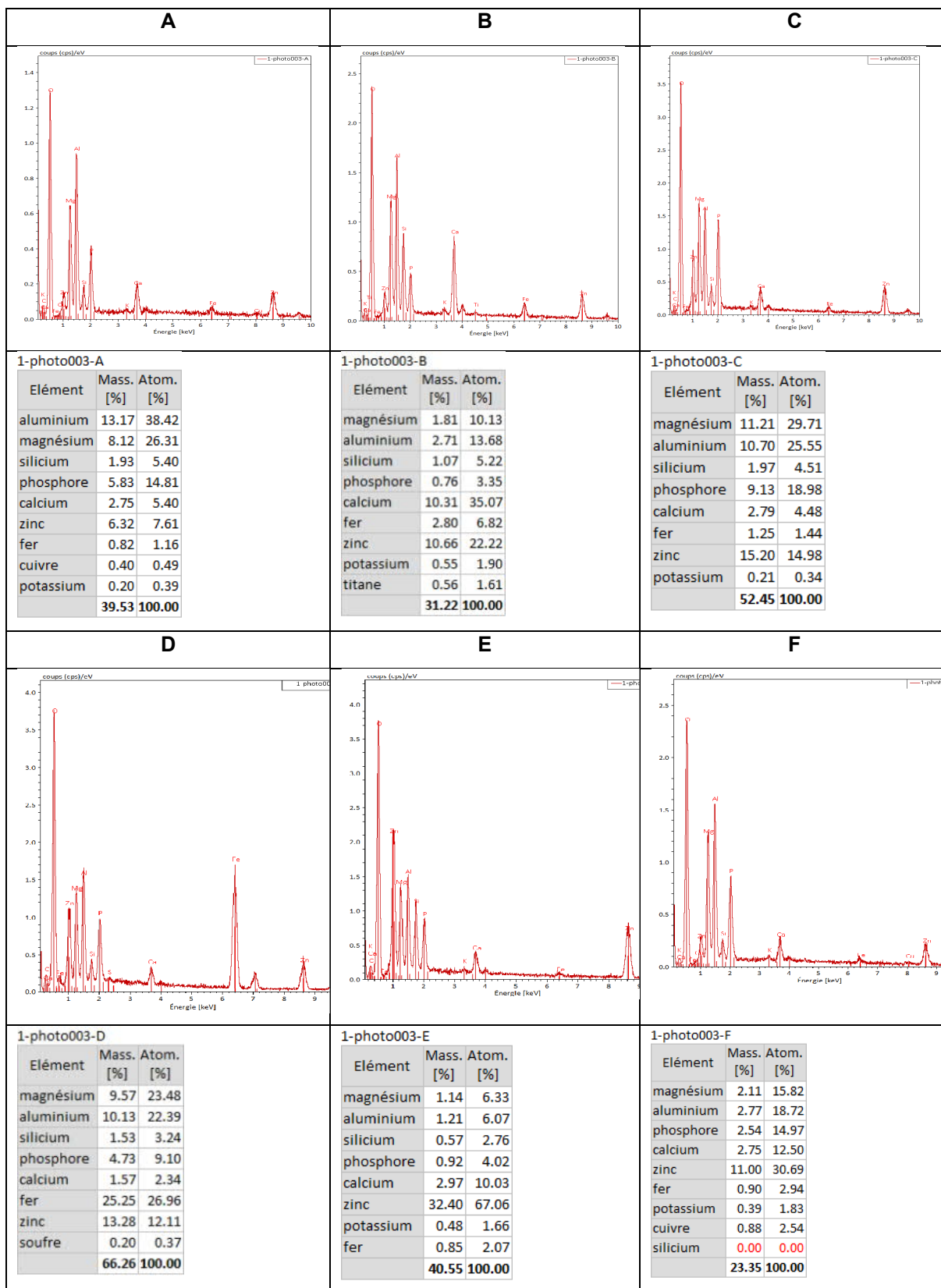
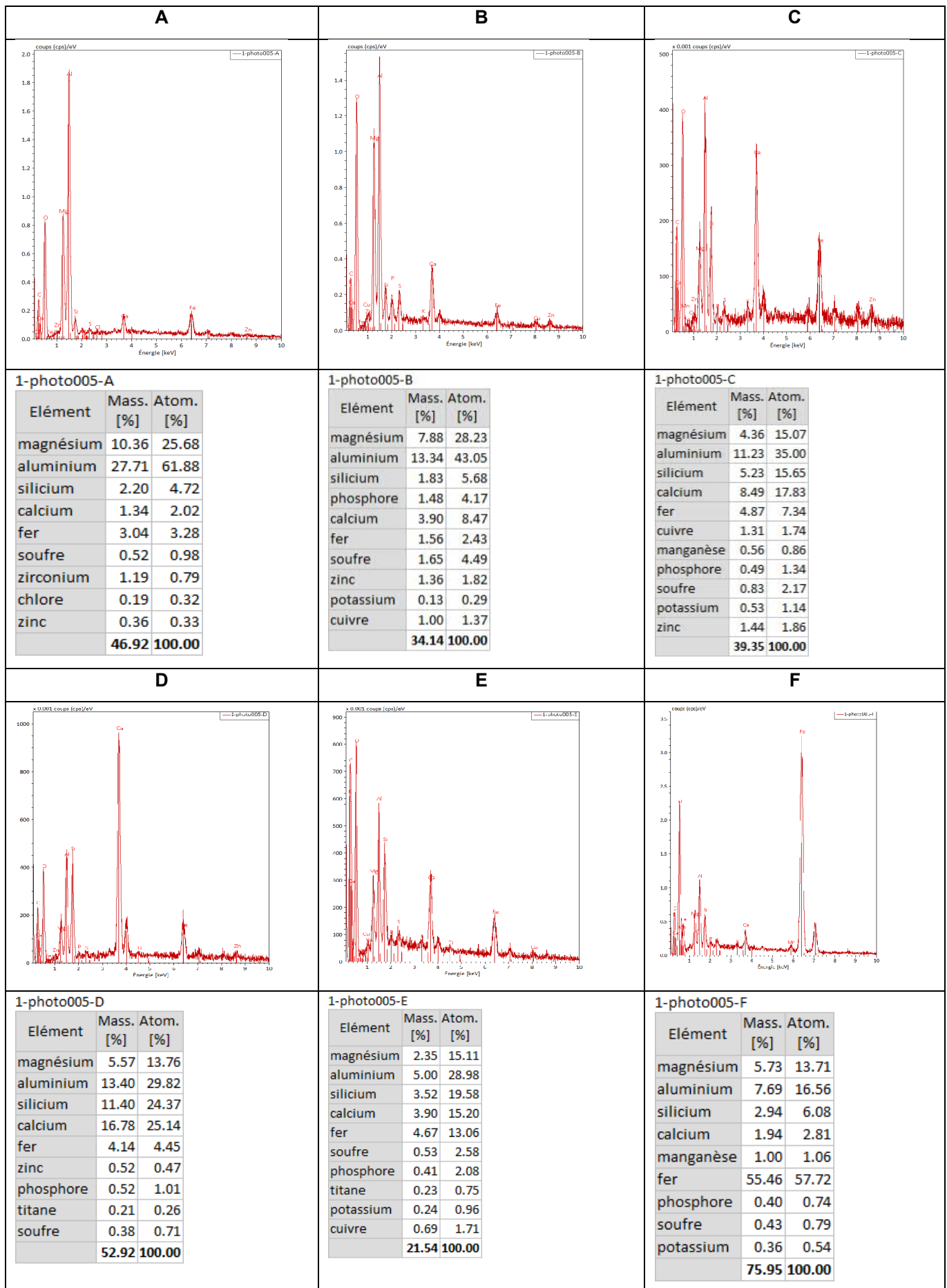


Figure 19 Analyse EDX de l'échantillon 21AR078 (photo MEB N°1)



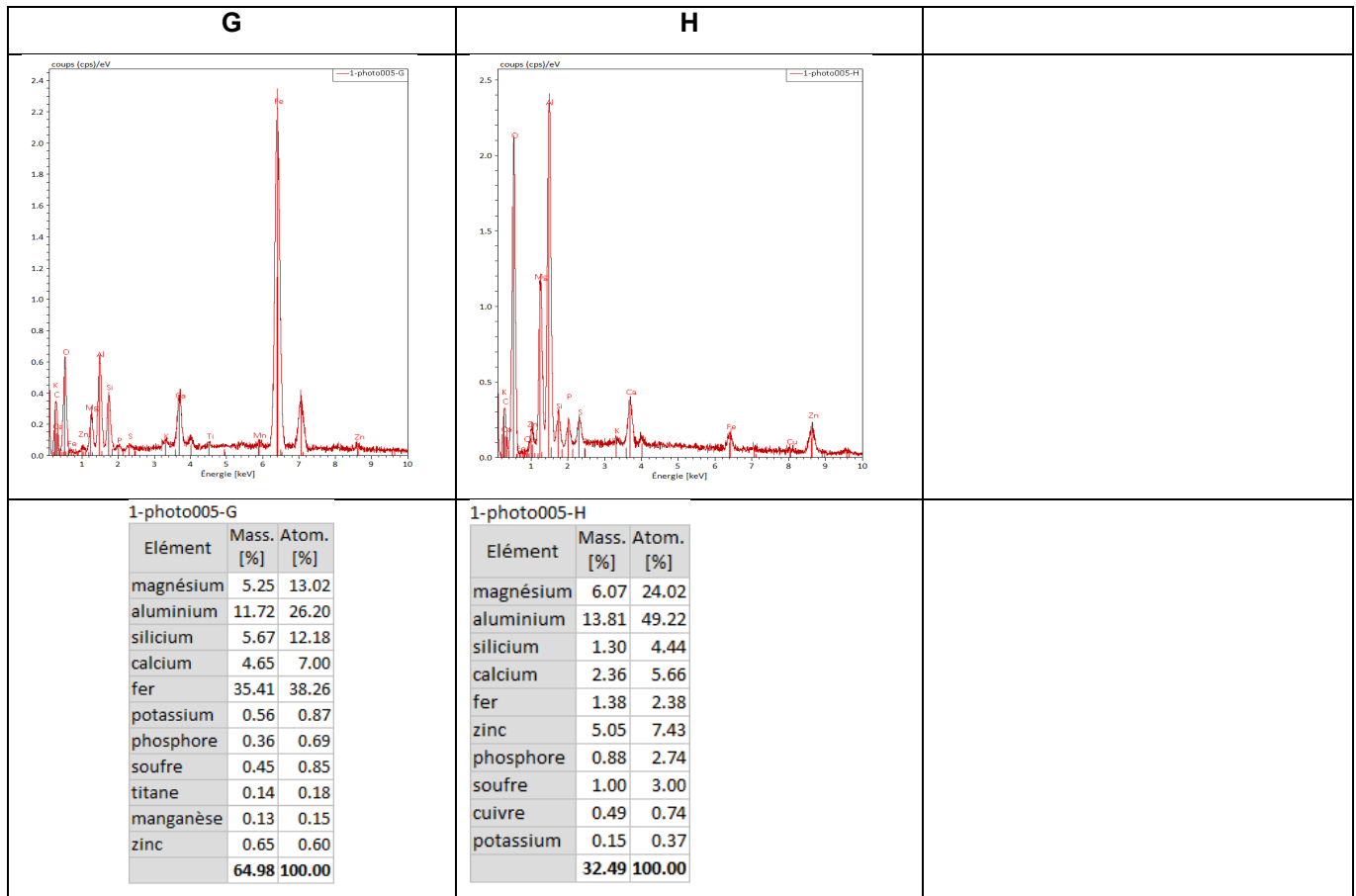


Figure 20 Analyse EDX de l'échantillon 21AR078 (photo MEB N°2)

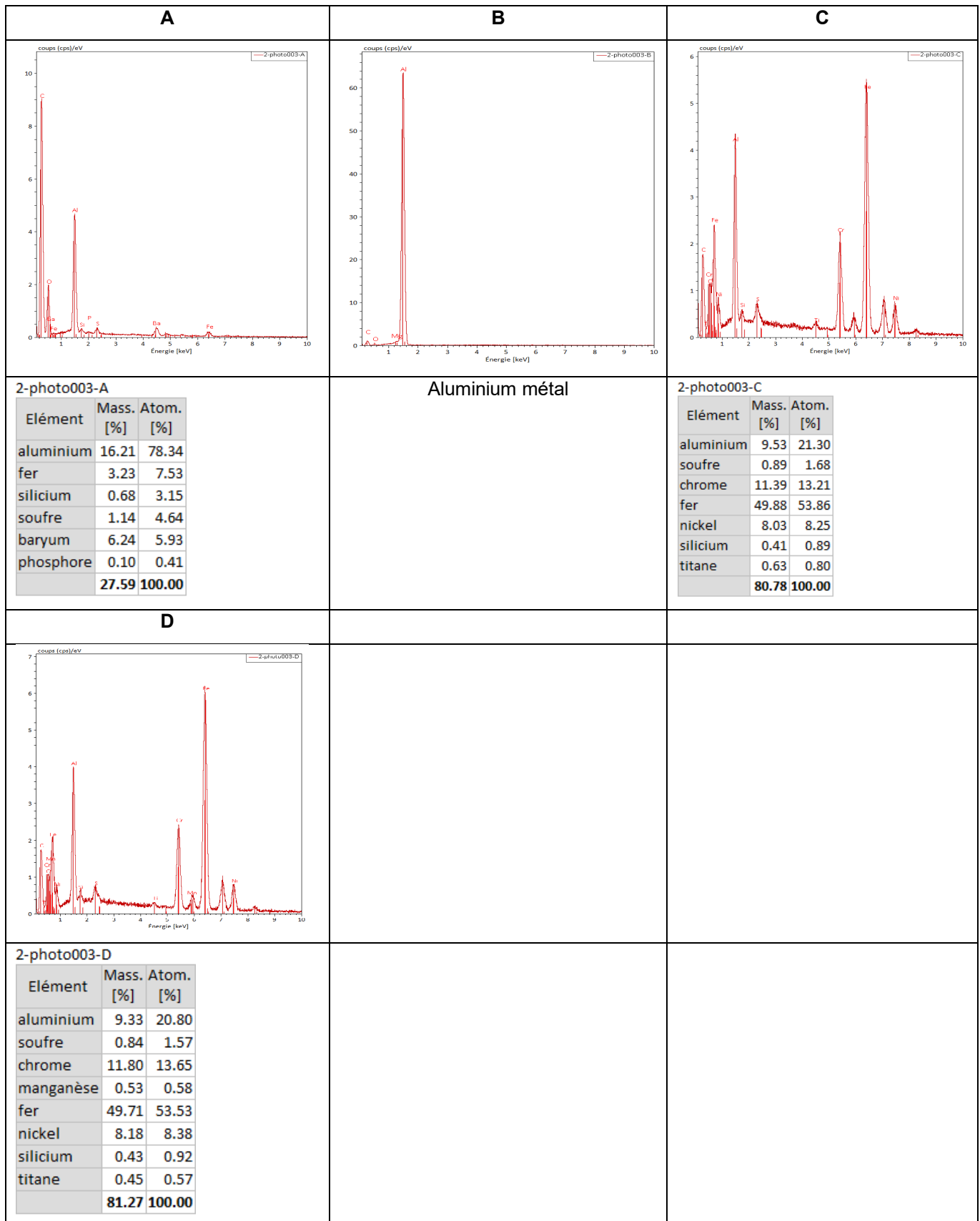


Figure 21 Analyse EDX de l'échantillon 21AR079 (photo MEB N°1)

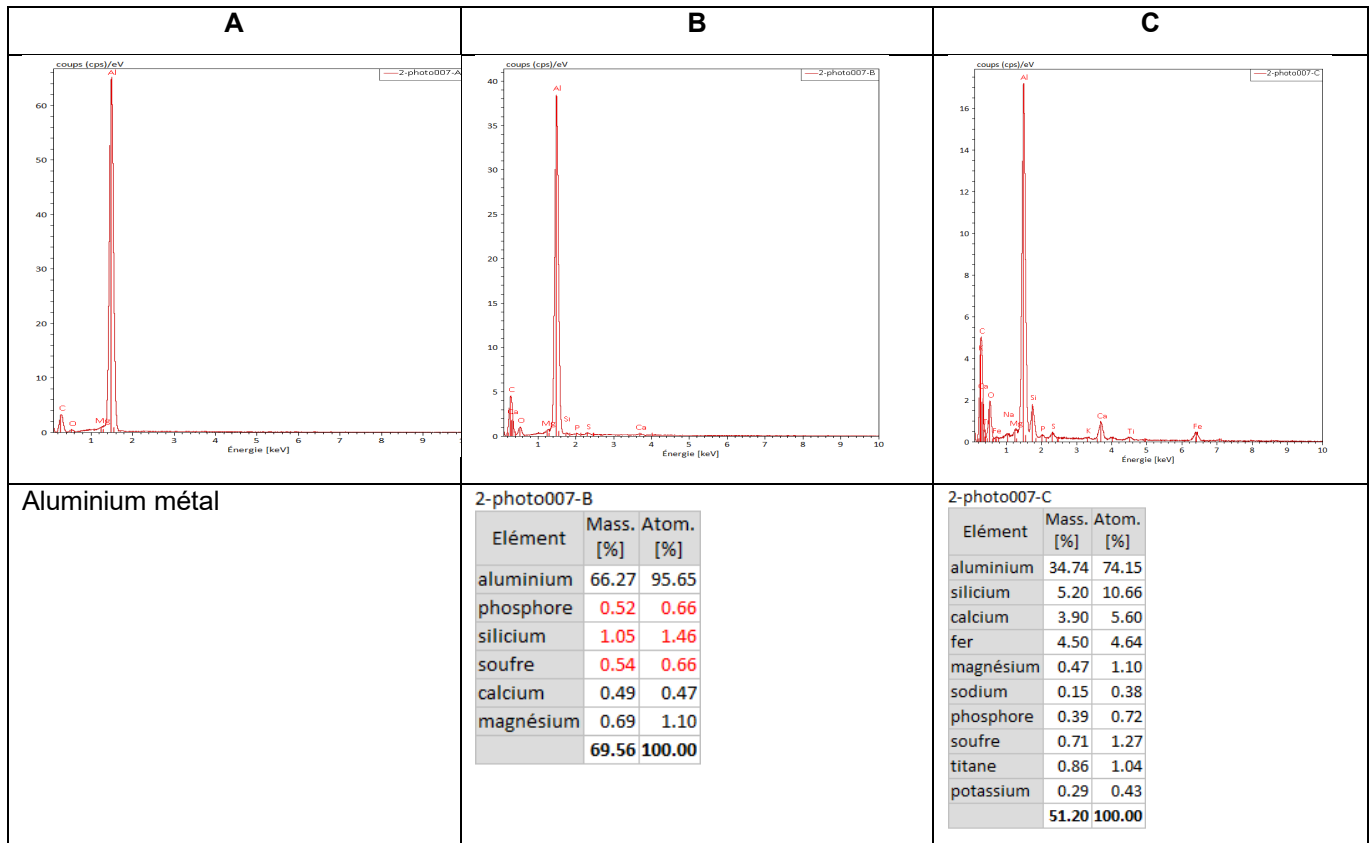


Figure 22 Analyse EDX de l'échantillon 21AR079 (photo MEB N°2)

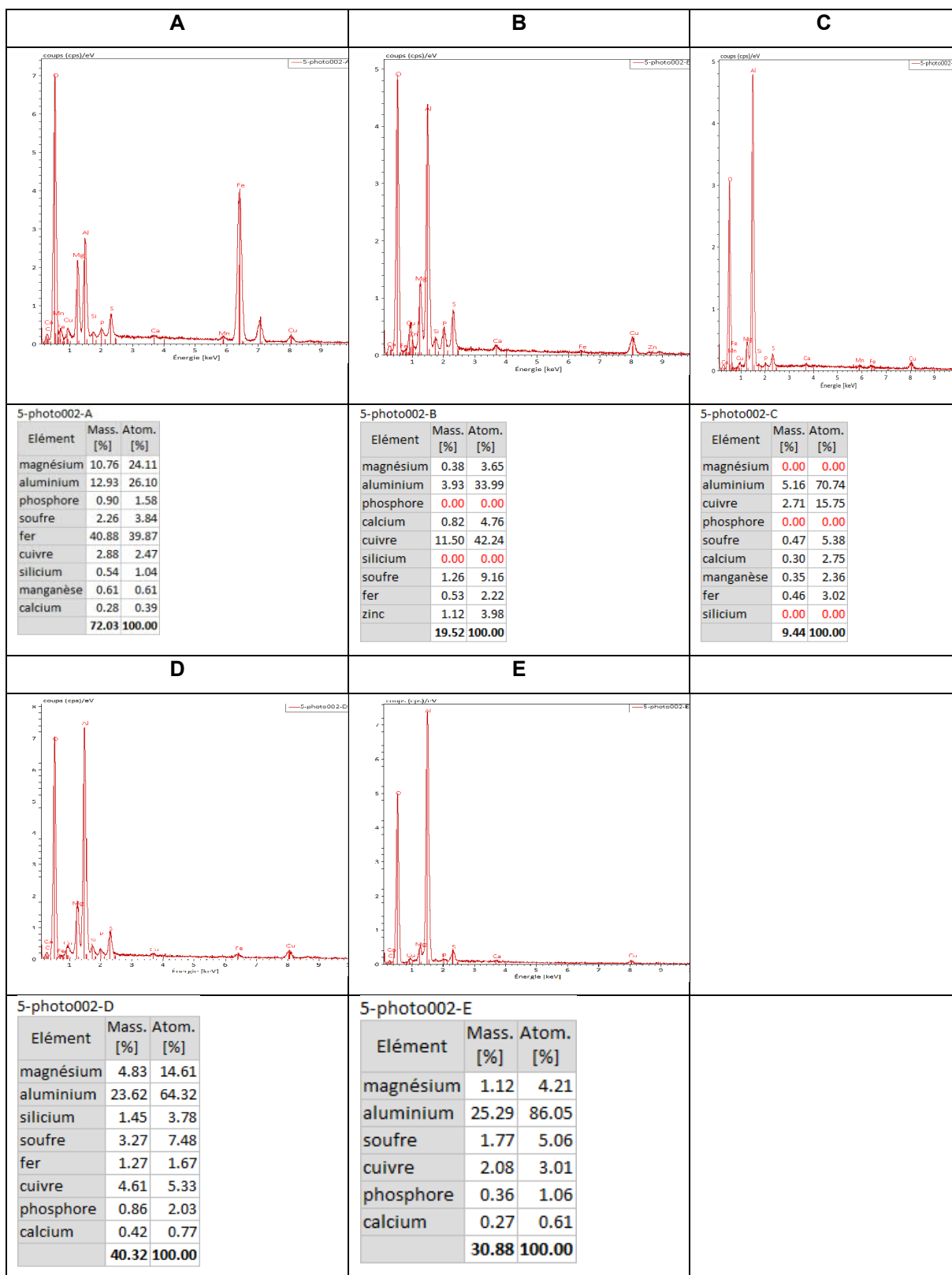


Figure 23 Analyse EDX de l'échantillon 21AR082 (photo MEB N°1)

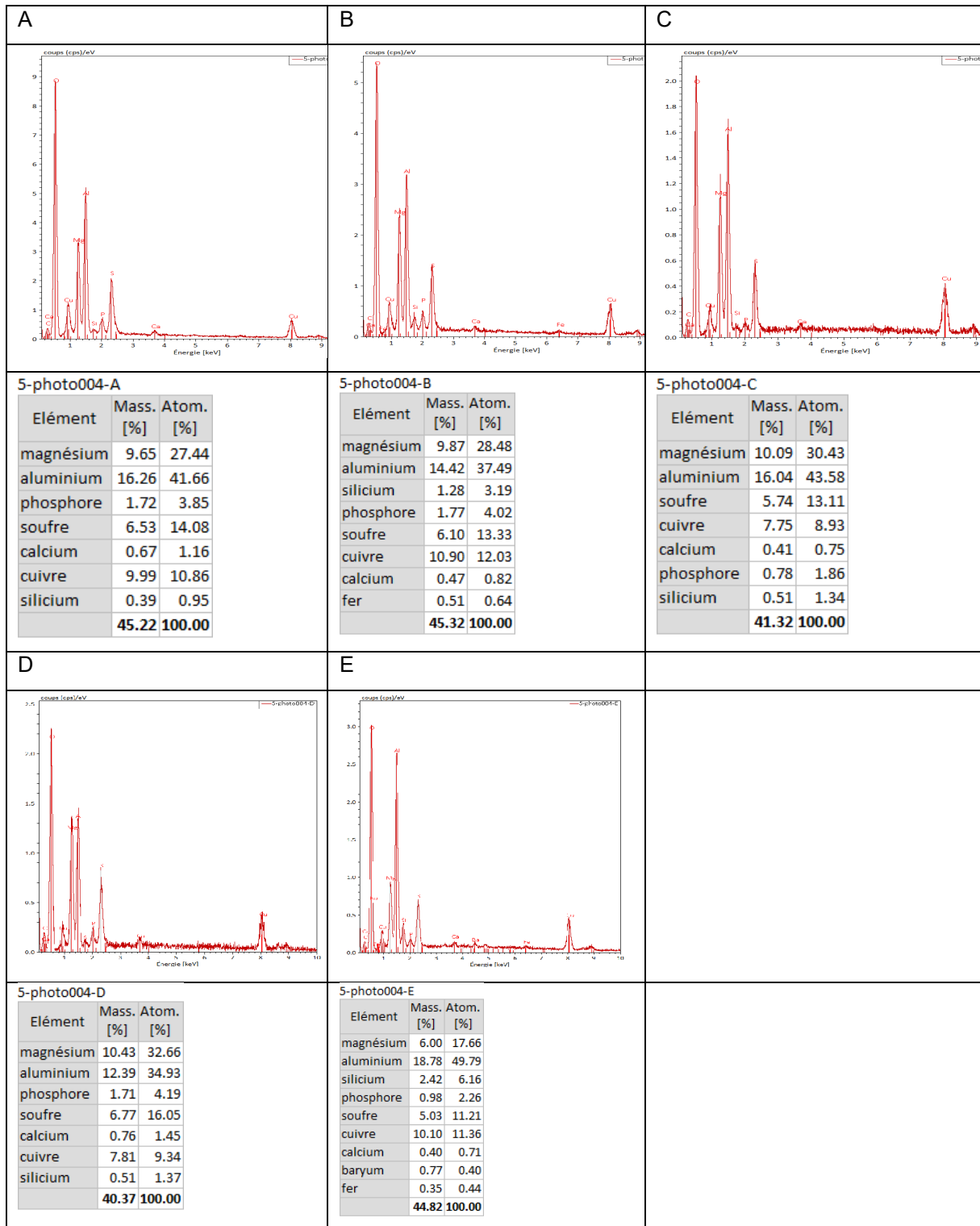


Figure 24 Analyse EDX de l'échantillon 21AR082 (photo MEB N°2)

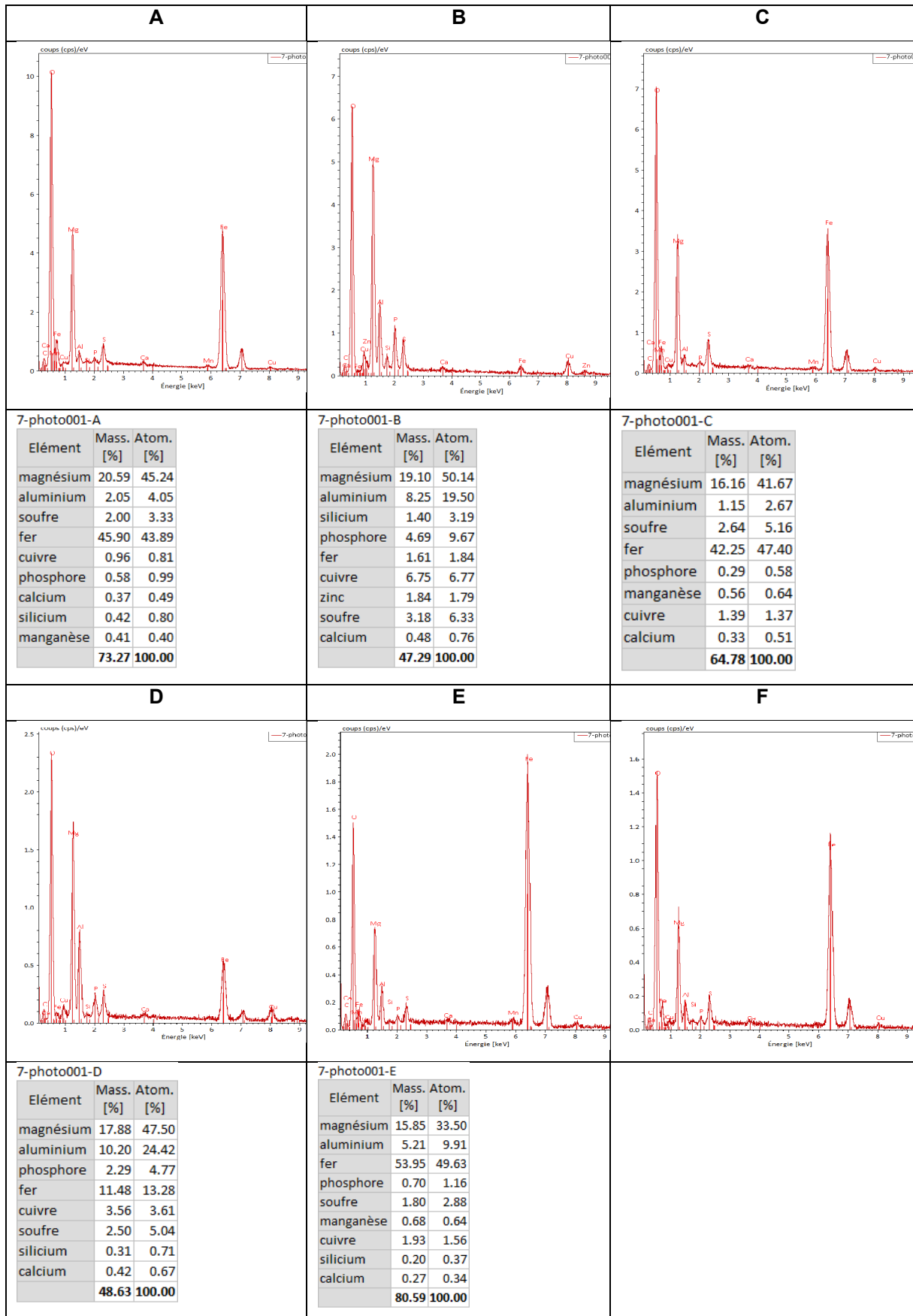
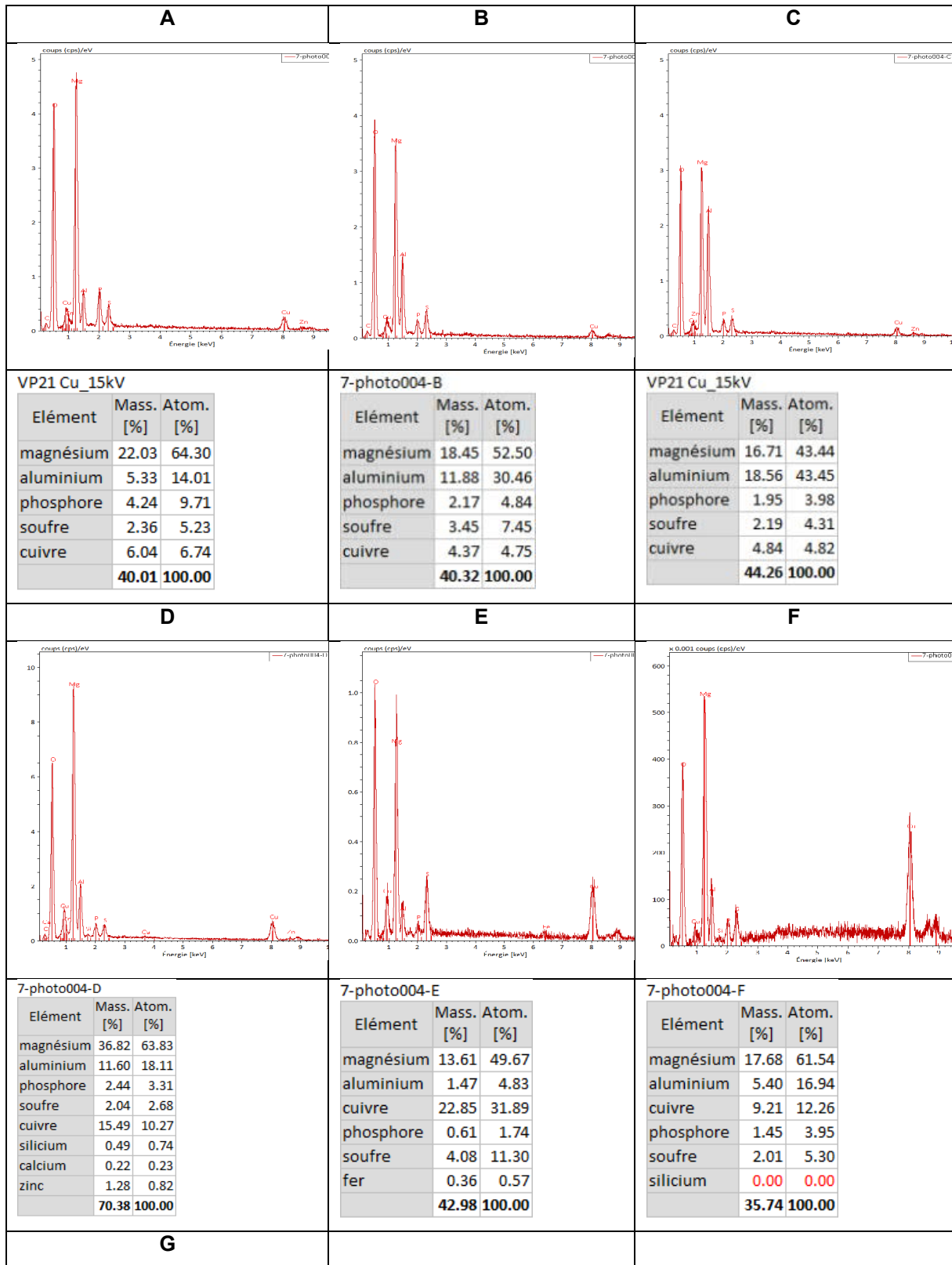


Figure 25 Analyse EDX de l'échantillon 21AR084 (photo MEB N°1)



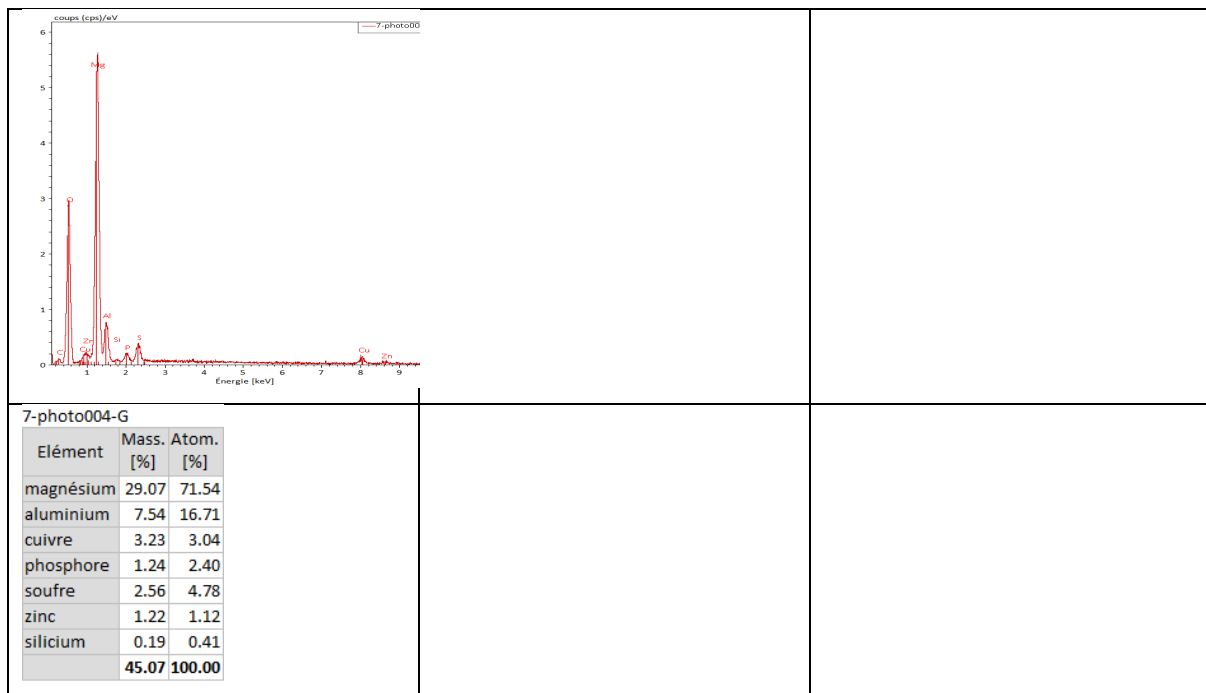


Figure 26 Analyse EDX de l'échantillon 21AR084 (photo MEB N°2)

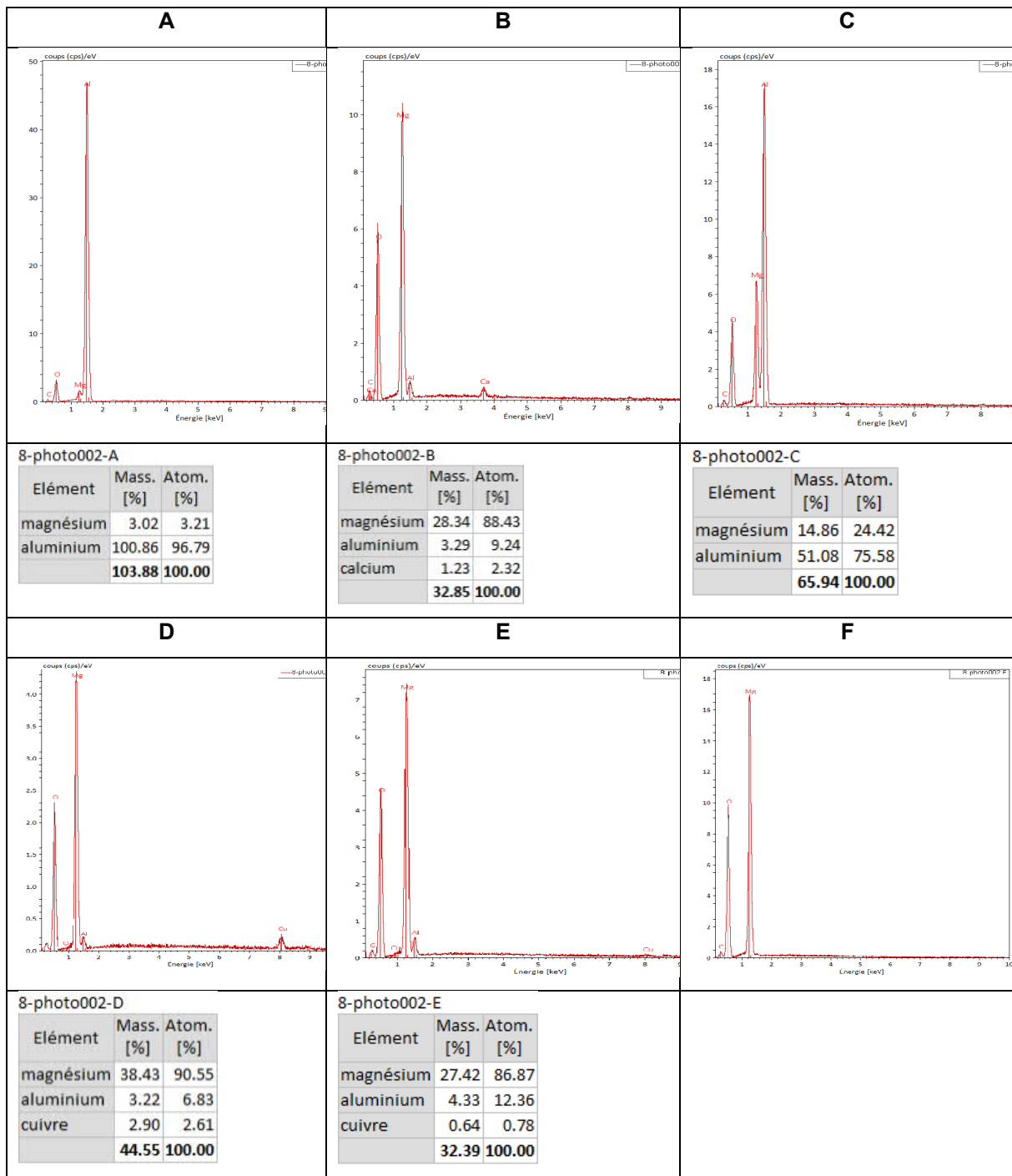


Figure 27 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°1)

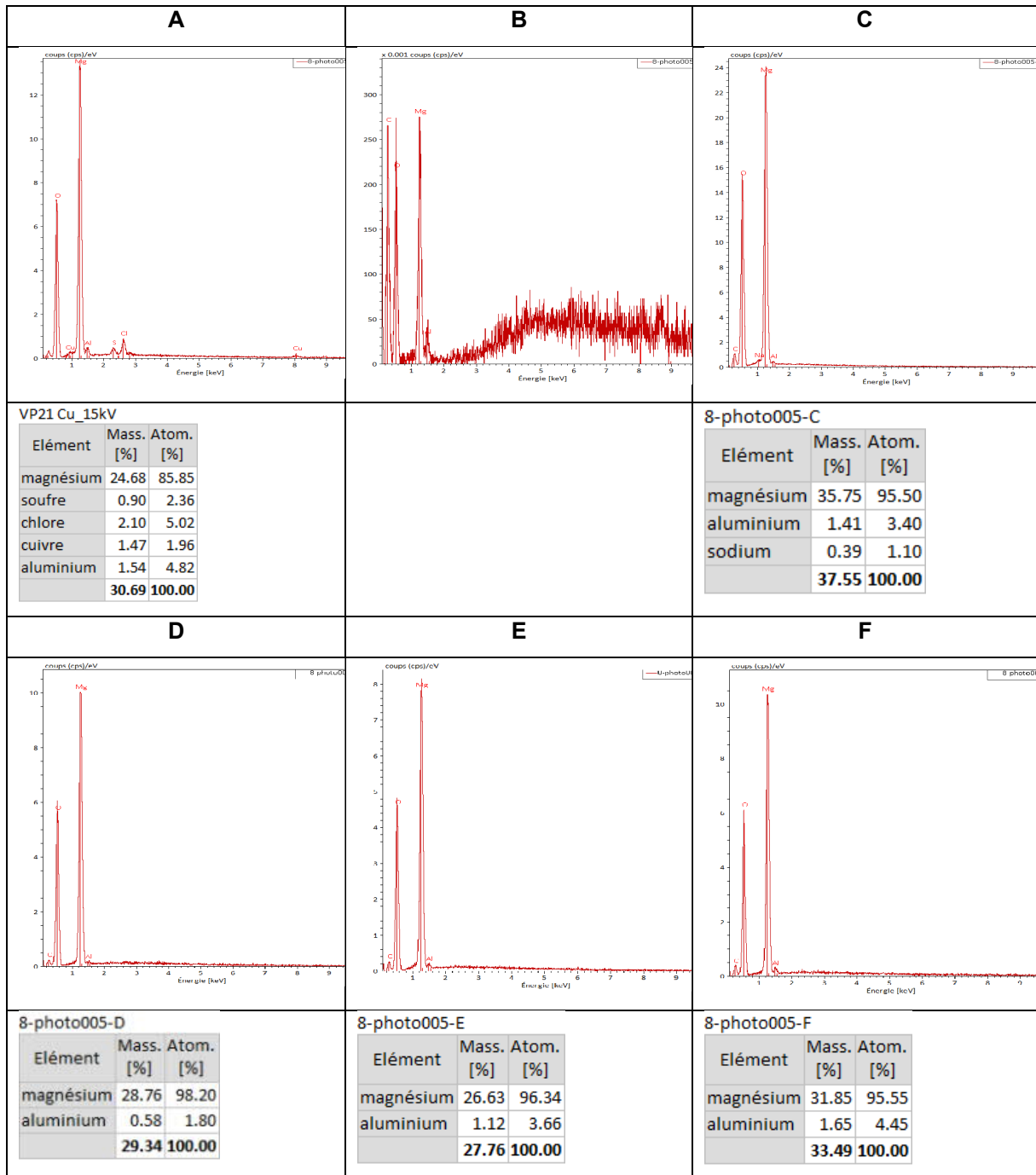


Figure 28 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°2)

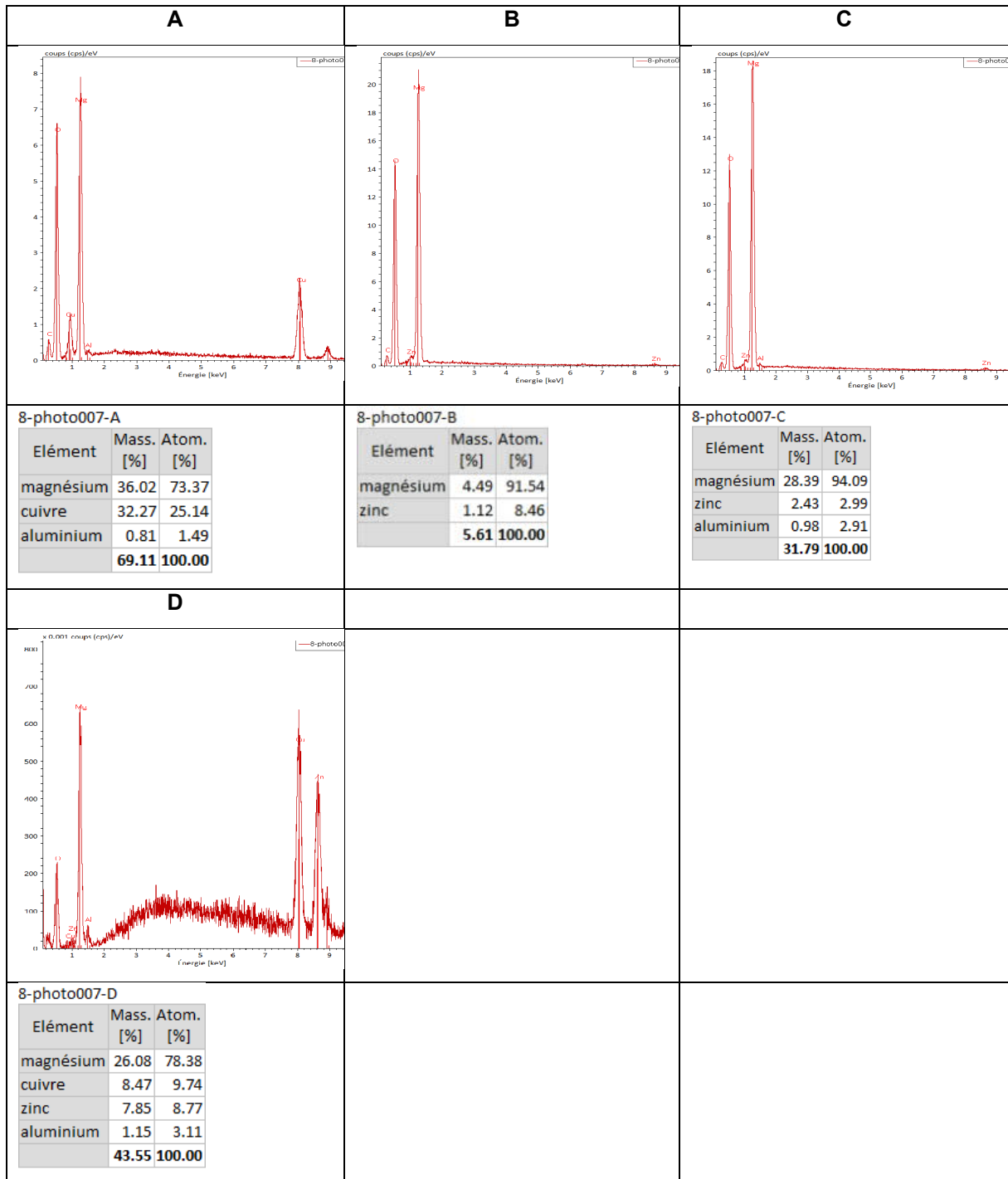


Figure 29 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°3)

