

# **Identification des alliages d'aluminium d'objets ethnographiques et caractérisation de leurs produits de corrosion**

Analyse par voie électrochimique et par fluorescence X

Mémoire présenté par :

Despland Chloé

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation

Objets archéologiques et ethnographiques

Année académique 2017-2018

Remise du travail : 16.07.2018

Jury : 27-29.08.2018

Nombre de pages : 113

Annexes incluses





## Engagement

*« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »*

Date et signature :

## Remerciements

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le concours des personnes suivantes que je tiens particulièrement à remercier :

Monsieur le Professeur et Docteur **Christian Degrigny** pour avoir proposé le sujet ainsi que pour toute l'aide et les réponses qu'il m'a fournies tout au long de ce travail ;

Le collège d'enseignants : Monsieur le Professeur et Docteur **Régis Bertholon**, directeur de filière conservation-restauration à la HE-Arc et référent sur ce projet, Messieurs les Professeurs **Valentin Boissonnas**, **Thierry Jacot** et **Tobias Schenkel**, Pour leurs conseils et critiques lors de la définition du sujet de Bachelor et de sa réalisation ;

Madame **Manon Rais**, pour sa gentillesse, son soutien, son sourire et sa grande disponibilité dans toutes situations ;

Docteur **Edith Josef**, membre de l'équipe de recherche, pour son aide et sa présence lors d'analyses FRX ;

Monsieur **Olivier Schinz**, conservateur du MEN Madame **Isabella Bosza**, conservatrice du MKB et Monsieur **Alexander Brust**, conservateur-restaurateur du MKB, pour la confiance accordée, pour le prêt d'objet et pour leur grande disponibilité ;

Madame **Eleanor Kissel** Professeur à la HE-Arc et conservatrice-restauratrice du Quai Branly, pour son intérêt ;

Mes collègues **Maïssane Farra**, **Marie Ducimetière**, **Augustin Duc**, **Alice Gerber** et **Véronique Serex** pour leur soutien et leur motivation tout au long de ce travail ;

Madame **Marie-Jeanne Scholl**, ancienne étudiante de la HE-Arc et **Elodie Granget** étudiante en première année de Master CROSTH à la HE-Arc, pour leurs réponses à mes questions relatives à leur précédant mémoire de Bachelor ;

Monsieur **Alexis Domjan**, professeur de chimie à la HE-Arc, pour ses réponses sur l'électrochimie un dimanche matin avec le sourire ;

Madame **Laura Brambilla**, chef de projet au sein de l'UR-Arc CR, et **Guillaume Rapp**, professeur à la HE-Arc, pour leur conseil et leur patience lors des problèmes rencontrés avec l'outil DiscoveryMat ;

Je tiens également à remercier pour la traduction et la relecture : **Mathieu Vasey**, mes parents **Gilles et Valérie Despland**, **Maïssane Farra**, **Lucie Perrin-Jaquet**, **Lucie Meylan**, **Julie Polli** et **Céline Zinguinian** ;

Finalement, je remercie tous les musées qui ont montré un intérêt pour mon travail : **Château de Morges et ses musées** ; **MEG** ; **BHM** ; **MJAH** ; **MAH** ; **MAHF** ; **Musée international d'horlogerie de la Chaux-de-Fonds** et le **Musée Bible et Orient de Fribourg**.

## Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>Summary</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>1 Critères de sélection :</b>	<b>9</b>
<b>2 Les collections étudiées</b>	<b>9</b>
<b>3 Technologie de fabrication</b>	<b>10</b>
<b>4 L'aluminium</b>	<b>11</b>
4.1 Historique	11
4.2 Procédé Héroult-Hall	12
4.3 Caractéristiques de l'aluminium	12
4.4 Corrosion de l'aluminium	14
<b>Partie II : Méthodologie</b>	<b>15</b>
<b>5 Caractérisation sensorielle du matériau</b>	<b>16</b>
<b>6 L'outil DiscoveryMat</b>	<b>18</b>
6.1 Matériel	18
6.2 Protocole de mesure	19
6.3 Limites de l'outil	21
6.3.1 Caractère invasif	21
6.3.2 Choix des solutions testées	21
6.4 Adaptation de l'application aux alliages d'aluminium	21
<b>7 La fluorescence des rayons X</b>	<b>22</b>
7.1 Principe physique de la fluorescence à rayons X	22
7.2 Fonctionnement de l'appareil FRX portable	22
7.3 Procédé	23
<b>8 Caractérisation des altérations</b>	<b>24</b>
<b>Partie III : Résultats des observations et analyses</b>	<b>27</b>
<b>9 Identification d'aluminium</b>	<b>28</b>
<b>10 Analyse DiscoveryMat des objets sélectionnés : problèmes rencontrés et résultats</b>	<b>29</b>
10.1 Sélection des objets pour l'analyse DiscoveryMat	29
10.2 Problèmes rencontrés	29
10.3 Résultats	30
10.3.1 Analyse des objets sélectionnés avec DiscoveryMat	30
10.3.2 Etude du comportement des tracés	37
<b>11 Analyse élémentaire FRX</b>	<b>38</b>
<b>12 Etat des altérations</b>	<b>41</b>

12.1	Altérations physiques.....	41
12.2	Altérations chimiques.....	42
<b>Partie IV : Regard critique et perspective .....</b>		<b>44</b>
<b>13</b>	<b>Discussion des résultats .....</b>	<b>45</b>
13.1	Caractérisation des matériaux .....	45
13.2	DiscoveryMat .....	45
13.3	FRX .....	46
13.4	Caractérisation des altérations.....	47
13.5	Croiser caractérisation des matériaux et FRX.....	47
13.6	DiscoveryMat en comparaison avec FRX.....	48
<b>Conclusion .....</b>		<b>49</b>
<b>Référence et listes d'illustration.....</b>		<b>50</b>
<b>14</b>	<b>Bibliographie référencée.....</b>	<b>51</b>
<b>15</b>	<b>Bibliographie consultée .....</b>	<b>53</b>
<b>16</b>	<b>Liste des figures .....</b>	<b>56</b>
<b>17</b>	<b>Liste des graphiques .....</b>	<b>59</b>
<b>18</b>	<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>60</b>
<b>19</b>	<b>Listes des abréviations .....</b>	<b>60</b>
<b>Annexes .....</b>		<b>61</b>
<b>20</b>	<b>Glossaire .....</b>	<b>62</b>
<b>21</b>	<b>Annexe photographique .....</b>	<b>63</b>
<b>22</b>	<b>Analyse tracés DiscoveryMat .....</b>	<b>71</b>
<b>23</b>	<b>Examen FRX .....</b>	<b>103</b>
<b>24</b>	<b>Spectres FRX .....</b>	<b>110</b>
<b>25</b>	<b>Vadémécum pour la reconnaissance des alliages métalliques blancs.....</b>	<b>111</b>

## Résumé

Ce travail de Bachelor s'inscrit dans le projet de recherche « EtICAL » mené par le Docteur Christian Degriigny au sein de la division Recherche appliquée et Développement de la Haute Ecole Arc de Conservation-Restauration de Neuchâtel, sous la coordination d'Agnès Gelbert-Miermon. Ce projet a permis de créer un inventaire des alliages d'aluminium présents dans les collections patrimoniales suisses et de caractériser leurs produits de corrosion, ainsi que la validation de l'analyse par fluorescence des rayons X (FRX). Ce mémoire avait pour but de reprendre les mêmes objectifs que ceux du projet EtICAL appliqué ici aux bijoux et objets d'apparat ethnographiques. Nous nous sommes également penchés sur l'utilisation de l'outil DiscoveryMat pour ces alliages.

La comparaison des courbes d'intensité de potentiel avec la base de données DiscoveryMat, validé par l'analyse FRX, nous a permis de démontrer l'efficacité de l'outil DiscoveryMat pour la détection de différents pourcentages de silicium, ainsi que la présence de titane et de manganèse. Le manque d'informations quant aux alliages contenant du magnésium ne permet pas pour le moment de garantir une détection par l'outil DiscoveryMat. La base de données a été enrichie de seize nouveaux échantillons de référence en alliages d'aluminium. La richesse des alliages ethnographiques étant vaste, ce travail n'a pu se concentrer que sur une petite quantité d'alliages possiblement présents dans ce domaine.

Les analyses DiscoveryMat et le complément d'analyse FRX ont permis de démontrer qu'une partie des objets ethnographiques étaient réalisés directement avec de la matière première. La piste privilégiée jusque lors était le recyclage. Comme les objets susmentionnés viennent tous de commandes d'ethnologues, on peut supposer que ceux-ci apportaient la matière lors de leur mission.

Nous avons également effectué une caractérisation des produits de corrosion qui a mis en évidence la présence d'un film d'oxyde sur tous les objets, qui, en fonction de son épaisseur, modifie l'aspect visuel. Cette caractérisation a également mis en évidence que 31% des objets en alliages d'aluminium ont des produits de corrosion par piqûres. Dans l'un de ces cas, ces produits se sont généralisés et un objet qui présente de la corrosion galvanique.

Pour finir, ce travail a mis en évidence la mauvaise connaissance des alliages d'aluminium et des autres métaux blancs par les professionnels du patrimoine. Pour combler ce manque, un vademécum permettant l'identification des différents alliages a été créé.

## Summary

This Bachelor thesis is part of the research project « EtICAL » led by Dr. Chistian Degriigny within the division of Applied Research and Development of the Haute Ecole Arc de Conservation-Restauration of Neuchâtel, under the coordination of Agnès Gelbert-Miermon. This project has made it possible to create an inventory of the aluminum alloys found in the Swiss patrimonial collections and to characterize their corrosion products, as well as the validation of X-ray fluorescence analysis (XRF). The aim of this research paper was to work on the same objectives as the EtICAL project for the particular case of jewellery and ethnographical items of ceremonial. We have also examined the use of the DiscoveryMat for those alloys.

The comparison of the intensity curves of potential with the DiscoveryMat database, validated by the XRF analyses, has enabled us to validate the DiscoveryMat instrument for the detection of various percentages of silicon, as well as the presence of titanium and manganese. The lack of information regarding the alloys containing magnesium makes it impossible to guarantee their detection by the DiscoveryMat instrument for now. The database has been expanded with eighteen new samples of reference in aluminum alloys. Given the abundance of existing ethnographic alloys, we could only talk about a small quantity of them and their various possible combinations in this research paper.

The DiscoveryMat analyses completed with the XRF analyses have enabled us to demonstrate that a part of the ethnographic items was made from raw materials. The preferred way was recycling until then. The above-mentioned items have all been ordered by ethnologists; therefore, we might assume that they would bring the material during their mission.

We have also carried out a characterization of the corrosion products that allowed us to bring out the presence of an oxide film on all the items, which, depending on its thickness, changes the visual aspect of the item. This characterization has also demonstrated that 31% of the items composed of aluminum alloys have Pitting corrosion. Among these items, one presented a case of generalization of those products, and another one of galvanic corrosion.

Lastly, this research has brought to light the poor knowledge of the aluminum alloys and other white metals by the professional of the heritage. To fill this gap, a vademecum allowing the identification of the diverse alloys has been created.



## **Zusammenfassung**

Diese Bachelorabschlussarbeit ist ein Teil von dem Forschungsprojekt « EtICAL » genannt, von Doktor Christian Degriigny innerhalb des „Angewandte Forschung und Entwicklung“ Sektors der Hochschule He-Arc in Konservierung und Restaurierung in Neuchâtel, unter der Koordination von Frau Agnès Gelbert-Miermon. Dieses Projekt ließ die Erstellung einem Inventar den Aluminiumlegierungen in Sammlungen von schweizerische Kulturerbe zu und konnte ihren Korrosionsprodukten bezeichnen und die Analysen durch Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFS) entwerten. Diese Abschlussarbeit nahm die gleichen Ziele als den EtICAL Projekt aber auf die ethnographischen Schmücke und Prunkgegenstände angewandt. Wir haben uns auch auf die Benützung der DiscoveryMat Apparat interessieren.

Der Vergleich zwischen die Kurven der Potenzialstärken mit der DiscoveryMat Datenbank validiert durch die Ergebnisse der RFS Analyse erlaubten uns zu demonstrieren der Benutzung des DiscoveryMat Apparats für die Feststellung unterschiedlichen Prozentangaben von Silicium und für das Auftreten von Titan und Mangan. Informationen auf Legierungen mit Magnesium fehlen, um heutzutage eine Feststellung durch den DiscoveryMat Apparat versichern zu können. Die Datenbank ist mit achtzehn neuen aus Aluminiumlegierung Referenzprüfkörpern angereichert worden. Weil die ethnographischen Legierungen so vielfältig sind, konnte diese Arbeit nur einen kleinen Anteil der bestehenden Legierungen und ihrer verschiedenen Kombinationen anpacken.

Die DiscoveryMat Analysen und RFS Analysen ergänzen beweisen, dass ein Teil den ethnographischen Gegenständen direkt aus Urstoffe entwickelt waren. Die Haupthypothese war bis jetzt die Wiederverwertung. Alle vorbezeichneten Gegenstände sind aus Bestellungen von Ethnologen. Man konnte also vermuten, dass sie die Stoffe während ihren Missionen selber gebracht haben.

Eine Bezeichnung den Korrosionsprodukten ist auch durchgeführt worden. So konnten wir das Auftreten eines Oxidfilms auf jede Gegenstände deutlich herausstellen, der entsprechend seiner Dicke das Aussehen der Gegenstände verändert. Diese Bezeichnung stellte auch fest, dass 31% der Gegenstände aus Aluminiumlegierungen wurmlochförmige Korrosionsprodukte tragen davon ein mit flächendeckenden Produkten und ein mit galvanische Korrosion.

Zum Schluss erlaubte diese Arbeit den Nachweis der schlechten Kenntnisse der Kulturerbe Fachmänner und Fachfrauen auf den Aluminiumlegierungen und den anderen weißen Metallen. Um dieses Mangel zu abhelfen, haben wir ein Vademecum, das einer Erkennung von den verschiedenen Legierungen erlaubte, hergestellt.

## Introduction

Ce mémoire de Bachelor of Art en conservation a été réalisé en collaboration avec l'unité de Recherche Arc en Conservation-Restauration (UR-Arc CR)<sup>1</sup>, supervisé par le Docteur Christian Degriigny, professeur à la HE-Arc, et avait pour professeur référent le Docteur Régis Bertholon, responsable de la filière. Il s'inscrit dans le projet « EtICAL » qui a débuté en 2016 et avait comme objectifs un inventaire des principaux alliages d'aluminium identifiés dans les collections patrimoniales Suisse par un examen non-invasif ainsi que l'identification et la caractérisation de leurs produits de corrosion. Afin d'obtenir des objets en prêt pour l'analyse, plusieurs musées ethnographiques, historiques et d'art et d'histoire ont été contactés. Le Musée d'Ethnographie de Neuchâtel (MEN) et le Museum der Kulturen Basel (MKB) se sont montrés particulièrement intéressés par cette étude.

Durant les recherches effectuées, les chercheurs ont rencontré un cas particulier qu'ils n'ont pas eu le temps d'aborder : les objets ethnographiques et plus particulièrement les bijoux. En raison des alliages non-normés dans les pays concernés, connaître précisément leur composition peut fournir des informations importantes sur l'origine de la matière utilisée. Ce mémoire a donc pour but d'appliquer les méthodes utilisées durant le projet EtICAL à une plus petite échelle, afin de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la composition des alliages d'aluminium de bijoux et d'objets d'apparat ethnographiques ?
- Peut-on utiliser de manière suffisamment significative l'outil DiscoveryMat pour identifier les alliages d'aluminium ?
- Comment se manifestent les produits de corrosions des alliages d'aluminium? Peuvent-ils endommager les objets à long terme ?

Les réponses à ces questions seront une première ébauche scientifique. Le nombre réduits d'objets ne permettra pas d'avoir des données suffisamment significatives afin de valider l'outil DiscoveryMat et de créer un inventaire des alliages d'aluminium employés dans la composition d'objets ethnographiques. Grâce aux rapports de missions consultés, nous pouvons supposer que la matière utilisée provient d'alliages d'aluminium recyclés ou réemployés. Ils varient donc fortement en fonction de la matière première présente. Nous supposons également, en raison de l'étude de diagrammes de Pourbaix, que l'outil DiscoveryMat est exploitable pour les alliages d'aluminium. Et en vue de la sérénité des professionnels du patrimoine au sujet des produits de corrosion de l'aluminium, nous pouvons imaginer que ceux-ci seront peu présents et n'endommagerons pas les valeurs des objets.

---

<sup>1</sup> Les abréviations sont définies à la première occurrence. La liste complète se trouve p. 61.

## **Partie I : Présentation des collections étudiées et du matériau aluminium**

Tout d'abord, ce chapitre expose les critères de sélection ainsi que les collections étudiées. Suit une présentation de l'aluminium par son historique, ces caractéristiques ainsi que ces produits de corrosions.

## 1 Critères de sélection :

Afin de sélectionner les objets pour l'étude, il a fallu définir des critères de sélection. Ceux-ci devaient être assez ouverts, car le nombre d'objets en aluminium présent dans les collections ethnographiques des musées contactés est peu élevé. Voici les critères :

- Contient de l'aluminium
- Intérêt des musées pour un objet ou une collection en particulier
- 2<sup>ème</sup> partie du 20<sup>ème</sup> siècle
- Bijou ou objet d'apparat
- Provenance : Afrique ou Amérique du Sud (relation missionnaire et pays en voie de développement)
- Trace d'oxydation, présence de dépôts exogènes ou déformation

## 2 Les collections étudiées

Le MEN ainsi que le MKB ont accepté d'effectuer un prêt d'objets à la HE-Arc. Deux collections prêtées par le MEN sont issues d'enquêtes ethnographiques menées par Jean Gabus en 1971 et 1976<sup>2</sup> (Figure 1 et Figure 40 à Figure 61, en annexe p.63 à 65). La méthode de fabrication a été richement documentée et ils ont souvent été commandés directement au bijoutier<sup>3</sup>. Les valeurs associées aux collections de M. Gabus ont avant tout une valeur de recherche et également une valeur sentimentale. En effet, cet ethnologue a effectué de multiples missions pour le MEN et a ramené plusieurs objets lors de ses missions. La valeur affective vient de l'attachement pour M. Gabus, qui fut un directeur marquant pour le musée.



Figure 1 : Une partie de la collection du MEN rapportée par Jean Gabus, ©C. Despland, HE-Arc

Une autre collection est prêtée par le MEN. Celle-ci provient d'une donation de 2010 d'une collectionneuse neuchâteloise, Véronique Gass (Figure 62 à Figure 77, en annexe p.66 à 67). Peu de documentations existent sur l'histoire de ces objets. Cependant, lors du recollement effectué au musée, une partie métallique de plusieurs bracelets a clairement été identifiée comme étant en aluminium. Cette collection possède une valeur sentimentale, due à la donation de cette femme, mais également une grande valeur esthétique.

---

<sup>2</sup> Gabus Jean, 1982, p.5.

<sup>3</sup> Gabus Jean, 1976, p.42.

Dix objets ont été prêtés par le MKB, neuf bijoux et un poignard d'apparat (Figure 2 et Figure 79 à Figure 100, en annexe p.68 à 70). Il y a trois tors provenant du Brésil, trois bracelets venant de Zambie, deux bracelets et un collier venant d'Afrique du Sud ou du Mozambique et un poignard venant du Cameroun, mais comme il y a peu d'informations sur ces objets dans les documentations du MKB, leur provenance n'est parfois pas certaine. Tous ces objets proviennent de collections et de régions différentes. Ils ont donc des valeurs différentes qu'une collection complète. Ils ont une valeur de recherche de par leur composition en alliage d'aluminium, et une valeur artistique de par leurs décorations.



Figure 2 : Objets en aluminium provenant du MKB.  
©C. Despland, HE-Arc

### 3 Technologie de fabrication



Figure 3 : Dessin d'un bijoutier du Sahel par Hans Erni, ©Gabus Jean, 1982

Dans la région du Sahel, d'où provient la majorité des bijoux étudiés, il y a une grande tradition autour de la métallurgie qui diffère en fonction du mode de vie des peuples. Nous parlons de forgerons, car ceux-ci sont réputés pour tout faire : les bijoux, les armes, les portes, etc. Ils sont donc polyvalents, ce qui est fort utile pour s'adapter à la matière première présente.<sup>4</sup> Il faut également savoir qu'une méthode de fabrication (Figure 3) se répand grâce aux types d'objets présents. Il arrive souvent que ces objets soient implantés dans une région longtemps avant la méthode de fabrication qui en découle. L'aluminium utilisé provient donc probablement d'activité de récupération d'objets laissés sur place par des missionnaires ou de prédation sur des panneaux de signalisation routière.<sup>5</sup>

Les autres régions d'où proviennent les objets ont des méthodes de fabrications similaires. Nous n'aborderons pas ici la particularité de chaque région d'origine des objets étudiés.

<sup>4</sup> Gabus Jean, 1982, p.45.

<sup>5</sup> Romainville Michel, 2011 [En ligne].

## 4 L'aluminium

### 4.1 Historique

L'exploitation de l'aluminium peut se séparer en deux grandes parties. La première avant 1886, où l'extraction de l'aluminium était onéreuse et le métal était utilisé pour des objets de luxe. La seconde après 1886, avec l'invention du procédé par électrolyse qui rend sa production bon marché. Les différentes étapes de l'histoire de l'aluminium sont décrites dans le tableau ci-dessous (Tableau 1):

Tableau 1 : Histoire de l'aluminium<sup>6</sup>

1807	Découverte de l'aluminium par Humphrey Davy.
1807-1854	Recherche par différents scientifiques pour isoler l'aluminium du minerai d'alumine (présent dans la bauxite).
<b>1854</b>	Premier procédé de production de l'aluminium élaboré par le français Henri Sainte-Claire Deville.
1855	Présentation au public de l'aluminium lors de l'exposition universelle de Paris.
<b>1886</b>	Invention d'un nouveau procédé d'extraction de l'aluminium par électrolyse par le français Paul Héroult et l'américain Charles-Martin Hall au même moment. Cette invention permet une extraction de l'aluminium bon marché.
1887	Ouverture, en Suisse, de la première usine utilisant ce procédé
1888	Déposition simultanée du brevet du procédé d'extraction par électrolyse de l'aluminium par Héroult en France et Hall aux États-Unis
1889	Agrandissement de l'usine en France voisine (SMS).
1898	Production suisse d'aluminium en excès. Proposition de ce nouveau métal à l'armée qui l'accueille avec enthousiasme et débouche sur un nouveau marché.
1908	Le brevet Héroult-Hall devient public et exploité dans cinq usines françaises
1908	Découverte du Duralumin <sup>*7</sup> par l'Allemand Alfred Wilm
1914-1918	Essor de l'aluminium pendant la Première Guerre mondiale
1923	Découverte de la protection de l'aluminium par oxydation anodique, ainsi que le dépôt d'un brevet par Alcoa pour la coloration de l'aluminium par oxydation anodique.
1932	Mise au point du raffinage électrolytique industriel de l'aluminium.
1939-1945	Deuxième guerre mondiale, grande exploitation de l'aluminium dans l'aviation.
2018	Le procédé d'extraction de l'aluminium n'a pas changé depuis 1886, il s'est amélioré sans changer ses bases.

<sup>6</sup> F. Hachez-Leroy, 2007. P.29-31.

<sup>7</sup> Les mots suivis d'une « \* » sont expliqués dans le glossaire, p.62.

## 4.2 Procédé Héroult-Hall

L'aluminium n'existe pas à l'état pur dans la nature, mais sous forme d'oxyde mêlé à d'autres éléments comme l'oxygène et le silicium. Pour l'extraire, un procédé d'électrolyse a été mis au point par Hall et Héroult, simultanément et séparément. Ce procédé ne permet pas d'obtenir un aluminium pur, mais un alliage d'aluminium avec des traces de silicium et de fer. Cet alliage est considéré comme « propre ».

## 4.3 Caractéristiques de l'aluminium

L'aluminium pur est un métal blanc argenté très réfléchissant. Il est connu pour sa résistance à la corrosion, grâce à la formation d'un film d'oxydation uniforme, et sa légèreté. C'est un bon conducteur thermique et électrique, mais il n'est pas magnétique. L'aluminium a vite été associé à d'autres métaux afin de lui conférer de nouvelles propriétés. Par exemple, l'ajout de manganèse, cuivre et/ou zinc augmente la résistance mécanique, alors que l'ajout de magnésium et/ou de silicium le rend plus résistant face à la corrosion.<sup>8</sup> Les alliages les plus couramment utilisés sont présents dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 : Alliages d'aluminium les plus courants<sup>9</sup>

Type d'alliage	Composition	Caractéristiques
Duralumin	2.5 - 5.5% Cu 0.5 - 2% Mg 0.5 - 1% Mn 0.2 - 1% Si	Très solide
Skleron	12% Zn 3% Cu 0.5% Mn Trace de Fe, Si, Li	Très dur
Hydronalium	3 - 12% Mg	Bonne résistance à l'eau salée
Magnalium	10 - 30% Mg	
Silumin	12 - 14% Si	

---

<sup>8</sup> Selwyn L., 2004. P.48.

<sup>9</sup> Aluminium Association, 1998.

En dehors de ces alliages nommés, l'Aluminium Association (AA) a choisi de créer des classements pour les alliages d'aluminium corroyés et coulés, en attribuant un numéro AA unique et un numéro UNS en fonction de la composition d'alliage. Le premier chiffre AA ainsi que les seconds chiffres (UNS) sont attribués en fonction des principaux éléments constituant l'alliage (Tableau 3 et Tableau 4). Les autres chiffres sont donnés en fonctions des caractéristiques secondaires.

Tableau 3 : Alliages d'aluminium corroyés<sup>10</sup>

Alliages d'aluminium corroyés	Intervalle de concentration	Numéro AA	Numéro UNS
Aluminium	≥99.00% mass. aluminium	1xxx	A91xxx
Aluminium + cuivre	1-6% mass. cuivre	2xxx	A92xxx
Aluminium + manganèse	0.5-1.5% mass. manganèse	3xxx	A93xxx
Aluminium + silicium	5-12% mass. silicium	4xxx	A94xxx
Aluminium + magnésium	0.5-5% mass. magnésium	5xxx	A95xxx
Aluminium + (magnésium et silicium)	0.5-5% mass. magnésium 0.5-5% mass. silicium	6xxx	A96xxx
Aluminium + zinc	3-7% mass. zinc	7xxx	A97xxx

Tableau 4 : Alliages d'aluminium coulés<sup>11</sup>

Alliages d'aluminium coulés	Intervalle de concentration	Numéro AA	Numéro UNS
Aluminium	≥99.00% mass. aluminium	1xx.x	A01xxx
Aluminium + cuivre	4-8% mass. cuivre	2xx.x	A02xxx
Aluminium + silicium + (cuivre ou magnésium)	5-22% mass. silicium 0.5-4.5% mass. cuivre 0.3-1% mass. magnésium	3xx.x	A03xxx
Aluminium + silicium	5-12% mass. silicium	4xx.x	A04xxx
Aluminium + magnésium	4-10% mass. magnésium	5xx.x	A05xxx
Aluminium + zinc	3-7% mass. zinc	6xx.x	A07xxx
Aluminium + étain	6% mass. étain	7xx.x	A08xxx

<sup>10</sup> Selwyn L., 2004. P.48.<sup>11</sup> Selwyn L., 2004. P.48.



#### 4.4 Corrosion de l'aluminium

Tableau 5 : Potentiel de corrosion\* de différents métaux<sup>12</sup>

Or	+1.45 V	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Cathodique ou noble</div> <div style="margin: 0 10px;">↑</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Anodique</div> </div>
Platine	+1.2 V	
Mercure	+0.850 V	
Argent	10.794 V	
Cuivre	+0.337 V	
Plomb	-0.126 V	
Etain	-0.14 V	
Nickel	-0.23 V	
Cadmium	-0.402 V	
Fer	-0.440 V	
Zinc	-0.763 V	
Aluminium	-1.66 V	
Magnésium	-2.371 V	

L'aluminium est un métal dont le potentiel de corrosion est relativement bas (Tableau 5), c'est pour cela que sa surface, au contact de l'air, se passive\* rapidement et forme un film d'oxydation. Celui-ci agit comme une protection face à la corrosion. Il a été observé que cette couche grandissait avec le temps en fonction de l'environnement. En dehors de ce film, la corrosion de l'aluminium peut être présente sous forme de piqûres ou de corrosion filiformes. Cela se produit généralement soit lorsque le film d'oxydation n'est pas homogène et présente des défauts, soit lorsqu'un revêtement de protection a été mal appliqué à la surface.

La réaction d'oxydoréduction qui entraîne la corrosion de l'aluminium le fait passer d'un état neutre à un état d'oxydation +3. En fonction des polluants présents dans l'air ou des dépôts à la

surface, l'aluminium peut prendre diverses formes d'oxyde (Tableau 6).

Tableau 6 : Minéraux d'aluminium et produit de corrosion<sup>13</sup>

Nom chimique	Nom minéral	Formule chimique	Couleur
Oxyde d'aluminium (III) (alumine)	-	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Blanc
Hydroxyde d'aluminium (II)	Bayerite	$\text{Al}(\text{OH})_3$ (ou $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )	Blanc
Hydroxyde d'aluminium (III)	Gibbsite (ou hydrargillite)	$\text{Al}(\text{OH})_3$ (ou $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )	Blanc
Hydroxyde et oxyde d'aluminium (III)	Boehmite	$\text{AlO}(\text{OH})$	Blanc
Chlorure d'aluminium (III) hexahydraté	Chloraluminite	$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Blanc

<sup>12</sup> Selwyn L., 2004. P.31.

<sup>13</sup> Selwyn L., 2004, p.50.




## **Partie II : Méthodologie**

Ce chapitre aborde la méthodologie employée pour l'observation des matériaux, pour les analyses DiscoveryMat et FRX ainsi que pour la caractérisation des altérations.

## 5 Caractérisation sensorielle du matériau

L'aluminium peut être reconnu grâce à un examen visuel accompagné par une brève recherche historique ainsi que l'utilisation d'autres sens. Afin de déterminer si les objets prêtés étaient bien en aluminium, une série de critères ont été établie selon ces caractéristiques<sup>14</sup>. Ils sont exposés ci-dessous (Tableau 7) :

Tableau 7 : Critères visuels d'identification de l'aluminium

Critère visuel	Définition	Remarque	Image
Aspect « blanc »	L'aluminium a un aspect blanc reconnaissable.	Peut être confondu avec du zinc.	 <p>Figure 4 : Aspect blanc de l'aluminium, ©C. Despland, HE-Arc</p>
Aspect dans les rayures	L'aluminium étant un métal qui se passive rapidement à l'oxygène, chaque impact de surface va réagir rapidement. Les rayures n'auront donc pas un aspect plus éclatant que le reste de la surface.		 <p>Figure 5 : Aspect dans les rayures, ©C. Despland, HE-Arc</p>
Produit de corrosion	L'aluminium a des produits de corrosion blancs, si ceux-ci sont rouges ou verts, cela l'élimine.	Si un objet est composé de plusieurs métaux, il peut y avoir de la corrosion galvanique à la surface d'aluminium.	 <p>Figure 6 : Produit de corrosion de l'aluminium généralisé, ©C. Despland, HE-Arc</p>

<sup>14</sup> Selwyn L., 2004, p.47 à 54.

L'examen visuel sera réalisé dans un premier temps à l'œil nu afin de déterminer l'aspect général des objets, ainsi que la présence ou non de produits de corrosion. Dans un second temps, chaque objet sera photographié sous différents angles, afin de servir de base documentaire et permettre la localisation des futures analyses. Tous les objets seront ensuite observés sous loupe-binoculaire (modèle : fiberoptic-heim LQ1600) afin de confirmer et de préciser les premières appréciations obtenues à l'œil nu. Finalement, des photographies seront prises sous loupe-binoculaire ou sous microscope électronique (Olympus®; modèle : Opto-digital Microscope DSX 100), ce dernier permettant un plus grand grossissement que sous loupe-binoculaire. Par rapport à un microscope optique, le microscope électronique permettra d'obtenir des images nettes sur plusieurs profondeurs de champs et de pouvoir comparer l'aspect à l'intérieur des griffures avec la surface au bord de celles-ci.

Suite à cette observation, un autre examen élémentaire ainsi qu'une brève recherche documentaire seront réalisés afin de confirmer les appréciations de l'observation selon les critères<sup>15</sup> présents ci-dessous (Tableau 8):

Tableau 8 : Autres critères d'identification

<b>Autres critères d'identification</b>	<b>Définition</b>	<b>Remarques</b>
Le poids (léger)	La densité de l'aluminium étant de 2.7 gr/cm <sup>3</sup> , les objets sont très légers pour leur volume.	Critère utilisable uniquement sur un objet non composite
Date de fabrication	Objet du quotidien et ethnographique non réalisé avant 1887.	Objet de luxe réalisé dès 1854

---

<sup>15</sup> Selwyn L., 2004, p.47 à 54.

## 6 L'outil DiscoveryMat

L'application DiscoveryMat permet de déterminer de manière qualitative la composition de certains matériaux métalliques, par comparaison des tracés de leurs potentiels de corrosion en fonction du temps dans trois solutions (solution KNO<sub>3</sub> (1% w/v), solution de sesquicarbonate (1% w/v) et de l'eau minéral, en l'occurrence Evian) à ceux de matériaux de composition connue constituant la base de données de l'application. Ce « spot-test », légèrement invasif, ne fonctionne que sur des métaux peu oxydés, requérant un polissage de surface minimal. Aussi, DiscoveryMat est particulièrement adapté à l'analyse des objets historiques base cuivre. Plus récemment il a été déployé sur les alliages d'aluminium.

### 6.1 Matériel

Le matériel utilisé pour cette analyse est représenté ci-dessous (Figure 7). Il consiste en un outil de mesure (électrode de référence Ag-AgCl dans sa rallonge, permettant d'éviter une pollution de la solution test<sup>16</sup>), un voltmètre permettant d'afficher les potentiels mesurés (METRIX®<sup>17</sup> piloté par un ordinateur) et un ordinateur. Une goutte d'électrolyte (solution testée) est déposée entre l'extrémité de la rallonge et la surface du métal à analyser, connectée comme l'électrode de référence au voltmètre.

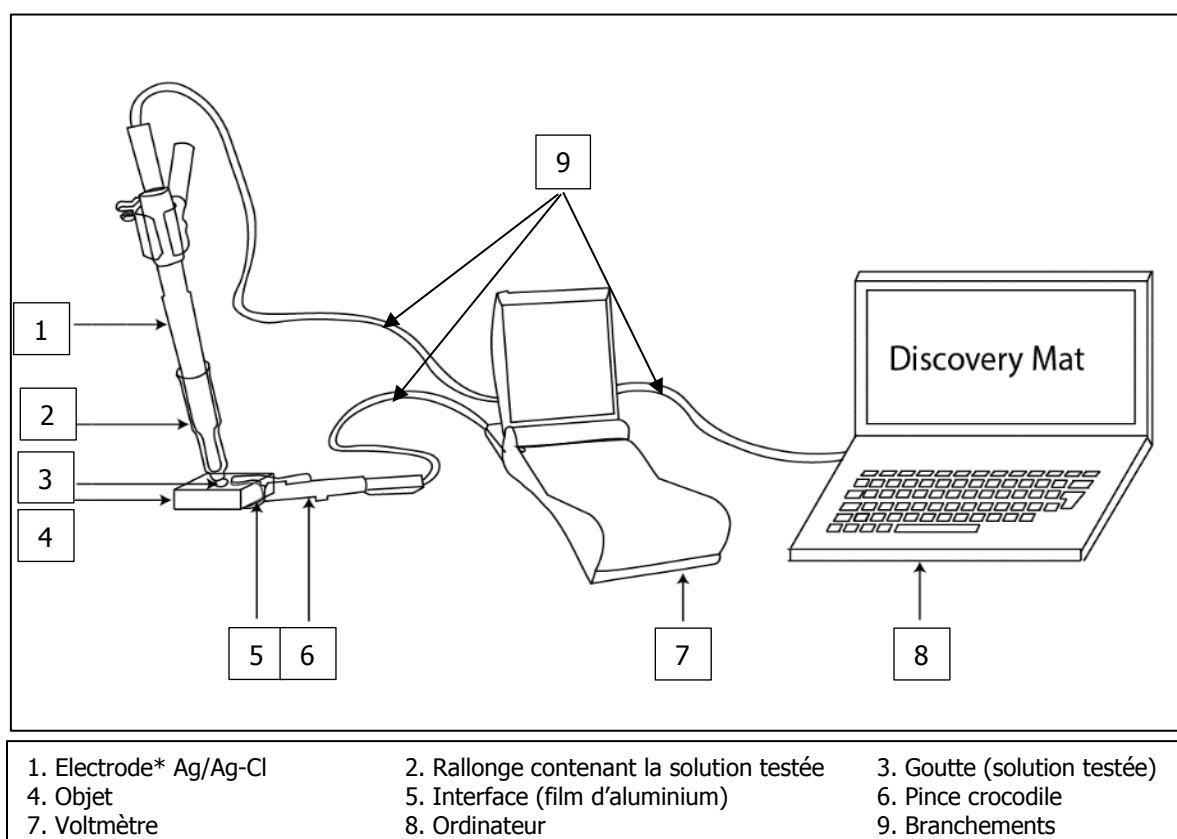


Figure 7 : Schéma représentant le matériel utilisé pour l'analyse DiscoveryMat, ©C. Despland, HE-Arc

<sup>16</sup> L'électrode de référence de marque Metrohm contient du KCl qui peut migrer au travers de la membrane poreuse dans la solution test. La rallonge contenant la solution test permet de ralentir ce phénomène.

<sup>17</sup> MTX3282-BT.

Le matériel DiscoveryMat est peu onéreux car l'électrode de référence est un consommable de base en électrochimie. Seul le multimètre coûte assez cher (environ 1000CHF) mais les dernières optimisations de la technique permettent d'espérer de lire le potentiel mesuré sur un voltmètre plus basique via une webcam. Le faible coût du matériel et sa facilité d'emploi en font un outil adapté aux besoins des conservateurs-restaurateurs.

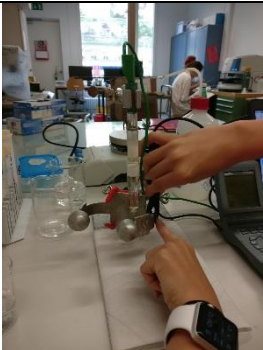
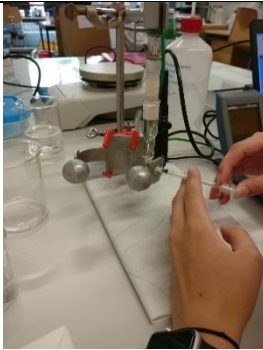
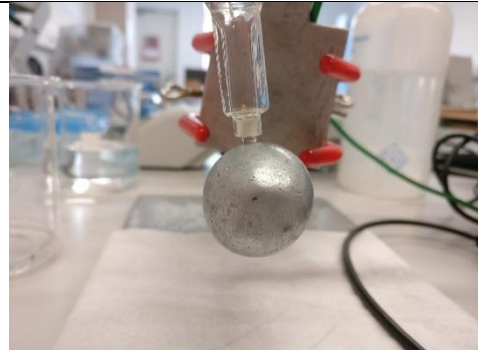
## 6.2 Protocole de mesure

Afin de disposer d'un outil fiable et d'avoir des mesures exploitables, les mesures sont réalisées en suivant un protocole bien précis<sup>18</sup> décrit dans le tableau ci-dessous (Tableau 9):

Tableau 9 : Description des étapes pour l'analyse DiscoveryMat

Etapes	Description
Etape 1	<b>Vérification de la fiabilité de l'électrode de référence</b> à l'aide d'une autre électrode de référence identique et servant à vérifier le bon fonctionnement de l'électrode de mesure. Les deux électrodes sont immergées dans de l'eau de ville et connectées à un voltmètre. La mesure de la différence de potentiel doit être inférieure à 0.010V pour que l'électrode de mesure soit considérée comme fiable.
Etape 2	<b>Réalisation de la solution</b> , remplissage de la rallonge l'allonge avec celle-ci et insertion de l'électrode de référence testée à l'étape 1 dans la rallonge (le capuchon fermant le tube de l'électrode doit être ouvert). 20 minutes sont alors nécessaires avant que le système obtenu soit stable.
Etape 3	<b>Réalisation d'une documentation photographique</b> de la surface analysée afin de documenter l'état avant analyse.
Etape 4	<b>Exécution d'un léger polissage</b> de la surface d'environ 5mm sur 5mm sous eau de ville avec un papier Emeri de granulométrie 4000.
Etape 5	<b>Connexion de l'électrode de référence et de l'objet (via une pince crocodile) au voltmètre.</b> La connexion sur l'objet se fait via une pince crocodile, la surface de l'objet étant protégée par une feuille d'aluminium évitant tout risque de rayure (Figure 8). Le voltmètre est piloté par l'ordinateur et la différence de potentiel y est lue via l'application DiscoveryMat.

<sup>18</sup> Degriigny C. et al., 2010, p.245-235.

	   <p>Figure 8 : Positionnement de la pince crocodile, ©C. Degrigny, HE-Arc</p> <p>Figure 9 : Insertion de la goutte, ©C. Degrigny, HE-Arc</p> <p>Figure 10 : Visualisation de la goutte, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>
Etape 6	<b>Application d'une goutte de 20µL</b> d'une des trois solutions à l'aide d'une seringue entre la surface de l'objet et l'extrémité de la rallonge (Figure 9 et Figure 10).
Etape 7	<b>Lancement de la mesure du potentiel de corrosion avec l'application DiscoveryMat dès l'application de la goutte.</b> Plusieurs mesures sont effectuées sur 5 minutes afin de valider leur reproductibilité et une mesure sur 15 minutes est finalement réalisée permettant de mieux apprécier le comportement électrochimique du matériau étudié en contact avec la solution testée.
Etape 8	<b>Répétitions des étapes 4 à 7</b> avec les deux autres solutions.
Etapes 9	Une fois les trois tracés de 15 minutes obtenus pour les trois solutions, ceux-ci sont <b>comparés aux tracés équivalents des matériaux de la base de données via DiscoveryMat.</b> La comparaison tient compte de la courbure et du gradient des tracés au démarrage de la mesure et des valeurs de potentiel en fin de mesure. Une distance de similarité entre les tracés du matériau étudié et ceux des matériaux de la base de données est calculée permettant de classer ces derniers, du matériau le plus probable (distance la plus faible) à celui le moins probable (distance la plus forte). La comparaison se fait également par l'observation visuelle du parallélisme entre les tracés du matériau étudié et des matériaux de la base de données.

## 6.3 Limites de l'outil

### 6.3.1 Caractère invasif

Le polissage de surface est nécessaire avant chaque prise de mesure et est réalisé en priorité sur des zones peu ou non-visibles. Cependant, il n'est pas toujours possible de trouver une telle zone et l'utilisation de l'outil devient donc exclue.

### 6.3.2 Choix des solutions testées

Le diagramme de Pourbaix simplifié de l'aluminium (Figure 11) indique que sur la base du pH des solutions tests retenues, seule la solution de sesquicarbonate de sodium devrait provoquer la corrosion du métal. Mais si la couche d'oxyde superficielle est dissoute et que des ions  $\text{AlO}_2^-$  sont mis en solution, le domaine de corrosion diminue (passage de la verticale avec indication -6 à la verticale avec indication -4 (Figure 11)). De ce fait le métal devrait se retrouver petit à petit dans une zone de passivation (Figure 11 et Figure 12, agrandissement du domaine de passivation évoqué par les flèches).

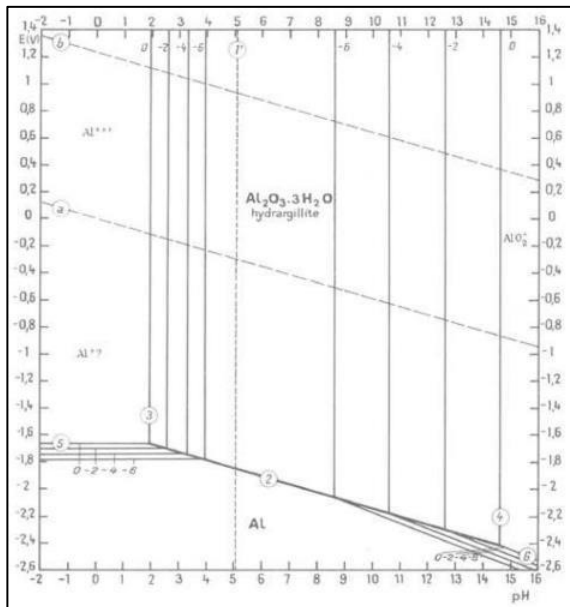


Figure 11 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium, ©Atlas de Pourbaix

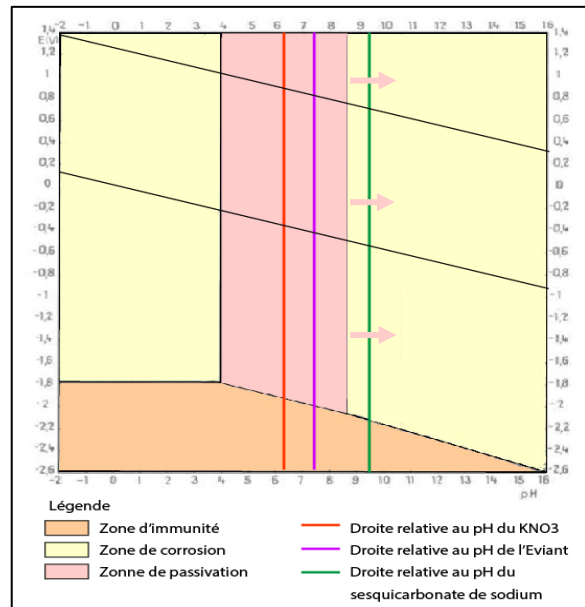


Figure 12 : Diagramme de Pourbaix simplifié de l'aluminium avec représentation des solutions utilisées, ©C. Despland, HE-Arc

## 6.4 Adaptation de l'application aux alliages d'aluminium

La base de données pour les alliages d'aluminium a été créée par Christian Degriy, chef du projet EtICAL. Dans le cadre de ce travail, nous avons exploité cette base de données afin de tenter d'identifier des objets prêtés pour cette étude et se passer ainsi de l'analyseur FRX. Lorsqu'aucune correspondance n'a été trouvée entre les tracés des objets et ceux des matériaux de la base de données, nous avons réalisé une analyse FRX des objets testés permettant d'inclure les matériaux de ces objets dans la base de données afin de l'enrichir. Une fois la base de données validée pour les alliages d'aluminium, elle sera gratuitement accessible via l'application.



## 7 La fluorescence des rayons X

Dans ce chapitre seront abordés les principes de base du fonctionnement de l'analyse par fluorescence des rayons X (FRX). Ces principes sont importants pour comprendre le fonctionnement de l'appareil FRX portable et pouvoir lire correctement les spectres résultants. Mais il est également important de comprendre la fluorescence, qui est « *l'émission lumineuse provoquée par diverses formes d'excitation autres que la chaleur* »<sup>19</sup>. L'analyse par fluorescence des rayons X (FRX) est une analyse élémentaire non-invasive et non destructive qui fournit un résultat quantitatif de la composition de l'alliage en un point.

### 7.1 Principe physique de la fluorescence à rayons X

L'analyse élémentaire par fluorescence de rayons X fonctionne grâce à la génération d'un faisceau d'excitation primaire à l'aide d'un tube à rayons X (Figure 13). Dans ce tube, un courant à haute tension accélère les électrons émis par une cathode\*, qui vont ensuite percuter une cible de l'autre côté du tube (anode\*). Cela génère des rayons X par rayonnement de freinage du métal de composition de l'anode<sup>20</sup>. Ce faisceau primaire\* de photons est projeté sur la surface d'un objet à analyser. Les rayons

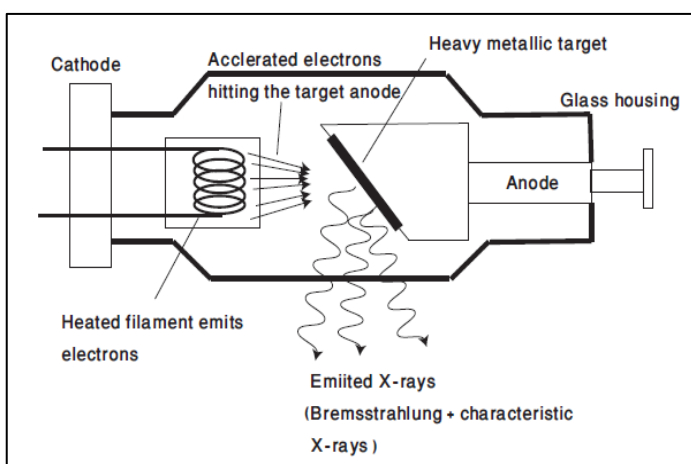


Figure 13 : Schéma simplifié d'un tube générateur de rayons X, © Asma Khalide an all, 2011

X pénètrent alors la matière et interagissent avec elle. Il en résulte différents types d'interaction : **l'effet Photoélectrique ou de fluorescence X ; électrons Auger et les rayons rétrodiffusés**. Ces interactions donnent des informations sur la composition matérielle.<sup>21</sup>

### 7.2 Fonctionnement de l'appareil FRX portable

L'analyse FRX se fait à l'aide de l'excitation de la matière par un faisceau de photons X de forte énergie et faible longueur d'onde. L'appareil utilisé au sein de l'UR-Arc CR est un Niton<sup>®</sup> XL3t. Le rayonnement est créé à l'intérieur du tube avec un filament d'argent, qui correspond à l'anode. Les photons vont ensuite exciter la matière rencontrée et vont provoquer un arrachement des électrons des couches internes des atomes. Ceci va créer, lors de la désexcitation de l'atome, le faisceau secondaire qui contient des photons caractéristiques. Ce faisceau est pluridirectionnel et va être en partie capté par la fenêtre du détecteur qui est un monocristal de silicium. Ce détecteur transforme les impacts reçus en

<sup>19</sup> Locquet, Nathalie, 2018.

<sup>20</sup> Asma Khalid, Aleena Tasneem Khan and Muhammad Sabieh Anwar, 2011 [en ligne].

<sup>21</sup> Ibidem.

impulsions électriques qui sont dirigées vers un analyseur multicanal afin de les transcrire sous forme de raies sur le spectre d'émission FRX.

### 7.3 Procédé



Figure 14 : Enceinte d'analyse FRX et visuel de l'exploitation par ordinateur, ©C. Despland, HE-Arc

Lors de l'analyse grâce à l'appareil FRX portable, nous pouvons utiliser plusieurs modes. Le projet EtICALI a permis de définir quel était le mode le plus adapté pour l'identification des alliages d'aluminium. Ici, nous utiliserons donc le mode « generals metals » sur une durée totale de 60secondes (20 secondes par spectre).



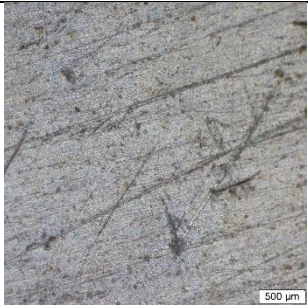
En vue de la taille relativement restreinte des objets analysés, nous avons choisi d'effectuer les analyses dans une enceinte pour tous les bijoux (Figure 14). Ceci a également été motivé par le confort lors de la prise de mesure et de la sécurité supplémentaire qu'elle apporte. Pour le poignard, l'enceinte ne pourra être utilisée en raison des dimensions trop grandes, les mesures seront donc réalisées sans.

Les analyses seront réalisées en trois endroits minimum par objets, ceci afin de déterminer si la composition de l'alliage est similaire pour l'ensemble de l'objet et afin d'écarter une potentielle erreur.

## 8 Caractérisation des altérations

L'examen visuel permettant la caractérisation des altérations s'est déroulé selon le même procédé que pour déterminer la présence d'aluminium. Une sélection d'altérations a été réalisée grâce aux constats d'état rédigés au sein des musées. Les trois altérations retenues sont décrites ci-dessous (Tableau 10):

Tableau 10 : Altérations physiques de l'aluminium

Altérations physiques	Définition	Remarques	Image
Dépôt exogène	Dépôt de nature autre que l'objet présent à la surface de l'objet.	Peut être localisé ou généralisé	 <p>Figure 15 : Dépôt exogène, ©C. Despland, HE-Arc</p>
Déformation	Modification de la forme par rapport à celle d'origine		 <p>Figure 16 : Déformation de la partie en aluminium, ©C. Despland, HE-Arc</p>
Traces d'usures	« Altération de la surface sous l'effet d'un usage ou d'un frottement prolongé ou répété » <sup>22</sup>	Peut être localisé ou généralisé	 <p>Figure 17 : Traces d'usures, ©C. Despland, HE-Arc</p>

<sup>22</sup> Gouvernement du Québec, 2018 [En ligne].


Au niveau des altérations chimiques, nous nous sommes concentrés ici sur les différentes formes de corrosions que pouvait prendre l'aluminium. Quatre formes de corrosion ont été retenues et sont décrites dans le tableau ci-dessous (Tableau 11) :

Tableau 11 : Altérations chimiques de l'aluminium

<b>Altération chimique</b>	<b>Définition</b>	<b>Remarques</b>	<b>Image</b>
Film uniforme d'oxydation	Film d'oxydation uniforme formé à la surface d'objets en aluminium	Pour caractériser cette corrosion, deux échelles ont été créées durant le projet EtICAL (Tableaux 11 et 12)	
Corrosion par piquûre	<i>« Corrosion ponctuelle qui cause la formation de cavités ou de piquûres à la surface du métal »<sup>23</sup></i>	La corrosion peut être localisée ou généralisée	 <p>Figure 18 : Produit de corrosion de l'aluminium généralisé, ©C. Despland, HE-Arc</p>
Corrosion filiforme	<i>« Corrosion qui se développe sous le revêtement organique de métaux comme l'aluminium ou comme le fer et qui se manifeste sous forme de fins filaments »<sup>24</sup></i>	La corrosion peut être localisée ou généralisée	 <p>Figure 19 : corrosion filiforme sur une parure de culte vaudou, Bénin, 1920-1940, Musée Africain de Lyon, ©L. Antoine</p>

<sup>23</sup> Selwyn L., 2004. P.213.

<sup>24</sup> Ibidem, P.212.

Corrosion galvanique	« Corrosion accélérée d'un métal mis en contact électrique avec un métal plus noble (ou un conducteur non métallique) dans un électrolyte » <sup>25</sup>	La corrosion peut être localisée ou généralisée	 <p>Figure 20 : Corrosion galvanique aluminium acier, ©Aluconsult</p>
----------------------	---	---	--

En fonction de la complexité des produits de corrosion observée, l'utilisation d'une stratigraphie graphique sera envisageable pour en faciliter la description.

Le tableau 12 expose l'échelle qui a permis de déterminer l'aspect de surface ainsi que les échantillons retenus lors du projet EtICAL<sup>26</sup> et le tableau 13 expose l'échelle de valeurs utilisée pour déterminer le niveau de ternissement des objets.

Tableau 12 : Aspect de surface de l'aluminium









Brillant	Satiné	Mat-Satiné	Mat
 <p>Figure 21 : Aspect brillant, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>	 <p>Figure 22 : Aspect satiné, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>	 <p>Figure 23 : Aspect mat-satiné, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>	 <p>Figure 24 : Aspect mat, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>

Tableau 13 : Echelle de valeurs

Clair	Gris clair	Gris foncé	Gris très foncé
 <p>Figure 25 : Valeur la plus claire, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>	 <p>Figure 26 : Valeur légèrement plus foncée, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>	 <p>Figure 27 : Valeur plus foncée, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>	 <p>Figure 28 : Valeur la plus foncée, ©C. Degrigny, HE-Arc</p>

<sup>25</sup> Selwyn L., 2004. P.212.

<sup>26</sup> Degrigny, EtICA, 2018, p.25-35.

## **Partie III : Résultats des observations et analyses**

Dans ce chapitre seront abordés les diverses observations ainsi que les résultats obtenus. Seront également mentionnées les observations des tracés d'intensité de potentiel et les caractérisations spécifiques à la composition des alliages.

## 9 Identification d'aluminium

L'observation a permis d'identifier les objets étant en aluminium et ceux ne l'étant pas. Pour les objets n'étant pas composés d'aluminium, la présence de produit de corrosion rouge ou vert a permis rapidement de les écarter. L'aspect de surface et le poids ont permis d'identifier un objet composé uniquement d'argent. Les résultats obtenus par l'examen visuel et sensoriel sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 14) :

Tableau 14 : Résultats des examens sensoriels

Critères	Objets
Objets composés d'alliage d'aluminium	71.6.151 ; 71.6.152 ; 71.6.254 ; 71.6.255 ; 71.6.257 ; 71.6.258 ; 71.6.259 ; 71.6.260 ; 71.6.261 ; 76.2.13.a ; 76.2.13.b ; 76.2.14.a ; 76.2.14.b ; objet TJA ; III 22988 ; III 22989 ; III 23119 ; III 23426 ; III 25730 ; IVc 11021 ; IVc 11022 ; IVc 11023
Objets composés d'alliage ferreux	71.6.322 ; III 23242 ; III 23425 ;
Objets composés d'alliage ferreux ou cuivre	09.26.2 ; 09.26.3 ; 09.26.4 ; 09.26.5 ; 09.26.26 ; 09.26.28 ; 09.26.29 ; 09.26.34
Objets argentifères	71.6.191

## 10 Analyse DiscoveryMat des objets sélectionnés : problèmes rencontrés et résultats

### 10.1 Sélection des objets pour l'analyse DiscoveryMat

Lors de différents entretiens avec les responsables du MEN et du MKB, nous avons obtenu leur accord pour effectuer des analyses légèrement invasives sur certains objets. La sélection d'objet s'est effectuée en collaboration avec les institutions afin de savoir sur quels objets nous avons la possibilité d'effectuer l'analyse en un point discret. Le polissage a été réalisé la plupart du temps à proximité du numéro d'inventaire et parfois à la place de celui-ci, qui a été réinscrit après.

### 10.2 Problèmes rencontrés

Lors des analyses, nous avons à plusieurs reprises fait face à un problème au niveau de la prise de mesures. En effet, les données mesurées avec le voltmètre étaient chaotiques et donnaient des tracés inexploitable (Figure 29).

Afin de déterminer la source du problème, nous avons envisagé plusieurs pistes que nous avons explorées. Le tableau 15 récapitule l'origine éventuelle du problème, les moyens de correction déployés et les résultats obtenus.

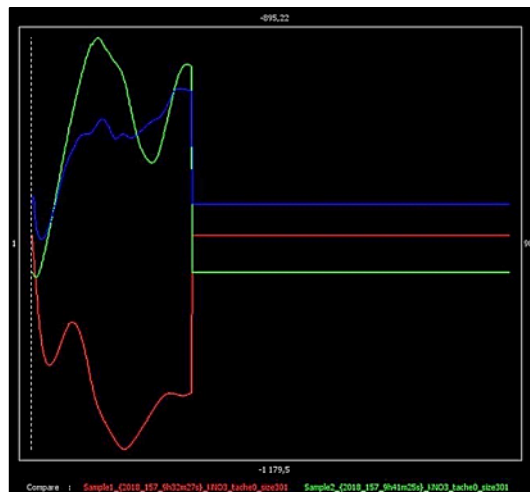


Figure 29 : Exemples de tracés chaotiques de suivi du potentiel de corrosion en milieu KNO<sub>3</sub>, ©C. Despland, HE-Arc

Tableau 15 : Récapitulatif des sources probables entraînant les erreurs DiscoveryMat

Origine éventuelle	Moyens de correction déployés	Résultats
Connexion, problèmes de câblages	Changement de câbles	Aucune amélioration
Problème de lecture du voltmètre	Redémarrage du voltmètre	Aucune amélioration
Disfonctionnement du voltmètre	Test avec un autre voltmètre et comparaison des valeurs	Affichage similaire entre les deux voltmètres
Disfonctionnement de l'application DiscoveryMat	Comparaison des données entre les résultats affichés sur le multimètre et sur l'application	Affichage identique
Présence d'une pollution dans la solution	Nouvelle préparation de la solution dans un autre bécher nettoyé.	Résultats similaires
Présence d'une bulle d'air dans le tube de l'électrode de référence	Observation de l'électrode et agitation afin d'évacuer la présence de bulles d'air	Résultats similaires



Il a été soulevé que l'électrode de référence, en vue de ses dix années de service, puisse être défectueuse. Le potentiel de l'électrode de référence a été comparé avec celui de deux autres électrodes dans de l'eau de ville. Les différences étaient de 0.040V avec l'une des trois et les mesures ne se stabilisaient pas pour les trois. Suite à cela, de nouvelles électrodes ont donc été commandées. Nous avons effectué trois tests de 15 minutes sur un coupon de référence, pour les nouvelles électrodes. Les tracés (Figure 30) étaient stables et exploitables. On peut en déduire que le problème venait très certainement de l'électrode. Les nouvelles électrodes ont été comparées aux anciennes dans de l'eau Evian. Une différence variant de 0.005V à 0.010V a été observée, ce qui est minime. Nous avons également remarqué au fond de l'ancienne électrode un dépôt d'aspect métallique. Celui-ci, en fonction de son emplacement, peut interférer avec la prise de mesures, ce qui pourrait être l'origine du dysfonctionnement observé. Le problème étant présent par intermittence et l'ancienne électrode ayant été comparée avec une électrode de référence avant chaque session de tests, nous considérons les tracés obtenus avant le changement d'électrodes exploitables lors de l'absence du problème.

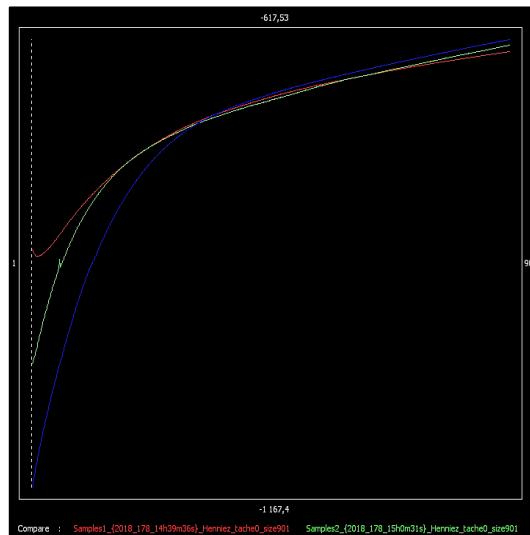


Figure 30 : Tests avec une nouvelle électrode,  
©C. Despland, HE-Arc


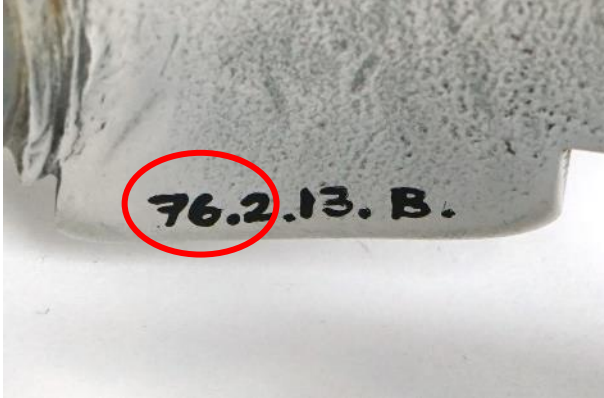
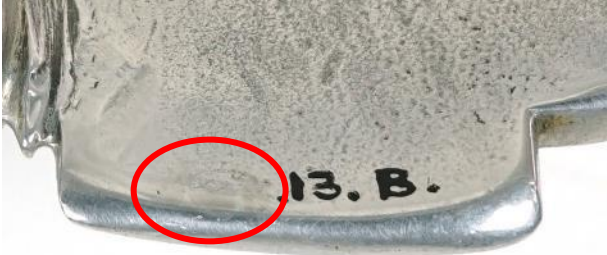
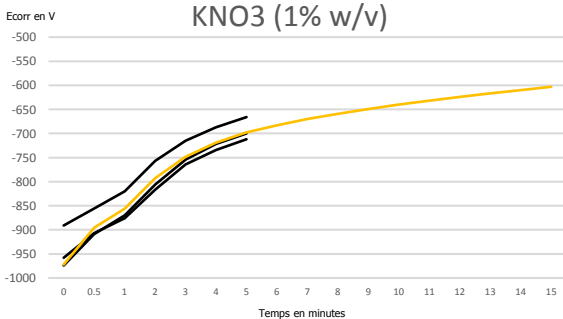
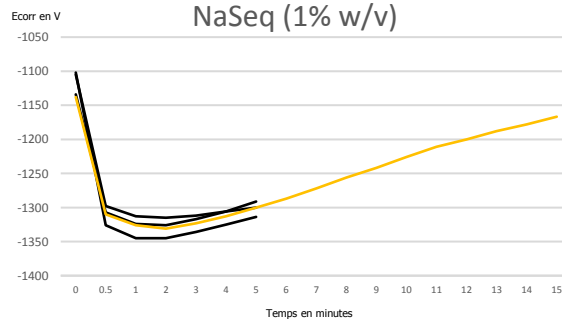
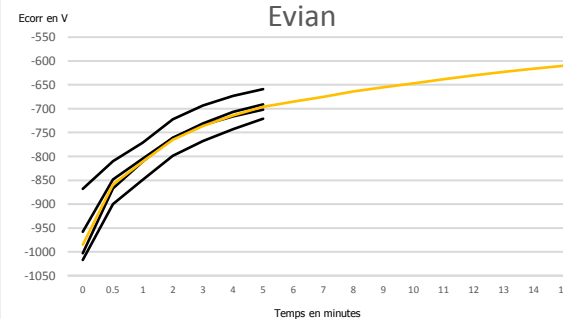
## 10.3 Résultats

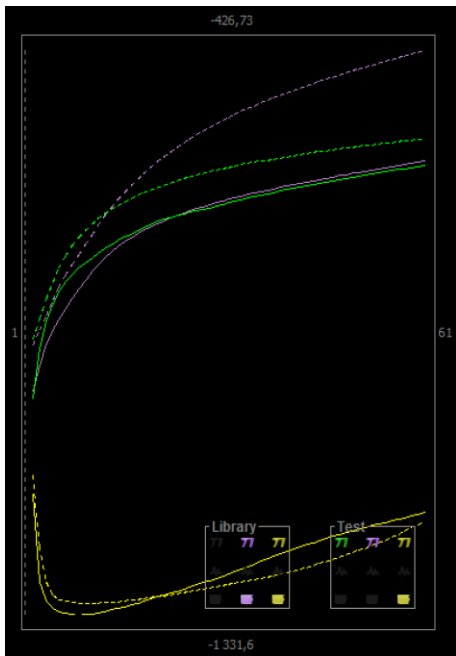
### 10.3.1 Analyse des objets sélectionnés avec DiscoveryMat

Chaque objet (ou élément d'objet) sélectionné a été analysé à une ou plusieurs reprises en fonction de la reproductibilité et de la pertinence des tracés obtenus ainsi que de l'impact visuel laissé par le polissage préparatoire sur l'objet. En raison de la patrimonialité des objets, les polissages ne pouvaient pas être reproduits autant de fois que souhaité. Il est donc arrivé que le tracé de 15 minutes ne soit pas le plus représentatif. Cette incertitude a été prise en compte en accordant une plus grande importance aux tracés de 15 minutes dans les deux autres solutions. En vue de la validation de l'outil pour l'analyse des alliages d'aluminium des objets testés, les tracés obtenus par objet ont été comparés à ceux des matériaux de la base de données existante constituée de vingt-trois entrées. Des fiches descriptives des objets analysés sont consultables en annexes. Elles contiennent les caractéristiques de l'objet, les graphiques des tracés par solution, les comparaisons avec la base de données ainsi que des commentaires. Un exemple, modifié<sup>27</sup> pour la logique de la démarche, est présenté à la page suivante (Tableau 16).

<sup>27</sup> Les tableaux en annexes contiennent les résultats de cette comparaison ainsi que ceux d'une comparaison réalisée dans un second temps. Les commentaires y ont été synthétisés.

Tableau 16 : Exemple modifié d'une fiche descriptive

76.2.13b corps		
Photo de l'objet	Photo de la zone retenue avant analyse	Photo de la zone retenue après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p>KNO3 (1% w/v)</p> 	<p>NaSeq (1% w/v)</p> 	<p>Evian</p> 
Discussion		
<p>Nous pouvons observer dans le graphique pour la solution Evian qu'il y a eu quatre tracés de 5 minutes et dans les deux autres graphiques, nous pouvons voir qu'il y a eu trois tracés de 5 minutes, au lieu des deux qui étaient initialement prévus dans la méthodologie. Nous avons dû effectuer plus de tracés que prévu en raison d'une mauvaise similarité du troisième tracé pour les trois solutions et du quatrième tracé pour Evian.</p>		

Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
Alliage DiscoveryMat proposé		Distance de similarité
1	Al 90.9 ; Zn 5.1; Mg 2.3 ; Cr 0.5 ; Cu 0.3 ; Fe 0.1	3 139
Graphique comparatif entre les tracés du matériau étudié et du matériau retenu de la base de données (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la comparaison effectuée avec la base de données contenant les vingt-trois matériaux de base, nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) donne une distance de similarité très élevée (mauvaise correspondance), des croisements des tracés de NaSeq et des tracés de KNO3 s'éloignant largement sur la fin.</p> <p>En vue des différences signalées, la proposition faite par DiscoveryMat n'est pas considérée comme probable.</p> <p>Devant ces mauvais résultats nous avons réalisé l'analyse FRX de l'objet en trois points qui donne une moyenne : Al 94.5 ; Si 4.3 ; Fe 0.7 ; Mn 0.4 ; Cr 0.1. Nous confirmons donc le caractère peu fiable de cette première analyse. Disposant des tracés du matériau étudié et de sa composition, nous avons pu l'intégrer au sein de la base de données et de l'enrichir.</p>

Le même travail a été mené sur les quinze autres objets (ou éléments d'objets) testés. Le tableau 17 résume les résultats obtenus (en noir pour les résultats DiscoveryMat et en rouge pour les résultats FRX). On constate que très peu de matériaux (en jaune dans le tableau) ont trouvé une correspondance plausible dans la base de données, il est à signaler qu'il s'agit des objets dont la distance de similarité est la moins élevée.

Tableau 17 : Comparaison composition DiscoveryMat (base de données constituée de 23 matériaux) et composition FRX

Objet/élément d'objet		Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Distance similarité
71.6.257		98.9	0.3	0.7					0.1		2423
		98.2	1.4	0.4							
71.6.259		99.8	0.1	0.1							4394
		97.2	2.3	0.5							
71.6.260		96.4	2.6	0.5		0.5					1841
		95.7	3.6	0.7							
71.6.261		96.4	2.6	0.5		0.5					3210
		94	5.7	3							
76.2.13a	Corps	96.4	2.6	0.5		0.5					2193
		93	5.1	1	0.1	0.6		0.1	0.1		
	Extrem.	98.9	0.3	0.7					0.1		4195
		93.9	3.2	0.4		0.3	2.1	0.1			
76.2.13b	Corps	90.9		0.1	0.3		2.3	0.3	5.1		3139
		94.5	4.3	0.7		0.4		0.1			
	Extrem.	96.4	2.6	0.5		0.5					2361
		95.3	1.7	0.4		0.3	2.2	0.1			
76.2.14a	Corps	97.1	1.5	0.6	0.2	0.4			0.2		4753
		95.4	3.9	0.7							
	Extrem.	90.9		0.1	0.3		2.3	0.3	5.1		2295
		95.5	2.7	0.7			1.1				
76.2.14b	Corps	96.4	2.6	0.5		0.5					1890
		94.2	5	0.8							
	Extrem.	90.9		0.1	0.3		2.3	0.3	5.1		2545
		93.7	3.9	0.8			1.6				
TJA	Corps	96.4	2.6	0.5		0.5					2113
		94.6	4.7	0.6				0.1			
	Extrem.	96.4	2.6	0.5		0.5					1529
		93	6.6	0.3				0.1			

III 22988	87.6	0.6	0.3	2.2	0.2			9	0.1	3327
	79	19.2	1.1	0.1				0.2	0.4	
IVc 11023	98.1	0.1	0.6	0.2	0.9					4892
	97.2	1	1			0.7	0.1			

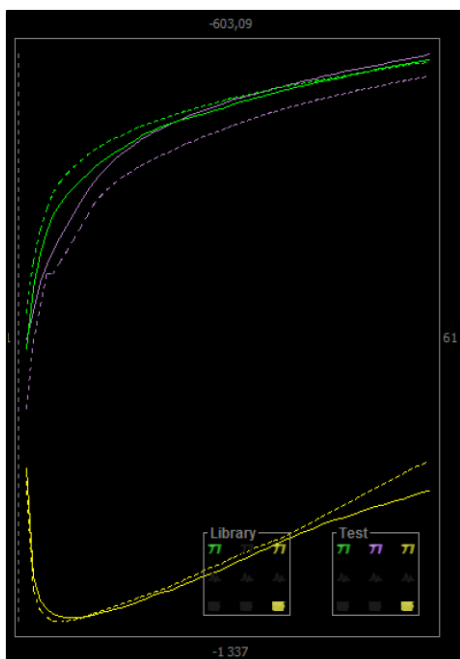


Figure 31 : Comparaison corps 76.2.13b et base de données enrichie (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune), ©C. Billat, HE-Arc

Etant peu satisfaite et disposant, grâce à l'analyse FRX des seize objets (ou éléments d'objets), d'une base de données enrichie des matériaux correspondants, nous avons repris l'analyse DiscoveryMat de chacun des seize objets (ou éléments d'objets) en le considérant comme seul matériau inconnu (simulation) face aux quinze autres matériaux associés aux vingt-trois matériaux initiaux de la base de données.

La figure 31 reprend l'exemple du corps 76.2.13b mentionné précédemment. Cette fois-ci la proposition la plus proche a la composition suivante : Al 93 ; Si 5.1 ; Fe 1 ; Mn 0.6 ; Cr 0.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.1 pour une distance de similarité de 823.

Les résultats sont donc plus concluants et cette première impression se confirme lors de l'identification des quinze objets (ou éléments d'objets) testés selon la même approche (Tableau 18).

Tableau 18 : Comparaison composition DiscoveryMat (base de données enrichie) et composition FRX

Objet/éléments d'objet	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Distance similarité
71.6.257	93	5.1	1	0.1	0.6		0.1			1414
	98.2	1.4	0.4							
71.6.259	95.7	3.6	0.7							1620
	97.2	2.3	0.5							
71.6.260	94.2	5	0.8							2126
	95.7	3.6	0.7							
71.6.261	93	5.1	1	0.1	0.6		0.1	0.1		1890
	94	5.7	3							

76.2.13a	Corps	94.5	4.3	0.7	0.1	0.4					823
		93	5.1	1	0.1	0.6		0.1	0.1		
	Extrem.	94.5	4.3	0.7		0.4		0.1			1407
		93.9	3.2	0.4		0.3	2.1	0.1			
76.2.13b	Corps	93	5.1	1	0.1	0.6		0.1	0.1		823
		94.5	4.3	0.7		0.4		0.1			
	Extrem.	94.5	4.3	0.7		0.4		0.2			1181
		95.3	1.7	0.4		0.3	2.2	0.1			
76.2.14a	Corps	94.2	5	0.8							2286
		95.4	3.9	0.7							
	Extrem.	94.2	5	0.8							1357
		95.5	2.7	0.7			1.1				
76.2.14b	Corps	95.5	3.6	0.7							2126
		94.2	5	0.8							
	Extrem.	95.5	2.7	0.7			1.1				1907
		93.7	3.9	0.8			1.6				
TJA	Corps	93	6.6	0.3				0.1			1906
		94.6	4.7	0.6				0.1			
	Extrem.	94.6	4.7	0.6				0.1			1906
		93	6.6	0.3				0.1			
III 22988		94	5.7	0.3							8270
		79	19.2	1.1	0.1				0.2	0.4	
IVc 11023		95.4	3.9	0.7							4786
		97.2	1	1			0.7	0.1			

Nous remarquons que lors de cette nouvelle comparaison, neuf matériaux ont trouvé une assez bonne correspondance (en jaune dans le tableau), trois objets ont eu une correspondance moyennement satisfaisante (en vert dans le tableau) et quatre objets n'ont pas trouvé de correspondance concluante (en blanc dans le tableau).

Les matériaux n'ayant pas eu de correspondance sont les extrémités sont étonnamment ceux dont la distance de similarité est la plus faible. Il s'agit de l'objet III 22988 qui a une différence de similarité très importante (8270) et une composition proposée par DiscoveryMat très éloignée. Cependant, lorsque l'on regarde les compositions des trente-huit matériaux de la base de données, on remarque qu'aucune entrée n'a une composition similaire à celle de l'objet III 22988. Aussi la forte proportion en Si induit des tracés particuliers.

Il y a également les objets 76.2.13a-b et 76.2.14a, dont la présence de magnésium n'a pas été détectée. On se demande alors si le magnésium est un élément correctement détecté par la FRX. En comparant

les résultats obtenus avec les spectres, il en ressort que la présence de magnésium est souvent hypothétique. Par exemple pour l'extrémité 1 de l'objet 76.2.13a, les résultats donnent une présence de Mg à 2.3%. Si on compare le spectre de l'extrémité 1 au spectre du centre (Figure 32), qui ne donne pas de Mg, on remarque des résultats similaires entre les deux spectres. On en conclut donc que la présence de magnésium n'est, pour ce cas, pas garantie.

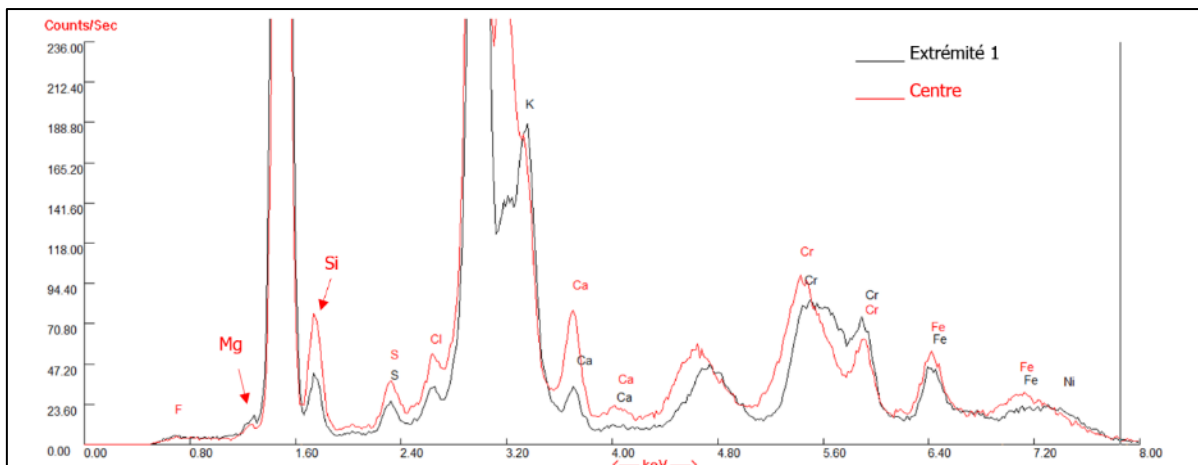


Figure 32 : Spectre FRX de l'extrémité 1 et du centre de l'objet 76.2.13a, ©C. Degrigny, HE-Arc

Des résultats similaires sont présents pour les objets 76.2.13b et 76.2.14a (Figure 131 et Figure 132, annexe p.110).

En nous intéressant aux matériaux ayant trouvé une moyenne ou une assez bonne correspondance, ainsi qu'aux éléments les plus présents dans les alliages d'aluminium (Al, Si et Fe), nous pouvons remarquer que l'aluminium est identifié avec une différence moyenne de **1% à 2%** (sauf 71.6.257), le silicium est identifié avec une différence moyenne de **1% à 3%** (71.6.257) et le fer avec une différence entre **0.3% et 0.7%** (sauf 71.6.261). Le manganèse, qui est un élément additionnel, est détecté avec une différence de **0.1% à 0.2%** (sauf 71.6.257). On en déduit que ces éléments sont détectés par l'application avec un taux variable quant aux proportions des compositions.

Nous pouvons remarquer que les éléments (Cr, Cu et Zn) présents entre **0.1% et 0.2%**, sont parfois mal détectés. Nous n'avons pas étudié d'alliages contenant ces éléments dans une plus grande proportion, nous ne pouvons donc pas remarquer une quelconque influence.

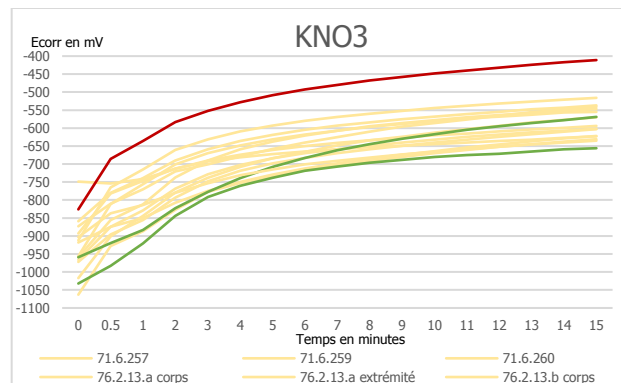
Si l'on prend en compte son accessibilité, sa portabilité et son coût, les correspondances me paraissent appréciables, bien que les résultats obtenus ne soient pas qualitatifs.

### 10.3.2 Etude du comportement des tracés

Suite aux résultats obtenus grâce à la comparaison entre les données obtenues avec l'application DiscoveryMat et celle obtenue par FRX, nous allons observer les comportements des tracés. Par cette observation, nous allons essayer de démontrer si les tracés ont un comportement différent en fonction de la proportion de silicium. En vue des compositions étudiées, très proches et avec des compositions non-normées, cette étude s'est avérée difficile.

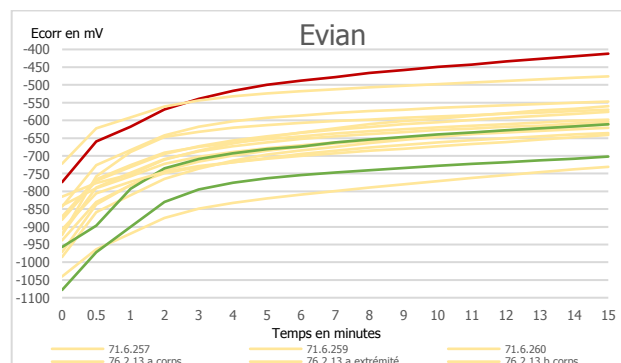
Lorsque l'on compare les tracés de tous les objets dans les trois solutions, il ressort pour la solution de KNO<sub>3</sub> (Graphique 1) qu'un tracé a un Ecorr final de 100mV plus faibles et un comportement différent que la moyenne des autres tracés, c'est celui de l'objet III 11023 (en rouge sur le graphique 1). Cet objet a la plus forte quantité de silicium (19.2%). Les tracés des objets contenant plus de 5.9% de silicium ont été colorés en vert (Graphique 1).

Graphique 1 : Tracés de tous les alliages testés dans la solution de KNO<sub>3</sub>, ©C. Despland, HE-Arc



On peut voir une similitude entre le comportement des tracés en vert et celui en rouge, avec une passivation lente et un Ecorr de début et de fin plus élevés pour le tracé rouge. La différence entre l'Ecorr d'origine et l'Ecorr final est comprise entre -376mV (4.9% de Si) et -415mV (19.2% de Si), pour ces trois tracés, alors que la différence moyenne pour les autres tracés est de -340mV. On peut supposer que plus la présence de silicium dans l'alliage est importante, moins vite l'alliage se passivera dans la solution de KNO<sub>3</sub>. Dans l'eau Evian (Graphique 2) le comportement de ces tracés est similaire à celui dans la solution de KNO<sub>3</sub>, ce qui n'est pas le cas pour la solution de sesquicarbonate de sodium.

Graphique 2 : Tracés de tous les alliages testés dans la solution Evian, ©C. Despland, HE-Arc





## 11 Analyse élémentaire FRX

Nous avons, en plus des analyse FRX réalisées sur les objets testés avec l'outil DiscoveryMat, pour l'intérêt de ce travail, effectué des analyses FRX sur les autres objets. Dans le tableau ci-dessous (Tableau 19) sont exposés les résultats de ces analyses. Une moyenne des différentes mesures a été réalisée par objet. Les résultats ont été classés par famille d'alliages. N'étant pas des objets usinés répondant des normes AA et UNS, nous avons fait fi des différences entre aluminiums corroyés et coulés.

Tableau 19 : Moyenne des compositions FRX

Objets	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr	Zn	Ni	Ag	Sn	S
<b>71.6.257</b>	98.2	1.4	0.4										
<b>71.6.259</b>	97.2	2.3	0.5										
<b>71.6.260</b>	95.7	3.6	0.7										
<b>71.6.261</b>	92.4	7.2	0.4										
<b>76.2.14a corps</b>	95.4	3.9	0.7										
<b>76.2.14b corps</b>	94.2	5	0.8										
<b>III 25730 pommeau</b>	98.8	0.8	0.4										
<b>Aluminium + cuivre</b>													
<b>III 22988</b>	79.7	19.2	1.1	<b>0.1</b>			0.4		0.2				
<b>III 23119</b>	96.9	2.3	0.5	<b>0.3</b>									
<b>71.6.258</b>	95.5	3.2	0.4	<b>0.4</b>	0.2			0.1	0.2				
<b>III 23426</b>	77	9.2	12.4	<b>0.5</b>			0.9						
<b>Aluminium + magnésium</b>													
<b>71.6.151</b>	96.7	1.3	0.5		0.7	<b>0.6</b>		0.2					
<b>76.2.14b extrémité</b>	93.7	3.9	0.8			<b>1.6</b>							
<b>76.2.13a extrémité</b>	93.9	3.2	0.4		0.3	<b>2.1</b>		0.1					
<b>76.2.13b extrémité</b>	95.2	1.8	0.4		0.3	<b>2.2</b>		0.1					
<b>76.2.14a extrémité</b>	95.5	2.7	0.7		1.1								
<b>Aluminium + Manganèse</b>													
<b>71.6.255</b>	97.9	1.3	0.4		<b>0.2</b>			0.1		0.1			
<b>76.2.13b corps</b>	94.5	4.3	0.7		<b>0.4</b>			0.1					
<b>76.2.13a corps</b>	93	5.1	1	0.1	<b>0.6</b>			0.1	0.1				
<b>IVc 11023</b>	97.2	1	1		<b>0.7</b>			0.1					
<b>71.6.152</b>	96.7	1.6	0.6		<b>0.8</b>			0.2	0.1				
<b>IVc 11022</b>	96.1	1.9	1		<b>0.8</b>		0.1	0.1					
<b>IVc 11021</b>	96.4	1.1	1.1		<b>0.9</b>			0.3					
<b>III 25730 pointe</b>	91	4.1	1		<b>1.3</b>		2.3	0.3					
<b>Aluminium + étain</b>													
<b>III 22989</b>	96.1	2.1	1.7									<b>0.1</b>	
<b>TJA corps</b>	94.6	4.7	0.6				0.1						
<b>TJA extrémité</b>	93.7	5.9	0.3				0.1						

Argent													
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr	Zn	Ni	Ag	Sn	S
71.6.191		0.8		6.7							91.8	0.7	
Alliage cuivreux													
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr	Zn	Ni	Ag	Sn	S
09.26.29		2.7	0.4	60.8					25.8	9.3		0.5	0.5
Alliage ferreux													
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr	Zn	Ni	Ag	Sn	S
71.6.322		0.9	97.9	0.1	0.2		0.1	0.1				0.5	0.1
III 23425		0.7	98.3	0.1	0.4			0.1					0.2
III 23242		2.8	95.8	1.1									0.3

Il ressort de cette analyse une absence d'aluminium dans la composition des objets **III 23242**; **III 23425**; **71.6.322**; **71.6.191** et **09.26.29** (choisi comme objet représentatif du reste de la collection de Mme. Gass). Ils sont composés d'alliages ferreux, cuivreux ou argentifère.

Nous pouvons également soulever la propreté des alliages des objets ou partie d'objet **71.6.257** ; **71.6.259** ; **71.6.260** ; **71.6.261** ; **76.2.14a (corps)** ; **76.2.14b (corps)** et **III 25730 (pommeau)** qui ne contiennent pas d'impuretés autres que le fer et le silicium. L'objet **III 22989** contient uniquement une trace d'étain (0.1%) comme impureté. Vu cette faible proportion, il peut être considéré comme un alliage propre.

Au sujet des autres impuretés, nous pouvons soulever une présence de cuivre ne dépassant jamais 0.5% de la composition de l'alliage. Or, il est considéré dès une présence de 1% par l'AA. Ici, il est donc compté comme présent à l'état de trace. Le magnésium et le manganèse sont considérés à partir d'une présence de 0.5% ce qui est le cas pour tous les objets contenant du magnésium et pour sept objets contenant du manganèse. Les cinq autres objets contenant du manganèse sont considérés comme en ayant à l'état de trace.

Des résultats particuliers ont été observés sur la pointe de l'objet III 25730 qui contient une forte présence de silicium par rapport aux autres objets et la présence de titane (0.4%). Nous avons également pu remarquer une plus grande présence de silicium sur un côté des objets IVc 11021, IVc 11022 et IVc 11023 par rapport à l'autre face. Une différence notoire a pu également être soulevée entre les extrémités sphériques et le corps central des objets 76.2.13a-b, 76.2.14.a-b et TJA. En effet, pour les chevilières provenant du MEN, les extrémités contiennent plus de magnésium et moins de silicium, ce qui est l'inverse pour l'objet de TJA. Nous avons finalement soulevé une forte présence de fer dans les résultats (12.4%) pour l'objet III 23426. Cette proportion peut s'expliquer par la présence d'une âme, probablement en fer, autour de laquelle est enroulé un fil d'aluminium.

Le spectre de l'extrémité de l'objet TJA en comparaison avec le spectre de l'extrémité de l'objet 76.2.13b (Figure 33), a permis de mettre en évidence une pollution en soufre et chlore ainsi que la présence de dépôt de calcium.

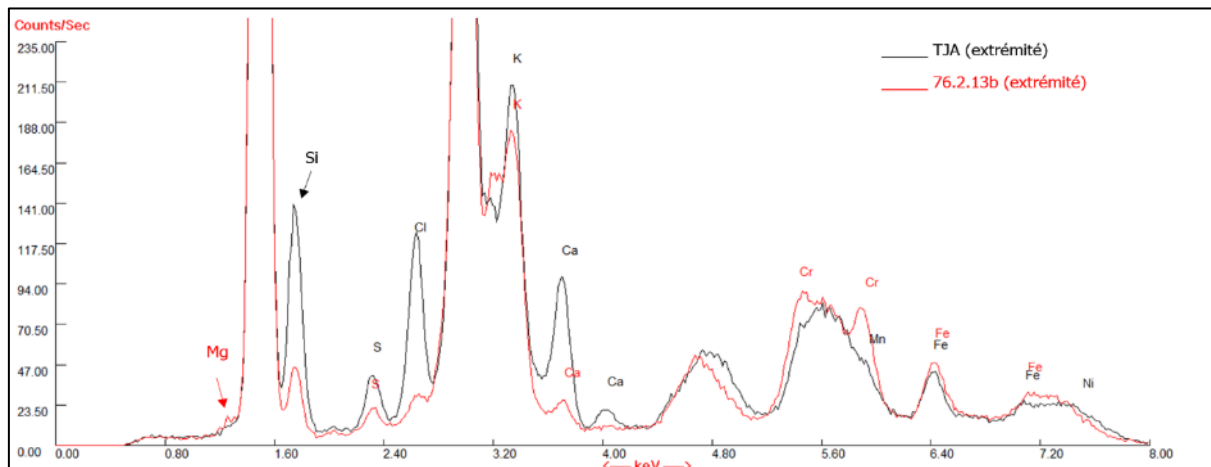


Figure 33 : Spectre FRX de l'extrémité TJA et de l'extrémité 76.2.13b, ©C. Degrginy, HE-Arc

## 12 Etat des altérations

### 12.1 Altérations physiques

Une synthèse des altérations physiques observées est présente dans le tableau ci-dessous (Tableau 20) :

Tableau 20 : Altérations physiques

Altération	Description
<b>Dépôts exogènes</b>	Un seul objet, le <b>III 22989</b> provenant du MKB, ne présente pas de dépôt exogène. Pour les objets moulés, ceux-ci restent souvent dans les interstices des résidus minéraux. Il y a également souvent des résidus cireux. Sur deux objets du MKB : <b>IVc 11021</b> et <b>IVc 11023</b> , il y a un dépôt brunâtre uniforme sur la surface de l'objet, probablement un résidu argileux.
<b>Déformation</b>	L'objet <b>III 25730</b> présente une déformation de la partie métallique au bout du fourreau. L'élément a été cassé et s'est retourné sur lui-même.
<b>Trace d'usures</b>	Tous les objets présentent de légères traces d'usures. Majoritairement, les objets du MKB ont plus de traces d'usures que ceux du MEN.

Avant tout, il est important de noter l'état, qui est très bon, au sujet des collections acquises par Jean Gabus et du bon état des collections du MKB et celle donnée par Véronique Gass. En effet, aucun objet ne présente de lacune et ils n'ont pas d'altérations physiques qui empêchent la lisibilité de l'objet et/ou qui amputent fortement leurs valeurs.

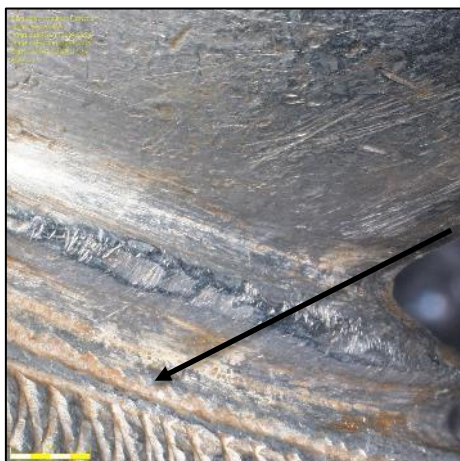


Figure 34 : Dépôt exogènes dans les interstices, objet 76.2.13a, ©C. Despland, HE-Arc

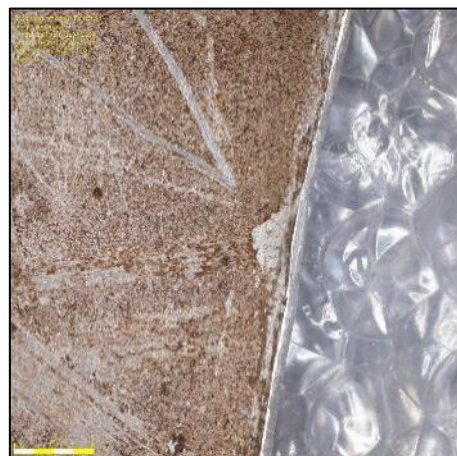


Figure 35 : Dépôt brunâtre et uniforme, objet IVc 11021, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 36 : Déformation de la pointe de l'objet III 25730, ©C. Despland, HE-Arc

Il est courant de trouver des dépôts exogènes sur des objets ethnographiques, si ceux-ci n'ont pas été entièrement nettoyés à leur arrivée dans un musée européen. On voit que sur la plupart des objets africains, les dépôts exogènes sont souvent localisés et présents dans des interstices (Figure 34), alors que sur deux tors provenant d'Amérique du Sud et le bracelet III 11023, un dépôt brunâtre est présent sur l'ensemble de l'objet ou sur une face de manière couvrante et homogène (Figure 35).

On peut également souligner la faible présence de traces d'usure sur une grande partie des collections de Jean Gabus par rapport aux objets du MKB. Le seul objet déformé provient du MKB. La partie déformée de l'objet **III 25730** est la pointe

du poignard qui est composé d'une fine plaque d'aluminium (Figure 36).

## 12.2 Altérations chimiques

Pour les altérations chimiques, seuls les objets étant en alliage d'aluminium, soit 22 objets, ont été considérés. Dans le tableau ci-dessous, une synthèse des altérations chimiques est exposée (Tableau 21).

Tableau 21 : Altérations chimiques

Altération	Description
<b>Film uniforme d'oxydation</b>	Tous les objets observés possèdent un film uniforme d'oxydation. Un objet est brillant, huit sont satinés, huit sont satinés-mates et cinq sont mates. Quant au critère de valeur, un objet est clair, treize sont gris clair, six sont gris foncé et deux sont gris très foncé.
<b>Corrosion par piqûre</b>	Deux types de produits de corrosion par piqûre ont été observés. Sur l'intérieure des objets <b>76.2.13a-b</b> et <b>76.2.14a-b</b> ainsi que sur les objets <b>IVc 11023</b> et <b>IVc 11021</b> , des piqûres de corrosion localisées ont pu être identifiées. Sur l'objet <b>III 23119</b> , une corrosion par piqûre qui a évolué en corrosion généralisée a pu être observée. Cette corrosion est mêlée à un dépôt exogène de couleur ocre.
<b>Corrosion filiforme</b>	Aucun produit de corrosion filiforme n'a été observé.
<b>Corrosion galvanique</b>	Des produits de corrosion galvanique ont été observés sur l'objet <b>III 24730</b>

Six objets ont des produits de corrosion par piqures localisés. On peut en voir sur les côtés des deux tors (**IVc 11021** et **IVc 10023**) non recouverts de dépôts ainsi que sur l'intérieure des quatre chevillères du MEN (**76.2.13a-b** et **76.2.14a-b**). Ces produits de corrosion sont présents sur une surface de 5mm<sup>2</sup> à plusieurs emplacements (Figure 37). Les produits de corrosion sont incolores ou blancs.

L'objet III 23119 a en un point de la corrosion par piqure généralisée (Figure 38 et Figure 39). Ces produits de corrosions sont blancs ou incolores. Ils ont un aspect cristallin et sont mêlés à un dépôt organique à l'aspect cireux de couleur brune. La limites\* a été perdue par endroit (Figure 39) entre les zones où se trouvent des produits de corrosions.



Figure 37 : Corrosion par piqures, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 38 : Corrosion par piqure généralisée, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 39 : Gros plan, corrosion par piqure généralisée, ©C. Despland, HE-Arc

De la corrosion par piqures a été observée sur sept objets sur vingt-deux, soit 31% des objets étudiés. Sur un seul objet, de la corrosion galvanique est présente.

## **Partie IV : Regard critique et perspective**

Dans cette partie une discussion des résultats pour chaque technique d'analyse sera effectuée ainsi qu'une comparaison entre l'observation et la FRX et une entre la FRX et DiscoveryMat, afin de permettre de réaliser une conclusion générale de l'étude.

## 13 Discussion des résultats

### 13.1 Caractérisation des matériaux

L'identification des matériaux a eu lieu en deux temps dans deux types d'endroits différents. La première identification a eu lieu lors de la sélection des objets dans les réserves du MEN et du MKB, la seconde a eu lieu dans les locaux de la HE-Arc. Les réserves sont des lieux souvent peu éclairés où il n'y a pas de poste de travail adéquat pour une observation. Dans les locaux de la HE-Arc, des lumières adaptées ainsi que des loupes binoculaires étaient à disposition. L'identification grâce au facteur visuel (éclat, aspect dans les rayures, etc.) a été plus aisée avec une lumière adaptée. Nous n'avons pas rencontré d'alliages comme le maillechort ou des métaux zingués ou chromés qui auraient été moins faciles à différencier de l'aluminium.

Les objets étudiés étaient pour la plupart non-composites, le poids a donc un facteur utile pour l'identification de l'aluminium. Ce facteur aurait pu être mieux exploité lors de la sélection des objets en réserve. Nous aurions également pu utiliser un aimant pour éliminer les alliages ferreux.

Nous pouvons soulever que même avec des critères prédéfinis et des yeux aguerris, l'aluminium n'est pas un métal facilement identifiable lorsque celui-ci ne compose qu'une partie de l'objet ou si l'observation est faite dans un lieu mal éclairé. De plus, des traitements de surface sur d'autres alliages peuvent aisément tromper l'observateur.

Lors de ce travail, des conservateurs-restaurateurs ainsi que des conservateurs de divers musées en plus du MEN et du MKB ont été contactés afin de savoir s'ils ressentaient le besoin d'une aide pour identifier l'aluminium des autres métaux blanc. Il en est ressorti qu'un guide d'identification leur serait grandement utile et permettrait une meilleure inventorisation. Un guide a donc été créé et est présent en annexe p. 111

### 13.2 DiscoveryMat

L'outil DiscoveryMat est facile d'utilisation. Des notions d'électrochimie ne sont pas forcément nécessaires afin de pouvoir l'utiliser. En effet, la comparaison des tracés est visuelle et la notion de distance de similarité est aisément assimilée. De plus, un polissage restreint et précis est facilement réalisable par la main d'un conservateur-restaurateur.

En raison de la patrimonialité des objets, les polissages ne pouvaient pas être indéfiniment reproduits. Ceci a pour conséquence que certains tracés obtenus ne soient pas aussi représentatifs que souhaitées. Les résultats obtenus dans cette circonstance étaient souvent moins concluants. Le polissage ne pouvant pas être optimal, les mesures ne le sont donc pas. On voit ici la limite de l'outil DiscoveryMat.



### 13.3 FRX

Au début de ce projet, nous pensions que la grande majorité des objets ethnographiques était réalisée à partir de matière recyclée. En vue des alliages propres d'une partie des collections ramenés par Jean Gabus, nous pouvons, pour certains objets, exclure la piste du recyclage. Il est probable, que l'ethnologue ait lui-même apporté la matière première pour la réalisation des objets 71.6.257 ; 71.6.259 ; 71.6.260 ; 71.6.261 et le corps des objets 76.2.14a-b. Aucune information à ce sujet n'est présente dans les rapports de missions. Pour tous les alliages des objets provenant du MKB, l'objet TJA et les objets contenant des impuretés provenant du MEN, la piste du recyclage est fortement probable. En effet, les compositions obtenues ne correspondent pas aux normes des matières premières fournies. De plus, les alliages contiennent des impuretés non similaires par rapport des objets réalisés au même moment par le même artisan.<sup>28</sup>

La différence soulevée de la forte présence de silicium sur un côté des objets IVc 11021 et IVc 11023 par rapport à l'autre peut s'expliquer par la présence d'un dépôt uniforme à la surface qui est potentiellement de l'argile (riche en Si).

Durant le projet EtICAL, l'analyse FRX a été comparée à l'analyse par spectroscopie d'émission de photons X induite par des particules (PIXE). Le but étant de pouvoir valider l'utilisation de la FRX, qui est plus accessible et plus facile à manipuler. Les résultats du projet EtICAL montrent que les deux analyses donnent des compositions proches. Ce projet a également permis de sélectionner le mode « general metals » sur une durée de 60secondes.

Suite à la comparaison des résultats données par la machine suivant le mode sélectionné avec les différents spectres, il en ressort que la présence de magnésium est souvent hypothétique et que des éléments présents à l'état de trace, comme le calcium, le soufre et le chrome, ne sont pas détectés par le mode « general metals ». Les résultats sont toutefois fiables mais il reste important de vérifier les spectres afin de confirmer ou non la présence de magnésium et d'identifier d'autres éléments sous formes de traces. Pour finir, le mode « general metals » donne des quantités fiables pour l'aluminium et le silicium.

---

<sup>28</sup> Gabus Jean, 1976, p.50-51.

### 13.4 Caractérisation des altérations

La caractérisation des altérations physiques s'est avérée rapide à effectuer en vue des paramètres prédéfinis. On peut supposer qu'en vue de la faible présence de traces d'usures des objets rapportés par Jean Gabus (outre les objets 76.2.13a-b et 76.2.14a-b), ceux-ci n'ont probablement jamais été portés. Les rapports de missions<sup>29</sup> attestent des commandes effectuées directement aux artisans par l'ethnologue. Les dépôts présents dans les interstices proviennent probablement des moules réalisés à partir de sable mouillé<sup>30</sup>.

La présence d'un dépôt probablement argileux identifié grâce à l'analyse FRX sur les objets IVc 11021, IVc 11023 et III 22988 peut provenir d'une application rituelle sur l'objet ou sur la peau de la personne portant l'objet. Aucune donnée ethnographique ne vient appuyer cette hypothèse.

La caractérisation du film d'oxydation s'est avérée complexe et peu précise. Afin de pouvoir appliquer de manière concluante les deux échelles (aspect de surface et valeur), il est nécessaire d'entraîner ses yeux sur des séries d'objets et de pouvoir les comparer entre elles afin d'être le plus précis possible. De plus, ces paramètres demandent une bonne lumière. Le film d'oxydation peut, à long terme, influencer la lisibilité de l'objet, rendre plus difficile l'identification de l'aluminium ainsi que changer l'aspect d'origine. En effet, cela fait perdre l'éclat blanc caractéristique de l'aluminium.

Concernant les produits de corrosion, le pourcentage de 31% d'objet présentant de la corrosion par piqures démontrent que plus d'objets qu'on ne le supposait sont attaqués par la corrosion. On peut voir que les objets ayant des produits de corrosion présentent également un grand nombre de traces d'usures. Nous pouvons remarquer que le fait que les objets aient été portés et/ou manipulés a apparemment influencé la corrosion des objets. Le seul objet présentant de la corrosion généralisée comporte des dépôts exogènes brunâtres à l'aspect cireux. On peut supposer que ce dépôt ait favorisé le développement de produit de corrosion par un apport d'humidité constant et d'un milieu acide. Tous les produits de corrosions identifiés n'influencent pas la lisibilité des objets, sauf pour l'objet III 23119 dont on ne voit plus la surface d'origine. Tant que la corrosion n'a pas été généralisée, nous pouvons en déduire que celle-ci n'a pas d'impact inquiétant sur l'objet.

### 13.5 Croiser caractérisation des matériaux et FRX

Lorsqu'on compare les résultats obtenus de l'observation et de l'analyse FRX, on remarque que les alliages d'aluminium ont été correctement identifiés par observation. Les critères sensoriels sélectionnés sont donc performants pour identifier un alliage d'aluminium d'un autre métal blanc.

---

<sup>29</sup> Gabus Jean, 1976, p.50-51.

<sup>30</sup> Gabus Jean, 1976, p.85.

### 13.6 DiscoveryMat en comparaison avec FRX

Les résultats de correspondance entre la base de données et la composition obtenue par FRX des alliages testés sont majoritairement approchants lors de la deuxième comparaison (douze résultats concluants sur seize). On obtient une composition similaire, avec une certaine marge d'erreur au niveau des concentrations. Lorsque la comparaison ne fournissait pas de résultat concluant, cela provenait soit d'une absence d'alliage similaire dans la base de données (objet **III 22988**). De plus, nous pouvons souligner que les trois objets ayant obtenu une correspondance moyenne, n'ont pas pu bénéficier d'un polissage optimal. On voit ici les limites de l'application DiscoveryMat pour les objets patrimoniaux.

La comparaison des données a permis de soulever que l'aluminium est identifié avec une différence moyenne de **1% à 2%**, le silicium de **1% à 3%**, le fer de **0.3% à 0.7%** et le manganèse de **0.1% à 0.2%**.

Nous n'avons pas pu identifier un comportement particulier entre les alliages comprenant du magnésium. Cependant, si on observe les spectres FRX des objets en alliage d'aluminium contenant du magnésium, sa présence est hypothétique. En l'état actuel, il est hasardeux de se prononcer sur une possible influence du magnésium sur les tracés d'intensité de potentiel.

Nous avons également pu remarquer que le cuivre, le chrome et le zinc, présent entre **0.1%** et **0.2%** dans les alliages testés, sont en partie détecté. Cela n'a pas été le cas pour tous les objets analysés avec DiscoveryMat. Dans le cadre de ce travail, où la présence de ces éléments traces témoigne certainement d'un recyclage, cette incertitude, dans l'état actuel de la base de données DiscoveryMat, ne permet pas d'obtenir des résultats suffisamment précis.

Malgré cette imprécision actuelle, l'outil DiscoveryMat est exploitable pour l'analyse semi-qualitative des alliages d'aluminium. Il donne des informations correctes quant aux éléments composant l'alliage. La précision des compositions, surtout en ce qui concerne le silicium, n'est cependant pas optimale.

## Conclusion

Réalisé en partenariat avec l'équipe de l'UR-Arc CR, inscrit dans la poursuite du projet EtICAL, ce travail de mémoire a conduit à la sélection de critères d'observation qui, en comparaison avec les résultats obtenus par les analyses DiscoveryMat et FRX, se sont montrés concluants dans la reconnaissance des objets en alliage d'aluminium. Nous pouvons donc considérer que ces critères sont exploitables lors de la reconnaissance de l'aluminium.

Ce travail a permis de démontrer, grâce aux tests effectués sur des objets patrimoniaux, que l'outil DiscoveryMat permet une analyse semi-qualitative des alliages d'aluminium. Bien que l'analyse semble peu concluante pour détecter la présence de magnésium comprise entre 0.1% et 1.2%, l'outil a permis de détecter les autres éléments présents dans l'aluminium avec une différence variant entre 0.5 et 3%. Cet outil semble donc approprié à l'application pour les objets ethnographiques en alliages d'aluminium par les conservateurs-restaurateurs. De plus, nous avons pu enrichir la base de données DiscoveryMat qui contient aujourd'hui seize nouveaux alliages d'aluminium.

Les analyses FRX ont permis de montrer que la matière utilisée pour la fabrication des bijoux et objets d'apparat ethnographique provenait en partie de recyclage, mais parfois la fabrication a été réalisée directement à partir de matière première. Nous avons pu souligner cet aspect en raison de la propreté des alliages qui auraient contenu des impuretés s'ils provenaient de recyclage. En vue des techniques de fabrication utilisées (coulage), il n'y a pas eu de réemploi d'aluminium.

À travers ce travail nous avons pu soulever la présence d'un film d'oxyde présent sur les objets étudiés qui, à long terme, entraîne une modification de l'aspect visuel d'origine. Celui-ci s'épaissit progressivement et entraîne une perte de l'éclat blanc caractéristique de l'aluminium. La présence de corrosion par piqûre a été signalée sur sept objets et la corrosion galvanique sur un objet. Ces produits de corrosion n'endommagent pas les valeurs associées de manière significative. Nous avons pu relever également la présence de produit de corrosion généralisé sur l'objet III 23119 qui peut amener à perdre la lisibilité de l'objet et de sa structure.

Pour finir, le travail réalisé jusque lors pourrait être compléter par une étude du comportement des courbes d'intensité de potentiel sur des coupons standardisés afin de préciser le comportement de celles-ci lors de la présence d'un certain pourcentage de silicium, de magnésium, de manganèse et de titane. Compte tenu de la grande variété d'alliage d'aluminium présent dans les collections ethnographiques, d'autres objets patrimoniaux pourraient être ajoutés à la base de données, en particulier ceux utilisés dans d'autres domaines que l'apparat. Le même protocole pour la construction de la base de données devra être suivi afin d'assurer une bonne reproductibilité.

## **Référence et listes d'illustration**

## 14 Bibliographie référencée

Aluminium Association, 1998 : Aluminium Association. *Care of Aluminium*. Aluminium Association, Washington, 1998.

Bertholon, 2000 : Bertholon, Régis. La limite de la surface d'origine des objets archéologiques métalliques. Caractérisation, localisation et approche des mécanismes de conservation. Université de Paris I, Paris, 2000.

Degrigny C., 2018 : Degrigny C. *Etude, Identification des objets en aluminium patrimoniaux et Classification de leurs formes de corrosion. Projet EtIC(AL)*. Version provisoire 7, Neuchâtel, 2018, non publié.

Degrigny C. et al., 2010 : Degrigny C. et al., *Use of Ecorr vs time plots for the qualitative analysis of metallic elements from scientific and technical objects: the SPAMT Test Project*, Journal of Solid State Electrochemistry: Volume 14, Issue 3, 2010, 425-435.

Fontaine Celia, 2012 [En ligne] : « Analyse qualitative par voie électrochimique des alliages à base d'argent. Application de l'outil CLAMTEC à ce type de matériau ». In *Rero Doc* [En ligne]. Mémoire de bachelor : Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel, 2012 [consulté le 18 mai 2018].  
[http://doc.rero.ch/record/277811/files/2012\\_BA-FontaineCelia\\_AnalyseElectrochimiqueAlliagesArgent.pdf](http://doc.rero.ch/record/277811/files/2012_BA-FontaineCelia_AnalyseElectrochimiqueAlliagesArgent.pdf)

Gabus Jean, 1976 : Gabus Jean. *Oualata et Gueïmaré des Nemadi : rapport brut des missions ethnographiques en R.I. de Mauritanie du 19 décembre 1975 au 29 mai 1976*. Musée d'ethnographie Neuchâtel, Neuchâtel, 1976.

Gabus Jean, 1982 : Gabus Jean. *Au Sahara : bijoux et techniques*. La Baconnière, Neuchâtel, 1982.

Granget Elodie, 2017 [En ligne] : Granget Elodie. « Caractérisation du champ de détection de l'appareil FRX : établissement d'une méthodologie pour la détection de fines couches métalliques ». In *Rero Doc* [En ligne]. Mémoire de bachelor : Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel, 2017 [consulté le 2 mai 2018]. <http://doc.rero.ch/record/306415?ln=fr>

Gouvernement du Québec, 2018 [En ligne] : Gouvernement du Québec. « Usure ». In *CCQ* [en ligne]. 2018 [consulté le 20 juin 2018].  
[http://www.ccq.gouv.qc.ca/index.php?id=104&no\\_cache=1&tx\\_mcccfrechercheavancee\\_pi1%5Bress\\_uid%5D=240](http://www.ccq.gouv.qc.ca/index.php?id=104&no_cache=1&tx_mcccfrechercheavancee_pi1%5Bress_uid%5D=240)

Guler Kaspar, 1949 [en ligne] : Guler Kaspar « L'aluminium et ses alliages ». In *Rero doc* [en ligne]. 1949 [consulté le 1<sup>er</sup> mai 2018].  
[https://doc.rero.ch/record/23877/files/BCV\\_N\\_112\\_066\\_1949\\_061.pdf](https://doc.rero.ch/record/23877/files/BCV_N_112_066_1949_061.pdf)

Hachez-Leroy F, 2007 : Hachez-Leroy F. « Aluminium : métal familier, patrimoine à découvrir ». In *Patrimoine industriel – apic* [En ligne]. 2007 [consulté le 29 janvier 2018].  
<http://www.patrimoineindustriel-apic.com/bibliotheque/APHG%20-%20Historiens%20&%20Geographes/HG405-4-F%20Hachez%20Leroy.pdf>

Larousse, 2018 [en ligne] : Larousse « Duralumin ». In *Larousse* [En ligne]. 2018 [consulté le 10 mai 2018]. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/Duralumin/27032>

Locquet Nathalie [En ligne] : Locquet Nathalie. « Les principes de la spectroscopie de fluorescence : de la théorie à la pratique ». In *heliospir* [En ligne]. [consulté le 9 mai 2018].  
[http://www.heliospir.net/medias/upload/files/15J\\_c\\_Locquet.pdf](http://www.heliospir.net/medias/upload/files/15J_c_Locquet.pdf)

Romainville Michel, 2011 [En ligne] : Romainville Michel. « Les routes africaines de l'aluminium ». In *Techniques & Culture* [En ligne]. 2011 [Consulté le 28.02.2018].  
<http://journals.openedition.org/tc/4598>

Selwyn L., 2004 : Selwyn L. Métaux et corrosion. Un manuel pour le professionnel de la conservation. Ottawa, Canada, Institut canadien de conservation, 2004.

## 15 Bibliographie consultée

- Asma Khalid, Aleena Tasneem Khan and Muhammad Sabieh Anwar, 2011 [en ligne] : Asma Khalid, Aleena Tasneem Khan and Muhammad Sabieh Anwar. «X - Ray Fluorescence (FRX) spectrometry for materials analysis and "discovering" the atomic number». In *LUMS School of Science and Engineering* [en Ligne]. 2011 [consulté le 20 avril 2018]. <http://advlabs.aapt.org/document/ServeFile.cfm?ID=11727&DocID=2608>
- Bauer, M. 2011 : Bauer Mathieu. Support du cours «Theoretical aspects of handheld x-ray fluorescence spectrometry and spectra evaluation » Thermofisher Scientific, 2011.
- Barralis, Jean et Maeder, Gérard. Précis de Métallurgie. Elaboration, structure, propriétés, normalisation. Editions Nathan, Paris, 2002, p.22, 176, 180.
- Burner Jean, 2011: Burner Jean. *Bijoux touaregs : art des bijoux anciens du Sahel et du Sahara au Niger*. Edition du Fournel, L'Argentièrre-la-Bessée, 2011.
- Canzio Riccardo, 1992 [En ligne] : Canzio Riccardo. « Mode de fonctionnement rituel et production musicale chez les Bororo du Mato Grosso ». In *Cahier de musiques traditionnelles* [En ligne]. 2004 [consulté le 15 juin 2018]. <http://www.jstor.org/stable/40240126>
- Colon P. et Groscoheat B., 2010 [En ligne] : Colon P. et Groscoheat B.. « La corrosion ». In *Université Médicale Virtuelle Francophone* [En ligne]. [consulté le 19 juin 2018]. <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap6/site/html/cours.pdf>
- Delannée C. 2011 : Delannée C. *L'aluminium dans les musées Mission de repérage d'objets constitués d'aluminium au sein de collections publiques françaises*. Rapport de stage pour l'Institut pour l'Histoire de l'Aluminium, Aras, 2011, *non publié*.
- Degrigny, 2009b : Degrigny, Christian. « Les techniques électrochimiques en conservation-restauration. Du transfert de compétence au développement de nouveaux procédés ». *L'actualité chimique*, n°327-328, 2009, p.2.
- Din-Stirbu Elena 2005 [En ligne] : Din-Stirbu Elena « Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage ». In *Insa Lyon* [En ligne]. Thèse de doctorat : Université de Pitesti, Roumanie et Institut National



des Science Appliquées, Lyon, 2005 [consulté le 10 juin 2018]. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005ISAL0104/these.pdf>

Dupayrat Marc, 2017 : Dupayrat, Marc. Support du cours «Méthode d'analyse par fluorescence des Rayons X», avril 2017, *non publié*.

Durou Aude 2006 : Durou Aude. *Bijoux nomades : le paysage aux sources de l'inspiration*. Aubanel, Paris, 2006.

Gabus Jean, 1958 : Gabus Jean. *Au Sahara : Arts et symboles*. La Baconnière, Neuchâtel, 1958.

Gandon Ruiz S. 2014 : Gandon Ruiz S. « L'aluminium dans les musées d'arts décoratifs France, Royaume-Uni, Belgique, Etas-Unis ». In *L'aluminium, matière à création, XIXe – XXe siècles, Colloque final de l'ANR Créalu, Paris 11 et 12 décembre 2014*. ANR, Paris, 2014.

Gardi René, 1970 : Gardi René. *Artisans africains : rencontres et choses vécues en Afrique occidentale*. Editions Sequoia, Paris, 1970.

Hachez-Leroy F, 2002 : Hachez-Leroy F. « Le marché de l'aluminium en Afrique ». In *Persée* [En ligne]. 2004 [consulté le 8 mai 2018]. [http://www.persee.fr/doc/outre\\_1631-0438\\_2002\\_num\\_89\\_334\\_3930?q=aluminium](http://www.persee.fr/doc/outre_1631-0438_2002_num_89_334_3930?q=aluminium)

Hallam David, 1993 : Hallam David. « Finishes on aluminium: a conservation perspective ». In *academia* [En ligne]. 1993 [consulté le 8 mai 2018]. <https://canberra.academia.edu/DavidHallam>

HES-SO, 2016 [En ligne] : HES-SO. « ETICAL ». In *HE-Arc* [En ligne]. 2016 [consulté le 2 mars 2018]. [https://www.he-arc.ch/sites/www.he-arc.ch/files/COR/ProjetsRAD/pagesProjet/projet\\_etical.pdf](https://www.he-arc.ch/sites/www.he-arc.ch/files/COR/ProjetsRAD/pagesProjet/projet_etical.pdf)

Kietega, Jean-Baptiste, 1999 : *La métallurgie lourde du fer au Burkina Faso. Une technologie à l'époque précoloniale*, Jean-Baptist Kietega.

Landolt, 1983 : Landolt, Didier. Corrosion et protection des métaux. Cours pour ingénieurs en science des matériaux. Département des matériaux. Ecole Polytechnique de Lausanne, 1983, p.6 (non publié).

Micorr, 2016 [En ligne] : Micorr. « Manual ». In *Micorr* [En ligne]. 2016 [consulté le 29 janvier 2018]. <https://micorr.org/manual/>

Persson Dan, 2004 [En ligne] : Persson Dan. « In Situ Studies of the Initiation and Propagation of Filiform Corrosion on Aluminum ». In *Academia*. [En ligne]. 2004 [consulté le 8 mai 2018]. [https://www.academia.edu/18913201/In\\_Situ\\_Studies\\_of\\_the\\_Initiation\\_and\\_Propagation\\_of\\_Filiform\\_Corrosion\\_on\\_Aluminum](https://www.academia.edu/18913201/In_Situ_Studies_of_the_Initiation_and_Propagation_of_Filiform_Corrosion_on_Aluminum)

NORAN Instruments, 1999 [En ligne] : NORAN Instruments, «Energy-dispersive X-ray microanalysis : An introduction». In *Noran*. [En ligne]. Middleton, Wisconsin, 1999. [consulté le 17 mai 2018]. <http://pedagogie84.pagesperso-orange.fr/orfevre.htm>

Vincent Mathieu, 2017 [En ligne] : Vincent, Mathieu. « Le spectromètre de Fluorescence X à dispersion de longueur d'onde ». In *docplayer* [En ligne]. 2017 [consulté le 9 mai 2018]. <http://docplayer.fr/45648828-Le-spectrometre-de-fluorescence-x-a-dispersion-de-longueur-d-onde.html>

Ville de Neuchâtel, 1971 [En ligne] : Ville de Neuchâtel. « Bibliothèque et musée ». In *Rerodoc*. [En ligne]. Neuchâtel, 1971 [Consulté le 29.05.2018]. [http://doc.rero.ch/record/20285/files/BPUN\\_PU494\\_1971.pdf](http://doc.rero.ch/record/20285/files/BPUN_PU494_1971.pdf)

Rocca Emmanuel & all, 2008 : Rocca Emmanuel & all « Etude de la corrosion des matériaux du patrimoine aéronautique en aluminium ». *Techne*, hors-série, 2008, pp. 43-49.

Scholl Marie-Jeanne, 2013 [En ligne] : Scholl Marie-Jeanne. «Caractérisation des plaques d'identification militaires en zinc provenant du site de Carspach (Alsace, Haut-Rhin, F) ». In *Rero Doc* [En ligne]. Mémoire de bachelor : Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel, 2013 [consulté le 9 mai 2018]. [http://doc.rero.ch/record/277808/files/2013\\_BA-SchollMarie-JeannePlaquesMilitairesZinc.pdf](http://doc.rero.ch/record/277808/files/2013_BA-SchollMarie-JeannePlaquesMilitairesZinc.pdf)

Séverin Tierce, 2006 : Séverin Tierce. « Etude de la corrosion des alliages d'aluminium brasés constituant les échangeurs thermiques utilisés dans les véhicules automobiles ». In *INP-Toulouse* [En ligne]. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2006 [consulté le 18 juin 2018]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000308/01/tierce.pdf>

## 16 Liste des figures

Figure 1 : Une partie de la collection du MEN rapportée par Jean Gabus, ©C. Despland, HE-Arc .....	9
Figure 2 : Objets en aluminium provenant du MKB. ©C. Despland, HE-Arc .....	10
Figure 3 : Dessin d'un bijoutier du Sahel par Hans Erni, ©Gabus Jean, 1982.....	10
Figure 4 : Aspect blanc de l'aluminium, ©C. Despland, HE-Arc .....	16
Figure 5 : Aspect dans les rayures, ©C. Despland, HE-Arc .....	16
Figure 6 : Produit de corrosion de l'aluminium généralisé, ©C. Despland, HE-Arc .....	16
Figure 7 : Schéma représentant le matériel utilisé pour l'analyse DiscoveryMat, ©C. Despland, HE-Arc .....	18
Figure 8 : Positionnement de la pince crocodile, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	20
Figure 9 : Insertion de la goutte, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	20
Figure 10 : Visualisation de la goutte, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	20
Figure 11 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium, ©Atlas de Pourbaix.....	21
Figure 12 : Diagramme de Pourbaix simplifié de l'aluminium avec représentation des solutions utilisées, ©C. Despland, HE-Arc .....	21
Figure 13 : Schéma simplifié d'un tube générateur de rayons X, © Asma Khalide an all, 2011.....	22
Figure 14 : Enceinte d'analyse FRX et visuel de l'exploitation par ordinateur, ©C. Despland, HE-Arc.	23
Figure 15 : Dépôt exogène, ©C. Despland, HE-Arc.....	24
Figure 16 : Déformation de la partie en aluminium, ©C. Despland, HE-Arc .....	24
Figure 17 : Traces d'usures, ©C. Despland, HE-Arc .....	24
Figure 18 : Produit de corrosion de l'aluminium généralisé, ©C. Despland, HE-Arc .....	25
Figure 19 : corrosion filiforme sur une parure de culte vaudou, Bénin, 1920-1940, Musée Africain de Lyon, ©L. Antoine .....	25
Figure 20 : Corrosion galvanique aluminium acier, ©Aluconsult.....	26
Figure 21 : Aspect brillant, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	26
Figure 22 : Aspect satiné, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	26
Figure 23 : Aspect mat-satiné, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	26
Figure 24 : Aspect brillant, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	26
Figure 25 : Valeur la plus claire, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	26
Figure 26 : Valeur légèrement plus foncée, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	26
Figure 27 : Valeur plus foncée, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	26
Figure 28 : Valeur la plus foncée, ©C. Degrigny, HE-Arc.....	26
Figure 29 : Exemples de tracés chaotiques de suivi du potentiel de corrosion en milieu KNO <sub>3</sub> , ©C. Despland, HE-Arc .....	29
Figure 30 : Tests avec une nouvelle électrode, ©C. Despland, HE-Arc .....	30
Figure 31 : Comparaison corps 76.2.13b et base de données enrichie (KNO <sub>3</sub> violet, Evian Vert ; NaSeq jaune), ©C. Billat, HE-Arc .....	34

Figure 32 : Spectre FRX de l'extrémité 1 et du centre de l'objet 76.2.13a, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	36
Figure 33 : Spectre FRX de l'extrémité TJA et de l'extrémité 76.2.13b, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	40
Figure 34 : Dépôt exogènes dans les interstices, objet 76.2.13a, ©C. Despland, HE-Arc .....	41
Figure 35 : Dépôt brunâtre et uniforme, objet IVc 11021, ©C. Despland, HE-Arc .....	41
Figure 36 : Déformation de la pointe de l'objet III 25730, ©C. Despland, HE-Arc .....	42
Figure 37 : Corrosion par piqures, ©C. Despland, HE-Arc.....	43
Figure 38 : Corrosion par piqure généralisée, ©C. Despland, HE-Arc .....	43
Figure 39 : Gros plan, corrosion par piqure généralisée, ©C. Despland, HE-Arc.....	43
Figure 40 : 71.6.151, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	63
Figure 41 : 71.6.151, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	63
Figure 42 : 71.6.152, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	63
Figure 43 : 71.6.152, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	63
Figure 44 : 71.6.191, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	63
Figure 45 : 71.6.191, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	63
Figure 46 : 71.6.254, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 47 : 71.6.254, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 48 : 71.6.255, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 49 : 71.6.255, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 50 : 71.6.257, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 51 : 71.6.257, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 52 : 71.6.258, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 53 : 71.6.258, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	64
Figure 54 : 71.6.259, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 55 : 71.6.259, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 56 : 71.6.261, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 57 : 71.6.261, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 58 : 76.2.13a-b, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 59 : 76.2.13a-b, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 60 : 76.2.14a-b, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 61 : 76.2.14a-b, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	65
Figure 62 : 09.26.2, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 63 : 09.26.2, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 64 : 09.26.3, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 65 : 09.26.3, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 66 : 09.26.4, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 67 : 09.26.4, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 68 : 09.26.5, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	66

Figure 69 : 09.26.5, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	66
Figure 70 : 09.26.26, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 71 : 09.26.26, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 72 : 09.26.28, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 73 : 09.26.28, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 74 : 09.26.29, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 75 : 09.26.29, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 76 : 09.26.34, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 77 : 09.26.34, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	67
Figure 78 : 71.6.322, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 79 : III 22988, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 80 : III 22988, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 81 : III 22989, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 82 : III 22989, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 83 : III 23119, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 84 : III 23119, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	68
Figure 85 : III 23424, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 86 : III 23424, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 87 : III 23425, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 88 : III 23425, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 89 : III 23426, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 90 : III 23426, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 91 : III 25730, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 92 : III 25730, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	69
Figure 93 : III 25730, détaille 1, ©C. Despland, HE-Arc.....	70
Figure 94 : III 25730, détaille 2, ©C. Despland, HE-Arc.....	70
Figure 95 : IVc 11021, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	70
Figure 96 : IVc 11021, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	70
Figure 97 : IVc 11022, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	70
Figure 98 : IVc 11022, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc .....	70
Figure 99 : IVc 11023, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc .....	70
Figure 100 : IVc 11023, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc.....	70
Figure 101 : Analyse FRX objet 71.6.151, ©C. Despland, HE-Arc.....	103
Figure 102 : Analyse FRX objet 71.6.152, ©C. Despland, HE-Arc.....	103
Figure 103 : Analyse FRX objet 71.6.254, ©C. Despland, HE-Arc.....	103
Figure 104 : Analyse FRX objet 71.6.255, ©C. Despland, HE-Arc.....	103
Figure 105 : Analyse FRX objet 71.6.257, ©C. Despland, HE-Arc.....	103

Figure 106 : Analyse FRX objet 71.6.258, ©C. Despland, HE-Arc.....	104
Figure 107 : Analyse FRX objet 71.6.259, ©C. Despland, HE-Arc.....	104
Figure 108 : Analyse FRX objet 71.6.260, ©C. Despland, HE-Arc.....	104
Figure 109 : Analyse FRX objet 71.6.261, ©C. Despland, HE-Arc.....	104
Figure 110 : Analyse FRX objet 76.2.14.a, ©C. Despland, HE-Arc.....	104
Figure 111 : Analyse FRX objet 76.2.14.b, ©C. Despland, HE-Arc.....	105
Figure 112: Analyse FRX objet 76.2.13.a, ©C. Despland, HE-Arc.....	105
Figure 113 : Analyse FRX objet 76.2.13.b, ©C. Despland, HE-Arc.....	105
Figure 114 : Analyse FRX objet TJA, ©C. Despland, HE-Arc .....	105
Figure 115 : Analyse FRX objet 71.6.191, ©C. Despland, HE-Arc.....	106
Figure 116 : Analyse FRX objet 09.26.29, ©C. Despland, HE-Arc.....	106
Figure 117 : Analyse FRX objet 71.6.322, ©C. Despland, HE-Arc.....	106
Figure 118 : Analyse FRX objet III 23425, ©C. Despland, HE-Arc.....	106
Figure 119 : Analyse FRX objet III 22988, ©C. Despland, HE-Arc.....	106
Figure 120 : Analyse FRX objet III 22989, ©C. Despland, HE-Arc.....	107
Figure 121 : Analyse FRX objet III 23119, ©C. Despland, HE-Arc.....	107
Figure 122 : Analyse FRX objet III 23242, ©C. Despland, HE-Arc.....	107
Figure 123 : Analyse FRX objet III 23426, ©C. Despland, HE-Arc.....	107
Figure 124 : Analyse FRX objet III 25730, ©C. Despland, HE-Arc.....	107
Figure 125 : Analyse FRX objet IVc 11021_vue 1, ©C. Despland, HE-Arc.....	108
Figure 126 : Analyse FRX objet IVc 11021_vue 2, ©C. Despland, HE-Arc.....	108
Figure 127 : Analyse FRX objet IVc 11022_vue 1, ©C. Despland, HE-Arc.....	108
Figure 128 : Analyse FRX objet IVc 11022_vue 2, ©C. Despland, HE-Arc.....	108
Figure 129 : Analyse FRX objet IVc 11023_vue1, ©C. Despland, HE-Arc.....	109
Figure 130 : Analyse FRX objet IVc 11023_vue 2, ©C. Despland, HE-Arc.....	109
Figure 131 : Spectre FRX de l'objet 71.6.156, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	110
Figure 132 : Spectre FRX de l'objet 71.6.257, ©C. Degrigny, HE-Arc .....	110

## 17 Liste des graphiques

Graphique 1 : Tracés de tous les alliages testés dans la solution de KNO <sub>3</sub> , ©C. Despland, HE-Arc....	37
Graphique 2 : Tracés de tous les alliages testés dans la solution Evian, ©C. Despland, HE-Arc.....	37

## 18 Liste des tableaux

Tableau 1 : Histoire de l'aluminium .....	11
Tableau 2 : Alliages d'aluminium les plus courants .....	12
Tableau 3 : Alliages d'aluminium corroyés .....	13
Tableau 4 : Alliages d'aluminium coulés .....	13
Tableau 5 : Potentiel de corrosion* de différents métaux .....	14
Tableau 6 : Minéraux d'aluminium et produit de corrosion, Selwyn L., 2004, p.50.....	14
Tableau 7 : Critères visuels d'identification de l'aluminium.....	16
Tableau 8 : Autres critères d'identification .....	17
Tableau 9 : Description des étapes pour l'analyse DiscoveryMat .....	19
Tableau 10 : Altérations physiques de l'aluminium .....	24
Tableau 11 : Altérations chimiques de l'aluminium .....	25
Tableau 12 : Aspect de surface de l'aluminium .....	26
Tableau 13 : Echelle de valeurs .....	26
Tableau 14 : Résultats des examens sensoriels.....	28
Tableau 15 : Récapitulatif des sources probables entraînant les erreurs DiscoveryMat.....	29
Tableau 16 : Exemple modifié d'une fiche descriptive .....	31
Tableau 17 : Comparaison composition DiscoveryMat (base de données constituée de 23 matériaux) et composition FRX.....	33
Tableau 18 : Comparaison composition DiscoveryMat (base de données enrichie) et composition FRX .....	34
Tableau 19 : Moyenne des compositions FRX .....	38
Tableau 20 : Altérations physiques .....	41
Tableau 21 : Altérations chimiques .....	42

## 19 Listes des abréviations

HE-Arc :	Haute Ecole Arc
MEN :	Musée d'ethnographie de Neuchâtel
MKB :	Museum der Kulturen Basel
UR-Arc CR :	Unité de Recherche ARC Conservation-Restauration

# Annexes





## 20 Glossaire

Alliage :	Mélange qui contient au moins un élément chimique métallique. <sup>31</sup>
Alliage propre :	Alliage ne contenant pas d'élément additionnel.
Anode :	Electrode présent où se passent les réactions d'oxydation. <sup>32</sup>
Cathode :	Electrode présent où se passent les réactions de réduction. <sup>33</sup>
Corrosion :	Procédé électrochimique qui consiste en un transfert d'électron au cours d'une réaction simultanée d'oxydoréduction. <sup>34</sup>
Cuivre rouge :	Ancien terme désignant le cuivre
Cuivre jaune :	Ancien terme employé pour désigner un alliage de laiton
Duralumin :	« <i>Le Duralumin contient du cuivre, du magnésium et du manganèse. Après chauffage à haute température, il subit une trempe à l'eau froide et un vieillissement à température ambiante, ce qui lui confère une résistance analogue à celle des aciers.</i> » <sup>35</sup>
Electrode :	Conducteur qui est en contact avec un électrolyte ou milieu conducteur. C'est par l'électrode que le courant passe. <sup>36</sup>
Faisceau primaire :	« <i>Rayonnement émis par le tube à rayons-X</i> ». <sup>37</sup>
Limitos :	Interface formant la limite entre l'environnement et les matériaux constitutifs de l'objet au moment où l'objet cesse d'être en utilisation. <sup>38</sup>
Passivation :	Le métal se recouvre d'un film passif, une couche mince d'oxydes ou d'autres composés, qui le protège en le séparant du milieu environnant et de l'électrolyte. <sup>39</sup>
Potentiel de corrosion :	Potentiel d'électrode d'une surface d'un métal en état de corrosion plongée dans un électrolyte. <sup>40</sup>
Réaction d'oxydation :	Réaction chimique caractérisé par le fait que les composants perdent des électrons. L'état d'oxydation est augmenté. <sup>41</sup>
Réaction de réduction :	Réaction chimique caractérisé par le fait que les composants acquièrent des électrons. L'état d'oxydation est diminué. <sup>42</sup>
Spot-test :	analyses chimiques qualitatives, mais non quantitatives, des éléments. <sup>43</sup>

---

<sup>31</sup> Selwyn L., 2004, p.5.

<sup>32</sup> Ibidem, p.21.

<sup>33</sup> Ibidem.

<sup>34</sup> Ibidem.

<sup>35</sup> Larousse, 2018 [en ligne].

<sup>36</sup> Selwyn L., 2004, p.21.

<sup>37</sup> Granget Elodie, 2017, p.7.

<sup>38</sup> Bertholon, 2000, p.35.

<sup>39</sup> Fontaine Celia, p. 97.

<sup>40</sup> Selwyn L., 2004, p.22.

<sup>41</sup> Ibidem, p.21.

<sup>42</sup> Ibidem.

<sup>43</sup> Fontaine Celia, p.26.

## 21 Annexe photographique



Figure 40 : 71.6.151, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 41 : 71.6.151, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 42 : 71.6.152, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 43 : 71.6.152, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 44 : 71.6.191, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 45 : 71.6.191, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 46 : 71.6.254, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 47 : 71.6.254, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 48 : 71.6.255, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 49 : 71.6.255, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 50 : 71.6.257, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 51 : 71.6.257, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 52 : 71.6.258, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 53 : 71.6.258, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 54 : 71.6.259, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 55 : 71.6.259, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 56 : 71.6.261, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 57 : 71.6.261, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 58 : 76.2.13a-b, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 59 : 76.2.13a-b, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 60 : 76.2.14a-b, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 61 : 76.2.14a-b, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc





Figure 62 : 09.26.2, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 63 : 09.26.2, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 64 : 09.26.3, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 65 : 09.26.3, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 66 : 09.26.4, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 67 : 09.26.4, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 68 : 09.26.5, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 69 : 09.26.5, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 70 : 09.26.26, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 71 : 09.26.26, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 72 : 09.26.28, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 73 : 09.26.28, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 74 : 09.26.29, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 75 : 09.26.29, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 76 : 09.26.34, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 77 : 09.26.34, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 78 : 71.6.322, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 79 : III 22988, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 80 : III 22988, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 81 : III 22989, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 82 : III 22989, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 83 : III 23119, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 84 : III 23119, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc





Figure 85 : III 23424, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 86 : III 23424, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 87 : III 23425, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 88 : III 23425, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 89 : III 23426, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 90 : III 23426, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 91 : III 25730, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 92 : III 25730, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc





Figure 93 : III 25730, détail 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 94 : III 25730, détail 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 95 : IVc 11021, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 96 : IVc 11021, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 97 : IVc 11022, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 98 : IVc 11022, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc

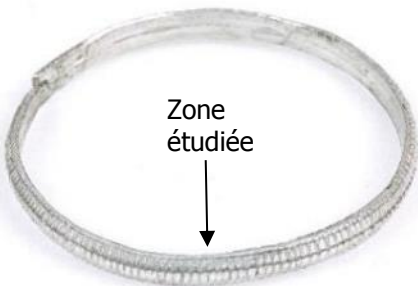


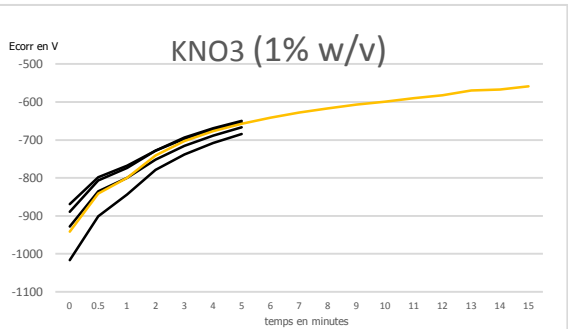
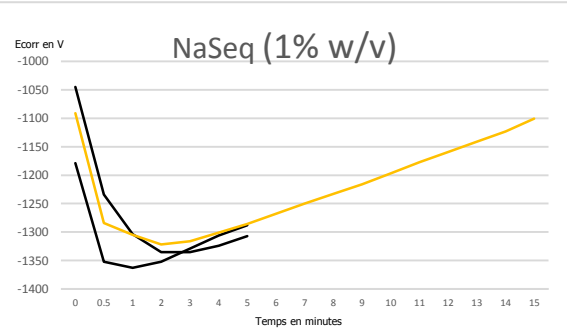
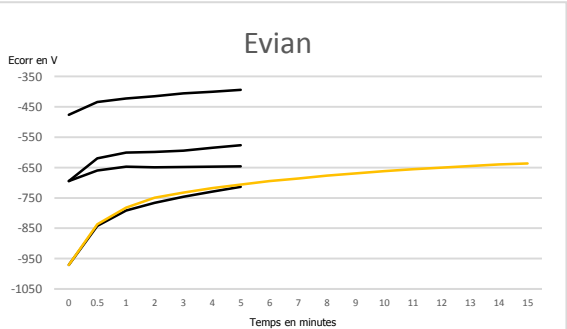


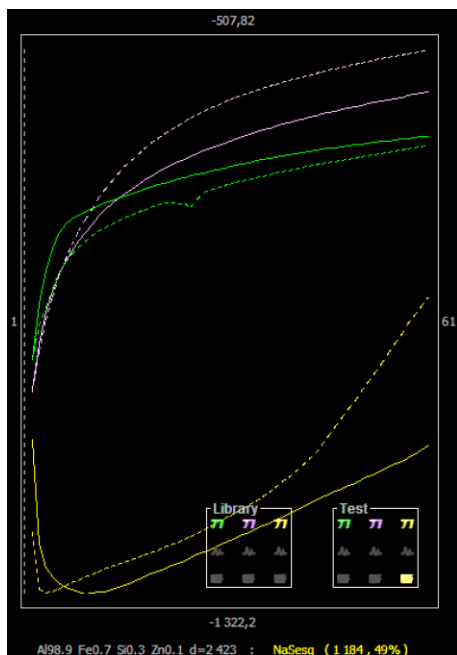
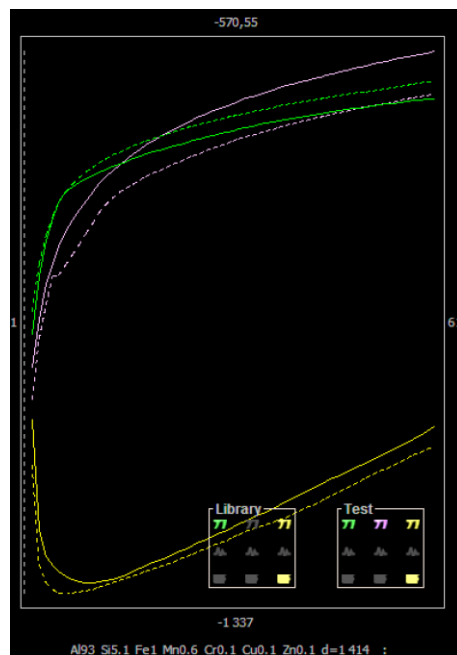
Figure 99 : IVc 11023, vue générale 1, ©C. Despland, HE-Arc



Figure 100 : IVc 11023, vue générale 2, ©C. Despland, HE-Arc




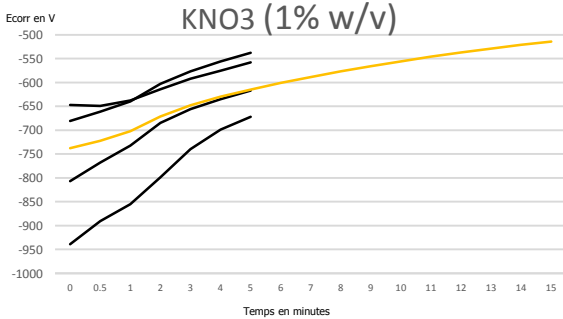
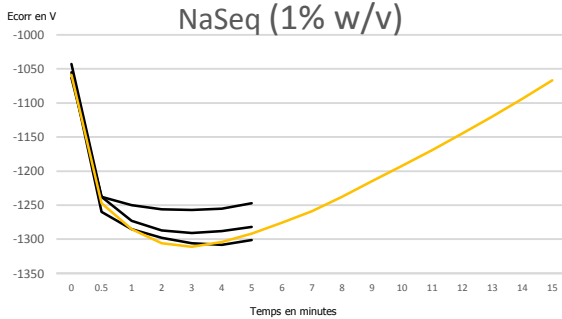
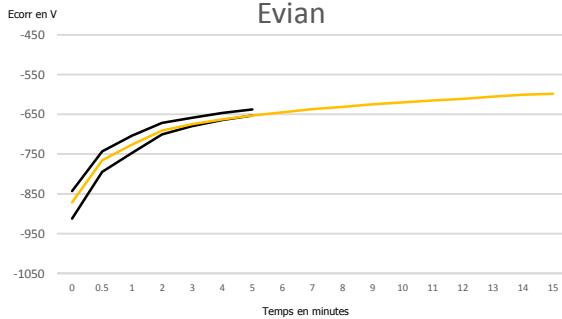
## 22 Analyse tracés DiscoveryMat

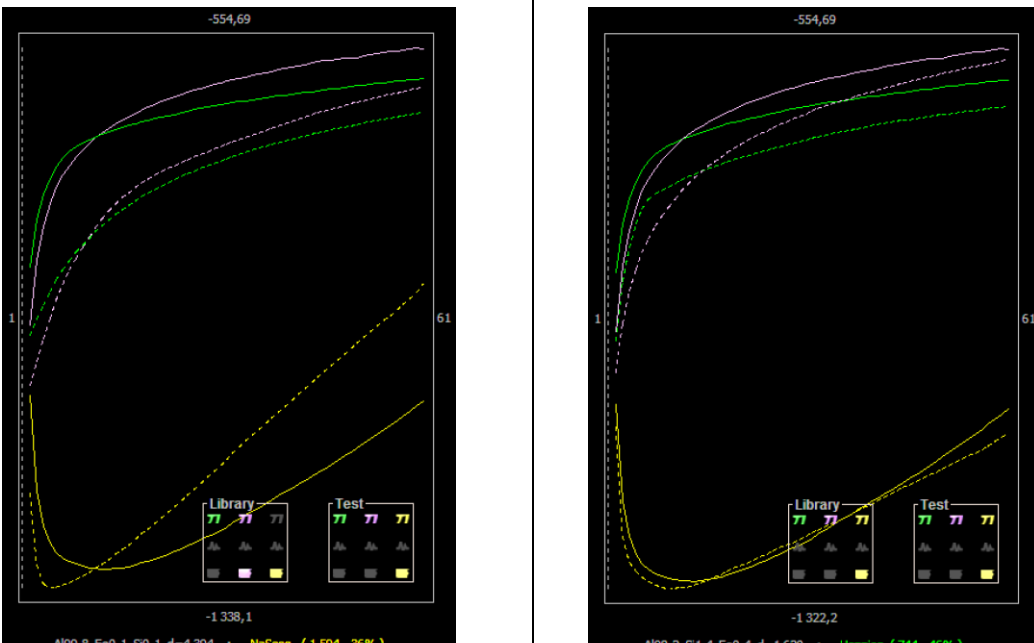
71.6.257		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 98.2 ; Si 1.4 ; Fe 0.4	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
		




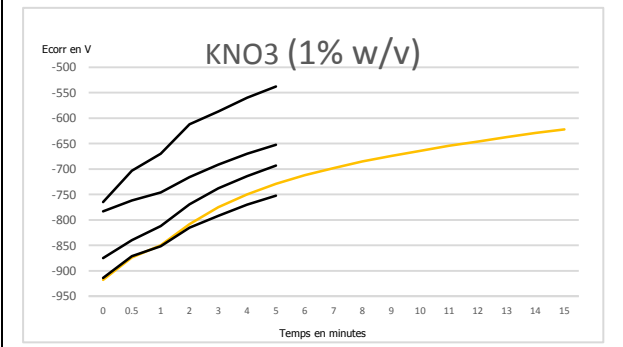
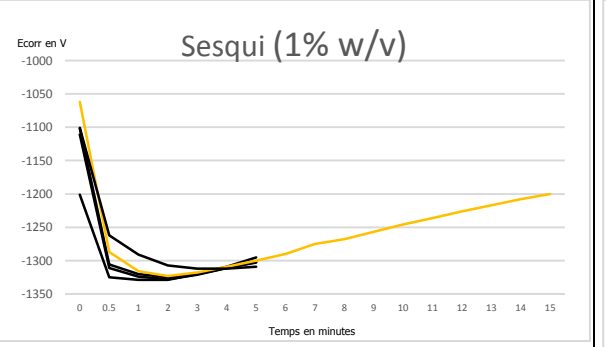
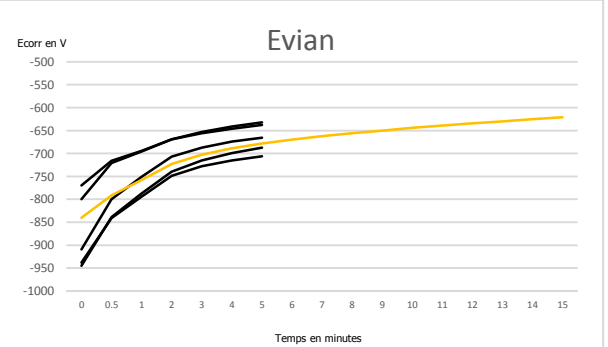
Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 98.9 ; Fe 0.7 ; Si 0.3 ; Zn 0.1	2 423	Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de NaSeq s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2)  Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 414), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 98.2 ; Si 1.4 ; Fe 0.4  La composition donnée par l'analyse FRX ne donne pas de Mn, Cr, Cu et Zn. Etant présent en faible quantité dans la composition proposée par DiscoveryMat (0.1%-0.6%), on peut supposer que cela n'influence pas suffisamment les tracés, mais suite au problème eu avec l'électrode, les résultats pour cet objet sont à prendre avec une certaine tolérance.
2	Al 93 ; Si 5.1 ; Fe 1 ; Mn 0.6 ; Cr 0.1 ; Cu 0.1 M Zn 0.1	1 414	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
<div></div>		<div></div>	

Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 414), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 98.2 ; Si 1.4 ; Fe 0.4

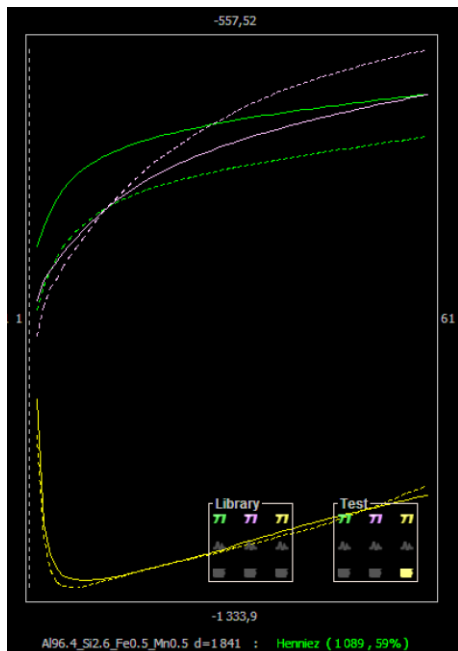
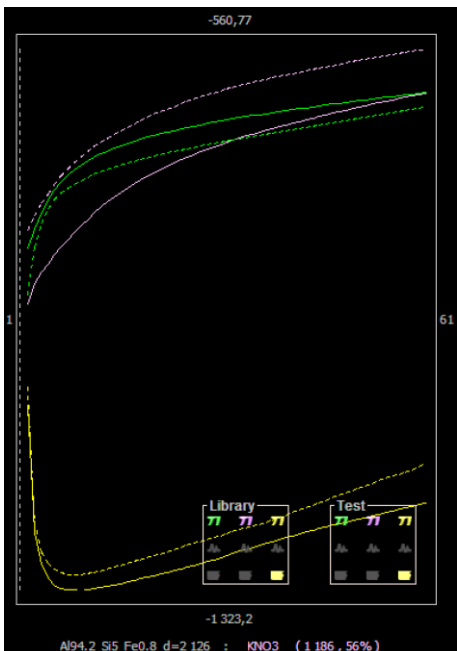
La composition donnée par l'analyse FRX ne donne pas de Mn, Cr, Cu et Zn. Etant présent en faible quantité dans la composition proposée par DiscoveryMat (0.1%-0.6%), on peut supposer que cela n'influence pas suffisamment les tracés, mais suite au problème eu avec l'électrode, les résultats pour cet objet sont à prendre avec une certaine tolérance.


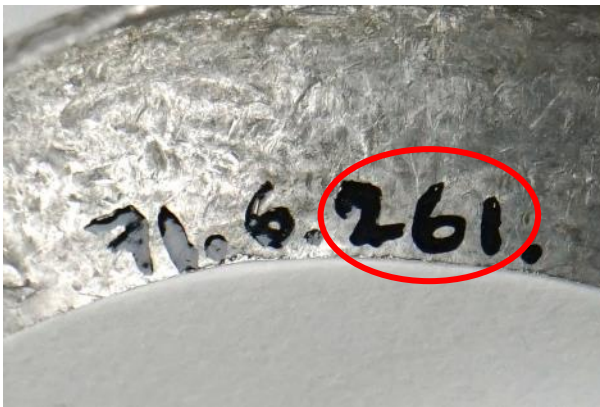

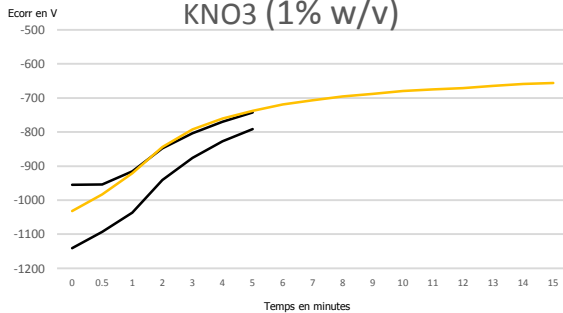
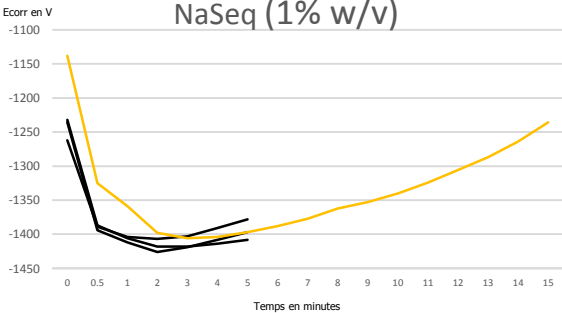
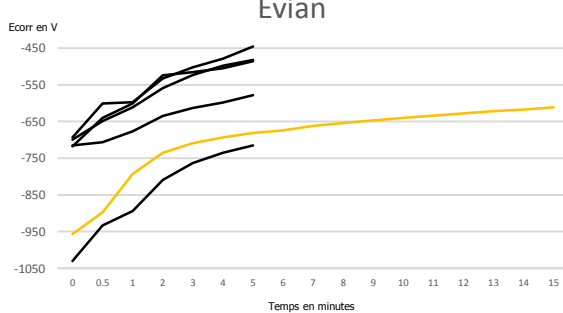
71.6.259		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 97.2 ; Si 2.3 ; Fe 0.5	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	AL 99.8 ; Si 0.1 ; Fe 0.1	4 394
2	Al 98.2 ; Si 1.4 ; Fe 0.4	1 620
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de NaSeq s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles, sauf pour le NaSeq dont le parallélisme n'est pas optimal (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 620), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 97.2 ; Si 2.3 ; Fe 0.5</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>

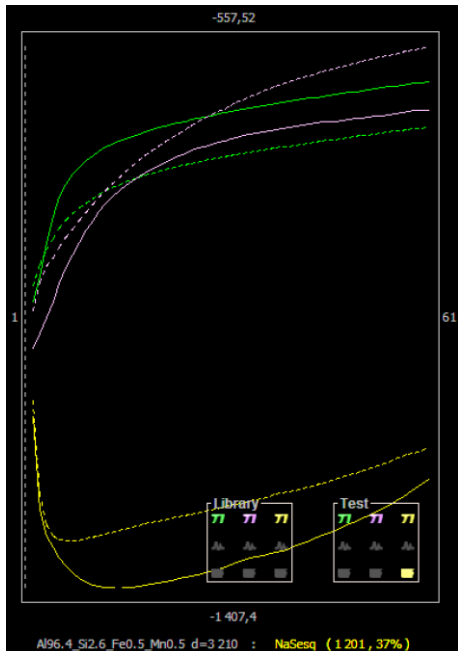
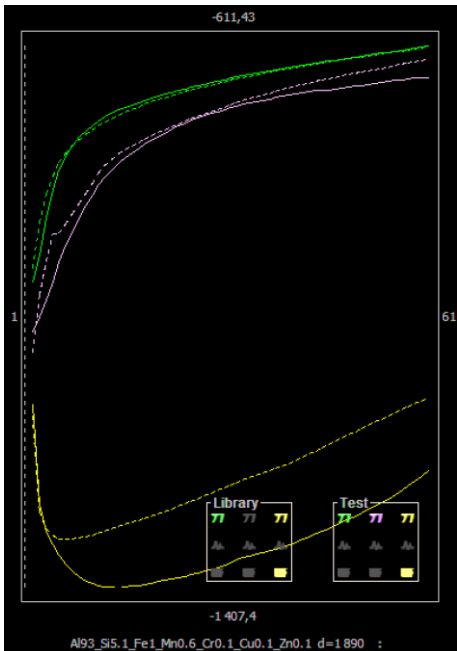
71.6.260		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 95.7 ; Si 3.6 ; Fe 0.7	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
		

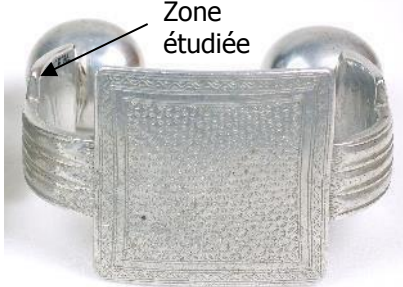
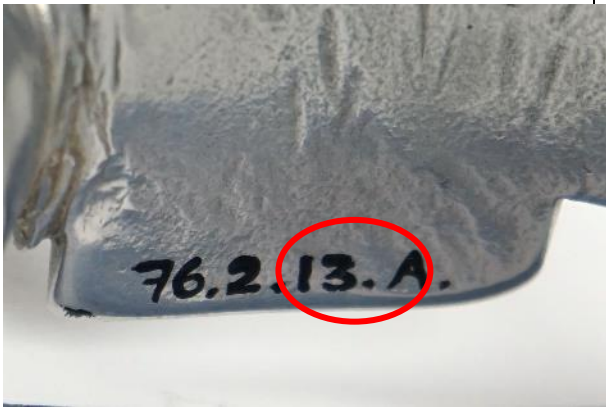
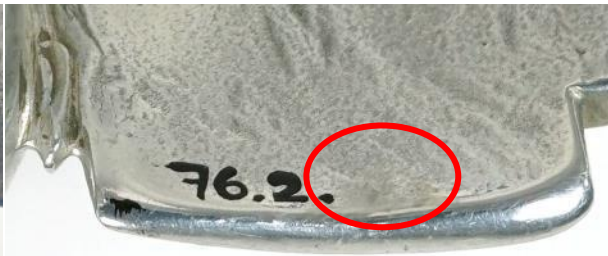
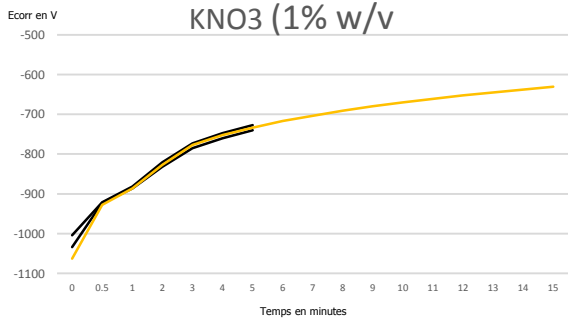
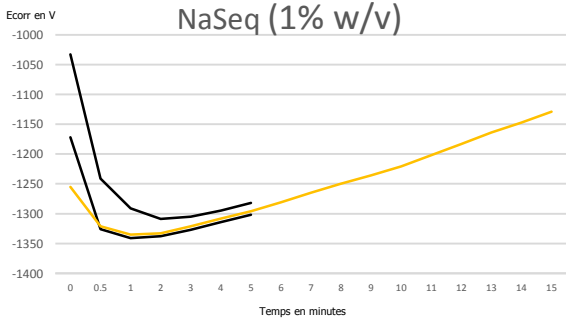
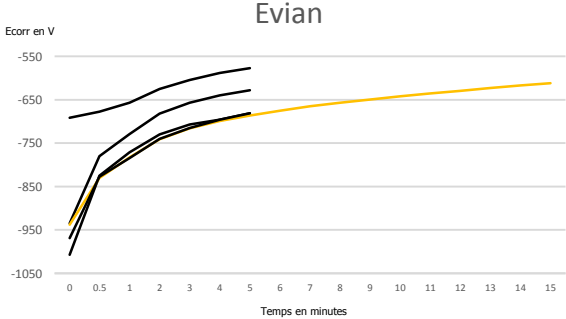


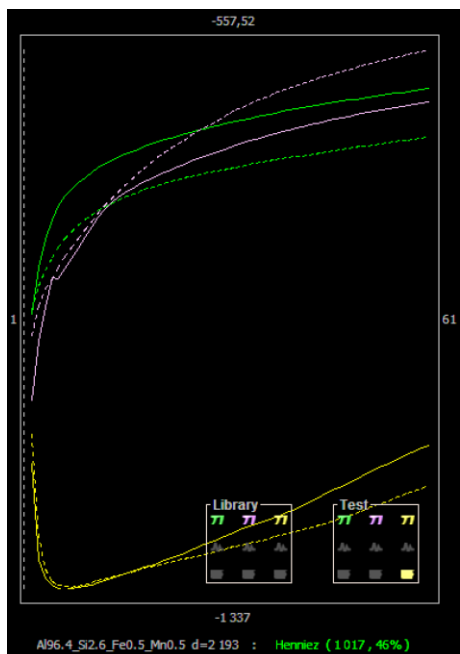
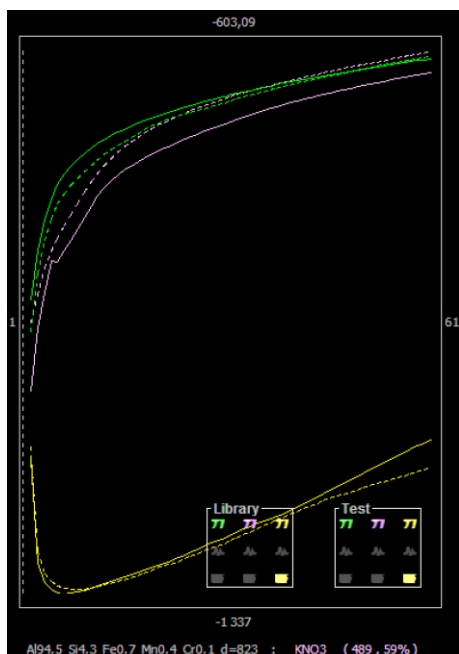
Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 96.4 ; Si 2.6 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	1 841	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (2 126), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 95.7 ; Si 3.6 ; Fe 0.7</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>
2	Al 94.2 ; Si 5 ; Fe 0.8	2 126	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
<div><div></div><div></div></div>			

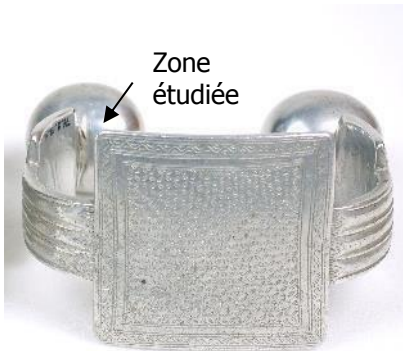


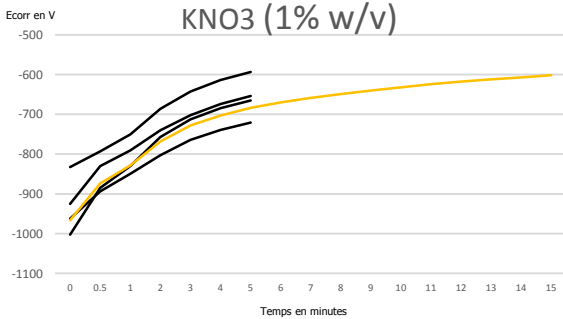
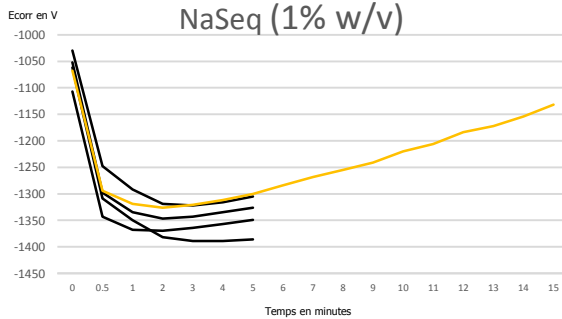
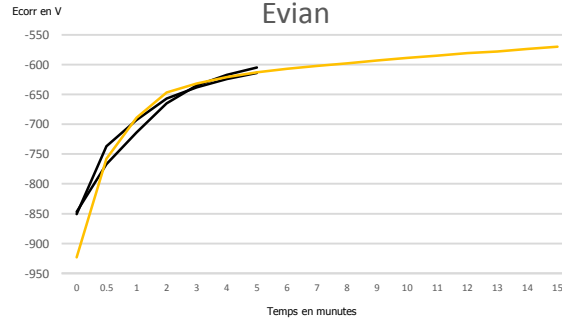
71.6.261		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 92.4 ; Si 7.2 ; Fe 0.4	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

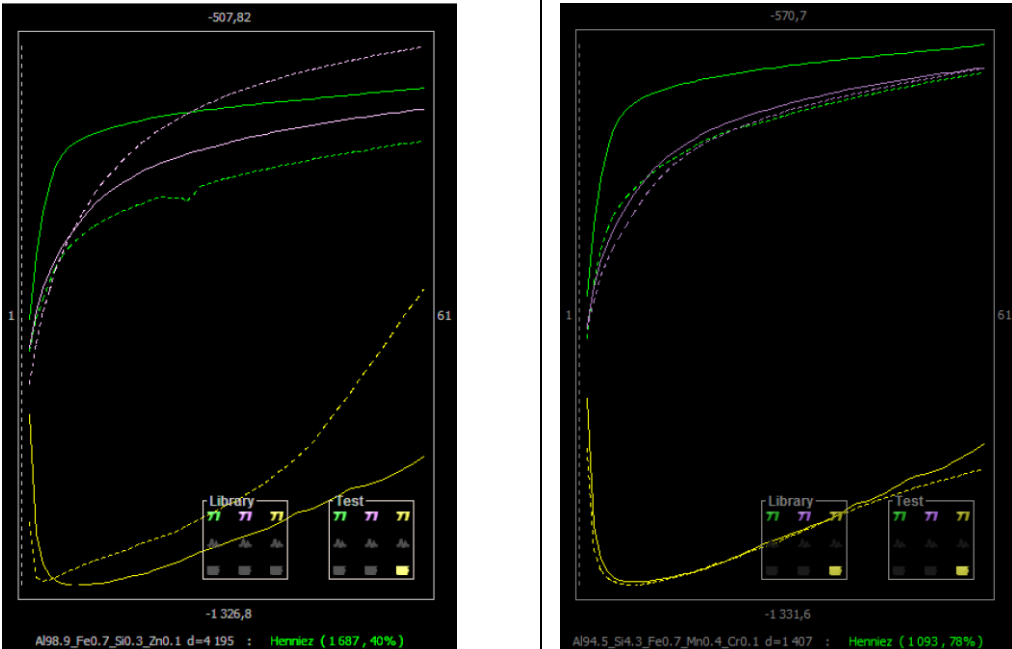



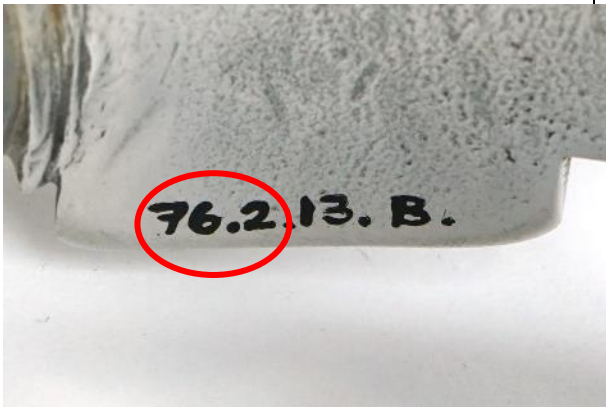

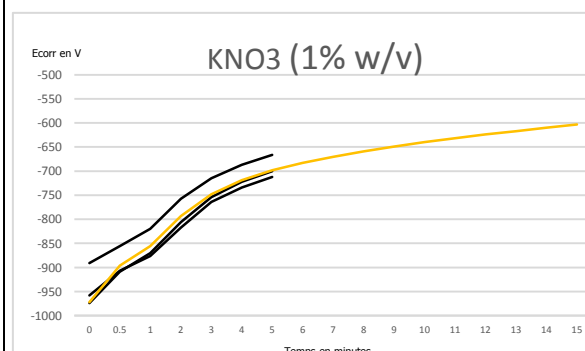
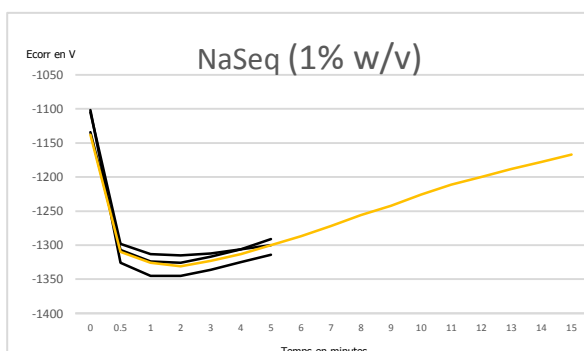
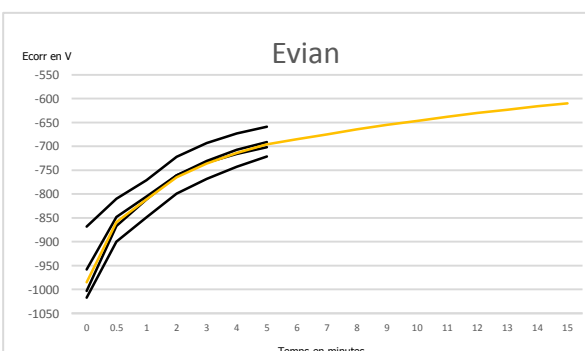
Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 96.4 ; Si 2.6 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	3 210	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1890), nous avons effectué l'analyse FRX (en plusieurs points), la moyenne donne : Al 92.4 ; Si 7.2 ; Fe 0.4</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution, mais donne des éléments supplémentaires (Mn, Cr, Cu et Zn). Le polissage effectué pour cet objet n'a pas pu être optimale.</p>
2	Al 93 ; Si 5.1 ; Fe 1 ; Mn 0.6 ; Cr 0.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.1	1 890	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
<div><div></div><div></div></div>			

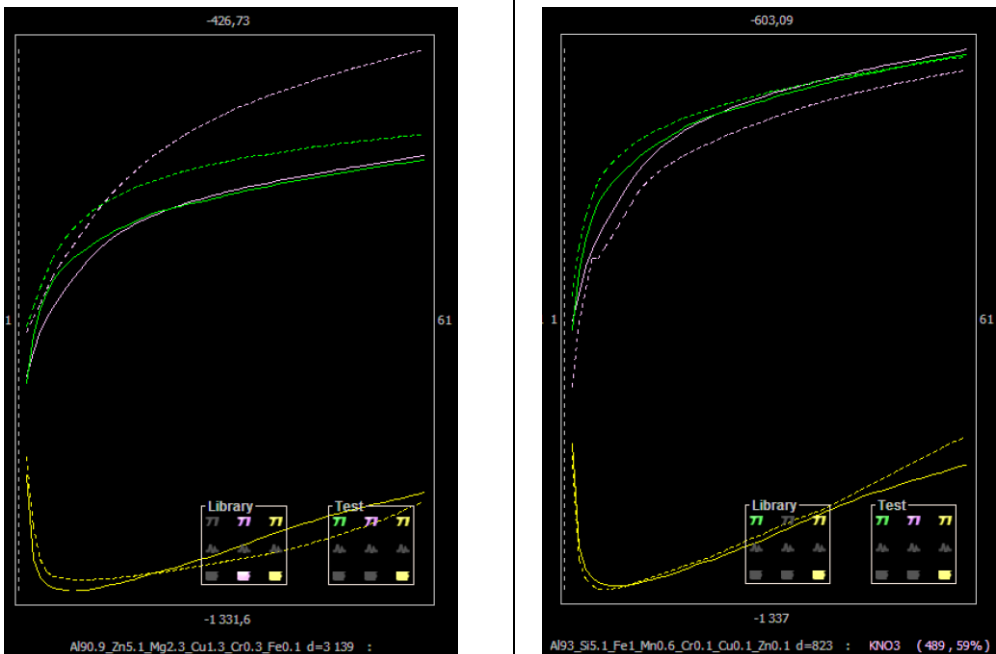
76.2.13a corps		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 93 ; Si 5.1 ; Fe ; 1 ; Mn 0.6 ; Cr 0.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
(1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie)		Distance de similarité	Discussion
1	Al 96.4 ; Si 2.6 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	2 193	
2	Al 94.5 ; Si 4.3 ; Fe 0.7 ; Mn0.4 ; Cr 0.1	823	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 et de NaSeq s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (823), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 93 ; Si 5.1 ; Fe ; 1 ; Mn 0.6 ; Cr 0.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution, mais de donne pas de Zn (0.1%).</p>	
			

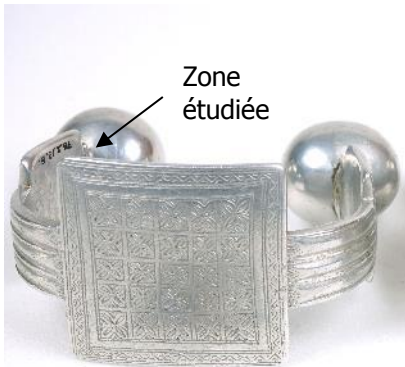


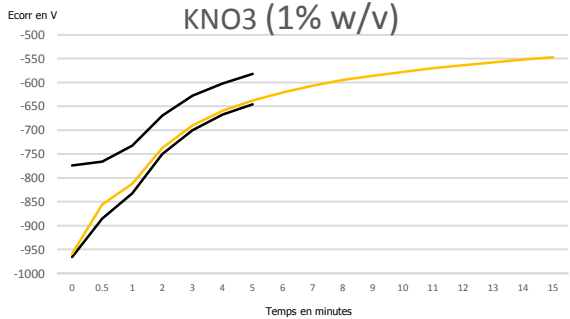
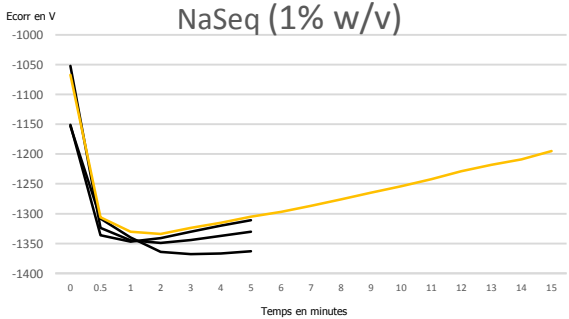
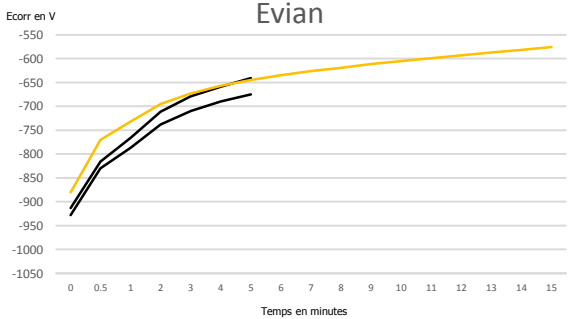
76.2.13a extrémité		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 93.9 ; Si 3.2 ; Mg 2.1 ; Fe 0.4 ; Mn 0.3 ; Cr 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	Al 98.9 ; Si 0.3 ; Fe 0.7 ; Zn 0.1	4 195
2	Al 94.5 ; Si 4.3 ; Fe 0.7 ; Mn 0.4 ; Cr 0.1	1 407
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 et de NaSeq s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 407), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 93.9 ; Si 3.2 ; Mg 2.1 ; Fe 0.4 ; Mn 0.3 ; Cr 0.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution, mais ne donne pas de Mg.</p>

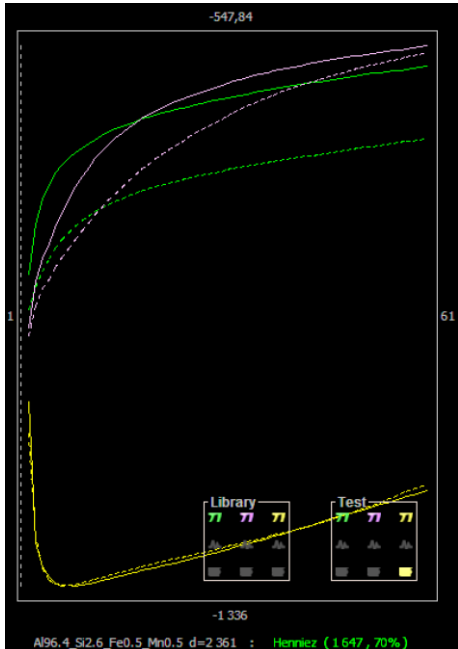
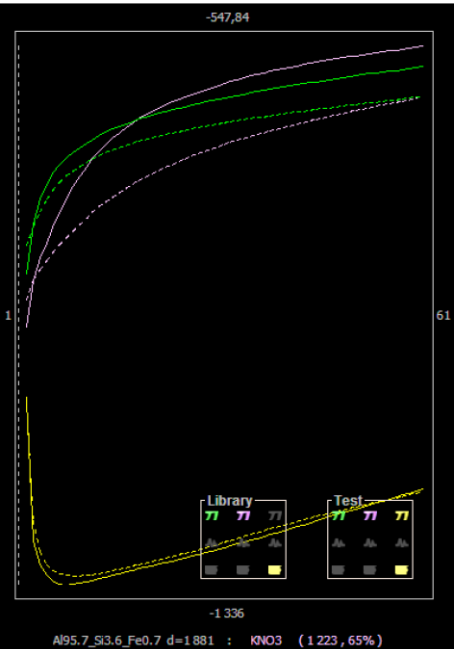
76.2.13b corps		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 94.5 ; si 4.3 ; Fe 0.7 ; Mn 0.4 ; Cr 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 


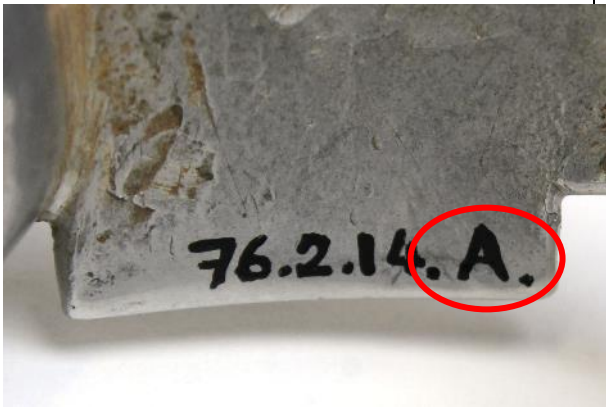
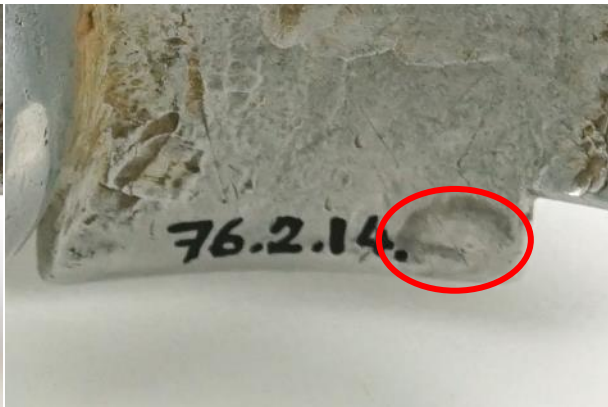
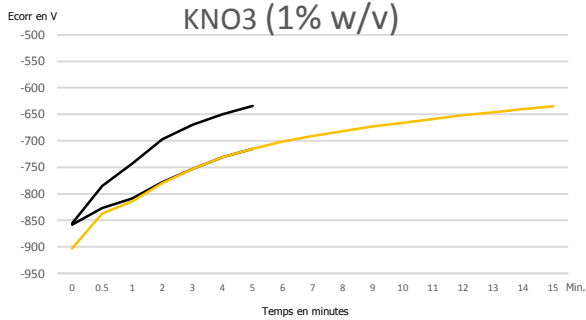
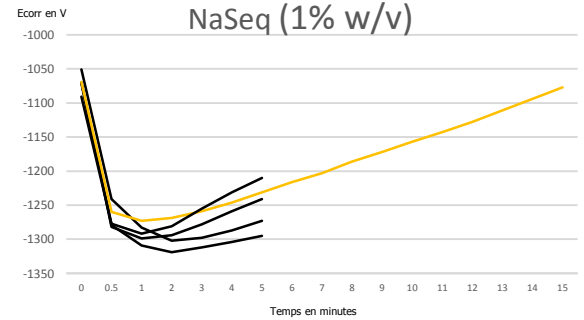
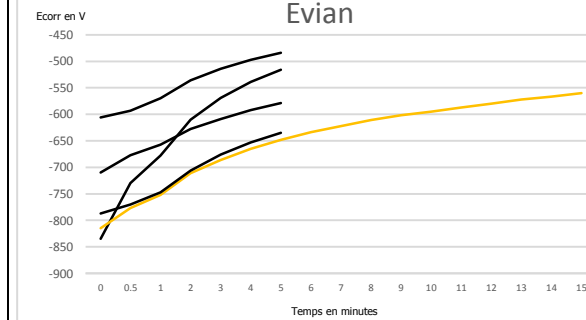
Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	Al 90.9 ; Fe 0.1 ; Cu 0.3 ; Mg 2.3 ; Cr 0.5 ; Zn 5.1	3 139
2	Al 93 ; Si 5.1 ; Fe 1 ; Mn 0.6 ; Cr 0.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.1	823
Graphiques comparatifs entre les tracés du matériau étudié et de ceux des deux matériaux retenus de la base de données (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données contenant les vingt-trois matériaux de base, nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (823), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 94.5 ; Si 4.3 ; Fe 0.7 ; Mn 0.4 ; Cr 0.1.</p> <p>La composition donnée par l'analyse FRX ne donne pas de Cu et de Zn. Etant présent à l'état de trace dans la composition proposée par DiscoveryMat (0.1%), on peut supposer que cela n'influence pas suffisamment les tracés</p>

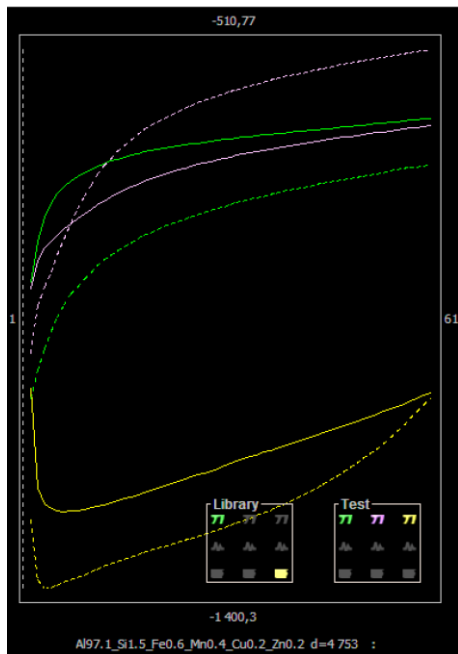
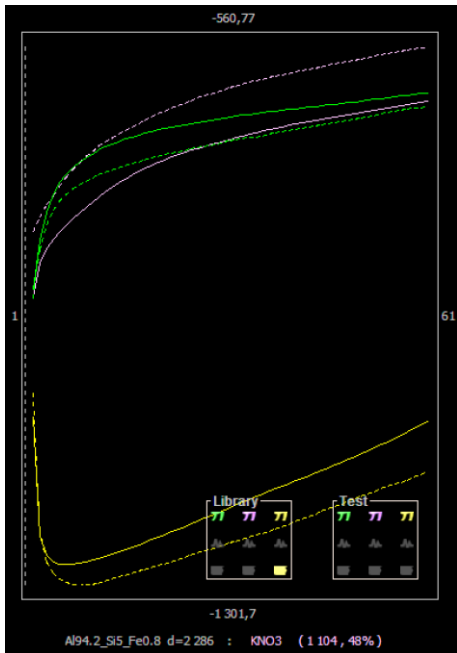


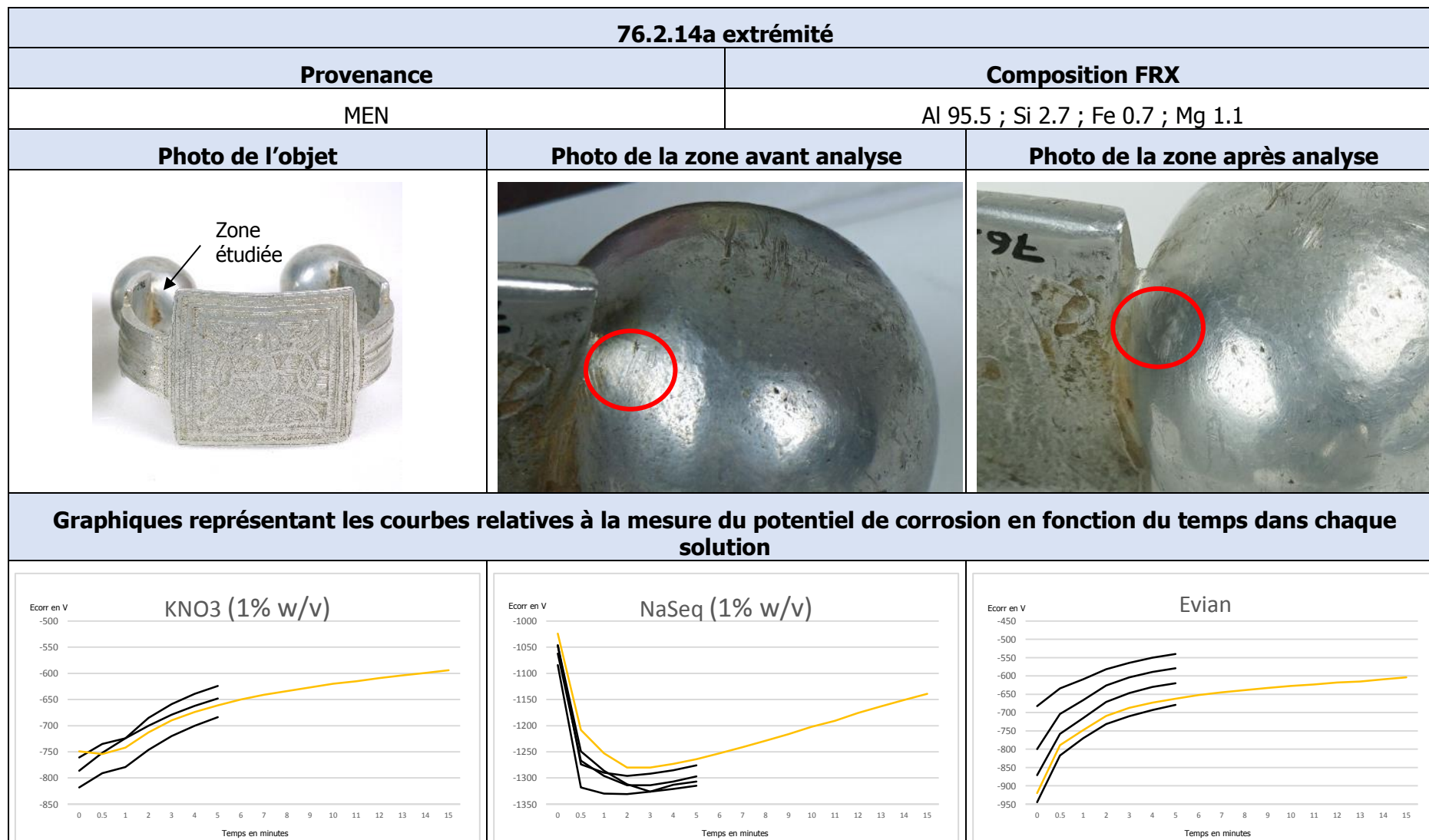
76.2.13b extrémité		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 95.2 ; Mg 2.2 ; Si 1.7 ; Fe 0.4 ; Mn 0.3 ; Cr 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO<sub>3</sub> (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 




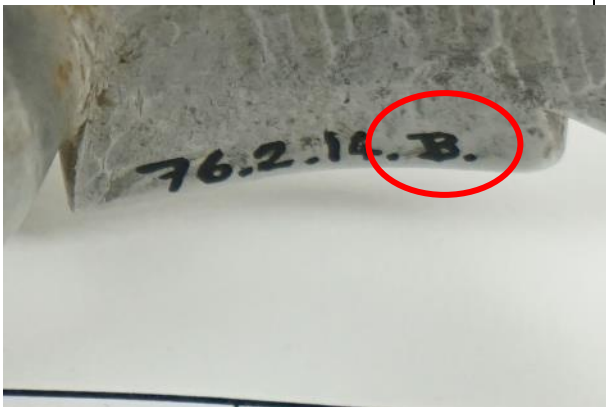
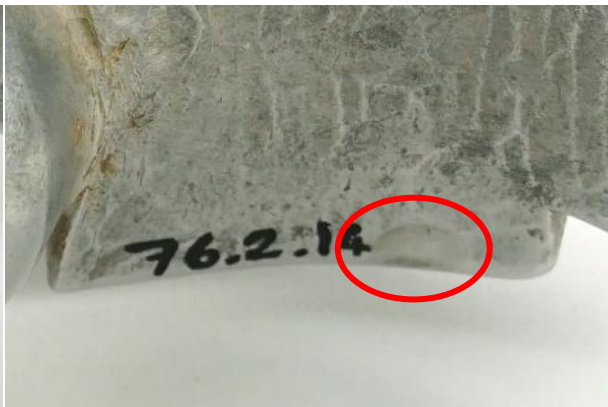
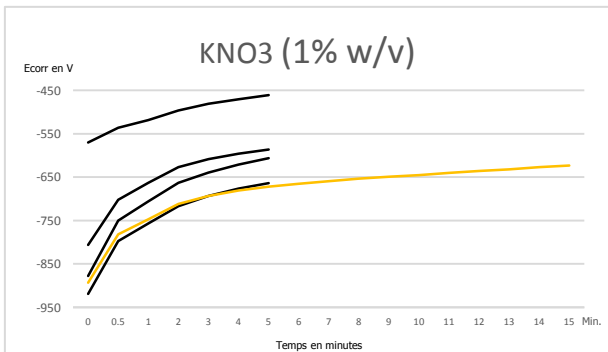
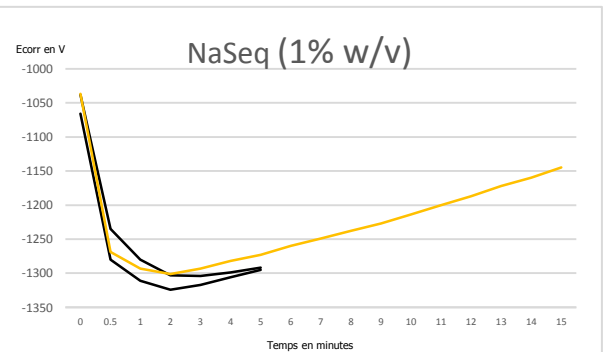
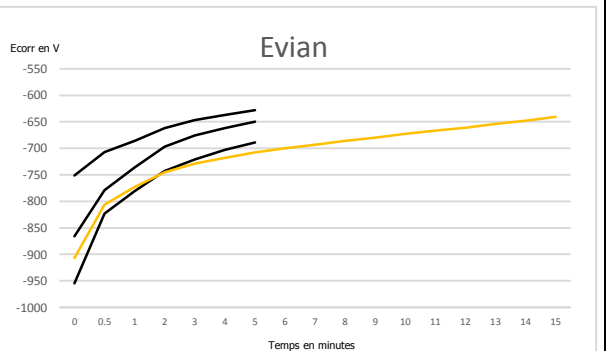
Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	Al 96.4 ; Si 2.6 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	2 361
2	Al 95.7 ; Si 3.6 ; Fe 0.7	1 881
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 se rejoignant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 881), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 95.2 ; Mg 2.2 ; Si 1.7 ; Fe 0.4 ; Mn 0.3 ; Cr 0.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution, mais ne donne pas de Mg (2.2%), ni de Mn (0.3%) et de Cr (0.1%).</p>
		

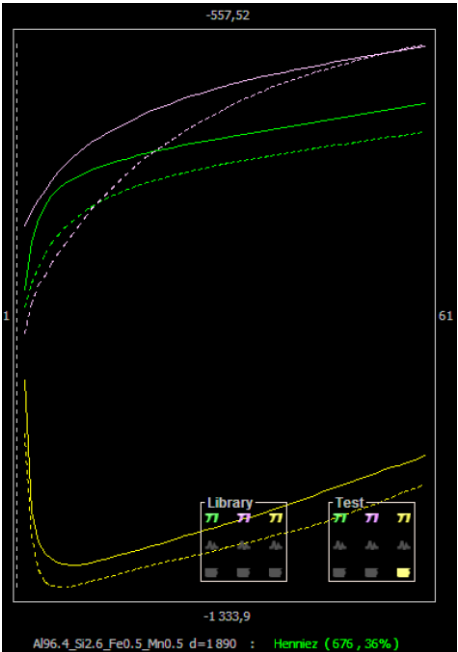
76.2.14a corps		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 95.4 ; Si 3.9 ; Fe 0.7	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 97.1 ; Si 1.5 ; Fe 0.6 ; Cu 0.2 ; Mn 0.4 ; Zn 0.2	4 753	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de NaSeq se rapprochant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2). Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (2 286), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 95.4 ; Si 3.9 ; Fe 0.7</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>
2	Al 94.2 ; Si 5 ; Fe 0.8	2 286	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
			

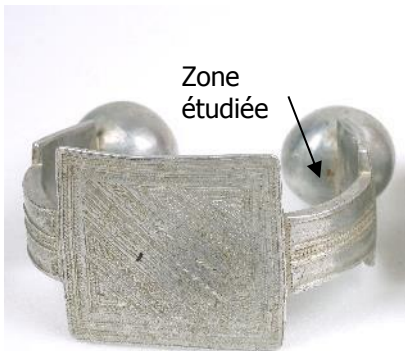


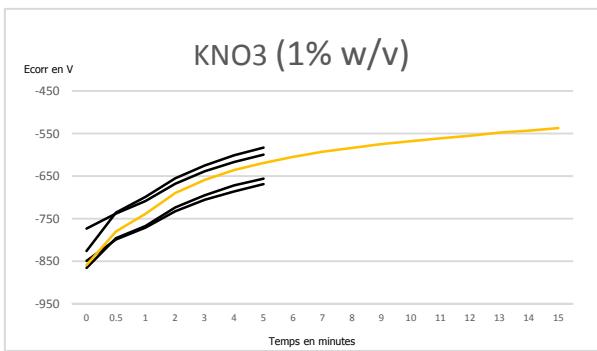
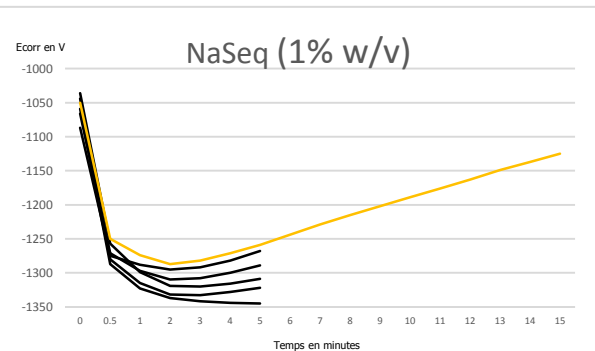
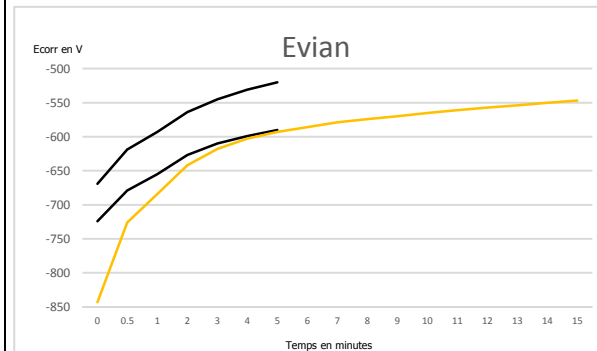


Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	Al 90.9 ; Zn 5.1 ; Mg 2.3 ; Cu 1.3 ; Cr 0.3 ; Fe 0.1	2 295
2	Al 94.2 ; Si 5 ; Fe 0.8	1 357
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 s'éloignant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 375), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 95.5 ; Si 2.7 ; Fe 0.7 ; Mg 1.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution, mais ne donne pas de Mg.</p>

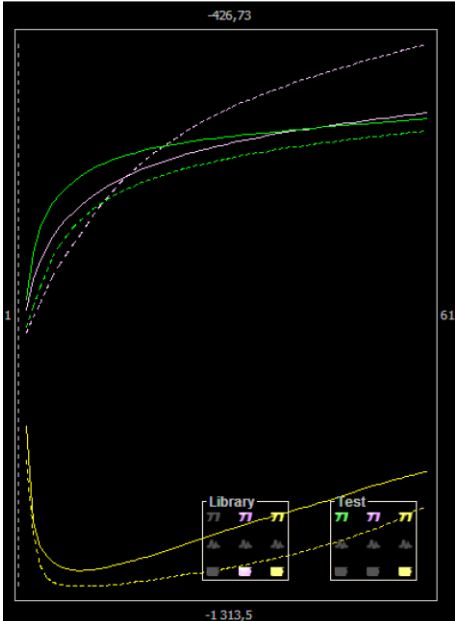
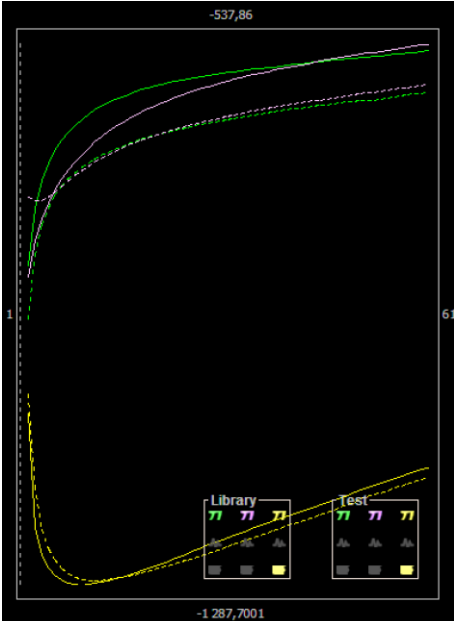
76.2.14b corps		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 94.2 ; Si 5 ; Fe 0.8	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 




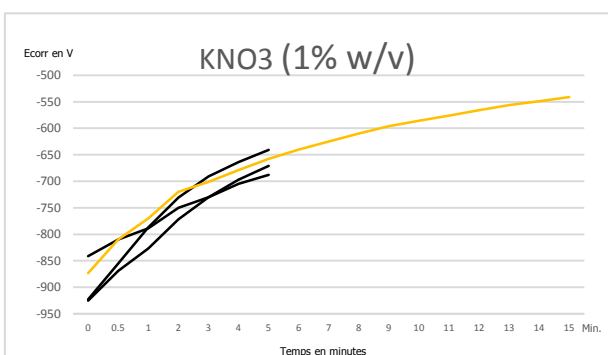
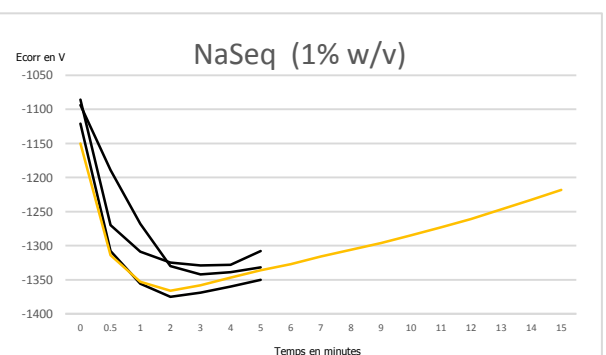
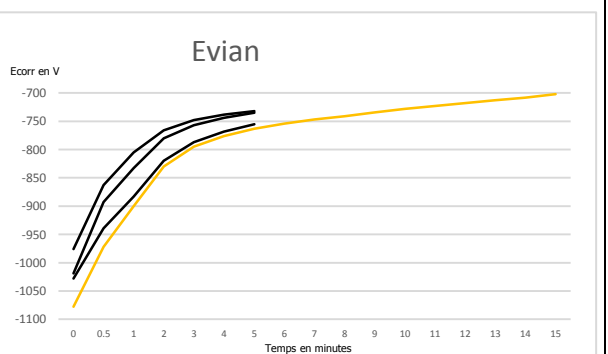
Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	Al 96.4 ; Si 2.6 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	1 890
2	Al 95.7 ; Si 3.6 ; Fe 0.7	2 126
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 se rapprochant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (2 126), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 94.2 ; Si 5 ; Fe 0.8</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>

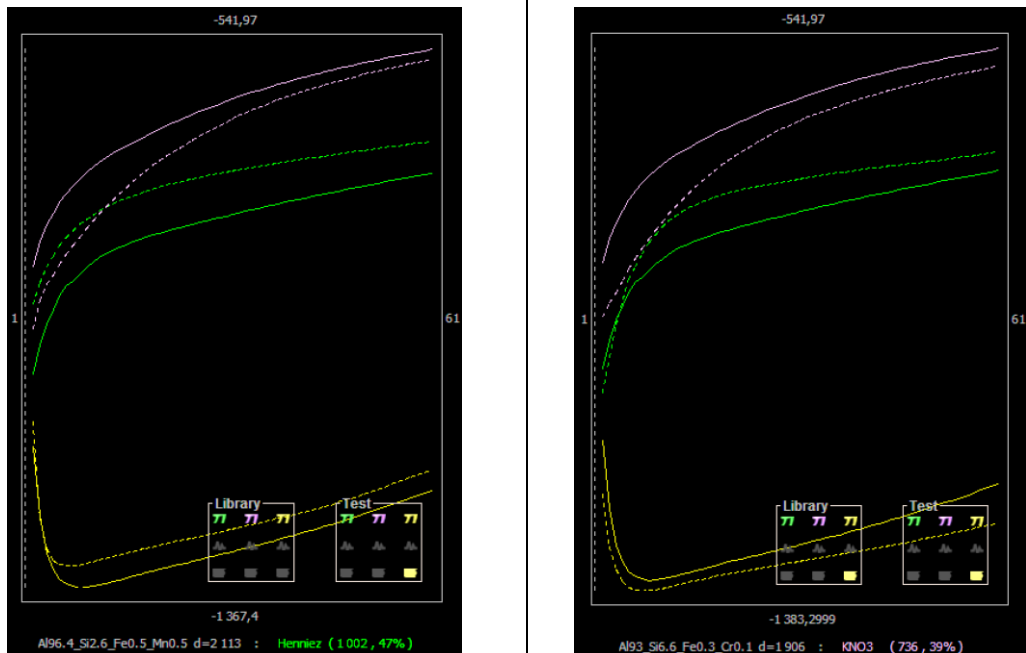


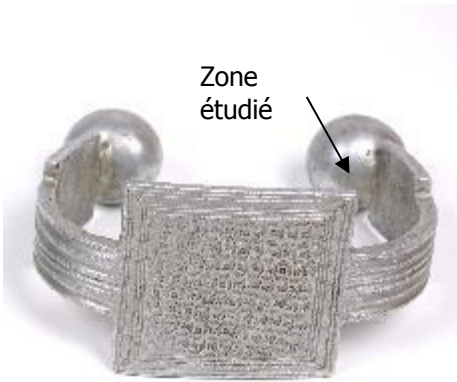


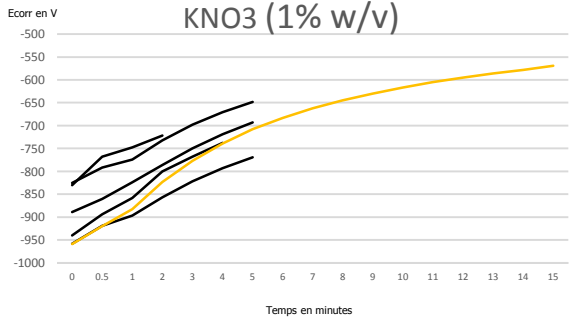
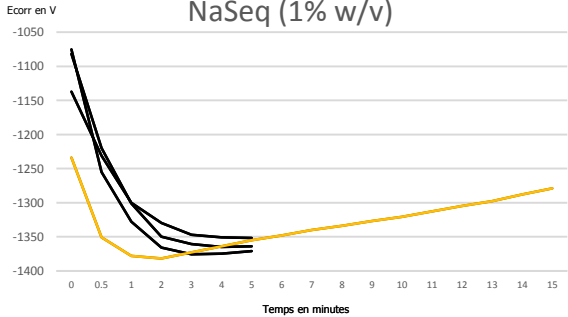
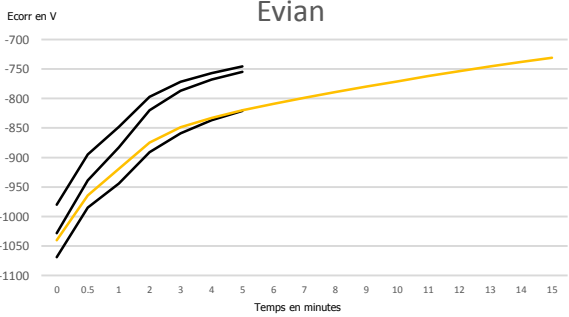
76.2.14b extrémité		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 93.7 ; Si 3.9 ; Fe 0.8 ; Mg 1.6	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

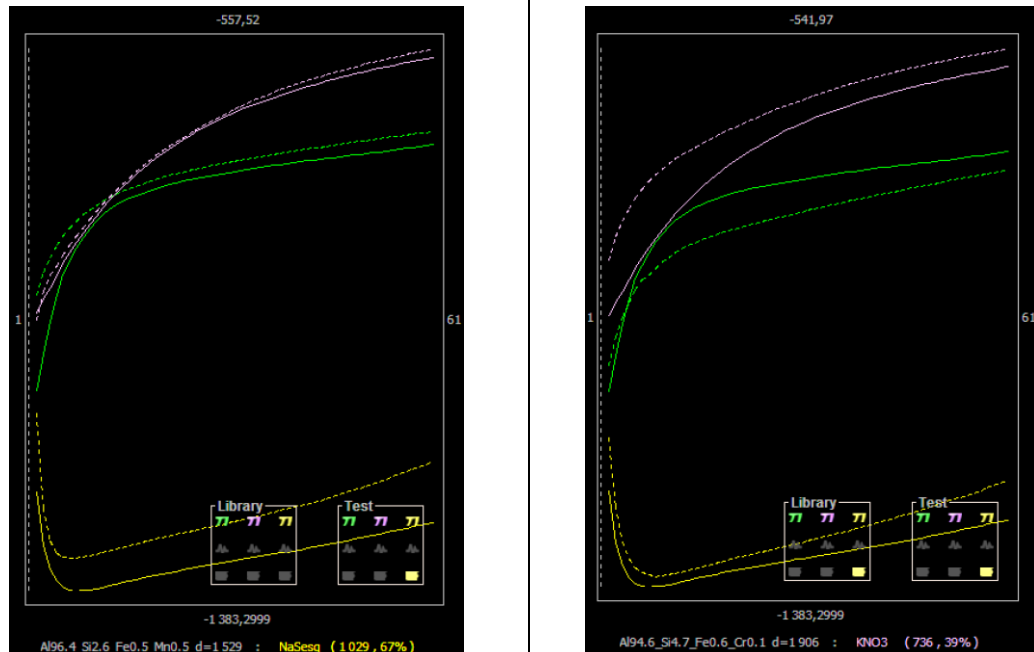





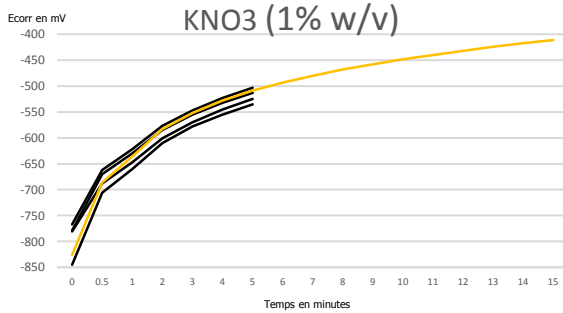
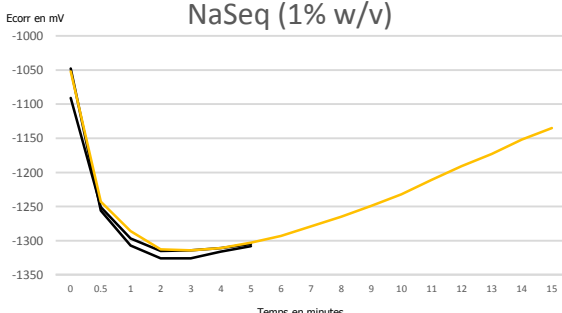
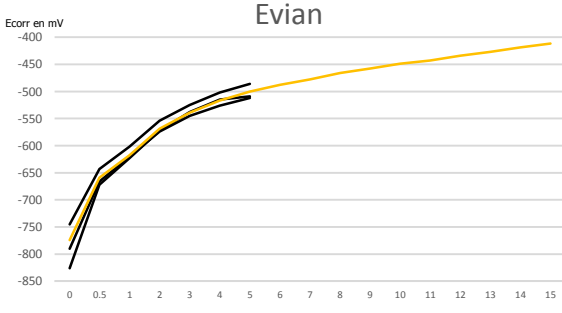
Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 90.9 ; Fe 0.1 ; Cu 0.3 ; Mg 2.3 ; Cr 0.3 ; Zn 5.1	2 545	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 s'éloignant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2). Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 907), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 93.7 ; Si 3.9 ; Fe 0.8 ; Mg 1.6</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>
2	Al 95.5 ; Si 2.7 ; Fe 0.7 ; Mg 1.1	1 907	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
			

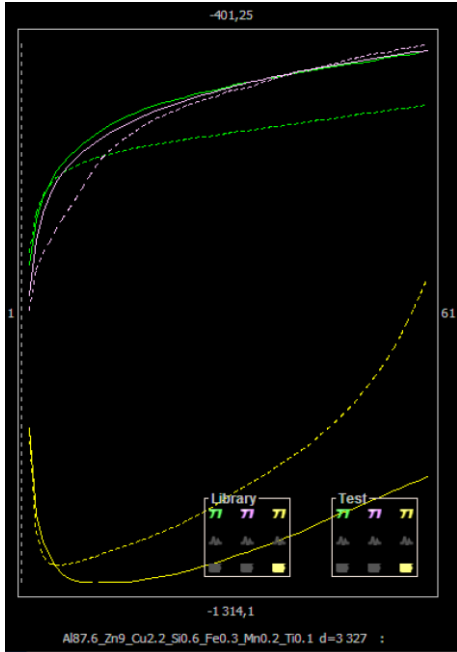
TJA corps		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 94.6 ; Si 4.7 ; Fe 0.6 ; Cr 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO3 (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

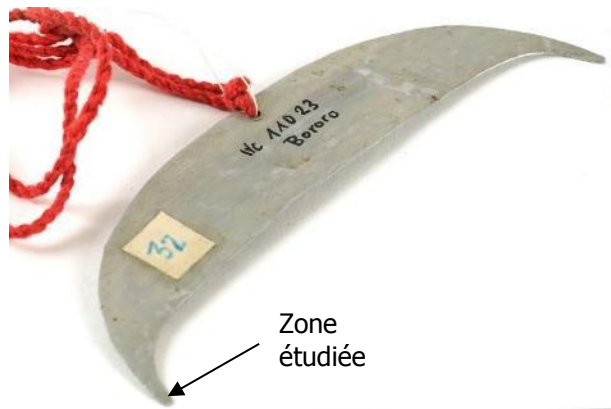


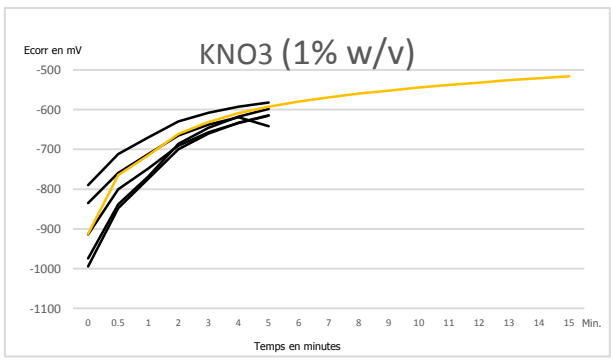
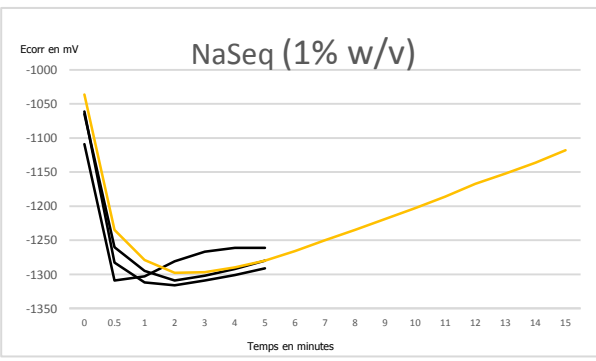
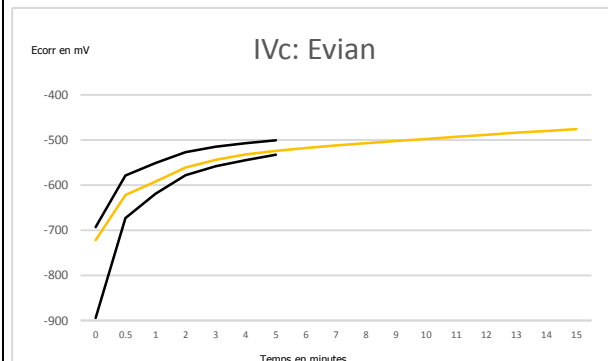
Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 96.4 ; Si 2.6 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	2 113	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 se rapprochant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 906), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 94.6 ; Si 4.7 ; Fe 0.6 ; Cr 0.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>
2	Al 93 ; Si 6.6 ; Fe 0.3 ; Cr 0.1	1 906	
<b>Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)</b>			
			

TJA extrémité		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 93.7 ; Si 5.9 ; Fe 0.3 ; Cr 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO<sub>3</sub> (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 

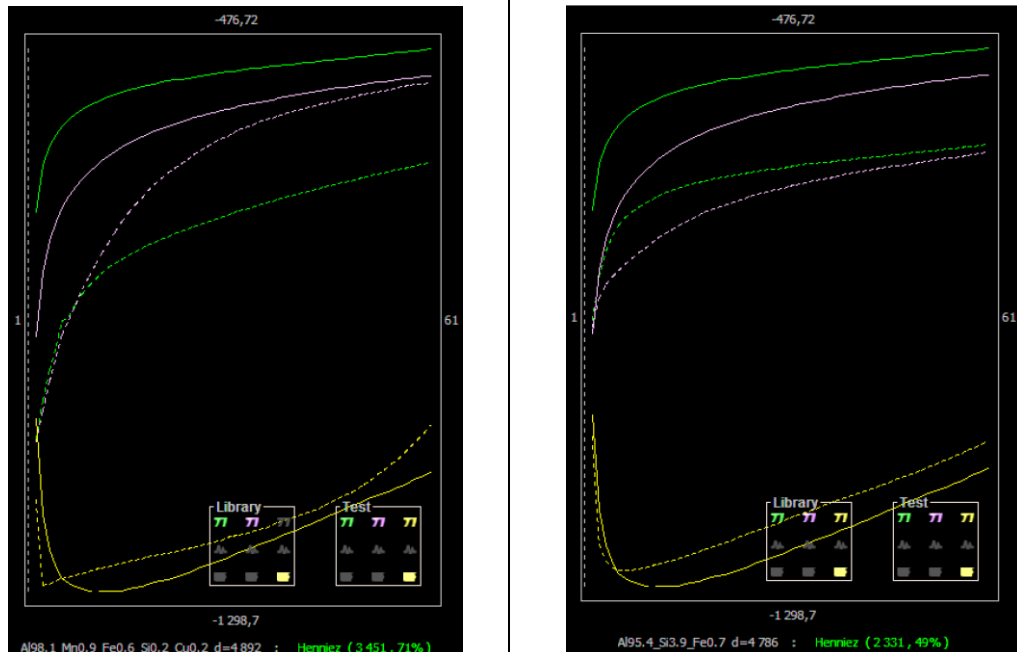
Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 96.4 ; Si 3.9 ; Fe 0.5 ; Mn 0.5	1 529	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de NaSeq s'éloignant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (1 906), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 93.7 ; Si 5.9 ; Fe 0.3 ; Cr 0.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution.</p>
2	Al 94.6 ; Si 4.7 ; Fe 0.6 ; Cr 0.1	1 906	
Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)			
			

III 22988		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 79 ; Si 19.2 ; Fe 1.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.2 ; Ti 0.4	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
<p><b>KNO<sub>3</sub> (1% w/v)</b></p> 	<p><b>NaSeq (1% w/v)</b></p> 	<p><b>Evian</b></p> 






Résultat du test en vue de la détermination de la composition		
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité
1	Al 87.6 ; Fe 0.6 ; Fe 0.3 ; Cu 2.2 ; Mn 0.2 ; Zn 9 ; Ti 0.1	3 327
2	Al 94 ; Si 5.7 ; Fe0.3	8 270
<b>Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)</b>		
		<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 et de NaSeq s'éloignant largement sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est très importante (8270), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 79 ; Si 19.2 ; Fe 1.1 ; Cu 0.1 ; Zn 0.2 ; Ti 0.4</p> <p>La composition est très éloignée pour les deux solutions. La quantité de titane (0.4%) est plus importante que dans n'importe quel autre alliage présent dans la base de données (max 0.1%). Cette quantité de titan pourrait expliquer la grande similitude dans le comportement des tracés de KNO3 et d'Evian</p>

IVc 11023		
Provenance	Composition FRX	
MEN	Al 97.2 ; Si 1 ; Fe 1 ; Mg 0.7 ; Cr 0.1	
Photo de l'objet	Photo de la zone avant analyse	Photo de la zone après analyse
 <p>Zone étudiée</p>		
Graphiques représentant les courbes relatives à la mesure du potentiel de corrosion en fonction du temps dans chaque solution		
 <p>KNO3 (1% w/v)</p>	 <p>NaSeq (1% w/v)</p>	 <p>IVc: Evian</p>








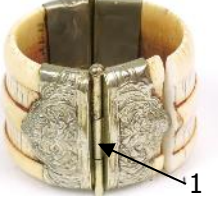



Résultat du test en vue de la détermination de la composition			
1 : comparaison avec la base de données de départ / 2 : comparaison avec la base de données enrichie		Distance de similarité	Discussion
1	Al 98.1 ; Si 0.1 ; Fe 0.6 ; Cu 0.2 ; Mn 0.9	4 892	<p>Lors de la première comparaison effectuée avec la base de données originelle nous n'avons pas obtenu de tracés similaires. La proposition la plus concordante (1) a des tracés de KNO3 se rapprochant sur la fin et ceux de NaSeq s'éloignant sur la fin. La comparaison avec la base de données enrichie donne un matériau avec des tracés parallèles à ceux du matériau testé (2).</p> <p>Constatant toutefois que la distance de similarité est importante (4 786), nous avons effectué l'analyse FRX en plusieurs points, la moyenne donne : Al 97.2; Si 1 ; Fe 1 ; Mg 0.7 ; Cr 0.1</p> <p>La composition est approchante de la deuxième solution, mais ne donne pas de Mg et une importante différence pour le Si.</p>
2	Al 95.4 ; Si 3.9 ; Fe 0.7	4 786	
<b>Graphique comparatifs entre les tracés de l'alliage de l'objet et ceux de référence (KNO3 violet, Evian Vert ; NaSeq jaune)</b>			
			

## 23 Examen FRX

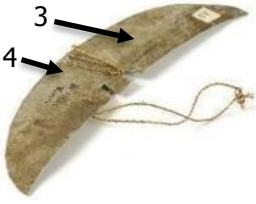
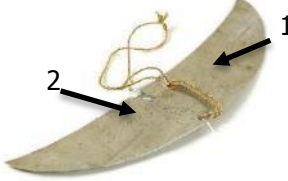


	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Commentaire
 <p>Figure 101 : Analyse FRX objet 71.6.151, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 95.5 Mg : 1.7 Si : 1.5 Mn : 0.6 Fe : 0.4 Cr : 0.1	Al : 97 Si : 0.9 Mn : 0.7 Fe : 0.5 Cr : 0.2	Al : 96 Si : 1.5 Mn : 0.7 Fe : 0.5 Cr : 0.2 Cu : 0.1		Al-Si1-2% avec un peu de Mn Présence possible de Mg
 <p>Figure 102 : Analyse FRX objet 71.6.152, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 95.9 Si : 1.2 Cr : 0.2 Mn : 0.8 Fe : 0.6 Zn : 0.1	Al : 95.4 Si : 1.9 Cr : 0.2 Mn : 0.7 Fe : 0.6 Zn : 0.1 Cu : 0.1			Al-Si1-2% avec un peu de Mn
 <p>Figure 103 : Analyse FRX objet 71.6.254, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 97.2 Mg : 1.0 Si : 0.8 Fe : 0.4 Cr : 0.1 Mn : 0.2 Ni : 0.1	Al : 96.6 Mg : 1.0 Si : 1.0 Fe : 0.4 Cr : 0.1 Mn : 0.2 Ni : 0.1			Al-Si1-2% avec un peu de Mn Présence possible de Mg
 <p>Figure 104 : Analyse FRX objet 71.6.255, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 97.3 Si : 1.0 Mn : 0.2 Fe : 0.4 Ni : 0.1 Cr : 0.1	Al : 96.9 Si : 1.5 Mn : 0.2 Fe : 0.4 Ni : 0.1 Cr : 0.1			Al-Si1-2% Peu d'impuretés
 <p>Figure 105 : Analyse FRX objet 71.6.257, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 98.1 Si : 1.4 Fe : 0.4	Al : 98.0 Si : 1.4 Fe : 0.4			Al-Si1.4% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe

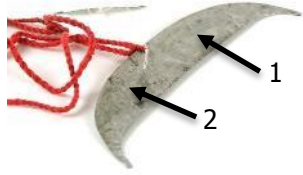
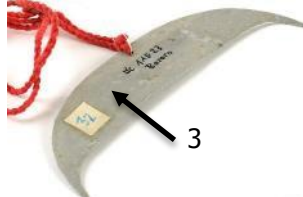
 <p>Figure 106 : Analyse FRX objet 71.6.258, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 95.3 Si : 2.5 Mg : 1.0 Fe : 0.4 Cu : 0.3 Mn : 0.2 Zn : 0.2 Cr : 0.1	Al : 94.5 Si : 3.2 Fe : 0.4 Cu : 0.4 Mn : 0.2 Zn : 0.2	Al : 94.3 Si : 4.0 Fe : 0.4 Cu : 0.4 Mn : 0.2 Zn : 0.2 Cr : 0.1		Al-Si3-4% avec un peu de Cu et de nombreuses impuretés Présence peu probable de Mg (zone 1)
 <p>Figure 107 : Analyse FRX objet 71.6.259, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 97.5 Si : 1.9 Fe : 0.5	Al : 97.0 Si : 2.2 Fe : 0.4	Al : 96.3 Si : 2.8 Fe : 0.5		Al-Si2-3% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe
 <p>Figure 108 : Analyse FRX objet 71.6.260, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 98.4 Si : 1.0 Fe : 0.4	Al : 93.4 Si : 4.4 Fe : 0.7	Al : 96.0 Si : 3.2 Fe : 0.6	Al : 96.0 Si : 3.0 Fe : 0.6	Al-Si3-4% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe
 <p>Figure 109 : Analyse FRX objet 71.6.261, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 93.0 Si : 5.6 Fe : 0.3	Al : 92.2 Si : 7.0 Fe : 0.4	Al : 86.8 Si : 11.6 Fe : 0.6 Ti : 0.1	Al : 94.5 Si : 4.5 Fe : 0.3	Al-Si5-7% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe
 <p>Figure 110 : Analyse FRX objet 76.2.14.a, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 94.4 Si : 3.8 Fe : 0.7	Al : 95.3 Si : 2.7 Mg : 1.1 Fe : 0.7	Al : 94.7 Si : 3.1 Mg : 1.3 Fe : 0.7		Al-Si3-4% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe Mg présent dans les extrémités et moins de Si

 <p>Figure 111 : Analyse FRX objet 76.2.14.b, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 93.5 Si : 5.0 Fe : 0.8	Al : 95.0 Si : 2.6 Mg : 1.4 Fe : 0.8	Al : 93.6 Si : 3.9 Mg : 1.6 Fe : 0.8		Al-Si2.5-5% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe Mg présent dans les extrémités et moins de Si
 <p>Figure 112: Analyse FRX objet 76.2.13.a, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 95.3 Mg : 2.3 Si : 1.7 Fe : 0.3 Mn : 0.2 Cr : 0.1	Al : 93.9 Mg : 2.1 Si : 3.2 Fe : 0.4 Mn : 0.3 Cr : 0.1	Al : 92.6 Si : 5.1 Fe : 1.0 Mn : 0.6 Cr : 0.1 Cu : 0.1 Zn : 0.1		Al-Si5% avec des impuretés pour le corps Al-Si2-3% avec des impuretés pour les extrémités Mg présent dans les extrémités et moins de Si
 <p>Figure 113 : Analyse FRX objet 76.2.13.b, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 95.1 Mg : 2.1 Si : 1.9 Fe : 0.4 Mn : 0.3 Cr : 0.1	Al : 95.2 Mg : 2.2 Si : 1.7 Fe : 0.4 Mn : 0.3 Cr : 0.1	Al : 99.0 Fe : 0.4 Mn : 0.2 Cr : 0.1	Al : 93.3 Si : 4.3 Fe : 0.7 Mn : 0.4 Cr : 0.1	Al-Si5% avec des impuretés pour le corps Al-Si2-3% avec des impuretés pour les extrémités Mg présent dans les extrémités et moins de Si Pas de Si dans la 3 <sup>ème</sup> analyse
 <p>Figure 114 : Analyse FRX objet TJA, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 92.6 Si : 6.6 Fe : 0.3 Cr : 0.1	Al : 93.7 Si : 5.2 Fe : 0.3 Cr : 0.1	Al : 94.5 Si : 4.7 Fe : 0.6 Cr : 0.1		Al-Si5-6% métal assez propre : pas d'impureté autre que Fe et Cr Si présent dans les extrémités et moins de Mg

 <p>Figure 115 : Analyse FRX objet 71.6.191, ©C. Despland, HE-Arc</p>	<p>Ag : 91.1 Cu : 6.7 Si : 0.8 Sn : 0.7</p>				Alliage Ag-Cu
 <p>Figure 116 : Analyse FRX objet 09.26.29, ©C. Despland, HE-Arc</p>	<p>Cu : 60.7 Zn : 25.8 Ni : 9.3 Si : 2.7 S : 0.5 Fe : 0.4 Sn : 0.5</p>				A priori laiton nickelé.
 <p>Figure 117 : Analyse FRX objet 71.6.322, ©C. Despland, HE-Arc</p>	<p>Fe : 97.9 Si : 0.9 Sn : 0.5 Mn : 0.2 Cu : 0.1 Cr : 0.1 Ti : 0.1 S : 0.1</p>				A priori fer étamé
 <p>Figure 118 : Analyse FRX objet III 23425, ©C. Despland, HE-Arc</p>	<p>Fe : 98.3 Si : 0.7 Mn : 0.4 S : 0.2 Cr : 0.1 Cu : 0.1</p>				Fer
 <p>Figure 119 : Analyse FRX objet III 22988, ©C. Despland, HE-Arc</p>	<p>Al : 76.1 Si : 21.9 Fe : 1.2 Ti : 0.4 Zn : 0.3 Cu : 0.1</p>	<p>Al : 78.9 Si : 19 Fe : 1 Ti : 0.4 Zn : 0.2 Cu : 0.1</p>	<p>Al : 81.7 Si : 16.7 Fe : 1 Ti : 0.3 Zn : 0.2 Cu : 0.1</p>		<p>Fort pourcentage de Si</p> <p>Le Fe est présent comme impureté issus de la bauxite. Ici, à un plus grand pourcentage (1-1.2%)</p> <p>Probablement issus de recyclage</p>

 <p>Figure 120 : Analyse FRX objet III 22989, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 97.4 Si : 1.4 Fe : 0.4 Cr : 0.1 Sn : 0.1	Al : 94.1 Si : 2.6 Fe : 2.8 Sn : 0.2 Pb : 0.1 Cu : 0.1	Al : 95.2 Si : 2.3 Fe : 2		Al-Si1-2% avec un peu de fer et de nombreuse impureté : recyclage ?
 <p>Figure 121 : Analyse FRX objet III 23119, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 98.1 Si : 1.2 Fe : 0.5 W : 0.1	Al : 96.4 Si : 3 Fe : 0.4 Cu : 0.2	Al : 95.9 Si : 2.8 Fe : 0.5 Cu : 0.7 Ti : 0.1		Al-Si 1-3% avec un peu de Cu : recyclage ?
 <p>Figure 122 : Analyse FRX objet III 23242, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Fe : 94.9 Si : 2.8 Cu : 1.1 S : 0.3				Fer avec trace de cuivre
 <p>Figure 123 : Analyse FRX objet III 23426, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 77.7 Si : 11.7 Fe : 8.9 Cu : 1 W : 0.2 V : 0.1 Ti : 0.3	Al : 77.3 Si : 9.5 Fe : 12.4 Cu : 0.3 Ti : 0.4 Mn : 0.1	Al : 75.1 Si : 6.4 Fe : 16 Cu : 0.3 Ti : 2.1 Zn : 0.1		Fort pourcentage de Si et de Fe, ainsi que des traces de cuivre et d'autres impuretés : Recyclage
 <p>Figure 124 : Analyse FRX objet III 25730, ©C. Despland, HE-Arc</p>	1) Al : 98.9 Si : 0.6 Fe : 0.3  5) Al : 98.5 Si : 0.5 Fe : 0.8	2) Al : 98.2 Si : 1.3 Fe : 0.4  6) Al : 98.2 Si : 1.2 Fe : 0.5	3) Al : 98.1 Si : 0.6 Fe : 0.3 Mg : 0.9  7) Al : 86.5 Si : 5.3 Fe : 1.4 Ti : 4.1 Mn : 2.2 Cr : 0.3	4) Al : 98.4 Si : 0.6 Fe : 0.3  8) Al : 90.3 Si : 4.1 Fe : 1 Ti : 2.3 Mn : 1.3 Cr : 0.3	Sur les différentes parties du pommeau (mesure 1 à 6) : Al-Si0-1% ; Trace de Fe  Mg élément potentiellement présent Sur le pointe (mesures 7-8): Al-Si4-5% ; Présence de Fe, Ti, Mn et Cr → difficile d'avoir une mesure précise en vue de l'état de métal

 <p>Figure 125 : Analyse FRX objet IVc 11021_vue 1, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 96.1 Si : 1.3 Fe : 1.2 Mn : 1 Cr : 0.4	Al : 96.7 Si : 0.9 Fe : 1 Mn : 0.8 Cr : 0.3	Al : 92 Si : 5.1 Fe : 1.3 Mn : 1 Cr : 0.4 Ti : 0.1	Al : 88.6 Si : 8.1 Fe : 0.4 Mn : 1.2 Cr : 1.6 Ti : 0.1	<p>Différence importante de Si entre les deux faces, possiblement dû à la saleté de surface (visible sur la figure 8).</p> <p>Si entre 0.9 et 8.1% ainsi que d'autres impuretés : Recyclage ?</p>
 <p>Figure 126 : Analyse FRX objet IVc 11021_vue 2, ©C. Despland, HE-Arc</p>					
 <p>Figure 127 : Analyse FRX objet IVc 11022_vue 1, ©C. Despland, HE-Arc</p>	Al : 96.3 Si : 1.6 Fe : 0.8 Mn : 0.6 Cr : 0.1 Ti : 0.1	Al : 95.8 Si : 1.9 Fe : 1.2 Mn : 0.9 Cr : 0.1 Ti : 0.1	Al : 95.7 Si : 2.1 Fe : 1.1 Mn : 0.8 Cr : 0.2		<p>Al-Si1-2%</p> <p>Présence de Cr, de Mn et de Ti : Recyclage</p>
 <p>Figure 128 : Analyse FRX objet IVc 11022_vue 2, ©C. Despland, HE-Arc</p>					

 <p>Figure 129 : Analyse FRX objet IVc 11023_vue1, ©C. Despland, HE-Arc</p>	<p>Al : 95.9 Si : 2.3 Fe : 0.9 Mn : 0.7 Cr : 0.1</p>	<p>Al : 94.6 Si : 3.4 Fe : 0.9 Mn : 0.7 Cr : 0.1</p>	<p>Al : 97.2 Si : 1 Fe : 1 Mn : 0.7 Cr : 0.1</p>		<p>Al-Si1-3%</p> <p>Présence de Cr, de Mn et de Ti : Recyclage</p>
 <p>Figure 130 : Analyse FRX objet IVc 11023_vue 2, ©C. Despland, HE-Arc</p>					



## 24 Spectres FRX

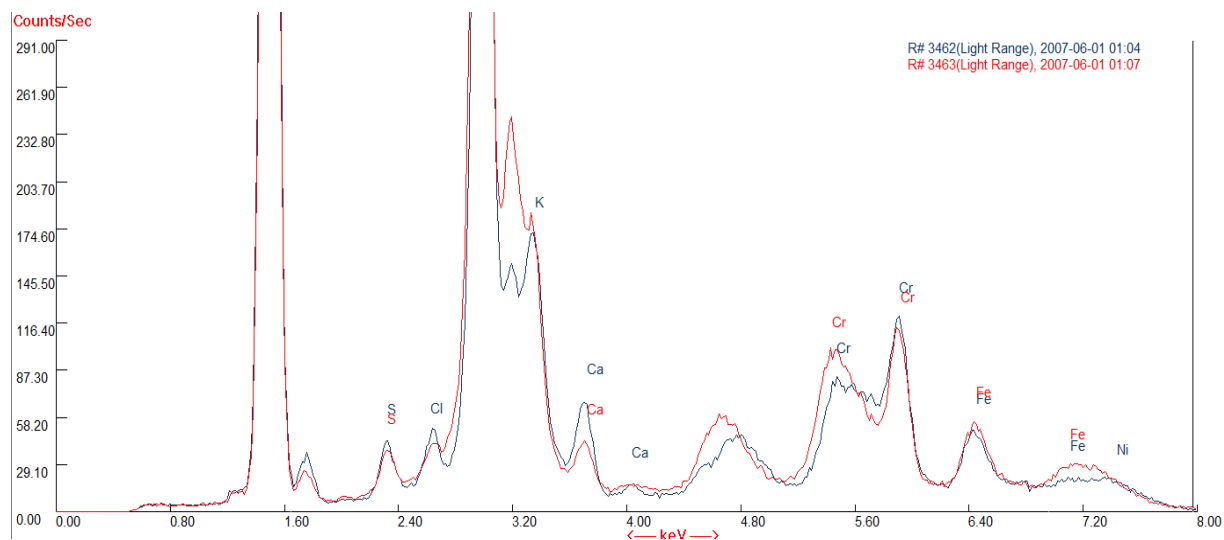


Figure 131 : Spectre FRX de l'objet 71.6.156, ©C. Degrigny, HE-Arc

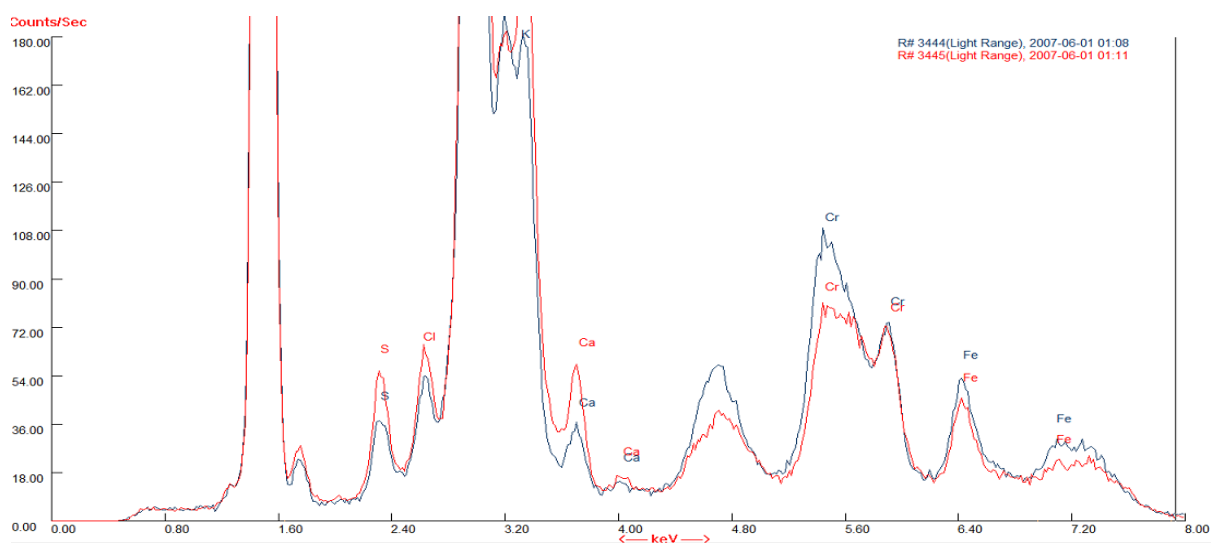
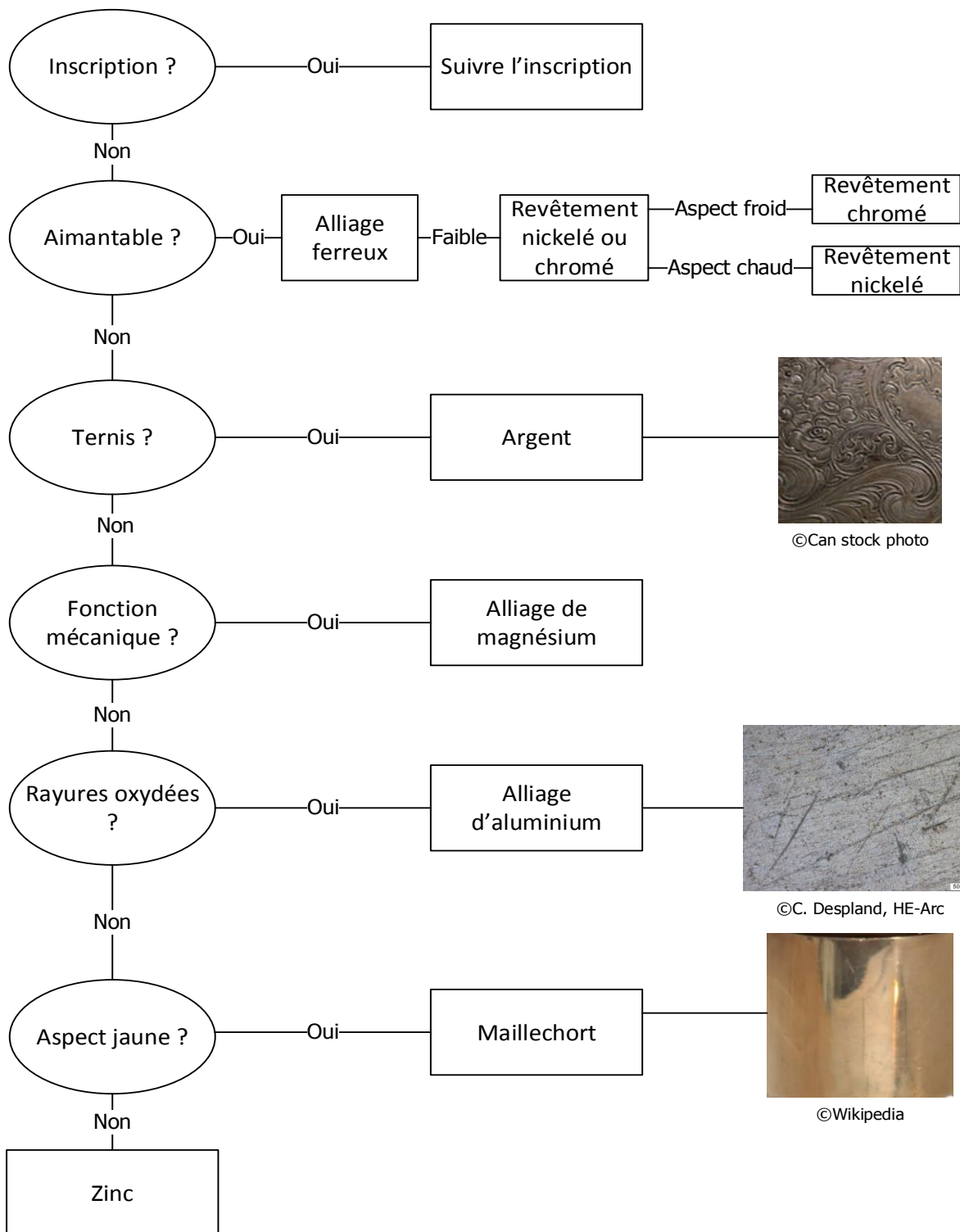


Figure 132 : Spectre FRX de l'objet 71.6.257, ©C. Degrigny, HE-Arc

## 25 Vadémécum pour la reconnaissance des alliages métalliques blancs

# Vadémécum

Reconnaissance des alliages blancs



## **Informations complémentaires**

### **Alliage d'aluminium**

- Exploité 1854 et en 1886, le procédé d'électrolyse fait baisser drastiquement le prix d'extraction
  - Entre 1854 et 1886 : L'aluminium est utilisé que pour des objets de luxe
  - Après 1886 : L'aluminium devient un métal peu onéreux et est exploité pour tous les ménages
- Produit de corrosion blanc ou transparent
- Métal léger

### **Le zinc**

- L'exploitation débute au 17<sup>e</sup> siècle et l'exploitation industrielle commence en 1738
- Produit de corrosion blanc ou transparent
- Métal lourd

### **Alliage de magnésium**

- Alliage léger

### **L'argent**

- Métal précieux, souvent marqué d'un poinçon
- Produits de corrosion noir, blanc ou jaune
- Métal lourd

### **Les alliages ferreux**

- Acier inoxydable
  - Contient minimum 10.5% mass. de chrome
  - Inventé en 1910
- Produits de corrosion rouge, orange, bleu, vert, jaune-brun, noir, blanc ou gris-noir
- Alliages lourds

### **Maillechort**

- Alliage riche en cuivre contenant du nickel et du zinc
- Créé en 1825
- Alliage lourd

## **L'étain**

- Produits de corrosion noir, gris, blanc ou jaune-foncé-brun
- Métal lourd

## **Bibliographie**

Selwyn L., 2004 : Selwyn L. Métaux et corrosion. Un manuel pour le professionnel de la conservation.  
Ottawa, Canada, Institut canadien de conservation, 2004.