

Le conditionnement d'objets en métal

Propositions pour le service archéologique du canton de Berne

Mémoire présenté par :

Kramer Miriam

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets archéologiques et ethnographiques
Objets scientifiques, techniques et horlogers

BA 2008-2009

31 juillet 2009

« 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 ».

La Chaux-de-Fonds, 31 juillet 2009

Remerciements

Je tiens à remercier :

L'ensemble du personnel du *service archéologique du canton de Berne* et notamment :

- Christoph Rogalla von Bieberstein, responsable du ressort conservation
- Barbara Chevallier, responsable du domaine de la conservation préventive
- Sabine Brechbühl-Trijasse, conservatrice-restauratrice
- Beat Liechti, collaborateur dans la gestion des objets de fouille
- Hanspeter Zwahlen, responsable du dépôt final des métaux

Erwin Hildbrand, laborantin en chimie au *Laboratorium für Konservierungsforschung der Schweizerischen Landesmuseen*, Affoltern am Albis ZH, pour les résultats des tests d'Oddy qu'il m'a fait parvenir.

Nina Fernández, restauratrice diplômée à *Augusta Raurica*, Augst BL, pour les informations sur le stockage des objets métalliques à l'aide de gel de silice.

Petra Nirmaier, restauratrice diplômée au *service archéologique de canton de Lucerne*, pour les précieuses informations sur le stockage des objets métalliques à l'aide de tamis moléculaires.

Tanja Jaeggi et Antonin Tarchini, pour le soutien et les corrections linguistiques.

Toutes les personnes qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre pour la réalisation de ce travail de diplôme.

Résumé

La conservation préventive a fortement gagné en importance au cours des 20 dernières années dans le domaine du patrimoine. Elle s'occupe de facteurs « extérieurs » à l'objet, tels que l'humidité relative et la température, sans perturber les actions de restauration.

Ainsi, le service archéologique du canton de Berne dispose aujourd'hui d'un dépôt climatisé pour ses objets de fouilles. Ce dépôt est partagé en différents locaux dans lesquels un climat adapté a été mis en place selon la constitution des objets. Les objets organiques et inorganiques non métalliques sont stockés dans le « Behälterlager » dans lequel l'humidité relative est maintenue à 50 %, avec des variations de plus ou moins 5 %. Pour les objets en métal, ce taux d'humidité relative serait toutefois trop élevé. Pour cette catégorie d'objets, le service archéologique possède un entrepôt propre avec une humidité relative nettement plus basse (20 % +/- 5 %). La température est, dans toutes les pièces, d'environ 18 °C (+/- 2 °C).

La conservation préventive ne se limite pas seulement aux facteurs climatiques, mais concerne également l'emballage adéquat des objets. Les matériaux de conditionnement sont soumis à des normes strictes, ils doivent par exemple être chimiquement inertes (c.-à-d. pas d'émission de gaz et vapeurs nuisibles) et remplir d'autres conditions, telles que la protection contre les vibrations et les chocs, la prévention du frottement entre les objets, etc. Le service archéologique ne dispose actuellement pas de conditionnement qui remplit ces conditions et qui est appliqué de manière systématique.

Dans le cadre de ce travail de diplôme, on nous a demandé de faire des propositions pour un concept d'emballage pour les objets en métal stockés dans le dépôt final.

Afin de présenter un projet approprié, les processus de dégradation, la sensibilité des objets ainsi que l'impact des différents matériaux d'emballage doivent être connus. Pour cette raison, nous avons dans la première partie de ce travail mis l'accent sur l'explication des processus de corrosion, des méthodes de traitement et de la sensibilité des objets. Le complexe de fouille choisi pour ce projet est également brièvement présenté.

Dans la deuxième partie, les contraintes imposées par le service archéologique, les critères de sélection des matériaux ainsi que trois méthodes d'emballage sont présentées. Ces trois méthodes peuvent être combinées selon les besoins. Par la proposition de trois solutions distinctes, qui se différencient entre autres par les coûts et les temps d'intervention, le service archéologique a l'occasion de faire un choix en fonction de ses possibilités.

Dans la troisième partie, on trouve finalement un calcul des coûts pour la réalisation de l'emballage. Ces coûts n'ont été calculés que pour le complexe présenté au début de ce travail et ne représentent qu'une estimation.

Abstract

In the last 20 years, the preventive conservation within the topic of the cultural property protection increased highly in significance. It is dealing with the « outside » factors of the conservation of objects, for example the relative humidity and the temperature, without interfering with the methods of restoration.

Thus, the archaeological service of the canton Bern (ADB) possesses an air-conditioned depot for its excavation finds. This depot is divided into different storage facilities, in which the climate is adapted to the objects. The organic and inorganic non-metallic objects are stored in the « Behälterlager », where the relative humidity is kept to 50%, with deviations of up to 5%. For metal objects, this relative humidity would be too high. For this category of finds the ADB possesses its own storage room with a clearly deeper relative humidity, kept to 20% (+/- 5%). The temperature in all rooms is approximately 18 °C, with deviations of up to 2 °C.

The preventive conservation is not limited to climatic factors, but additionally plans the appropriate packing of the objects. Strict specifications are given for the considered materials, for example they have to be chemically neutral (i.e. not to develop harmful gases and steams) and they have to fulfill a whole number of other conditions (protection from vibration and impacts, avoidance of friction between the objects, etc.). Up to now, the ADB does not possess any packing model which is fulfilling these conditions and that is being applied systematically.

In the context of this thesis we were asked to propose possibilities for a packing concept for the metal finds in the final storage.

In order to be able to submit a suitable draft, the processes of degradation, the sensitivity of the objects and the influence of the different materials had to be known. For this reason, the first part of this work deals with the explanation of corrosion procedures, treatment methods and the sensitivity of the objects. The excavation complex selected for this project is also briefly presented.

In the second part of the thesis the requirements of the ADB and the eligibility criteria of the materials are discussed and the possible packaging methods are introduced. Altogether three different methods are suggested, which can be combined depending upon need. Presenting three different solutions, which differ among other things also in costs and effort, gives the opportunity to the ADB to select according to its desires and possibilities.

The third part contains a listing of the costs for the realization of the packing. These costs were calculated specifically for the presented excavation complex of the ADB and should be considered as an estimation.

Zusammenfassung

Die präventive Konservierung hat in den letzten 20 Jahren im Bereich des Kulturgüterschutzes stark an Bedeutung zugenommen. Sie befasst sich mit den « äusseren » Faktoren der Konservierung der Objekte, wie zum Beispiel der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur, ohne dabei die Massnahmen der Restaurierung zu beeinträchtigen.

So verfügt der archäologische Dienst des Kantons Bern (ADB) heute über ein klimatisiertes Depot für seine Ausgrabungsfunde. Dieses Depot ist in verschiedene Lagerräumlichkeiten unterteilt, in denen jeweils ein den Objekten angepasstes Klima herrscht. Die organischen und anorganischen nicht metallischen Objekte sind im Behälterlager untergebracht wo die relative Luftfeuchtigkeit auf 50 % gehalten wird, mit Abweichungen von bis zu 5 %. Für Metallobjekte wäre diese relative Luftfeuchtigkeit jedoch zu hoch. Für diese Fundkategorie besitzt der ADB einen eigenen Lagerraum mit einer deutlich tieferen relativen Luftfeuchtigkeit von 20 % (+/- 5 %). Die Temperatur hält sich in allen Räumen auf ca. 18 °C, mit Abweichungen von bis zu 2 °C.

Die präventive Konservierung beschränkt sich nicht nur auf klimatische Faktoren, sondern sieht auch die sachgemässe Verpackung der Objekte vor. Für die zu verwendenden Materialien herrschen strikte Vorgaben, so müssen sie zum Beispiel chemisch neutral sein (d. h. keine schädlichen Gase und Dämpfe entwickeln) und zudem eine ganze Reihe anderer Bedingungen erfüllen (Schutz vor Vibration und Stössen, Vermeidung von Reibung zwischen den Objekten, usw.).

Der ADB verfügt zurzeit noch über kein Verpackungsmodell das diese Bedingungen erfüllen könnte und systematisch angewendet wird.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden wir gebeten, Vorschläge für ein Verpackungskonzept für die Metallfunde im Endlager zu machen.

Um einen geeigneten Entwurf vorlegen zu können, müssen die Degradierungsprozesse, die Empfindlichkeit der Objekte und der Einfluss der verschiedenen Materialien bekannt sein. Aus diesem Grund wird im ersten Teil dieser Arbeit Wert auf die Erklärung von Korrosionsvorgängen, Behandlungsmethoden und die Empfindlichkeit der Objekte gelegt. Zuvor wird kurz der für dieses Projekt ausgewählte Ausgrabungskomplex vorgestellt.

Im zweiten Teil werden die Ansprüche des ADB und die Auswahlkriterien der Materialien behandelt, sowie die möglichen Verpackungsmethoden vorgestellt. Insgesamt werden drei verschiedene Methoden vorgeschlagen, die je nach Bedarf auch untereinander kombiniert werden können. Durch die Präsentation von drei verschiedenen Lösungen, die sich unter anderem auch in Kosten und Aufwand unterscheiden, hat der ADB die Gelegenheit nach seinen Wünschen und Möglichkeiten auszuwählen.

Im dritten Teil findet sich schliesslich eine Auflistung der Kosten für die Realisation der Verpackung. Diese Kosten wurden nur für den vorgestellten Ausgrabungskomplex des ADB berechnet und verstehen sich als Schätzung.

Table des matières

1	INTRODUCTION	6
2	DESCRIPTION ET ÉTAT ACTUEL DE LA COLLECTION.....	7
2.1	LE COMPLEXE DE 'KALLNACH, BERGWEG, 1988'	7
2.1.1	<i>Le contexte de la fouille</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>La sensibilité des matériaux.....</i>	<i>8</i>
2.2	LE DEPOT DU SERVICE ARCHEOLOGIQUE DU CANTON DE BERNE.....	9
2.2.1	<i>Les conditions climatiques dans le dépôt des métaux.....</i>	<i>10</i>
2.2.2	<i>Les conditionnements utilisés actuellement.....</i>	<i>11</i>
2.3	LE CONSTAT D'ÉTAT DES OBJETS.....	12
2.3.1	<i>Les processus et facteurs de la corrosion.....</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Objets ferreux.....</i>	<i>14</i>
2.3.3	<i>Objets cuivreux.....</i>	<i>16</i>
2.4	LES TRAITEMENTS EFFECTUES	16
3	LE NOUVEAU CONDITIONNEMENT	21
3.1	CONDITIONNEMENT RECHERCHE PAR LE SERVICE ARCHEOLOGIQUE.....	21
3.2	CONCEPTS PROPOSÉS	21
3.2.1	<i>Critères pris en considération.....</i>	<i>21</i>
3.2.2	<i>Choix des matériaux de conditionnement.....</i>	<i>23</i>
3.2.3	<i>Proposition de trois variantes.....</i>	<i>27</i>
4	REALISATION PRATIQUE DE PROTOTYPES	33
4.1	ESTIMATION DES COUTS POUR LES TROIS VARIANTES.....	33
	SYNTHESE.....	38
	CONCLUSION GENERALE.....	39
	BIBLIOGRAPHIE.....	40
	LISTE DES FIGURES	43
	ANNEXE A : FIGURES.....	44
	ANNEXE B : GRAPHIQUES CLIMATIQUES	50
	ANNEXE C : FICHE CONSTAT D'ÉTAT.....	52
	ANNEXE D : FICHE TECHNIQUE DES MATERIAUX.....	53
	ANNEXE E : TABELLE POUR LA DETERMINATION DE LA QUANTITE D'EAU DANS L'AIR	54
	ANNEXE F : LISTE DES FOURNISSEURS	55

1 INTRODUCTION

La conscience des musées sur le sujet de la conservation des objets sur le long terme a mené au développement des techniques liées à la conservation préventive. Mais ce développement a également permis aux acteurs de la conservation d'avoir un accès plus facile à ces mêmes techniques. Les contraintes liées aux conditions de stockage des différents objets, la compatibilité des matériaux de conditionnement et l'influence des facteurs climatiques sont aujourd'hui largement connues. De nombreux musées se sont fixés pour objectif d'améliorer les conditions dans leurs réserves afin d'offrir une situation de conservation optimale aux collections, de façon à leur donner une longue existence. Le service archéologique du canton de Berne dispose d'un dépôt climatisé pour le stockage de ses objets en métal. Toutefois, il n'existe encore aucun concept uniforme pour l'emballage adéquat de ces objets. Le conditionnement est d'une grande importance en ce qui concerne le stockage d'objets sur le long terme. Le choix des matériaux utilisés doit permettre d'améliorer les conditions des objets sans pour autant amener de nouvelles sources de dégradation pour ces derniers. Ces matériaux doivent par exemple être chimiquement et physiquement stables, permettre une bonne capacité d'absorption des chocs et vibrations et peuvent également être employés pour atténuer les variations climatiques (matériaux tampon). Dans le cadre de ce travail de diplôme, nous présenterons trois propositions pour l'amélioration des conditions de stockage du dépôt de métal du service archéologique de Berne. Ceci tout en abordant certaines notions théoriques liées à la conservation préventive.

2 DESCRIPTION ET ÉTAT ACTUEL DE LA COLLECTION

2.1 LE COMPLEXE DE 'KALLNACH, BERGWEG, 1988'

Le complexe de Kallnach est un des plus importants ensembles d'objets de la collection de métaux du service archéologique du canton de Berne.

Ses trouvailles s'intègrent dans la période du haut moyen-âge et elles ont pu être datées entre le 7^{ème} et 10^{ème} siècle après J.-C. Il s'agit de boucles métalliques de ceinture ou de chaussures (total 32, dont 27 en fer, 4 en bronze et une en argent), de boucles d'oreille, de bagues, de perles en pâte de verre, verre transparent et en ambre, de divers armes et ustensiles (couteaux, épées, pointes de flèches et alènes),



Fig. 1 : Boucle de ceinture, décorée avec la technique de l'ajouré

d'une précieuse fibule en bronze et en or et de restes de textiles. Les boucles en fer sont soigneusement damasquinées, dans la plupart du temps avec de l'argent et certaines avec du laiton. Les boucles de ceinture en bronze sont coulées et comportent également des décorations coûteuses, faites par gravure, ciselure ou grâce à la technique de l'ajouré (fig. 1). Les boucles d'oreille sont fabriquées en fil de bronze et contenaient auparavant des verroteries. Parmi les sept bagues trouvées, six sont

façonnées en bronze et une en argent. La bague en argent est la seule qui comporte des décorations (cinq petites perles en verre rouge et vert). Les perles en pâte de verre sont de couleur et forme différente, la plupart du temps vertes ou jaunes et plutôt arrondies. Les perles en verre transparent, plus rares, sont généralement de couleur bleue claire ou bleue foncée, jaune ou blanche. Elles sont habituellement de forme annulaire. Les perles en ambre (25 pièces) ont certainement été importées du Baltique. Elles sont d'une taille comprise entre 6 mm et 25 mm et on les trouve réparties dans les colliers en pâte de verre. Les couteaux et épées sont en fer et souvent très corrodés. Certaines comportent encore leurs fourreaux (en cuir)¹.

Ce complexe est actuellement stocké dans dix caisses RAKO®.

2.1.1 LE CONTEXTE DE LA FOUILLE

Le village de Kallnach se situe entre les villes de Berne et de Bienne, dans le canton de Berne, à environ 6 km de la rive du lac de Bienne (fig. 9, annexe A). Le site de la fouille se trouve sur le côté nord d'une petite colline et, déjà avant 1988, le terrain était connu pour sa richesse en vestiges archéologiques enfouis dans le sol. Beaucoup d'objets ont été découverts lors de travaux agricoles, jusqu'à ce qu'une fouille soit finalement planifiée lors d'un projet de construction. La fouille de sauvetage est menée sur une surface d'environ 600 m² plus la surface des fossés creusés pour les tuyaux d'approvisionnement et d'évacuation du nouveau bâtiment. Au début, des restes indéfinissables de fondements ont pu être datés à la fin du 3^{ème} jusqu'au 4^{ème} ou 5^{ème} siècle après J.-C. (romain tardif). Une nécropole, contenant 155 tombes et une chambre funéraire, date du haut moyen-âge (entre le 7^{ème} et le 10^{ème} siècle après J.-C.). Sur la

¹ Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006a, p.55-82.

surface fouillée, il n'existe pas d'autres structures de cette époque (pas d'habitats, pas d'ateliers)². C'est de ces tombes que proviennent les objets du complexe de 'Kallnach, Bergweg, 1988' (décrits sous le chapitre 2.1).

La nécropole du haut moyen-âge a été intégrée dans les ruines romaines. On peut partir du principe que les alentours de la surface fouillée comportent encore davantage de tombes. Ce du fait que certaines d'entre elles ont été coupées par les limites du site. Au sud de la zone de la nécropole se situe un fondement qui démontre une autre orientation que les structures romaines (fig. 10, annexe A). Du fait que le mur croise les structures romaines et que l'orientation soit la même que pour les tombes environnantes, on soupçonne qu'il s'agit d'une chambre funéraire datant du haut moyen-âge.

L'état des tombes va de « très bien conservée » jusqu'à « non reconnaissable ». Les perturbations ont pu être causées par différents facteurs (manque de place, marquage insuffisant à la surface, pillage ultérieur). Il est donc possible que quelques vestiges aient déjà été partiellement endommagés à l'époque. La fouille de sauvetage a été réalisée en trois étapes et a duré de septembre 1988 jusqu'en août 1989³.

2.1.2 LA SENSIBILITE DES MATERIAUX

Pas tous les matériaux ne sont sensibles aux mêmes facteurs. Les matériaux organiques ont besoin d'une humidité relative (HR) plus élevée que les métaux et les recommandations pour les métaux peuvent également varier selon leur composition et leur état de conservation. Vous trouverez ci-dessous les sensibilités et les conditions de stockage pour les différents matériaux, présents dans le complexe de Kallnach.

Les métaux en général : Quasiment tous les métaux sont sensibles aux composés sulfurés (qui sont contenus par exemple dans la laine) et au dégagement d'acides (formique, acétique, chlorhydrique, etc.) qui sont souvent présents dans le bois. D'autres matériaux d'emballage inadéquats (comme des boîtes en carton acide) peuvent accélérer l'oxydation par dégagement d'autres composés volatils⁴.

Mardaga donne le conseil de stocker les objets métalliques à une HR au-dessous de 30 %, mais il ne s'exprime pas sur les conditions climatiques pour le stockage des métaux atteints de corrosion active. La surface de certains objets métalliques peut être endommagée par l'acidité de la peau. Il est donc indispensable de mettre des gants pour la manipulation⁵.

Le fer : Le fer est particulièrement sensible lorsqu'il est en contact avec l'humidité et l'oxygène. La combinaison de ces deux facteurs peut créer une corrosion qui se développe très vite et qui peut détruire l'objet en peu de temps. Les objets en fer sont généralement stockés à une HR au-dessous de 15 %. Dans le cas où il y a des matériaux organiques minéralisés qui adhèrent aux objets ferreux, cela ne pose pas de problème, ces objets peuvent être stockés sans autre à une HR au-dessous de 15 %⁶. Watkinson et Lewis conseillent une HR au-dessous de 12 % pour les objets ferreux atteints de corrosion active⁷.

² Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006b, p.12-16.

³ Ibid., p.27-30.

⁴ Huber et von Lerber, 2003, p.144-145.

⁵ Mardaga, 2001, p.62-65.

⁶ Watkinson, 1987, p.37-38.

⁷ Watkinson et Lewis, 2005, p.249.

Le bronze : Le bronze est moins sensible que le fer en ce qui concerne l'humidité relative et peut donc être stocké jusqu'à une HR de 35 %⁸. Par contre, les bronzes sont très sensibles au dioxyde de soufre (SO₂) qui provient de l'oxydation du soufre présent dans les combustibles (essences, charbons). Il contribue donc à la détérioration des bronzes⁹.

L'Argent : L'argent est sensible aux gaz sulfureux qui peuvent contribuer au ternissement et ainsi au développement de corrosion (qui se produit de façon lente, comparé à celle du fer). Watkinson propose de stocker les objets en argent si possible au-dessous d'une HR de 35 %¹⁰.

Les objets en **matériau inorganique** (verre, pâte de verre, ambre, azurite et silex dans le cas de l'ensemble des objets de Kallnach) devraient être stockés à une HR plus élevée que pour les objets métalliques.

Les objets en **verre** et en **pâte de verre** sont généralement conservés dans un climat comportant une HR d'environ 55 %. Les petites fluctuations de 5 % à 10 % sont acceptables, mais l'HR ne devrait jamais atteindre 65 % ou plus, ni descendre au-dessous de 45 %¹¹.

Mardaga prévoit une température moyenne (plus ou moins 20 °C) et une HR entre 40 % et 55 %¹².

Les perles en **ambre** sont généralement stockées dans les mêmes conditions que le verre. L'ambre, une résine fossilisée qui est généralement translucide, peut devenir opaque et former des microfissures en cas de dessèchement¹³. Pour les objets en **silex** et en **azurite** (un minéral bleu), nous n'avons trouvé qu'une seule source qui indique les conditions de stockage pour les collections géologiques en général. Selon cette source, une température entre 16 °C et 22 °C et une HR de 45 % à 55 % semble adéquat¹⁴.

2.2 LE DEPOT DU SERVICE ARCHEOLOGIQUE DU CANTON DE BERNE

Depuis que le service archéologique du canton de Berne se situe à la Brünnenstrasse 66 à Berne Bümpliz Nord (avril 2006), il dispose d'un dépôt climatisé pour ses trouvailles. Le dépôt est divisé en plusieurs locaux. Les objets qui viennent d'être fouillés entrent d'abord dans le « Behälterlager », un entrepôt automatique avec plus de 10'000 places pour des caisses RAKO® (400 x 600 mm). Dans cet entrepôt, les objets restent jusqu'à la fin de leur évaluation. Le service archéologique s'efforce de ne pas laisser les objets métalliques plus que deux mois dans cet entrepôt. Mais comme nous le verrons plus loin, cela n'est pas toujours respecté. La température dans ce local se situe aux alentours de 20 °C +/- 2 °C et l'HR à environ 50 % +/- 5 %, ce qui est certainement trop haut pour les métaux archéologiques.

Le deuxième local est le « Palettenlager » où se trouvent les complexes évalués (dépôt final), les objets hors normes et les collections externes. Les objets en métal ne sont jamais conservés dans ce local. Ceux-ci sont stockés dans un local spécial (« Metallager »), climatisé à une température de 18 °C +/- 2 °C et une HR de 20 % +/- 5 % (fig. 11, annexe A). Les objets qui sont conservés dans ce dépôt devraient être des objets évalués, traités et éventuellement dégagés. Normalement, tous les objets dans ce dépôt

⁸ Watkinson, 1987, p.41.

⁹ Mardaga, 2001, p.30.

¹⁰ Watkinson, 1987, p.44.

¹¹ Ibid., p.67.

¹² Mardaga, 2001, p.96.

¹³ Watkinson, 1987, p.54.

¹⁴ Museums & Galleries Commission, 1993, p.55.

devraient être considérés comme terminés. Malheureusement, le dépôt contient aussi des objets non évalués qui ont été entreposés dans ce local dès le début. Il arrive également que les objets appartenant à un seul complexe n'aient pas suivi les mêmes traitements mais soient quand même entrés dans le dépôt final. Le service archéologique est constamment en train d'améliorer cette situation. Ainsi, il est en discussion de diviser le dépôt des métaux en quatre zones¹⁵. Une zone qui correspondrait au « Behälterlager » où les objets provenant directement de la fouille seraient stockés à court terme jusqu'à ce qu'ils entrent dans le processus de conservation. La deuxième zone répondrait à un besoin à moyen terme pour les objets examinés et conservés qui attendent leur évaluation définitive. La troisième zone contiendrait le dépôt final pour les objets considérés comme terminés. Comme il arrive parfois, pour diverses raisons, que le processus de conservation pour certains objets doive être interrompu, une quatrième zone serait prévue pour le stockage temporaire de ces objets.

Le complexe de 'Kallnach, Bergweg, 1988' contient des objets conservés (dessalés) et restaurés (dégagés), mais aussi des objets non ou insuffisamment traités. Néanmoins, cet ensemble d'objets est aujourd'hui déclaré comme terminé et entrera dans le dépôt final avec un conditionnement adapté sur le long terme. Les seules possibilités de déplacement de ces objets seront dues à la prévision d'éventuelles expositions.

2.2.1 LES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LE DEPOT DES METAUX

Le service archéologique dispose depuis 2006 d'une climatisation qui permet d'obtenir un climat stable au niveau de l'HR et de la température. L'installation n'était au début pas assez puissante pour des locaux d'une telle taille, notamment en été quand le temps est chaud et humide. De ce fait, des problèmes quotidiens sont apparus. Aujourd'hui, l'amélioration du système de climatisation est toujours en cours, mais le climat reste plus ou moins stable. Le climat dans le dépôt des métaux n'est pas concerné par ces problèmes et comme décrit au chapitre 2.2, il est régulé à une température de 18 °C +/- 2 °C et à une HR de 20 % +/- 5 %.

Pour la raison que les instruments de mesure (capteurs) du service archéologique ne sont pas calibrés, nous avons décidé d'effectuer des mesures supplémentaires avec un capteur étalonné. Après avoir réglé les capteurs de façon identique, nous avons prévu de comparer le climat dans le dépôt des métaux avec le microclimat d'une des caisses RAKO®.

La procédure a été la suivante : nous avons d'abord posé notre capteur de type Elpro Hamster® EHT1 à côté du capteur du service archéologique (TFA Klima Logger) pendant environ cinq heures. Pendant ce temps-là, notre capteur s'est adapté au climat du dépôt. Les deux capteurs ont été programmés afin de réaliser une mesure toutes les 60 minutes. A la fin de la période de mesure, le capteur du service indiquait une température de 17.9 °C et une HR de 22 %. Notre capteur mesurait 18.2 °C et 22.7 % d'HR. La différence entre les deux capteurs est donc de 0.3 °C pour la température et de 0.7 % pour l'HR. Ces variations sont minimales et ne nécessitent pas d'ajustement. Dans le cas où la différence pour l'HR aurait été supérieure à 5 %, il aurait été indispensable de prendre en compte cet écart dans l'analyse de nos résultats.

¹⁵ Bruhin, 2009.

Afin de détecter une éventuelle différence de climat entre le dépôt et la caisse RAKO[®], nous avons par la suite posé notre capteur, toujours avec un pas de programmation de 60 minutes, dans une des boîtes pendant quatre jours.

Dans le but de voir plus précisément les variations climatiques, nous avons décidé de répéter cette procédure avec un pas de programmation de cinq minutes. Nous avons donc posé notre capteur avec un pas de programmation de cinq minutes pendant quatre jours à côté du capteur du service archéologique et ensuite encore pendant environ quatre jours dans une caisse RAKO[®].

L'analyse des données : Malheureusement, les mesures enregistrées par le capteur du service archéologique correspondant à la période de mesures réalisées dans la caisse RAKO[®], ont été perdues suite à un problème technique. Il n'est donc pas possible de comparer le climat du dépôt et de la caisse RAKO[®] pour le même laps de temps, ce qui aurait été l'idéal. Néanmoins, nous avons des résultats de mesure pour le dépôt (graphique 1, annexe B) durant les jours précédant notre test dans la caisse RAKO[®]. L'analyse des données enregistrées par notre capteur dans la caisse RAKO[®] (graphique 2, annexe B) démontre que le climat est nettement plus stable que dans le dépôt. L'HR dans le dépôt présente des fluctuations journalières qui peuvent aller jusqu'à près de 7 % et la température comporte des variations maximales de 1.5 °C. En outre, les variations dans la caisse RAKO[®] ne dépassent pas 0.3 % pour l'HR et 0.1 °C pour la température. Il semble donc que les caisses RAKO[®] constituent une sorte de tampon supplémentaire. Nous supposons que ces fluctuations sont dues au fonctionnement du système de climatisation, car elles parviennent également dans la nuit et de façon très régulière.

2.2.2 LES CONDITIONNEMENTS UTILISÉS ACTUELLEMENT

Le dépôt des métaux ne dispose jusqu'à présent pas d'une méthode de conditionnement homogène pour les objets. Quasiment tous les objets sont stockés dans des caisses RAKO[®], mais à l'intérieur de ces dernières il existe toutes sortes de types de conditionnement (fig. 12, annexe A). Ce sont par exemple des boîtes en carton, des sachets Minigrip[®] en polyéthylène (PE) et d'autres sachets en plastiques, des petites boîtes en plastique, des boîtes à membrane ou d'autres encore. Tout comme les emballages, les rembourrages et les techniques de fixation des objets sont également différents. Nous avons pu constater l'utilisation des matériaux suivants pour les rembourrages : plaques et films en mousse de PE, mousse de polyuréthane (PU, PUR), papier ménage, papier journal, papier de soie, film alimentaire (PE), ouate en coton et un autre rembourrage probablement en polyester. Certains objets ne disposent d'aucun rembourrage, ils sont tout simplement posés dans les boîtes en carton acide. En ce qui concerne les techniques de fixations on trouve des épingles en métal, des cure-dents en bois et parfois les objets ne sont pas fixés du tout.

Ces conditionnements ne sont certainement pas tous adaptés aux objets et ne respectent pas toujours les recommandations en vigueur du point de vue de la conservation préventive.

Une grande partie des matériaux utilisés actuellement ne sont pas compatibles avec les objets de collection (dans ce cas surtout les objets métalliques) et sont donc à proscrire, notamment les boîtes en

carton acides, le PU, les boîtes à membrane (la membrane est constitué de PU), le papier ménage ainsi que le papier journal et le papier de soie acide¹⁶.

Le métal est particulièrement sensible au dégagement d'acides. De ce fait, on peut supposer que les cure-dents en bois, utilisés pour la fixation et directement en contact avec les objets, ne sont pas un choix optimal. Nous conseillons donc de les proscrire également, car la proximité du matériau à l'objet joue un rôle déterminant.

Nous n'avons pas fait de tests pour confirmer les effets nocifs de ces matériaux. Un test d'Oddy permettrait de détecter un éventuel dégagement de composés nuisibles. Nous conseillons de proscrire les matériaux mentionnés ci-dessus parce qu'il est connu que ces matériaux peuvent dégager des composés nocifs, dû à leur composition (colles, etc.) et/ou à leur vieillissement.

2.3 LE CONSTAT D'ETAT DES OBJETS

Afin de pouvoir proposer un conditionnement adapté, il faut connaître l'état des objets présents dans la collection. Dans un premier temps, nous avons donc fait ce constat de manière systématique pour tous les objets métalliques à l'aide d'une fiche. Dans cette fiche sont notés les informations concernant la nature de l'objet, le traitement effectué ainsi que les altérations observées. Vous trouverez un modèle de cette fiche en annexe C.

Certains objets en **alliage ferreux** présentent une corrosion active et sont de ce fait mécaniquement moins stable que les objets non atteints. Malgré cela, les objets ferreux ont en général une bonne stabilité mécanique.

Les petits objets en **alliage cuivreux** présentent une fragilité liée à leur taille et leur mode de fabrication. De ce fait, ils doivent être conditionnés de manière à ce qu'ils soient assez protégés des risques mécaniques.

Les objets en **ambre, verre (+ pâte de verre), silex et azurite** ne figurent pas dans le constat d'état. Ce constat d'état a été effectué pour les objets en métal, car ce travail de diplôme propose un conditionnement à long terme uniquement pour les objets dans le dépôt des métaux. Dans le cas où tous les objets du complexe devraient rester ensembles, l'atmosphère de conditionnement serait établie selon les exigences des objets métalliques qui restent les plus sensibles. Sur notre demande, nous avons obtenu l'information que les objets non métalliques du complexe de Kallnach ne doivent pas forcément rester avec les objets métalliques du même complexe¹⁷. Nous proposons donc de les séparer des objets métalliques et de les délocaliser dans le « Behälterlager » où il règne un climat plus adéquat pour ces objets (cf. chapitre 2.1.2).

Suite à ce constat d'état, nous avons décidé de séparer les objets comportant de la corrosion active. En effet, il semble que l'HR de 20 % n'ait pas suffi à éviter le développement d'une corrosion. Ces objets, essentiellement ceux qui n'ont pas été dessalés et ceux qui n'ont subi qu'un traitement plasma au Musée national suisse dans les années 90, ont alors besoin d'une HR encore plus basse. Les traitements plasma effectués n'ont apparemment pas été suffisants pour retirer la totalité de chlorures.

¹⁶ Watkinson, 1987, p.29.

¹⁷ Information orale de Mme Barbara Chevallier, responsable du domaine de la conservation préventive au service archéologique du canton de Berne, le 3 juin 2009.

En dépouillant les fiches du constat d'état pour les objets en alliage ferreux, nous avons pu constater que les objets cités ci-dessus présentent également une instabilité mécanique (fig. 13, annexe A), alors que les objets dessalés par bain de sulfites alcalins ont une bonne stabilité mécanique malgré la présence de corrosion active.

Pour les objets en alliage cuivreux, il n'a pas toujours été facile de détecter une éventuelle corrosion active. Cela doit être encore confirmé avant le conditionnement, dans l'idéal à l'aide d'un binoculaire. Tous les objets présentant une couleur verte vive ont été considérés comme touchés par une corrosion active. Cependant, il se peut que cette couleur soit parfois due à la présence d'une patine (malachite).

2.3.1 LES PROCESSUS ET FACTEURS DE LA CORROSION

L'état le plus stable des métaux est sa forme oxydée, donc minéralisée et chaque métal cherche à retourner à ce stade. Plus le processus d'extraction est difficile, plus le métal a tendance à retourner au stade de minerai (par exemple, le fer se corrompt très facilement alors que l'or, qui se trouve naturellement à l'état métallique dans la nature, n'est pas sensible à la corrosion)¹⁸.

La corrosion d'objets métalliques se déclenche soit par une réaction chimique, soit par une réaction électrochimique (beaucoup plus fréquente) du métal avec son environnement.

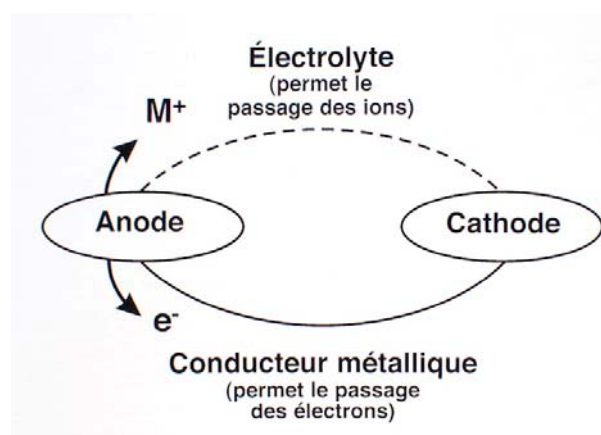


Fig. 2 : Schéma du processus de corrosion. M^+ = ions métalliques, e^- = électrons. (Selwyn, 2004, p.22)

La réaction électrochimique (fig. 2) se déroule au travers d'un transfert d'électrons lors d'une réaction d'oxydoréduction. La réaction d'oxydoréduction se caractérise par le fait que « les réactions d'oxydation et de réduction surviennent simultanément et dans la même mesure¹⁹. ». Pour que cette réaction puisse avoir lieu, la présence de deux électrodes (une anode et une cathode), d'un conducteur électrique et d'un électrolyte est obligatoire. L'anode et la cathode doivent être en contact électrique, qui est établi grâce au conducteur. Les deux demi-réactions nécessaires à la corrosion se déroulent sur les deux électrodes.

Les demi-réactions d'oxydation se produisent à l'anode, alors que les demi-réactions de réduction surviennent à la cathode. Le conducteur électrique permet le passage d'électrons de l'anode vers la cathode. « Le conducteur peut être un métal, un produit de corrosion conducteur (p. ex. la magnétite) ou tout autre matériau conducteur (p. ex. le graphite)²⁰. ». L'électrolyte (par exemple l'eau) est nécessaire pour qu'il puisse se produire une liaison ionique permettant le flux des ions entre l'anode et la cathode. La présence de tous ces composants est indispensable pour qu'il y ait une corrosion²¹.

¹⁸ Mardaga, 2001, p.59.

¹⁹ Dans Selwyn, 2004, p.21.

²⁰ Ibid., p.23.

²¹ Selwyn, 2004, p.21-23.

Afin d'illustrer ce processus de manière plus concrète, voici un exemple. Dans le sol archéologique, on trouve dans quasiment tous les cas de l'eau et de l'oxygène. On peut alors dire que l'eau, présente dans le sol, est l'électrolyte nécessaire pour le passage des ions. Le métal (p. ex. un clou en fer) joue le rôle du conducteur. Sur la surface du métal se produit une zone anodique et une zone cathodique. Les zones anodiques se forment en présence de défauts de fabrication, impuretés dans le métal ou autres irrégularités. Sous l'influence de l'oxygène, également présent dans le sol, les réactions d'oxydoréduction peuvent alors avoir lieu et le métal se corrode.

La présence des quatre conditions mentionnées ci-dessus (anode, cathode, conducteur, électrolyte) est nécessaire au développement d'une corrosion. Cependant, d'autres facteurs peuvent influencer la vitesse et la nature de la corrosion.

Ceci dépend par exemple du métal lui-même (plus noble est le métal, moins il est sensible à la corrosion), de sa composition (alliages), de sa technique de fabrication ou encore de son environnement. Selon sa nature, le sol archéologique peut avoir une grande influence sur les objets enfouis. Il peut par exemple y régner un climat agressif avec un pH acide ou il peut contenir beaucoup de sels solubles. Les principaux facteurs de la corrosion dans un sol sont donc²² :

- Nature du sol
- Taux d'oxygène
- Eau/humidité
- pH
- Microorganismes
- Sels solubles
- La température (température élevée=corrosion rapide)

Il est évident que les objets de fouilles sous-marines ne sont pas concernés par les mêmes facteurs de corrosion. Dans l'eau, l'oxygène est quasi totalement absent, mais les sels sont par contre beaucoup plus abondants.

2.3.2 OBJETS FERREUX

Le processus de corrosion des objets métalliques archéologiques se divise en deux phases : la corrosion durant l'enfouissement et la corrosion post excavation.

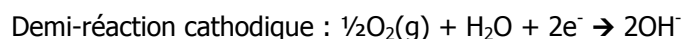
Le phénomène de la corrosion des objets enfouis est complexe. Comme cité ci-dessus, beaucoup de facteurs peuvent intervenir. Les trois principaux facteurs pendant l'enfouissement sont certainement la quantité d'eau et d'oxygène, l'acidité du sol (pH) et la quantité des sels solubles dans le sol²³.

Les objets en fer se recouvrent à l'air ambiant d'une fine couche d'oxyde qui constitue une protection pour le métal (tant que le taux d'HR reste au-dessous de 65 %). Dans le sol, cette couche protectrice est détruite à cause de l'humidité (l'eau) et le fer commence à corroder.

Normalement, le fer se trouve dans les états d'oxydation +2 (Fe^{2+}) et +3 (Fe^{3+}). En contact avec l'humidité, les deux demi-réactions nécessaires pour le développement de la corrosion, peuvent avoir lieu :

²² Müller, 2008, p.39.

²³ Gerwin, 1999, p.174-175.



Après ces premières demi-réactions, la chaîne du processus de corrosion continue : hydrolyse des ions de fer(II), formation de l'hydroxyde de fer(II), formation de l'hydroxyde de fer(III), formation d'hydroxydes et oxydes de fer (goethite, lépidocrocite), précipitation des composés de fer(II)-fer(III) (magnétite, rouilles vertes) et ainsi de suite²⁴. Toutes ces réactions dépendent fortement du pH et de l'oxygène présent dans le sol. En général, on peut dire que plus le pH est bas (milieu acide), plus le fer a tendance à se corroder rapidement. Au-dessus d'un pH d'environ 8, la surface du fer atteint l'état de passivation (ralentissement du phénomène de corrosion). La présence d'ions chlorures déplace la limite de passivation à un pH encore plus élevé²⁵. Les diagrammes de Pourbaix permettent de déterminer de façon théorique le comportement du fer en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve (pH de l'environnement, potentiel électrochimique du métal)²⁶.

La corrosion post excavation est principalement due aux variations du taux d'humidité et d'oxygène. Lors de la mise au jour d'un objet ferreux enfoui, le taux d'humidité descend tandis que le taux d'oxygène augmente brusquement. La diminution du taux d'humidité provoque un assèchement de l'objet qui peut créer des fissurations des couches de corrosion. Ainsi, l'oxygène peut facilement pénétrer jusqu'à la surface du métal. Les produits de corrosion qui sont devenus stables dans le milieu d'enfouissement peuvent recommencer à s'oxyder et à former de nouveaux produits de corrosion. Ces transformations peuvent fortement endommager l'objet (du point de vue chimique, mais aussi physique). La présence de sels solubles, en particulier les chlorures qui migrent vers la surface et se cristallisent, peut entraîner des détériorations conséquentes (formation d'akaganéite). L'akaganéite (β -FeOOH) est un composé considéré comme le principal responsable de la dégradation des objets archéologiques, car il peut relâcher des chlorures à une HR au-dessus de 20%. C'est un produit de corrosion actif, non stable et volumineux, de couleur orange-brun et de structure tubulaire. Cette structure peut induire de fortes contraintes physiques et absorber les chlorures en les rendant insoluble. L'akaganéite se transforme à long terme en goethite en relâchant les chlorures captés. Ces chlorures peuvent par la suite à nouveau attaquer le métal. L'augmentation du volume provoquée par ce phénomène de corrosion peut être responsable d'écailllements jusqu'à la destruction de la surface originale de l'objet. La lisibilité et la conservation de l'objet est alors menacée²⁷.

Mise à part l'akaganéite, de nombreux autres produits de corrosion peuvent se former en fonction du milieu dans lequel le métal est conservé. Par exemple, le « weeping iron » ou la corrosion en présence de dioxyde de soufre (SO_2). Ces autres produits n'ayant pas été détectés sur les objets du complexe de Kallnach, nous renonçons à la description de ceux-ci. Des informations plus précises peuvent être trouvées dans divers ouvrages²⁸.

²⁴ Afin de simplifier, nous renonçons ici à l'énumération de toutes les équations des réactions chimiques.

²⁵ Selwyn, 2004, p.110-111.

²⁶ Scharff *et al.*, 2000, p.20-21.

²⁷ Selwyn, 2004, p.116-117.

²⁸ Evans, 1952, Selwyn *et al.*, 1999, p.217-232 et Turgoose, 1985, p.13-18.

2.3.3 OBJETS CUIVREUX

Les principaux états d'oxydation du cuivre sont +1 (Cu^+) et +2 (Cu^{2+}). Mise à part de la cuprite Cu_2O (de couleur rougeâtre) et la chalcocite Cu_2S (de couleur noir), la plupart des composés de cuivre(I) sont incolores. Les produits de corrosion qui comportent une couleur vert ou bleu sont habituellement des composés de cuivre(II)²⁹.

Dans le sol archéologique, les objets en alliages de cuivre développent généralement une fine couche de composés de cuivre(I) (surtout de la cuprite) qui se forme à la surface du métal. Lorsque des ions de chlorure sont présents dans le sol, cette couche peut également contenir de la nantokite CuCl (chlorure de cuivre(I), de couleur gris pâle), produit de corrosion contenant en surface des composés de cuivre(II) de couleur bleu ou vert. Les produits de corrosion les plus observés sur les alliages de cuivre qui ont été enfouis sont la cuprite Cu_2O et la malachite $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$. La malachite (produit de corrosion stable de couleur verte) nécessite, pour sa formation, du CO_2 qui se trouve soit dissout dans l'eau du sol, soit dans l'air.

Comme les objets ferreux, les cuivreux peuvent aussi souffrir de la présence de chlorures dans le sol. La nantokite qui se forme à l'interface métal et corrosion interne peut attirer les ions chlorure et les retenir de sorte que la concentration de ces ions augmente fortement. Tant que la nantokite n'est pas en contact avec l'air, il ne se produit aucune réaction. Lorsqu'elle entre en contact avec de l'humidité ou de l'oxygène (mise au jour, dégagements de produits de corrosion externes) une corrosion rapide et destructrice peut se produire. C'est la formation de chlorures et d'hydroxydes de cuivre(II), tels que l'atacamite, la paratacamite et la clinoatacamite $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$. Ces produits de corrosion ont un aspect poudreux, sont de couleur vert clair et se développent souvent localement (aussi connu sous le nom de « maladie de bronze »)³⁰.

Des informations complémentaires concernant les produits de corrosion dans d'autres circonstances (p. ex. en présence d'acides gras, contamination au sodium, en présence de soufre, etc.) peuvent être trouvées dans les ouvrages mentionnés dans la note de bas de page³¹.

2.4 LES TRAITEMENTS EFFECTUES

Les objets métalliques du complexe 'Kallnach, Bergweg, 1988' ont été traités et restaurés dans différentes institutions et chez divers restaurateurs indépendants, selon leur constitution.

Les **objets ferreux** ont tous été traités par le Musée national suisse à Zurich de 1990 à 1991, principalement par la technique de déchloruration par plasma d'hydrogène. Environ 29 % des objets traités par plasma d'hydrogène ont été dessalés plus tard (1995/1996) par immersion dans un bain de sulfites alcalins. Ce traitement a été effectué par M. Hans Weber, autrefois restaurateur à Coire GR. Cette décision a été prise, car apparemment le traitement par plasma d'hydrogène n'a pas donné un résultat satisfaisant.

Les **objets cuivreux** ont été traités chez M. Rolf Fritschi, autrefois restaurateur à Zweidlen ZH. Ils ont été principalement stabilisés à l'aide de l'inhibiteur de corrosion Benzotriazole (BTA) et recouvert par un

²⁹ Selwyn, 2004, p.65.

³⁰ Ibid., p.70-74.

³¹ Selwyn, 2004, p.65-76 et Scott, 2002.

revêtement de surface de type cire (Cosmoloid H80) ou de type vernis (Paraloid B72). Certains objets ont seulement été protégés à l'aide de Paraloid B72.

Ci-dessous sont décrits les différents traitements de stabilisation effectués sur les objets métalliques du complexe de Kallnach.

La technique de déchloruration par plasma d'hydrogène

Le procédé de déchloruration par plasma d'hydrogène est une façon d'extraire les chlorures fixés dans un objet métallique. Le fonctionnement étant compliqué, nous nous limiterons aux détails permettant de comprendre les bases de ce procédé.

Qu'est-ce que le plasma ? Le plasma correspond au 4^e état de la matière. Il est proche du gaz mais se distingue de celui-ci par le fait qu'il ne contient que des particules chargées électriquement. Le plasma n'existe pas à l'état naturel sur terre, bien qu'environ 99 % de notre univers en soit constitué (galaxie, étoiles, soleil, etc.). Seules les étoiles en contiennent une certaine quantité. Il existe deux types de plasma : les plasmas chauds et les plasmas froids. La différence entre un plasma chaud et un plasma froid est due à son degré d'ionisation et à sa densité électronique, ainsi qu'à son équilibre thermodynamique. Plus la température augmente (jusqu'à une température très élevée de plus d'un million de degrés), plus la densité électronique devient élevée et plus le plasma est ionisé. Les plasmas chauds respectent l'équilibre thermodynamique, ce qui n'est pas le cas des plasmas froids. Concrètement, cela veut dire que les espèces chimiques dans le plasma froid (électrons, ions, molécules et atomes neutres) ne chauffent pas de manière homogène. Dans ce type de plasma, seul les électrons augmentent leur température, alors que les ions et les éléments neutres restent à température basse. C'est pourquoi on parle d'un plasma hors équilibre thermodynamique. Le plasma peut être créé artificiellement (à l'aide d'une décharge électrique entre deux électrodes) et trouve de nombreuses applications dans divers domaines (microélectronique, éclairage, industrie automobile, etc.). Dans le domaine de la conservation-restauration, ce sont les plasmas froids qui sont utilisés pour les traitements de surface des objets métalliques. Dans le cas où des restes de matériaux organiques (textiles, bois) adhèrent aux objets métalliques, il est déconseillé d'utiliser la réduction au plasma, car ce traitement pourrait les dessécher³². Sans entrer dans les détails, le traitement a un effet de réduction sur les espèces responsables de la corrosion (oxydes et chlorures). Cette réduction permet de transformer les produits de corrosion en hématite (Fe₂O₃) et en magnétite (Fe₃O₄) (produits stables). Le traitement permet également de fragiliser les couches de corrosion qui se trouvent au-dessus de la surface originelle et de les rendre ainsi plus poreuse, ce qui facilite l'extraction des chlorures³³.

La technique du plasma d'hydrogène a été testée et appliquée dans le domaine de la restauration à partir de la fin des années 70 en Angleterre. Dans les années 80, c'est à Zurich qu'ont lieu les premiers tests de déchloruration des objets ferreux. Depuis, cette technique fait partie des traitements réalisés sur les objets métalliques au Musée national suisse.

³² Dussère, 1997, p.138 et Leprince et Lamethe-Parneix, 1999, p.131.

³³ Dussère, 1997, p.139.

La méthode est développée à partir d'une technique plus ancienne où l'on travaillait avec du dihydrogène, chauffé à environ 800 °C et mis sous pression. En remplaçant le dihydrogène par du plasma d'hydrogène, il est devenu possible de travailler avec de températures plus basses (inférieures à 400 °C) et des pressions plus faibles³⁴.

Au Musée national suisse, ces essais ont été réalisés en deux étapes. La première étape, jusqu'à environ 1989, a consisté au traitement suivant :

« a traitement hydrogène/méthane pendant deux heures

b nettoyage mécanique à l'aide d'un scalpel ou d'un scalpel à ultrasons

c traitement plasma (à environ 400 °C) pendant 18-20 heures avec hydrogène, méthane, azote et argon

d revêtement de surface avec cire microcristalline³⁵ ».

La deuxième étape qui a eu lieu entre 1990-1993 représente une technique plus perfectionnée. Elle a été développée par l'équipe de recherches du Musée national suisse et par le conservateur des métaux (Jörg Elmer) de l'époque. Le but principal de ce développement est de limiter les dégâts observés durant la première étape et dus aux températures élevées (400 °C) et au temps d'immersion relativement longs (18-20 heures).

La méthode a donc été modifiée comme suit :

« a dessiccation préalable des objets dans un four à vide à une température d'environ 75 °C

b traitement plasma pendant 7-8 heures avec hydrogène, méthane, azote et argon, la température est peu à peu réduite à une moyenne de 190-260 °C

c nettoyage mécanique à l'aide d'un scalpel à ultrasons ou en employant des abrasifs

d revêtement de surface avec cire microcristalline³⁶ ».

Les objets ferreux du complexe de Kallnach ont tous été traités avec la méthode de déchloration par plasma d'hydrogène au Musée national suisse entre octobre 1990 et janvier 1991. Ils ont donc tous bénéficié de la version développée et n'ont subi des températures que de maximum 265, voir 280 °C³⁷. Malgré cela, la méthode n'a pas encore été assez affinée pour permettre une conservation satisfaisante sur le long terme et a été à nouveau modifiée en 1994. Depuis, l'emploi de l'azote et du méthane est supprimé et la température est abaissée à environ 120 °C. Mais le point le plus important est sûrement l'addition d'un bain de dessalaison par sulfites alcalins. La combinaison de ces deux méthodes semble donner des résultats très satisfaisants. Schmidt-Ott³⁸ écrit en 1999 : « *Après quatre ans, tous les objets traités selon cette méthode sont restés stables et ne présentent aucune trace de corrosion ultérieure, bien qu'ils n'aient pas toujours été déposés dans un milieu climatisé et contrôlé³⁹.* »

³⁴ Forrières, 2001, p.77-79.

³⁵ Dans Schmidt-Ott, 1997, p.46.

³⁶ Ibid., p.46.

³⁷ Ces informations sont tirées du « Restaurierungsprotokoll Plasmabehandlung, Kallnach Kt. Bern, 1990 » qui se trouve dans les archives du service archéologique du canton de Berne à Bern Bümpliz, Brünnenstrasse 66.

³⁸ Schmidt-Ott, 1999.

³⁹ Dans Schmidt-Ott, 1999, p.149.

Malheureusement, les objets du complexe de Kallnach n'ont pas pu profiter de ce traitement combiné. Ils contiennent donc certainement une concentration plus élevée en chlorures, ce qu'on peut d'ailleurs confirmer par le constat d'état, effectué en mai 2009.

La technique par immersion dans le bain de sulfites alcalins

La méthode du sulfite alcalin a été développée par North et Pearson en 1975. Initialement employée pour la déchloruration d'objets métalliques provenant de la mer⁴⁰, elle est aujourd'hui également utilisée pour les objets archéologiques provenant des sols terrestres⁴¹.

Le sulfite alcalin a comme avantage d'augmenter la porosité des couches de corrosion jusqu'au noyau métallique de l'objet. Une plus grande porosité des couches facilite la diffusion des ions chlorure (donc l'extraction)⁴².

Le bain contient trois composants : de l'eau déminéralisée, de l'hydroxyde de sodium (soude caustique, NaOH) et du sulfite de sodium (Na_2SO_3). Plusieurs articles⁴³ proposent le dosage suivant : 0.5 mol de NaOH et 0.5 mol de Na_2SO_3 pour un litre d'eau. Le bain est ensuite chauffé à environ 30-60 °C, de préférence sous couvert, afin d'éviter l'oxydation du sulfite en sulfate de sodium. Comme on peut le voir plus bas, une partie du mécanisme de déchloruration consiste en la transformation du sulfite SO_3^{2-} en sulfate SO_4^{2-} . Afin de protéger les objets d'une oxydation indésirable, il faut qu'il reste une certaine quantité de sulfite sous sa forme d'origine dans le bain.

L'hydroxyde de sodium et le sulfite de sodium contribuent au lessivage des chlorures. L'eau déminéralisée joue le rôle d'électrolyte. L'hydroxyde de sodium permet la transformation de l'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$) en goethite (échange des ions Cl^- par des ions OH^-) et ainsi l'extraction des chlorures. Le sulfite de sodium interrompt le cycle de corrosion grâce au fait qu'il utilise l'oxygène de l'air pour la transformation du sulfite SO_3^{2-} en sulfate SO_4^{2-} . De plus il empêche l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} , ce qui pourrait obstruer les voies d'extraction.

L'hydroxyde de sodium et le sulfite de sodium ont également la propriété de provoquer une augmentation du pH, qui a un effet positif sur le traitement (protection anticorrosion pour le noyau métallique restant, meilleure pénétration des couches de corrosion).

La technique par immersion dans un bain de sulfites alcalins possède l'avantage de lessiver également les chlorures avant qu'ils ne se transforment en akaganéite. Ces chlorures ferreux hydratés (stade préliminaire de l'akaganéite) sont plus faciles à lessiver que les chlorures dans le réseau de l'akaganéite. Pour un lessivage optimal et sans problèmes, il est conseillé de changer le bain régulièrement et de le mettre constamment en mouvement (empêche l'agglomération des chlorures)⁴⁴.

La durée du traitement dépend de plusieurs facteurs, tels que la composition physico-chimique des couches de corrosion et les espèces ioniques au sein de ces couches. Généralement, on considère un traitement accompli quand la teneur en chlorures reste basse pendant plusieurs semaines. Un taux d'ions

⁴⁰ North et Pearson, 1975, p.75/13/3.1-14.

⁴¹ Greiff et Bach, 2000, p.319.

⁴² Loeper-Attia et Weker, 1997, p.162.

⁴³ Loeper-Attia et Weker, 1997, p.163, Greiff et Bach, 2000, p.336, Forrières, 2001, p.75.

⁴⁴ Greiff et Bach, 2000, p.324.

chlorures inférieur à 5 ppm est un niveau acceptable⁴⁵. « *Pour des raisons physico-chimiques il n'est pas possible d'extraire tous les ions chlorure. Du point de vue de la conservation, une faible quantité restante est toutefois tolérable*⁴⁶ ».

L'inhibiteur de corrosion Benzotriazole (BTA)

Avant d'être employé dans le domaine de la conservation-restauration, le Benzotriazole (BTA) (C₆H₅N₃) a déjà été utilisé pendant vingt ans dans d'autres domaines. Depuis 1967, le BTA fait part des traitements courants des objets cuivreux⁴⁷. Le BTA peut être employé lors d'une corrosion active due aux chlorures cuivreux mais aussi comme traitement préalable. Divers études ont cependant montré que l'efficacité du traitement augmente s'il est appliqué avant une éventuelle corrosion⁴⁸.

La solution standard d'aujourd'hui est composée de 3 % de BTA dans de l'éthanol à une température ambiante⁴⁹. Le BTA peut également être dissout à 1 % dans de l'eau et les températures pendant le traitement peuvent atteindre environ 50 °C⁵⁰. La durée du traitement varie énormément, allant d'une demi-heure jusqu'à plusieurs mois, suivant l'importance de la corrosion. Le document le plus récent⁵¹ prévoit une durée jusqu'à 24 heures.

Le processus de l'inhibiteur BTA est basé sur la formation de complexes sous forme d'une fine couche de protection stable sur la surface métallique de l'objet. Le BTA n'est que très peu soluble à l'eau⁵².

Du à la toxicité du BTA (potentiellement cancérigène, nocif par inhalation, irritant pour les yeux, dangereux pour les animaux aquatiques), des précautions particulières doivent être prises lors de sa manipulation.

Après le traitement, la couche précipitée de BTA à la surface de l'objet est souvent protégé par une couche de Paraloid B72 (5 % dans de l'éthanol)⁵³. Vous trouverez des informations plus précises sur le Paraloid B72 et le Cosmoloid H80 ci-dessous.

Paraloid B72

Le Paraloid B72 est une résine acrylique qui est également utilisé comme colle. Le produit de base pour le Paraloid sont des billes transparentes à l'avantage d'être solubles dans une grande gamme de solvants polaires et non polaires (alcool, acétone, acétate d'éthyle, toluène, etc.). La viscosité est variable selon la concentration et selon le solvant utilisé⁵⁴. La brillance du film se laisse également influencer par la concentration. Le Paraloid B72 a une très bonne réversibilité à long terme, critère important dans le domaine de la conservation-restauration. L'hydrogène sulfureux, naturellement présent dans l'air, peut

⁴⁵ Loeper-Attia et Weker, 1997, p.163.

⁴⁶ Dans Greiff et Bach, 2000, p.337.

⁴⁷ Scott, 2002, p.376.

⁴⁸ Bertholon et Relier, 1990, p.217.

⁴⁹ Scott, 2002, p.380.

⁵⁰ Bertholon et Relier, 1990, p.217.

⁵¹ Scott, 2002, p.380.

⁵² Ibid., p.376-377.

⁵³ Ibid., p.380-381.

⁵⁴ Notes personnelles du cours « Les colles », donné par M. Christian Binet, conservateur-restaurateur et professeur à la HECR Arc, La Chaux-de-Fonds, 10 décembre 2008.

déclencher une corrosion, entre autres, aux surfaces des alliages cuivreux. La protection de l'objet cuivreux est donc le plus assuré dans le cas où l'application d'un vernis est combinée avec un traitement au BTA⁵⁵.

Cosmoloid H80

Le Cosmoloid H80 est une cire microcristalline de couleur blanchâtre qui est commercialisé sous forme de plaques ou de granulés. Il est utilisé comme revêtement de surface (couche de protection) pour objets métalliques. Il est généralement dissout dans le white-spirit pour l'application.

3 LE NOUVEAU CONDITIONNEMENT

3.1 CONDITIONNEMENT RECHERCHE PAR LE SERVICE ARCHEOLOGIQUE

Le service archéologique du canton de Berne ne dispose actuellement pas d'une méthode de conditionnement homogène pour ses objets et les matériaux utilisés ne répondent pas tous aux exigences de la conservation préventive. D'une manière générale, ces matériaux doivent toujours être chimiquement et physiquement stables, afin de ne pas représenter une source de dégradation potentielle pour les objets. Le service archéologique aimerait donc que nous développions un concept d'emballage « standard », permettant une conservation correcte de l'ensemble des objets métalliques dans le dépôt final. Le concept de base est mis en place pour les objets appartenant au complexe de Kallnach. Les critères suivants devront être pris en compte pour la réalisation de ce conditionnement :

- L'identification des objets doit être claire : étiquetage, marquage, visibilité
- La stabilité mécanique des objets doit être assurée: aucune friction avec d'autres objets, rembourrage suffisant
- La stabilité chimique : les matériaux de conditionnement doivent être chimiquement inertes et adaptés à une conservation sur le long terme
- Le climat : le climat doit avoir accès à l'objet, pas d'emballages hermétiquement fermés sans conditionnement

Bien entendu, le service archéologique a aussi des contraintes qui sont liées par exemple à la place et aux ressources humaines. Bien que la place ne soit pas le critère considéré comme principal, il souhaiterait que le volume du nouveau conditionnement n'augmente pas. De plus, les boîtes RAKO® devront être maintenues comme base pour ce concept.

3.2 CONCEPTS PROPOSES

3.2.1 CRITERES PRIS EN CONSIDERATION

La proposition d'un conditionnement doit toujours être adaptée aux besoins de l'institution et doit donc prendre en compte les risques les plus probables présents dans l'entourage de la collection.

⁵⁵ Bertholon et Relier, 1990, p.219-220.

Après un constat d'état des objets, une expertise des matériaux de conditionnement utilisés jusqu'à présent et une évaluation des facteurs climatiques dans le dépôt, nous avons défini les risques qui nous semblent les plus probables. Ce sont :

- l'humidité relative (corrosion)
- la contamination par les matériaux d'emballage inadaptés
- le frottement mécanique
- la perte d'informations

Comme les objets du complexe de Kallnach risquent d'être prêtés et/ou exposés, nous avons également pris en considération le risque « exposition/prêt/autre sortie du dépôt ».

Avec ces cinq risques, nous prenons en compte les contraintes imposées par le service archéologique pour le nouveau concept d'emballage (climat, stabilité chimique, stabilité mécanique, identification claire des objets).

L'HR représente un risque important dans notre cas, car le complexe de Kallnach est constitué d'objets n'ayant pas tous subi un traitement de dessalaison. De ce fait, une HR d'environ 20 % peut déclencher un nouveau cycle de corrosion. Nous avons détecté des objets ferreux avec une corrosion active, ce qui montre que l'HR est encore trop élevée pour ces objets. Les objets ferreux non dessalés doivent être stockés dans un environnement avec moins de 12 % d'humidité relative⁵⁶.

Bien évidemment, il existe généralement dans une réserve d'autres risques potentiels tels que la lumière et les risques biologiques (insectes, micro-organismes, rongeurs). Dans le cas du dépôt final, nous jugeons que ces risques peuvent quasiment être exclus. L'éclairage est uniquement activé lorsque le personnel intervient pour un travail ou pour aller chercher un objet ou une caisse. De plus, les objets en question ne sont pas très sensibles à la lumière et la quasi-totalité de ces derniers sont emballés dans des caisses RAKO® munies d'un couvercle (pas d'accès de la lumière).

Vu les conditions climatiques dans le dépôt des métaux (HR 20 % +/- 5%, T 18 °C +/- 2 °C), le risque de micro-organismes est minime. Les micro-organismes se développent surtout à un taux d'humidité au-dessus de 65 %. Le dépôt ne contenant aucun objet en matériau organique, les insectes ne représentent pas un risque. Nous supposons que la température n'a dans notre cas pas beaucoup d'influence, car elle est très stable et reste toujours à un niveau assez bas. En ce qui concerne la problématique de la poussière, le système de climatisation dispose d'un filtre à particules et les objets sont protégés par les caisses fermées. Le dépôt des métaux est entièrement constitué de murs en béton et il comporte un seul accès (donnant à l'intérieur du bâtiment) et aucune fenêtre. Le risque lié aux rongeurs est donc très limité.

Les risques physiques, tel que l'eau (inondation) et le feu (incendie) sont toujours probables et devraient être pris en considération. Le dépôt dispose d'un système de sprinkler et plusieurs conduites sont présentes. Ces deux risques, ainsi que les risques criminels (vol, vandalisme) ne sont pas traités dans ce travail. Ces risques apparaîtront dans le plan d'urgence qui sera développé dans peu de temps par le service archéologique du canton de Berne.

⁵⁶ Watkinson et Lewis, 2005, p.249.

3.2.2 CHOIX DES MATERIAUX DE CONDITIONNEMENT

La conservation préventive prévoit d'utiliser des matériaux de conditionnement qui sont chimiquement et physiquement stables et qui ne présentent aucun autre danger pour les objets du patrimoine (rugosité, dureté, etc.). Il existe aujourd'hui une riche documentation en ce qui concerne la proscription de certains matériaux et la réalisation de tests de mesures des émissions (par exemple test d'Oddy, test pH) n'est pas toujours nécessaire. Néanmoins, nous conseillons d'effectuer ces tests lorsque l'on n'est pas sûr de la nature du matériau et essentiellement lorsque d'autres composés (par exemple des colorants) peuvent être présents.

Généralement, les conditionnements à base de PE sont inertes et sont recommandés par plusieurs sources⁵⁷. Cela s'applique également pour le papier de soie non acide et les boîtes en polystyrène (PS).

Le matériau d'emballage doit permettre une protection contre⁵⁸ :

- Les usures mécaniques (objet contre objet)
- Les frottements et les déplacements à l'intérieur de la caisse
- Les vibrations et les chocs
- Les variations climatiques
- Les sources nocives biologiques

Ci-dessous, vous trouverez une description des matériaux et produits que nous avons prévu pour le nouveau concept d'emballage.

Mousses

L'Ethafoam® et le **Plastazote®** (fiches techniques en annexe D) sont des mousses de marques commerciales déposées constituées de PE⁵⁹. L'Ethafoam® est une mousse de PE non réticulée à cellules fermées. Le Plastazote® est une mousse réticulée à microcellules fermées. Les deux existent en différentes épaisseurs et densités et sont chimiquement neutre. Elles permettent une bonne protection contre les chocs et les vibrations, isolent bien et sont robustes. Dans le domaine de la conservation, l'Ethafoam® est souvent utilisé pour des supports, des calages ou des matelassures. La rugosité de cette mousse est un de ses rares désavantages, elle apparaît lorsqu'on la découpe (les cellules fermées sont détruites). Sous forme de feuilles minces, cette mousse est utilisée pour la garniture d'étagère ou la protection d'objets lors de transport. Les feuilles utilisées comme rembourrage dans les sachets Minigrip® sont également en PE non réticulé à cellules fermées. Elles possèdent l'avantage de rester lisses, car la découpe n'est pas nécessaire pour cet usage. Le Plastazote® a une texture beaucoup plus fine que l'Ethafoam®, sa surface est douce, lisse et souple même lorsqu'on la découpe. Il est plus dense que l'Ethafoam® mais comporte une aussi bonne capacité d'absorption des chocs. Il se prête donc particulièrement bien pour le support

⁵⁷ Huber et von Lerber, 2003, Mardaga, 2001, Relier et Queixalos, 1997.

⁵⁸ Guillemard et Laroque, 1999, p.61.

⁵⁹ Ces deux mousses ont été testées au début de l'année 2009 par le *Laboratorium für Konservierungsforschung der Schweizerischen Landesmuseen*. L'Ethafoam® est classé entre usage permanent et usage temporaire, le Plastazote® est classé dans usage permanent (informations reçues d'Erwin Hildbrand, laborantin en chimie au *Laboratorium für Konservierungsforschung der Schweizerischen Landesmuseen*, 24 juin 2009).

d'objets sensibles ou la garniture d'étagère. Les deux marques existent en différentes couleurs, mais pour l'utilisation en conservation on utilise généralement le blanc ou le noir⁶⁰.

Gel de silice

Le gel de silice (fiche technique en annexe D) est un matériau hygroscopique qui permet de contrôler l'HR dans une enceinte fermée. Il est généralement fabriqué synthétiquement et possède une structure très poreuse et amorphe. Les gels de silice sont commercialisés sous forme de petites billes ou granulés de diverses couleurs. Ils sont vendus en vrac ou sous forme de sachets composés de divers matériaux (non-tissé, Tyvek®, papier). Certains gels contiennent un indicateur de couleur qui indique leur activité (humide ou sec). L'humidité est adsorbée et captée par les pores du gel. Contrairement aux tamis moléculaires, la capacité d'adsorption dépend de l'HR ambiante. Elle peut varier entre 10-38 % en poids d'eau. Les gels de silice sont régénérables jusqu'à dix fois en les exposant à des températures de 120-150 °C. Le gel de silice ne contient pas de substances toxiques, est chimiquement inerte et insoluble dans l'eau⁶¹.

Tamis moléculaires

Les tamis moléculaires sont des zéolites cristallines avec une structure moléculaire « cage ». Ils sont composés d'aluminosilicates hydratés. Afin d'illustrer la structure dite « cage », on peut dire qu'à chaque fois quatre atomes d'oxygène enferment un atome de silicium ou d'aluminium.

On trouve les zéolites en tant qu'éléments dans la nature et sont formés par une réaction chimique lente entre les roches volcaniques et l'eau salée. Elles sont pour la plupart du temps incolores ou blanches, parfois rouges ou jaunes et de formes différentes. Les zéolites utilisées pour les tamis moléculaires sont généralement des zéolites synthétiques qui contiennent une structure en pores uniformes et se présentent sous la forme de granulés⁶². Elles sont employées dans divers domaines, tels que l'épuration des eaux usées, les techniques de l'énergie solaire ou l'industrie agricole.

La propriété la plus exceptionnelle de ces zéolites est sûrement l'énorme puissance d'adsorption de l'humidité. A la différence du gel de silice, les zéolites peuvent adsorber environ 20 à 23 % en poids d'eau, indépendamment du taux d'HR contenue dans l'environnement. Elles permettent donc d'obtenir un climat extrêmement sec avec un taux d'HR de près de 0 %⁶³. Le terme « tamis moléculaire » vient de l'autre propriété étonnante des zéolites qui consiste à pouvoir adsorber des substances toxiques ou même radioactives. Elles fonctionnent alors comme un tamis qui filtre les molécules en fonction de leurs dimensions (les molécules en dessous d'une certaine dimension sont adsorbées). Les zéolites utilisées pour le stockage à long terme comportent des diamètres de pores de 3Å (=3 nm) ou 4Å (fiche technique en annexe D)⁶⁴. Les molécules ainsi captées sont maintenues à l'intérieur par une liaison physique et chimique. Elles peuvent être rejetées uniquement lorsque l'on chauffe les zéolites. L'avantage des zéolites

⁶⁰ Préserv'Art, 2007 (site internet)

⁶¹ Dry & Safe, 2008 (site internet)

⁶² Abbey Newsletter, 1996.

⁶³ Long life for art, 2004 (site internet)

⁶⁴ Rempel, 1996, p.13.

synthétiques est que le diamètre des pores peut être défini lors de leur production, ce qui permet de fabriquer des zéolites en fonction des besoins.

Cette propriété représente également un intérêt dans le domaine de la conservation, car il est possible d'adsorber non seulement l'humidité mais en même temps les substances nocives, telles que le chlorure d'hydrogène (HCl) ou l'acide acétique (CH₃COOH).

Les zéolites sont fabriquées à partir de silicium et aluminium. Ces deux composants font partie des éléments les plus abondants dans la nature, il est donc quasiment impossible d'épuiser les ressources sur terre. A cela s'ajoute encore le fait que les zéolites sont régénérables de nombreuses fois, il suffit pour cela de les exposer à des températures au dessus de 250 °C⁶⁵. On trouve dans le commerce des tamis moléculaires en vrac ou enfermés dans des sachets en Tyvek[®] (ne peuvent cependant pas être régénérés, car le Tyvek[®] ne supporte pas des températures aussi hautes). Les tamis moléculaires sont inertes et ne représentent aucun danger pour la santé et pour les objets⁶⁶.

Absorbeurs d'oxygène

Les absorbeurs d'oxygène sous forme de petits sachets sont connus dans le domaine de la conservation-restauration depuis environ 20 ans. Ils sont notamment utilisés pour le stockage d'objets particulièrement sensibles à l'oxygène, tels que les objets archéologiques (en métal) ou les objets en caoutchouc.

Aujourd'hui, les absorbeurs d'oxygène sont également employés pour lutter contre les infestations d'insectes dans les collections. Dans les deux cas, il est nécessaire de créer une enveloppe étanche autour de l'objet (sachets ou tentes pour les plus grands objets).

Les premiers absorbeurs d'oxygène ont été constitués de poudre de fer combiné avec un matériau siccatif (dans la plupart du temps des zéolites naturels). L'absorption de l'oxygène est basée sur l'oxydation de la poudre de fer. Cette réaction a besoin d'humidité qui se trouve adsorbée dans les zéolites. Grâce à l'addition de chlorures de sodium (NaCl), cette réaction est accélérée. Le principal problème lié à ces premiers absorbeurs d'oxygène (par exemple Ageless de Mitsubishi Gas Chemical Company (MGC), Atco de Standa Industrie ou FreshPax de Multisorb Technologies Inc.) est qu'ils libèrent une partie de cette humidité lors de la réaction d'oxydation. Cela provoque, au début de la réaction, une augmentation de l'HR à l'intérieur de l'enveloppe en film plastique jusqu'à 84 %. Une fois la réaction terminée, l'HR se stabilise vers un taux de 72 %. Afin de diminuer cette humidité, il a été nécessaire d'ajouter des sachets de gel de silice dans l'emballage soudé. De plus, l'oxydation du fer étant une réaction exothermique, une augmentation de la température est donc inévitable. Ces absorbeurs d'oxygène sont uniquement efficaces aux alentours d'un taux d'humidité relative de >55 %⁶⁷.

L'entreprise MGC propose aujourd'hui un nouveau système d'absorption d'oxygène pour contrer ces « effets secondaires » indésirables. Il s'agit du RP système[™] qui est proposé en deux modèles différents : Le RP-A[™] et le RP-K[™]. Contrairement aux premiers absorbeurs d'oxygène, ce système contient des composants organiques insaturés, de l'oxyde de calcium (CaO), des zéolites et du charbon actif en faible

⁶⁵ Long life for art, 2004 (site internet)

⁶⁶ Shashoua, 1999 (site internet)

⁶⁷ Elert et Maekawa, 2000, p.348-350.

quantité. Le charbon actif permet l'adsorption des polluants gazeux, tels que le dioxyde de soufre (SO₂), le chlorure d'hydrogène (HCl) ou encore l'ammoniac (NH₃). La réaction d'absorption d'oxygène est ici plus lente que pour les absorbeurs de la première génération. Grâce à cela, la température dans le sachet n'augmente que très peu et il n'y a pas de dégagement d'humidité.

La différence entre le RP-A™ et le RP-K™ est que le RP-K™ diminue uniquement le taux d'oxygène dans le sachet en film plastique, tandis que le RP-A™ permet de diminuer en même temps le taux d'humidité jusqu'à près de 0 %. L'absorbeur RP-K™ est donc surtout adapté pour les matériaux organiques et l'absorbeur RP-A™ (fiche technique en annexe D) se prête particulièrement bien pour le stockage des objets métalliques⁶⁸.

Pour contrôler le taux d'oxygène restant dans l'enveloppe soudée, il existe des indicateurs d'oxygène Ageless-Eye (MGC) qui se présentent sous la forme de pastilles bleues (fiche technique en annexe D). Au-dessous d'un taux d'oxygène de 0.1 % ces pastilles tournent au rose. Dès que la concentration d'oxygène repasse au-dessus de 0.5 %, elles redeviennent bleues. Cependant, il semblerait que ces pastilles ne fonctionnent plus de manière fiable avec un faible taux d'humidité. Certains tests ont démontrés que les pastilles combinées au système RP-A™ ne fonctionnent pas de façon satisfaisante. Apparemment, les pastilles ont besoin d'un taux d'humidité d'au minimum ~30 %⁶⁹. Un document datant de 2003⁷⁰ mentionne que l'entreprise MGC a produit par la suite une autre pastille sous le nom d'Ageless-Eye S qui est adaptée à une fourchette d'humidité beaucoup plus large (0 % - 92 %). Grâce à un fil en coton, qui est soudé dans l'emballage de l'indicateur, l'humidité trouve plus facilement l'accès à la pastille et un changement de couleur peut se produire plus rapidement. Suite à une demande d'information auprès de MGC, il semblerait que ces indicateurs ne soient aujourd'hui plus commercialisés, mais que les indicateurs Ageless-Eyes soient à présent compatibles avec un faible taux d'humidité⁷¹. Des tests devraient être réalisés dans le but de confirmer cette information. Les absorbeurs d'oxygène RP-A™ et RP-K™ existent en trois tailles : pour 100, 300 ou 500 ml d'air.

Films plastiques

Pour les produits mentionnés ci-dessus (tamis moléculaires, absorbeurs d'oxygène), il est indispensable que le film plastique utilisé pour l'emballage de l'objet soit parfaitement étanche (oxygène et vapeur d'eau). Il doit également être suffisamment résistant mécaniquement et permettre de réaliser des soudures étanches. Généralement, les films d'une épaisseur d'environ 0.1 mm sont bien adaptés à la fabrication de sachets étanches.

Les films les plus souvent utilisés dans ce domaine sont le film ESCAL™ et les films laminés avec de l'aluminium (conservation sur le long terme) (fiches techniques en annexe D). Pour une application de courte durée (par exemple la désinsectisation) des films avec une moins bonne perméabilité peuvent aussi être utilisés.

⁶⁸ Long life for art, 2004 (site internet)

⁶⁹ Elert et Maekawa, 2000, p.351.

⁷⁰ Elert et Maekawa, 2003, p.31.

⁷¹ Courrier électronique du 24 juin 2009.

Le film ESCALTM est un film transparent constitué de trois couches différentes : une couche de polypropylène (PP), une couche de polyacétate de vinyle (PVA) avec revêtement céramique et une couche PE⁷². Il est d'une épaisseur de 0.11 mm et se caractérise par sa faible perméabilité à l'oxygène (0.05 cc/m² x jour x atm à une température de 25 °C et une HR de 60 %) et à la vapeur d'eau (0.01 g/m² x jour, avec les mêmes proportions de T° et HR)⁷³.

Les films laminés avec de l'aluminium se distinguent également par une faible perméabilité à l'oxygène et à la vapeur d'eau (0.01 cc/m² x jour x atm et 0.01 g/m² x jour), mais ils sont plus sensibles aux endommagements mécaniques et ne sont pas transparents. Ils sont par contre généralement moins chers que les films ESCAL^{TM74}.

La soudure joue un rôle très important dans l'efficacité des poches utilisées pour une conservation sur le long terme et elle doit être d'une largeur d'au moins 8 mm ou doublée (deux soudures en parallèle)⁷⁵. Les deux films proposés sont disponibles sous forme de rouleaux de différentes longueurs et également sous forme de poches préfabriquées.

Les contenants en plastique, tels que les Tupperware[®] ou autres boîtes utilisées dans l'industrie alimentaire ne sont pas adaptés au stockage des objets sous anoxie, car ils ne sont jamais assez étanches.

3.2.3 PROPOSITION DE TROIS VARIANTES

Le but des propositions qui suivent est de faire en sorte que les objets du complexe de Kallnach soient conservés dans des conditions acceptables permettant d'éviter tous dégâts. Afin de laisser une certaine liberté de choix au service archéologique, nous avons choisi de proposer trois variantes de conditionnement en considérant le critère « les conditions de conservation » comme le point le plus important : une solution idéale, une solution intermédiaire et une solution du minimum acceptable. Les autres critères tels que les coûts et les temps de réalisation sont également discutés dans ce travail. Ces trois méthodes peuvent être combinées au besoin.

Afin de réaliser trois propositions adaptées, il a été nécessaire de se baser sur les critères mentionnés sous le chapitre 3.2.1. Nous avons donc pris en compte les risques et défini les points à améliorer.

La solution du minimum acceptable

La solution du minimum acceptable propose les améliorations essentielles (à appliquer impérativement) pour une bonne conservation de la collection. Nous reprenons ci-dessous les risques identifiés, démontrons l'état actuel de la collection et proposons une nouvelle solution.

- **Le risque de l'humidité relative**

Les objets atteints de corrosion active doivent être stockés dans un environnement plus sec. Dans ce but, nous proposons de les mettre dans des boîtes hermétiques (par exemple Tupperware[®]), en ajoutant des sachets de gel de silice (fig. 14, annexe A). Ces boîtes devraient être dans l'idéal en plastique transparent (conseillé : PP) pour que le contrôle du taux d'humidité puisse se faire depuis l'extérieur sans devoir ouvrir

⁷² m.art preserving, 2009 (site internet)

⁷³ Elert et Maekawa, 2000, p.352.

⁷⁴ Ibid., p.352.

⁷⁵ Long life for art, 2004 (site internet)

le contenant. Dans ce but, une carte indicatrice (fiche technique en annexe D) est positionnée contre le côté intérieur de la boîte. Les boîtes hermétiques peuvent par la suite être intégrées dans les caisses RAKO®.

- **La contamination par les matériaux d'emballage inadaptés**

Le conditionnement actuellement utilisé à l'intérieur des caisses RAKO® est basé sur l'utilisation de boîtes en carton (acide = dégagement de substances nocives). Celles-ci doivent donc être impérativement remplacées. Pour la solution du minimum acceptable, nous proposons de les remplacer par des boîtes en PS qui ne dégagent aucun composé nuisible. Les étiquettes en papier, utilisées pour l'identification des objets, contiennent certainement également des acides pouvant être nuisibles aux objets métalliques. Ces étiquettes étant directement en contact avec les objets (dans les boîtes et aussi dans les sachets), elles doivent être remplacées. Nous proposons d'utiliser des étiquettes préfabriquées en Tyvek® et d'indiquer, sur les sachets Minigrip®, directement les informations sur la bande blanche prévue à cet effet (cf. perte d'informations).

- **Le frottement mécanique**

Actuellement, les objets sont souvent posés sans aucune protection dans les boîtes en carton ou dans les sachets en plastique. Ils ne disposent d'aucun rembourrage et sont libres de bouger dans l'emballage. Les objets présentant une instabilité mécanique sont par conséquent exposés à un risque non négligeable qui peut être facilement remédié. Nous conseillons donc de recouvrir l'intérieur de chaque boîte hermétique ainsi que chaque boîte en PS (le fond ainsi que les côtés) avec une fine couche de mousse PE (d'une épaisseur d'environ 3 mm, par exemple de l'Ethafoam®). Grâce à la mousse, les objets glisseront moins facilement (même s'ils ne sont pas fixés) et seront en plus protégés contre l'abrasion et les vibrations.

Cette solution serait également adaptée pour les objets dans les sachets plastiques (Minigrip®). Nous prévoyons donc d'ajouter dans chaque sachet un morceau de mousse Ethafoam® de 3 mm d'épaisseur (uniquement sur un côté) (fig. 15, annexe A). Cette méthode permet de protéger non seulement l'objet concerné, mais également l'objet voisin (sachets rangés debout). De plus, la visibilité des objets n'est pas perturbée, il n'est pas nécessaire de sortir l'objet du sachet pour l'observer. Selon notre estimation, la plupart des objets trouvent place dans des sachets d'une taille de 100 x 125 mm. Pour les objets plus grands ou beaucoup plus petits, les dimensions des sachets peuvent être adaptées. Afin d'éviter un éventuel microclimat à l'intérieur des sachets, nous conseillons de les perforer. Les sachets sont finalement intégrés dans les boîtes PS pour un rangement à la verticale.

- **La perte d'informations**

Afin d'éviter la perte d'informations, chaque emballage doit comporter au minimum les numéros d'inventaire des objets concernés. Dans ce but, nous proposons d'utiliser uniquement des sachets Minigrip® en PE avec trois bandes blanches qui permettent l'écriture au stylo-feutre. Il est aussi possible, si besoin, d'ajouter une étiquette en Tyvek® à l'intérieur du sachet. Cette étiquette devrait cependant être placée à l'arrière du sachet, entre le film d'Ethafoam® et le film PE (Minigrip®) afin d'éviter de cacher l'objet.

Dans le cadre du développement d'un nouveau concept d'emballage, la section restauration d'Augusta Raurica à Augst BL a soumis trois stylo-feutres à un test de résistance à la lumière ainsi qu'à un test d'abrasion sur les sachets Minigrip®. Ces tests ont été menés pendant un peu plus d'une année, du 13 janvier 2005 au 21 avril 2006. Les stylo-feutres suivants ont été testés : « Edding 8400 », « Edding 8404 » et « Artline 90 ». Pour le test de résistance à la lumière, les informations ont été inscrites sur la bande blanche mais également en dehors de celle-ci. Les sachets ont été exposés à la lumière (fenêtre) pendant la période de test. L'intensité des feutres « Edding 8400 » et « Artline 90 » est restée inchangée, seul le feutre « Edding 8404 » a légèrement pâli.

Le test d'abrasion a été mené de la manière suivante : l'écriture a été effectué sur la bande blanche et en dehors. Les inscriptions ont été régulièrement frottées avec les doigts, durant toute la durée du test. De manière générale, tous les stylo-feutres adhèrent bien sur les bandes blanches, ce qui n'est pas forcément le cas pour les inscriptions directement présentes sur le film transparent. Les feutres « Edding 8400 » et « Artline 90 » ont de nouveau affiché le meilleur résultat. Afin d'exclure les effets nocif provenant des stylo-feutres, ils ont été soumis à un test d'Oddy. Le feutre « Edding 8400 » n'a déclenché aucune réaction sur les coupons métalliques. A Augusta Raurica, ils utilisent depuis le « Edding 8400 » pour le marquage des sachets Minigrip®⁷⁶. Nous pouvons profiter de ces résultats pour proposer d'employer ce feutre également au service archéologique du canton de Berne.

La solution intermédiaire

La solution intermédiaire représente une proposition permettant une bonne protection des objets. Elle permet la mise en place de meilleures conditions de conservation tout en proposant une alternative facilement abordable (coûts, temps de réalisation). Elle se différencie du minimum acceptable au niveau du conditionnement des objets dans les boîtes en PS et au niveau du rembourrage des objets. Nous

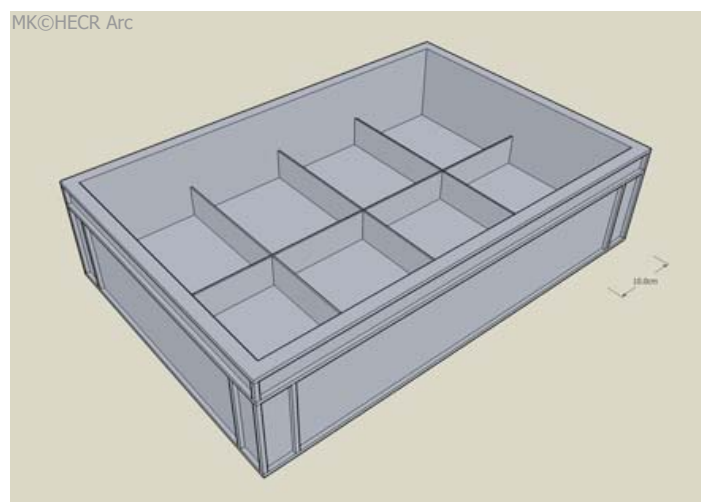


Fig. 3 : Schéma d'une caisse RAKO® avec des séparations

dans le sens transversal (fig. 3). Ainsi, les sachets Minigrip® d'une taille de 100 x 125 mm sont maintenus en place dans la caisse.

conservons le système avec les Minigrips® revêtus d'une fine couche de mousse, mais nous supprimons complètement les boîtes en PS. Au lieu de ces boîtes, nous employons des séparations conçues exprès pour les caisses RAKO® (fig. 16, annexe A). Ces séparations se présentent sous la forme de fines bandes en PP qui permettent de créer plusieurs compartiments selon besoins (emboîtement).

Nous proposons pour les objets rangés dans les sachets Minigrip® de séparer la caisse une fois dans le sens longitudinal et quatre fois

⁷⁶ Fernández, 2007, p.1-2.

Les objets qui sont actuellement rangés dans les boîtes en carton peuvent être posés sur une couche de mousse en PE souple et non abrasive (par exemple de Plastazote®) d'une épaisseur d'environ 30 mm. Autour de ces objets on fixe de petits bouts de mousse (d'épaisseurs variables selon la taille de l'objet), avec des épingles en acier inoxydable, permettant de maintenir l'objet en place⁷⁷. Grâce à ces ajouts de mousse, les objets sont parfaitement maintenus sur la plaque, même durant les éventuels déplacements des caisses (fig. 17, annexe A). Les plaques de mousse peuvent être ajustées et posées directement dans les caisses RAKO®. Cette méthode possède les avantages suivants : ce conditionnement ne prend pas beaucoup de temps à effectuer, les plaques en mousse peuvent être réutilisées simplement en enlevant les ajouts de mousse et elle permet une bonne protection contre le frottement mécanique.

Les objets atteints de corrosion active sont également conditionnés dans des boîtes hermétiques (Tupperwares®) avec du gel de silice, mais contrairement à la solution du minimum acceptable, les objets sont fixés à une plaque de mousse comme décrit ci-dessus. Cela permet d'éviter le glissement à l'intérieur de la boîte et de prévenir ainsi le frottement. En ce qui concerne l'identification claire des objets, nous conseillons de marquer chaque contenant, caisse RAKO®, rayon et étagère avec un moyen (stylo-feutre, impression) indélébile et résistant à la lumière.

Cette solution demande éventuellement de regrouper les objets dans les sachets Minigrip®, car en utilisant les séparations, les boîtes hermétiques et les plaques en mousse avec les objets stables n'ont plus leur place dans la même caisse RAKO®.

La solution idéale

Pour la solution idéale, nous avons recours à des moyens plus sophistiqués, tels que des tamis moléculaires ou des absorbeurs d'oxygène. Cette proposition varie également au niveau des rembourrages de conditionnement. Elle demande un peu plus de temps et de moyens, mais elle permet de protéger les objets de façon optimale. Les coûts liés à l'utilisation d'absorbeurs d'oxygène étant particulièrement élevés, nous avons cherché à proposer une deuxième variante pour le conditionnement des objets atteints de corrosion active. Cette deuxième variante permet de développer la question de l'utilisation des tamis moléculaires, apparemment peu connus (documentation rare) dans le domaine de la conservation.

Nous proposons ici l'utilisation de tamis moléculaires ou d'absorbeurs d'oxygène comme moyen pour diminuer le risque lié à l'humidité relative (principalement métaux avec corrosion active) sur le long terme. Les **tamis moléculaires** sont utilisés dans les applications nécessitant une déshumidification maximale de l'air. Outre cette qualité d'adsorption puissante, ils permettent également de capter certains polluants. Etant beaucoup plus puissants que le gel de silice, les tamis moléculaires ne doivent pas être changés aussi souvent et occupent un volume moins important (fig. 18, annexe A). Les absorbeurs d'oxygène du type **RP-A™** permettent l'absorption de l'oxygène et d'autres polluants et diminuent en même temps l'humidité relative.

⁷⁷ Selon Erwin Hildbrand, laborantin en chimie au *Laboratorium für Konservierungsforschung der Schweizerischen Landesmuseen* à Affoltern am Albis, l'emploi des épingles inoxydables ne pose aucun problème pour la conservation des objets à long terme (information reçue le 24 juin 2009).

L'enceinte hermétique nécessaire à l'utilisation de ces absorbeurs et tamis moléculaires est réalisée à l'aide de films plastiques thermosoudables de type ESCALTM et films laminés avec de l'aluminium (détails techniques, voir chapitre 3.2.2). L'inconvénient des films laminés avec de l'aluminium est lié au fait qu'ils ne soient pas transparents. Le contrôle visuel de l'objet est donc impossible. Les films ESCALTM sont quant à eux relativement coûteux. Afin de trouver un compromis, nous proposons de fabriquer des poches avec une face (avant) en film ESCALTM et l'autre face (arrière) en film laminé. Pour les deux solutions (RP-ATM et tamis moléculaires), les poches étanches doivent contenir les éléments suivants : une carte indicatrice du taux d'HR, une pastille indicatrice du taux d'oxygène Ageless-Eye (pour la solution avec les absorbeurs d'oxygène) et les indications de l'objet sur une étiquette en Tyvek[®] (numéro d'inventaire, désignation, etc.). Il est conseillé de noter la date de fabrication sur la poche pour un suivi ultérieur. Afin de protéger l'objet de l'usure mécanique, nous conseillons de placer un support en mousse fine à l'intérieur de la poche (Ethafoam[®] 3 mm). Les objets qui sont mécaniquement moins stables peuvent être soutenus par un support rigide, par exemple une plaque en PP cannelé recouverte d'une fine couche de mousse.

Les poches hermétiques de dimensions raisonnables sont ensuite rangées dans des contenants en PP de

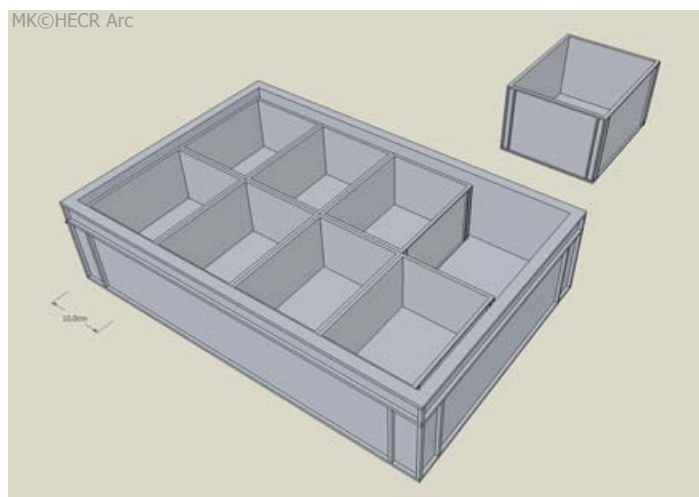


Fig. 4 : Schéma d'une caisse RAKO[®] avec contenants

volume correspondant à 1/8 d'une caisse RAKO[®], eux-mêmes placés dans les caisses RAKO[®] (fig. 4). Ces contenants sont réalisés par l'entreprise Utz (cf. liste des fournisseurs) qui proposent diverses tailles, de 1/16 jusqu'à 1/2 d'une caisse RAKO[®]. Ces contenants remplacent en fait les boîtes en carton, utilisées actuellement par le service archéologique. Ils possèdent l'avantage d'être très robustes, chimiquement inertes et de s'intégrer parfaitement dans les caisses RAKO[®] (= aucune perte de place).

Les poches de grandes dimensions (couteaux, épées) sont directement posées dans les caisses RAKO[®]. Le fond de la caisse étant préalablement revêtu d'une fine couche de mousse.

Les absorbeurs d'oxygène possèdent l'avantage d'éliminer également les éventuels polluants gazeux et de permettre un abaissement du taux d'HR à un niveau proche de 0 %. Ces excellentes propriétés en font malheureusement un produit relativement coûteux. Ces absorbeurs sont également susceptibles d'engendrer des dégâts aux objets mécaniquement instables. L'air ambiant contenant environ 20 % d'oxygène, la réduction de ce volume par les absorbeurs provoque une rétraction de la poche qui exerce une pression sur l'objet. Les objets fragiles devraient donc être emballés préalablement dans une boîte rigide, par exemple en PS.

Les tamis moléculaires n'ont aucune influence sur l'oxygène mais permettent également l'adsorption de certains polluants, mais de manière limitée par rapport aux absorbeurs d'oxygène. Ils sont par contre très

puissants en ce qui concerne l'adsorption de l'HR et ont une durée de vie élevée (régénérable). Rappelons-nous que l'exclusion d'un seul facteur de corrosion peut interrompre le cycle. L'élimination de l'humidité peut donc suffire pour arrêter (ou au moins ralentir de façon efficace) le développement de la corrosion. Les tamis moléculaires représentent alors une bonne méthode qui est à la fois moins coûteuse et plus durable.

Concernant les objets stables, ceux-ci sont directement rangés dans des contenants en PP (sans poche hermétique). La prévention contre le frottement mécanique et le soutien de l'objet est assuré en employant une mousse PE non-réticulée (Ethafaam®) d'une épaisseur d'environ 30 mm. Cette mousse est découpée, creusée selon la forme de l'objet et placée au fond des contenants en PP. L'Ethafaam® non-réticulé pouvant avoir une surface rugueuse et abrasive, la partie creusée est recouverte par du papier de soie non acide. A travers cette technique, l'objet reste bien visible, est facile à sortir et est protégé des problèmes de friction. Dépendant de la taille des objets, on peut mettre un, deux ou même trois objets dans un seul contenant en PP (fig. 19, annexe A). Les sachets Minigrip® sont également rangés dans des contenants en PP.

En ce qui concerne l'inscription des numéros d'inventaire, des étiquettes en Tyvek® (numéro inscrit à l'aide d'un feutre « Edding 8400 » ou d'un crayon) sont épinglées sur les plaques de mousse. Ceux-ci renvoient à une liste d'inventaire où l'on trouve d'avantage d'informations sur l'objet. Cette liste indique le lieu de séjour de l'objet et est contrôlée et mise à jour régulièrement.

Une solution pour la sortie du dépôt/prêt/exposition

Il est probable que certains objets de ce complexe doivent être prêtés et/ou exposés dans le futur. Pour cette raison, un conditionnement qui permettra à ces objets de supporter les changements de climat sans aucun dégât doit être prévu. L'éventualité d'un prêt concerne surtout les objets « primordiaux » du complexe. Ces objets ne présentent pas de corrosion active (très certainement grâce à une meilleure restauration (bain par sulfites alcalins)), la problématique de l'accessibilité de l'objet est donc supprimée. Il ne serait pas nécessaire de débiller les objets soudés dans les poches étanches.

Chaque objet sortant devra être placé dans une boîte hermétique, dans laquelle l'air sera déshumidifié à l'aide de sachets de gel de silice. La boîte devra contenir suffisamment de gel de silice pour maintenir l'HR au-dessous de 20 % (pour les objets atteints de corrosion active, le taux d'HR ne devra pas dépasser 12 %).

Afin d'éviter les risques liés aux chocs et aux vibrations, nous proposons d'employer la solution intermédiaire avec la technique d'ajouts de mousse souple pour l'intérieur des boîtes (fig. 20, annexe A). On peut ainsi s'épargner de creuser la mousse et celle-ci reste réutilisable après le retour de l'objet dans le dépôt.

L'avantage du conditionnement prévu pour la solution idéale (contenants en PP, mousse creusée) est que l'objet est déjà parfaitement supporté. Dans le cas d'une sortie du dépôt, le contenant pourra être tout simplement mis dans une boîte hermétique. Dans tout les cas, un indicateur du taux d'HR devra être ajouté.

4 REALISATION PRATIQUE DE PROTOTYPES

4.1 ESTIMATION DES COÛTS POUR LES TROIS VARIANTES

Les coûts proposés pour les trois variantes représentent une estimation relativement précise, mais ne doivent pas être considérés comme des montants exacts. Les prix sont représentés en francs suisse (CHF), TVA et frais de port exclus. La TVA est de 7.6 % pour la Suisse et de 19 % pour les marchandises provenant de l'Allemagne. La conversion de Euros (€) en francs suisse (CHF) a été effectuée selon le cours du 28 juillet 2009 (1 € = 1.53 CHF).

Pour la **solution du minimum acceptable**, nous proposons des boîtes « RONDO » de l'entreprise rotho pour le stockage des objets atteints de corrosion active. Elles sont en PP transparent et sont munies d'un couvercle bleu en PE basse densité. La compatibilité de ces boîtes a été testée par la section restauration d'Augusta Raurica à Augst BL. Le test d'Oddy a donné un résultat satisfaisant⁷⁸. La taille de 160 x 120 x 75 mm (capacité de 0.75 l) représente une dimension moyenne utilisée comme base pour les calculs (quantité de mousse, gel de silice, etc.). En réalité, on utilisera des boîtes adaptées aux dimensions de chaque objet ou groupes d'objets. Nous avons comptabilisé environ 54 objets ferreux atteints de corrosion active nécessitant un conditionnement dans des boîtes hermétiques. La quantité de gel de silice nécessaire pour une boîte de cette taille s'élève à environ 10 g⁷⁹. Une carte indicatrice permettant le contrôle du taux d'humidité est ajoutée dans chaque boîte hermétique. Une mousse de PE d'une épaisseur d'environ 3 mm est utilisée pour rembourrer le fond ainsi que les côtés des boîtes en PP et en PS.

Pour les calculs, nous avons utilisé comme dimensions de base deux tailles de boîtes en PS (112 x 107 x 40 et 155 x 138 x 59) que nous proposons de substituer aux boîtes en carton acide.

Nous partons du principe que les sachets Minigrip® remplissent deux caisses RAKO® et que les objets actuellement stockés dans les boîtes en carton occupent la place de trois caisses RAKO®.

Les morceaux de mousse pour les sachets Minigrip® peuvent être coupés à une dimension de 9 x 10 mm (= 1.8 m² en tout).

Matériaux	Données pour le calcul	Quantité par complexe	Coût total CHF
Boîtes en PP « RONDO » 160 x 120 x 75 mm	3.20 CHF / pc.	54 pcs.	172.80
Boîtes en PS 45 x (112 x 107 x 40 mm) 16 x (155 x 138 x 59 mm)	2.15 CHF / pc. 4.75 CHF / pc.	45 pcs. 16 pcs.	172.75
Carte indicatrice, sans cobalt, 5 – 15 %	0.85 CHF / pc.	54 pcs.	45.90
Etiquettes en Tyvek® 75 x 55 mm	0.16 CHF / pc.	~ 150 pcs	24.00

⁷⁸ Fernández, 2007, p.1-2.

⁷⁹ Calculé avec la formule disponible sur http://www.zeochem.com/produkte/desiccant_silica/calculation.htm

Gel de silice Rubingel, 1/3 DU (10 g)	0.60 CHF / 10 g	540 g	32.40
Mousse fine 3 mm pour sachets Minigrip® + boîtes PS + boîtes PP	Surface tot. mousse : $1.8 \text{ m}^2 + 1 \text{ m}^2 + 1.9 \text{ m}^2 = 4.7 \text{ m}^2$ Prix mousse : 1.05 CHF / m^2	4.7 m^2	4.94
Minigrip® « Profiline » avec bandes blanches 100 x 125 mm	0.02 CHF / pc.	200	4.00
Coût total des matériaux			456.80

Fig. 5 : Tableau de calcul des coûts pour la solution du minimum acceptable. (MK©HECR Arc)

La solution intermédiaire nécessite les mêmes quantités pour les matériaux suivants: Boîtes hermétiques, sachets Minigrip®, cartes indicatrices, étiquettes en Tyvek® et le gel de silice. La mousse fine est utilisée que pour le rembourrage des sachets Minigrip®. Pour le rembourrage des boîtes hermétiques et des autres objets, nous employons du Plastazote® d'une épaisseur de 30 mm. Pour les ajouts de mousse nous avons prévu une surface 1 m^2 (calculé large). En ce qui concerne le rembourrage des boîtes hermétiques, la surface nécessaire reste la même que pour la proposition précédente. Il faut ajouter à cela une surface de Plastazote® pour trois caisses RAKO®, pour le conditionnement des objets qui sont actuellement stockés dans les boîtes en carton. Nous prévoyons également des séparations pour deux caisses RAKO® (deux séparations dans le sens longitudinal et six séparations dans le sens transversal) pour le rangement des sachets Minigrip®.

Matériaux	Données pour le calcul	Quantité par complexe	Coût total CHF
Boîtes en PP « RONDO » 160 x 120 x 75 mm	3.20 CHF / pc.	54 pcs.	172.80
Carte indicatrice, sans cobalt, 5 – 15 %	0.85 CHF / pc.	54 pcs.	45.90
Epingles inoxydables	7.90 CHF / 500 pcs.	~ 530 pcs.	8.37
Étiquettes en Tyvek® 75 x 55 mm	0.16 CHF / pc.	~ 150 pcs	24.00
Gel de silice Rubingel, 1/3 DU (10 g)	0.60 CHF / 10 g	540 g	32.40
Minigrip® « Profiline » avec bandes blanches 100 x 125 mm	0.02 CHF / pc.	200	4.00
Mousse fine 3 mm pour	Surface tot. mousse : 1.8 m^2	1.8 m^2	1.89

sachets Minigrip®	Prix mousse : 1.05 CHF / m ²		
Plastazote® 29, 30 mm pour boîtes PP + 3 caisses RAKO®	Surface tot. mousse : $1 \text{ m}^2 + 0.58 \text{ m}^2 = 1.58 \text{ m}^2$ Prix mousse : 42.20 CHF / m ²	1.58 m ²	66.68
Plastazote® 29 10 mm	Surface tot. mousse : 1 m ² Prix mousse : 15.78 CHF / m ²	1 m ²	15.78
Séparations pour 2 caisses RAKO®	Longitudinal : 1.60 CHF / pc. Transversal : 1.30 CHF / pc.	2 6	11.00
Coût total des matériaux			382.80

Fig. 6 : Tableau de calcul des coûts pour la solution intermédiaire. (MK©HECR Arc)

La solution idéale comporte deux propositions : une prévoyant l'utilisation d'absorbants d'oxygène et l'autre l'utilisation de tamis moléculaires. Les seuls matériaux qui varient par rapport aux propositions précédentes sont les absorbants d'oxygène, les tamis moléculaires, les boîtes en PS et les pastilles indicatrices d'oxygène. Les boîtes en carton actuelles, qui représentent le contenu de trois caisses RAKO® pour les objets de moyennes et grandes dimensions et deux caisses RAKO® pour les sachets Minigrip®, sont remplacées par des contenants en PP. Une partie de ces derniers (objets non emballés) sont rembourrés avec de l'Ethafoam® d'une épaisseur de 30 mm qui est garni avec du papier de soie non acide (zone de contact avec les objets). Les contenants PP ont une dimension intérieure de 164 x 125 x 93 mm. La quantité d'absorbants d'oxygène est calculée par rapport au volume d'air contenu à l'intérieur de chaque poche soudée. Nous avons défini trois dimensions approximatives de poches (dimensions extérieures) : une pour les objets de petite dimension (environ 20) - 110 x 80 x 30 mm, une pour taille moyenne (environ 26) - 180 x 90 x 50 mm et une pour les objets de grande taille (environ 8) - 500 x 10 x 50 mm. Le coût total pour les poches est ensuite divisé en deux : une partie en film aluminium et l'autre en film ESCAL™. Dans le but d'assurer un fonctionnement optimal, nous avons plutôt surévalué la quantité d'absorbants dans les poches. Dans les cas où plusieurs absorbants sont nécessaires pour la même poche, nous avons comparé le coût avec un absorbant d'une capacité supérieure. Par exemple, un absorbant de type RP-3A est utilisé à la place de deux absorbants de type RP-1A. Chaque poche est munie d'une pastille indicatrice d'oxygène « Ageless-Eye » et d'une fine couche de mousse PE comme support pour les objets. Les objets mécaniquement fragiles nécessitent un soutien additionnel sous forme d'une plaque de PP cannelé. Le fond de deux caisses RAKO® est également revêtu d'une fine couche de mousse pour pouvoir poser les objets de grande taille soudés dans des poches directement dans les caisses. Comme il est éventuellement nécessaire de protéger les objets d'éventuels dégâts dû à une pression trop forte (à cause de la diminution du volume d'air dans la poche, environ 20 %), nous avons prévu pour le calcul 16 boîtes en PS de taille 155 x 138 x 59 mm.

Les coûts pour la solution avec les absorbeurs d'oxygène :

Matériaux	Données pour le calcul	Quantité par complexe	Coût total CHF
Absorbeur d'oxygène RP-1A	0.72 CHF / pc.	26 pcs.	18.72
Absorbeurs d'oxygène RP-3A	1.38 CHF / pc.	20 pcs.	27.60
Absorbeurs d'oxygène RP-5A	2.05 CHF / pc.	58 pcs.	118.90
Boîtes en PS 16 x (155 x 138 x 59 mm)	4.75 CHF / pc.	16 pcs.	76.00
Carte indicatrice, sans cobalt, 5 – 15 %	0.85 CHF / pc.	54 pcs.	45.90
Contenants RAKO®	3.40 CHF / pc.	40 pcs.	136
Ethafoam® 30 mm pour contenants PP 24 x (160 x 120 mm)	Surface tot. mousse : 0.46 m ² Prix mousse : 27.04 CHF / m ²	0.46 m ²	12.44
Etiquettes en Tyvek® 75 x 55 mm	0.16 CHF / pc.	~ 150 pcs	24.00
Film aluminium laminé	Surface tot. film : 1 m ² Prix film : 2.87 CHF / m ²	1 m ²	2.87
Film ESCAL™	Surface tot. film : 1 m ² Prix film : 21.20 CHF / m ²	1 m ²	21.20
Pastille indicatrice d'oxygène « Ageless-Eye »	1.06 CHF / pc.	54 pcs.	57.24
Minigrip® « Profiline » avec bandes blanches 100 x 125 mm	0.02 CHF / pc.	200	4.00
Mousse fine 3 mm pour sachets Minigrip® + poches étanches + fonds de 2 caisses RAKO®	Surface tot. mousse : 1.8 m ² + 0.708 m ² + 0.39 m ² = 2.90 m ² Prix mousse : 1.05 CHF / m ²	2.90 m ²	3.00
Papier de soie non acide	Surface tot. papier : 0.46 m ²	0.46 m ²	0.16

	Prix papier : 0.34 CHF / m ²		
Plaque PP cannelé 2mm	Surface tot. plaque : 0.5 m ² Prix plaque : 20.24 CHF / m ²	0.5 m ²	10.12
Coût total des matériaux			558.15

Fig. 7 : Tableau de calcul des coûts pour la solution idéale avec absorbeurs d'oxygène. (MK©HECR Arc)

Les coûts pour la solution avec les tamis moléculaires :

Le calcul nécessaire pour déterminer la quantité de tamis moléculaires est un peu plus complexe que celui pour les absorbeurs d'oxygène, car il faut tenir compte de l'HR et de la température lors de l'emballage de l'objet. Pour cela, on peut se référer à une table pour la détermination de la quantité d'eau dans l'air (voir annexe E). Nous sommes partis du principe que les objets vont être emballés directement dans le dépôt des métaux (HR 30 %, avec marge de sécurité et T 20 °C). Dans un tel environnement, l'air contient 5.19 g/m³ d'eau (cf. table). Il s'agit donc de calculer la quantité d'eau dans l'air pour un volume donné (poches soudées), puis on obtient la quantité de tamis moléculaires nécessaire pour absorber cette eau. Exemple pratique : poche de 48 x 8 x 5 cm = 1920 cm³ = 0.001920 m³. Eau dans l'air : 5.19 g/m³, donc il faut **0.01 g** de tamis moléculaires (0.001920 m³ x 5.19 g/m³)⁸⁰. Pour le stockage à long terme, il est conseillé de multiplier le résultat par environ 20. Malgré cela, grâce à la grande efficacité de ce matériau, les quantités nécessaires restent très faibles. Cela permet également d'économiser sur les quantités de film plastique nécessaires pour la fabrication des poches étanches (le sachet de 0.5 g mesure 27 x 16 x 3 mm).

Matériaux	Quantité et coût par objet ou groupe d'objet	Quantité par complexe	Coût total CHF
Carte indicatrice, sans cobalt, 5 – 15 %	0.85 CHF / pc.	54 pcs.	45.90
Contenants RAKO®	3.40 CHF / pc.	40 pcs.	136
Ethafoam® 30 mm pour contenants PP 24 x (160 x 120 mm)	Surface tot. mousse : 0.46 m ² Prix mousse : 27.04 CHF / m ²	0.46 m ²	12.44
Etiquettes en Tyvek® 75 x 55 mm	0.16 CHF / pc.	~ 150 pcs	24.00
Film aluminium laminé	Surface tot. film : 1 m ² Prix film : 2.87 CHF / m ²	1 m ²	2.87
Film ESCAL™	Surface tot. film :	1 m ²	21.20

⁸⁰ Calcul selon Stefan Walther, gestionnaire de produit et propriétaire de l'entreprise Dry & Safe GmbH, Oensingen (communication téléphonique du 3 juillet 2009).

	1 m ² Prix film : 21.20 CHF / m ²		
Minigrip® « Profiline » avec bandes blanches 100 x 125 mm	0.02 CHF / pc.	200	4.00
Mousse fine 3 mm pour sachets Minigrip® + poches + fonds de 2 caisses RAKO®	Surface tot. mousse : 1.8 m ² + 0.708 m ² + 0.39 m ² = 2.90 m ² Prix mousse : 1.05 CHF / m ²	2.90 m ²	3.00
Papier de soie non acide	Surface tot. papier : 0.46 m ² Prix papier : 0.34 CHF / m ²	0.46 m ²	0.16
Plaque PP cannelé 2 mm	Surface tot. plaque : 0.5 m ² Prix plaque : 20.24 CHF / m ²	0.5 m ²	10.12
Tamis moléculaire Minipax 0.5 g	0.11 CHF / pc.	54 pcs.	5.94
Coût total des matériaux			265.65

Fig. 8 : Tableau de calcul des coûts pour la solution idéale avec tamis moléculaires.

Synthèse

A travers cette synthèse, nous souhaitons aborder les points non discutés dans le travail et donner également quelques précisions supplémentaires. Nous n'avons par exemple pas donné de conseil pour le rangement exact des objets dans les caisses RAKO®. Il faudrait donc encore étudier la façon dont les objets sont répartis dans les caisses, car actuellement plusieurs problématiques sont présentes dans une seule caisse (objets atteints de corrosion active, sachets Minigrip®, objets stables). Dans le cas où le suivi des numéros d'inventaire est un point important, nous serons obligés de ranger les objets selon l'ordre actuel. Pour l'instant, nous ignorons encore si cette possibilité est réalisable au niveau de la place. Dans le cas où il serait nécessaire d'interrompre ce suivi (par exemple de regrouper tous les objets avec la corrosion active ou tous les sachets Minigrip®), un marquage précis et un renvoi à un document de référence (liste sur papier et électronique) serait indispensable pour que l'identification et le lieu des objets soit clair. En ce qui concerne le stockage des objets atteints de corrosion active, nous ne pouvons pas donner une durée exacte pour l'activité des produits utilisés. Le gel de silice comporte certainement la capacité d'adsorption la plus faible et une durée de vie plus courte que les autres propositions (absorbants d'oxygène, tamis moléculaires). Les boîtes hermétiques ne sont jamais étanches à 100 % et l'efficacité du gel dépend également de la fréquence dans laquelle les boîtes sont ouvertes et refermées. En ce qui

concerne les absorbeurs d'oxygène, un document⁸¹ parle d'une durée de vie variable de 2.2 et 6 ans (avec poche en film ESCALTM) selon la quantité ajoutée dans les poches. Les perspectives pour la durabilité des absorbeurs d'oxygène sont donc très bonnes. Les tamis moléculaires semblent avoir à peu près la même capacité, mais il faut garder en tête que malgré la grande résistance du film de type ESCALTM, les films plastiques n'ont pas une durée de vie indéterminée et qu'ils se dégradent également avec le temps (lumière, frottement, vieillissement). Afin d'assurer l'efficacité du conditionnement sur le long terme, nous conseillons de contrôler l'ensemble des objets régulièrement (environ une à deux fois par an).

Au niveau des coûts des différentes propositions, la solution idéale avec les tamis moléculaires s'avère finalement être la moins coûteuse (comparé aux autres solutions) et représente à notre avis une bonne alternative pour le service archéologique. Il faut cependant remarquer que nous n'avons pas pris en compte les temps de réalisations pour les différentes solutions et que ce critère devrait éventuellement encore être étudié avant de faire un choix final. D'une manière générale, nous pouvons dire que les deux solutions idéales demandent un temps de réalisation plus long que les autres. Par exemple, la réalisation d'une poche étanche prend environ trois fois plus de temps que le conditionnement dans une boîte hermétique. Pour la solution idéale, le fait de creuser la mousse augmente considérablement le temps de réalisation (environ deux fois plus que les autres solutions).

Conclusion générale

La réalisation d'un conditionnement pour une collection de musée demande une réflexion approfondie. La constitution et les problématiques de la collection doivent être connues et le concept de stockage précédent doit être pris en considération, afin de ne pas trop perturber la logique du musée. Les principales difficultés rencontrées sont liées à la réalisation des calculs pour les quantités de matériaux nécessaires, car cela demande une connaissance exacte des quantités et des dimensions des objets, mais également des éléments de conditionnement déjà utilisés par le musée. Ces calculs permettent finalement de donner une estimation précise des coûts liés au reconditionnement de la collection. Une partie des détails pratiques liés à la mise en place du concept de conditionnement restent toujours à régler au moment même de la mise en place.

⁸¹ Becker, 1999, p.75.

Bibliographie

- Abbey Newsletter, 1996: Abbey Newsletter. Zeolites. *Abbey Newsletter*, 1996, 20, 7.
- Becker, 1999 : Becker, Holger. RP System, ein neues Verpackungsmaterial für korrosionsempfindliche Materialien. *Arbeitsblätter für Restauratoren*, 1999, Heft 1, Gruppe 21: Magazinierung, p.72-76.
- Bertholon et Relier, 1990 : Bertholon, Régis et Relier, Caroline. Stabilisation – Protection – Stockage (Chapitre V). In Berducou, Marie Cl. (coord.). *La conservation en archéologie – Méthodes et pratique de la conservation-restauration des vestiges archéologiques*. Masson, Paris, 1990, p.210-221.
- Bruhin, 2009 : Bruhin, Stefanie. *Zustand und Inventar des Metalllagers*. Rapport interne du service archéologique du canton de Berne, Berne, 2009, *non publié*.
- Dry & Safe, 2008: Dry & Safe. *Silikagele*. [En ligne]. Dry & Safe, 2008 [consulté le 29 juillet 2009]. <http://www.trockenmittel.ch/silikagele/1-339.html>
- Dussère, 1997 : Dussère, Florence. Peut-on concevoir le plasma comme un traitement de masse ? In MacLeod, Ian *et al.* (ed.). *Metal 95: Actes de la conférence internationale sur la conservation des métaux, Semur en Auxois 25-28 septembre 1995*. James&James, London, 1997, p.138-146.
- Elert et Maekawa, 2000 : Elert, Kerstin et Maekawa, Shin. Anwendung von Sauerstoffabsorbieren in Museen – Lagerung sauerstoffempfindlicher Materialien, Schädlingsbekämpfung. *Restauro*, 2000, 5, p.348-354.
- Elert et Maekawa, 2003: Elert, Kerstin et Maekawa, Shin. *The use of oxygen-free environments in the control of museum insect pest*. J. Paul Getty Trust, Los Angeles, 2003.
- Evans, 1952 : Evans, Ulick Richardson. *Précis de corrosion : une introduction à l'étude des réactions entre corps métalliques et non métalliques*. Dunod, Paris, 1952.
- Fernández, 2007 : Fernández, Maria-Luisa. *Oddy-Test Ergebnisse*. Document interne, Augst, 2007, *non publié*.
- Forrières, 2001: Forrières, Claude. La stabilisation des fers archéologiques (Chapitre 4). In Volfovsky, Claude (dir.). *La Conservation des Métaux*. CNRS, Paris, 2001, p.73-82.
- Gerwin, 1999: Gerwin, Werner. Die Korrosion archäologischer Eisenfunde im Boden – Zusammenhänge mit Bodeneigenschaften. *Arbeitsblätter für Restauratoren*, 1999, Heft 1, Gruppe 19: Naturwissenschaftliche Untersuchungen, p.173-182.
- Greiff et Bach, 2000 : Greiff, Susanne et Bach, Detlef. Eisenkorrosion und Natriumsulfitentsalzung: Theorie und Praxis. *Arbeitsblätter für Restauratoren*, 2000, Heft 2, Gruppe 1: Eisen, p.319-339.
- Guillemard et Laroque, 1999 : Guillemard, Denis et Laroque, Claude. *Manuel de conservation préventive : gestion et contrôle des collections*. OCIM, Dijon, 1999.

- Huber et von Lerber, 2003 : Huber, Joachim et von Lerber, Karin. *Handhabung und Lagerung von mobilem Kulturgut – Ein Handbuch für Museen, kirchliche Institutionen, Sammler und Archive*. Transcript, Bielefeld, 2003.
- Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006a : Kissling, Christiane et Ulrich-Bochsler, Susi. *Kallnach-Bergweg. Das frühmittelalterliche Gräberfeld und das spätrömische Gebäude. Bericht über die Grabungen von 1988-1989*. Archäologischer Dienst des Kantons Bern, 2006. Kapitel 6, Die Grabinventare des frühmittelalterlichen Gräberfeldes, p.55-82.
- Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006b : Kissling, Christiane et Ulrich-Bochsler, Susi. *Kallnach-Bergweg. Das frühmittelalterliche Gräberfeld und das spätrömische Gebäude. Bericht über die Grabungen von 1988-1989*. Archäologischer Dienst des Kantons Bern, 2006.
- Leprince et Lamethe-Parneix, 1999 : Leprince, Philippe et Lamethe-Parneix, Danièle. Le plasma : qu'est-ce que c'est ? In Meyer-Roudet, H. (coord.) *A la recherche du métal perdu - nouvelles technologies dans la restauration des métaux archéologiques*. Musée archéologique du Val-d'Oise. Errance, Paris, 1999, p.131-133.
- Loeper-Attia et Weker, 1997: Loeper-Attia, M-A. et Weker, W. Déchloration d'Objets Archéologiques en Fer par la Méthode du Sulfite Alcalin à l'IRRAP. In MacLeod, Ian *et al.* (ed.). *Metal 95: Actes de la conférence internationale sur la conservation des métaux, Semur en Auxois 25-28 septembre 1995*. James&James, London, 1997, p.162-166.
- Long life for art, 2004 : Long life for art. *Wissenswertes zur präventiven Konservierung*. [En ligne]. Long life for art, 2004 [consulté le 18 juin 2009]. http://www.cwall.de/fr_didaktik.htm
- Mardaga, 2001 : Mardaga, Pierre (ed.). *Préserver les objets de son patrimoine – Précis de conservation préventive*. SFIIC, Champs-sur-Marne, 2001.
- m.art preserving, 2009 : m.art preserving. *RP-Zubehör : ESCAL-Folie*. [En ligne]. m.art preserving, 2009 [consulté le 23 juillet 2009]. <http://www.m-art-preserving.com/preserving/d/rpzubehoer/escalfolie.htm>
- Museums & Galleries Commission, 1993 : Museums & Galleries Commission MGC (ed.). *Standards in the Museum Care of Geological Collections*. Museums & Galleries Commission, London, 1993.
- Müller, 2008 : Müller, Katharina. Korrodierte Oberflächen bei Metallfunden in der Archäologie. *NIKE-Bulletin*, 2008, 6, p.38-42.
- North et Pearson, 1975: North N. A. et Pearson C. Alkaline sulphite reduction treatment of marine iron. In: Preprints of the 4th Triennial Meeting. *ICOM Committee for Conservation, Venice, 13-18 October 1975, International Council of Museums, 1975*, p.75/13/3.1-14.
- Préserv'Art, 2007 : Préserv'Art. Choisir le bon produit. *Site du centre de conservation Québec*. [En ligne]. Centre de conservation Québec, 2007 [consulté le 29 juillet 2009]. <http://preservart.ccq.mcc.gouv.qc.ca/ProduitResult.aspx>

- Relier et Queixalos, 1997 : Relier, Caroline et Queixalos, Inocence. La conservation du mobilier archéologique, de la fouille au dépôt – Le métal. *Document sans doute issu du workshop organisé par l'ARAAFU l'association française des CR en avril 1997 à Saint-Denis dans les locaux d'UTICA.*
- Rempel, 1996 : Rempel, Siegfried. Zeolite Molecular Traps and their Use in Preventative Conservation. *Western Association for Art Conservation Newsletter WAAC*, 1996, 18, 1, p.12-18.
- Scharff *et al.*, 2000: Scharff, Werner *et al.* *Schutz archäologischer Funde aus Metall vor immissionsbedingter Schädigung*, Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg, Heft 57, Konrad Theiss, Stuttgart, 2000.
- Schmidt-Ott, 1997: Schmidt-Ott, Katharina. Applications of low pressure plasma treatment at the Swiss National Museum and assessment of the results. *Zeitschrift für Archäologie und Kunstgeschichte*, 1997, 54, Heft 1, p.45-49.
- Schmidt-Ott, 1999: Schmidt-Ott, Katharina. Le laboratoire de musée national suisse de Zurich. In Meyer-Roudet, H. (coord.). *A la recherche du métal perdu - nouvelles technologies dans la restauration des métaux archéologiques*. Musée archéologique du Val-d'Oise. Errance, Paris, 1999, p.148-150.
- Scott, 2002 : Scott, David A. *Copper and Bronzes in Art - corrosion, colorants, conservation*. Getty Publications, Los Angeles, 2002.
- Selwyn, 2004 : Selwyn, Lyndsie. *Métaux et corrosion : Un manuel pour le professionnel de la conservation*. Institute canadien de conservation, Ottawa, 2004.
- Selwyn *et al.*, 1999 : Selwyn, Lyndsie S. *et al.* The corrosion of excavated archaeological iron with details on weeping and akaganéite. *Studies in Conservation*, 1999, 44, p.217-232.
- Shashoua, 1999: Shashoua, Yvonne. Barbie Gets Cool! In National Museum of Denmark – Conservation Department. [En ligne]. 1999 [consulté le 24 juillet 2009]. <http://www.natmus.dk/cons/lab/barbie/bb.htm>
- Turgoose, 1985: Turgoose, S. Corrosion of archaeological iron during burial and treatment. *Studies in Conservation*, 1985, 30, p.13-18.
- Watkinson, 1987 : Watkinson, David E. (ed.). *First Aid for Finds*. Rescue/UKIC Archaeology Section, London, 1987.
- Watkinson et Lewis, 2005 : Watkinson, David et Lewis, Mark T. Desiccated Storage of Chloride-contaminated Archaeological Iron Objects. *Studies in Conservation*, 2005, 50, p.241-252.

Liste des figures

Sauf mention contraire, toutes les figures MK©HECR Arc.

Fig. 1 : Boucle de ceinture, décorée avec la technique de l'ajouré.	p.7
Fig. 2 : Schéma du processus de la corrosion. M^+ = ions métalliques, e^- = électrons. ©Selwyn	p.13
Fig. 3 : Schéma d'une caisse RAKO® avec des séparations.	p.29
Fig. 4 : Schéma d'une caisse RAKO® avec contenants.	p.31
Fig. 5 : Tableau de calcul des coûts pour la solution du minimum acceptable	p.33
Fig. 6 : Tableau de calcul des coûts pour la solution intermédiaire	p.34
Fig. 7 : Tableau de calcul des coûts pour la solution idéale avec absorbeurs d'oxygène	p.36
Fig. 8 : Tableau de calcul des coûts pour la solution idéale avec tamis moléculaires	p.37
Fig. 9 : Situation géographique de Kallnach. (Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006, p.12)	p.44
Fig. 10: Surface de fouille avec tombes et structures. (Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006, p.28)	p.44
Fig. 11: Le dépôt des métaux du service archéologique	p.45
Fig. 12 : Exemple de mode de rangement actuel	p.45
Fig. 13 : Objet atteint de corrosion active	p.46
Fig. 14 : Mode de rangement proposé (solution minimale)	p.46
Fig. 15 : Proposition d'emballage de petits objets	p.46
Fig. 16 : Les séparations RAKO®	p.47
Fig. 17 : Conditionnement sur mousse avec ajouts	p.47
Fig. 18 : Objet soudé dans une poche étanche avec tamis moléculaire	p.48
Fig. 19 : Le conditionnement proposé pour la solution idéale	p.48
Fig. 20 : Solution pour la sortie du dépôt	p.49

ANNEXE A : Figures

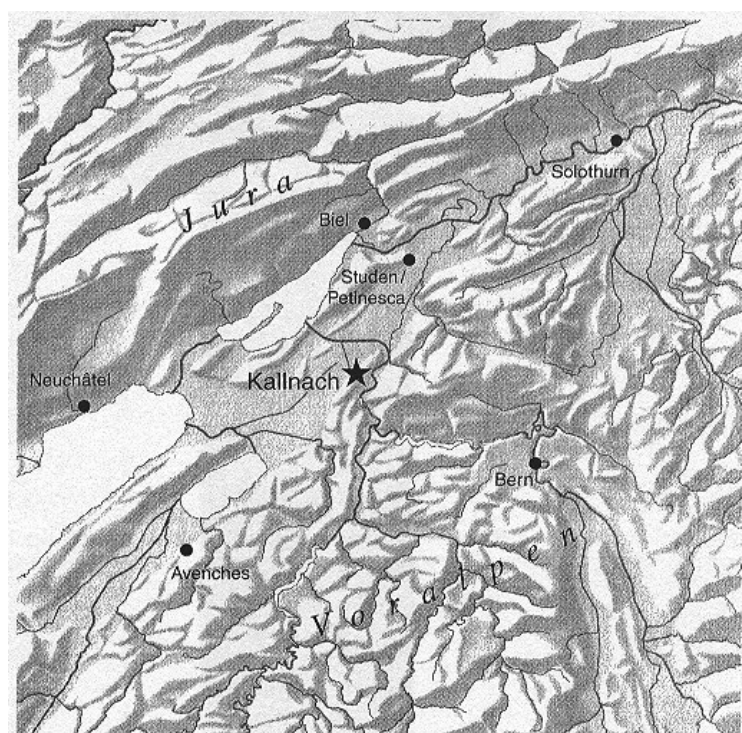


Fig. 9 : Situation géographique de Kallnach. (Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006, p.12)

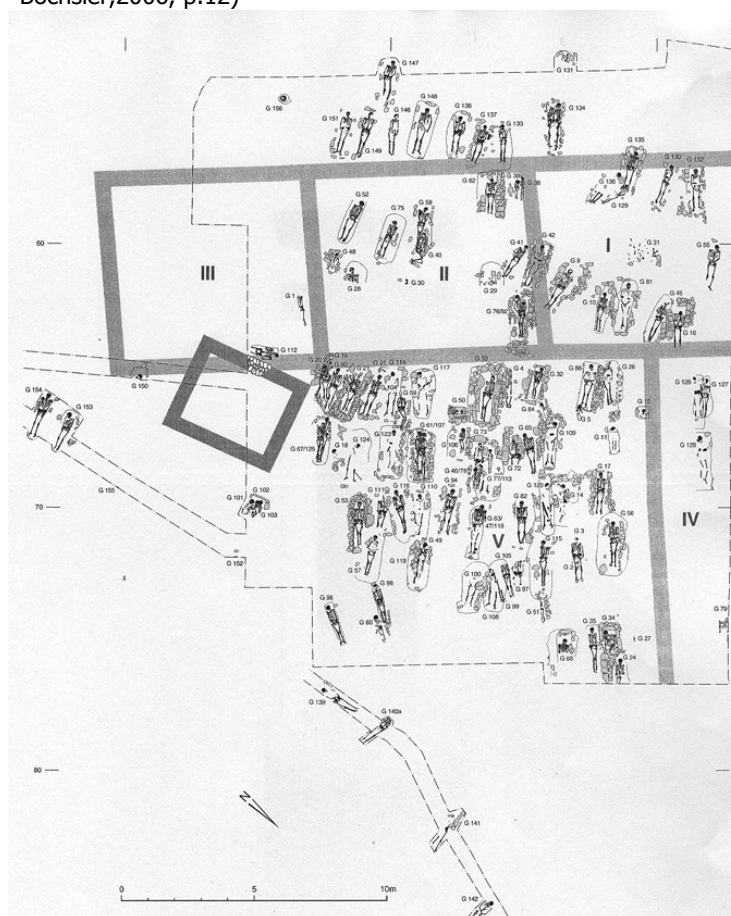


Fig. 10 : Surface de fouille avec tombes et structures. (Kissling et Ulrich-Bochsler, 2006, p.28)



Fig. 11 : Le dépôt des métaux du service archéologique



Fig. 12 : Exemple de mode de rangement actuel



Fig. 13 : Objet atteint de corrosion active

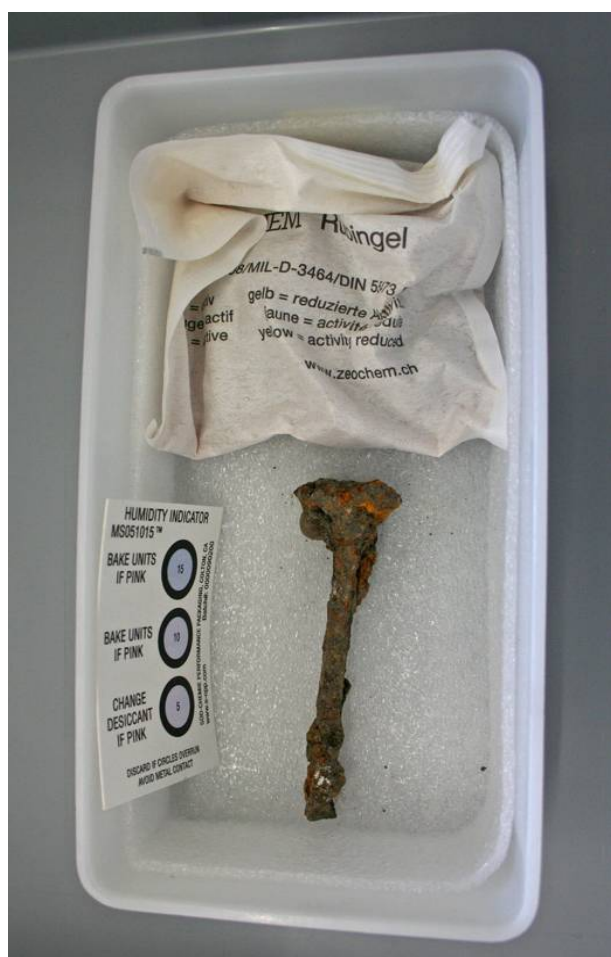


Fig. 14 : Mode de rangement proposé (solution minimale)



Fig. 15 : Proposition d'emballage de petits objets



Fig. 16 : Les séparations RAKO®



Fig. 17 : Conditionnement sur mousse avec ajouts



Fig. 18 : Objet soudé dans une poche étanche avec tamis moléculaire

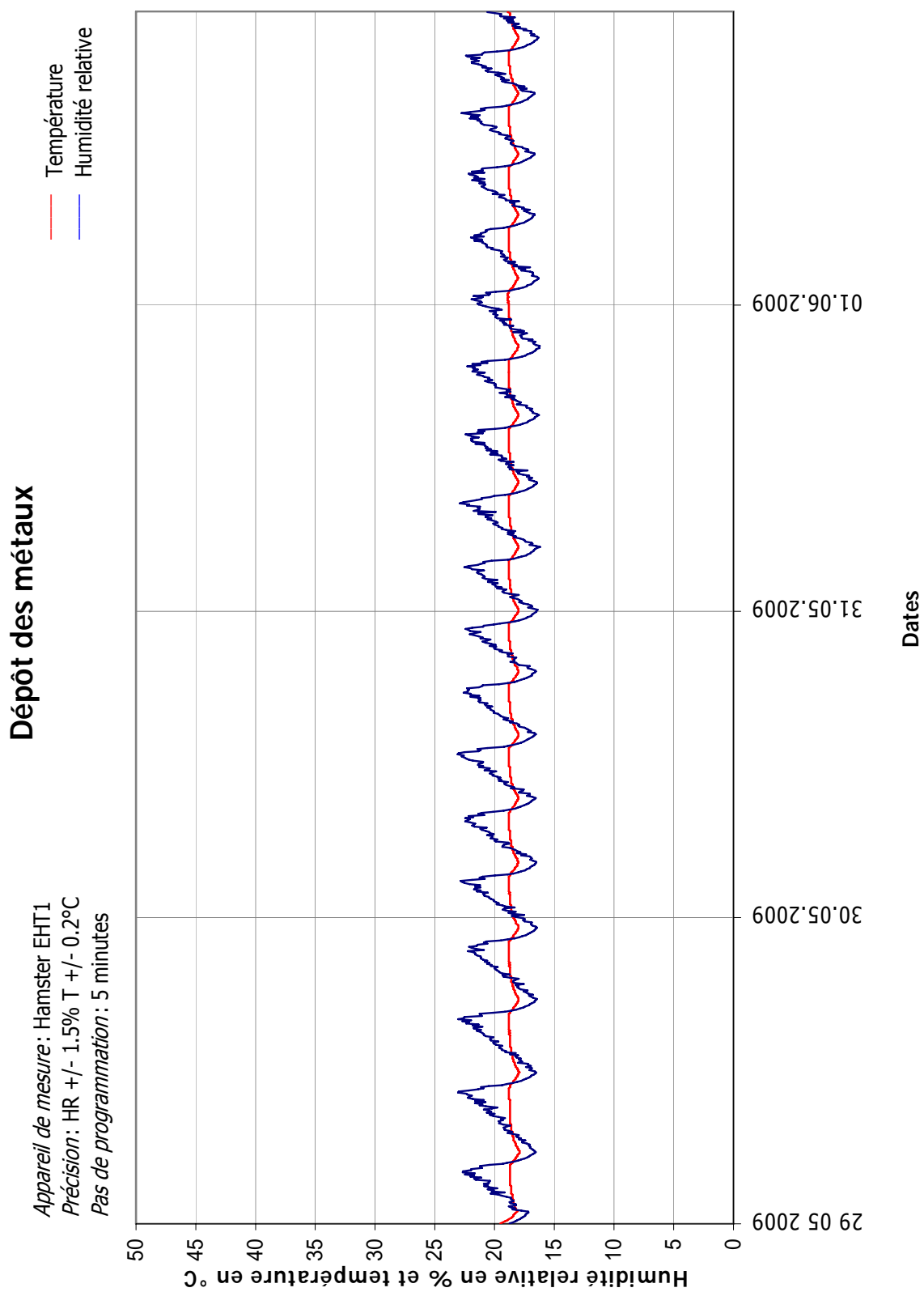


Fig. 19 : Le conditionnement proposé pour la solution idéale

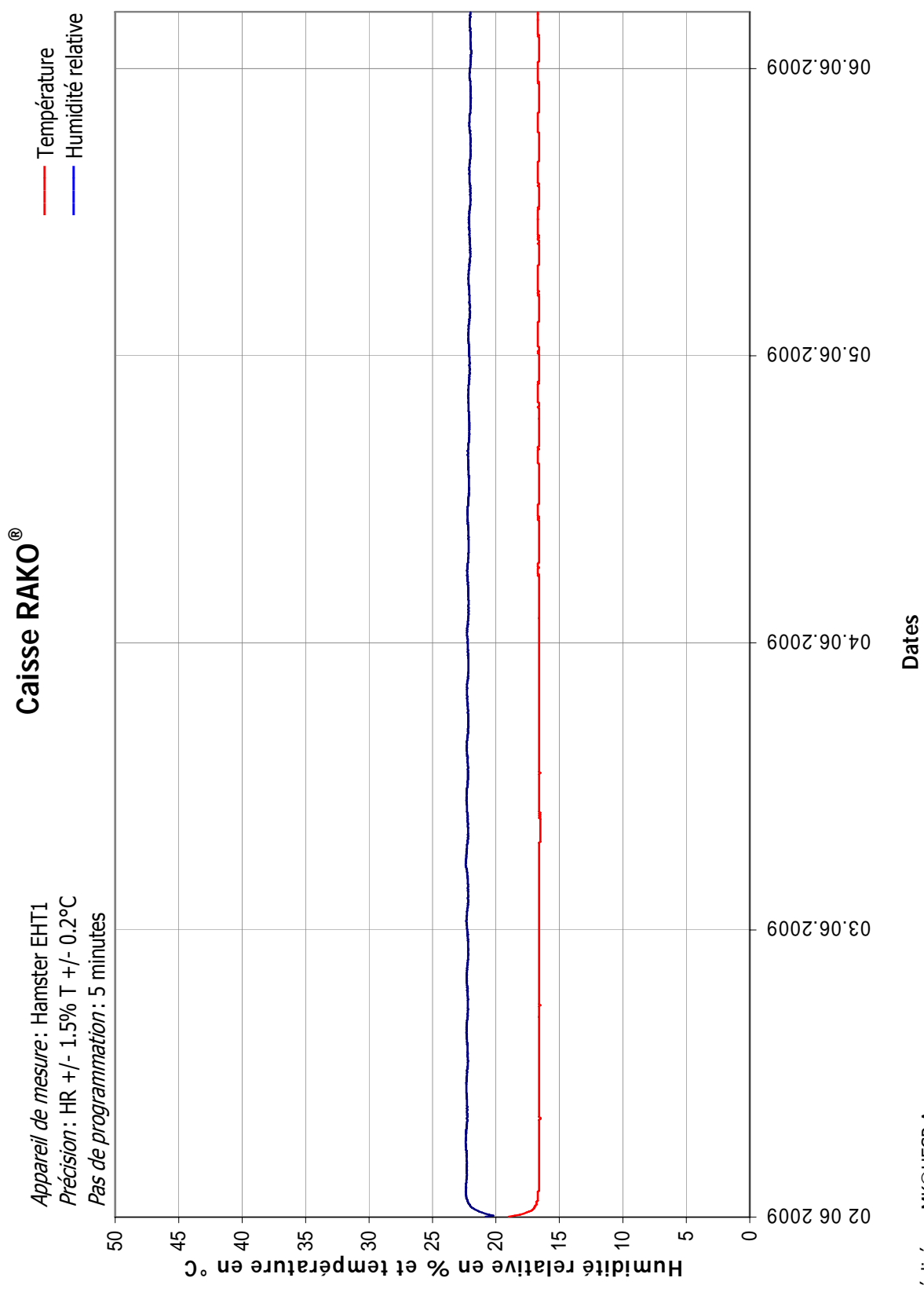


Fig. 20 : Solution pour la sortie du dépôt

ANNEXE B : Graphiques climatiques



réalisé par MK©HECR Arc



ANNEXE C : Fiche constat d'état

Numéro d'inventaire : 31933 Messerklinge

Nature de l'objet	
Matériau constitutif	Fer
Objet composite	x
Taille de l'objet	Moyenne, 133x25 mm

Traitements effectués	
Dessalé	✓ , Plasma SLM
Dégagé	✓
Protection de surface	x

Altérations	
Fragilité mécanique	✓ , éclats => corrosion active!
Corrosion active	✓

ANNEXE D : Fiche technique des matériaux

ANNEXE E : Tabelle pour la détermination de la quantité d'eau dans l'air

°C	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
+50	8.30	16.60	24.89	33.19	41.49	49.79	58.08	66.38	74.68	82.9
	+8	+19	+26	+32	+36	+40	+43	+45	+48	+50
+45	6.54	13.09	19.63	26.18	32.72	39.26	45.81	52.35	58.90	65.44
	+4	+15	+22	+27	+32	+36	+38	+41	+43	+45
+40	5.11	10.23	15.34	20.46	25.57	30.68	35.80	40.91	46.03	51.14
	+1	+11	+18	+23	+27	+30	+33	+36	+38	+40
+35	3.96	7.92	11.88	15.84	19.80	23.76	27.72	31.68	35.64	39.60
	-2	+8	+14	+18	+22	+25	+28	+31	+33	+35
+30	3.04	6.07	9.11	12.14	15.18	18.22	21.25	24.29	27.32	30.36
	-6	+3	+10	+14	+18	+21	+24	+26	+28	+30
+25	2.30	4.61	6.91	9.22	11.52	13.82	16.13	18.43	20.74	23.04
	-8	±0	+5	+10	+13	+16	+19	+21	+23	+25
+20	1.73	3.46	5.19	6.92	8.65	10.37	12.10	13.83	15.56	17.29
	-12	-4	+1	+5	+9	+12	+14	+16	+18	+20
+15	1.28	2.56	3.85	5.13	6.41	7.69	8.97	10.26	11.54	12.82
	-16	-7	-3	+1	+4	+7	+9	+11	+13	+15
+10	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.64	6.58	7.52	8.46	9.40
	-19	-11	-7	-3	±0	+1	+4	+6	+8	+10
+5	0.68	1.36	2.04	2.72	3.40	4.08	4.76	5.44	6.12	6.80
	-23	-15	-11	-7	-5	-2	±0	+2	+3	+5
±0	0.48	0.97	1.45	1.94	2.42	2.90	3.39	3.87	4.36	4.84
	-26	-19	-14	-11	-8	-6	-4	-3	-2	±0
-5	0.34	0.68	1.02	1.36	1.70	2.05	2.39	2.73	3.07	3.41
	-29	-22	-18	-15	-13	-11	-8	-7	-6	-5
-10	0.23	0.47	0.70	0.94	1.17	1.40	1.64	1.87	2.11	2.34
	-34	-26	-22	-19	-17	-15	-13	-11	-11	-10
-15	0.16	0.32	0.48	0.64	0.80	0.97	1.13	1.29	1.45	1.61
	-37	-30	-26	-23	-21	-19	-17	-16	-15	-15
-20	0.09	0.18	0.26	0.35	0.44	0.53	0.62	0.70	0.79	0.88
	-42	-35	-32	-29	-27	-25	-24	-22	-21	-20
-25	0.06	0.11	0.17	0.22	0.28	0.33	0.38	0.44	0.50	0.55
	-45	-40	-36	-34	-32	-30	-29	-27	-26	-25

©Dry & Safe

ANNEXE F : Liste des fournisseurs

Matériau	Fournisseur
Absorbeurs d'oxygène RP-1A RP-3A RP-5A	Long Life for Art Christoph Waller Hauptstrasse 47 D-79356 Eichstetten Tél. : +49 (0) 7663 608 99-0 Fax : +49 (0) 7663 608 99-20 www.cwaller.de
Boîtes hermétiques Rotho « RONDO », 0.75 l 160 x 120 x 75 mm	Rotho Kunststoff AG Industriestrasse Althau 11 CH-5303 Würenlingen Tél. : 056/297 13 13 Fax : 056/297 13 10 www.rotho.com
Boîtes PS, Diverses tailles et formes	Semadeni AG Tägetlistrasse 35-39 Postfach CH-3072 Ostermundigen 1 Tél. : 031/930 18 18 Fax : 031/930 18 28 www.semadeni.com
Cartes indicatrices d'humidité Sans cobalt, 5 – 15 %	Long Life for Art Christoph Waller Hauptstrasse 47 D-79356 Eichstetten Tél. : +49 (0) 7663 608 99-0 Fax : +49 (0) 7663 608 99-20 www.cwaller.de
Contenants pour caisses RAKO® 177 x 139 x 99 mm	Georg Utz AG Augraben 2-4 CH-5620 Bremgarten Tél. : 056/648 77 11 Fax : 056/648 79 12 www.georgutz.com
Epingles en acier inoxydable Boîtes à 500 pcs.	Atelier MB Im Halt 25 CH-5412 Gebenstorf

	<p>Tél. : 056/210 25 15 Fax : 056/223 33 72 www.ateliermb.com</p>
<p>Ethafoam®, blanc, 35 kg/m³ Plaque 2 x 1.2 m, 30 mm</p>	<p>Neupack Produkte AG Gewerbstrasse 1 CH-6038 Honau Tél. : 091/612 24 24 Fax : 091/612 24 25 www.neupack.com</p>
<p>Etiquettes d'identification en Tyvek® 75 x 50 mm</p>	<p>ATLANTIS FRANCE 35, rue du Ballon F-93160 NOISY LE GRAND Tél. : +33 (0)1 48 15 51 51 Fax : +33 (0)1 48 15 51 50 www.atlantis-france.com</p>
<p>Film aluminium laminé Rouleau 1 x 25 m</p>	<p>Long Life for Art Christoph Waller Hauptstrasse 47 D-79356 Eichstetten Tél. : +49 (0) 7663 608 99-0 Fax : +49 (0) 7663 608 99-20 www.cwaller.de</p>
<p>Film ESCAL™ Rouleau 1 x 10 m</p>	<p>Long Life for Art Christoph Waller Hauptstrasse 47 D-79356 Eichstetten Tél. : +49 (0) 7663 608 99-0 Fax : +49 (0) 7663 608 99-20 www.cwaller.de</p>
<p>Gel de silice Rubingel, 1/3 DU (10 g)</p>	<p>Zeochem AG Seestrasse 108 CH-8707 Uetikon Tél. : 044/922 93 93 Fax : 044/920 20 93 www.zeochem.ch</p>
<p>Minigrip® « Profiline » avec bandes blanches 100 x 125 mm</p>	<p>Prodinger Verpackung AG Bäumlimattstrasse 5-7 CH-4313 Möhlin</p>

	<p>Tél. : 061/335 90 00 Fax : 061/335 90 10 www.prodinger.ch</p>
<p>Mousse fine PE, blanche, 3 mm Rouleau de 175 m²</p>	<p>Prodinger Verpackung AG Bäumlimattstrasse 5-7 CH-4313 Möhlin Tél. : 061/335 90 00 Fax : 061/335 90 10 www.prodinger.ch</p>
<p>Papier de soie sans chlore, ni acides Feuilles à 0.5 x 0.76 m, 18 g/m² 1 paquet à 740 feuilles</p>	<p>Scheitlin-Papier AG Industriestrasse 20 CH-9300 Wittenbach Tél. : 071/292 30 70 Fax : 071/292 30 71 www.scheitlin-papier.ch</p>
<p>Pastilles indicatrices d'oxygène « Ageless-Eye »</p>	<p>Long Life for Art Christoph Waller Hauptstrasse 47 D-79356 Eichstetten Tél. : +49 (0) 7663 608 99-0 Fax : +49 (0) 7663 608 99-20 www.cwaller.de</p>
<p>Plaques PP cannelé 2mm Plaque 2 x 1 m</p>	<p>Amsler & Frey AG Feldstrasse 26 CH-5107 Schinznach Dorf Tél. : 056/463 60 70 Fax : 056/463 60 79 www.amsler-frey.ch</p>
<p>Plastazote® 29 kg/ m³, blanc, 10 mm ou 30 mm Plaque 2 x 1 m</p>	<p>Digipack AG Binzackerstrasse 37 Postfach 823 CH-8623 Wetzikon Tél. : 044/931 30 30 Fax : 044/931 30 40 www.digipack.ch</p>
<p>Séparations pour caisses RAKO®</p>	<p>Georg Utz AG Augraben 2-4 CH-5620 Bremgarten</p>

	<p>Tél. : 056/648 77 11 Fax : 056/648 79 12 www.georgutz.com</p>
<p>Tamis moléculaires en sachets Tyvek® Minipax 0.5 g, 4Å</p>	<p>Long Life for Art Christoph Waller Hauptstrasse 47 D-79356 Eichstetten Tél. : +49 (0) 7663 608 99-0 Fax : +49 (0) 7663 608 99-20 www.cwaller.de</p>