



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Conseil général de l'environnement
et du développement durable
Bureau d'enquêtes et d'analyses
sur les risques industriels



Rapport d'enquête

Sur l'explosion au sein du site
industriel de la société Purfer
situé à Saint-Pierre-de-Chandieu
(69) le 28 juillet 2021

Bordereau documentaire

Organisme auteur : Bureau d'enquêtes et d'analyses sur les risques industriels (BEA-RI)

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur l'explosion au sein du site industriel de la société Purfer situé à Saint-Pierre-de-Chandieu (69)

N° : MTE-BEARI-2022-004

Date du rapport : 18/05/2022

Proposition de mots-clés : magnésium, aluminium, réaction exothermique, copeaux, récupération de métaux

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 501-1 et suivants du code de l'environnement.

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

Au titre de ce rapport on entend par :

- Cause de l'accident : toute action ou événement de nature technique ou organisationnelle, volontaire ou involontaire, active ou passive, ayant conduit à la survenance de l'accident. Elle peut être établie par les éléments collectés lors de l'enquête, ou supposée de manière indirecte. Dans ce cas le rapport d'enquête le précise explicitement.
- Facteur contributif : élément qui, sans être déterminant, a pu jouer un rôle dans la survenance ou dans l'aggravation de l'accident.
- Enseignement de sécurité : élément de retour d'expérience tiré de l'analyse de l'évènement. Il peut s'agir de pratiques à développer car de nature à éviter ou limiter les conséquences d'un accident, ou à éviter car pouvant favoriser la survenance de l'accident ou aggraver ses conséquences.
- Recommandation de sécurité : proposition d'amélioration de la sécurité formulée par le BEA-RI, sur la base des informations rassemblées dans le cadre de l'enquête de sécurité, en vue de prévenir des accidents ou des incidents. Cette recommandation est adressée, au moment de la parution du rapport définitif, à une personne physique ou morale qui dispose de deux mois à réception, pour faire part au BEA des suites qu'elle entend y donner. La réponse est publiée sur le site du BEARI.

Synthèse

Le 28 juillet 2021 à 11 h 41, sur le site de récupération de métaux de la société PURFER, une pelle sur roues munie d'un grappin est amenée sur la zone de stockage des déchets d'aluminium en vue d'alimenter une presse cisaille mobile. L'opérateur stationne la pelle devant la zone réservée au stockage des copeaux d'aluminium et pose le grappin sur le tas de copeaux en procédant simultanément à son ouverture.

Lors du contact avec le tas et le sol, une violente réaction exothermique a lieu engendrant un fort dégagement de chaleur par rayonnement thermique et une vive lumière, mais sans bruit ressenti par les témoins. La réaction, de type « boule de feu », durera 13 secondes. L'opérateur de la pelle est grièvement blessé, brûlé par le rayonnement.

Les analyses des prélèvements effectués sur site montreront la présence dans le tas de copeaux d'aluminium de traces d'aiguilles de magnésium ainsi que la présence importante d'oxyde de magnésium dans les résidus de combustion, ce qui conduit à privilégier comme scénario la contamination du tas de copeaux d'aluminium par des copeaux de magnésium.

Lors de la dépose du grappin en bord de tas, le frottement du grappin sur le sol a pu provoquer l'énergie suffisante pour initier la combustion du magnésium. Cette combustion, qui produit une grande quantité de chaleur, se caractérise par l'émission d'une lumière blanche et très intense, ce qui est cohérent avec les témoignages. La quantité de chaleur produite a pu également générer la fusion d'une partie de l'aluminium et sa combustion. À l'issue de la combustion du magnésium, en l'absence de l'apport de cette énergie, la combustion des copeaux d'aluminium s'est arrêtée.

L'expertise réalisée a pu montrer que le phénomène constaté correspond à l'inflammation de quelques centaines de grammes de magnésium, provoquant l'inflammation de quelques kilogrammes d'aluminium.

L'étude de cet accident permet de dégager des enseignements de sécurité sur la nécessité de disposer de matériaux d'extinction adéquats, d'élaborer une procédure de test qui permettra de détecter les lots contaminés et de mieux informer les opérateurs sur les risques associés à la manipulation de copeaux d'aluminium et l'utilité des équipements de protection.

Le BEA-RI recommande à la direction générale de la prévention des risques (DGPR) d'engager une action auprès de la Commission européenne afin de faire classer en tant que déchet dangereux les « limailles et chutes de magnésium » ainsi que les « poussières et les fines de magnésium ».

Il recommande également à l'exploitant d'étudier la mise en place dans le cadre de ses relations commerciales d'une information de ces apporteurs sur les dangers de la présence de magnésium en mélange avec l'aluminium et d'une procédure de test à mettre en œuvre au moment de la réception des déchets. Cette procédure devra rester simple et proportionnée aux enjeux. L'exploitant pourra s'appuyer sur les recherches qui pourraient être lancées par la profession.

Sommaire

I.	Rappel sur l'enquête de sécurité.....	6
II.	Constats immédiats et engagement de l'enquête	6
	II.1 Les circonstances de l'accident.....	6
	II.2 Le bilan de l'accident.....	6
	II.3 Les mesures prises après l'accident.....	7
	II.4 L'engagement et l'organisation de l'enquête	7
III.	Contextualisation.....	8
	III.1 Le site Purfer de Saint-Pierre-de-Chandieu.....	8
	III.2 La zone aluminium du site.....	9
	III.3 Réactions chimiques susceptibles de se produire avec des déchets d'aluminium.....	11
	III.4 La contamination des déchets d'aluminium	12
IV.	Compte-rendu des investigations menées.....	13
	IV.1 Reconnaissance de terrain	13
	IV.2 Recueil des témoignages.....	14
	IV.2.1 Recueil du témoignage des témoins.....	14
	IV.2.2 Recueil du témoignage de l'opérateur de la pelle à grappin.....	14
	IV.2.3 Analyse des vidéos de surveillance de l'établissement.....	15
	IV.3 Analyse de l'Ineris.....	17
V.	Déroulement de l'évènement.....	18
	V.1 Déclenchement de l'évènement.....	18
	V.2 L'intervention des secours publics.....	18
VI.	Conclusions sur le scénario de l'évènement.....	19
	VI.1 Scénario.....	19
	VI.2 Facteurs contributifs.....	20
	VI.2.1 Procédure de réception des déchets.....	20
	VI.2.2 Traçabilité des produits.....	20
	VI.2.3 Mode de manutention	20
	VI.2.4 Protection thermique.....	20
VII.	Enseignements de sécurité.....	20
	VII.1 Matériaux d'extinction.....	20
	VII.2 Procédure de réception.....	21
	VII.3 Information des opérateurs.....	21
VIII.	Recommandations de sécurité.....	21
	VIII.1 Recommandation à destination du pouvoir réglementaire.....	21
	VIII.2 Recommandations à destination de l'exploitant.....	22
IX.	Annexes.....	23
	Annexe 1 Contribution de l'Ineris.....	24

Rapport d'enquête

Sur l'explosion au sein du site industriel de la société Purfer situé à Saint-Pierre-de-Chandieu (69)

I. Rappel sur l'enquête de sécurité

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 501-1 et suivants du code de l'environnement. Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités. En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

II. Constats immédiats et engagement de l'enquête

II.1 Les circonstances de l'accident

Le 28 juillet 2021 au matin, sur le site de récupération de métaux de la société Purfer, les dispositions sont prises pour procéder, sur la zone réservée aux déchets d'aluminium, au cisailage des éléments ne présentant pas les caractéristiques géométriques requises. À cet effet, le personnel met en place une presse cisaille mobile.

À 11h41, une pelle sur roues munie d'un grappin 5 dents est amenée sur la zone aluminium en vue d'alimenter la presse cisaille mobile. L'opérateur stationne la pelle devant la zone réservée au stockage des copeaux d'aluminium et pose le grappin sur le bord du tas de copeaux en procédant simultanément à son ouverture.

Lors du contact avec le tas d'aluminium et le sol, une violente réaction exothermique a lieu, engendrant un fort dégagement de chaleur par rayonnement thermique et une vive lumière, mais sans bruit ressenti par les témoins. La réaction, sous forme de « boule de feu », durera 13 secondes. À l'issue des 13 secondes, le grappin de la pelle ne touche plus le tas. L'opérateur blessé quitte la cabine de l'engin et rejoint le bâtiment administratif pour y recevoir les premiers soins.

II.2 Le bilan de l'accident

L'opérateur de la pelle est grièvement blessé, brulé par le rayonnement. Des dégâts sont à déplorer sur l'engin.

Toute activité est stoppée dans la zone aluminium.



Photo n°1 : tas de copeaux remanié avec du sable



Photo n°2 : cabine de l'engin

II.3 Les mesures prises après l'accident

Les sapeurs-pompiers sont appelés à 11h42 pour secours à personne (brûlures sévères). Un premier véhicule arrive sur place à 11h58 et constate également l'échauffement du tas de métaux. Des fumées de couleur plutôt blanche sont observées mais peu importantes.

Le blessé est pris en charge en urgence absolue (brûlure à 50%). Constatant la nature du sinistre, les sapeurs-pompiers établissent un périmètre de sécurité et demandent un renfort en matière de risques chimiques. Ils décrivent des fumerolles et l'absence de flamme vive, ainsi que des fumées blanches qui s'échappent lentement. Des analyses sont réalisées sur les fumées et ne révèlent pas de toxicité particulière et d'effet hors site.

En parallèle, l'exploitant commande 3 camions de sable sec, et 60 tonnes de sable sont déversées sur le tas de copeaux et mélangés avec les 12 tonnes de métaux afin de prévenir toute reprise de réaction.

II.4 L'engagement et l'organisation de l'enquête

Vu les circonstances et le contexte de l'accident, le directeur du bureau d'enquêtes et d'analyses sur les risques industriels (BEA-RI) a décidé l'ouverture d'une enquête après en avoir informé le Directeur général de la prévention des risques.

Les enquêteurs techniques du BEA-RI se sont rendus sur place le 4 août 2021 en compagnie d'un expert de l'Ineris. Ils ont rencontré les représentants de la société Purfer, des services d'incendie et de secours ainsi que les inspecteurs du travail et de l'environnement.

Ils ont recueilli les témoignages ou déclarations écrites des acteurs impliqués dans l'évènement et dans sa gestion. Ils ont eu, consécutivement à ces entretiens et aux réunions techniques organisées par la suite, communication des pièces et documents nécessaires à leur enquête.

Des prélèvements sont réalisés à la demande du BEA-RI par l'Ineris sur les matériaux présents après l'accident sur le tas de copeaux en différentes localisations ainsi que sur la cabine de la pelle et sur le grappin.

III. Contextualisation

III.1 Le site Purfer de Saint-Pierre-de-Chandieu

La société PURFER exploite dans la zone industrielle de Saint-Pierre-de-Chandieu des installations de transit, de tri, de regroupement et de traitement de déchets dangereux et non dangereux.

Elle reçoit notamment sur son site :

- Des déchets de métaux ferreux et non ferreux,
- Des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE),
- Des véhicules hors d'usage (VHU) en provenance de centres agréés VHU ou de particuliers (la société PURFER est elle-même centre agréé VHU),

Le site s'étend sur 6,2 hectares, et est mitoyen au nord de la voie ferrée Lyon-Grenoble. Il s'agit d'un des 28 sites de PURFER Sud-Est, dont le siège régional est voisin du site industriel de Saint-Pierre-de-Chandieu. Une quarantaine de personnes travaillent sur le site en une équipe. Le site fonctionne de 7h à 17h. Les opérateurs sont polyvalents.

Les installations PURFER de Saint-Pierre-de-Chandieu constituent une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) classée sous le régime de l'autorisation depuis juillet 2000. Les principales rubriques présentes sur le site sont les suivantes : 2712, 2713, 2714, 2718, 2790 et 2791.

Une importante partie des déchets métalliques reçus est traitée par un broyeur, puis fait l'objet d'opérations de tri post-broyage, dont il résulte des métaux ferreux, des métaux non ferreux, des fractions plastiques, des fractions combustibles, des inertes et des résidus ultimes. La société est par ailleurs agréée pour la dépollution des VHU et pour leur broyage.

D'autres déchets métalliques sont simplement réceptionnés, triés puis entreposés par catégorie, sans autre action que le regroupement pour massification. Des lots de 25 tonnes ou plus sont constitués avant chargement d'un semi-remorque et expédition vers la fonderie ou autre site de recyclage final.



Photo n°3 : entrée du site

III.2 La zone aluminium du site

La zone de stockage des copeaux d'aluminium est située dans le parc à métaux 2 situé non loin de l'entrée du site. Les déchets de copeaux d'aluminium sont stockés dans une alvéole située en extérieur. Ses dimensions approximatives sont de 7 mètres sur 6. Les déchets y sont entassés jusqu'à quelques mètres de hauteur. La géométrie de la dalle semble permettre l'évacuation des eaux car aucune flaque d'eau n'était visible lors de la visite sur les lieux.



Photo n°4 : zone de stockage de l'aluminium

Pour ce produit, l'activité de Purfer consiste à massifier et préparer des métaux non ferreux. La provenance de ce type de métaux non ferreux est soit des clients ayant une activité de transformation d'aluminium (fabricant d'autocars, de menuiserie aluminium) soit des clients récupérateurs de ferrailles dont les sites sont exploités par le groupe ou par des indépendants.

Les dépôts sur le tas sont constitués de petites quantités (400 kg à 1 t). Les déchets sont acceptés sur le site après un examen visuel et peuvent faire l'objet d'un déclassement notamment au regard de la taille des éléments, les copeaux et tournures étant la catégorie la moins valorisée financièrement.

Des lots homogènes, de minimum 25 tonnes sont ensuite constitués et expédiés (en général vers le recycleur final représenté par la fonderie). L'alvéole est vidée lorsque les quantités sont supérieures à 25 tonnes ce qui peut engendrer un temps de stockage sur site de plusieurs mois

Les opérations de déchargement et de chargement des camions se font au moyen d'un grappin sans précautions particulières.

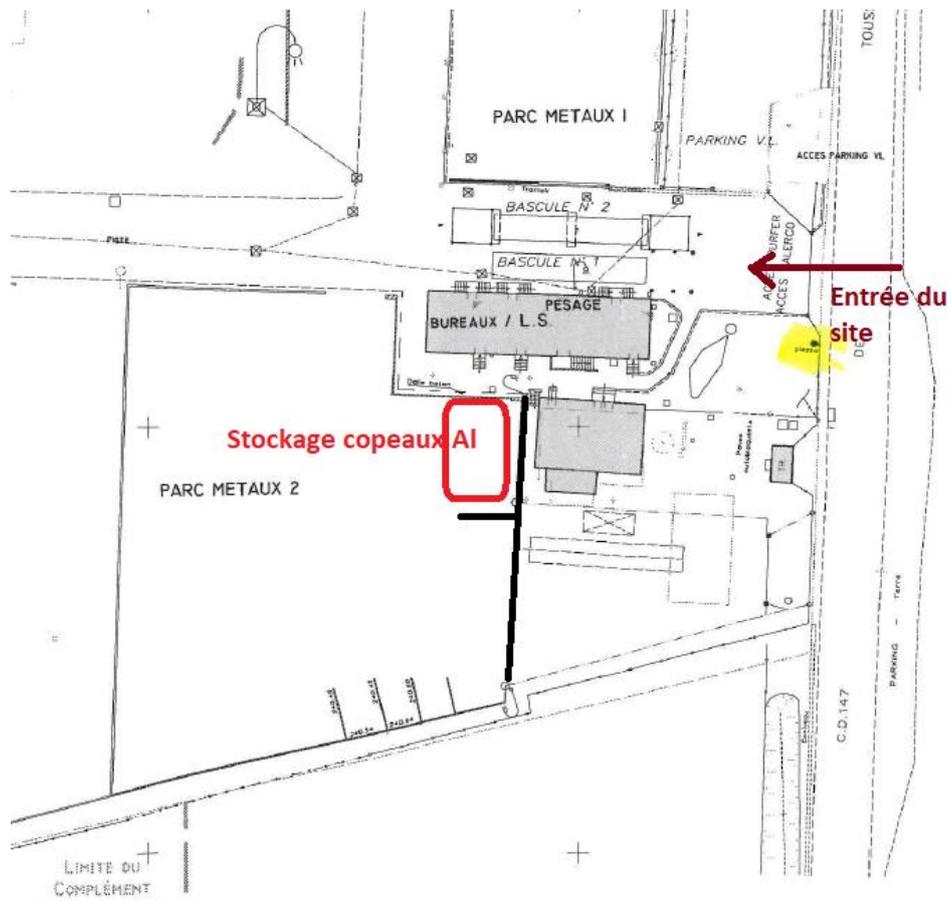


Figure n°5 : extrait du plan du site représentant la zone de stockage des copeaux d'aluminium

Le 28 avril 2021, 3 mois avant le sinistre, l'alvéole de copeaux d'aluminium a été vidée de la plus grande partie de son contenu, par un retrait de 25 tonnes expédié en fonderie. Il restait alors probablement 2 ou 3 tonnes de copeaux sur le tas, probablement assez anciens.

Le 28 juillet, 3 mois après le dernier transfert, l'alvéole comportait approximativement 12 tonnes de copeaux. La composition du tas est difficile à déterminer car les entrées commerciales sur le site qualifiées comme « copeaux d'aluminium » peuvent être réorientées et déchargés également sur d'autres tas en fonction de leur qualité et il n'existe pas de traçabilité de ces tris. Il est toutefois intéressant de noter que le dernier apport sur l'alvéole ne semble pas être en cause car il a été positionné sur la partie du tas qui n'a pas réagi lors du sinistre.

III.3 Réactions chimiques susceptibles de se produire avec des déchets d'aluminium

L'aluminium est combustible et selon sa granulométrie il peut s'enflammer, voire conduire à une explosion.

On considère que l'incendie est plus fréquent avec l'aluminium sous forme de copeaux alors que les explosions sont le plus souvent à craindre lors de la production de particules plus fines (poussières d'un diamètre inférieur à 500 μm). Dans le cas des copeaux, la formation d'une pellicule d'alumine (oxyde

d'aluminium) protège l'aluminium de l'oxygène de l'air. Il faut donc, pour provoquer l'incendie, fournir l'énergie suffisante pour faire fondre cette couche protectrice.

Par ailleurs, les poussières et les copeaux d'aluminium peuvent réagir avec de l'eau pour former de l'hydrogène selon la réaction : $2 \text{ Al} + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{ H}_2$

De tels copeaux et poussières sont en outre susceptibles de réagir avec certains oxydes métalliques par une réaction de type « thermité » (réaction utilisée en aluminothermie) et peuvent former des feux couvant qui se propagent en dégageant une chaleur d'autant plus considérable que le dépôt de poussière est important.

L'aluminothermie est la production de hautes températures (plus de 2000°C) par réaction d'oxydo-réduction exothermique d'aluminium en poudre avec divers oxydes métalliques.

III.4 La contamination des déchets d'aluminium

L'hypothèse d'une contamination des déchets d'aluminium par d'autres éléments instables doit être considérée.

La contamination par des déchets de magnésium, eux-mêmes sous forme de solides divisés, présente un risque fort d'inflammation.

Le magnésium est un métal léger, résistant et très réactif. Les copeaux de magnésium proviennent notamment de l'automobile et d'équipements électroniques en fin de vie. Après leur déchiquetage, les copeaux sont séparés des autres matériaux par magnétisme, courants induits ou milieux denses. On obtient alors une fraction constituée par du magnésium et de l'aluminium. La séparation aluminium/magnésium est possible par spectroscopie laser mais est encore très coûteuse et il est dès lors possible que du magnésium soit présent dans des déchets d'aluminium car difficilement détectable visuellement.

Le magnésium sous forme de solide divisé, est capable de réagir avec le dioxygène de l'air en présence d'une source d'inflammation active d'autant plus faible qu'il présente une faible granulométrie.

Il réagit également avec l'eau ($\text{Mg} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{MgO} + \text{H}_2$), par exemple lors de l'utilisation d'eau sur un feu de magnésium.

Mélangé en faible quantité dans de l'aluminium, il est susceptible de fournir l'énergie suffisante pour faire fondre la pellicule d'alumine et démarrer la combustion de l'aluminium. Cette combustion de l'aluminium s'arrêtera avec l'arrêt de la fourniture de l'énergie issue de la combustion du magnésium.

Sur les dix dernières années, figurent dans la base de données ARIA du BARPI, 6 événements mettant en cause du magnésium sous forme de copeaux ou de poudre dans des sites de traitement de déchets. Il faut ajouter à ce bilan 4 événements ayant eu lieu dans des établissements usinant du magnésium et qui mettent également en cause des copeaux de magnésium.

En terme réglementaire, le travail et le stockage du magnésium ont fait l'objet dans le passé de rubriques particulières, 263 (dépôts de poudre de magnésium) et 264 (travail du magnésium et de ses alliages) dans la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. Ces deux rubriques ont été supprimées respectivement en 1992 et 1996 au profit de la rubrique 1450 (stockage ou emploi de solides inflammables).

En matière de classification des déchets au titre de l'article R541-7 du code de l'environnement, les copeaux et la poudre de magnésium ne sont pas nommément désignés dans la liste unique des déchets qui figure à l'annexe de la décision 2000/532/CE de la Commission du 3 mai 2000.

Ils sont donc repris dans cette liste sous les codes :

12 01 03	limaille et chutes de métaux non ferreux
12 01 04	fines et poussières de métaux non ferreux

Les déchets de magnésium sont donc classés de la même manière que les déchets d'aluminium. L'absence d'astérisque leur confère un statut de déchets non dangereux et les exonère d'un certain nombre d'obligations de suivi lors de leur élimination.

IV. Compte-rendu des investigations menées

IV.1 Reconnaissance de terrain

Les enquêteurs du BEA-RI, accompagnés d'un expert de l'Ineris, se sont déplacés sur site le 4 août 2021. Ils ont procédé aux premiers constats en présence des personnels de la société Purfer et des représentants de la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes.

Ils ont pu accéder au site et notamment à la zone aluminium afin de comprendre son organisation et son fonctionnement et procéder à des prélèvements. Des prélèvements ont été effectués à différents endroits du tas d'aluminium ainsi que sur la pelle au niveau de la cabine et au niveau du grappin (cf rapport de l'INERIS en **annexe 1**).



Photo n°6: dépôts sur la cabine



Photo n°7: grappin

IV.2 Recueil des témoignages

IV.2.1 Recueil du témoignage des témoins

Le recueil des témoignages des personnes présentes au moment de l'accident apporte les informations suivantes :

Le phénomène est décrit comme : « une énorme boule de feu », ou « une grande lueur blanche ». Les témoins parlent également de chaleur mais aucun ne mentionne de bruit ni d'effet de souffle. De la fumée blanche accompagnée de fines particules a également été observée.

IV.2.2 Recueil du témoignage de l'opérateur de la pelle à grappin

Le témoignage du conducteur de la pelle à grappin a pu être recueilli ; il nous a indiqué les éléments suivants :

La répartition des engins sur le site dépend de la tâche qui est confiée à chaque opérateur. Le jour de l'accident, l'opérateur était affecté au broyage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) et plus particulièrement au broyage des machines à laver.

De manière générale, il prend son poste à 8h. Le jour de l'événement, dans la matinée, son responsable lui a demandé de déplacer la presse cisaille à aluminium. Le tracteur routier attelé en permanence à la presse cisaille étant en panne de batterie, il a pris la pelle dans la zone aluminium et l'a amenée à proximité de la presse cisaille pour le faire démarrer.

Au moment où il a pris la pelle, il n'a rien remarqué de particulier : elle était stationnée, conformément aux consignes, grappin ouvert et posé au sol au niveau de la zone aluminium. Le grappin n'était pas en contact avec le tas de copeaux d'aluminium. Lui-même n'a eu aucune action sur le tas.

Une fois la pelle emmenée à proximité de la presse-cisaille, il a pu démarrer le moteur du tracteur en employant des câbles de batteries à batteries. Après démarrage du tracteur, il a stationné la pelle dans la zone de stockage du cuivre sans que le grappin n'ait été en contact avec les tas de cuivre. Et a ensuite déplacé la presse cisaille mobile sur la zone aluminium et est revenu à pied chercher la pelle à grappin.

Arrivé sur la zone aluminium, il ne remarque rien de particulier notamment sur le tas d'aluminium.

Du fait de l'encombrement de la zone aluminium (présence de la presse cisaille), il stationne la pelle un peu plus près du tas de copeaux d'aluminium que ce qu'il se pratique habituellement. Lors de la dépose du grappin, la pelle est encore en léger mouvement. Le grappin frotte sur le sol et une partie du grappin est en contact avec le tas d'aluminium (deux ou trois dents). Dans le mouvement, il ouvre également le grappin.

Au moment où le grappin touche le sol, l'opérateur constate une vive flamme blanche qui dure une quinzaine de seconde. Durant ce laps de temps, il essaye de reculer puis prend la décision de sauter de l'engin. Il n'a pas le souvenir d'avoir relevé le grappin ni ressenti de problème avec la pelle.

Il n'a pas ressenti de gêne pour respirer ni pendant ni après l'événement. L'essentiel de ses blessures est lié au flux radiatif.

Le frottement du grappin sur le sol est susceptible de générer des étincelles. Il n'a pas de souvenir précis que cela fût le cas le jour de l'accident mais il a déjà constaté le phénomène auparavant.

IV.2.3 Analyse des vidéos de surveillance de l'établissement

L'établissement est équipé d'une vidéo surveillance, les enquêteurs du BEA-RI et les experts de l'Ineris ont pu analyser ces vidéos.

L'analyse de la caméra qui montre une partie de la scène permet de voir le début de l'intense flamme blanche constatée par les témoins et l'arrêt rapide de la réaction. Entre la photo n° 8 et la photo n° 12, il s'écoule de l'ordre de 13 secondes.

Les autres caméras confirment un phénomène très lumineux sans apporter d'autres points de vue sur la zone impactée. Elles confirment le témoignage de l'opérateur blessé sur son activité avant l'accident.



Photo n°8 : pelle avant la dépose du grappin



Photo n°9 : début du phénomène



Photo n°10 : extension maximale de la boule de feu



Photo n°11 : baisse d'intensité du phénomène



Photo n°12 : fin du phénomène

IV.3 Analyse de l'Ineris

Le BEA RI a sollicité l'appui de l'Ineris sur les points suivants :

- 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.

La contribution de l'Ineris qui répond à ces différentes questions figure en **annexe 1** du présent rapport.

V. Déroulement de l'évènement

V.1 Déclenchement de l'évènement

Le 28 juillet, l'alvéole de copeaux d'aluminium comportait environ 12 tonnes de copeaux, le dernier apport datait de quelques jours.

Le mois de juillet et la nuit du 27 au 28 juillet avaient été pluvieux, mais en fin de matinée du 28 juillet, le temps était ensoleillé et la température agréable (25°).

En cours de matinée, une cisaille mobile (tracteur et semi-remorque spécialisée) a été mise en place dans la zone aluminium pour préparer des opérations de cisailage. Personne ne travaillait dans la zone de stockage aluminium juste avant le sinistre.

À 11h40, un opérateur déplace une pelle mécanique sur roue munie d'un grappin vers la zone aluminium. L'engin venait de la zone « cuivre » située au nord-est. L'opérateur a pénétré dans la zone de stockage aluminium, a tourné au droit de l'alvéole des copeaux, et a garé son engin à proximité du tas de copeaux. Lors de la descente du grappin, le conducteur a actionné son ouverture.

Les images vidéo montrent l'apparition d'une boule de feu juste après la fin du dernier mouvement du bras articulé et de la dépose du grappin. Le feu intense, sans bruit d'explosion ni effet de souffle selon les témoins, a duré quelques secondes et se manifeste comme un flash ou une boule de feu. Des projections de petits débris solides ont été perceptibles jusqu'à l'entrée du site située à 60 m à vol d'oiseau. Dans les minutes qui ont suivi, seules des fumerolles blanches se sont dégagées du tas.

V.2 L'intervention des secours publics

Les sapeurs-pompiers sont appelés à 11h42 pour secours à personnes (brûlures au magnésium). Un premier véhicule arrive sur place à 11h58 et constate qu'il y a également un échauffement du tas de métaux à proximité. Des fumées de couleur blanche sont observées mais sont peu importantes.

Le blessé est pris en charge en urgence absolue du fait de ses importantes brûlures.

Puis, en ce qui concerne le feu de métaux, les sapeurs-pompiers établissent un périmètre de sécurité et demandent un renfort en matière de risques chimiques. Des détections au moyen de détecteurs électrochimiques sur des gaz de décomposition habituels (Cl_2 , HCl, NH_3 , CO) ainsi que des relevés d'explosimétrie qui ne mettent pas en évidence de risques dans ce domaine de mesures sont effectués. Ils décrivent des fumerolles et l'absence de flamme vive, ainsi que des fumées blanches qui s'échappent lentement. Le phénomène observé diffère des feux de métaux habituellement observés, les températures mesurées sont relativement faibles.

Il est décidé de ne pas utiliser d'eau et d'éteindre le feu en mélangeant les copeaux d'aluminium avec du sable sec. Le tas de copeaux d'aluminium sera mélangé sous la surveillance des sapeurs-pompiers à 60 tonnes de sable sec commandé par l'exploitant, puis surveillé. Le conducteur de la pelle mécanique

a été équipé d'EPI de type « tenue de feu sapeur-pompier » ainsi que d'un casque. Des moyens en eau défensifs (lance à main et lance écran) prêts à être alimentés ont été mis en place pour protéger la grue en cas de renouvellement du phénomène.



Photo n°13 : image de la caméra thermique (crédit SDIS)

VI. Conclusions sur le scénario de l'événement

VI.1 Scénario

La présence importante d'oxyde de magnésium dans les résidus de combustion ainsi que de traces d'aiguilles de magnésium dans les analyses réalisées par l'Ineris conduisent à privilégier la contamination du tas de copeaux d'aluminium par des copeaux de magnésium.

Lors de la dépose du grappin en bord de tas, le frottement du grappin sur le sol a pu provoquer l'énergie suffisante pour initier la combustion du magnésium. Cette combustion, qui produit une grande quantité de chaleur, se caractérise par l'émission d'une lumière blanche très intense, ce qui est cohérent avec les témoignages. La quantité de chaleur produite a pu également générer la fusion d'une partie de l'aluminium et sa combustion. À l'issue de la combustion du magnésium, en l'absence de l'apport de cette énergie, la combustion des copeaux d'aluminium s'est arrêtée.

Les autres réactions violentes de l'aluminium, telles qu'une explosion ou une réaction d'aluminothermie ont été écartées car elles ne correspondent pas au phénomène observé (pas de surpression constatée) ni à la nature des résidus retrouvés sur la pelle.

L'Ineris a évalué que pour produire ce phénomène (une réaction très violente sur un intervalle de temps très court) de faibles quantités d'aluminium et de magnésium ont été nécessaires : la quantité de magnésium mise en jeu était de l'ordre de quelques centaines de gramme et la quantité d'aluminium de l'ordre de quelques kilogrammes.

VI.2 Facteurs contributifs

VI.2.1 Procédure de réception des déchets

La nature purement visuelle des contrôles menés à l'arrivée des déchets sur le site rend difficile la distinction entre certains métaux. Cette distinction est plus particulièrement délicate à faire sur des matériaux tels que des copeaux ou des tournures pour lesquels on ne peut pas évaluer facilement les différences de masses volumiques ou de couleurs.

VI.2.2 Traçabilité des produits

Comme indiqué précédemment, la codification des déchets n'établit pas de différence entre les codes déchets des copeaux d'aluminium et de magnésium. Ils sont regroupés sous le code 12 01 03 (Limaille et chutes de métaux non ferreux). Les copeaux de magnésium n'ayant pas le statut de déchets dangereux, ils ne sont pas particulièrement tracés par les producteurs.

La massification apportée par la société Purfer conduit à rassembler sur son site des lots provenant directement de producteurs mais également d'apports individuels et d'autres professionnels de la récupération des métaux. La traçabilité, et particulièrement sur les lots issus de professionnels de la récupération des métaux, est difficile à traiter ; ces lots étant eux-mêmes issus de regroupements de lots de taille plus petite.

VI.2.3 Mode de manutention

L'énergie d'inflammation nécessaire à la réaction de combustion du magnésium diminue fortement avec la granulométrie des matériaux. Dans ce cadre la manipulation par un grappin a pu, s'agissant du magnésium, produire cette énergie d'activation notamment via le frottement sur un sol en béton de ce grappin.

VI.2.4 Protection thermique

La présence pour l'opérateur d'une protection thermique, simplement constituée d'une vitre, si la porte de la cabine avait été fermée, aurait réduit, au regard de l'intensité et de la durée du phénomène, son exposition au rayonnement thermique et limité l'étendue et la gravité de ses blessures.

VII. Enseignements de sécurité

VII.1 Matériaux d'extinction

Même si dans le cas présent, l'apport de matériaux d'extinction n'a pas été indispensable, le fait de disposer sur place ou à proximité, pour les intervenants internes comme pour les services d'incendie et de secours, de sable sec ou de matériaux équivalents en quantités suffisantes, permet d'intervenir

rapidement sur ce type de feux de métaux et de limiter le risque d'utilisation d'un agent d'extinction inapproprié, comme de l'eau.

VII.2 Procédure de réception

Dans le cas de l'aluminium et du magnésium sous forme de tournures ou de copeaux, la distinction entre ces deux matériaux sur de simples critères visuels semble extrêmement délicate à effectuer.

L'élaboration d'une procédure de test qui devra rester simple et d'un coût proportionné avec la valorisation des déchets est fortement souhaitable, notamment avec une mobilisation conjointe d'experts scientifiques et de représentants de la profession des récupérateurs de métaux, dans la mesure où ce sujet concerne de la même manière les nombreuses installations analogues. Évaluer la densité ou la réactivité à la flamme d'un échantillon pourrait ainsi être une piste de test permettant de distinguer des lots d'aluminium contaminés par du magnésium.

VII.3 Information des opérateurs

La tâche qui consiste à manipuler des copeaux d'aluminium avec une pelle à grappin est une tâche habituelle au sein d'un site spécialisé dans la collecte, le tri et le recyclage des métaux. Il est primordial que les opérateurs soient informés et régulièrement sensibilisés aux risques spécifiques liés à la manipulation de ces déchets, à éviter les frottements du grappin sur le sol et à l'utilité des équipements de protection.

VIII. Recommandations de sécurité

VIII.1 Recommandation à destination du pouvoir réglementaire

Les caractéristiques du magnésium à l'état divisé et notamment sa capacité à pouvoir facilement s'enflammer (H228), ainsi que sa réactivité au contact de l'eau (H261), justifieraient, en matière de déchets, un classement en déchet dangereux qui permettrait son identification et sa traçabilité dès la production du déchet.

Ce classement des déchets, établi au niveau européen relève de décisions de la Commission européenne.

Le BEA-RI recommande à la direction générale de la prévention des risques (DGPR) d'engager une action auprès de la Commission européenne afin de faire classer en tant que déchet dangereux les « limailles et chutes de magnésium » ainsi que les « poussières et les fines de magnésium ».

Une telle classification obligerait les producteurs de déchets de magnésium à identifier particulièrement ceux-ci, y compris lorsque ces déchets sont mélangés avec des déchets d'aluminium.

La demande auprès de la Commission européenne pourra s'appuyer sur le présent rapport d'enquête ainsi que sur l'inventaire des autres accidents mettant en cause des déchets de magnésium collationnés par le BARPI.

VIII.2 Recommandations à destination de l'exploitant

À ce jour, les déchets d'aluminium, notamment sous forme de copeaux, ne font pas l'objet d'une procédure de réception particulière visant à qualifier le niveau de pollution de la livraison par le magnésium ou un autre produit, ou de sa réactivité.

Le BEA-RI recommande à l'exploitant d'étudier la mise en place dans le cadre de ses relations commerciales d'une information de ces apporteurs sur les dangers de la présence de magnésium en mélange avec l'aluminium et la mise en place d'une procédure de test à mettre en œuvre au moment de la réception des déchets.

Cette procédure devra rester simple et proportionnée aux enjeux. L'exploitant pourra s'appuyer sur les recherches éventuellement lancées par la profession.

IX. Annexes

Annexe 1 Contribution de l'Ineris

24

Annexe 1 Contribution de l'Ineris



(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 HNO_3 / 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.

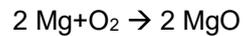
En ce qui concerne les réactions thermites potentielles, l'aluminium et le magnésium sont susceptibles de réagir fortement en présence d'oxyde de cuivre, d'oxyde de fer, de monoxyde de plomb ou encore d'oxyde de manganèse^{3,4} lorsqu'une énergie d'inflammation suffisante est apportée. Si du cuivre est 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

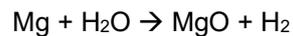
En ce qui concerne l'oxyde ferrique rouge Fe_2O_3 détectée dans l'échantillon prélevé sous la cabine de la pelle, ce dernier provient soit de la combustion de particules de fer soit de résidus de rouille (Fe_2O_3 sous forme hydratée) déjà présents sous la cabine de la pelle.

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 :



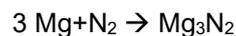
L'oxyde de magnésium formé a ainsi été retrouvé dans le grappin de la pelle (21AR085) ainsi que dans plusieurs échantillons prélevés.

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.

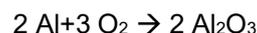
Par ailleurs, on doit noter également la présence de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dans les résidus de combustion prélevés dans la pelle à grappin. Ce composé s'est formé très vraisemblablement selon les réactions suivantes :



Le nitru 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 nitru 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)

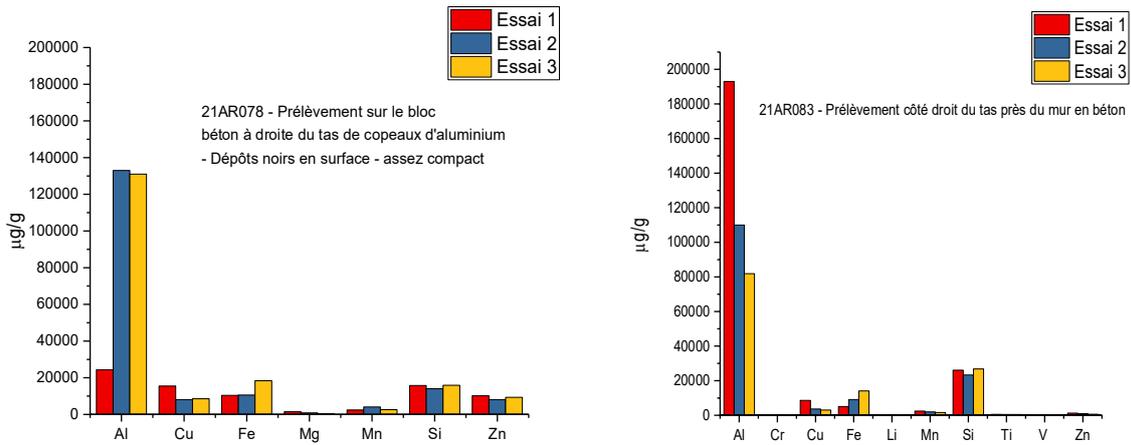


Figure 10 Analyse par ICP optique des échantillons 21AR078 et 21AR083

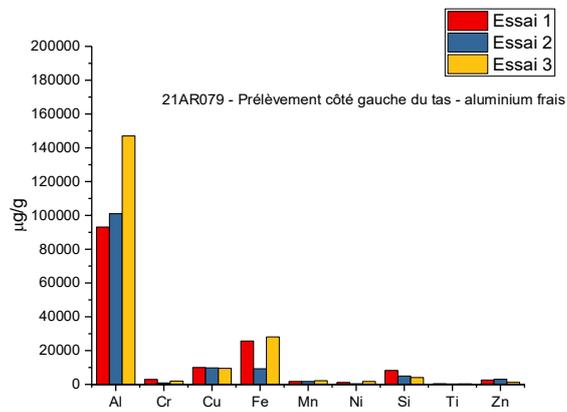


Figure 11 Analyse par ICP optique de l'échantillon 21AR079

- Résultats d'analyse par MEB (EDX)

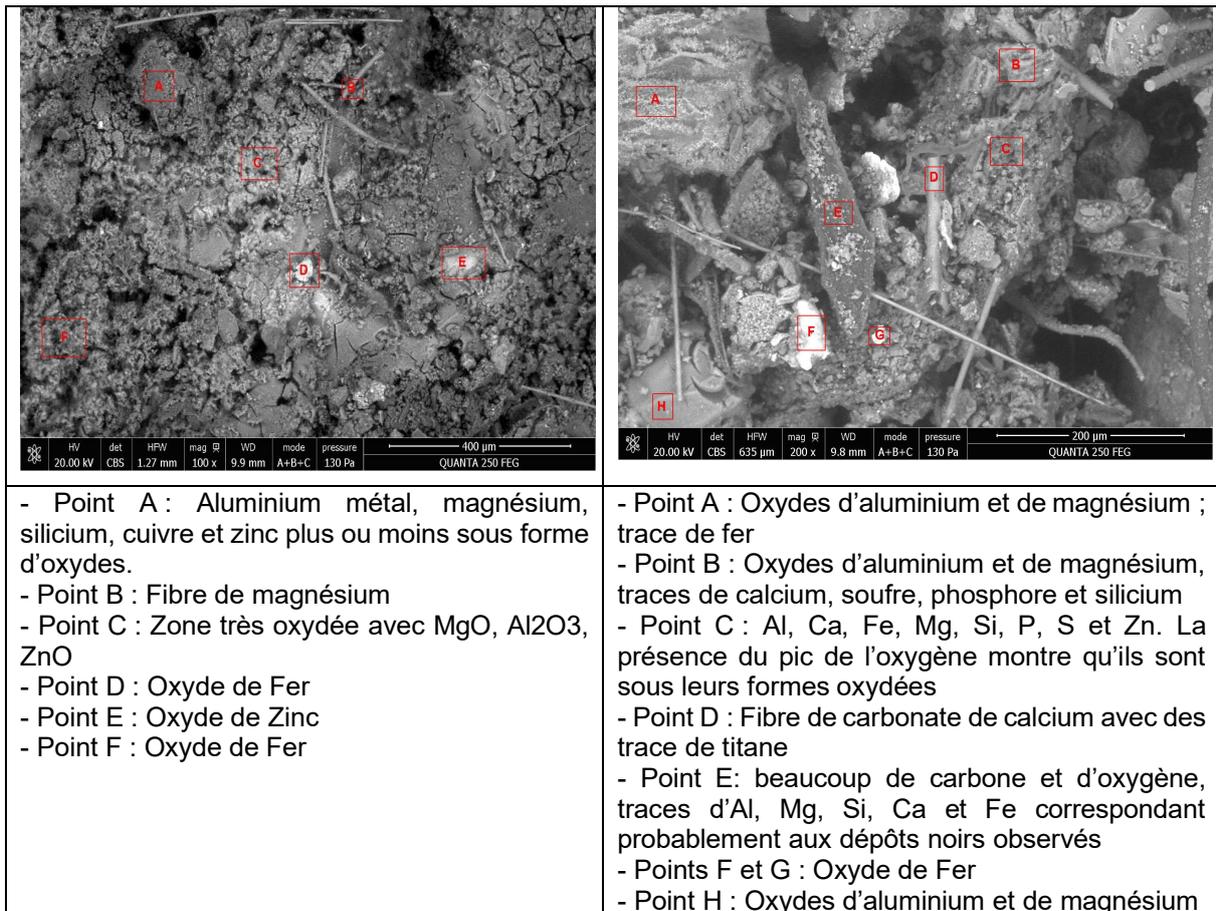


Figure 12 Images MEB de l'échantillon 21AR078

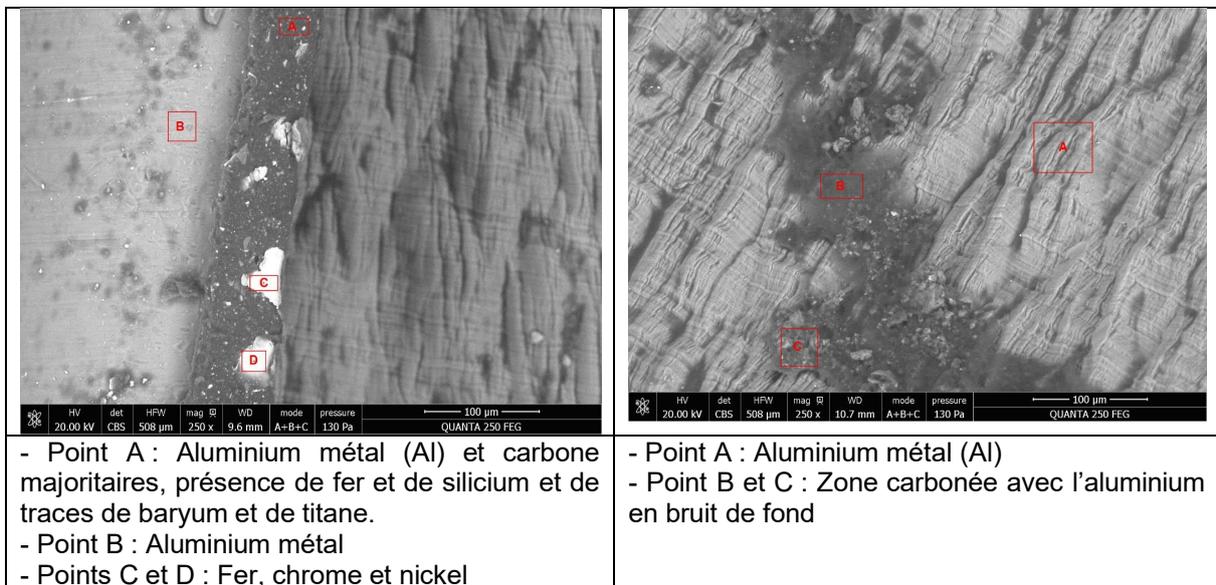


Figure 13 Images MEB de l'échantillon 21AR079

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)

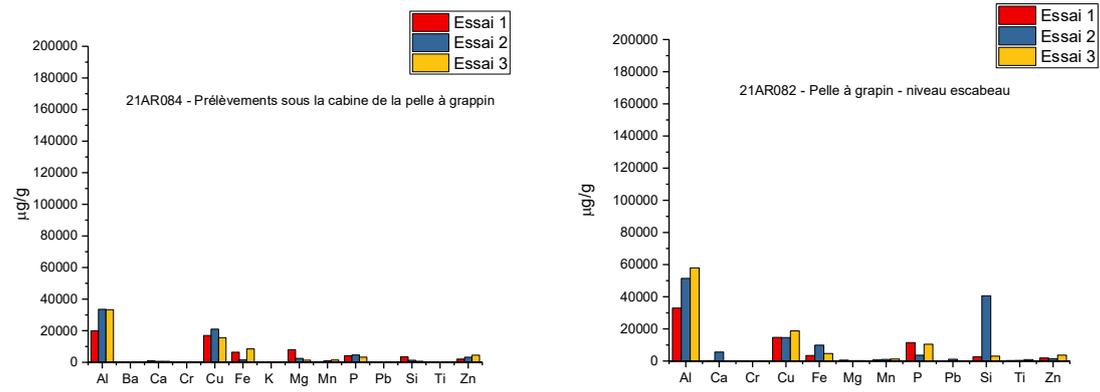


Figure 14 Analyse par ICP optique des échantillons 21AR084 et 21AR082

- Résultats d'analyse par MEB (EDX)

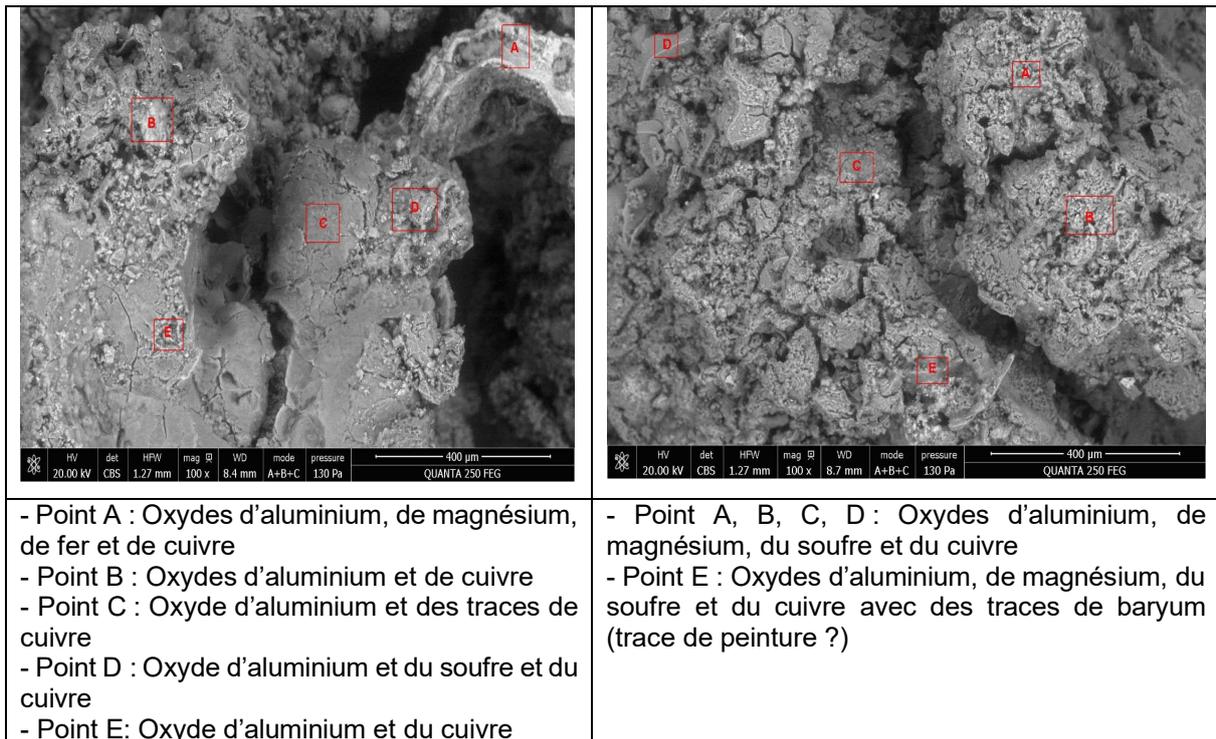


Figure 15 Images MEB de l'échantillon 21AR082

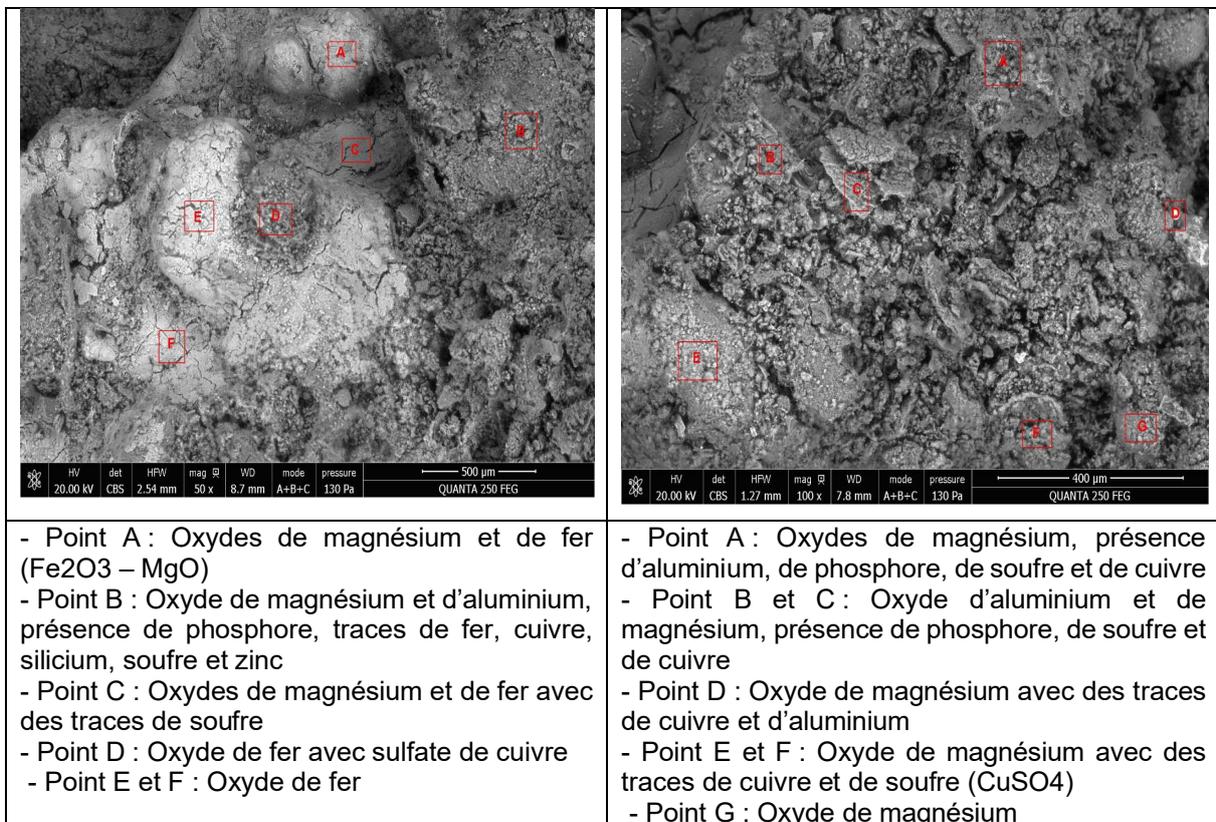


Figure 16 Images MEB de l'échantillon 21AR084

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

- Résultats d'analyse par MEB (EDX)

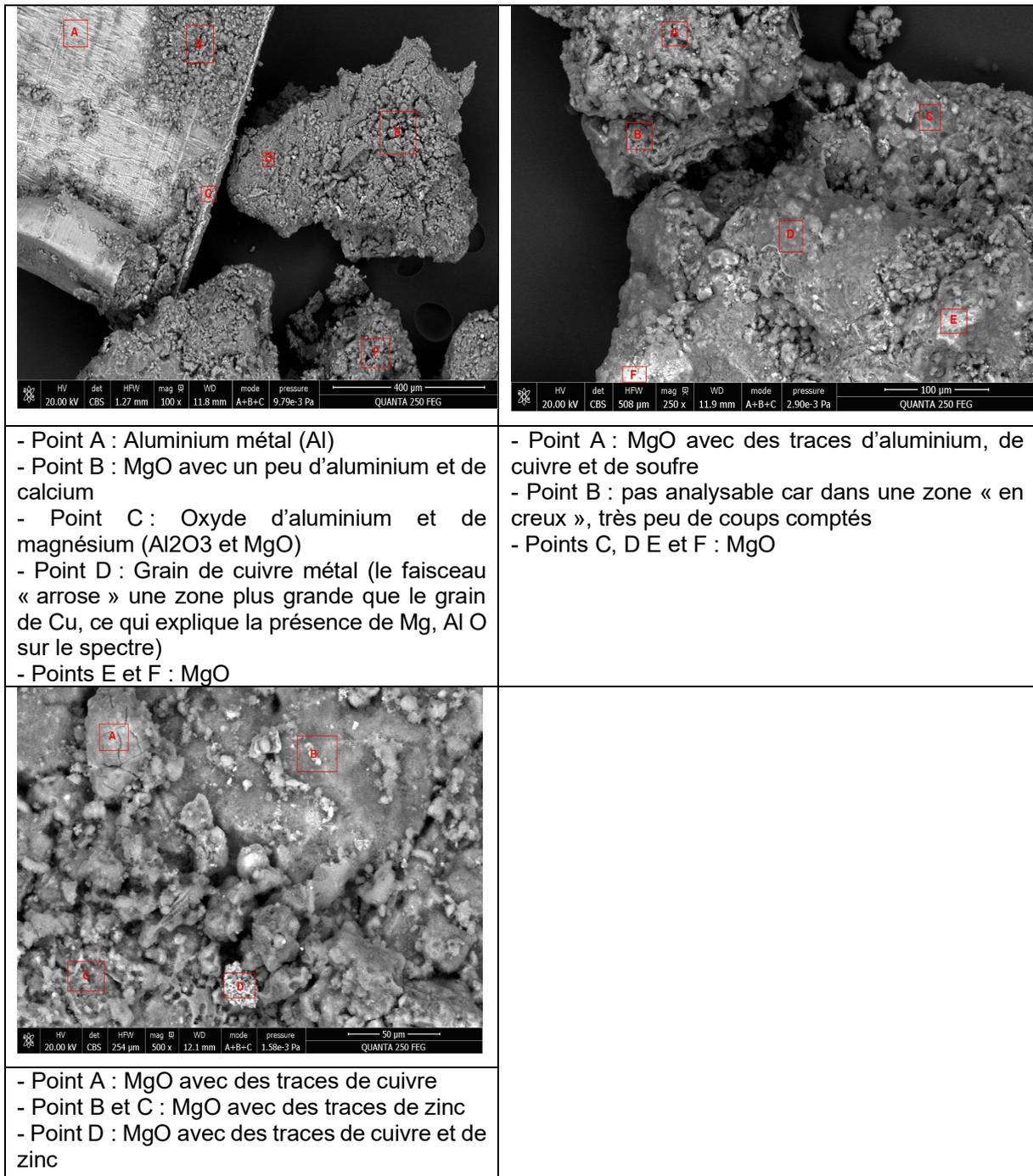


Figure 17 Images MEB de l'échantillon 21AR085

- Analyse par diffraction X

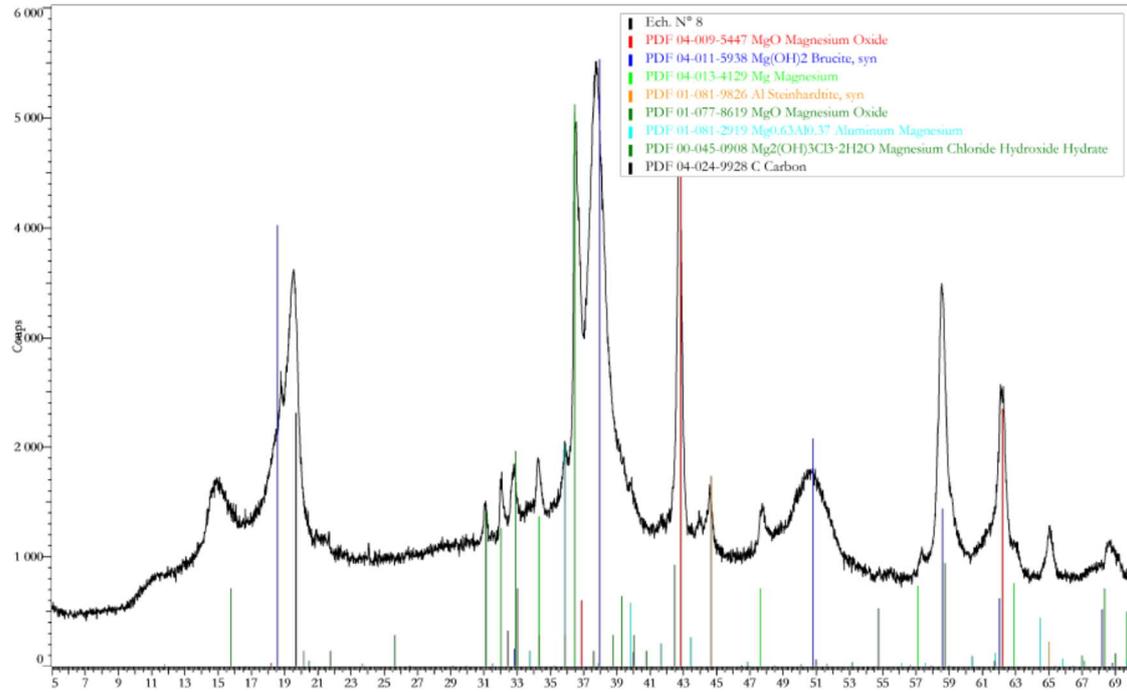


Figure 18 Spectre de diffraction RX de l'échantillon 21AR085

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

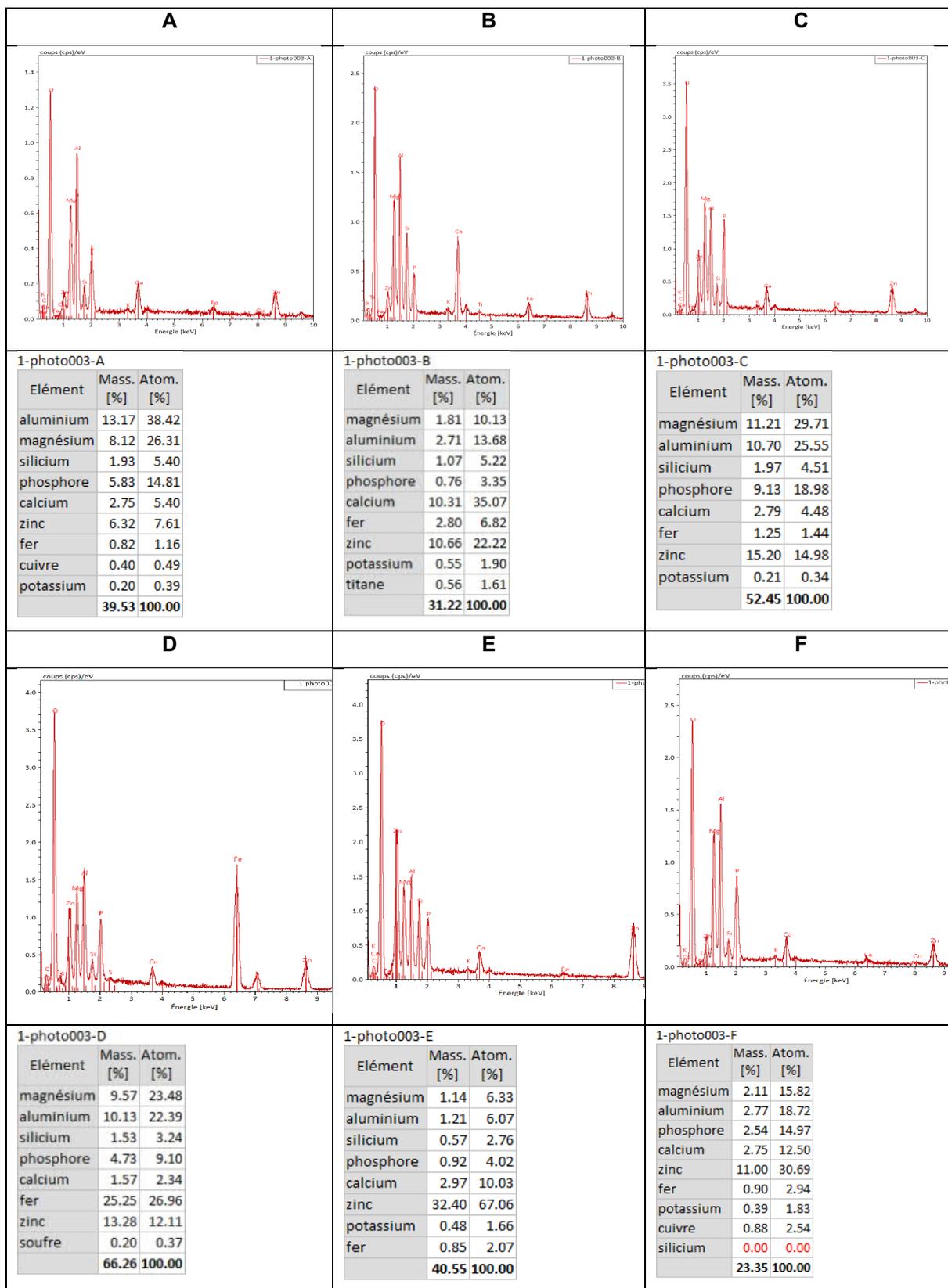
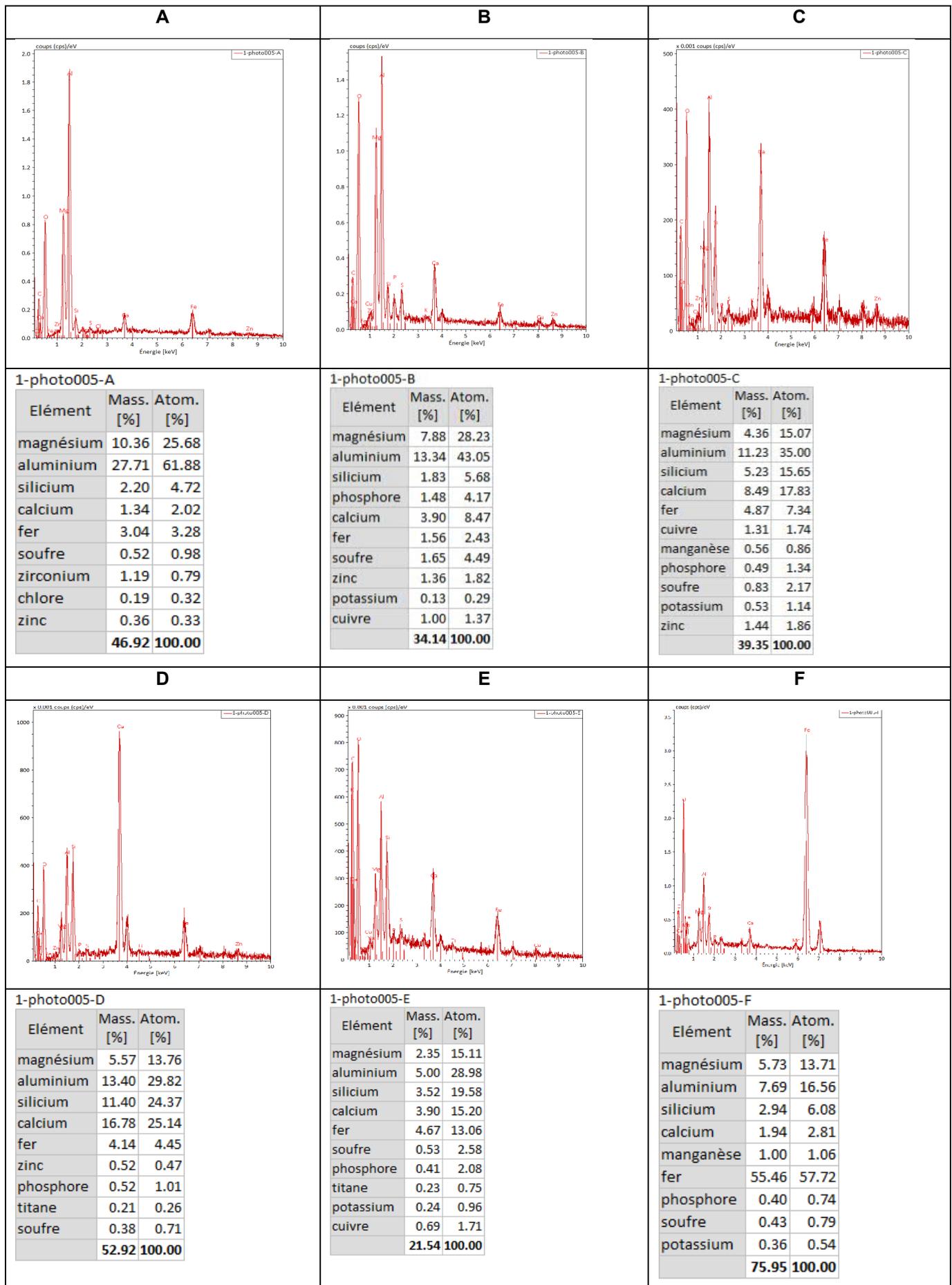


Figure 19 Analyse EDX de l'échantillon 21AR078 (photo MEB N°1)



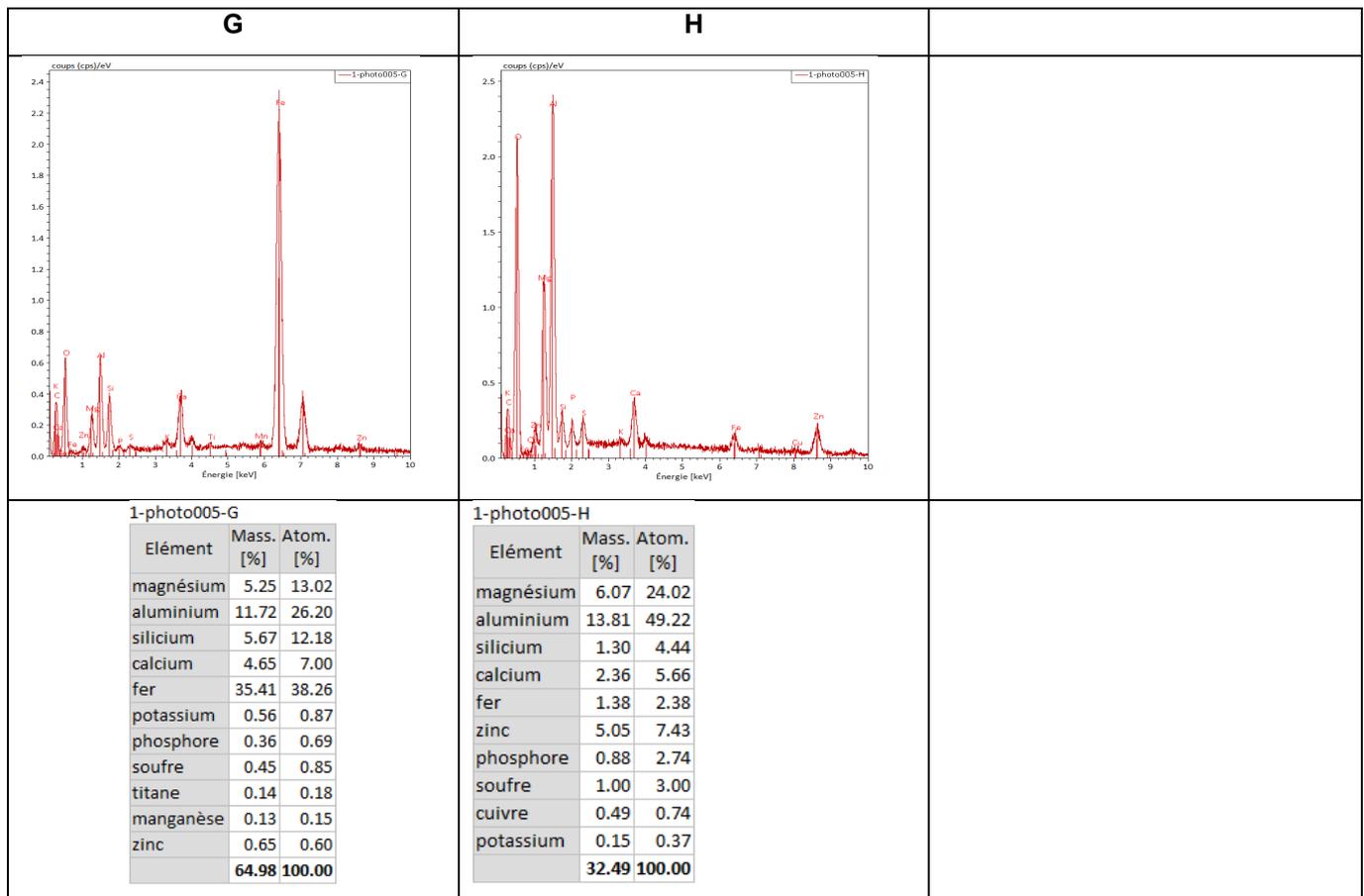


Figure 20 Analyse EDX de l'échantillon 21AR078 (photo MEB N°2)

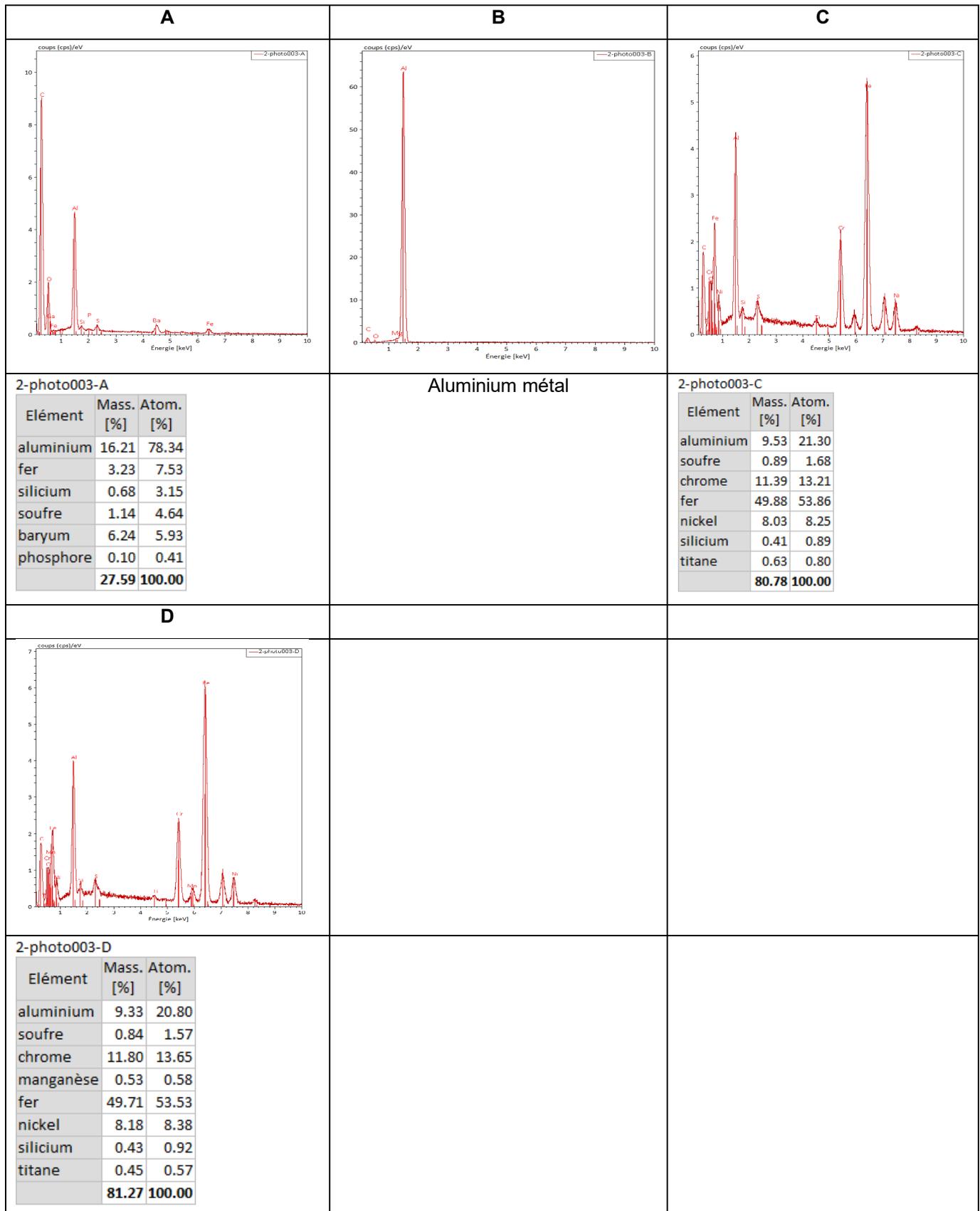


Figure 21 Analyse EDX de l'échantillon 21AR079 (photo MEB N°1)

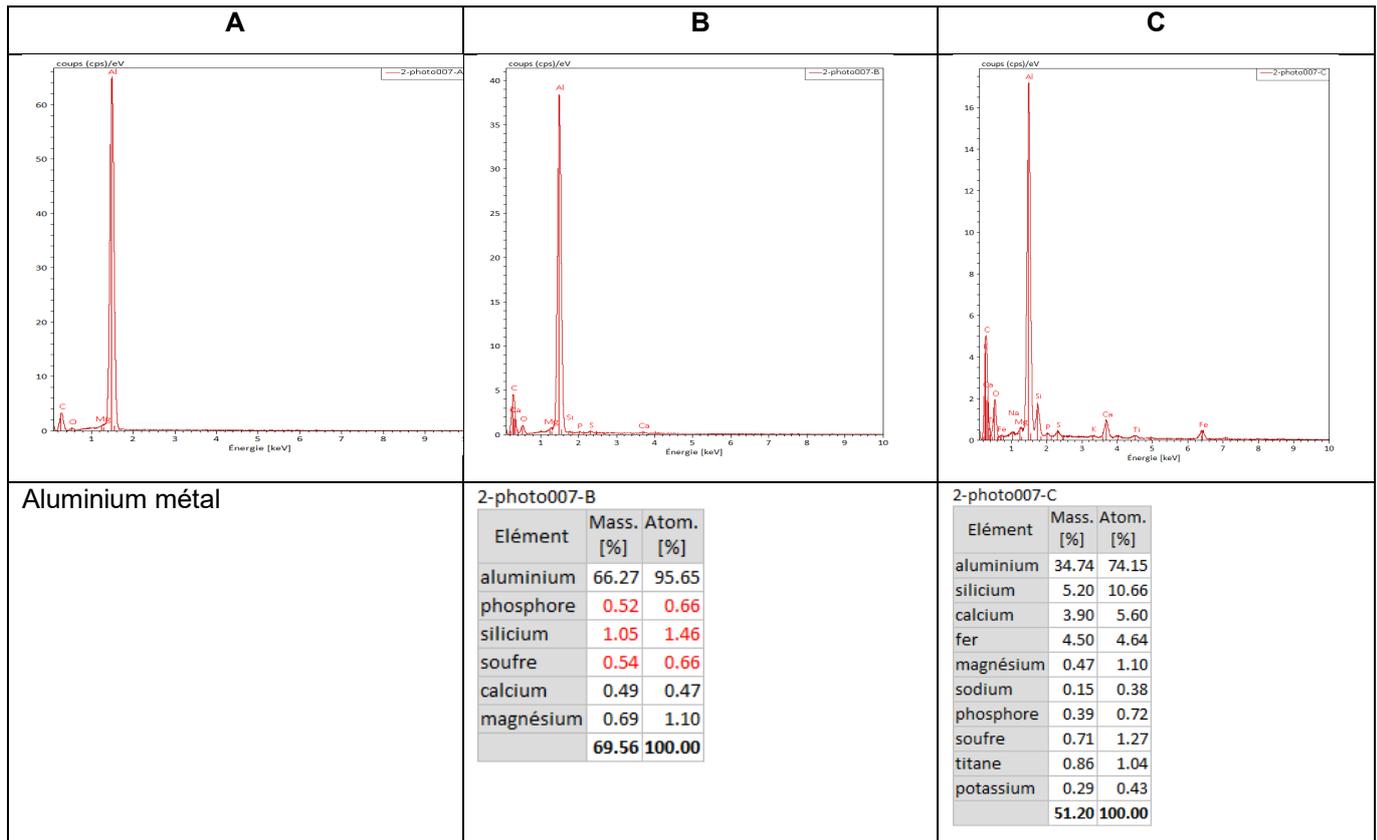


Figure 22 Analyse EDX de l'échantillon 21AR079 (photo MEB N°2)

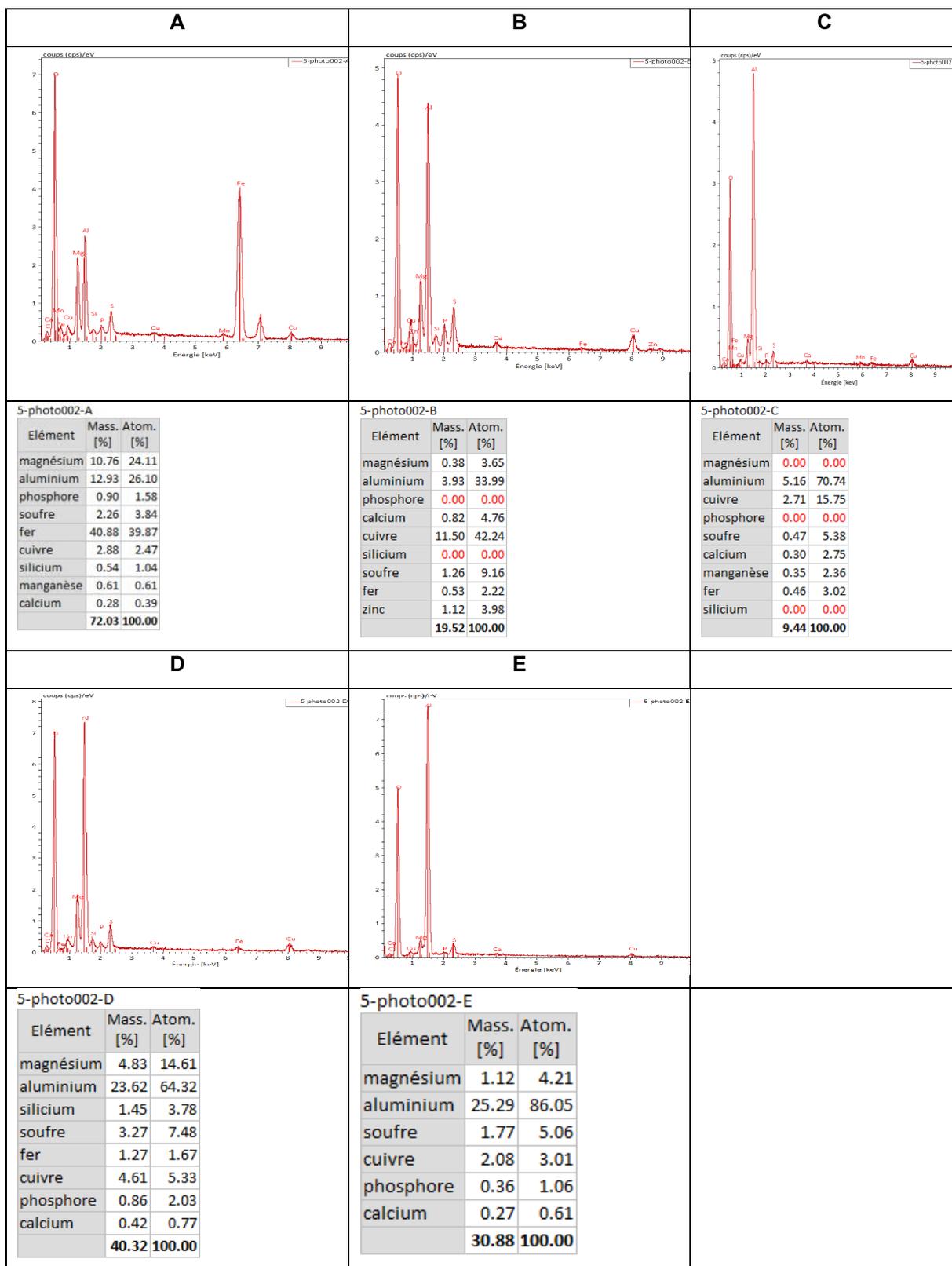


Figure 23 Analyse EDX de l'échantillon 21AR082 (photo MEB N°1)

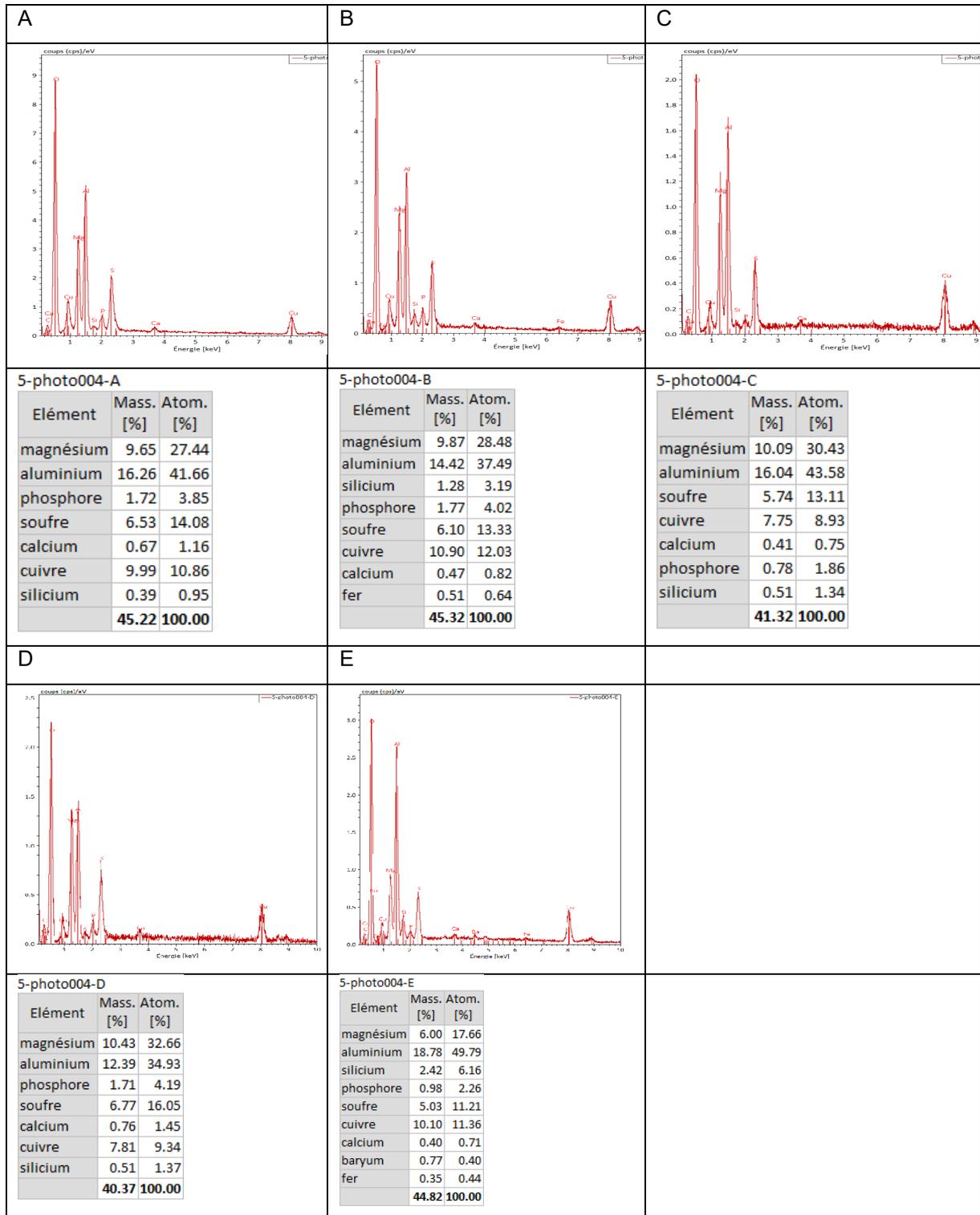


Figure 24 Analyse EDX de l'échantillon 21AR082 (photo MEB N°2)

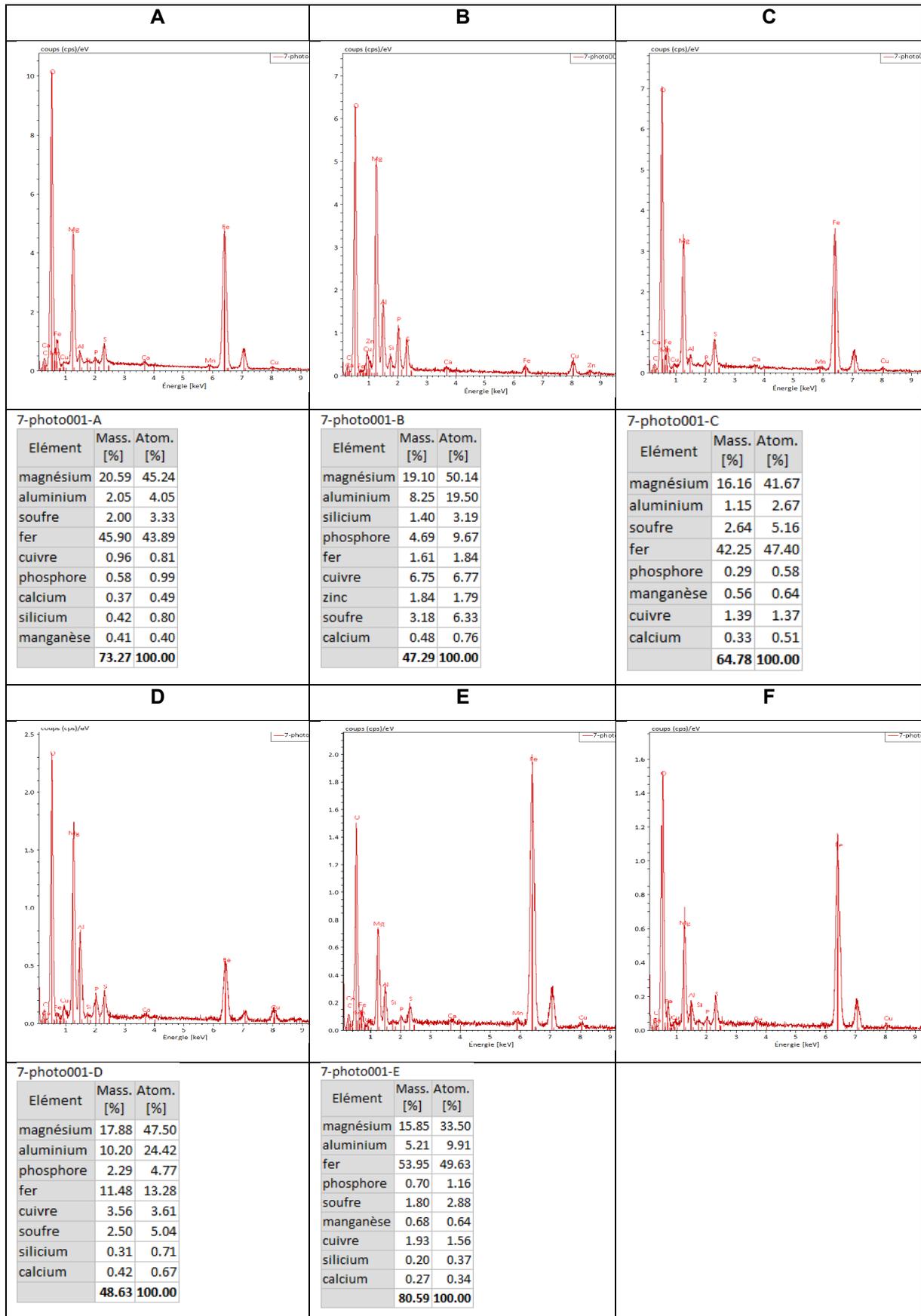
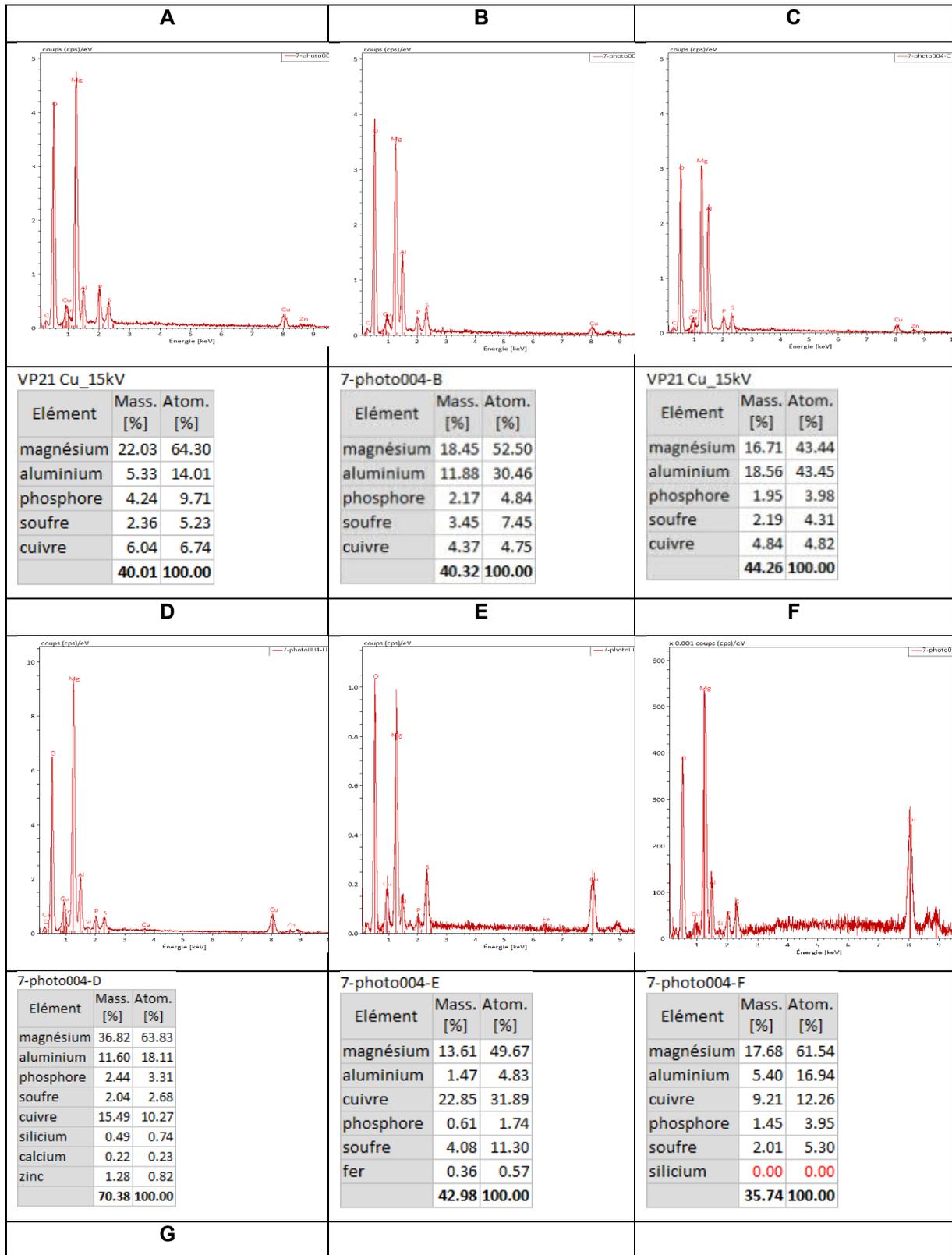


Figure 25 Analyse EDX de l'échantillon 21AR084 (photo MEB N°1)



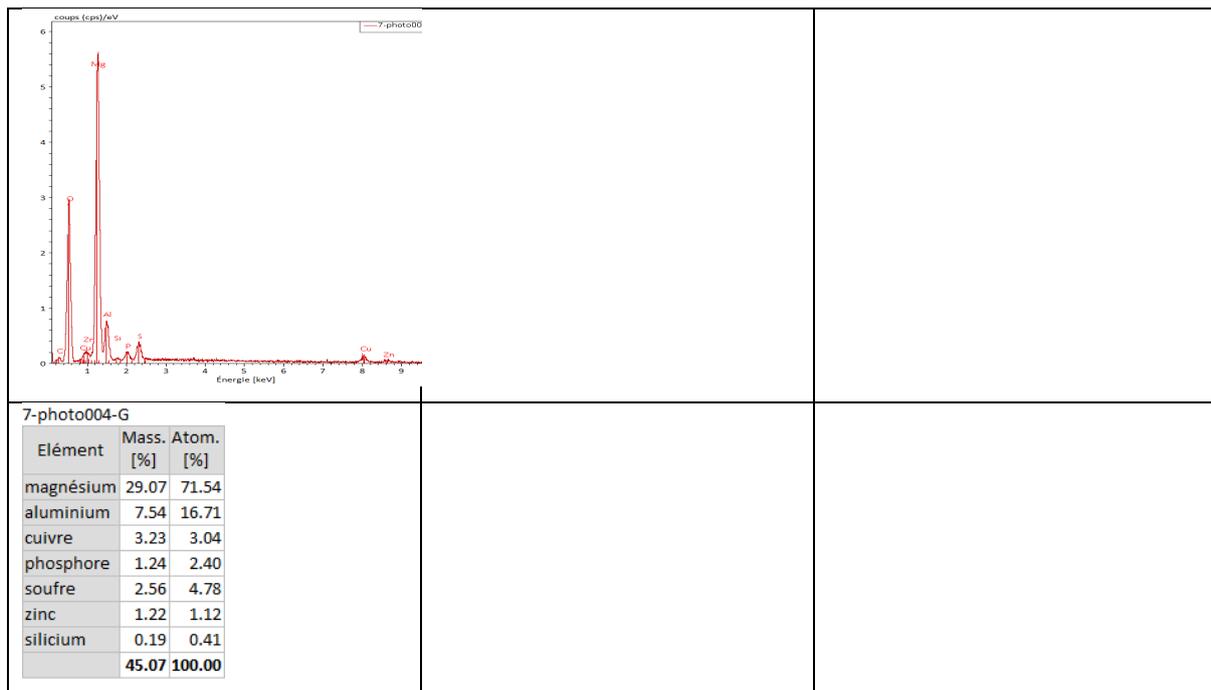


Figure 26 Analyse EDX de l'échantillon 21AR084 (photo MEB N°2)

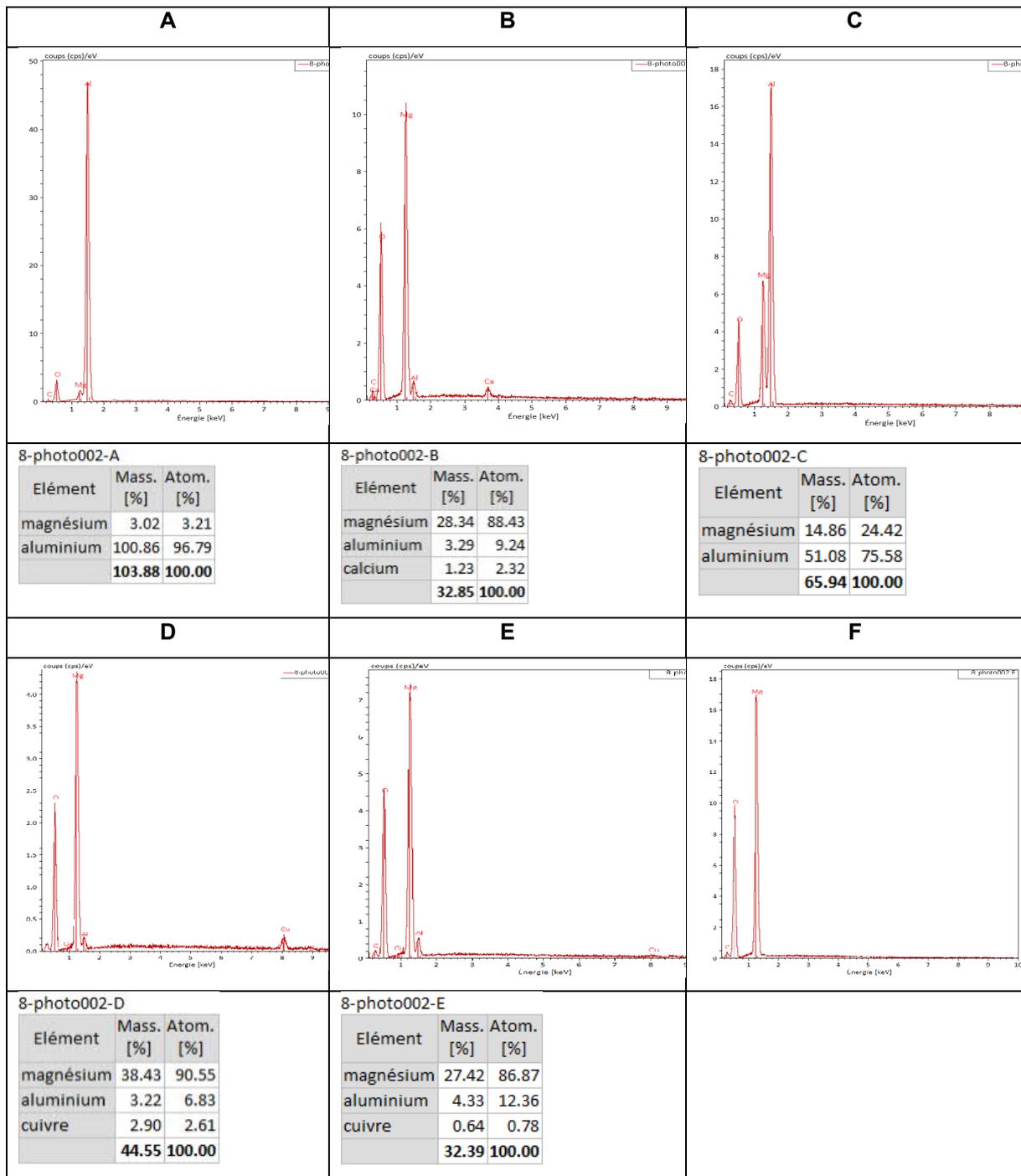


Figure 27 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°1)

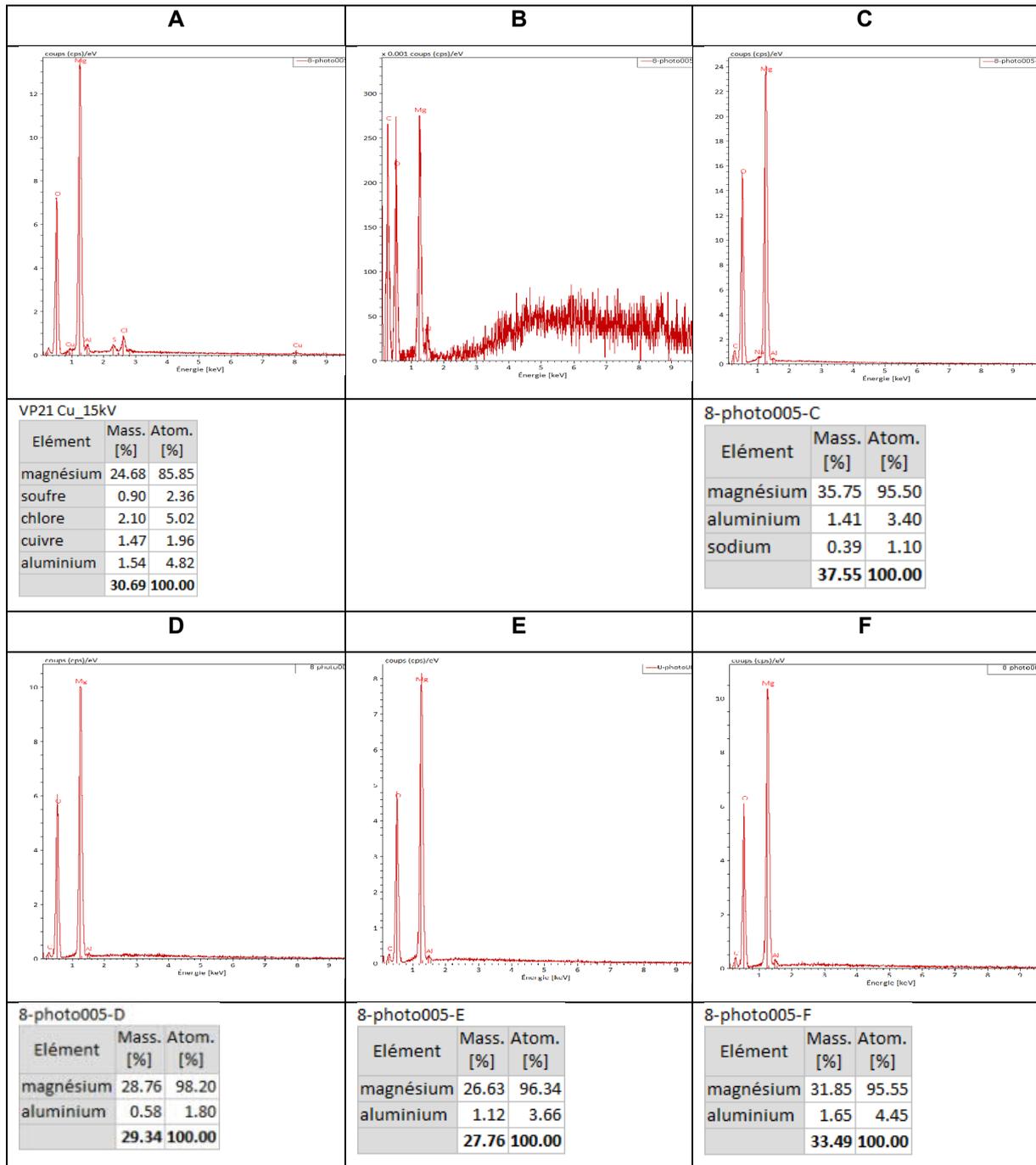


Figure 28 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°2)

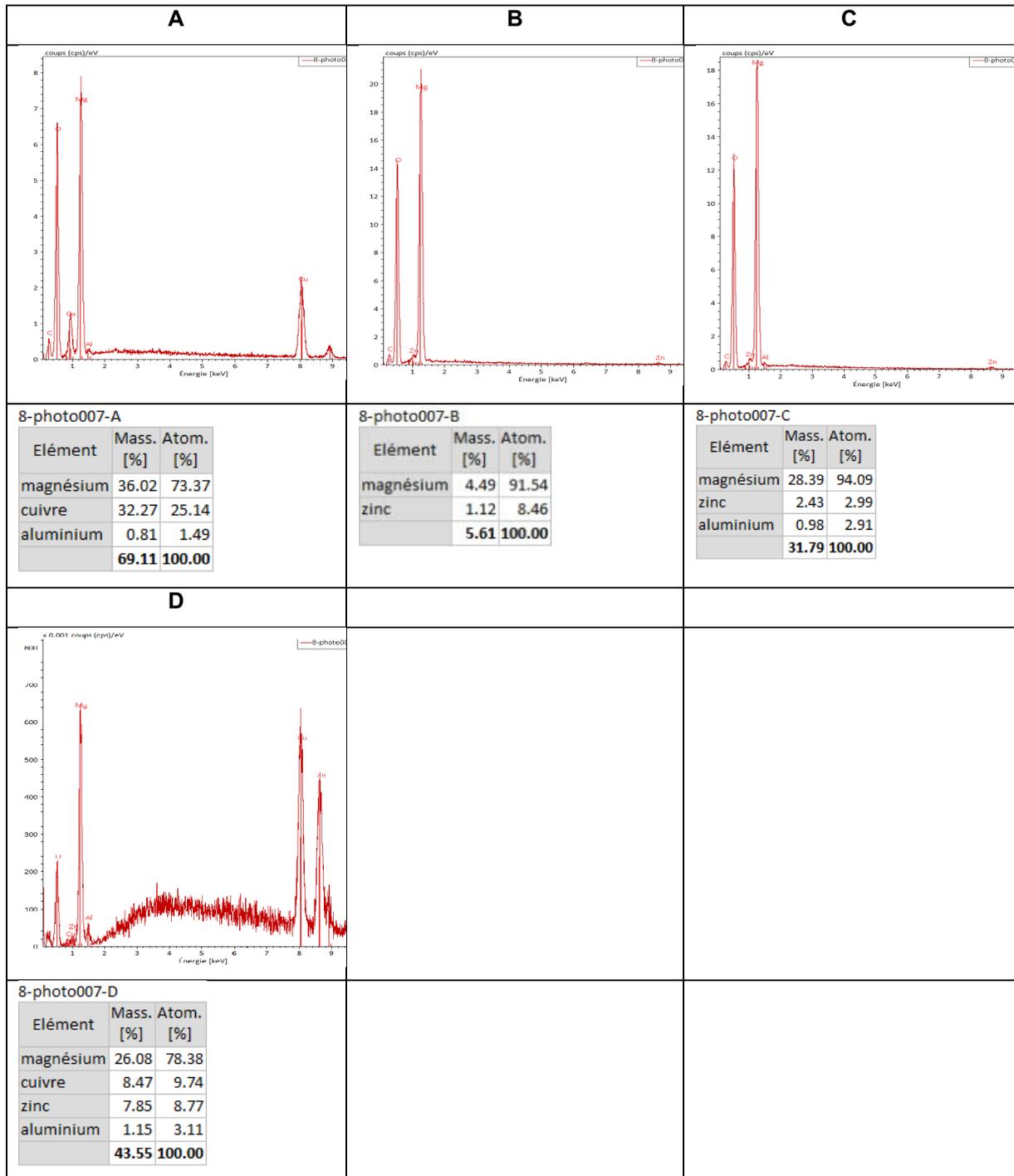


Figure 29 Analyse EDX de l'échantillon 21AR085 (photo MEB N°3)



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Bureau d'enquêtes et d'Analyses
sur les Risques Industriels

MTE / CGEDD / BEA-RI
Tour Séquoïa
92055 La Défense Cedex

+33 1 40 81 21 22
bea-ri.cgedd@developpement-durable.gouv.fr

<http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/bea-ri-r549.html>